ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ПРИБОРОСТРОЕНИЯ

ISSN: 2225-4293
Online ISSN: 2712-7885

2023. Т. 12. №2 (48)

ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ПРИБОРОСТРОЕНИЯ. 2023. Т. 12. №2 (48)

Научно-технологический центр уникального приборостроения Российской академии наук

Учредители: Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Научно-технологический центр уникального приборостроения Российской академии наук, Кравченко Виктор Филиппович

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

2023. Т. 12. №2 (48)

ISSN 2225-4293
Online **ISSN 2712-7885**

Журнал «**Физические основы приборостроения**» включен:
- В ***Российский индекс научного цитирования*** (***РИНЦ***).
- В список журналов базы данных ***Russian Science Citation Index*** (***RSCI***) на платформе ***Web of Science.***
- В ***Перечень рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук.***

РЕДКОЛЛЕГИЯ

Кравченко В.Ф., главный редактор, заслуженный деятель науки РФ, д.ф.–м.н., проф.
Назаров Л.Е., заместитель главного редактора, д.ф.–м.н.

Боголюбов А.Н., д.ф.–м.н., проф.
Боритко С.В., д.ф.–м.н., проф.
Быков А.А., д.ф.–м.н., проф.
Булатов М.Ф., д.ф.–м.н., проф.
Гуляев Ю.В., академик РАН, д.ф.–м.н., проф.
Дмитриев А.С., д.ф.–м.н., проф.
Крохин О.Н., академик РАН, д.ф.–м.н., проф.
Крюковский А.С., 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., член-корр. РАН, д.ф.–м.н., проф.
Панич А.Е., д.т.н., проф.
Панич А.А., д.т.н., проф.
Пожар В.Э., д.ф.-м.н.
Садовничий В.А., академик РАН, д.ф.–м.н., проф.
Самохин А.Б., д.ф.–м.н., проф.
Сидняев Н.И., д.т.н., проф.
Синявский Г.П., д.ф.–м.н., проф.
Татаренко Н.И., д.ф.–м.н.

ЗАРУБЕЖНЫЕ ЧЛЕНЫ РЕДКОЛЛЕГИИ

Кобаяши К., проф. (Япония)
Кураев А.А., д.ф.–м.н., проф. (Беларусь)
Мартиросян Р.М., академик НАН Республики Армения, иностранный член РАН, д.ф.-м.н.. проф. (Республика Армения)
Миттра Р., проф. (США)
Перес-Меана Э., проф. (Мексика)
Пономарев В.И., д.т.н., проф. (Мексика)
Ра Д., проф. (Корея)
Хашимото М., проф. (Япония)

EDITORIAL BOARD

Kravchenko, V.F., Editor-in-Chief, Honored Worker of Science of the Russian Federation, Dr. Sci. (Phys.– Math.), Prof.
Nazarov, L.E., Deputy Editor-in-Chief, Dr. Sci. (Phys.– Math.)

Bogolyubov, A.N., Dr. Sci. (Phys.– Math.), Prof.
Boritko, S.V., Dr. Sci. (Phys.– Math.), Prof.
Bykov, A.A., Dr. Sci. (Phys.– Math.), Prof.
Bulatov, M.F., Dr. Sci. (Phys.– Math.), Prof.
Gulyaev, Yu.V., Academician of RAS, Dr. Sci. (Phys.– Math.), Prof.
Dmitriev, A.S., Dr. Sci. (Phys.– Math.), Prof.
Krohin, O.N., Academician of RAS, Dr. Sci. (Phys.– Math.), Prof.
Krukovsky, A.S., Dr. Sci. (Phys.– Math.), Prof.
Kutuza, B.G., Dr. Sci. (Phys.– Math.), Prof.
Lukin, D.S., Dr. Sci. (Phys.–Math.), Prof.
Mazur, M. M., Dr. Sci. (Techn.)
Morozov, A. N., Corresponding member of RAS, Dr. Sci. (Phys.– Math.), Prof.
Panich, A.E., Dr. Sci. (Techn.), Prof.
Panich, A.A., Dr. Sci. (Techn.), Prof.
Pozhar, V.E., Dr. Sci. (Phys.–Math.)
Sadovnichiy, V.A., Academician of RAS, Dr. Sci. (Phys.– Math.), Prof.
Samokhin, A.B., Dr. Sci. (Phys.– Math.), Prof.
Sidnayev, N.I., Dr. Sci. (Techn.), Prof.
Synyavskiy, G.P., Dr. Sci. (Phys.– Math.), Prof.
Tatarenko, N.I., Dr. Sci. (Phys.– Math.)

FOREIGN EDITORIAL BOARD MEMBERS

Kobayashi, K., Prof. (Japan)
Kuraev, A.A., Dr. Sci. (Phys.– Math.), Prof. (Belarus)
Martirosyan, R.M., Academician of NAS of Republic of Armenia, Foreign Member of the RAS, Dr. Sci. (Phys.– Math.), Prof. (Republic of Armenia)
Mittra, R., Prof. (USA)
Perez-Meana, H., Prof. (Mexico)
Ponomaryov, V.I., Dr. Sci. (Techn.), Prof. (Mexico)
Ra, J-W., Prof. (Korea)
Hashimoto, M., Prof. (Japan)

© **НТЦ УП РАН, 2023**

Адрес редакции: 117342, Москва, ул. Бутлерова, д. 15
www.jfop.ru

Заведующий редакцией: **Чуриков Д.В.**
E-mail: **red@jfop.ru**

СОДЕРЖАНИЕ

АКУСТООПТИЧЕСКИЕ И ОПТОАКУСТИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ И УСТРОЙСТВА

Доброленский Ю.С., Кораблёв О.И., Трохимовский А.Ю., Беляев Д.А., Калинников Ю.К.
35 лет космической акустооптики — 2

Мазур М.М.
Некоторые этапы развития акустооптики во ВНИИ физико-технических и радиотехнических измерений — 12

Вайсбург Н.Я., Иванов А.М., Каплунов И.А., Третьяков С.А.
История и актуальные проблемы выращивания монокристаллов парателлурита в лаборатории кристаллизации Тверского государственного университета — 25

Булатов К.М., Быков А.А., Зинин П.В., Малыхина И.В.
Калибровка мультиспектральных оптических систем с использованием акустооптического фильтра — 32

Агаев Э.А., Ахмедов Р.А., Гасанов А.Р., Гасанов Р.А., Рустамов А.Р., Садыхов М.В., Эйнуллаев В.С.
Пространственно-временное моделирование фотоупругого взаимодействия в акустооптической линии задержки — 38

ПРИБОРЫ И МЕТОДЫ ФИЗИКИ И ТЕХНИКИ СВЧ ДИАПАЗОНА

Заргано Г.Ф., Харланова Т.С.
Исследование затухания электромагнитных волн в трехслойном диэлектрическом волноводе — 50

Кравченко В.Ф., Кураев А.А., Матвеенко В.В., Матвеенко И.П.
Клинотрон на открытом резонаторе с симметричными коническими гофрированными зеркалами — горатрон — 60

СПЕКТРАЛЬНЫЕ МЕТОДЫ И УСТРОЙСТВА

Вагин В.А., Кузнецова Д.Ю., Хорохорин А.И.
Двухзондовый фурье-спектрометр среднего ИК-диапазона — 66

Старых А.В., Костюковский С.Р., Любская О.Г.
Использование новых спектрорадиометров в системах автоматического контроля — 72

ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ СИСТЕМЫ

Губин М.С., Кинжагулов И.Ю., Малый В.В., Сергеев Д.С., Федоров А.В.
Разработка основных конструктивных элементов устройства позиционирования преобразователей автоматизированной установки комплексного неразрушающего контроля — 78

ПРИБОРЫ И МЕТОДЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ ФИЗИКИ

Титов С.А., Богаченков А.Н., Зыкова Л.А., Гурылева А.В., Бурлаков А.Б., Мачихин А.С.
Стенд для исследования сердечно-сосудистой системы Danio rerio методами акустической и оптической микроскопии — 86

Рубрики журнала — 94

Правила оформления рукописей — 95

CONTENTS

ACOUSTO-OPTIC AND OPTO-ACOUSTIC METHODS AND DEVICES

Dobrolensky Yu.S., Korablev O.I., Trokhimovsky A.Yu., Belyaev D.A., and Kalinnikov Yu.K.
35 Years of Space Acousto-Optics — 2

Mazur M.M.
Development of Acousto-Optics in National Research Institute of Physical, Technical and Radioengineering Measurements. Some Stages — 12

Vaysburg N.Ya., Ivanov A.M., Kaplunov I.A., and Tretiakov S.A.
History and Current Problems of Growing Paratellurite Single Crystals in The Laboratory of Crystallization of Tver State University — 25

Bulatov K.M., Bykov A.A., Zinin P.V., and Malykhina I.V.
A Calibration of Multispectral Optical Systems Using an Acousto-Optical Filter — 32

Agayev E. A., Ahmadov R. A., Hasanov A. R., Hasanov R. A., Rustamov A. R., Sadikhov M. V., and Eynullayev V. S.
Spatiotemporal Simulation of Photoelastic Interaction in an Acousto-Optic Delay Line — 38

MICROWAVE RANGE DEVICES AND METHODS OF PHYSICS AND TECHNIQUES

Zargano G.F., Kharlanova T.S.
Study of Electromagnetic Wave Attenuation in a Three-Layer Dielectric Waveguide — 50

Kravchenko V. F., Kurayev A.A., Matveyenka V.V., and Matveyenka I.P.
Klynotron With Using The Open Resonator and Symmetric Conical Corrugated Mirrors — Goratron — 60

SPECTRAL METHODS AND DEVICES

Vaguine V.A., Kuznetsova D.Yu., and Khorokhorin A.I.
Two-Channel Fourier Spectrometer of The Mid-IR Range — 66

Starykh A.V., Kostyukovsky S.R., and Lyubskaya O.G.
The Use of New Spectroradiometers in Automatic Control Systems — 72

INFORMATION-MEASURING SYSTEM

Gubin M.S., Kinzhagulov I.Yu., Maly V.V., Sergeyev D.S., and Fedorov A.V.
Development of The Main Structural Elements of The Positioning Sensor of The Automated Installation of Complex Non-Destructive Testing — 78

INSTRUMENTS AND METHODS OF EXPERIMENTAL PHYSICS

Titov S.A., Bogachenkov A.N., Zykova L.A., Guryleva A.V., Burlakov A.B., and Machikhin A.S.
Setup For Studying The Cardiovascular System of Danio Rerio Using Acoustic and Optical Microscopy — 86

Journal Headings — 94

Rules for the Preparation of Manuscripts — 95

Сдано в набор 01.11.2023. Подписано в печать 30.11.2023.
Формат бумаги 420×297. Печать цифровая. Печатных листов 24.
Тираж 120 экз. Цена договорная.
Отпечатано в типографии «DC Print», г. Москва, 3-й Нижнелихоборский проезд, д. 1А, стр. 3, оф. 3.

Все права защищены. Перепечатка материалов журнала невозможна без письменного разрешения редакции.

АКУСТООПТИЧЕСКИЕ И ОПТОАКУСТИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ И УСТРОЙСТВА

УДК 535.4; 535.5; 535.8

35 ЛЕТ КОСМИЧЕСКОЙ АКУСТООПТИКИ

© Авторы, 2023
doi: 10.25210/jfop-2302-TYWQDV | **edn:** TYWQDV

Доброленский Ю. С. — к.ф.- м.н., зав. лаб., Институт космических исследований РАН, Москва.
E-mail: dobrolenskiy@cosmos.ru
Кораблёв О. И. — член-корреспондент РАН, д.ф.- м.н., зав. отделом, Институт космических исследований РАН, Москва
Трохимовский А. Ю. — н.с., Институт космических исследований РАН, Москва
Беляев Д. А. — к.ф.- м.н., с.н.с, Институт космических исследований РАН, Москва
Калинников Ю. К. — с.н.с., Всероссийский научно-исследовательский институт физико-технических и радиотехнических измерений, Менделеево, Московская область

Аннотация
В статье приводится обзор применения приборов, использующих акустооптический (АО) эффект, в космических исследованиях: в исследованиях Земли из космоса, лунных и межпланетных автоматических миссиях. Даётся краткое описание каждого из приборов, принцип его работы и научные задачи. Показаны наиболее характерные области применения акустооптических приборов, прежде всего спектрометров, их плюсы и минусы с точки зрения космического эксперимента.

Ключевые слова: *акустооптика, перестраиваемый акустооптический фильтр, спектрометр, космические исследования*

Abstract
The paper gives a review of space applications of the instruments using acousto-optic (AO) effect. Earth remote sensing as well as Lunar and planetary studies have been observed. Brief description of each instrument, operating principle and scientific goals are given. We discuss the most typical areas of AO instruments applications, their pros and cons form the point of view of space experiment.

Keywords: *acousto-optics, acousto-optic tuneable filter, spectrometer, space research*

Введение

В 2022-м году акустооптика отметила условный 100-летний юбилей: в 1922-м году вышла знаменитая статья Бриллюэна [1], в которой было предсказано существование дифракции света на акустических волнах — акустооптического (АО) эффекта. От этого момента принято отсчитывать историю акустооптики как самостоятельной области физики и техники. Спустя 10 лет, в 1932-м, такая дифракция действительно была обнаружена в эксперименте Дебаем и Сирсом [2] и одновременно и независимо от них Люка и Бикаром [3]. Вскоре после этого, в 1930-е годы, в работах Рамана и Ната [4], Рытова [5] и других учёных были заложены теоретические основы акустооптики. Однако по-настоящему интенсивное развитие акустооптики началось в 1960-е годы после создания лазеров. Именно тогда появились основные типы АО-устройств: акустооптические модуляторы, дефлекторы и фильтры. Последние из них — акустооптические перестраиваемые фильтры (АОПФ) [6, 7] — заняли в научном приборостроении особое место. Они применяются в спектроскопии, лазерной технике, биомедицинских исследованиях, астрономии и многих других областях. С середины 1980-х годов приборы на основе АОПФ стали всё чаще использоваться в космических исследованиях, т.е. устанавливаться на борт космического аппарата (КА) [8]. Таким образом, к настоящему времени история «космической акустооптики» насчитывает уже 35 лет.

Обзор экспериментов

Первым АО-прибором, отправленным в космос, считается Трассер-НХМ, запущенный на КА «Океан О1 № 2» в 1987 году [9, 10]. «Океан» — серия советских, а позднее российско-украинских метеорологических спутников, предназначенных для мониторинга поверхности мирового океана (отсюда и встречающаяся в названиях КА и аппаратуры аббревиатура НХМ — «народнохозяйственный, морской»). Прибор, созданный во Всесоюзном научно-исследовательском институте физико-технических и радиотехнических измерений (ВНИИФТРИ), представлял собой 2-канальный спектрометр, каждый из каналов которого был построен на основе коллинеарного АО-фильтра видимого света (0.42–0.78 мкм) на кристалле кварца SiO_2 с разрешением 2 Å на 633 нм. В разных каналах анализировался свет разной поляризации, т.е. прибор осуществлял не только спектральный, но и спектрально-поляризационный анализ отражённого от поверхности океана солнечного излучения. Спектрометр проработал на околоземной орбите более года. Эксперимент был признан удачным, и в дальнейшем, в конце 1980-х и 1990-е гг., модифицированные версии

Доброленский Ю.С., Кораблёв О.И., Трохимовский А.Ю., Беляев Д.А., Калинников Ю.К. 35 лет космической акустооптики // Физические основы приборостроения. 2023. Т. 12. № 2(48). С. 2-11. DOI: 10.25210/jfop-2302-TYWQDV. EDN: TYWQDV

Трассера применялись для измерений водных покровов с борта самолётов и кораблей [10]. Наконец в 1999-м году ещё одна модификация спектрометра — «Трассер-О» — была запущена на борту последнего КА этой серии: «Океан-О». Работа прибора на орбите продолжалась 2 года.

Следующим шагом «космической акустооптики» следует назвать запуск в 1998-м году американского астрономического спутника SWAS (Submillimeter Wave Astronomy Satellite) для изучения межзвёздной среды в субмиллиметровом радиодиапазоне [11]. Для этого, в том числе, использовался изготовленный в Университете Кёльна (Германия) прибор AOS (Acousto-Optical Spectrometer), основным элементом которого был АО-дефлектор на кристалле ниобата лития $LiNbO_3$. Спутник проработал на околоземной орбите почти 7 лет. В 2001-м году аналогичное устройство, также называвшееся AOS и предназначенное также для анализа радиосигналов от звёзд, изготовленное на этот раз во Франции, было запущено в составе субмиллиметрового радиометра (SubMillimeter Radiometer, SMR) на борту шведского спутника «Odin» [12]. Отметим, что до настоящего времени о завершении миссии, в задачи которой входит исследование не только звёзд, но и атмосферы Земли, не сообщалось. Наконец, в 2009-м году, на борт Международной космической станции (МКС) был доставлен японский комплекс SMILES (Superconducting subMIllimeter-wave Limb-Emission Sounder), включающий 2 идентичных AOS подобного типа [13]. Задачами комплекса было изучения малых газовых составляющих в атмосфере Земли, в том числе их вертикального распределения. SMILES проработал на МКС около полугода. Эти 3 эксперимента стоят несколько особняком, поскольку о других случаях применения в космосе АО-дефлекторов к настоящему моменту неизвестно.

Новый этап в использовании АО-приборов в космических исследованиях начался в 2003 году с запуском российско-европейской миссии «Марс-Экспресс» (рис. 1), в состав которой входил спектрометр СПИКАМ (англ. SPICAM — SPectroscopy for the Investigation of the Characteristics of the Atmosphere of Mars). Инфракрасный (ИК) канал этого спектрометра был построен на основе АОПФ, в котором была реализована неколлинеарная широкоугольная геометрия на кристалле парателлурита TeO_2, с использованием обеих поляризаций света [14].

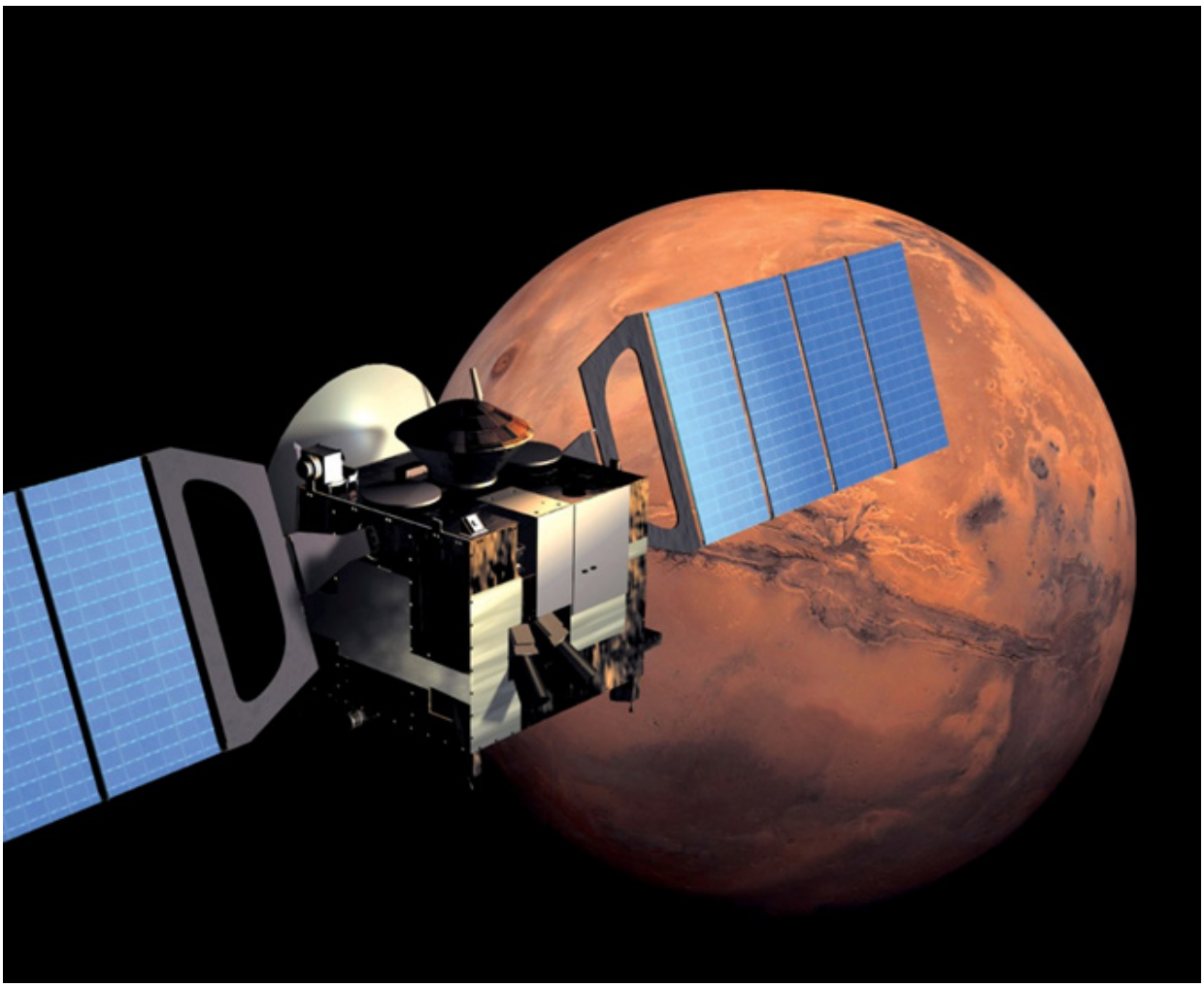


Рис. 1. *КА «Марс-Экспресс» на фоне Марса (фото с сайта esa.int).*

Оптическая схема прибора показана на рис. 2. СПИКАМ ИК был создан в Институте космических исследований Российской академии наук (ИКИ РАН), а АОПФ для него — во ВНИИФТРИ. Задачей эксперимента являлось исследование состава марсианской атмосферы, в частности содержания водяного пара, а также полярных шапок из H_2O и CO_2 на поверхности планеты. За почти 20 лет работы на околомарсианской орбите (спектрометр продолжает работу до сих пор) получено много ценных данных об атмосфере Марса. Так началось применение акустооптики в дальнем космосе.

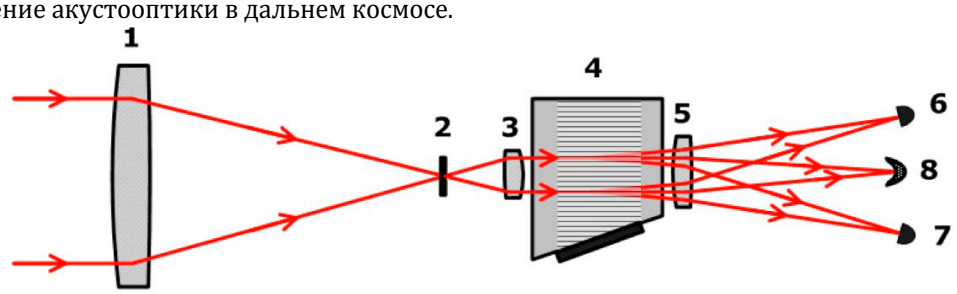


Рис. 2. *Упрощённая оптическая схема прибора СПИКАМ-ИК.* 1 — *входной телексоп;* 2 — *диафрагма;* 3, 5 — *коллимирующие линзы;* 4 — *АОПФ;* 6, 7 — *детекторы;* 8 — *световая ловушка.*

Вслед за «Марс-Экспрессом» последовала схожая миссия к Венере «Венера-Экспресс» (запущена в 2005 году, рис. 3), в составе которой было уже 2 АО-прибора: спектрометры СПИКАВ и SOIR [15]. Прибор СПИКАВ (англ. SPICAV — SPectroscopy for the Investigation of the Characteristics of the Atmosphere of Venus), а точнее его ИК-канал СПИКАВ-ИК, являлся дальнейшим развитием СПИКАМ-ИК: за счёт 2-го пьезопреобразователя спектральный диапазон прибора был расширен в коротковолновую область и составил 0.7–1.7 мкм (против 1.0–1.7 мкм у СПИКМ-ИК). Спектрометр также анализировал обе поляризации света, что позволило, например, провести спектрально-поляризационный анализ венерианских облаков [16].

