

Учредитель: Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Научно-технологический центр уникального приборостроения Российской академии наук

Издатель: Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Научно-технологический центр уникального приборостроения Российской академии наук

Журнал зарегистрирован 15 февраля 2000 г. Министерством Российской Федерации по делам печати, телерадиовещания и средств массовой информации

Свидетельство о регистрации ПИ № 77–1685

Физические Основы Приборостроения

2013. Том 2. №4

ISSN: 2225–4293

РЕДКОЛЛЕГИЯ

Пустовойт В.И., гл. редактор, академик РАН, д.ф.–м.н., профессор
Кравченко В.Ф., зам. гл. редактора, д.ф.–м.н., проф.
Белоцерковский О.М., академик РАН
Боголюбов А.Н., д.ф.–м.н., проф.
Боритко С.В., д.ф.–м.н., проф.
Виноградов Е.А., член-корр. РАН, д.ф.–м.н., проф.
Гуляев Ю.В., академик РАН, д.ф.–м.н., проф.
Дмитриев А.С., д.ф.–м.н., проф.
Дианов Е.М., академик РАН, д.ф.–м.н., проф.
Жижин Г.Н., д.ф.–м.н., проф.
Компанец О.Н., д.ф.–м.н., проф.
Кошкин В.И., д.ф.–м.н., проф.
Крохин О.Н., академик РАН, д.ф.–м.н., проф.
Кутуза Б.Г., д.ф.–м.н., проф.
Лукин Д.С., д.ф.–м.н., проф.
Мазур М.М., д.т.н.
Морозов А.Н., д.ф.–м.н., проф.
Отливанчик Е.А., к.ф.–м.н.
Панас А.И., д.ф.–м.н., проф.
Пожар В.Э., д.ф.–м.н.
Садовничий В.А., академик РАН
Самохин А.Б., д.ф.–м.н., проф.
Сидняев Н.И., д.т.н., проф.
Синявский Г.П., д.ф.–м.н., проф.
Федоров И.Б., академик РАН, д.т.н., проф.
Филачев А.М., член-корр. РАН, д.т.н., проф.
Шатров А.Д., д.ф.–м.н., проф.
Холодов А.С., член корр. РАН, д.ф.–м.н., проф.
ЗАРУБЕЖНЫЕ ЧЛЕНЫ РЕДКОЛЛЕГИИ
Буц В.А., д.ф.–м.н., проф. (Украина)
Волосюк В.К., д.т.н., проф. (Украина)
Загородний А.Г., академик НАН Украины
Клемм Р., проф. (Германия)
Кобаяши К., проф. (Япония)
Кураев А.А., д.ф.–м.н., проф. (Беларусь)
Миттра Р., проф. (США)
Перес-Меана Э., проф. (Мексика)
Пономарев В.И., д.т.н., проф. (Мексика)
Ра Д., проф. (Корея)
Сихвола А., (Финляндия)
Фисун А.И., д.ф.–м.н., проф. (Украина)
Хашимото М., проф. (Япония)
Шифрин Я.С., д.т.н., проф. (Украина)
Яковенко В.М., академик НАН Украины (Украина)

EDITORIAL BOARD

Pustovoit, V. I., Editor-in-Chief, Academician RAS, Dr. Sci. (Phys.–Math.), Prof.
Kravchenko, V. F., Deputy Editor-in-Chief, Dr. Sci. (Phys.–Math.), Prof.
Belotserkovskii, O. M., Academician RAS
Bogolyubov, A. N., Dr. Sci. (Phys.–Math.), Prof.
Boritko, S. V., Dr. Sci. (Phys.–Math.), Prof.
Vinogradov, E. A., Corresponding Member of the RAS, Dr. Sci. (Phys.–Math.), Prof.
Gulyaev, Yu. V., Academician RAS, Dr. Sci. (Phys.–Math.), Prof.
Dmitriev, A. S., Dr. Sci. (Phys.–Math.), Prof.
Dianov, E. M., Academician RAS, Dr. Sci. (Phys.–Math.), Prof.
Zhizhin, G. N., Dr. Sci. (Phys.–Math.), Prof.
Kompanets, O. N., Dr. Sci. (Phys.–Math.), Prof.
Koshkin, V. I., Dr. Sci. (Phys.–Math.), Prof.
Krohin, O. N., Academician RAS, Dr. Sci. (Phys.–Math.), Prof.
Kutuza, B. U., Dr. Sci. (Phys.–Math.), Prof.
Lukin, D. S., Dr. Sci. (Phys.–Math.), Prof.
Mazur, M. M., Dr. Sci. (Techn.)
Morozov, A. N., Dr. Sci. (Phys.–Math.), Prof.
Otlivanchik, E. A., Cd. Sci. (Phys.–Math.)
Panas, A. I., Dr. Sci. (Phys.–Math.), Prof.
Pozhar, V. E., Dr. Sci. (Phys.–Math.)
Sadovnichiy, V. A., Academician RAS
Samokhin, A. B., Dr. Sci. (Phys.–Math.), Prof.
Sidnyayev, N. I., Dr. Sci. (Techn.), Prof.
Synyavskiy, G. P., Dr. Sci. (Phys.–Math.), Prof.
Fedorov, I. B., Academician RAS, Dr. Sci. (Techn.), Prof.
Filachev, A. M., Corresponding Member of the RAS, Dr. Sci. (Techn.), Prof.
Shatrov, A. D., Dr. Sci. (Phys.–Math.), Prof.
Holodov, A. S., Corresponding Member of the RAS, Dr. Sci. (Phys.–Math.), Prof.
FOREIGN EDITORIAL BOARD MEMBERS
Buts, V. A., Dr. Sci. (Phys.–Math.), Prof. (Ukraine)
Volosyuk, V. K., Dr. Sci. (Techn.), Prof. (Ukraine)
Zagorodny, A. G., Academician NAN Ukraine
Klemm, R., Prof. (Germany)
Kobayashi, K., Prof. (Japan)
Kuraev, A. A., Dr. Sci. (Phys.–Math.), Prof. (Belarus)
Mittra, R., Prof. (USA)
Perez-Meana, H., Prof. (Mexico)
Ponomarev, V. I., Dr. Sci. (Techn.), Prof. (Mexico)
Ra, J-W., Prof. (Korea)
Sihvola, A. H., Prof. (Finland)
Fisun, A. I., Dr. Sci. (Phys.–Math.), Prof. (Ukraine)
Hashimoto, M., Prof. (Japan)
Shifrin, Ya. S., Dr. Sci. (Techn.), Prof. (Ukraine)
Yakovenko, V. M., Academician NAN Ukraine