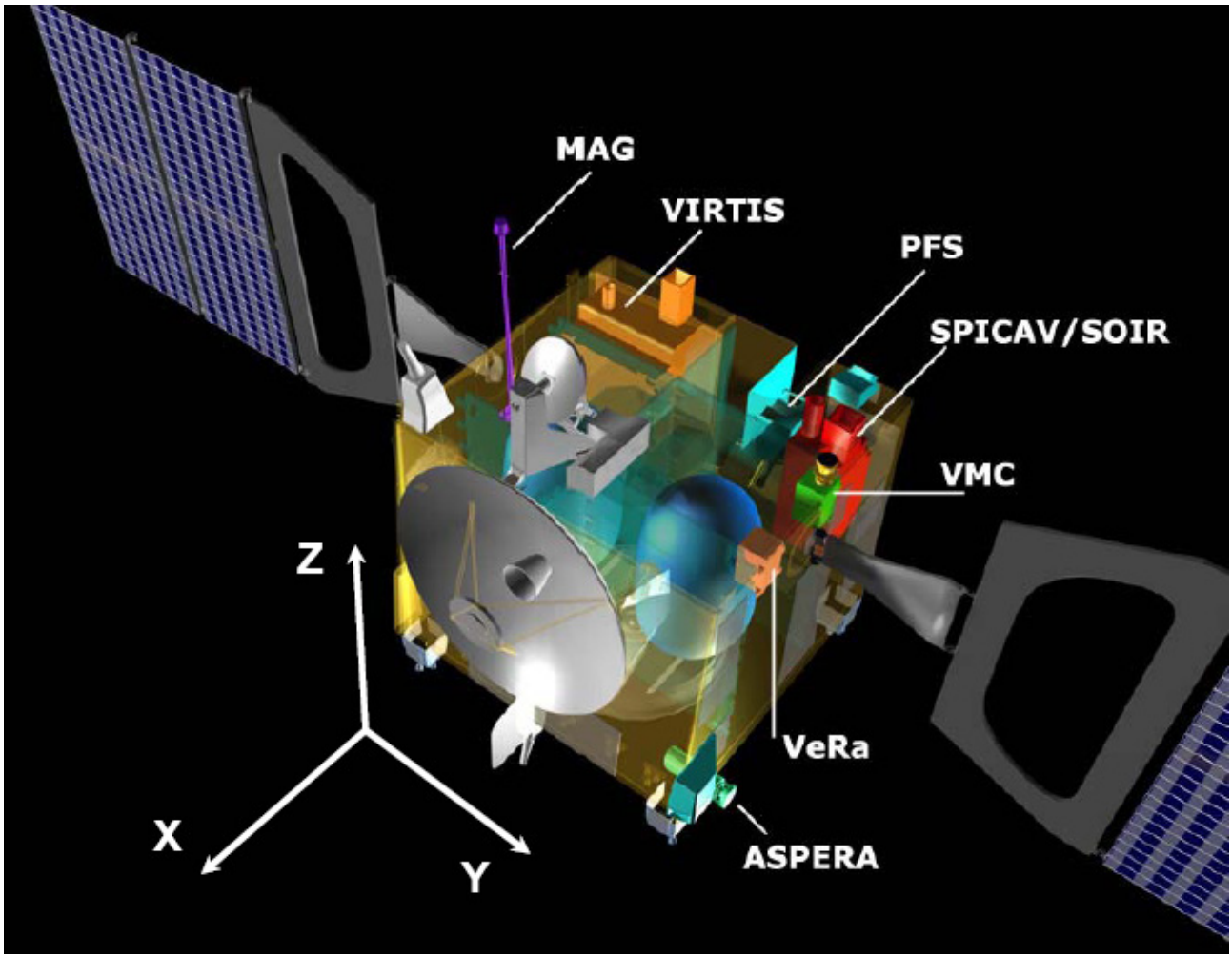


Рис. 3. *КА «Венера-Экспресс»* (*фото с сайта esa.int*).

В другом приборе — SOIR (Solar Occultation in the InfraRed) — была применена новая концепция [17]: АОПФ использовался для предварительной фильтрации света перед дифракционной эшелле-решёткой (рис. 4). Эшелле-решётка, работающая в очень высоких порядках дифракции (в случае SOIR — примерно от 100-го до 200-го), позволяет получить разрешающую силу в десятки тысяч, однако при этом из-за очень короткой области свободной дисперсии возникает проблема наложения порядков. Установка перед решёткой АОПФ с полосой пропускания, приблизительно равной области свободной дисперсии решётки, позволяет заранее отфильтровать «лишние» длины волн и избежать наложения порядков. Схема «АОПФ + эшелле-решётка» оказалась очень удачной и неоднократно использовалась в дальнейшем [8]. SOIR был создан в Бельгийском королевском институте космической аэрономии (Royal Belgian Institute for Space Aeronomy, BIRA-IASB), АОПФ же был российского производства (Научно-производственный центр «Спурт») [18]. Спектрометр проводил измерения в режиме «солнечного просвечивания атмосферы» (наблюдения в направлении Солнца сквозь атмосферу планеты) в диапазоне 2.2–4.4 мкм и получил уникальные данные о вертикальной структуре атмосферы Венеры, в том числе о важном для понимания эволюции планеты отношении содержания дейтерия к содержанию водорода. Миссия «Венера-Экспресс» была завершена в 2014-м году.

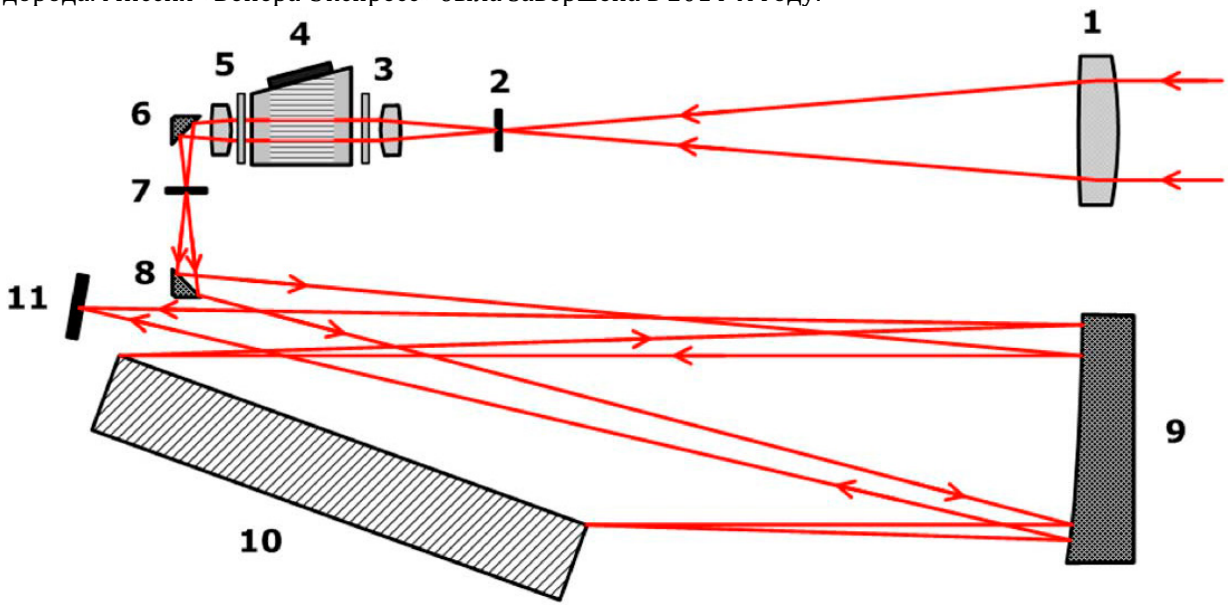


Рис. 4. *Упрощённая схема эшелле-спектрометра с АОПФ для предварительной фильтрации света.* 1 — *входной телескоп;* 2 — *диафрагма;* 3, 5 — *коллимирущие линзы;* 4 — *АОПФ;* 6, 8 — *зеркала;* 7 — *щель;* 9 — *внеосевое параболическое зеркало;* 10 — *эшелле-решётка;* 11 — *ПЗС-матрица.*

Своего рода адаптацией прибора SOIR для мониторинга парниковых газов в атмосфере Земли в ближнем ИК-диапазоне (0.7–1.7 мкм) был созданный в ИКИ РАН (также при участии НПЦ «Спурт») прибор РУСАЛКА (РУчной СпектроАнаЛизатор Компонентов Атмосферы), доставленный в 2009-м году на МКС [19]. Космонавт мог вести съёмку непосредственно через иллюминатор станции, а для привязки к местности использовался жёстко связанный со спектрометром фотоаппарат. Эксперимент продолжался 2.5 года.

Стоит также упомянуть закончившуюся неудачей миссию Фобос-Грунт. КА, предназначенный для изучения Марса и его спутника Фобоса, был запущен в 2011-м году, однако не смог выйти на траекторию перелёта к Марсу и, проведя 2 месяца на низкой околоземной орбите, сгорел в плотных слоях атмосферы. Для этой миссии были разработаны 2 АО-прибора. Один из них, созданный в ИКИ РАН спектрометр TIMM-2, предназначался для анализа атмосферы Марса с орбиты и был построен по уже описанной схеме «АОПФ + эшелле» [20]. АОПФ был изготовлен Конструкторским бюро специального приборостроения (КБСП). Другой прибор, французский микроскоп-спектрометр MicrOmega, был предназначен для анализа поверхности Фобоса после посадки [21]. Здесь АОПФ использовался в качестве монохроматора в системе освещения образца. Изначально для прибора был разработан российский АОПФ, также производства КБСП, однако в процессе доводки и испытаний образцов прибора возникла череда трудностей, и в конечном итоге выбор был сделан в пользу АОПФ английского производства (Gooch & Housego). Тем не менее, в процессе работы на «МикрОмегой» был накоплен ценный опыт «выживаемости» АО-устройств при низких температурах (вплоть до –150 °C), очень пригодившийся в дальнейшем. Сам же прибор MicrOmega был с некото-

рыми усовершенствованиями установлен на японскую миссию Хаябуса-2 (Hayabusa-2), запущенную в 2014-м году к астероиду Рюгу [22] и в 2020-м году доставившую с него грунт на Землю (миссия продолжается), а также на посадочный модуль миссии «ЭкзоМарс» (см. ниже) [23].

В 2016 году стартовала первая часть российско-европейской миссии «ЭкзоМарс» — Trace Gas Orbiter (TGO, рис. 5), или орбитальный аппарат для исследования малых составляющих атмосферы. Перелёт к Марсу и последующий выход на расчётную «научную» орбиту занял около 2-х лет, и в 2018-м году началось выполнение основной программы научных исследований. На борту TGO находятся уже 3 АО-спектрометра: 2 в составе бельгийского комплекса NOMAD и 1 в составе российского АЦС. NOMAD (Nadir and Occultation for MArs Discovery) представляет собой комплекс из 3-х спектрометров: 2-х ИК- и одного ультрафиолетового (УФ). Оба ИК-канала сделаны по схеме «АОПФ + эшелле», однако предназначены для разной геометрии наблюдений [24]. Канал SO (Solar Occultation), являющийся практически копией прибора SOIR, работает в диапазоне длин волн 2.2–4.3 мкм только в режиме солнечного просвечивания; канал LNO (Limb, Nadir and Occultation) построен по схожей схеме, но обладает несколько меньшим рабочим диапазоном (2.3–3.8 мкм) и предназначен, главным образом, для наблюдений в надир и на лимб планеты. Оба АОПФ были изготовлены Gooch & Housego (Великобритания).

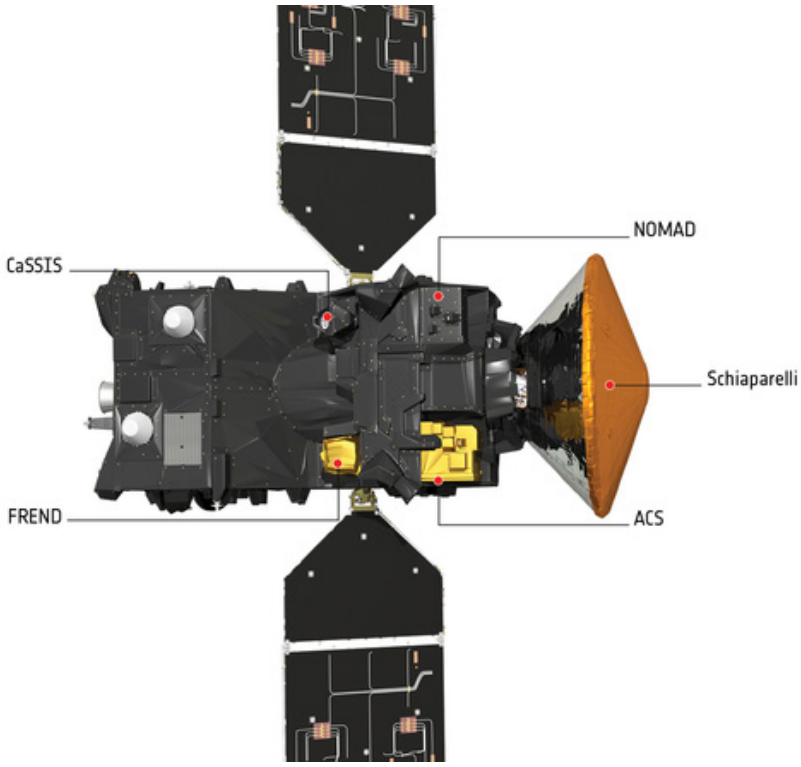


Рис. 5. *КА «ЭкзоМарс TGO» (фото с сайта esa.int).*

Российский комплекс АЦС (англ. ACS — Atmospheric Chemistry Suit), созданный в ИКИ РАН, также состоит из 3-х спектрометров, но, в отличие от NOMAD, все они относятся к ИК-диапазону (соответственно ближнему, среднему и тепловому). Спектрометр ближнего ИК-диапазона NIR (Near InfraRed), работающий на длинах волн от 0.7 до 1.6 мкм, также создан по схеме «АОПФ + эшелле» и является «наследником» спектрометров SOIR и «Русалка» [25]. АОПФ изготовлен в Научно-исследовательском институте микроприборов им. Г.Я. Гуськова (НИИМП). Спектрометр предназначен для наблюдений как в надир, так и в режиме просвечиваний. К настоящему моменту получены уникальные данные о вертикальном профиле водяного пара и температуры в атмосфере Марса, также проведены измерения угарного газа, кислорода и др. Орбитальный аппарат «ЭкзоМарс TGO» продолжает свою работу.

Судьба второй части проекта «ЭкзоМарс» — посадочного аппарата — оказалась не столь удачной. Аппарат должен был состоять из 2-х частей: российской посадочной платформы и европейского марсохода (рис. 6), на каждой из которых устанавливался свой комплекс научной аппаратуры. Среди приборов марсохода имелось 2 акустооптических: уже упоминавшийся микроскоп-спектрометр MicrOmega, предназначенный в данном случае для анализа извлечённого из-под поверхности с помощью бура марсианского

грунта, и ИК-спектрометр ИСЕМ, устанавливаемый на мачте марсохода и предназначенный для минералогического анализа поверхности в диапазоне 1.1–3.4 мкм [26]. Прибор ИСЕМ (англ. ISEM–Infrared Spectrometer for ExoMars) был разработан в ИКИ РАН, а входящий в его состав акустооптический модуль (АОМ) — в НИИМП. ИСЕМ представляет собой «классический» АО-спектрометр, в котором АОПФ является единственным диспергирующим элементом. Неоднократно переносившийся запуск миссии должен был наконец состояться в 2022-м году, однако прекращение сотрудничества между Европейским космическим агентством (ЕКА) и Роскосмосом привело к отмене запуска и, по всей вероятности, к прекращению существования проекта в его нынешнем виде.

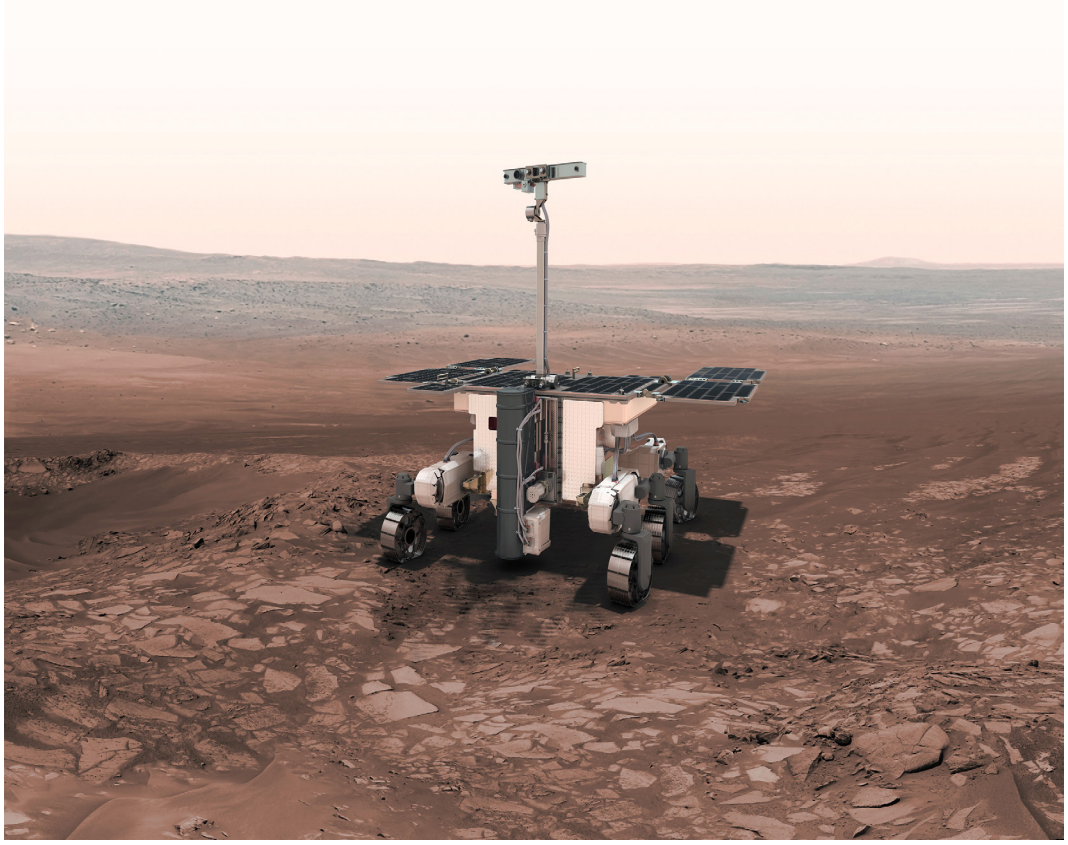


Рис. 6. *Марсоход «Розалинд Франклин» миссии «ЭкзоМарс»* (*фото с сайта esa.int*).

Тем временем, один АО-прибор всё же добрался до поверхности Марса: в составе ИК-канала спектрометра SuperCam на борту марсохода «Perseverance» («Настойчивость») американской миссии «Mars-2020» [27]. Запуск миссии был осуществлён в 2020-м году, успешная посадка на Марс состоялась в феврале 2021-го. Научные задачи SuperCam и общая схема использования АОПФ схожи с прибором ИСЕМ (сходно также их расположение — на мачте марсохода). АО-канал SuperCam обладает меньшим спектральным диапазоном (1.3–2.4 мкм), зато использует обе поляризации света. Прибор SuperCam — результат международной кооперации. В частности, ИК-канал был создан во французской обсерватории LESIA, а АОПФ для него изготовлен Gooch & Housego. Работа марсохода «Perseverance» на поверхности Марса продолжается.

Особого упоминания в контексте акустооптики заслуживает лунная программа Китая. В 2013 году на Луну был высажен посадочный аппарат Чанъэ-3 с луноходом Юйту. В состав научной аппаратуры лунохода входил 2-канальный спектрометр VNIS (Visible and Near-Infrared Spectrometer) [28]. Оба канала прибора — видимого (0.45–0.95 мкм) и ИК-излучения (0.9–2.4 мкм) — использовали АОПФ, причём канал видимого света являлся полноценным видеоспектрометром с полем зрения около 7 градусов и КМОП-матрицей, содержащей 256×256 элементов, в качестве фотоприёмника. Таким образом, спектрометр VNIS является первым АО-видеоспектрометром, побывавшем в космосе. Прибор проводил измерения лунной поверхности с борта лунохода в течение нескольких месяцев. Официально о завершении миссии было объявлено в 2016 году.

В 2018 году была реализована миссия Чанъэ-4, являющаяся продолжением и дублёром миссии Чанъэ-3. Миссия впервые совершила посадку на обратной стороне Луны. Состав научной аппаратуры Чанъэ-4 повторял Чанъэ-3, то есть на её борту находился ещё один спектрометр VNIS — в составе лунохода Юйту-2.

Прилунение состоялось в январе 2019-го года, после чего началось выполнение научной программы, в том числе минералогических измерений спектрометром VNIS. К настоящему времени луноход преодолел уже более километра по поверхности Луны; о завершении миссии не сообщалось.

Наконец, в 2020-м году к Луне была отправлена миссия Чанъэ-5, доставившая затем на Землю образцы лунного грунта. И в этой миссии в состав научной аппаратуры также входит АО-спектрометр под названием LMS — Lunar Mineralogical Spectrometer [28, 29]. Прибор представляет собой дальнейшее развитие аппаратуры VNIS: спектральный диапазон расширен до 3.2 мкм и разбит на 2 канала, в каждом из которых установлен АОПФ. После фильтра каждый из каналов разделяется ещё на 2; таким образом, получается 4 поддиапазона с 4 независимыми фотоприёмниками. В одном из них — как и в приборе VNIS, самом коротковолновом, от 0.48 до 0.95 мкм — установлена КМОП-матрица с 512×512 элементами, то есть прибор LMS является “на четверть” видеоспектрометром. АОПФ изготовлены Исследовательским институтом № 26 (англ. «No.26 Research Institutes of China Electronics Technology Group Corporation (CETC-26)»). Таким образом, на данный момент на Луне находятся уже 3 АО-видеоспектрометра, 2 из которых продолжают работу. На 2024-й год запланирован запуск следующей миссии Чанъэ-6.

В рамках Российской лунной программы в 2023-м году должен состояться запуск миссии Луна-25 (Луна-Глоб) — аппарата, который должен совершить посадку в южной полярной области Луны. В состав комплекса научной аппаратуры Луны-Глоб входит прибор ЛИС-ТВ-РПМ [30], состоящий из АО-спектрометра ЛИС (Лунный Инфракрасный Спектрометр), и стереопары камер ТВ-РПМ (ТелеВизионная поддержка Рабочего Поля Манипулятора). Прибор установлен на манипуляторе — специальной «автоматической руке», предназначенной для раскопки лунного грунта. ЛИС-ТВ-РПМ будет проводить съёмку лунной поверхности, а также раскопанных участков грунта. Разработка аппаратуры для Луны-Глоб была начата давно, и фактически спектрометр ЛИС является прототипом прибора ИСЕМ, о котором уже было сказано выше. В дальнейшем планируется запуск миссии Луна-27 (Луна-Ресурс-1) с более тяжёлым посадочным аппаратом, в составе которого также планируется АО-спектрометр.

Реализованные к настоящему моменту эксперименты в хронологическом порядке сведены в табл. 1.

Заключение

Из приведённого обзора видно, что количество АО-приборов в космосе имеет тенденцию к увеличению. Если в 80-е — 90-е годы XX века это были единичные эксперименты, то в последние 10 лет мы видим резкое увеличение числа АО-спектрометров в самых разных миссиях, осуществляемых разными странами. При этом накопленный к настоящему моменту уже достаточно большой опыт позволяет судить о том, в каких случаях применение акустооптики оправдано, а в каких предпочтительнее использовать приборы, построенные на других принципах. Прежде всего, нельзя не заметить, что подавляющее большинство «космических» АО-приборов работают в ближнем ИК-диапазоне. Это связано с наличием «хорошего» материала, в котором осуществляется АО-взаимодействие, — парателлурита, диапазон прозрачности которого находится в видимой и ближней ИК-области спектра. С одной стороны, парателлурит обладает большим АО-качеством, т.е. позволяет получить высокую эффективность дифракции при небольшой мощности звука (~1 Вт), с другой — технология изготовления АОПФ на его основе хорошо разработана и не представляет принципиальных трудностей. Немаловажным также является то обстоятельство, что свойства парателлурита позволяют реализовать в нём широкоугольную геометрию АО-взаимодействия, т.е. осуществлять обработку изображений. В более коротких длинах волн, например в ближнем УФ-диапазоне, столь удачного материала нет — попытки создать для космических исследований АОПФ на кристалле дигидрофосфата калия (KDP) пока что не привели к успеху.

Другой принципиальной особенностью, ограничивающей область применения, является то, что АОПФ является именно *перестраиваемым фильтром*. С одной стороны, в этом есть несомненный плюс: вместо барабана фильтров для перекрытия широкой спектральной области можно обойтись одним элементом (например, ИСЕМ работает в диапазоне 1.1–3.4 мкм, т.е. примерно полторы октавы); при этом для переключения между длинами волн не требуется дополнительная электрическая мощность. Наряду с небольшими габаритами и массой это является непреходящей ценностью в условиях ограниченности ресурсов КА. С другой стороны, необходимость последовательной фильтрации приводит к тому, что время получения полного спектра может составлять несколько минут, а в условиях слабой освещённости — и несколько десятков минут. За это время движущийся по орбите КА может пройти значительное расстояние, и разные части спектра будут соответствовать разным областям в пространстве. Это подсказывает предпочтительность установки АО-спектрометров на посадочные модули: неподвижные посадочные платформы либо роверы (луноходы, марсоходы), проводящие измерения во время остановок.