© НТЦ УП РАН, 2013

Адрес редакции: 117342, Москва,
ул. Бултерова, д. 15, комн. 232.
www.physbi.ru
www.jfop.ru

Зав. редакцией: **Чуриков Д. В.**
Телефон редакции: **8 (495) 334–83–50**
E-mail: red-fop@mail.ru
Skype: **physbi**

СОДЕРЖАНИЕ

CONTENTS

ОБЗОРЫ

REVIEWS

Г. П. Синявский, Л. В. Черкесова, Г. Н. Шаламов
Синергетический подход к исследованию нелинейных параметрических зонных систем, работающих в высших зонах неустойчивости колебаний. Часть II

4

G. P. Sinyavsky, L. V. Cherckesova, and G. N. Shalamov
Synergetic Approach to Research of Nonlinear Parametrical Zones Systems, Working in the Higher Zones of Oscillation Instability. Part II

НОВЫЕ МАТЕМАТИЧЕСКИЕ И ФИЗИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ

NEW MATHEMATICAL AND PHYSICAL METHODS

А.А. Вертий, С.С. Саутбеков, Ю.К. Сиренко, Н.П. Яшина
Эффекты дифракционного излучения в конечных плоских и аксиально-симметричных периодических структурах

36

A. A. Vertiy, S. S. Sautbekov, Yu. K. Sirenko, and N. P. Yashina
the Effects of Diffraction Radiation in Plane Finite and Axially Symmetric Periodic Structures

В.Т. Ерофеенко, В.Ф. Кравченко
Исследование поведения импульса поля электрического диполя атомарными функциями

53

V. T. Erofeenko, V. F. Kravchenko
Study of the of the Electric Dipole Field Pulse Behavior on Basis of Atomic Functions

В.А. Буц, В.Ф. Клепиков, В.В. Литвиненко
Механизм получения интенсивного когерентного излучения для радиационных методов диагностики

57

V. A. Buts, V. F. Klepikov, and V. V. Litvinenko
Mechanism Producing of Intense Coherent Radiation for Radiation Methods of Diagnosis

И.С. Голяк, А.Н. Морозов
Методы оптимизации алгоритма обработки двумерных интерферограмм получаемых статическим Фурье-спектрометром

70

I. S. Golyak, A. N. Morozov
Optimization Methods of Algorithm for Processing Two-Dimensional Interferograms Obtained by Static Fourier-Spectrometer

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ФИЗИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ

MATHEMATICAL MODELING OF PHYSICAL PROCESSES

В.В. Щербак
Широкополосный поглотитель с непрецизионной решеткой

78

V. V. Shcherbak
Broadband Absorber with a Unprecise Grating

И.Б. Кутуза, В.Э. Пожар
Алгоритм измерения гладких спектров с помощью акустооптических спектрометров

83

I. B. Kutuza, V. E. Pozhar
Measurement Algorithm of Smooth Spectral Curves by Using Acousto-Optical Spectrometers

Е.С. Саркисян
К измерению среднего квадрата интенсивности слабого света

89

E. S. Sarkisyan
on Measurements of the Mean Square Intensity of Weak Light

МЕТОДЫ ВЫСОКОТОЧНЫХ ИЗМЕРЕНИЙ И ВОСПРОИЗВЕДЕНИЯ ФИЗИЧЕСКИХ ВЕЛИЧИН		METHODS OF HIGH-PRECISION MEASUREMENTS AND REPRODUCTION OF PHYSICAL VALUES
М. Али, А. П. Кирьянов, В. И. Ковалёв, В. И. Пустовойт Спектроголоэллипсометр рассеяния и отражения света оптически одноосным двумерным кристаллом	95	M. Ali, A. P. Kiryanov, V. I. Kovalev, and V. I. Pustovoi Spectroheloellipsometer with Light Scattering and Reflecting From the Optically Uniaxial Two-Dimension Crystal
ПРИБОРЫ И МЕТОДЫ ИЗМЕРЕНИЯ В МИЛЛИМЕТРОВОМ И СУБМИЛЛИМЕТРОВОМ ДИАПАЗОНАХ		DEVICES AND METHODS OF MEASUREMENTS IN MILLIMETER AND SUBMILLIMETER RANGES
И.К. Кузьмичев, А. Ю. Попков Открытый резонатор для измерения электрофизических параметров веществ. Часть II. Эксперимент	108	I.K. Kuzmichev, A. Yu. Popkov An Open Resonator for Measuring Electrical Physical Parameters of Substances Part II. Experiment
ОСНОВЫ ПРИБОРОВ И УСТРОЙСТВ		BASES OF INSTRUMENTS AND DEVICES
В.М. Епихин, Ю. Ф. Кияченко, М. М. Мазур, Л. И. Мазур, Л. Л. Пальцев, Ю. А. Судденок, В. Н. Шорин Акустооптические спектрометры изображения видимого и ближнего ИК диапазонов	116	V. M. Epikhin, Yu.F. Kiyachenko, M.M. Mazur, L. I. Mazur, L. L. Paltsev, Yu.A. Suddenok, and V.N. Shorin Acousto-Optical Imaging Spectrometers for Visible and Near Infra-Red Ranges
НЕКРОЛОГИ		OBITUARIES
Памяти Вячеслава Вячеславовича Мериакри	126	Memories of the Vyacheslav Vyacheslavovich Meriakri
Содержание тома 2	128	Contence of the Volume 2

Уважаемые читатели!

Подписка на журнал оформляется через подписное агентство «Книга-Сервис» и объединенный каталог «Пресса России» (подписной индекс **29196**)

ОСНОВЫ ПРИБОРОВ И УСТРОЙСТВ

УДК 533.9; 53.043

АКУСТООПТИЧЕСКИЕ СПЕКТРОМЕТРЫ ИЗОБРАЖЕНИЯ ВИДИМОГО И БЛИЖНЕГО ИК ДИАПАЗОНОВ

© Авторы, 2013

В. М. Епихин — к.ф.-м.н., с.н.с., ЗАО «Сигма-Оптик ЛТД». E-mail: epikvm@mail.ru

Ю. Ф. Кияченко — к.ф.-м.н., в.н.с., ЗАО «Сигма-Оптик ЛТД». E-mail: kiyatchenko@mail.ru

М. М. Мазур — д.т.н., начальник лаборатории, ФГУП «Всероссийский научно-исследовательский институт физико-технических и радиотехнических измерений». E-mail: s-mmazur@mail.ru

Л. И. Мазур — н.с., ФГУП «Всероссийский научно-исследовательский институт физико-технических и радиотехнических измерений»

Л. Л. Пальцев — с.н.с., ЗАО «Сигма-Оптик ЛТД»

Ю. А. Судденко — инженер-электронщик, ФГУП «Всероссийский научно-исследовательский институт физико-технических и радиотехнических измерений»

В. Н. Шорин — с.н.с., ЗАО «Сигма-Оптик ЛТД». E-mail: chorin@vniiftri.ru

Аннотация

Созданы и исследованы спектрометры изображения с одиночным (однокристалльным) и двойным (двухкристалльным) акустооптическими монохроматорами. Измерены их основные характеристики: спектральный диапазон, спектральное разрешение, качество получаемых изображений — количество пространственно разрешенных пар линий в изображении, aberrации изображения и однородность коэффициента передачи сигнала в поле изображения. Проведено сравнение характеристик спектрометров изображения с одиночным и двойным монохроматорами.

Ключевые слова: спектрометр изображений, спектральная фильтрация изображений, акустооптический фильтр, акустооптическая ячейка

Abstract

Imaging spectrometers with single-crystal and double-crystal monochromators are created and investigated the basic characteristics of these imaging spectrometers: spectral range, spectral resolution, the quality of obtained images, including the number of space resolved line pairs in the image, image aberrations and the uniformity of the signal transfer parameter in the image field. The characteristics of single-crystal and double-crystal monochromator imagers are compared.

Key words: imaging spectrometer, spectral filtering of images, acousto-optic monochromator, acousto-optic tunable filter, acousto-optic cell, spectral resolution, spatial resolution

1. Введение

Спектральная фильтрация изображений в последнее время активно используется для обнаружения и идентификации объектов, для визуализации и анализа их структуры [1].

Практическая значимость получения спектральных изображений состоит в том, что структурные особенности наблюдаемого объекта могут проявляться путем изменения контраста компонентов его изображения, полученного в определенных спектральных интервалах, в то время как в других спектральных интервалах, равно как и для неселектированного (белого) излучения, эти особенности проявляются слабо или не проявляются вовсе [2, 3]. Для решения задач, в которых полоса пропускания должна иметь возможность перемещения по спектральному диапазону, в качестве селективирующего элемента монохроматора используют перестраиваемые фильтры: акустооптические, Фабри-Перо, Ли и Солса, электрооптические, жидкокристаллические [4, 5].

Акустооптические фильтры имеют электронное управление, отличаются высоким быстродействием, пропусканием, спектральным разрешением и светосилой, а также обеспечивают наиболее широкий спектральный диапазон. Цель данной работы — создание акустооптического спектрометра изображений (видеоспектрометра), а также исследование его свойств и потенциальных возможностей.

2. Требования к конструкции спектрометра и его составных частей

Одним из наиболее информативных спектральных диапазонов, в частности для решения экологических задач при дистанционном зондировании, являются видимый и ближний ИК диапазоны. Благоприятным обстоятельством является то, что для этого диапазона разработаны и выпускаются относительно недорогие матричные фотоприемники, обладающие качественными характеристиками (достаточное количество элементов изображения, чувствительность, спектральный диапазон).

При работе акустооптического фильтра (АОФ) в составе видеомонохроматора требуется, чтобы в рабочем угловом поле фильтр имел малые величины оптических аберраций и хроматического смещения изображения. В традиционных конструкциях АО фильтров эти параметры не являются существенными. Предлагались два пути решения этой проблемы: создание симметричной конструкции двойного монохроматора, включающей две акустооптических ячейки, в котором искажения компенсируются [6, 7]; разработка специальной геометрии ячейки, где эти эффекты были бы уменьшены до необходимого уровня, при этом монохроматор остается одиночным [8]. Нами были использованы оба варианта. Из практических соображений варианты монохроматоров были сделаны на разные, но перекрывающиеся диапазоны: двойной монохроматор на диапазон (440–760) нм и одиночный монохроматор, на диапазон (632–1160) нм.

Оптимальная работа АО фильтров для передачи изображения требует параллельного хода лучей в ячейках, следовательно, оптическая система прибора должна обеспечить такой участок для размещения АО фильтра. Это определило конструкцию оптической системы.

Размерность фотоприемной матрицы должна быть согласована с параметрами монохроматора. Количество элементов (пикселей) матрицы вдоль любого направления изображения должно быть не менее отношения предельного полевого угла монохроматора к угловому разрешению монохроматора по этому направлению.