Таблица 1. *АО-приборы, успешно запущенные в космос по состоянию на* 2022 *год*

Годы	КА (страна)	Прибор (объект исследования)	Страна-изготовитель прибора (АО-элемента)	АО-материал; спектральный диапазон	Примечание
1987–1988	Океан О1 № 2 (СССР)	Трассер-НХМ (поверхность мирового океана Земли)	СССР	SiO_2 0.42–0.78 мкм	Коллинеарный фильтр
1998–2005	SWAS (США)	AOS (межзвёздная среда)	Германия	$LiNbO_3$ 0.54–0.62 мм*;	Дефлектор *диапазон анализируемых радиоволн
1999–2001	Океан-О (Россия/Украина)	Трассер-О (поверхность мирового океана Земли)	Россия	SiO_2 0.42–0.78 мкм	Коллинеарный фильтр
2001 — н.в.	Odin (Швеция)	SMR-AOS (Звёзды, атмосфера Земли)	Швеция (Франция)	$LiNbO_3$ 0.5–3 мм*; длина волны света 0.78 мкм	Дефлектор *диапазон анализируемых радиоволн
2003 — н.в.	Марс-Экспресс (Европейский союз)	СПИКАМ-ИК (атмосфера Марса)	Россия	TeO_2 1–1.7 мкм	Широкоугольный фильтр
2005–2014	Венера-Экспресс (Европейский союз)	СПИКАМ-ИК (атмосфера Марса)	Россия	TeO_2 0.7–1.7 мкм	Широкоугольный фильтр
2005–2014	Венера-Экспресс (Европейский союз)	SOIR (атмосфера Венеры)	Бельгия (Россия)	TeO_2 2.2–4.4 мкм	АОПФ + эшелле
2009–2010	МКС (Япония)	SMILES-AOS (атмосфера Земли)	Япония	$LiNbO_3$ 0.46–0.48 мм*	2 дефлектора *диапазон анализируемых радиоволн
2009–2012	МКС (Россия)	РУСАЛКА (атмосфера Земли)	Россия	TeO_2 0.7–1.7 мкм	АОПФ + эшелле
2013–2016	Чанъэ-3: Юйту (Китай)	VNIS — VIS-NIR (поверхность Луны) VNIS — SWIR (поверхность Луны)	Китай Китай	TeO_2 0.45–0.95 мкм TeO_2 0.9–2.4 мкм	Видеоспектрометр Широкоугольный фильтр
2014 — н.в.	Хаябуса-2 (Япония)	MicrOmega (поверхность астероида)	Франция (Великобритания)	TeO_2 0.9–3.6 мкм	Монохроматор
2016 — н.в.	ЭкзоМарс TGO (Европейский союз/ Россия)	NOMAD-SO (атмосфера Марса) NOMAD-LNO (атмосфера Марса)	Бельгия (Великобритания) Бельгия (Великобритания)	TeO_2 2.2–4.3 мкм TeO_2 2.2–3.8 мкм	АОПФ + эшелле АОПФ + эшелле
2016 — н.в.	ЭкзоМарс TGO (Европейский союз/ Россия)	ACS-NIR (атмосфера Марса)	Россия	TeO_2 0.7–1.6 мкм	АОПФ + эшелле
2018 — н.в.	Чанъэ-4: Юйту-2 (Китай)	VNIS — VIS-NIR (поверхность Луны) VNIS — SWIR (поверхность Луны)	Китай Китай	TeO_2 0.45–0.95 мкм TeO_2 0.9–2.4 мкм	Видеоспектрометр Широкоугольный фильтр
2020 — н.в.	Mars-2020: Perseverance (США)	SuperCam (поверхность Марса)	Франция (Великобритания)	TeO_2 1.3–2.4 мкм	Широкоугольный фильтр
2020 — н.в.	Чанъэ-5 (Китай)	LMS — V-NIR (поверхность Луны) LMS — S-MWIR (поверхность Луны)	Китай Китай	TeO_2 0.48–1.45 мкм TeO_2 1.4–3.2 мкм	Видеоспектрометр/ широкоугольный фильтр Широкоугольный фильтр

В этом случае анализируемая картина является неподвижной и операторы прибора почти не ограничены в выборе времени экспозиции. Тенденция именно к такому использованию АО-спектрометров наблюдается в последнее время. Здесь, однако, необходимо упомянуть ряд приборов на орбитальных КА (SOIR, NOMAD, АЦС), используемых в геометрии солнечного просвечивания атмосферы. В этом случае очень высокий уровень оптического сигнала (прямое Солнце), а также съёмка отдельных интересующих спектральных участков позволяет существенно сократить время измерения.

Таким образом, решение о создании прибора того или иного типа для конкретного космического эксперимента принимается в результате анализа многих факторов: плюсов и минусов разных типов приборов, особенностей геометрии эксперимента, наличия проведённых ранее разработок или существующего прототипа, наконец производственных и технологических возможностей. Можно констатировать, что к настоящему моменту акустооптика уверенно заняла определённую нишу среди других приборов (спектрометров на дифракционных решётках, призменных приборов, фурье-спектрометров и.т.п.).

Что касается «потенциала роста», то следует ожидать, прежде всего, большего количества АО-видеоспектрометров, так как, несмотря на востребованность подобных приборов, пока что они присутствуют лишь на китайских лунных посадочных аппаратах. В более отдалённой перспективе, по мере технологического освоения новых материалов, например таких как KDP в ближнем УФ и теллур в тепловом ИК, возможно также расширение спектральной области применения АО-приборов.

Список литературы

1. *Brillouin, L.* Diffusion de la Lumiure et des Rayons X Par un Corps Transparent Homogine // Annal. de Phys. 1922. Vol. 9. Iss. 17. P. 88–122.
2. *Debye, P., Sears, F.W.* On the Scattering of Light by Supersonic Waves // Proc. Nat. Acad. Sci. 1932. Vol. 18. P. 409–414.
3. *Lucas, R., Biquard, P.* Nouvelles Proprиitиs Optiques des Liquids Soumis a des Ondes Ultrasonores // C. R. Acad. Sci. 1932. Vol. 194. P. 2132–2134.
4. *Nath, N. S. N.* The diffraction of light by high frequency sound waves: generalised theory // Proceedings Mathematical Sciences. 1936. Vol. 4. Iss. 2. P. 222–242.
5. *Рытов С. М.* Дифракция света на ультразвуковых волнах // Изв. АН СССР, сер. физич. 1937. № 2. С. 223–259.
6. *Harris, S.E., Wallace, R.W.* Acousto-Optic Tunable Filter // J. Opt. Soc. Amer. 1969. Vol. 59. Iss. 6. P. 744–747. DOI: 10.1364/JOSA.59.000744
7. *Harris, S.E., Nieh, S.T.K., Winslow, D.K.* Electronically Tunable Acousto-Optic Filter // Appl. Phys. Letts. 1969. Vol. 15. Iss. 10. P. 325–326. DOI: 10.1063/1.1652844
8. *Korablev, O.I., Belyaev, D.A., Dobrolenskiy, Y.S., Trokhimovskiy, A.Y., and Kalinnikov Y.K.* Acousto-optic tunable filter spectrometers in space missions // Appl. Opt. 2018. Vol. 57. Iss. 10. P. C103–C119. DOI: 10.1364/AO.57.00C103
9. *Kramer, H.J.* Observation of the Earth and Its Environment. Survey of Missions and Sensors. Berlin, Heidelberg: Springer Verlag, 2002. 1955 p.
10. *Pustovoit, V.*I, Pozhar, V.E. Acousto-optical spectrometers for Earth remote sensing // Proc. SPIE. 1999. Vol. 3750. P. 243–249. DOI: 10.1117/12.363518
11. *Melnick, G.J., Dalgarno, A., Erikson, N.R.,* et al. The Submillimeter Wave Astronomy Satellite: Science Objectives and Instrument Description // Proc. of ESA Symp. "The Far Infrared and Submillimetre Universe". 1997. P. 189–194. DOI: 10.1117/12.317419
12. *Frisk, U., Hagstrцm, M., Ala-Laurinaho, J., et al.* The Odin satellite. I. Radiometer design and test // Astron. Astrophys. 2003. Vol. 402. P. L27–L34. DOI: 10.1051/0004-6361:20030335
13. *Ochiai, S., Nishibori, T., Ozeki, H., Kikuchi, K., and Manabe, T.* Superconducting Submillimeter-Wave Limb-Emission Sounder on the International Space Station. I: Radiometric and Spectral Calibration and Data Processing // Journal of the National Institute of Information and Communications Technology. 2008. Vol. 55. Iss. 1. P. 83–95.
14. *Кораблёв О. И., Берто Ж.-Л., Калинников Ю. К. и др.* Исследования Марса в эксперименте СПИКАМ-ИК на борту КА Марс-Экспресс. 1. Акустооптический спектрометр СПИКАМ-ИК // Космические исследования. 2006. Т. 44. № 4. С. 1–16.
15. *Bertaux, J.-L., Nevejans, D., Korablev, O., et al.* SPICAV on Venus Express: Three spectrometers to study the global structure and composition of the Venus atmosphere // Planetary and Space Science. 2007. Vol. 55. Iss. 12. P. 1673–1700. DOI: 10.1016/j.pss.2007.01.016
16. *Korablev, O., Fedorova, A., Bertaux, J.-L., et al.* SPICAV IR acousto-optic spectrometer experiment on Venus Express // Planetary and Space Science. 2012. Vol. 65. Iss. 1. P. 38–57. DOI: 10.1016/j.pss.2012.01.002
17. *Baldwin, D.P., Zamzow, D.S., Eckels, D.E., and Miller, G.P.* AOTF-echelle spectrometer for air-ICP-AES continuous emission monitoring of heavy metals and actinides // Proc. SPIE. 1999. Vol. 3534. P. 478–486. DOI: 10.1117/12.339029
18. *Nevejans, D.,* Neefs, E, van Ransbeeck, E, et al. Compact high-resolution spaceborne echelle grating spectrometer with acousto-optical tunable filter based order sorting for the infrared domain from 2,2 to 4,3 μm // Appl. Opt. 2006. Vol. 45. Iss. 21, P. 5191–5206. DOI: 10.1364/AO.45.005191
19. *Кораблёв О. И., Трохимовский А. Ю., Виноградов И. И. и др.* Прибор «РУСАЛКА» для измерения содержания углекислого газа и метана в атмосфере с борта Международной космической станции // Оптический журнал. 2011. Т. 78. № 5. С. 44–58.
20. *Korablev, O., Montmessin, F., Trokhimovsky, A., et al.* Compact echelle spectrometer for occultation sounding of the Martian atmosphere: design and performance // Appl. Opt. 2013. Vol. 52. P. 1054–1065. DOI: 10.1364/AO.52.001054
21. *Pilorget, C.* Microscopie hyperspectrale dans le proche IR pour l'analyse in situ d'echatillons: l'instrument MicroMega a bord des missions Phobos Grunt, Hayabusa-2 et ExoMars // Universite Paris-Sud XI, Institut d'Astrophysique Spatiale (IAS). 2012. P. 254.
22. *Bibring, J.-P., Hamm, V., Langevin, Y., et al.* The micrOmega investigation onboard Hayabusa2 // Space Sci. Rev. 2017. Vol. 208. P. 401–412. DOI: 10.1007/s11214-017-0335-y

23. *Bibring, J.-P., Hamm, V., Pilorget, C., Vago, J.L., and Team, M.* The micrOmega investigation onboard ExoMars // Astrobiology. 2017. Vol. 17. P. 621–626. DOI: 10.1089/ast.2016.1642
24. *Neefs, E., Vandaele, A.C., Drummond, R., et al.* NOMAD spectrometer on the ExoMars trace gas orbiter mission: part 1-design, manufacturing and testing of the infrared channels // Appl. Opt. 2015. Vol. 54. P. 8494–8520. DOI: 10.1364/AO.54.008494
25. *Trokhimovskiy, A., Korablev, O., Kalinnikov, Y., et al.* Near-infrared echelle-AOTF spectrometer ACS-NIR for the ExoMars trace gas orbiter // Proc. SPIE. 2015. Vol. 9608. P. 960809. DOI: 10.1117/12.2190369
26. *Dobrolenskiy, Y., Mantsevich, S., Evdokimova, N., et al.* Acousto-Optic Spectrometer ISEM for ExoMars-2020 space mission: ground measurements and calibrations // Proc. SPIE. 2019. Vol. 11210. P. 112100F-1–112100F-11.
27. *Perez, R., Pares, L., Newell, R., et al.* The supercam instrument on the NASA Mars 2020 mission: optical design and performance // Proc SPIE. 2017. Vol. 10562. P. 105622K-1–105622K-9. DOI: 10.1117/12.2296230
28. *Zhiping, H., Chunlai, L., Rui, X., et al.* Spectrometers based on acousto-optic tunable filters for in-situ lunar surface measurement // J. Appl. Remote Sens. 2019. Vol. 13 (2). P. 027502–1–027502–11. DOI: 10.1117/1.JRS.13.027502
29. *Rui, X., Chunlai, L., Liyin, Y., et al.* Lunar Mineralogical Spectrometer on Chang'E-5 Mission // Space Sci. Rev. 2022. Vol. 218. Iss. 5. P. 1–22. DOI: 10.1007/s11214-022-00910-6
30. *Манцевич С. Н., Доброленский Ю. С., Евдокимова Н. А. и др.* Лунный инфракрасный спектрометр с телевизионной поддержкой рабочего поля манипулятора (ЛИС-ТВ-РМП) // Астрон. вестн. 2021. Т. 55. № 6. С. 550–561.

Поступила 25 июля 2023 г.

35 YEARS OF SPACE ACOUSTO-OPTICS

YU.S. DOBROLENSKY, O.I. KORABLEV, A.YU. TROKHIMOVSKY,
D.A. BELYAEV, AND YU.K. KALINNIKOV

doi: 10.25210/jfop-2302-TYWQDV | **edn:** TYWQDV

The paper gives a review of space applications of the instruments using acousto-optic (AO) effect. Earth remote sensing as well as Lunar and planetary studies have been observed. Brief description of each instrument, operating principle and scientific goals are given. We discuss the most typical areas of AO instruments applications, their pros and cons form the point of view of space experiment.

Уважаемые читатели!

Журнал включен:

- В ***Российский индекс научного цитирования*** (***РИНЦ***).
- В базу данных ***Russian Science Citation Index*** (***RSCI***) на платформе ***Web of Science.***
- В ***Перечень рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук.***

АКУСТООПТИЧЕСКИЕ И ОПТОАКУСТИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ И УСТРОЙСТВА

УДК 534:535

НЕКОТОРЫЕ ЭТАПЫ РАЗВИТИЯ АКУСТООПТИКИ ВО ВНИИ ФИЗИКО-ТЕХНИЧЕСКИХ И РАДИОТЕХНИЧЕСКИХ ИЗМЕРЕНИЙ

© Автор, 2023
doi: 10.25210/jfop-2302-RNFHAG | **edn:** RNFHAG

Мазур М. М. — д.т.н., нач. лаб., Всероссийский научно- исследовательский институт физико-технических и радиотехнических измерений, Менделеево. E-mail: s-mmazur@mail.ru

Аннотация
Работа посвящена некоторым важным эпизодам истории развития исследований и разработок в области акустооптики во ВНИИ физико-технических и радиотехнических измерений, которая насчитывает 50 лет, связана с деятельностью выдающего ученого, академика Российской академии наук В.И. Пустовойта и созданного им научного коллектива. Основное внимание уделено технологии конверсии продольной ультразвуковой волны в медленную сдвиговую в акустооптических ячейках из парателлурита. Описаны отличительные свойства и влияние, которое эта технология оказала на развитие акустооптического приборостроения во ВНИИФТРИ.

Ключевые слова: *акустооптика, преобразование акустических мод*

Abstract
The work is devoted to some important episodes in the history of the development of research and development in the field of acousto-optics at the Institute of Physics and Technology and Radio Engineering Measurements, which dates back 50 years, is associated with the activities of an outstanding scientist, Academician of the Russian Academy of Sciences V.I. Pustovoit and the scientific team created by him. The main attention is paid to the technology of converting a longitudinal ultrasonic wave into a slow shear wave in acousto-optic cells made of paratellurite. The distinctive properties and the influence that this technology has had on the development of acousto-optic instrumentation at VNIIFTRI are described.

Keywords: *acousto-optics, acoustic mode conversion*

Введение

В 1966 году во Всесоюзном научно-исследовательском институте физико-технических и радиотехнических измерений (Менделеево) была создана лаборатория № 301, которую возглавил молодой и активный Владислав Иванович Пустовойт, кандидат физико-математических наук, закончивший аспирантуру Физического института Академии наук (ФИАН). Перед лабораторией в то время ставились следующие научные направления: исследование акустоэлектронных явлений, измерение упругих и пьезоэлектрических свойств кристаллических материалов в широком температурном диапазоне, создание устройств высокочастотной акустики. На протяжении первых 6 лет в лаборатории был выполнен большой объем очень интересных работ по физике акустоэлектронных явлений, были измерены упругие и пьезоэлектрические свойства ряда новых кристаллов и керамик, были разработаны и поставлены заказчикам устройства высокочастотной акустики, среди которых линии задержки на диапазон рабочих частот 200–800 МГц. Эти результаты измерений упругих и пьезоэлектрических свойств кристаллов в дальнейшем были включены в справочники как наиболее достоверные.

По результатам этих и других работ по этой тематике были защищены диссертации сотрудниками института Ф.Л. Визеном, Г.С. Падо, Е.Ф. Токаревым, В.М. Левиным, Л.А. Чернозатонским, Р.Г. Маевым, В.Н. Масленниковым, И.А. Даньковым, Ю.П. Мухортовым, М.М. Мазуром, М.В. Балахановым, В.П. Тенишевым, Т.Г. Вискун и некоторыми другими исследователями. После защиты диссертации в Институте кристаллографии АН к технологическим работам по созданию ультразвуковых излучателей подключился З.А. Магомедов. Уже по акустооптической тематике были защищены диссертации В.Э. Пожаром и В.Н. Жогуном. С течением времени лаборатория разрослась до самостоятельного отделения, а часть исследователей перешли в другие организации, где создали свои научные коллективы, развивающие научные направления, связанные с акустооптикой и акустикой. В Институт биохимической физики РАН перешли В.М. Левин, Р.Г. Маев и Л.А. Чернозатонский, где до сих пор активно работает Лаборатория акустической микроскопии (рук. В.М. Левин). А З.А. Магомедов создал и возглавил научно-техническое предприятие «Сигма-Оптик» (г. Зеленоград), где разрабатываются и изготавливаются уникальные системы акустического контроля добычи и транспортировки природного газа, а также акустооптические приборы и устройства.

Мазур М.М. Некоторые этапы развития акустооптики во ВНИИ физико-технических и радиотехнических измерений // Физические основы приборостроения. 2023. Т. 12. № 2(48). С. 12-24. DOI: 10.25210/jfop-2302-RNFHAG. EDN: RNFHAG

В 1995 году В.И. Пустовойт был назначен директором Центрального конструкторского бюро уникального приборостроения Российской академии наук (ЦКБ УП РАН, Москва), впоследствии преобразованного по его инициативе в Научно-технологический центр (НТЦ), где был основан Отдел акустооптических информационных технологий (рук. Пожар В. Э.). Впоследствии Л. А. Чернозатонский, Р.Г. Маев, В.Э. Пожар, М.М. Мазур и В.Н. Жогун защитили докторские диссертации.

Начало развития акустооптики во ВНИИФТРИ

В 1972 г. после защиты В.И. Пустовойтом диссертации на соискание звания доктора физико-математических наук тематика работ лаборатории была расширена и в нее включена акустооптика. К этому времени в лаборатории была уже неплохая технологическая база: макетная мастерская для выполнения токарных, фрезерных и слесарных работ, участок обработки оптических материалов, установка для ориентации кристаллов (рентгеновский гониометр), а также группа технологов для создания электроакустических ультразвуковых (УЗ) пьезопреобразователей. Первые пьезопреобразователи были созданы на основе эпитаксиальных пленок из сульфида кадмия (CdS). В короткое время были заключены договоры на разработку и создание самых разнообразных акустооптических (АО) устройств: модуляторов, дефлекторов, фильтров.

В то время практически единственным материалом, из которого можно было сделать АО фильтр, был кристаллический кварц. Первый такой фильтр, получивший название «Фотон», был создан в середине 70-х годов [1], и эта разработка оказалась наиболее успешной. Это был фильтр, работающий по коллинеарной схеме на проход, в котором совмещение светового луча со звуковым пучком происходит в призме с внутренним поворотным зеркалом. Создание этого фильтра дало старт программе «Трассер», направленной на создание бортовых АО спектрометров, и в том числе спутниковых. Достаточно длительное время в отделе продолжали заниматься совершенствованием АО фильтров на кристаллическом кварце (рис. 1), были созданы фильтры, работающие в ультрафиолетовом, видимом и ближнем инфракрасном (ИК) диапазонах, вместе перекрывающие область от 240 до 1200 нм. Вначале в этих АО фильтрах использовались пленочные УЗ пьезопреобразователи из CdS, затем была разработана и освоена клеевая технология прикрепления УЗ пьезопреобразователей из монокристаллического ниобата лития ($LiNbO_3$) [2]. Руководил разработкой этих АО фильтров Ф.Л. Визен

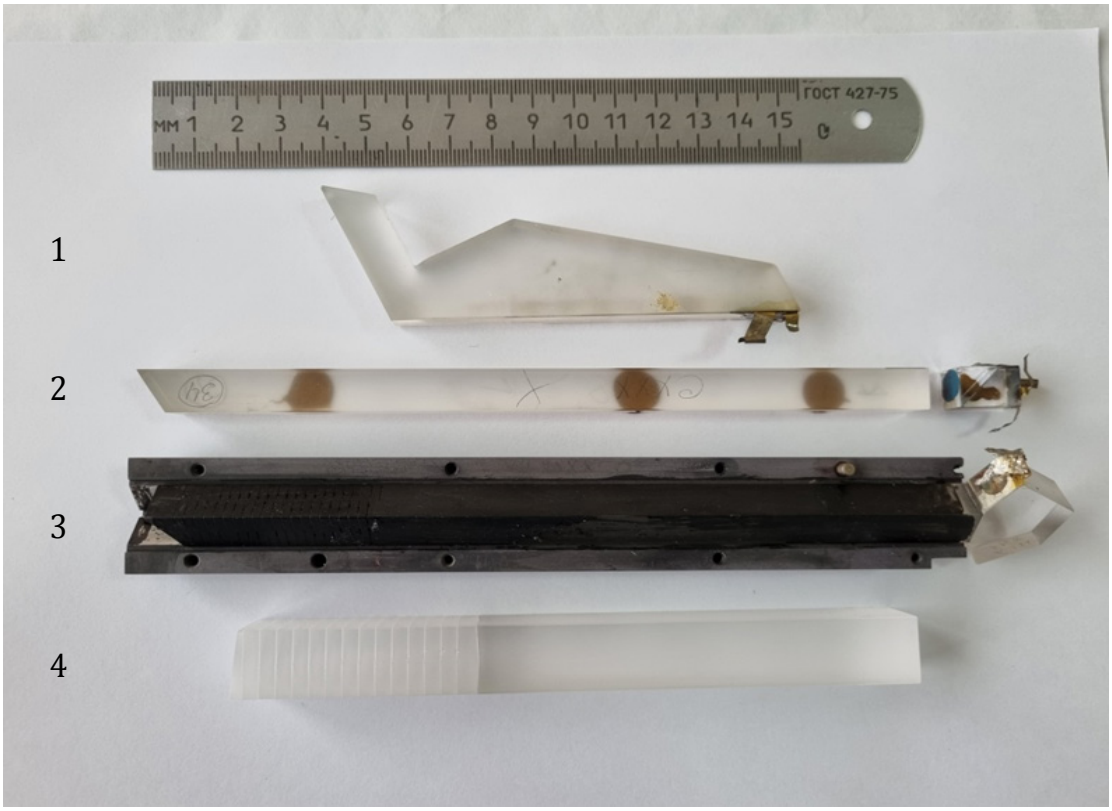
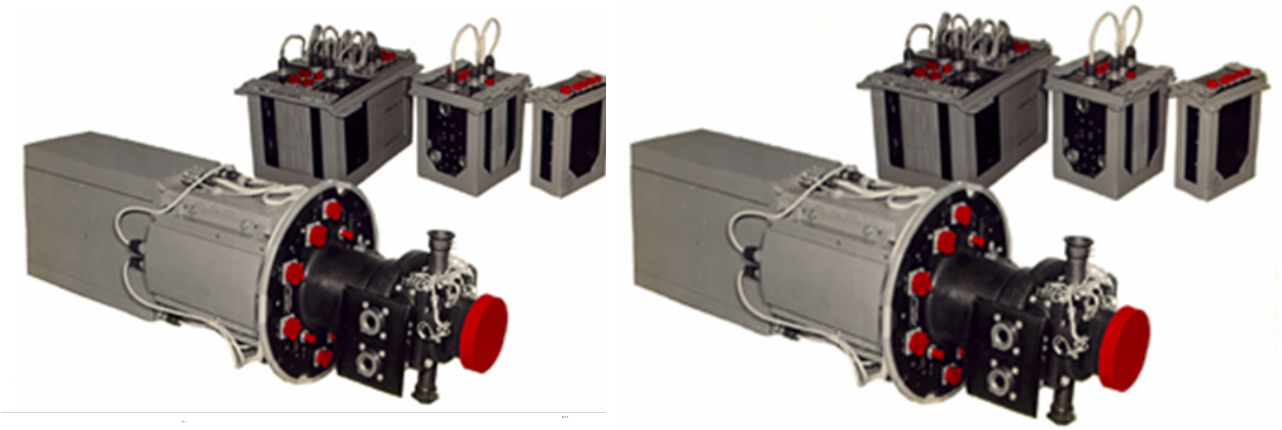


Рис. 1. *АО ячейки из кварца.* 1 — *квазиколлинеарная;* 2, 3 — *коллинеарные, работающие на проход;* 4 — *коллинеарная, работающая на отражение.*

На основе этих кварцевых АО фильтров во ВНИИФТРИ был разработан и изготовлен ряд спектрометров и специализированных спектральных оптических приборов (см. рис. 2–4, ниже).



а) *б)*

Рис. 2. *Бортовые АО спектрометры и контрольно-диагностическая аппаратура:*
а) «Трассер-О»; б) «Трассер-АС».