3. Устройство спектрометров

На рис. 1 приведена блок-схема акустооптических спектрометров изображения видимого (ВИ) и инфракрасного (ИК) диапазонов. Основными узлами спектрометров являются следующие: входной объектив, определяющий поле зрения видеоспектрометра и формирующий необходимые параметры светового пучка в монохроматоре; акустооптический монохроматор изображений, производящий спектральную селекцию излучения; выходной объектив, создающий изображение анализируемого объекта на фотоприемной матрице; чувствительная монохромная видеокамера; ВЧ-драйвер, формирующий ВЧ сигнал и усиливающий его по мощности до уровня, необходимого для обеспечения высокого коэффициента передачи монохроматора. ВЧ драйвер монохроматора состоит из синтезатора частоты и усилителя мощности. С целью унификации приборов в обоих спектрометрах используются почти одинаковые входные и выходные объективы. Их отличие заключается в размере промежуточной диафрагмы задающей угловое поле световых пучков в монохроматоре. ВЧ драйверы спектрометров также частично унифицированы, у них одинаковые синтезаторы частоты. Основное отличие спектрометров заключается в конструкции акустооптических монохроматоров. В АО спектрометре видимого диапазона применен двойной АО монохроматор, в АО спектрометре ИК диапазона применен одинарный АО монохроматор. В качестве приемника изображения спектрометров использовалась камера Prosilica GX2750 Allied Vision Technologies с количеством пикселей (2750×2200) и размером фотоприемной площадки (12.5×10.0) мм. Таким образом, для ВИ монохроматора изображение размером (10×10) мм полностью размещается на фотоматрице. Для ИК монохроматора ситуация другая — фотоприемная площадка не покрывает всего размера изображения (круг диаметром 12.6 мм).

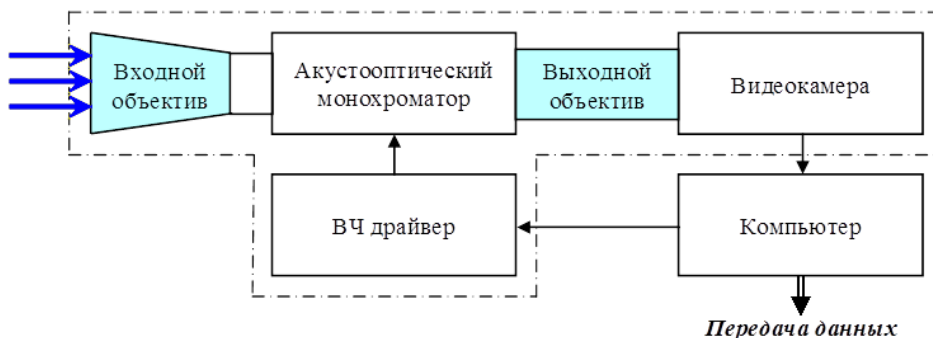


Рис. 1. Блок-схема акустооптических спектрометров изображения.

3.1. Устройство монохроматоров

На рис. 2 показаны оптические схемы монохроматоров видимого (а) и ИК диапазонов (б). Для упрощения широкополосного согласования ультразвукового преобразователя с ВЧ трактом в применяемых АО ячейках генерируется продольная звуковая волна, которая затем конвертируется в сдвиговую на скошенной надлежащим образом грани АОЯ [10].

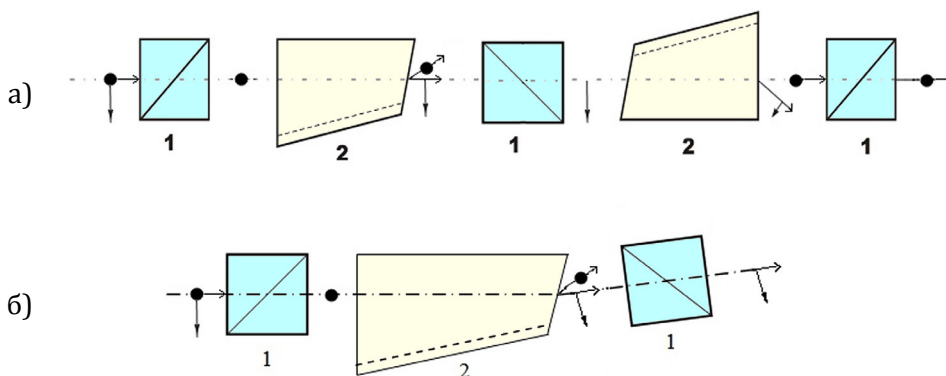


Рис. 2. (а) — схема двухкристального монохроматора видимого диапазона, (б) — схема однокристального монохроматора ИК диапазона. 1 — поляризаторы; 2 — АО ячейки из парателлурита (TeO_2); стрелками обозначены направления поляризации света и распространения световых пучков.

В фильтре симметричной конструкции (рис. 2, а) использовались неколлинеарные акустооптические ячейки, в которых световой пучок с обыкновенной поляризацией распространяется под углом 14.4° оси Z кристалла и дифрагирует на сдвиговой звуковой волне с волновым вектором, направленным под углом 7.1° к оси $[110]$ кристалла. Как показано в [9], симметричная конструкция при работе в параллельных пучках обеспечивает отсутствие искажений передаваемого через двойной монохроматор изображения. Это очень важное достоинство двойного монохроматора, так как получаемое изображение не требует дополнительной обработки для устранения как хроматических, так и геометрических aberrаций. При управлении от единого синтезатора частоты для точного совпадения центров аппаратных функций АОЯ на спектральной шкале ячейки двойного монохроматора должны быть с высокой степенью идентичными, что возможно при применении специальной технологии обработки кристалла [11]. Другой способ совмещения аппаратных функций в двойном монохроматоре описан в [12], возможность его использования в видеомонохроматоре требует дополнительного изучения.

Акустооптический монохроматор ИК диапазона построен по традиционной однокристалльной схеме, рис. 2, б. Направления распространения ультразвукового и «обыкновенного» светового пучков в кристалле TeO_2 составляли: 12.3° к оси $[110]$ и 26.3° к оси $[001]$, соответственно. Оптическая апертура ячейки составляла (12×12) мм. Длина пьезопреобразователя ультразвуково-

вых волн составляла 26 мм. Максимальная угловая апертура АО фильтра ограничивалась на уровне 5.2° с помощью полевой диафрагмы.

Особенностью использованной АОЯ являлась эффективная компенсация углового дрейфа продифрагированного светового пучка в рабочем диапазоне (632–1160) нм. Причиной дрейфа является дисперсия кристалла TeO_2 [12]. Как показали исследования [8], углом наклона между входной и выходной гранями АОЯ можно минимизировать спектральный угловой дрейф выходного пучка. При этом спектральный дрейф угла дифракции в АО ячейке максимально компенсируется дрейфом угла преломления продифрагированного пучка на наклонной выходной грани. Результаты расчета показывают, что в этом случае величина остаточного спектрального углового дрейфа светового пучка $\Delta\theta_{\text{др}} \approx 1.9 \times 10^{-3}$ град. не превышает его дифракционной расходимости $\Delta\theta_{\text{дф}} \approx 3.7 \times 10^{-3}$ град. Таким образом, компенсация является эффективной.

3.2. Фокусирующая оптика спектрометров

Фокусирующая оптика спектрометров состоит из двух независимых частей: входного объектива, создающего промежуточное изображение предмета на полевой диафрагме и системы, передающей это изображение на поверхность фотоприемника (видеокамеры). Вторая часть состоит из двух компонентов: коллиматора и фокусирующего объектива с параллельным ходом лучей между ними. Из конструктивных соображений система коллиматор — фокусирующий объектив выбрана симметричной, так что она обладает единичным (по модулю) увеличением. Компоненты представляют собой одинаковые ахроматические дублеты. Фокусное расстояние компонентов 140 мм определяется предельной угловой апертурой акустооптического фильтра и предполагаемым размером фотоматрицы. Роль апертурной диафрагмы всего устройства, определяющей светосилу спектрометров, выполняют оправа акустооптического фильтра (10x10) мм в ВИ-монохроматоре и оправа поляризатора $\varnothing 12$ мм в ИК-монохроматоре. Входной объектив представлял собой триплет с фокусным расстоянием 63 мм и обеспечивал для предмета, удаленного на бесконечность, угловое поле зрения $\pm 4.5^\circ$ и $\pm 5.7^\circ$ для монохроматоров ВИ- и ИК- диапазонов, соответственно. Для других условий работы, (другие поля зрения, работа с предметом на малом конечном расстоянии и т.п.) объектив может быть заменен на другой с соответствующими характеристиками. Как показали расчеты, оптическая система в целом имеет разрешение, близкое к дифракционному. Малый хроматизм фокусирующей системы во всем диапазоне (0.44–1.16) мкм позволил использовать ее для обоих спектрометров, применив соответствующее широкополосное просветление. Расчетная бочкообразная дисторсия составляла $\approx 1\%$. Перефокусировкой входного объектива можно было настроиться на предмет, находящийся на конечном расстоянии, в пределах (2– ∞) м без потери качества.

3.3. Блок электроники спектрометров

Блок электроники спектрометров включал в себя высокочастотный драйвер акустооптических ячеек и контроллер на базе микропроцессора AT91SAM7, управляющий спектрометром. Драйвер представлял собой синтезатор частоты, выполненный по схеме прямого синтеза на микросхеме AD9954, и двухканальный ВЧ усилитель мощности. Усилитель обеспечивал эффективность АОФ не менее 70% во всем спектральном диапазоне. Регулировка уровня ВЧ мощности осуществлялась как встроенным в синтезатор ЦАП, так и дополнительным 14 разрядным ЦАП, управляемым микропроцессором. Выходные фильтры на выходе синтезатора и усилителя — фильтры верхних частот шестого порядка. Управление ВЧ драйвером, т.е. задание частоты или длины волны, а также необходимого уровня выходной мощности производится от внешнего управляющего компьютера через USB вход микропроцессора. Дополнительный 14 разрядный ЦАП позволяет плавно изменять смещение выходного каскада усилителя мощности для корректировки в небольших пределах выходной мощности, что дает возможность задать необходимый профиль изменения смещения выходного каскада усилителя при перестройке драйвера по диапазону частот. Это позволяет для каждой селектируемой длины волны света корректировать амплитуду аппаратной функции. Профиль коррекции записывается вместе с таблицей зависимости длины волны света от частота ультразвука в файл параметров каждого спектрометра.

4. Результаты и их обсуждение

Основные параметры акустооптических видеоспектрометров, полученные экспериментально, сведены в таблицу 1.

Таблица 1. Основные экспериментальные параметры акустооптических видеоспектрометров ВИ- и ИК- диапазонов

Тип прибора	Спектральный диапазон, нм	Частотный диапазон, МГц	Реперные точки, МГц@нм	$\Delta f_{0,5}$, КГц	$\Delta \lambda_{0,5}$, нм	$N_x \times N_y$, отн. ед.	Δx , шт.	Δy , шт.	Дисторсия, %	I_{\min}/I_{\max} , отн. ед.
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
ВИ	440–760	132.3–64.7	80.3@632.8	330	2.6	900×900	2	1	0.5	0.4
ИК	632–1160	152.8–77.1	152.6@632.8	145	0.5	410×465 (590)	5	1	0.5	0.5
			84.6@1064	—	—					
			77.7@1152	145	2.1					

4.1. Спектральные параметры

Во втором столбце приведены границы спектрального рабочего диапазона.

В третьем столбце даны значения частотного рабочего диапазона, определяемого полосой согласования ультразвуковых преобразователей АО- ячеек по уровню КСВН < 2.0 и определяющего границы спектрального диапазона.

В четвертом столбце указаны значения частоты управляющего сигнала для реперных лазерных длин волн. Эти значения использовались для вычисления коэффициентов $k_{1,2}$ в приближенной калибровочной формуле зависимости частоты управляющего сигнала f от длины волны фильтруемого излучения λ , для спектрометра ИК диапазона

$$f = \lambda^{-1} \times [k_1 \times \Delta n(\lambda) + k_2 \times \lambda^{-1}], \quad (1)$$

где Δn — разность коэффициентов преломления необыкновенного и обыкновенного лучей. Интерполяционная зависимость между управляющей частотой и длиной волны света для спектрометра видимого диапазона строилась по 12 реперным точкам, измеренным на дифракционном спектрофотометре.

В пятом столбце помещены значения ширины обращенной аппаратной функции $\Delta f_{0,5}$ по уровню 0.5 для коллимированного светового пучка, измеренные на соответствующих лазерных длинах волн. Эти значения постоянны во всем рабочем диапазоне каждого из спектрометров.