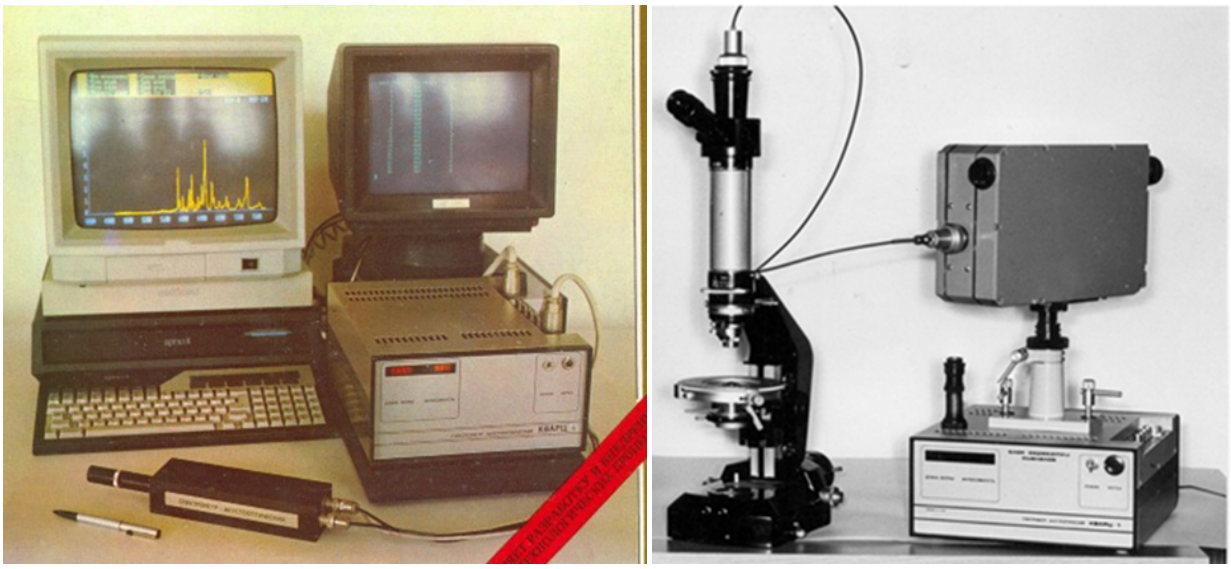
В бортовых приборах (рис. 2), разработанных под руководством В.И. Пустовойта, Ю.К. Калинникова и В.Н. Жогуна, использовались коллинеарные АО ячейки на проход (поз. 2, 3 на рис. 1) видимого диапазона 400–700 нм. Первый советский АО спектрометр «Трассер-НХМ» был запущен на околоземную орбиту в 1988 году [3].

В лабораторных приборах, разработанных под руководством В.Н. Жогуна, (рис. 3) используются коллинеарные АО ячейки, работающие на отражение (поз. 4 на рис. 1) в видимой области спектра (440–750 нм) или в инфракрасном (ИК) диапазоне (600–1150 нм).

В спектрометрическом газоанализаторе «САГА», разработанном под руководством М.М. Мазура и В.Н. Шорина, используется двойной монохроматор на квазиколлинеарных АО ячейках (поз. 1 на рис. 1) УФ диапазона (250–450 нм).

Технология создания фильтров из молибдата кальция

Следующим шагом в разработке АО спектрометров стали приборы, в которых использовалась АО ячейки из молибдата кальция ($CaMoO_4$) [4, 5]. Использование этого материала позволяет снизить мощность управляющего высокочастотного (ВЧ) электрического сигнала, подаваемого на УЗ пьезопреобразователь, и увеличить угловое поле зрения.



а) *б)*

Рис. 3. *Лабораторные АО спектрометры на кристаллах кварца:*
а) видимого диапазона «Кварц-4», б) ИК спектрометр «Кварц-2».

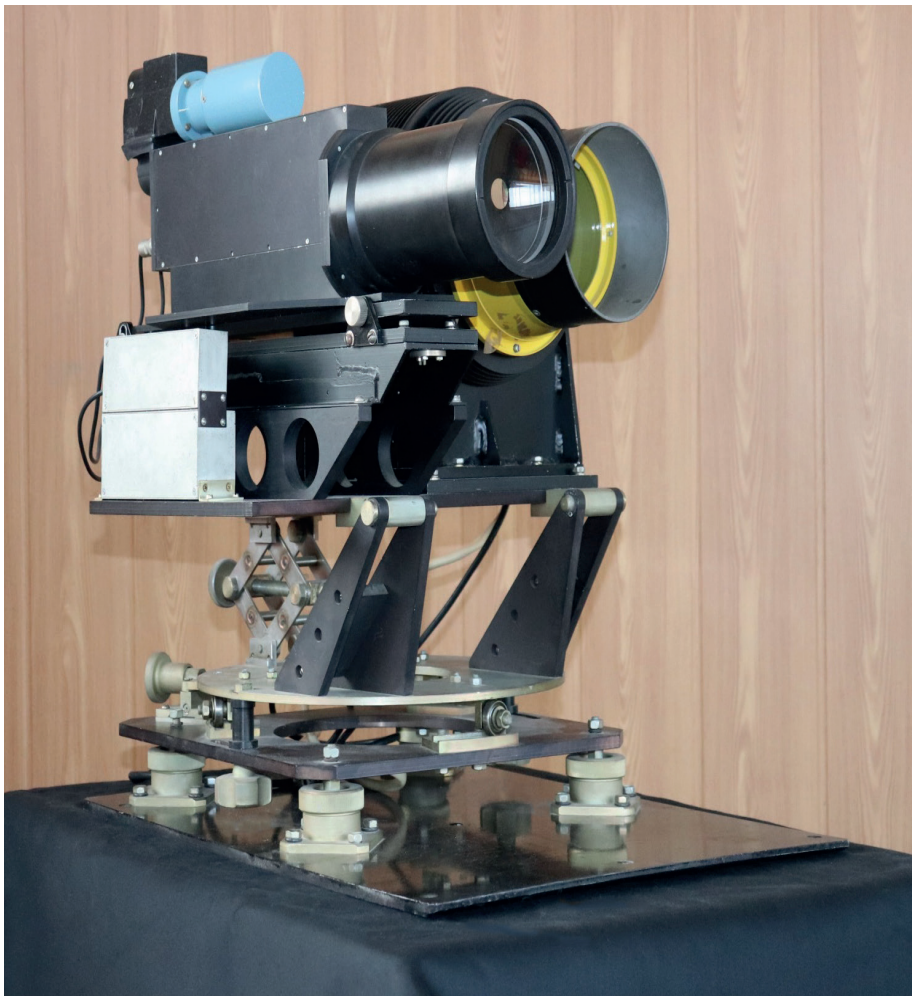


Рис. 4. *Трассовый газовый анализатор «САГА».*

Однако молибдат кальция обладает значительной дисперсией диэлектрической проницаемости, что ограничивает спектральный диапазон использования этого материала областью 440–1200 нм. На этом материале под руководством М.М. Мазура и В.Н. Шорина был разработан рамановский спектрометр с двойным монохроматором (рис. 5).

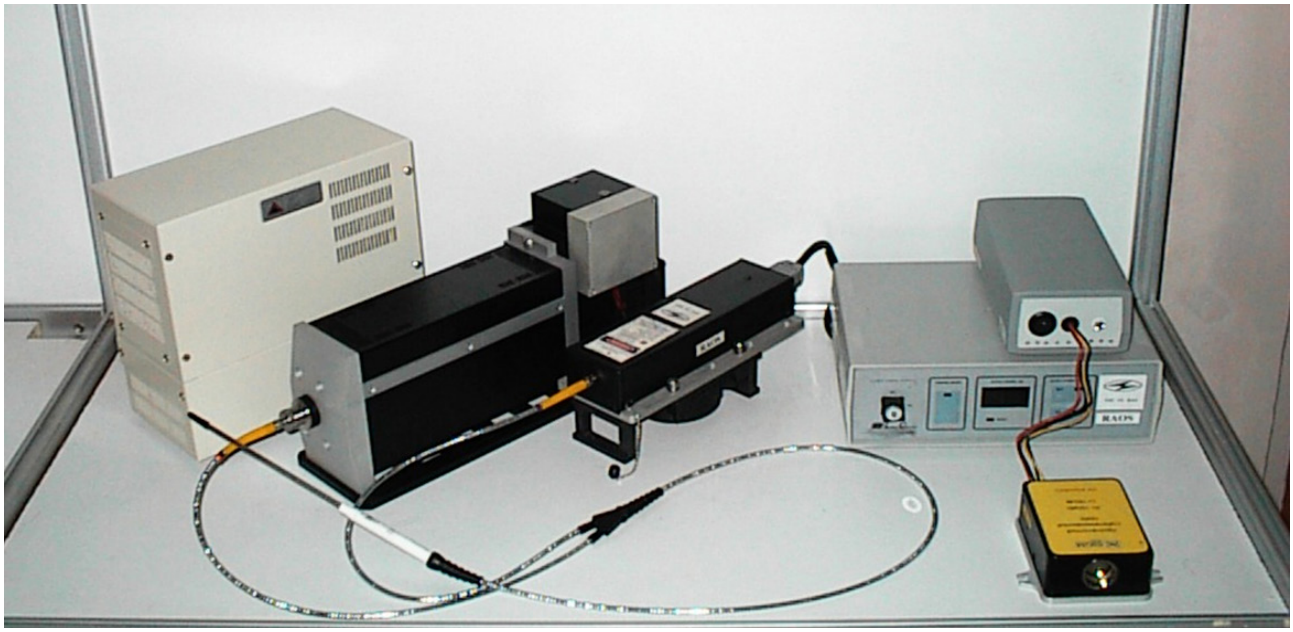


Рис. 5. *Рамановский спектрометр на основе коллинеарных АО фильтров из* $CaMoO_4$.

При использовании в качестве возбуждения лазера с длиной волны 532 нм регистрируются спектры комбинационного рассеяния с частотным сдвигом в диапазоне 100–3500 см$^{-1}$. В разработанных АО ячейках сдвиговая ультразвуковая волна, распространяющаяся вдоль оси *X* кристалла $CaMoO_4$, необходимая для анизотропной дифракции, создавалась путем конверсии продольной акустической моды, распространяющейся вдоль оси *Z*. При выводе из области АО взаимодействия сдвиговая волна отражалась в направлении, которому соответствует нулевое значение акустооптического качества для света, распространяющегося вдоль оси *X* [6], что исключает паразитную дифракцию на отраженном пучке.

Технология создания фильтров на парателлурите

В результате накопленного опыта использования разработанных приборов стало понятно, что для многих применений АО фильтров достаточно менее высокое спектральное разрешение, чем в коллинеарных АО фильтрах из кварца. В то же время на практике необходимо существенное снижение управляющей ВЧ мощности. Решением этой проблемы было создание неколлинеарных АО фильтров из кристаллов парателлурита (TeO_2) с использованием сдвиговой волны, что, как было впервые продемонстрировано в работе [7], позволяло увеличить полосу пропускания монохроматора, его угловую апертуру и радикально снизить управляющую мощность. В результате осознания этой информации во ВНИИФТРИ по инициативе В.М. Епихина и Ю.К. Калинникова активно начали заниматься созданием АО фильтров на парателлурите, и первый макет был создан в конце 70-х годов [8]. Источником сдвиговой волны в нем был конвертор из плавленого кварца, преобразующий продольную УЗ волну в сдвиговую.

Способы создания эффективного широкополосного ультразвукового пьезопреобразователя на парателлурите

Однако на пути разработки работоспособного АО фильтра из кристалла парателлурита возникла проблема создания эффективного широкополосного УЗ пьезопреобразователя, обеспечивающего генерацию сдвиговой волны в направлении распространения медленной акустической моды. В ходе исследований были рассмотрены и опробованы следующие варианты решения этой проблемы:

1. применение конвертора из плавленого кварца для преобразования продольной УЗ волны в сдвиговую;
2. использование в качестве УЗ излучателя сдвиговых волн пьезоэлектрических кристаллов с малым акустическим импедансом и большой константой электромеханической связи, например, иодата лития ($LiIO_3$) для хорошего акустического согласования пьезопреобразователя с кристаллом парателлурита;
3. изготовление УЗ пьезопреобразователя из ниобата лития нужной ориентации с использованием просветляющего четвертьволнового слоя из пленки индия;
4. конверсия продольной УЗ волны в медленную сдвиговую непосредственно в АО ячейке.

Первый способ оказался неудобным и конструктивно, и технологически. Второй подход также оказался неудачным — по-видимому, глубина разрушенного слоя при обработке кристалла превышала толщину пластинки УЗ пьезопреобразователя. Также не эффективным оказался третий подход: изготовление пьезопреобразователя из ниобата лития нужной ориентации (срезов *X* или *Y*+163°) с использованием просветляющего четвертьволнового слоя из пленки In. Для этого потребовались дополнительное технологическое оборудование и значительные усилия в отработке технологии. (Следует отметить, что в течение нескольких лет такие технологии были отработаны и этот способ создания УЗ пьезопреобразователей во ВНИИФТРИ также был реализован). Но на тот момент единственным перспективным оставался способ конверсии продольной УЗ волны в медленную сдвиговую при отражении в АО ячейке.

Технология конверсии акустических волн в кристалле парателлурита

Метод возбуждения медленной УЗ волны путем конверсии мод имеет ряд достоинств, особенно, для хорошо освоенной во ВНИИФТРИ технологии приклеиваемых УЗ пьезопреобразователей. Этот метод возбуждения (рис. 6) в парателлурите имеет некоторые особенности, проанализированные ниже.

Сравнение характеристик УЗ излучателей продольных и сдвиговых волн проведено с использованием формулы расчета сопротивления излучения R_A [9], характеризующего пьезопреобразователь и равного отношению излучаемой мощности к квадрату питающего тока

$$R_A = \frac{1}{8K^2 C_0 f_p} \frac{Z}{Z_p} M_0 . \qquad (1)$$

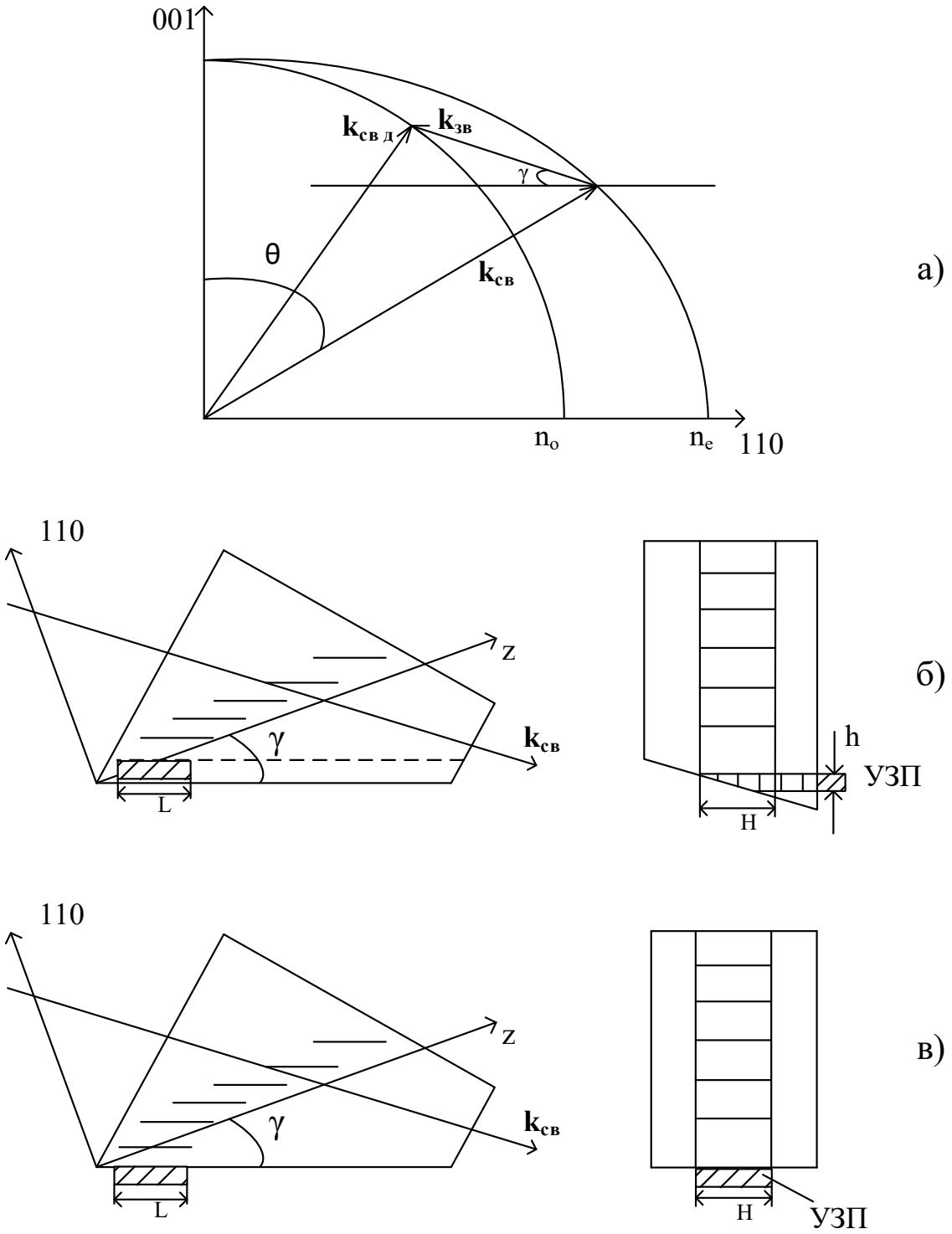


Рис. 6. *Схема АО фильтра из TeO_2 с возбуждением медленной УЗ моды: а) векторная диаграмма дифракции,* $\mathbf{k}_{св}$, $\mathbf{k}_{свд}$, $\mathbf{k}_{зв}$ *— волновые векторы падающей и дифрагированной световых волн и звуковой волны; б) схема АО ячейки с излучателем продольной УЗ моды и ее конверсией в сдвиговую; в) схема АО ячейки с излучателем сдвиговой моды.*

Эта формула не учитывает влияние электродов, клеевого слоя и четвертьволнового согласующего слоя. Здесь K — величина электромеханической связи, C_0, , f_p — емкость, акустический импеданс и резонансная частота УЗ пьезопреобразователя, Z — акустический импеданс среды, M_0 — форм-фактор пьезопреобразователя. Расчет величины сопротивления излучения для двух АО ячеек с излучателем из ниобата лития (*б* и *в* на рис. 6) при равных сечениях ультразвукового пучка с характеристиками материалов, взятыми из справочника [10], дает отличие примерно в 40 раз (см. табл. 1).

Таблица 1. *Характеристики АО ячеек с излучателем из ниобата лития*

Излучаемая УЗ волна	Резонансная частота, МГц	Размер, мм	Сопротивление излучения, Ом
продольная	100	10×1	56
сдвиговая	100	10×6	1.4

Это отличие объясняется следующими факторами. Во-первых, при конверсии размер звукового пучка сокращается примерно в 6 раз, из-за чего ширина, а соответственно и емкость сдвигового УЗ пьезопреобразователя во столько же раз больше, чем у продольного. Во-вторых, из-за различия скоростей толщина сдвигового преобразователя примерно в 1,5 раза меньше толщины продольного. В-третьих, в направлении [110] для сдвигового пьезопреобразователя отношение $Z / Z_p \approx 0.2$, тогда как для продольного $Z / Z_p \approx 0{,}8$.

Следует отметить, что максимальная ширина полосы УЗ пьезопреобразователя обеспечивается [9] при выполнении условия $K\sqrt{2}Z_p / Z = 1$. Для АО фильтров с конверсией $K\sqrt{2}Z_p / Z = 0{,}86$, что очень близко к оптимальному значению. Кроме того, как показали расчеты, выполненные Т.Г. Вискун, при конверсии в АО ячейке коэффициент преобразования энергии продольной волны в медленную сдвиговую достигает 90% (а для $\gamma = 7^\circ$ даже 93%). В результате две другие ультразвуковые волны, образующиеся при отражении (квазипродольная и квазисдвиговая), способны вызывать дифракцию (паразитную) в несколько сотен раз меньше, чем медленная сдвиговая.

На основе этих оценок были изготовлены АО фильтры с конверсией продольной УЗ волны в сдвиговую, что позволило продемонстрировать их работоспособность и удобство изготовления и использования [11]. Как в дальнейшем показал анализ литературы, идея конверсии в то же время независимо была реализована авторами работы [12], в которой, однако, не было анализа достижимого коэффициента конверсии, а соответственно и степени влияния на функцию пропускания АО фильтра двух других звуковых волн, возникающих при отражении.

С использованием конверсии продольной звуковой волны в медленную сдвиговую были разработаны и изготовлены АО фильтры многих типов с различными направлениями распространения медленной сдвиговой УЗ волны (γ от 5 до 18°). Эти АО фильтры использовались в различных устройствах, работающих во всем спектральном диапазоне прозрачности парателлурита (от 0.4 до 4.4 мкм). Впоследствии была разработана технология изготовления комплементарных АО ячеек из парателлурита с конверсией ультразвуковой волны, необходимых для создания двойных АО монохроматоров, содержащих два АО фильтра, у которых окна пропускания совпадают с высокой точностью [13, 14].

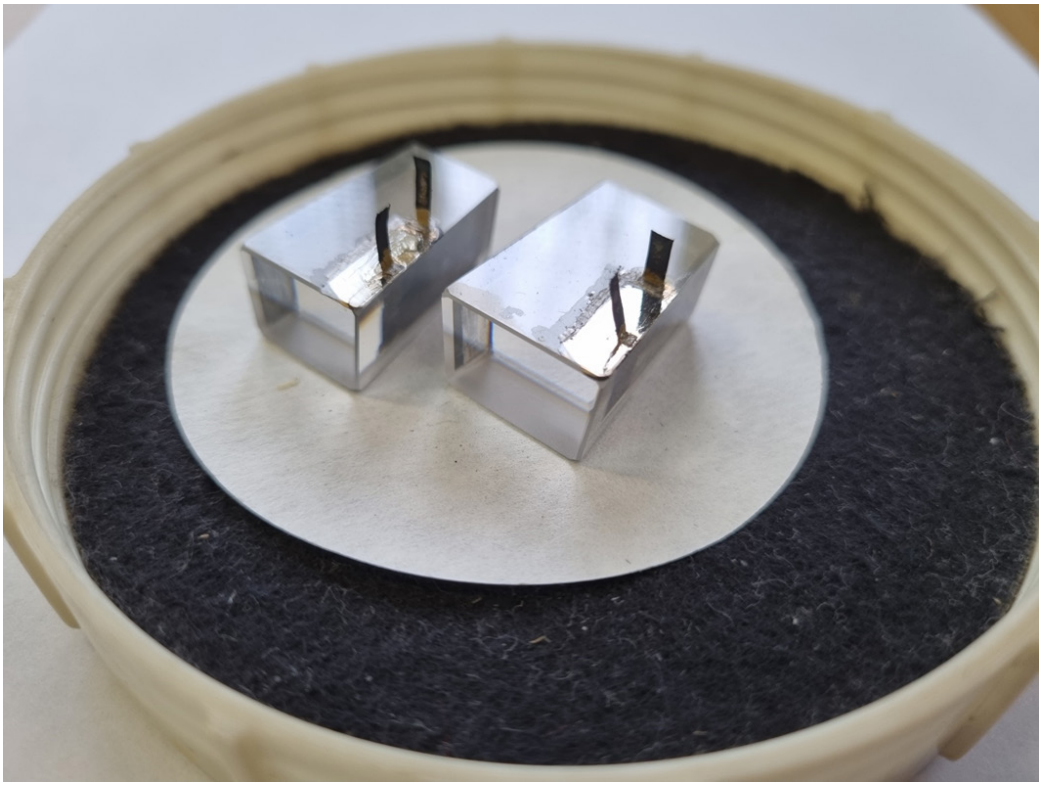


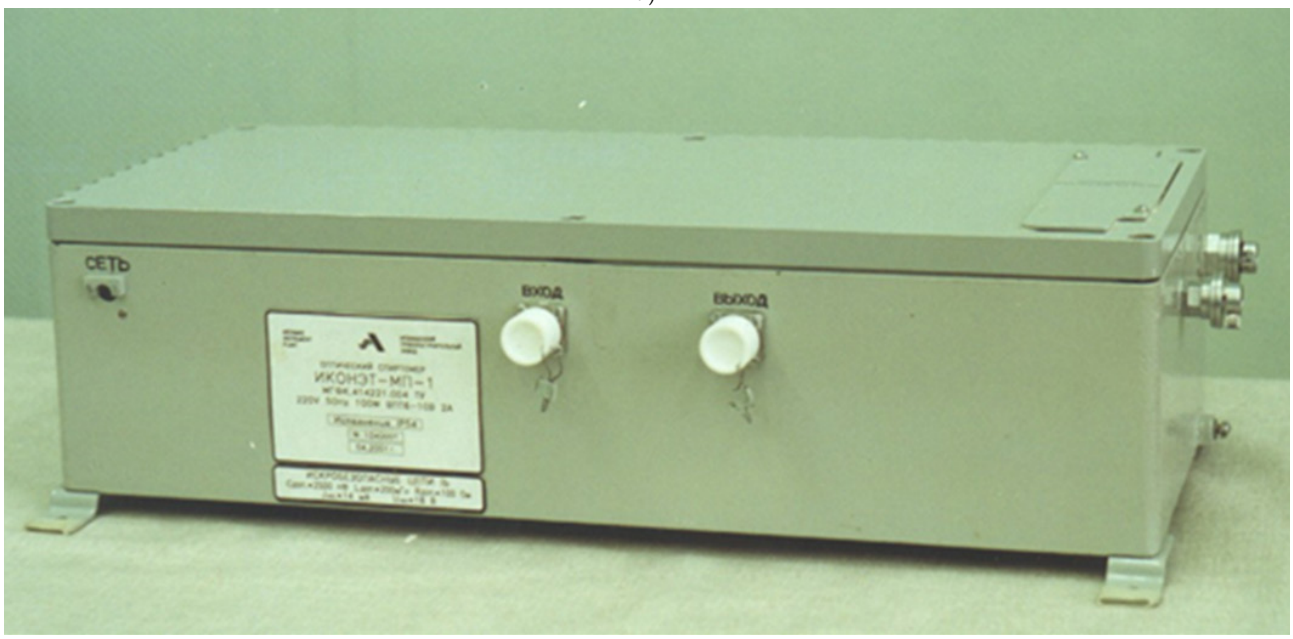
Рис. 7. *Пара комплементарных АО ячеек с конверсией УЗ волн.*

Результаты использования

В дальнейшем метод конверсии УЗ волн, благодаря всем перечисленным преимуществам, получил распространение не только во ВНИИФТРИ, но и в организациях, использующих технологию клеевого прикрепления УЗ излучателей: фирма «Сигма-Оптик», НТЦ УП РАН, Арзамасский приборостроительный завод. Абсолютное большинство изготовленных в этих организациях АО спектральных устройств используют технологию конверсии [15].