В шестом столбце содержатся значения ширины спектральной аппаратной функции $\Delta \lambda_{0,5}$ по уровню 0.5, рассчитанные с использованием значений $\Delta f_{0,5}$ и данных по дисперсии TeO_2 [13] по формуле [14]

$$\Delta \lambda_{0,5} = -\Delta f_{0,5} \times \lambda / (b \times f), \text{ где } b = 1 - [d(\Delta n) / d\lambda] \times \lambda / \Delta n.$$

4.2. Пространственное разрешение

Вначале проводились исследования формирующей оптики. С этой целью акустооптический монохроматор удалялся, а входной телескоп напрямую соосно соединялся с выходным объективом посредством переходника. Измерения пространственного разрешения проводились на стандартном оборудовании из набора оптической скамьи ОСК-2 по стандартной методике визуального наблюдения изображения набора мирр через оптический микроскоп. Результаты показали, что пространственное разрешение формирующей оптики спектрометров близко к дифракционному.

Для исследования пространственного разрешения видеоспектрометров с помощью лазерного принтера был изготовлен плакат с изображением набора мирр в декартовой системе координат. Размеры мирр составляли геометрическую прогрессию со знаменателем $q = 0.89$. Плакат устанавливался на расстоянии 4 метров от приборов и освещался с фронтальной стороны тремя лампами накаливания мощностью по 100 Вт. Таким образом, изображение плаката наблюдалось в отраженном свете. Для получения максимально резкого изображения выходной объектив имел возможность подстройки.

В качестве меры пространственного разрешения использовалось число одновременно наблюдаемых в поле изображения разрешенных по критерию Рэля пар линий ($N_x \times N_y$), N_x — по горизонтали (в плоскости акустооптического взаимодействия), N_y — по вертикали (в плоскости, перпендикулярной плоскости акустооптического взаимодействия). Значения N_x и N_y приведены в седьмом столбце.

Для спектрометра видимого диапазона измерения проводились на длине волны 630 нм. Использовалась квадратная полевая диафрагма (10x10) мм, что обеспечивало угол зрения АОФ $\pm 2.0^\circ$ по вертикали и горизонтали. Пространственное разрешение в центре кадра составляло (900x900) пар линий в пересчете на весь кадр. Следует отметить, что по краям кадра пространственное разрешение примерно в 1.5 раза ниже, чем в центре. Центральное пространственное разрешение приблизительно в 1.3 раза ниже дифракционного, которое оценивалось по формуле: $N^d \approx 1 \times A / (F \times \lambda)$, где $l = 10$ мм — размер поля изображения, равный размеру полевой диафрагмы; $A = 10$ мм — апертура АОЯ; $F = 140$ мм — фокусное расстояние фокусирующего объектива; $\lambda = 0.63$ мкм — длина волны фильтруемого излучения. Важным результатом является изотропия пространственного разрешения в кадре.

Спектрометр ИК-диапазона исследовался на длине волны 980 нм. Использовалась полевая диафрагма с круглым отверстием $\varnothing 12.6$ мм, что давало угол зрения АОФ $\pm 2.6^\circ$. Для центральной области кадра было получено $N_x = 410$, $N_y = 465$ в пересчете на весь кадр. И в данном случае на периферийных участках кадра разрешение было ниже центрального приблизительно в 1.5 раза. Следует отметить, что размер светочувствительной площадки использованной фотоматрицы в вертикальном направлении занимает только 0.8 размера поля изображения, поэтому, в случае заполнения пикселями всего поля изображения, величина N_y может быть увеличена до максимально возможного значения $465/0.8 = 580$. Таким образом, пространственное разрешение в центре кадра в горизонтальном направлении в 2.2 раза, а в вертикальном направлении в 1.6 раза ниже дифракционного, рассчитанного по формуле $N^d \approx 1 \times A / (F \times \lambda \times 1.22)$, где обозначения прежние, $l = 12.6$ мм, $A = 12$ мм, $f = 140$ мм, $\lambda = 980$ нм. Следовательно, пространственное разрешение в поле изображения анизотропно с коэффициентом ≈ 1.4 .

Из сравнения результатов измерения пространственного разрешения следует, что в двойном монохроматоре действительно происходит компенсация оптических искажений, возникающих в процессе акустооптической дифракции в одиночном АОФ, причем она наиболее значима в плоскости акустооптического взаимодействия.

4.3. Оптические искажения при передаче изображения

Искажения и хроматический сдвиг изображения исследовались с помощью изготовленного транспаранта, который представлял собой квадратную решетку отверстий диаметром 2 мм и шагом 60 мм в металлическом листе толщиной 1.6 мм. Точность позиционирования отверстий была не хуже ± 0.05 мм. Транспарант располагался на расстоянии 4 м от прибора. Источником света служил дневной рассеянный солнечный свет, который освещал решетку сзади.

Хроматический сдвиг (ХС) — это величина смещения координат центров отверстий на изображении транспаранта для крайних точек спектрального диапазона спектрометра (Δx , Δy), измеренная в направлении координатных осей x и y (столбцы 8 и 9 таблицы, соответственно). Из-за наперед известной круглой формы отверстий транспаранта координаты их центров определяются с высокой точностью (± 1 пиксель). Причиной ХС является спектральный угловой дрейф продифрагировавшего светового пучка в воздухе после выхода из АОЯ (см. п. 3.1.).

Для ВИ спектрометра ХС для любой области кадра в направлении абсцисс не фиксировался (менее одного пикселя), а в направлении ординат не превышал 2 пикселей. Таким образом, экспериментально показано, что в двойном монохроматоре происходит компенсация хроматического сдвига.

Для ИК спектрометра ХС для любой области кадра в направлении x не более одного пикселя, а в направлении y приблизительно 5 пикселей. Хотя эта величина и не превышает интервала, соответствующего измеренному пространственному разрешению в плоскости акустооптического взаимодействия (≈ 7 пикселей), она существенно больше расчетной величины спектрального дрейфа АОФ (≈ 1 пиксель).

Численное моделирование показало, что наиболее вероятной причиной наблюдаемого ХС является пренебрежение оптической активностью кристалла TeO_2 в первоначальных расчетах параметров АОЯ. Последовательный учет этого эффекта приводит к другому значению угла между оптическими гранями ячейки для достижения минимального углового дрейфа продифрагировавшего пучка в спектральном диапазоне, причем значение этого минимального дрейфа $\Delta\theta_{\text{др}}$ практически не изменяется (см. п. 3.1.).