Среди приборов, в которых использован разработанный метод конверсии волн, семейство спиртомеров, лазерных спектрометров и микровидеоспектрометров (рис. 8–10).

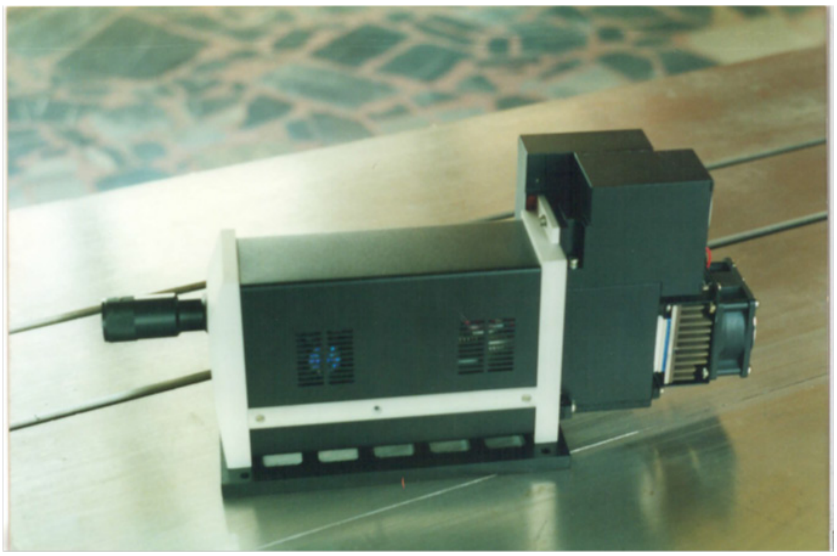
а)



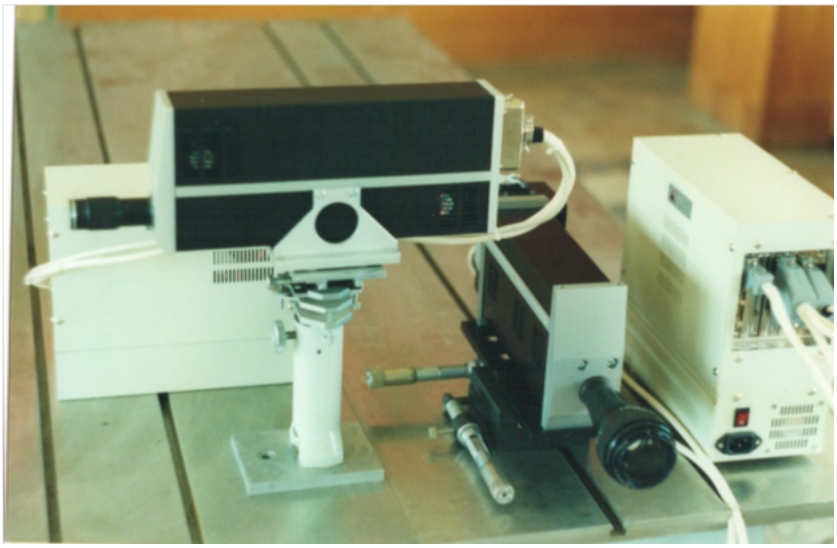
б)

Рис. 8. *Спектрометрические спиртомеры на основе АО фильтров:*
а) лабораторный измеритель крепости спиртосодержащих растворов «ИКОНЭТ-М»,
б) измеритель объемной доли этанола в потоке в промышленной линии «ИКОНЭТ-МП».

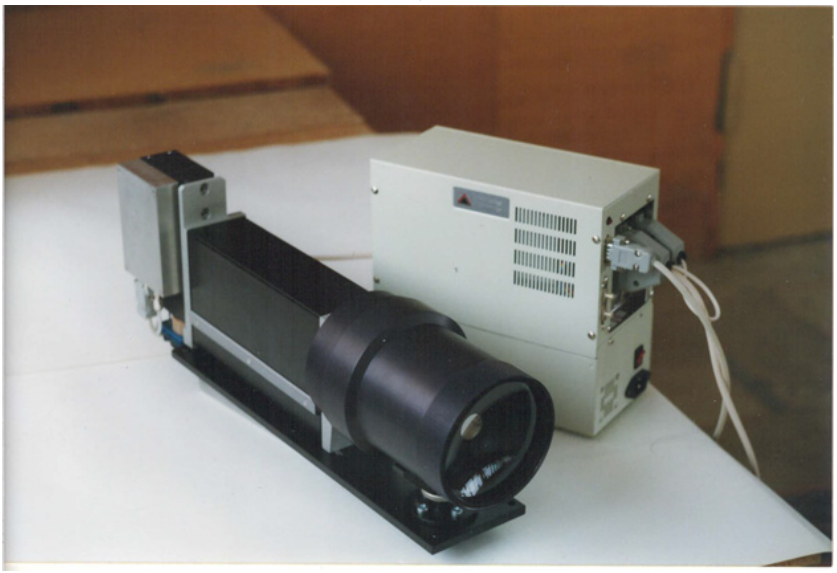
Спиртомеры (рис. 8 (а, б)) изготавливались фирмой «Сигма-Оптик» и Арзамасским приборостроительным заводом соответственно. В этих приборах использовался однокристальный монохроматор с конверсией УЗ пучка и разведением световых пучков без использования поляризаторов. Всего по настоящее время выпущено около 1000 таких приборов, которые успешно работают на поточных линиях в достаточно жестких условиях.



а)



б)

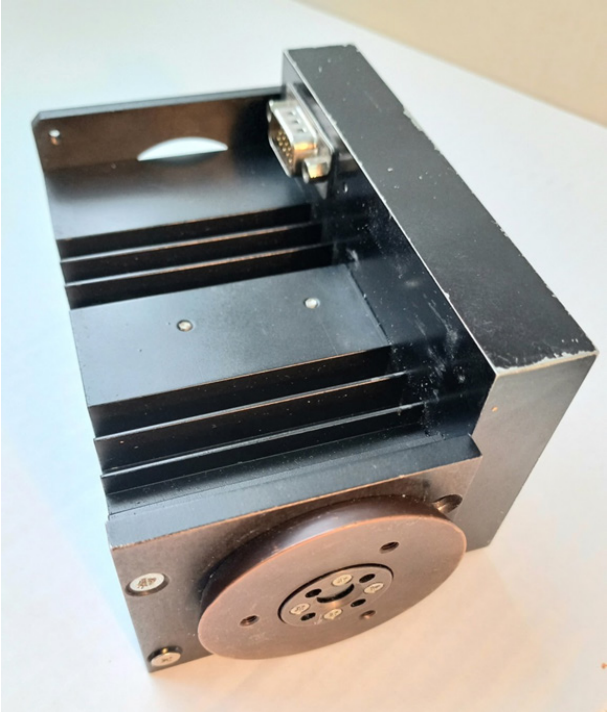


в)

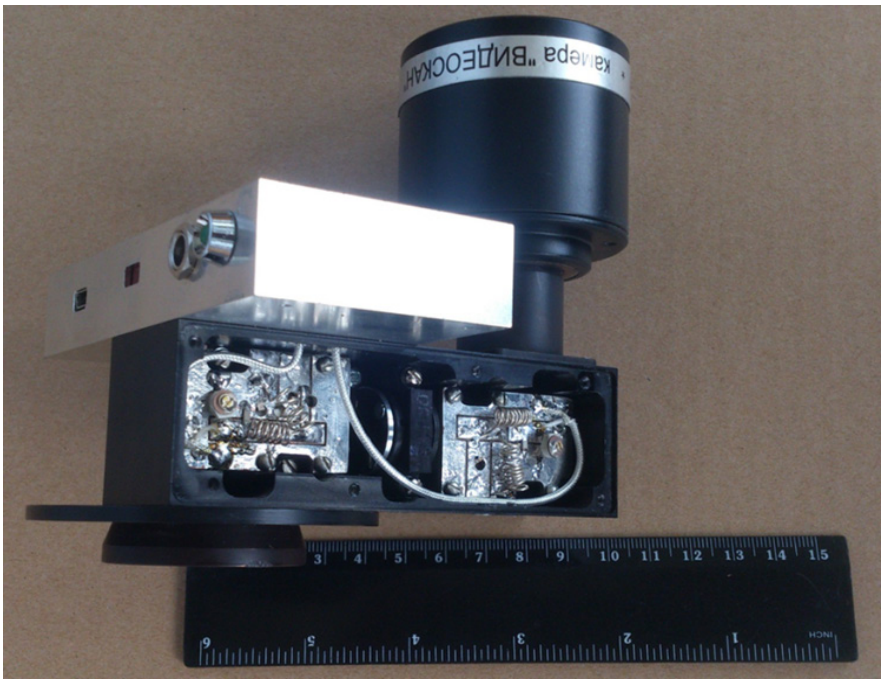
Рис. 9. *Спектрорадиометры на основе двойных АО монохроматоров с конверсией мод: для рамановской спектроскопии (а), для ИК и для видимого диапазонов (б), для мониторинга удаленных объектов (в).*

Для приборов, которые анализируют достаточно широкий спектральный диапазон и требуют достаточно высокой степени монохроматизации излучения, используются схемы двойных АО монохроматоров: в видимом и ближнем ИК диапазонах с поляризационным разделением, а в среднем ИК диапазоне — бесполяризаторные [14]. Весьма подробный список АО монохроматоров, АО спектрометров и специализированных АО приборов, разработанных во ВНИИФТРИ, приведен в обзорной работе [15] с указанием их особенностей. На рис. 9. представлены фотографии нескольких типов АО спектрометров с двойными монохроматорами, разработанных под руководством М.М. Мазура и В.Н. Шорина.

Отдельный класс устройств представляют собой АО монохроматоры, предназначенные для передачи спектральных изображений (рис. 10).



а)



б)

Рис. 10. *Двойные АО монохроматоры для получения спектральных изображений в микроскопах: а) монохроматор АВМ*-1 [16]*; б) светосильный АО монохроматор с видеокамерой* [17].

В настоящее время основные усилия разработчиков АО устройств во ВНИИФТРИ сосредоточены на разработке различных типов АО частотосдвигателей и АО модуляторов [18–20]. В АО ячейках этих устройств также часто используется конверсия УЗ мод, причем не только для возбуждения волн, но и для их поглощения. В последнем случае продольная рабочая УЗ волна конвертируется в сдвиговую, поглощение которой более эффективно. Во ВНИИФТРИ разрабатываются и изготавливаются частотосдвигатели как для лазерных пучков (рис. 11), так и для излучения, подаваемого по световоду (рис. 12).

Особенностью разрабатываемых модуляторов (рис. 13) является их относительно высокая лучевая стойкость, что обусловлено использованием ячеек из калий-гадолиниевого вольфрамата ($KGdWO_4$).

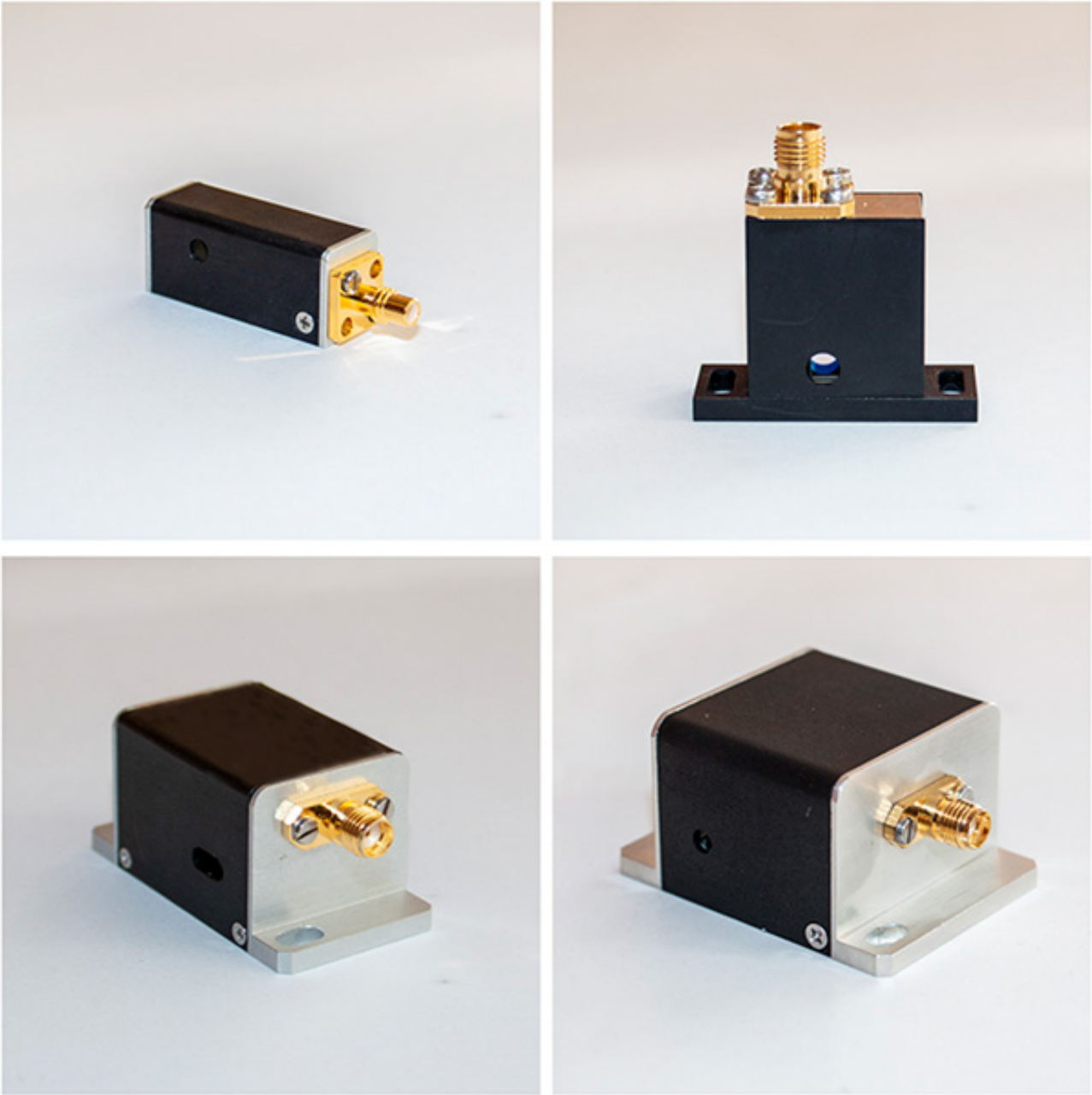


Рис. 11. *Различные типы частотосдвигателей на кристаллах парателлурита для сдвига частоты лазерного излучения на величину от* 5 *до* 500 *МГц.*

Выводы

Использование технологии конверсии продольной УЗ волны в медленную сдвиговую моду в кристаллах парателлурита плюс технологии клеевого прикрепления УЗ излучателей позволяет сравнительно легко обеспечить изготовление АО ячеек различных конструкций, что дало возможность поставить заказчикам тысячи самых разнообразных устройств и приборов с АО ячейками на кристаллах парателлурита.

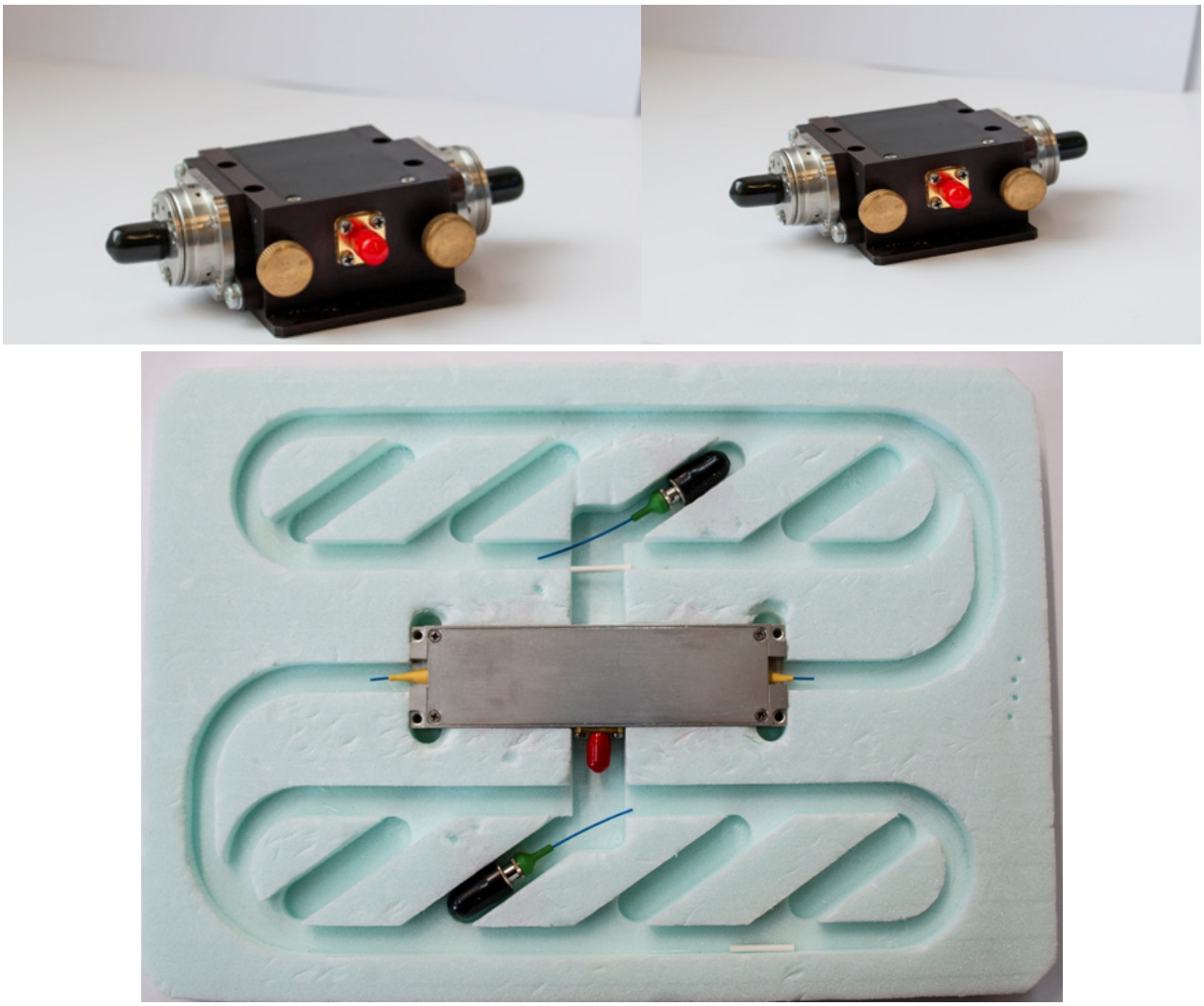


Рис. 12. *Волоконные частотосдвигатели разработки ВНИИФТРИ.*

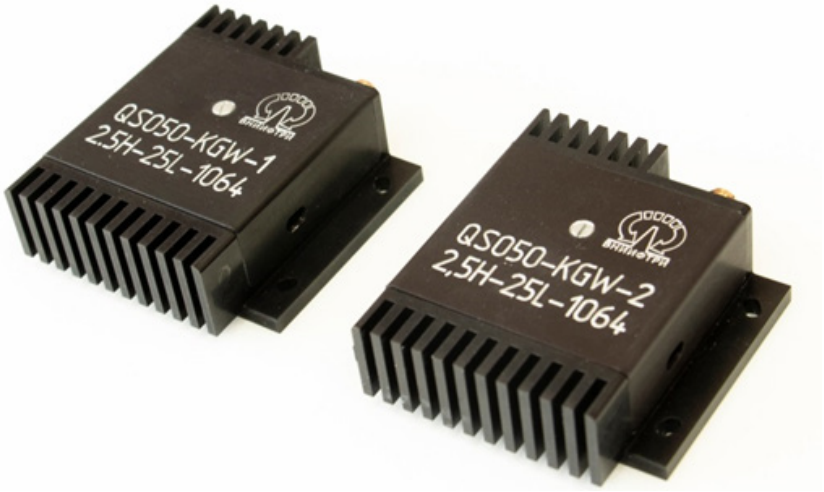


Рис. 13. *Модуляторы с высокой лучевой прочностью на кристалле KGW.*

Благодарности

Автор выражает искреннюю благодарность всем сотрудникам НИО-9 за интерес к этой работе. Выражаю благодарность Л.И. Мазур, В.Н. Шорину, Е.А. Лаврову, А.В. Рябинину, В.М. Епихину, А.В. Апрелеву, В.Э. Пожару за полезные обсуждения и помощь в написании и оформлении статьи.

Список литературы

1. *Визен Ф. Л., Захаров В. Н., Калинников Ю. К., Магомедов З. А.,* В.Н. Масленников, Пустовойт В. И. Кварцевый акустооптический фильтр // ПТЭ. 1979. № 6. С. 170.
2. *Пальцев Л. Л., Магомедов З. А., Чечуй С. А., Визен Ф. Л., Пустовойт В. И., Мазур Л. И., Ивлиев Н. Н.* Авторское свидетельство №1719335, «Способ соединения элементов акустооптических фильтров». Приоритет от 20 апреля 1993.
3. *Аскеров Н. А., Жогун В. Н., Пустовойт В. И.* Дистанционное зондирование природных объектов с помощью акустооптических спектрометров // Труды ВНИИФТРИ. 2005. Т. 48. № 140. С. 97–106.
4. *Мазур М. М., Шорин В. Н., Чижиков С. И., Леонов С. А.* Двойной акустооптический монохроматор на CaMoO4. Опт. и спектр. 1989. Т. 67. № 3. С. 736–737.
5. *Мазур М. М., Шорин В. Н., Абрамов А. Ю., Магомедов З. А., Мазур Л. И.* Спектрометр с двойным акустооптическим монохроматором. Опт. и спектр. 1996. Т. 81. № 3. С. 521–523.
6. *Блистанов А. А., Вискун Т. Г., Мазур М. М. и др.* Особенности коллинеарного взаимодействия в молибдате кальция // ЖТФ. 1988. Т. 58. № 1. С. 189–192.
7. *Chang, I. C.* Noncollinear acousto-optic filter with large angular aperture // Applied Physics Letters. 1974. Vol. 25. Iss. 7. P. 370–372. DOI: 10.1063/1.1655512
8. *Епихин В. М., Визен Ф. Л., Никитин Н. В., Калинников Ю. К.* Неколлинеарный АОФ с оптимальными угловыми характеристиками // ЖТФ. 1982. Т. 52. № 12. С. 2405–2410.
9. *Дьелисан Э., Руайе Д.* Упругие волны в твердых телах. М.: Наука, 1982.
10. *Шасткольская М. П.* Акустические кристаллы. Справочник. М.: Наука. 1982.
11. *Мазур М. М., Вискун Т. Г.* Авторское свидетельство № 1584601. Неколлинеарный акустооптический фильтр. Приоритет от 08.02.1988.
12. *Гусев О. Б., Клудзин В. В.* Акустооптические измерения. Изд. Ленинградского университета, 1987.
13. *Мазур М. М.* Критерий идентичности акустооптических ячеек для двойных АО монохроматоров // Труды ВНИИФТРИ. 2005. Т. 48. № 140. С. 48–52.
14. *Мазур М. М., Пожар В. Э., Пустовойт В. И., Шорин В. Н.* Двойные акустооптические монохроматоры // Успехи современной радиоэлектроники. 2006. № 10. С. 19–30.
15. *Мазур М.*М, Пожар В. Э. Спектрометры на акустооптических фильтрах // Измерительная техника. 2015. № 9. С. 29–33.
16. *Pustovoit, V.I., Pozhar, V.E., Mazur, M.M., Shorin V. N., Kutuza I. B., Perchik A. V.* Double-AOTF spectral imaging system // Proc. SPIE. 2005. Vol. 5953. P. 200–203. DOI: 10.1117/12.623173
17. *Мазур М. М., Мазур Л. И., Пустовойт В. И., Судденок Ю. А., Шорин В. Н.* Светосильный двухкристальный акустооптический монохроматор // ЖТФ. 2017. Т. 87. № 9. С. 1399–1402. DOI: 10.21883/JTF.2017.09.44917.2056.
18. *Мазур М. М., Мазур Л. И., Рябинин А. В., Шорин В. Н.* Широкополосный акустооптический сдвигатель частоты лазерного излучения с волоконными вводами // Квант. электроника. 2020. Т. 50. № 10. С. 954–956. DOI: 10.1070/QEL17361
19. *Мазур М. М., Мазур Л. И., Сироткин А. А., Рябинин А. В., Шорин В. Н.* Акустооптические модуляторы мощного лазерного излучения на кристаллах KGW и KYW // Квант. электроника. 2020. Т. 50. № 10. С. 957–961. DOI: 10.1070/QEL17375
20. *Epikhin, V.M., Mazur, M.M., Ryabinin, A.V., Kamaushkin, P.V., and Mazur, L.I.* Acousto-optic modulators/frequency shifters with single-mode optic fibers // Journal of Physics: Conference Series. Vol. 2127. Iss. 1. P. 012037. DOI 10.1088/1742–6596/2127/1/012037

Поступила 25 июля 2023 г.