Величина оптических искажений измерялась как разность расстояния между параллельными линиями в центре и по краям кадра, отнесенная к средней величине расстояния. Обнаружена небольшая бочкообразная дисторсия. Измеренное значение $\approx 0.5\%$ оказалось одинаковым для спектрометров обоих типов и не зависело от длины волны (см. столбец 10 таблицы). Наблюдаемая дисторсия соответствует расчетной дисторсии оптической системы спектрометров.

4.4. Равномерность коэффициента передачи спектрометров по полю изображения

Зависимость коэффициента передачи спектрометров от координат точки изображения исследовалась с помощью шарового диффузного излучателя (ШДИ), который являлся широкоапертурным рабочим эталоном спектральной плотности энергетической яркости (ШРЭ СПЭЯ) [15]. Диаметр фотометрической сферы составлял 180 мм, диаметр выходной апертуры — 60 мм. Спектрометры устанавливались вблизи края выходной апертуры фотометрической сферы. Известно, что для использованного ШДИ неравномерность энергетической яркости по выходной апертуре не превышала нескольких процентов. Зависимость коэффициента передачи оценивалась как отношение фотосигналов пикселей периферийных и центральных областей кадра, эта усредненная величина приведена в столбце 11. Ее значения, измеренные на длинах волн 670 нм и 980 нм, составили 0.4 и 0.5 для ВИ и ИК спектрометров, соответственно. Обнаруженная зависимость, по-видимому, обусловлена виньетированием наклонных к оптической оси световых пучков на оправках элементов оптического тракта спектрометров.

Реально получаемое на выходе видеокамеры спектрометра спектральное изображение наблюдаемого объекта представляет собой двумерный файл оцифрованных фотоэлектрических сигналов дискретных элементов фотоматрицы $q_{\lambda xy}$

$$q_{\lambda xy} = B_{\lambda xy} \times \Delta\lambda \times k_{\lambda xy},$$

где $B_{\lambda xy}$ — спектральная яркость элементарной площадки поверхности объекта ΔS_{xy} , соответствующая площадке ds_{xy} пикселя фотоматрицы с координатами (x, y) , $\Delta\lambda$ — интервал длин волн фильтруемого излучения;

$k_{\lambda xy}$ — полный коэффициент передачи спектрометра на длине волны λ для световых пучков, создающих изображение ds_{xy} площадки ΔS_{xy} . Таким образом, наблюдаемое изображение пропорционально не только спектральной яркости, но и приборному коэффициенту, имеющему свое собственное распределение в поле изображения.

Для восстановления распределения $B_{\lambda xy}$ на поверхности объекта по его наблюдаемому спектральному изображению $q_{\lambda xy}$ необходимо провести калибровку спектрометра, то есть определить файл калибровочных коэффициентов $k_{\lambda xy}$ путем «попиксельного» фотометрирования

выходной апертуры ШРЭ СПЭЯ, для которого спектральная яркость известна и однородна: $B_{\lambda xy} = B_{\lambda}$ [15]. Далее, для получения искомого распределения $B_{\lambda xy}$ исследуемого объекта следует использовать обратное преобразование

$$B_{\lambda xy} = q_{\lambda xy} / (\Delta\lambda \times k_{\lambda xy}).$$

4.5. Быстродействие спектрометров

Следует указать следующие характерные времена, ограничивающие быстродействие акустооптических спектрометров как ВИ, так и ИК диапазонов:

1. Время прохождения фронта ультразвуковой волны через апертуру светового пучка («физическое» время τ_{ϕ}). Оценки дают $\tau_{\phi} \approx 15 \times 10^{-6}$ с.
2. Время формирования заданного значения частоты управляющего ВЧ сигнала, включая время трансляции командного импульса от микропроцессора в синтезатор частоты («электронное» время $\tau_{э}$). Эксперименты показали, что $\tau_{э} \approx 30 \times 10^{-6}$ с.
3. Время формирования и записи кадра изображения (время «накопления» $\tau_{н}$). В наших экспериментах в качестве внешней подсветки объектов использовался либо рассеянный солнечный свет, либо свет электрических ламп накаливания суммарной электрической мощностью не более 300 Вт. При этом для достижения отношения сигнал/шум ≥ 10 время накопления составляло: для ВИ спектрометра $\tau_{н} \approx (0.1 - 0.5)$ с; для ИК спектрометра $\tau_{н} \approx (0.5 - 1)$ с.

В нашем случае быстродействие ограничивалось временем накопления $\tau_{н}$. Однако, при наблюдении очень ярких излучающих объектов возможна ситуация, когда $\tau_{н} < \tau_{э}$, τ_{ϕ} и быстродействие принципиально ограничено временами $\tau_{э}$ и τ_{ϕ} .

Выводы

1. Исследованы основные экспериментальные параметры видеоспектрометров на базе двойного и одиночного акустооптических монохроматоров, предназначенных для получения спектральных изображений удаленных объектов и проведено их сравнение.
2. Одно из главных преимуществ схемы двойного АО-монохроматора — полная компенсация спектрального углового дрейфа продифрагировавшего светового пучка, обусловленного дисперсией кристалла АОЯ. К достоинствам двойного монохроматора следует отнести изотропность пространственного разрешения в поле изображения, а также величину пространственного разрешения, близкую к дифракционной. Важным преимуществом двойного монохроматора является уменьшение интенсивности боковых максимумов аппаратной функции, что увеличивает достоверность регистрируемого спектрального изображения объекта.
3. Главными достоинствами одиночного монохроматора являются простота его конструкции (следовательно, надежность и более низкие масса, габариты, стоимость), а также большая, чем в двойном монохроматоре, угловая апертура. К особенностям следует отнести анизотропность пространственного разрешения в поле изображения.
4. В схеме одиночного АО-монохроматора возможна компенсация спектрального углового дрейфа на уровне дифракционной расходимости светового пучка. Поскольку эффективность такой компенсации растет с увеличением длины волны фильтруемого излучения, эта схема имеет наибольшие преимущества в ИК-области.