DEVELOPMENT OF ACOUSTO-OPTICS IN NATIONAL RESEARCH INSTITUTE OF PHYSICAL, TECHNICAL AND RADIOENGINEERING MEASUREMENTS. SOME STAGES

M.M. MAZUR
National Research Institute of Physical, Technical and Radio-engineering Measurements, Mendeleyevo

doi: 10.25210/jfop-2302-RNFHAG | **edn:** RNFHAG

The work is devoted to some important episodes in the history of the development of research and development in the field of acousto-optics at the Institute of Physics and Technology and Radio Engineering Measurements, which dates back 50 years, is associated with the activities of an outstanding scientist, Academician of the Russian Academy of Sciences V. I. Pustovoit and the scientific team created by him. The main attention is paid to the technology of converting a longitudinal ultrasonic wave into a slow shear wave in acousto-optic cells made of paratellurite. The distinctive properties and the influence that this technology has had on the development of acousto-optic instrumentation at VNIIFTRI are described.

АКУСТООПТИЧЕСКИЕ И ОПТОАКУСТИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ И УСТРОЙСТВА

УДК 548.55; 548.1.022/.27

ИСТОРИЯ И АКТУАЛЬНЫЕ ПРОБЛЕМЫ ВЫРАЩИВАНИЯ МОНОКРИСТАЛЛОВ ПАРАТЕЛЛУРИТА В ЛАБОРАТОРИИ КРИСТАЛЛИЗАЦИИ ТВЕРСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО УНИВЕРСИТЕТА

© Авторы, 2023
doi: 10.25210/jfop-2302-FTCOXO | **edn:** FTCOXO

Вайсбург Н. Я. — научный сотрудник управления научных исследований, Тверской государственный университет, Тверь. E-mail: vaysburg.ny@tversu.ru

Иванов А. М. — научный сотрудник управления научных исследований, Тверской государственный университет, Тверь.

Каплунов И. А. — доктор технических наук, профессор, кафедра прикладной физики, Тверской государственный университет, Тверь. E-mail: kaplunov.ia@tversu.ru

Третьяков С. А. — кандидат физико-математических наук, доцент кафедры прикладной физики, Тверской государственный университет, Тверь. E-mail: tretyakov.sa@tversu.ru

Аннотация

Представлена история создания лаборатории кристаллизации в Тверском государственном университете и выращивания в ней монокристаллов парателлурита. Описано развитие технологи роста, решенные проблемы и современные задачи.

Ключевые слова: *парателлурит, технологии роста кристаллов*

Abstract

The history of the creation of the crystallization laboratory at Tver State University and the cultivation of single crystals of paratellurite in it is presented. The development of growth technology, solved problems and modern tasks are described.

Keywords: *paratellurite, crystal growth technologies*

Монокристаллы парателлурита используются в качестве светозвукопроводов в акустооптических устройствах. В настоящей статье представлена история выращивания этого материала в стенах Тверского государственного университета и описано положение дел на сегодняшний день.

История выращивания кристаллов в Тверском государственном университете началась в 1974 году, когда Смирнов Юрий Мстиславович, имевший большой опыт и знания по выращиванию монокристаллического кремния и германия на Запорожском титано-магниевом комбинате, где работал начальником цеха выращивания германия, защитивший к тому времени кандидатскую диссертацию по данному направлению, приехал в отпуск на родину в Удомлю и посетил ректора Калининского государственного университета Владимира Васильевича Комина. После беседы о перспективах нового для университета направления, он получил предложение создать в университете научно-исследовательскую лабораторию (рис. 1). Эта идея вскоре была реализована.

В 1976 году Юрия Мстиславовича заинтересовал относительно новый тогда материал — парателлурит (α-TeO_2), образец которого привез из Днепропетровска Шакин Олег Васильевич. И, начиная с 1977 года, в лаборатории начались работы по выращиванию этих кристаллов (рис. 2).

В ходе исследований варьировали направления выращивания, меняли размеры и материал тиглей и тепловую экранировку, подбирали кинетические характеристики процесса. Выполнялись также работы по синтезу исходного сырья — двуокиси теллура — из элементарного зонно-очищенного материала. Смирнов Ю. М. был требовательным руководителем. Он сам принимал участие в анализе результатов, в планировании работ. Его коллегами по научной группе, ответственной за процессы роста парателлурита, в то время (70–80-е годы) были И.К. Долгих, В.Н. Калинкин, В. Ленёв, Б. Тимонов.

В 1980 году физический факультет университета окончил Колесников Александр Игоревич (рис. 3(а)), который уже в ходе учебы проводил в лаборатории работы, связанные с выращиванием кристаллов.

Вайсбург Н.Я., Иванов А.М., Каплунов И.А., Третьяков С.А. История и актуальные проблемы выращивания монокристаллов парателлурита в лаборатории кристаллизации Тверского государственного университета // Физические основы приборостроения. 2023. Т. 12. № 2(48). С. 25-31. DOI: 10.25210/jfop-2302-FTCOXO. EDN: FTCOXO

а)

б)

Рис. 1. *Представление Ю. М. Смирновым образцов выращенных монокристаллов: а — монокристалл германия; б — на встрече с делегацией из Южной Кореи.*

И после получения диплома ему было предложено остаться: на преподавательской должности и в качестве сотрудника лаборатории. По указанию Ю.М. Смирнова, Александр Игоревич посетил ряд лабораторий, занимавшихся вопросами роста монокристаллов, где в процессе общения и дискуссий знакомился с новыми идеями и результатами теоретических и практических изысканий. В дальнейшем, в конце 80-х он становится руководителем группы.

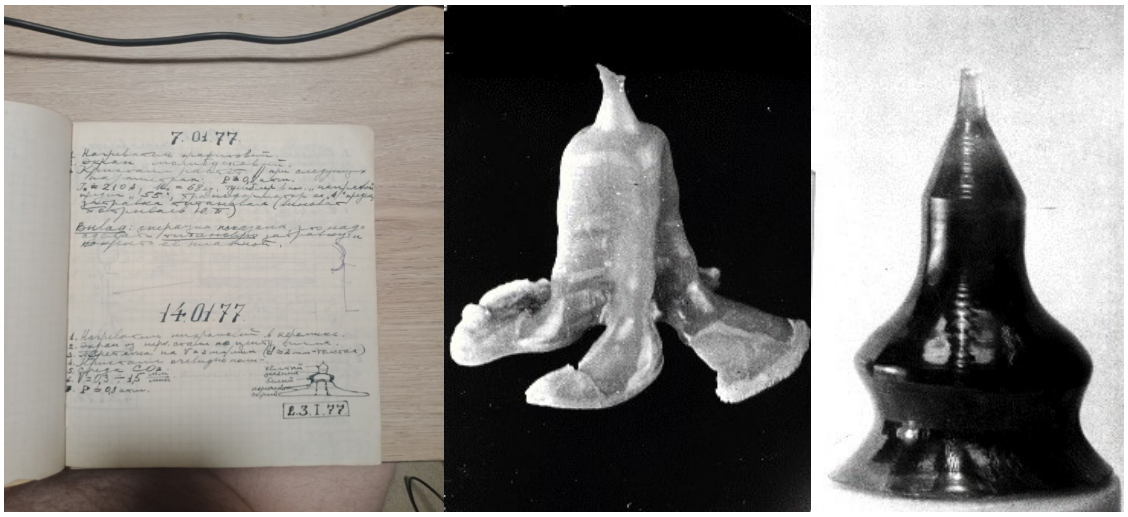
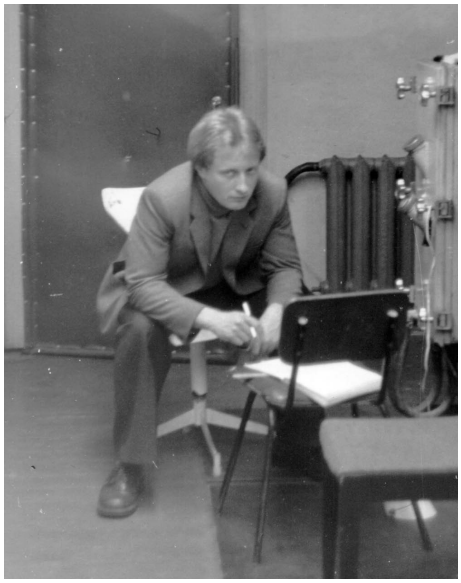
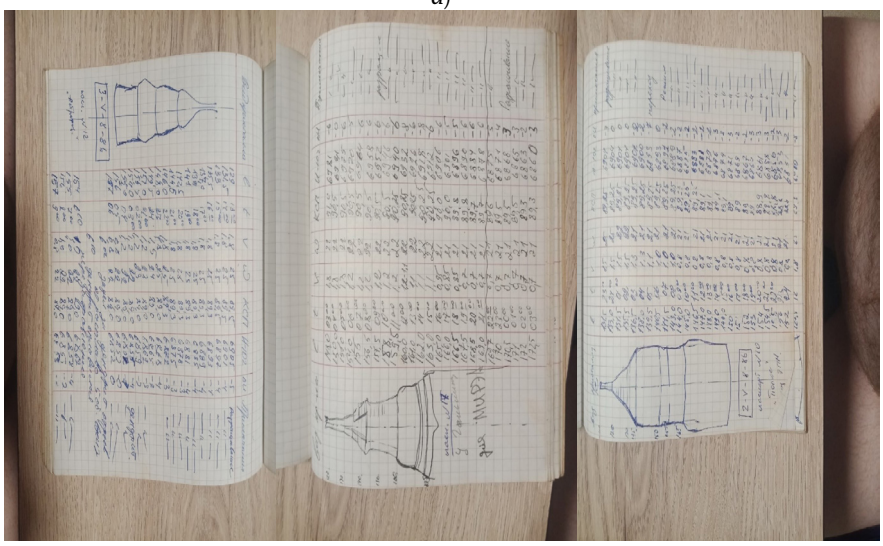


Рис. 2. *Начало выращивания парателлурита: записи в лабораторном журнале в ходе самого первого процесса и выращенные в течение* 1977 *года монокристаллы.*



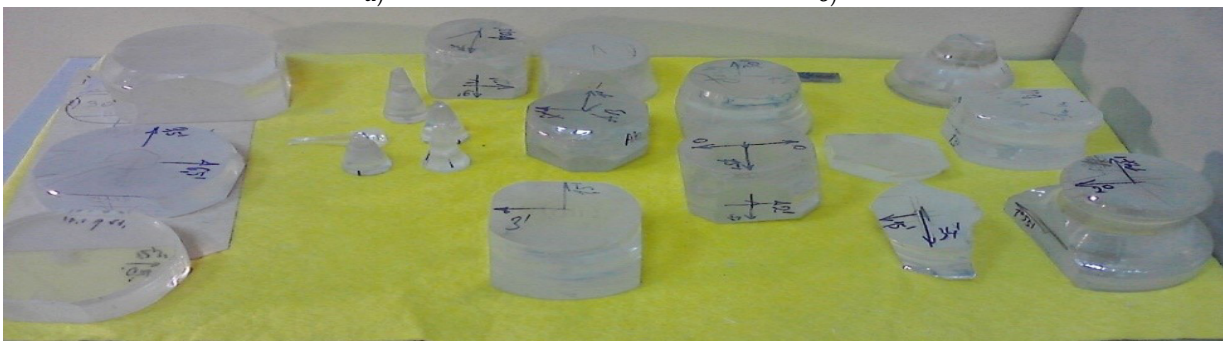
а)



б)

Рис. 3. *Развитие технологии роста* (1986 *г.*)*: а*) *А.И. Колесников у установки Редмет*-8*;*
б) *зарисовки формы выращенных монокристаллов.*

а) *б*)



в)

г)

Рис. 4. *МИП «Фотоника»: а) ростовая установка Редмет-15; б) оптическая комната для изготовления оптических элементов из TeO2; в) ориентированные були парателлурита, предназначенные для дальнейшей обработки; г) тепловизионные измерения вихрей Тейлора А. И. Колесниковым и Н.В. Айдиняном, аспирантом из Армении.*

а)

б)

Рис. 5. *Ростовые установки в помещении лаборатории кристаллизации* 2019 *год* (*а*). *Були парателлурита диаметром* 80 *мм, выращенные молодым коллективом в* 2020 *году* (*б*).

Уже в 80-х исследования переключились с создания технологии роста (подбора оптимальных параметров и условий, сборка тепловых узлов) на ее совершенствование, что привело к увеличению диаметра получаемых монокристаллов до 40–50 мм [1–3]. Большая часть кристаллов выращивалось по хозяйственным договорам для научно-исследовательских институтов (рис. 3(б)), занимавшихся разработкой и созданием акустооптических (АО) устройств. Продолжавшиеся исследовательские работы были направлены на легирование монокристаллов железом, лантаном, хромом, гадолинием и неодимом, и на изучение свойств полученных образцов [4].

К сожалению, события и ситуация в стране в 90-х годах прошлого века отрицательно сказались на лаборатории. Часть коллектива ушла из науки, часть покинула Россию, что привело к существенному спаду в научно-исследовательской работе. Но благодаря накопленному опыту, сохранившимся теоретическим и экспериментальным наработкам, качество выращиваемых кристаллов постепенно улучшалось, а типичный диаметр выращиваемых кристаллов достиг 60–65 мм. Поддержание оборудования в рабочем состоянии и материальная поддержка персонала проводилось исключительно за счет выполнения хозяйственных договоров между Тверским государственным университетом (ТвГУ) и различными отечественными организациями.

Только в начале 2000-х годов появилась возможность улучшения положения лаборатории благодаря одобренным проектам и увеличению спроса на кристаллы. Также в этот период Иванов Алексей Михайлович прошел специализированное обучение по технологии обработки кристаллических материалов, что позволило не только выращивать були, но и непосредственно изготавливать по чертежам АО элементы и за счет этого сократить потери материала.

В 2010 году было создано малое инновационное предприятие (МИП) «Фотоника» (первое в Тверском регионе по 217-ФЗ), на базе которого функционировала установка для выращивания кристаллов и была оборудована оптическая комната для изготовления оптических элементов (рис. 4(а, б, в)). Сотрудниками его стали работники кафедры прикладной физики ТвГУ, а также привлеченные аспиранты и студенты старших курсов (рис. 4(г)). На предприятии реализовывались проекты в рамках Фонда содействия инновациям и НИОКР от Минобрнауки России, планировалось привлечение частных инвестиций для расширения деятельности.

Этот период отметился большой активностью в научно-исследовательской работе, обеспечивавшейся финансированием из грантов и хозяйственных договоров, что позволило в рамках диссертационных работ аспирантов и даже магистерских работ студентов получать экспериментальные результаты, находившие применение при оптимизации ростовой технологии [5–9].

Однако найти инвестора, готового вложить средства в проект с относительно большим сроком окупаемости, не удалось и в 2018 году руководство университета приняло решение о закрытии отдельного предприятия и возвращении производства кристаллов в стены ВУЗа в связи с дальнейшей нерентабельностью содержания помещения и ряду возникших административных проблем. А в июле 2019 года скоропостижно скончался руководитель направления А.И. Колесников. Смерть бессменного руководителя и проблемы связанные с переездом и перезапуском процессов роста отрицательно сказались на лаборатории и к сентябрю 2019 года в ней осталось лишь три сотрудника.

Начиная с осени 2019 года основными задачами лаборатории стало обучение молодых специалистов (на данный момент подготовлено 4 сотрудника из числа аспирантов и студентов), восстановление деловых и научных связей (увеличено количество выпускаемых АО элементов), модернизация оборудования и автоматизация производственных процессов, проведение сопутствующих исследований и развитие технологии, обеспечивающей рост монокристаллов парателлурита высокого качества с минимизацией затрат (см. рис. 5).

Актуальными проблемами, решением которых заняты сотрудники на данный момент, являются исследования гидродинамики расплава диоксида теллура [10], исследования влияния параметров роста на структурное совершенство монокристаллов, совершенствование технологии по обработке оптических поверхностей изготавливаемых элементов. В настоящее время имеет место проблема обеспечения сырьевым материалом — поставкой исходного порошка диоксида теллура. На территории РФ с недавних пор известна только одна организация, производящая данный порошок требуемого качества, — ЗАО «Люминофор» (г. Ставрополь). Значительная часть материала импортируется из Китая.

Заключение

За 45 лет своего существования, группа по выращиванию монокристаллов парателлурита в составе лаборатории кристаллизации Тверского университета прошла через разные этапы как развития, так и спада. Пройден путь от выращивания малых сильно рассеивающих, дефектных кристаллов диаме-

тром 10–20 мм до получения монокристаллов 70–90 мм в диаметре. Значительно улучшено структурное качество получаемых кристаллов, разработаны и оптимизированы технологии по обработке оптических поверхностей. Защищено 6 кандидатских диссертаций на тему выращивания монокристаллов парателлурита и исследования их структуры, написано большое количество статей и получено более 10 патентов на изобретения, посвященных исследованию структуры, применению монокристаллов и развитию технологии роста. В течение всего времени проводились и продолжаются совместные работы с коллективами, занимающимися изготовлением и разработкой АО устройств. По результатам своих достижений сотрудники отмечены наградами российского и международного уровня.

Список литературы

1. *Колесников А. И.* Кинетика захвата газовых пузырьков кристаллами диоксида теллура // Физика кристаллизации. Калинин: КГУ. 1984. С. 7–15.
2. *Колесников А. И., Блохина Г. С., Калинкин В. Г. и др.* Влияние температурных градиентов на морфологию и дислокационную структуру монокристаллов парателлурита // Физика кристаллизации. 1985. С. 98–104.
3. *Грамацкий В. И., Караман М. И., Колесников А. И. и др.* Оптические свойства кристаллов TeO2 // Оптические свойства полупроводников и диэлектриков. 1986. С. 78–85.
4. *Колесников А. И.* Влияние условий роста на распределение дефектов в чистых и легированных монокристаллах парателлурита. Диссертация на соискание степени кандидата физико-математических наук. Тверь, 1996. 235 с.
5. *Kolesnikov, A.I., Kaplunov, I.A., Il'yashenko, S.E., Molchanov, V.Ya., Grechishkin, R.M., Arkhipova, M.A., and Tret'yakov, S.A.* Optical Parameters of Paratellurite Crystals // Crystallografy Reports. 2012. Vol. 57. Iss. 7. P. 37 39. DOI: 10.1134/S1063774512070115
6. *Kolesnikov, A. I., Kaplunov, I. A., Tretiakov, S. A., Malyshkina, O. V., and Grechishkin, R. M.* Piezooptic Effect and Dislocation Structure in Paratellurite Single Crystals // Ferroelectrics. 2012. Vol. 441. Iss. 1. P. 84 91. DOI: 10.1080/00150193.2012.741939
7. *Айдинян Н. В.* Кинетика роста крупногабаритных монокристаллов парателлурита и германия в методе Чохральского. Диссертация на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук. Тверь, 2017. 156 с.
8. *Tretiakov, S., Grechishkin, R., Kolesnikov, A., Kaplunov, I., Yushkov, K., Molchanov, V., and Linde, B.B.J.* Characterization of Temperature Field Distribution in Large-Size Paratellurite Crystals Applied in Acousto-Optic Devices // Acta Physica Polonica A. 2015. Vol. 127. Iss. 1. P. 72–74. DOI: 10.12693/APhysPolA.127.72
9. *Tretiakov, S., Kolesnikov, A., Kaplunov, I., Grechishkin, R., Yushkov, K., and Shmeleva, E.* Thermal Imaging and Conoscopic Studies of Working Acousto-optical Devices on the Base of Paratellurite // International Journal of Thermophysics. 2016. Vol. 37. Iss. 1. P. 1–9. DOI: 10.1007/s10765-015-2017-x
10. *Иванов А. М., Каплунов И. А., Молчанов С. В., Третьяков С. А.* Гидродинамика расплава диоксида теллура при выращивании монокристаллов // Физические основы приборостроения (в данном номере журнала). № 2. 2023.

Поступила 1 августа 2023 г.

HISTORY AND CURRENT PROBLEMS OF GROWING PARATELLURITE SINGLE CRYSTALS IN THE LABORATORY OF CRYSTALLIZATION OF TVER STATE UNIVERSITY

N.YA.VAYSBURG, A.M. IVANOV, I.A.KAPLUNOV, AND S.A.TRETIAKOV

doi: 10.25210/jfop-2302-FTCOXO | **edn:** FTCOXO

In this work considers the history of growing single crystals of paratellurite in the laboratory of crystallization from the beginning of its creation to the present. The names of employees who have made a serious contribution to research aimed at solving problems of improving the structural quality of the material and developing technology for the growth of single crystals of paratellurite are presented.

The growth of single crystals of paratellurite in the laboratory began in 1977. The crystals were obtained in small sizes and were not suitable for use in acousto-optics. Therefore, at the initial stage, research work was carried out aimed at finding technical conditions. By the mid-80s, the quality of the crystals had been significantly improved and they began to be supplied to research laboratories involved in the design and manufacture of acousto-optical devices. By the early 90s, the average crystal size was about 60 mm in diameter. Unfortunately, in the 90s and early 2000s, the political and economic situation in the country negatively affected the functioning of the laboratory, and only since 2008, the laboratory has continued its work aimed at developing technology for growing paratellurite and researching its properties.

At this moment, the laboratory staff consists of young specialists, including undergraduates and graduate students. The laboratory continues research within the grants, and the results obtained are used in the process of growth of crystals and manufacturing of elements from them under contracts with research institutes and private organizations.

АКУСТООПТИЧЕСКИЕ И ОПТОАКУСТИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ И УСТРОЙСТВА

УДК 53.07

КАЛИБРОВКА МУЛЬТИСПЕКТРАЛЬНЫХ ОПТИЧЕСКИХ СИСТЕМ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ АКУСТООПТИЧЕСКОГО ФИЛЬТРА

© Авторы, 2023
doi: 10.25210/jfop-2302-WAVSJS | **edn:** WAVSJS

Булатов К. М. — к.т.н., н.с., Научно-технологический центр уникального приборостроения РАН, Москва, E-mail: neytron.kamil@mail.ru
Быков А. А. — к.т.н., н.с., Научно-технологический центр уникального приборостроения РАН, Москва, E-mail: bykov@ntcup.ru
Зинин П. В. — к.ф.-м.н., в.н.с., Научно-технологический центр уникального приборостроения РАН, Москва, E-mail: zosimpvz@mail.ru
Малыхина И. В. — аспирант, Научно-технологический центр уникального приборостроения РАН, Москва, E-mail: malixina.ira2013@yandex.ru

Аннотация
Описан метод пространственной калибровки матричных фотоприемников мультиспектральных камер с использованием двойного акустооптического спектрального фильтра изображений. Такая калибровка фотоприемников необходима для проведения спектральных измерений, в том числе в целях дистанционного измерения пространственного распределения температуры. Разработанный метод пространственно-спектральной калибровки мультиспектральной камеры был опробован на восьмицветной мультиспектральной камере. Показано, что спектральная чувствительность отдельных спектральных элементов камеры принципиально отличается от профилей спектральных каналов, представленных разработчиком, и калибровка позволяет объективно оценить применимость камеры для определения спектральных характеристик объектов с разным типом спектра. Данный метод применим также и для камер с большим числом спектральных каналов.

Ключевые слова: *мультиспектральная камера, пространственная спектральная калибровка, акустооптический фильтр*

Abstract
This paper describes a new method for calibrating matrix photodetectors of a multispectral camera using an acousto-optical video filter. Such calibration of photodetectors is necessary for the accuracy of spectral measurements, including remote measurements of temperature distribution. The method for calibrating the spatial spectral sensitivity of the multispectral camera has been tested on an eight-colour camera, which contains eight colour channels in one pixel. It is shown that the spectral sensitivity of individual spectral elements of the camera is fundamentally different from the spectral channel shapes presented by the developer, and this gives chance to assess the applicability of the camera for spectral measurements of objects with different spectral structure. This method is also applicable to cameras with a large number of photodetectors in one pixel.

Keywords: *multispectral camera, spatial spectral calibration, acousto-optical filter*

Введение

Недавно было показано, что использование акустооптической гиперспектральной фильтрации оказалось плодотворным для исследования взаимодействия лазерного излучения с веществом при высоких давлениях и температурах [1]. На примере вольфрамовой нити накала, нагреваемой постоянным током от стабилизированного источника тока, было продемонстрировано, что для измерения пространственного распределения температуры может быть использован двойной акустооптический спектральный фильтр (ДАОФ) изображений [2]. Яркость каждой точки спектрального изображения пропорциональна интенсивности излучения соответствующей точки нагретого тела на соответствующей длине волны. Набор спектральных изображений, полученных в диапазоне 650–750 нм, позволяет вычислить зависимость интенсивности излучения каждой точки нагретого объекта от длины волны. Распределение температуры и излучательной способности поверхности нагретого тела вычисляется путем аппроксимации в каждой точке экспериментально полученной спектральной зависимости интенсивности излучения распределением Планка с использованием метода наименьших квадратов [1, 3]. Большое число экспериментальных точек на кривой Планка, соответствующее количеству регистрируемых на различных длинах волн изображений, приводит к довольно высокой точности определения температуры [4]. Однако скорость измерения распределения температур, получаемых с помощью ДАОФ (0,1–1 с), недостаточна для исследования многих физических процессов, таких как фазовые превращения, например, плавление под действием высоких температур. В настоящее время активно развиваются методы быстрого дистанционного измерения распределения температуры с использованием мультиспектральных видеокамер [5].

Булатов К.М., Быков А.А., Зинин П.В., Малыхина И.В. Калибровка мультиспектральных оптических систем с использованием акустооптического фильтра // Физические основы приборостроения. 2023. Т. 12. № 2(48). С. 32-37. DOI: 10.25210/jfop-2302-WAVSJS. EDN: WAVSJS

Одной из наиболее важных характеристик камеры является спектральная чувствительность фотоприёмника, которая может иметь различия в разных его участках. Практика показывает, что два экземпляра одинаковых фотоприемников в одинаковых условиях могут давать разные результаты. Кроме того, фотоприемники могут со временем деградировать. Поэтому разработка оперативного метода калибровки мультиспектральных камер [6] является актуальной задачей.

Основные методы измерения пространственной спектральной чувствительности матрицы фотоприемника, известные на сегодняшний день, следующие: 1) калибровка непрерывными во времени стабильными лазерными источниками [7]; 2) калибровка с использованием перестраиваемого монохроматора [8]; 3) калибровка с использованием набора различных фильтров [9]. Калибровка лазерными источниками предполагает использование нескольких таких источников с разными частотами излучения и известной мощностью [7], однако не дает полной информации о спектральной чувствительности матрицы камеры в силу ограниченного набора длин волн.

В работе [9] описан метод калибровки мультиспектральной системы визуализации, основанный на использовании интерференционных фильтров. Калибровка направлена на коррекцию систематических искажений мультиспектральных изображений, вносимых пространственной неоднородностью матрицы, а также оптическими элементами и фильтрами. Метод также позволяет учесть нелинейность отклика матрицы. Но небольшой набор фильтров обычно оказывается недостаточен для полноценной спектральной калибровки оптической системы.

Альтернативой предложенному методу служит установка для калибровки, состоящая из монохромной камеры и жидкокристаллического перестраиваемого фильтра, предназначенная для получения гиперспектрального изображения неба [8]. При этом определение спектральных характеристик перестраиваемого фильтра и камеры осуществлялось посредством радиометра SpectraScan PR650. В качестве эталонного источника излучения использовалось излучение неба, которое не является стабильным источником света. В качестве стабильного источника света может быть выбрана комбинация широкополосного излучателя и щелевого монохроматора. Но и эта схема не лишена недостатка: калибровочный световой пучок может иметь неоднородное пространственное распределение. Поэтому данный метод не может считаться идеальным. К тому же, использование дифракционных решеток приводит к вибрационной чувствительности метода.

В данной работе предложен метод пространственно-спектральной калибровки мультиспектральной камеры, в котором используется двойной перестраиваемый спектральный акустооптический фильтр изображений. Метод основан на измерении зависимости выходного сигнала спектральных каналов матрицы фотоприемника от плотности энергии, приходящейся на заданный спектральный интервал. Спектральный интервал может меняться и задается окном пропускания ДАОФ. Преимущества данного метода заключается в его простоте, скорости получения результата, пространственной однородности излучения и виброустойчивости, обусловленной отсутствием в ДАОФ подвижных частей.

Метод калибровки

Для проведения калибровки мультиспектральной камеры была разработана оптическая схема установки и собран ее макет (рис. 1), содержащий широкополосный источник света в виде лампы ТРШ 2850–3000 со смотровым окном из кварца; объектив с большим рабочим отрезком 10× Mitutoyo Plan Apo Infinity Corrected Long WD Objective, NA=0.42; линзу АС 254–400-А (Л1) с фокусным расстоянием 400 мм; двойной акустооптический фильтр (ДАОФ), изготовленный в НТЦ УП РАН [10]. Двойной акустооптический фильтр используется для минимизации пространственных искажений, которые существенно затрудняют калибровку системы, и увеличения контраста [11]. В зависимости от увеличения оптической системы объектив и линза могут иметь разные фокусные расстояния. В установке реализовано 20-кратное увеличение. Поворотное зеркало 31 позволяет переключать оптический поток с одной камеры на другую. Поскольку двойной акустооптический фильтр имеет малое угловое поле зрения (до 2°), хроматизм и неоднородность яркости в пределах изображения не наблюдаются [2].

В схеме используется эталонный источник теплового излучения с известной спектральной плотностью с излучающей площадкой из шлифованного вольфрама. Влияние неоднородности поверхности незначительно и вносит ошибку ~1%. Данную ошибку можно нивелировать путем использования при калибровке нескольких участков излучающей площадки лампы и усреднения результатов.

Излучение лампы со спектральной интенсивностью $I_{ИСТ}(w)$ попадает на объектив с коэффициентом пропускания $K_{SYS}(w)$, а затем проходит через ДАОФ с коэффициентом пропускания

$$K_{AOF}(w_n),$$

где w_n — частота света, соответствующая длинам волн фильтров калибруемой мультиспектральной камеры $(n=1,\ldots,n_{cam})$. Далее излучение попадает на линзу Л1 и при помощи зеркал 31 и 32 происходит

фокусировка на ПЗС (CCD) матрице (DMK 23UP1300), где регистрируется световой поток. После этого поворотным зеркалом 31 оптическая система переключается на мультиспектральную камеру (Silios VIS), которая регистрирует гиперспектральное изображение.

Параметры оптической системы при изменении оптического пути поворотным зеркалом 31 остаются неизменными, за исключением коэффициента спектральной чувствительности камер.

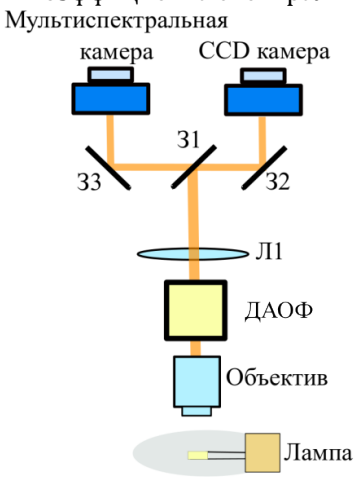


Рис. 1. *Схема установки для калибровки мультиспектральной камеры.*

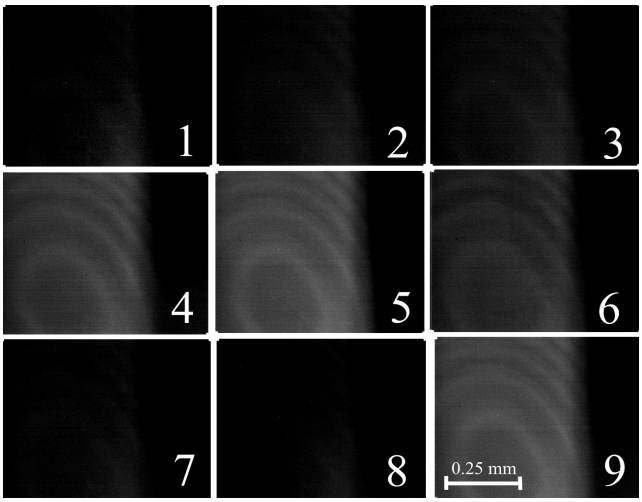


Рис. 2. *Спектральные изображения нагретого объекта, полученные в разных каналах* (n = 1, ..., 8) *мультиспектральной камеры при настройке ДАОФ на длину волны* 700 *нм. Канал* 9 *— широкополосный, регистрирующий яркость объекта в видимом диапазоне.*

Сигнал мультиспектральной камеры определяется выражением

$$N(w_n,x,y)=\frac{K(w_n)I_{\text{ИСТ}}(w_n)\Delta t}{hw_n}=\frac{K_{AOF}Q_{CAM}K_{SYS}I_{\text{ИСТ}}(w_n)\Delta t}{hw_n}, \quad (1)$$

где N — сигнал (имп./с) n-го спектрального элемента (пикселя) камеры с координатами (x, y), K — коэффициент передачи системы, $I_{ИСТ}$ — мощность излучения калиброванного теплового источника, падающая на элемент, h — постоянная Планка, Q_{CAM} — квантовая эффективность камеры.

Это позволяет выразить коэффициент передачи системы в каждом пикселе и в каждом спектральном канале в следующем виде:

$$K(w_n,x,y)\equiv K_{AOF}Q_{CAM}(x,y)K_{SYS}=\frac{N(w_n,x,y)h\ w_n}{I_{ИСТ}(w_n)\Delta t}. \quad (2)$$

При этом точность привязки по спектру определяется спектральным разрешением ДАОФ (2 нм).

В ходе калибровки проводится дополнительное измерение в схеме, когда зеркало 31 переключено (рис. 1) на эталонную камеру (CCD) с известной средней квантовой эффективностью Q_{CAL}.

Аналогично формуле (2) можно в этом случае записать

$$K_{cal}(w_n,x,y)\equiv K_{AOF}Q_{CAL}(x,y)K_{SYS}=\frac{N'(w_n,x,y)h\ w_n}{I_{ИСТ}(w_n)\Delta t'} \quad (3)$$

Из формул (2) и (3) можно определить чувствительность рабочей камеры в каждом канале n каждого пикселя (x, y)

$$Q_{CAM}(w,x,y)=\frac{N(w_n,x,y)\Delta t'}{N'(w_n,x,y)\Delta t}Q_{CAL}. \quad (4)$$

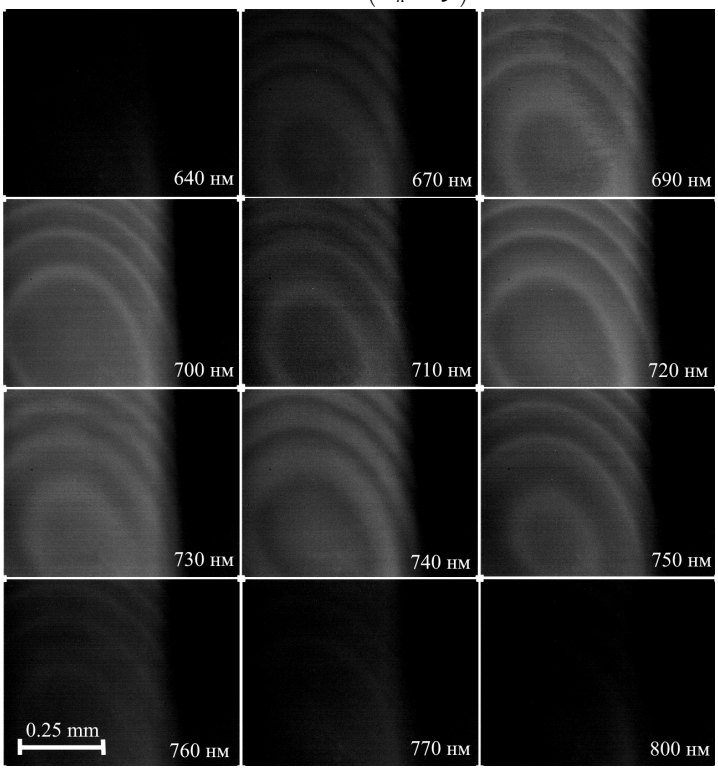


Рис. 3. *Спектральные изображения нагретого объекта получены в 4-м канале мультиспектральной камеры при перестройке ДАОФ по длинам волн.*

Результаты эксперимента

В ходе калибровки была получена серия мультиспектральных изображений на длинах волн в пределах рабочего диапазона ДАОФ (590–850 нм) с шагом 2 нм. В качестве примера на рис. 2 показана одна из серий полученных изображений во всех каналах мультиспектральной камеры при фиксированной длине волны настройки ДАОФ $n = 700$ нм. Как видно, максимальную яркость имеют каналы 4 и 5.

На рис. 3 представлены изображения, полученные в одном из каналов мультиспектральной камеры при перестройке ДАОФ. Наблюдаемое спектральное смещение без предварительной пространственной коррекции приводит к существенной погрешности.

Проведённая калибровка позволила определить спектральную зависимость квантовой эффективности каждого канала мультиспектральной камеры (рис. 4). Для определенности графики приведены для каждого канала центрального пикселя камеры. Для сравнения приведены спектры чувствительности, приведенные в технической документации на камеру (рис. 5)

Оказалось, что центральные пики пропускания каждого канала мультиспектральной камеры сдвинуты в среднем на 10 нм. При этом каналы с 2-го по 5-й имели широкие окна в виде двойного пика, причем один из пиков фактически дублировал смежный с ним канал. Это значит, что спектральная снимки в исследованной камере определяется численно — как комбинация показателей нескольких каналов. Об этом же свидетельствует тот факт, что спектр пропускания канала 1 — не селективный, а представляет собой область 710–830 нм, которая присутствует в качестве «хвоста» у всех остальных каналов. Соответственно этот фильтр, вероятно, используется для вычитания этого «фонового» сигнала из яркости изображений, получаемых в остальных каналах.

Проведенная без ДАОФ регистрация изображения плоской лампы продемонстрировала различие чувствительности каналов (рис. 6).

Заключение

Предложенный метод калибровки пространственной спектральной чувствительности мультиспектральной камеры, использующий акустооптический перестраиваемый фильтр и основанный на сопоставлении сигнала матрицы калибруемого фотоприемника с сигналом калиброванной матрицы в каждом пикселе и на каждой длине волны. Преимущества данного метода заключаются в его относительной простоте,

небольшом времени, обеспечении пространственной однородности излучения и не чувствительности к вибрациям. Проведённый эксперимент на собранном стенде позволил выявить реальную чувствительность всех каналов мультиспектральной камеры, которая принципиально отличается от спектральной чувствительности каналов камеры, представленной производителем.

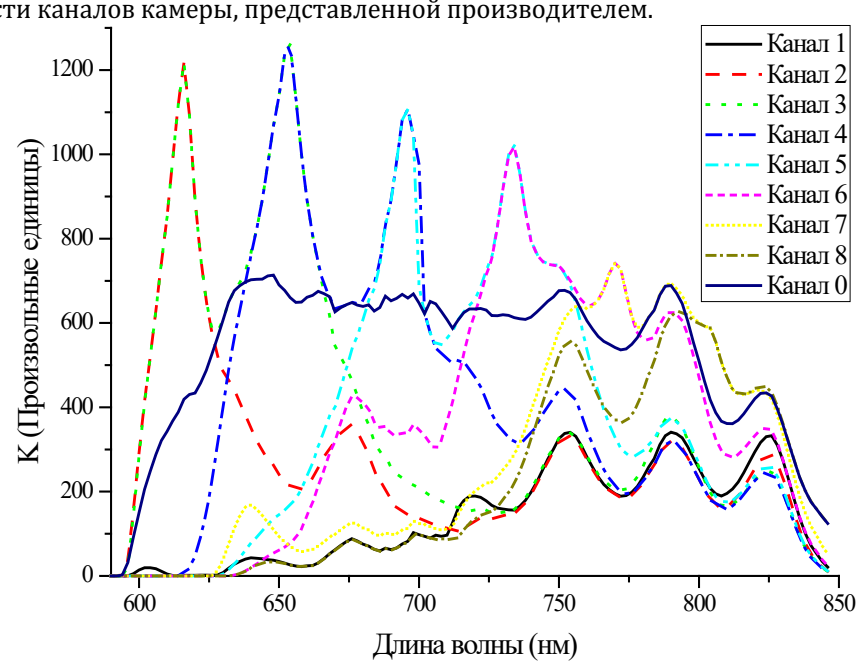


Рис. 4. *Спектральная зависимость квантовой эффективности всех каналов мультиспектральной камеры* Q_{CAM} *по измерениям в центральном пикселе камеры. Канал 0 — неселективный канал (то же, что канал 9 на рис. 2).*

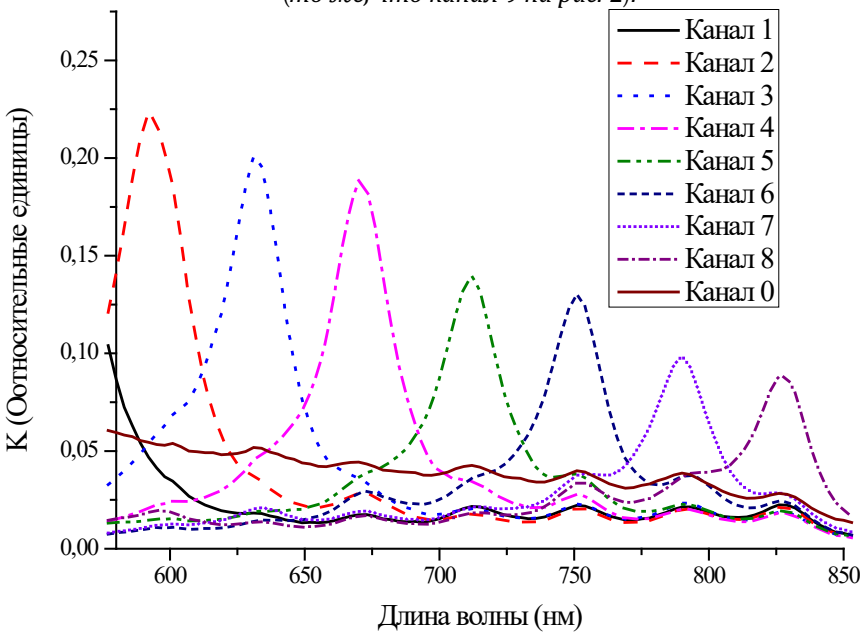


Рис. 5. *Спектральная зависимость квантовой эффективности каналов мультиспектральной камеры* Q_{CAM} *по данным производителя.*

Отсюда можно заключить, что это выходные сигналы камеры в каждом спектральном являются линейной комбинацией каналов, отфильтрованных используемых в камере оптических фильтров. Таким образом, проведение пространственно-спектральной калибровки позволяет получить спектральные зависимости чувствительности каналов и построить на этом при необходимости численную процедуру анализа данных.

Исследование проведено в рамках работ по государственному заданию Научно-технологического центра уникального приборостроения РАН «Разработка новых методов и средств для изучения поведения вещества в условиях высоких давлений и температур» (FFNS-2022–0008). Спектральные исследования выполнены на уникальной научной установке «Лазерный нагрев в ячейках высокого давления» [http://ckp-rf.ru/usu/507563/].

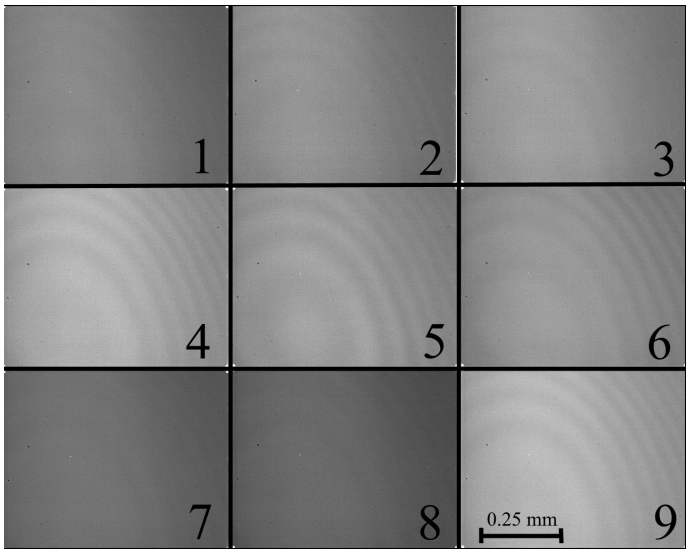


Рис. 6. *Изображения нагретого объекта в разных каналах матрицы мультиспектральной камеры.*

Список литературы

1. *Зинин П. В., Булатов К. М., Быков А. А., Мантрова Ю.В., Кутуза И. Б.* Дистанционное измерение распределения температуры на поверхности твёрдых тел при воздействии мощного лазера в ячейках высокого давления // Успехи физических наук. 2022. Т. 192. № 8. С. 72–82. DOI: 10.3367/UFNr.2021.05.038996
2. *Machikhin, A.S., Zinin, P.V., Shurygin, A.V., and Khokhlov, D.D.* Imaging system based on a tandem acousto-optical tunable filter for in situ measurements of the high temperature distribution // Optics Letters. 2016. Vol. 41. Iss. 5. P. 901. DOI: 10.1364/OL.41.000901
3. *Булатов К. М., Быков А. А., Гапонов М. И., Зинин П. В., Кутуза И. Б. и др.* Разработка методов изучения поведения вещества в экстремальных условиях: высокие давления и температуры // Физические основы приборостроения. 2017. Т. 6. № 3. С. 72–82. DOI: 10.25210/jfop-1703-072082
4. *Bulatov, K. M., et al.* Multi-spectral image processing for the measurement of spatial temperature distribution on the surface of the laser heated microscopic object // Comput. Opt. 2017. Vol. 41. № 6. P. 864. DOI: 10.18287/2412-6179-2017-41-6-864-868
5. *Булатов К. М., Зинин П. В., Мачихин А. С., Кутуза И. Б.* Мультиспектральная камера для динамических измерений распределения высоких температур // Светотехника. 2022. № 5. С. 67–70. DOI: 10.33383/2022-081
6. *Mamaghani, B., Salvaggio, C.* Multispectral Sensor Calibration and Characterization for sUAS Remote Sensing // Sensors. 2019. Vol. 19. Iss. 20. P. 4453. DOI: 10.3390/s19204453
7. *Осипов М. В., Пузырев В. Н., Саакян А. Т., Стародуб А. Н., Федотов С. И., Фроня А. А., Даниелян Г. Л.* Метод регистрации рассеянного плазмой лазерного излучения // Прикладная физика. 2008. № . 4. С. 53–57.
8. *Lypez-Blvarez, M.A., Hernбndez-Andrйs, J., Romer, J., Campos, J., and Pons, A.A.* Calibrating the Elements of a Multispectral Imaging System // Journal of Imaging Science and Technology. 2009. Vol. 53. Iss. 3. P. 031102. DOI: 10.2352/J.ImagingSci.Technol.2009.53.3.031102
9. *Mansouri, A., Sanchez, M., Marzani, F.S., and Gouton, P.* Radiometric calibration of a multispectral camera // Computer Vision and Graphics. Computational Imaging and Vision. 2006. Vol. 32. P. 273–278.
10. *Zinin, P.V., Bykov, A.A., Machikhin, A.S., Troyan, I.A., Bulatov, K.M., et al.* Measurement of the temperature distribution on the surface of the laser heated specimen in a diamond anvil cell system by the tandem imaging acousto-optical filter // High Pressure Research. 2019. Vol. 39. Iss. 1. P. 131–149. DOI: 10.1080/08957959.2018.1564748
11. *Мазур М. М., Пожар В. Э., Пустовойт В. И., Шорин В. Н.* Двойные акустооптические монохроматоры // Успехи современной радиоэлектроники. 2006. № 10. С. 19–30.

Поступила 12 июня 2023 г.

A CALIBRATION OF MULTISPECTRAL OPTICAL SYSTEMS USING AN ACOUSTO-OPTICAL FILTER

K.M. BULATOV, A.A. BYKOV, P.V. ZININ, AND I.V. MALYKHINA

doi: 10.25210/jfop-2302-WAVSJS | **edn:** WAVSJS

This paper describes a new method for calibrating matrix photodetectors of a multispectral camera using an acousto-optical video filter. Such calibration of photodetectors is necessary for the accuracy of spectral measurements, including remote measurements of temperature distribution. The method for calibrating the spatial spectral sensitivity of the multispectral camera has been tested on an eight-colour camera, which contains eight colour channels in one pixel. This method is also applicable to cameras with a large number of photodetectors in one pixel.

АКУСТООПТИЧЕСКИЕ И ОПТОАКУСТИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ И УСТРОЙСТВА

УДК 621.391.272

ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ФОТОУПРУГОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ В АКУСТООПТИЧЕСКОЙ ЛИНИИ ЗАДЕРЖКИ

© Авторы, 2023
doi: 10.25210/jfop-2302-QRJWXA | **edn:** QRJWXA

Агаев Э. А. — к.т.н., ст. преподаватель, Национальная академия авиации Азербайджана, Азербайджан, Баку. E-mail: elgun84@yahoo.com
Ахмедов Р. А. — докторант, Национальная академия авиации Азербайджана, Азербайджан, Баку. E-mail: rovshan.ahmadov96@list.ru
Гасанов А. Р. — д.т.н., проф., Национальная академия авиации Азербайджана, Азербайджан, Баку. E-mail: afig.gasanov.51@mail.ru
Гасанов Р. А. — д.т.н., доцент, Национальная академия авиации Азербайджана, Азербайджан, Баку. E-mail: ruslan-icq@mail.ru
Рустамов А. Р. — к.т.н., проф., Национальная академия авиации Азербайджана, Азербайджан, Баку. E-mail: asad-rustam@mail.ru
Садыхов М. В. — докторант, Национальная академия авиации Азербайджана, Азербайджан, Баку. E-mail: sadiqovm.1999@gmail.com
Эйнуллаев В. С. — к.т.н., старший преподаватель, Национальная академия авиации Азербайджана. E-mail: vugar14@mail.ru

Аннотация
Построена математическая модель фотоупругого взаимодействия в акустооптической линии задержки (АОЛЗ) на основе пространственно-временной интерпретации ее работы. Основными параметрами моделирования являются диаметр светового пучка и скорость распространения акустической волны в фотоупругой среде, которые оптимизированы с учетом длительности входного импульса. Показано, что при различных соотношениях основных параметров и длительности входного импульса напряжение на выходе АОЛЗ формируются по различным механизмам. Получены соответствующие уравнения для расчета формы и параметров выходного сигнала для прямоугольного входного импульса. Установлено, что во всех случаях выходное напряжение находится как сумма трех составляющих. Показано, что если длительность импульса на входе АОЛЗ больше времени пересечения оптического пучка упругим волновым пакетом, то длительность импульса на ее выходе будет равна длительности входного импульса. В случае, когда длительность входного импульса меньше времени пересечения оптического пучка упругим волновым пакетом, длительность выходного импульса будет определяться временем распространения упругого волнового пакета в апертуре оптического пучка. Полученные уравнения, установленные положения и закономерности подтверждаются численными расчетами. Результаты численного анализа проверены экспериментально на макете АОЛЗ. Проведён сравнительный анализ результатов теоретических и экспериментальных исследований, подтверждающий однозначную адекватность разработанной модели фотоупругого взаимодействия в АОЛЗ.