Авторы благодарят Ю. К. Калининкова за интерес к работе и помощь по расчету ВЧ фильтров драйвера, Е. А. Лаврова за помощь в оформлении статьи. Данная работа выполнена в рамках ГК 16.523.11.3005 в целях реализации ФЦП «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2007–2013 годы».

Список литературы

1. Мазур М.М., Шорин В.Н., Епихин В.М., Судденко Ю.А., Кияченко Ю.Ф., Мазур Л.И., Пальцев Л.Л. Гиперспектральные регистрирующие системы видимого и ближнего ИК-диапазонов на основе акустооптических фильтров. // Тезисы докладов научно-технической Конференции «Гиперспектральные приборы и технологии». 17–18 января 2013. С. 35–38.
2. Жозун В.Н., Мазур М.М., Пожар В.Э., Пустовойт В.И., Шорин В.Н. Микровидеоспектрометры на основе акустооптических фильтров // В кн.: «Акустооптические, акустические и рентгеноспектральные методы и средства измерений в науке и технике». Труды ВНИИФТРИ. 2005. Вып. 48 (140). С. 27–34.
3. Скворцов Л.А. Дистанционное обнаружение взрывчатых веществ с помощью методов активного формирования спектральных изображений // КЭ. 2011. Т. 41. № 12. С. 1051–1060.
4. Atherton, P., Reay, N., Ring, J., Hics, T., Title, A., Rosenberg, W., Chang, I.C., Lotspeich, J., Stephens, R., Henderson, D., and Gunning, W. Tunable Spectral Filters: a Review // Opt.Eng. 1981. Vol. 20. No. 6. P. 806–845.
5. Levenson, R.M., Hoyt, C.C. Spectral Imaging and Microscopy // American Laboratory. 2000. Novem. P. 26–33.
6. Калинин Ю.К., Стаценко Л.Я. Использование акустооптических фильтров для фильтрации изображения // ЖТФ. Т. 59. № 9. 1989. С. 153–156.
7. Пожар В.Э., Пустовойт В.И., Мазур М.М., Шорин В.Н. Акустооптический видеомонохроматор для фильтрации оптических изображений // Патент РФ 2258206 от 16.01.2004.
8. Епихин В.М., Калинин Ю.К. Компенсация спектрального дрейфа угла дифракции неколлинеарного акустооптического фильтра // ЖТФ. 1989. Т. 59. № 2. С. 160–163.
9. Мачихин А.С., Пожар В.Э. Искажение изображения, возникающее при передаче через двойной акустооптический монохроматор // Электромагнитные волны электронные системы. 2009. Т. 14. № 11. С. 63.
10. Мазур М.М., Вискун Т.Г. Неколлинеарный акустооптический фильтр // Авт. свид. № 1584601. 1988.
11. Мазур М.М. Критерий идентичности акустооптических ячеек для двойных акустооптических монохроматоров. // В кн.: «Акустооптические, акустические и рентгеноспектральные методы и средства измерений в науке и технике». Труды ВНИИФТРИ. 2005. Вып. 48 (140). С. 48–52.
12. Епихин В.М., Рокос И.А. Двойной акустооптический монохроматор для ультрафиолетовой области спектра на монокристалле дигидрофосфата калия с улучшенными оптическими характеристиками // Опт. и спектр. 2004. Т. 96. № 3. С. 515–519.
13. Uchida, N. Optical Properties of Single-Crystal Paratellurite (TeO₂) // Phys.Rev. B. 1971. Vol. 4. No. 10. P. 3736–3745.
14. Епихин И.М., Визен Ф.Л. Расширение спектрального диапазона неколлинеарного акустооптического фильтра // ЖТФ. 1990. Т. 60. № 9. С. 169–173.
15. Аскеров Н.А., Мазур М.М. Широкоапертурные рабочие эталоны СПЭЯ в диапазоне длин волн 0,22–2,0 мкм. // Труды ВНИИФТРИ. 2005. Вып. 48 (140). С. 192–195.

Поступила 12 августа 2013 г.

ACOUSTO-OPTICAL IMAGING SPECTROMETERS FOR VISIBLE AND NEAR INFRA-RED RANGES

V. M. EPIKHIN, YU.F. KIYACHENKO, M. M. MAZUR, L. I. MAZUR,
L. L. PALTSEV, YU.A. SUDDENOK, AND V. N. SHORIN

This work is devoted to the description of the created acousto-optical (AO) imaging spectrometers of visible and near infra-red ranges and research of their characteristics: spectral ranges, spectral bandwidth, quality of received images. In introduction, the short review of existing ways of spectral images detection is given. In the second section of article, requirements for designing the imaging spectrometers and necessary properties of acousto-optical monochromators are discussed. The construction of acousto-optical imaging spectrometers are described: the principle diagram of the devices, optical schemes of acousto-optical monochromators of visible and infra-red ranges,

the characteristic of AO spectrometers, a design of input optics, a design of radiofrequency control unit (driver) of monochromators. In the spectrometer of visible range, the symmetric two-crystal acousto-optical monochromator made of TeO₂, which is distortion-compensated is used. In the spectrometer of the infra-red range, the single-crystal monochromator is used, in which an effective compensation of angular drift of the diffracted light beam is due to the dispersion on the output crystal face inclined at the specific angle to the beam.

These two different designs of acousto-optical monochromators can be compared in the spectral interval of the overlapping of their spectral ranges. The advantages of the double monochromator are the isotropic distribution of spatial resolution across the images field, and that the spatial resolution is close to the diffraction limit. Important additional advantage of the double monochromator is the reduction of intensity of sidelobes of the transmission function that raises reliability of the detected spectral images of the object. The main advantages of the single monochromator is a simple design (reliability of the construction and lower weight, dimensions, and the cost), and also the larger angular aperture, than in the double monochromator. It is necessary, however, note the anisotropy of spatial resolution across the images field.

Уважаемые читатели!

Подписка на журнал оформляется через подписное агентство «Книга-Сервис» и объединенный каталог «Пресса России» (подписной индекс **29196**)