Ключевые слова: *математическая модель, фотоупругое взаимодействие, оптический пучок, акустооптическая линия задержки, упругая волна, импульс*

Abstract
A mathematical model of photoelastic interaction in an acousto-optic delay line (AODL) is constructed based on the spatiotemporal interpretation of its operation. The basic modeling parameters are the light beam diameter and acoustic wave propagation velocity in a photoelastic medium, which are optimized with respect to the input pulse duration. It is shown that for different ratios of the basic parameters and the duration of the input pulse, the voltage at the output of the AODL is formed by various mechanisms. The corresponding equations are obtained for calculating the shape and parameters of the output signal for a rectangular input pulse. It is established that in all cases the output voltage is found as the sum of three components. It is shown that if the duration of the pulse at the input of the AODL is longer than the time of crossing the optical beam by the elastic wave packet, then the duration of the pulse at its output will be equal to the duration of the input pulse. In the case when the duration of the input pulse is less than the time of crossing the optical beam by an elastic wave packet, the duration of the output pulse will be determined by the time of propagation of the elastic wave packet in the aperture of the optical beam. The obtained equations, established provisions and regularities are confirmed by numerical calculations. The results of the numerical analysis were tested experimentally on the AODL layout. A comparative analysis of the results of theoretical and experimental studies is carried out, confirming the unambiguous adequacy of the developed model of photoelastic interaction in AODL.

Keywords: *mathematical model, photoelastic interaction, acousto-optic delay line, optical beam, elastic wave, impulse*

Агаев Э.А., Ахмедов Р.А., Гасанов А.Р., Гасанов Р.А., Рустамов А.Р., Садыхов М.В., Эйнуллаев В.С. Пространственно-временное моделирование фотоупругого взаимодействия в акустооптической линии задержки // Физические основы приборостроения. 2023. Т. 12. № 2(48). С. 38-49. DOI: 10.25210/jfop-2302-QRJWXA. EDN: QRJWXA

Введение

Обработка сигналов во временной области является одной из необходимых операций во многих радиотехнических системах. Для решения этой задачи чаще используют электромагнитные, акустические, цифровые и оптические линии задержки (ЛЗ) [1–4]. В [1] представлена непрерывно настраиваемая дисперсионная ЛЗ. Здесь базовый блок состоит из секции ступенчатого сопротивления и двух переменных резисторов в виде p-i-n диодов. Применение этой ЛЗ обеспечивает быструю настройку в заданном диапазоне частот. В [2] продемонстрирована акустическая ЛЗ с малыми потерями на основе поперечно-горизонтальных волн в тонкой пленке ниобата лития ($LiNbO_3$). В [3] описана цифровая ЛЗ с несколькими входами, обеспечивающая работу в широком диапазоне частот. В [4] обсуждается перестраиваемая оптическая ЛЗ, позволяющая выбирать временные задержки 110, 225 и 330 пс.

Во всех типах ЛЗ задержка сигнала обусловлена конечной скоростью протекающих в них физических процессов. Тот факт, что скорость распространения акустических колебаний примерно в 10^5 раз меньше, чем электромагнитных, объясняет неоспоримые преимущества акустических ЛЗ по сравнению с электромагнитными и оптическими при необходимости получения больших задержек аналоговых сигналов. Существенным недостатком акустических ЛЗ является невозможность получения плавно-регулируемой задержки сигнала. Плавно-управляемая задержка сигнала до нескольких сотен наносекунд достигается с помощью электромагнитной ЛЗ.

Регулируемую задержку можно получить с помощью цифровых ЛЗ. В этих устройствах аналоговый сигнал дискретизируется, квантуется и после кодирования преобразуется в цифровой сигнал, который вводится в запоминающее устройство (ЗУ), а затем выводится из ЗУ и преобразуется в аналоговый сигнал. Недостатками цифровых ЛЗ являются: наличие ошибок квантования, апертурных ошибок и т.д.; трудность создания аналого-цифровых и цифроаналоговых преобразователей с высоким быстродействием; узкополосность и т.д.

Обработка сигналов во временной области используется, например, при реализации согласованных фильтров, радиолокационных симуляторов [5, 6], на их основе строятся генераторы сигналов различной формы [7, 8]. В [5] представлен линейный инвариантный фильтр, в котором требуемый временной интервал формируется электромагнитной ЛЗ, реализованной на основе *LC* и *RC* цепочек. В [6] обсуждается реализация радиолокационного симулятора на основе цифровой ЛЗ. В [7] описывается высокочастотный генератор на основе широкополосной акустической ЛЗ из $LiNbO_3$. В [8] описан компактный генератор сигналов треугольной формы с широкополосной перестройкой, основным элементом которого является оптическая ЛЗ.

Из анализа технологии изготовления, а также конкретных применений, указанных выше ЛЗ, очевидно, что они не могут быть использованы для плавного управления длительностью задержки широкополосных аналоговых сигналов в широком диапазоне, например, до нескольких десятков микросекунд. В контексте решения такой проблемы фотоупругий эффект обладает высоким потенциалом [9–12]. В [9] обсуждается возможность использования особенностей фотоупругого эффекта для построения широкополосных линий задержки. Потенциальные возможности акустооптической (АО) линии задержки обсуждаются в [10] в контексте формирования последовательности ультракоротких лазерных импульсов. В [11] особенности фотоупругого эффекта используются для задержки фемтосекундных импульсов до 6 пикосекунд с высокой точностью. В [12] приводятся результаты пикосекундных оптоакустических экспериментов.

Устройство, реализованное на основе фотоупругого эффекта и обеспечивающее обработку сигналов во временной области, принято называть акустооптической линией задержки (АОЛЗ). В устройствах этого класса эффективная обработка сигналов во временной области обусловлена малой скоростью распространения акустической волны в фотоупругой среде (ФУС) и возможностью синтеза ФУС достаточно больших размеров. В то же время малая скорость распространения упругой волны предопределяет геометрические и энергетические параметры фотоупругого взаимодействия, так как она пересекает оптический пучок с одинаковой скоростью [13].

Фотоупругий эффект реализуется в акустооптическом модуляторе (АОМ), который состоит из ФУС и прикрепленного к ее торцу электроакустического преобразователя (ЭАП) (рис. 1). Толщина ЭАП зависит от рабочей частоты и может составлять от нескольких микрон до нескольких миллиметров. Следует отметить, что акустооптические процессоры на базе АОМ обладают высоким потенциалом в плане обработки широкополосных аналоговых сигналов. Диапазон рабочих частот АОМ составляет 40–60 процентов от его центральной частоты, которая выбирается в диапазоне от десятков МГц до единиц ГГц.

Сигнал, обрабатываемый в АОЛЗ, в большинстве случаев импульсный [14]. В то же время диаметр оптического пучка имеет конечные размеры. Поэтому проектирование, разработка и наладка АОЛЗ во всех случаях требует согласования длительности входного импульсного сигнала τ_i со скоростью распространения упругой волны в ФУС υ и диаметром светового пучка d.

Известные теории фотоупругого взаимодействия довольно сложны в контексте адаптации к разработке АОЛЗ с заданными параметрами [15, 16]. Все это определяет актуальность разработки такой теоретической модели фотоупругого взаимодействия в АОЛЗ, которая доступна для прикладных применений. В контексте решения сформулированной задачи за основу берется то, что использование аксонометрической проекции позволяет повысить наглядность фотоупругого взаимодействия.

Целью данной работы является создание математической модели фотоупругого взаимодействия и получение расчетных соотношений для оценки предельных возможностей АОЛЗ.

Теоретическая часть

На клеммы ЭАП подается электрический сигнал $u_{in}(t)$ с несущей частотой f_0 в диапазоне от десятков МГц до единиц ГГц, который возбуждает в ФУС упругую волну мощностью P_a и с размерами поперечного сечения, равными длине L и ширине H ЭАП соответственно. При попадании лазерного луча в апертуру ФУС (в данном случае под углом Брэгга, θ_B) наблюдается фотоупругий эффект, т.е. часть света отклоняется. В случае брэгговской дифракции наблюдается только один порядок дифракции. Пространственное положение отклоненного пучка и интенсивность света в нем определяются параметрами радиочастотного электрического сигнала, подключенного к выводам ЭАП [17]. Отклоненный световой пучок проходит через щель в диафрагме (Д) и регистрируется фотодетектором (ФД). Сигнал на выходе ФД $u_{out}(t)$ отстает от входного сигнала $u_{in}(t)$ на время $\tau = x_0 / \upsilon$, где x_0 -расстояние от ЭАП до точки акустооптического взаимодействия. Желаемая задержка сигнала $u_{in}(t)$ устанавливается путем изменения x_0. Именно на этом принципе реализована АОЛЗ, в которой фотоупругое взаимодействие происходит в пределах апертуры лазерного пучка.

Рисунок 1 иллюстрирует режим дифракции Брэгга, в котором лазерное излучение мощностью P_0, длиной волны λ и частотой ν падает в апертуру ФУС под углом Брэгга

$$\theta_B = \arcsin(0.5\lambda / \Lambda),$$

где $\Lambda = \upsilon / f_0$ — длина упругой волны.

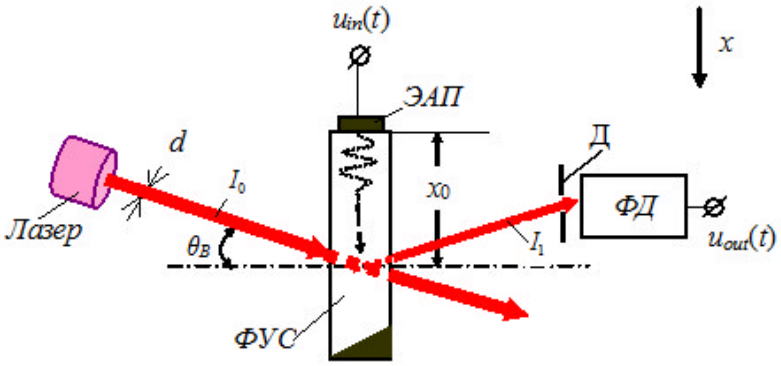


Рис. 1. *Структурная схема АОЛЗ.*

Как правило, в АОЛЗ используется слабое акустооптическое взаимодействие. Поэтому можно считать, что интенсивности падающего света I_0 и отклоненного света I_1 связаны следующим приближенным равенством [18]

$$I_1 \approx I_0 \cdot \eta, \tag{1}$$

где $\eta = [\pi^2 M P_a L] / (2\lambda^2 H)$ — дифракционная эффективность; $M = n^6 p^2 / (\rho \upsilon^3)$ — коэффициент добротности ФУС; n, ρ и p — соответственно коэффициент преломления, плотность и фотоупругая постоянная среды взаимодействия.

Для упрощения интерпретации механизма формирования выходного напряжения $u_{out}(t)$ будем считать, что плотность потока мощности равномерно распределена в поперечном сечении лазерного пучка. Предположим также, что в качестве ФД используется фотоэлектронный умножитель (ФЭУ).

С учетом принятых начальных условий мощность отклоненного светового пучка P_1 определяется на основе формулы (1) в стационарном режиме, т.е. когда световой пучок полностью взаимодействует с немодулированным упругим волновым пакетом, а площадь поперечного сечения отклоненного светового пучка S_1 остается неизменной

$$P_1 = S_1 I_1 = S_1 I_0 \eta = S_1 \eta P_0 / S_0 , \tag{2}$$

где S_0 — площадь поперечного сечения светового пучка, падающего в апертуру АОМ.

Отметим, что в любом случае площадь поперечного сечения отклоненного светового пучка равна площади поперечного сечения акустооптического взаимодействия в коллинеарной плоскости.

Отклоненный пучок света через отверстие в диафрагме падает на светочувствительную поверхность ФЭУ. Ток на выходе ФЭУ определяется в соответствии с законами общей физики следующим образом:

$$i_{out} = Ge\eta' P_1 / (h\nu), \tag{3}$$

где G — коэффициент усиления ФЭУ; $e = 1.6 \cdot 10^{-19}$ Кл — заряд протона; η' — квантовый выход фотокатода (среднее число электронов, испускаемых фотокатодом при падении на него одного фотона); $h = 6.63 \cdot 10^{-34}$ Дж·с — постоянная Планка. Отметим, что в данном случае число фотонов, падающих в секунду на фоточувствительную поверхность ФЭУ, равно $P_1 / (h\nu)$.

На основании выражений (1), (2) и (3) запишем формулу для напряжения на нагрузке ФЭУ с сопротивлением $R_н$ в следующем виде:

$$u_{out} = R_н i_{out} = R_н Ge\eta' S_1 \eta P_0 / (S_0 h\nu). \tag{4}$$

При фотоупругом взаимодействии стационарный режим со всеми его атрибутами устанавливается лишь при определенных условиях. В целом площадь сечения акустооптического взаимодействия, соответственно, площадь сечения отклоненного светового пучка S_1 и выходное напряжение ФЭУ u_{out} являются функциями текущей координаты x. Поэтому перепишем формулу (4) как функцию координаты x в следующей форме

$$u_{out}(x) = cS_1(x), \tag{5}$$

где $c = R_н Ge\eta' \eta P_0 / (S_0 h\nu)$ — постоянный множитель для выбранной конструкции АОЛЗ, с размерностью В/м^2.

В соответствии с вышеприведенным утверждением при моделировании процесса фотоупругого взаимодействия в АОЛЗ будем считать, что на ее вход поступает импульсный сигнал длительностью τ_i. При этом возможны два случая: *а*) длительность входного импульсного сигнала больше времени пересечения лазерного пучка акустическим волновым пакетом, $\tau_i > d / \upsilon$, и *б*) длительность входного импульсного сигнала меньше времени пересечения лазерного пучка акустическим волновым пакетом, $\tau_i < d / \upsilon$.

Для выбранной конструкции АОЛЗ параметры d и υ остаются неизменными. Поэтому для оценки предельных возможностей конкретного образца АОЛЗ удобно ввести параметр $\tau_0 = d / \upsilon$, равный времени установления стационарного режима, при $\tau_i > d / \upsilon$.

В обоих случаях длительность акустооптического взаимодействия равна $\tau_i + \tau_0$. Однако длительность импульса на выходе ФЭУ будет определяться в первом случае как $\tau_{out} = \tau_i$, а во втором случае как $\tau_{out} = \tau_0$. Кроме того, механизм формирования импульсов на выходе ФЭУ в первом и втором случаях существенно различается.

Аксонометрическая проекция фотоупругого взаимодействия для случая, когда длительность входного импульса больше времени пересечения лазерного пучка акустическим волновым пакетом, т.е. когда $\tau_i > \tau_0$, представлена на рис. 2. В этих условиях передний и задний фронты импульса на выходе ФЭУ формируются процессом входа и выхода переднего и заднего фронтов упругого волнового пакета в оптический пучок соответственно.

При входе переднего фронта упругого волнового пакета в оптический пучок процесс изменения площади поперечного сечения отклоненного светового пучка моделируется следующим уравнением:

$$S_{11}(\text{x}) = \int_{x_0}^{x} H(\text{x})dx \text{, при } x_0 \le x \le x_0 + d , \tag{6}$$

где

$$H(\text{x}) = 2\left[d(x - x_0) - (x - x_0)^2\right]^{0,5} \text{, при } x_0 \le x \le x_0 + d \tag{7}$$

— длина линии взаимодействия переднего фронта упругого волнового пакета с лазерным пучком в плоскости xoz.

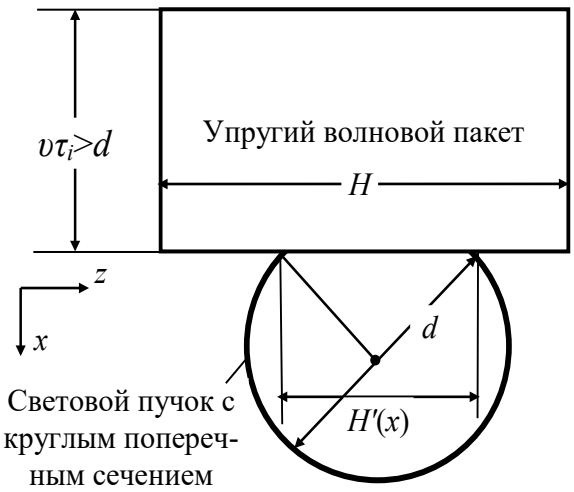


Рис. 2. *Аксонометрическая проекция фотоупругого взаимодействия на плоскость, перпендикулярную направлению распространения лазерного пучка, для случая когда длительность импульса* $\tau_i > \tau_0$.

При $x = x_0 + d$, площадь акустооптического взаимодействия будет иметь максимальное значение и определяться как

$$S_{12}(\mathrm{x})\big|_{x=x_0+d} = \int_{x_0}^{x_0+d} H(\mathrm{x})dx = 0{,}25\pi d^2, \text{ при } x_0 + d \le x \le x_0 + \upsilon\tau_i. \quad (8)$$

Значение площади поперечного сечения отклоненного светового пучка, определяемое по формуле (8), будет сохраняться до тех пор, пока передний фронт упругого волнового пакета не достигнет расстояния $x = x_0 + \upsilon\tau_i$. Затем начинается процесс выхода упругого волнового пакета из оптического пучка, сопровождающийся уменьшением площади поперечного сечения отклоненного светового пучка. В этих условиях площадь поперечного сечения отклоненного светового пучка определяется выражением

$$S_{13}(\mathrm{x}) = \int_{x_0}^{x_0+d} H(\mathrm{x})dx - \int_{x_0}^{x-\upsilon\tau_i} H(\mathrm{x})dx, \text{ при } x_0 + \upsilon\tau_i \le x \le x_0 + \upsilon\tau_i + d. \quad (9)$$

Изложенная выше интерпретация фотоупругого взаимодействия позволяет сделать вывод, что изменение площади поперечного сечения отклоненного светового пучка происходит в соответствии с уравнениями (6), (8) и (9). Поэтому при подаче на вход АОЛЗ сигнала в виде прямоугольного импульса (в данном случае длительностью $\tau_i > \tau_0$) напряжение на ее выходе будет определяться суммой трех слагаемых.

С учетом того, что в рассматриваемом случае текущая координата x связана с текущим временем t равенством $x = \upsilon \cdot t$, уравнения (6), (7), (8) и (9) можно преобразовать на временную плоскость в следующем виде

$$H(t) = 2\upsilon\left[(d/\upsilon)(t-\tau) - (\tau - t)^2\right]^{0,5} \text{ при } \tau \le t \le \tau + \tau_0; \quad (10)$$

$$S_{11}(t) = \upsilon \cdot \int_{\tau}^{t} H(t)dt \text{ при } \tau \le t \le \tau + \tau_0. \quad (11)$$

$$S_{12}(t)\big|_{t=\tau+d/\upsilon} = \upsilon \int_{\tau}^{\tau+d/\upsilon} H(t)dt = 0{,}25\pi d^2 \text{ при } \tau + \tau_0 \le t \le \tau + \tau_i. \quad (12)$$

$$S_{13}(t) = \upsilon \int_{\tau}^{\tau+d/\upsilon} H(t)dt - \upsilon \int_{\tau}^{t-\tau_i} H(t)dt \text{ при } \tau + \tau_i \le t \le \tau + \tau_i + \tau_0. \quad (13)$$

В соответствии с вышеизложенным, напряжение на выходе ФЭУ будет формироваться как сумма трех составляющих. На основании уравнений (5), (10), (11), (12) и (13) получаем следующие уравнения для составляющих напряжения на выходе ФЭУ:

$$u_{out.1}(t) = c\upsilon \int_{\tau}^{t} H(t)dt \text{ при } \tau \le t \le \tau + \tau_0. \quad (14)$$

$$u_{out.2}(t) = c\upsilon \int_{\tau}^{\tau+d/\upsilon} H(t)dt \text{ при } \tau + \tau_0 \le t \le \tau + \tau_i. \quad (15)$$

$$u_{out.3}(t)=c\upsilon\left[\int_{\tau}^{\tau+d/\upsilon}H(t)dt-\int_{\tau}^{t-\tau_i}H(t)dt\right] \text{ при } \tau+\tau_i\le t\le\tau+\tau_i+\tau_0. \quad (16)$$

Результирующее уравнение для напряжения на выходе ФЭУ будет иметь следующий вид:

$$u_{out}(t)=u_{out.1}(t)+u_{out.2}(t)+u_{out.3}(t) \text{ при } \tau\le t\le\tau+\tau_i+\tau_0. \quad (17)$$

Из совместного анализа уравнений (14)-(17) получаем следующую формулу для расчета напряжения на выходе ФЭУ:

$$\begin{gathered}u_{out}(t)=u_{out.1}(t)\cdot\left[\Phi(t-\tau)-\Phi(t-\tau-\tau_0)\right]+u_{out.2}(t)\cdot\left[\Phi(t-\tau-\tau_0)-\Phi(t-\tau-\tau_i)\right]+\\+u_{out.3}(t)\cdot\left[\Phi(t-\tau-\tau_i)-\Phi(t-\tau-\tau_i-\tau_0)\right]\\ \text{при } \tau\le t\le\tau+\tau_i+\tau_0,\end{gathered} \quad (18)$$

где $\Phi(t)$ — единичная функция Хевисайда.

Обобщая принятые условия, установленные закономерности и полученные результаты, можно постулировать, что при выполнении неравенства $\tau_i>\tau_0$ форму и параметры отклика АОЛЗ на прямоугольное входное воздействие можно вычислить по формуле (18).

Численное моделирование реакции АОЛЗ с параметрами: $d=1.6$ мм; $\upsilon=3.63$ км/с; $\tau=0.5$ мкс на прямоугольное входное воздействие длительностью $\tau_i=1.5$ мкс. Расчет производится по формуле (18). Результаты вычисления представлены на рис. 3 в виде нормированного графика напряжения на выходе ФЭУ.

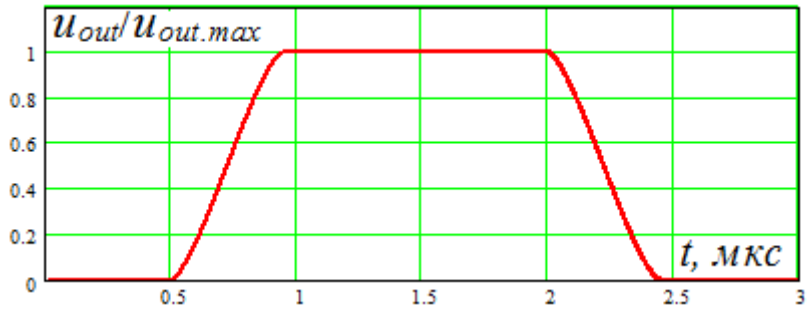


Рис. 3. *Нормированный график напряжения на выходе АОЛЗ при длительности входного импульса* τ_i 1.5 *мкс.*

По графику на рис. 3 определяется время нарастания (спада), равное 0.44 мкс и совпадающее с расчетным значением $\tau_0=0.444$ мкс. Длительность импульса составляет 1.5 мкс (определена на уровне 0.5), что также соответствует указанному выше положению.

Описанный выше подход к анализу особенностей фотоупругого взаимодействия был использован в [19] для исследования временных и частотных характеристик АОЛЗ. Здесь частота среза АОЛЗ с прямым детектированием определяется по времени нарастания импульса на выходе. Там же полученный результат подтвержден численным моделированием и проверен экспериментально.

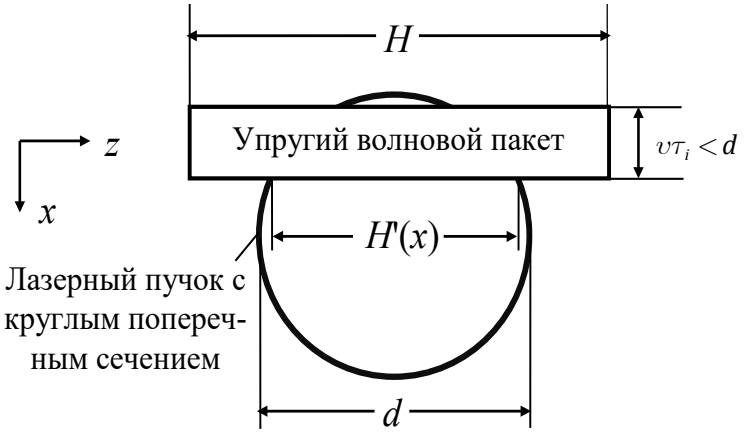


Рис. 4. *Аксонометрическая проекция фотоупругого взаимодействия на плоскость, перпендикулярную направлению распространения лазерного пучка, для случая, когда длительность импульса* $\tau_i<\tau_0$.

Рассмотрим теперь случай, когда длительность входного импульса меньше времени пересечения лазерного пучка акустическим волновым пакетом, т.е. когда $\tau_i < \tau_0$. Некоторые аспекты этого режима работы АОЛЗ обсуждаются в [20].

На рис. 4 представлена аксонометрическая проекция взаимодействия упругого волнового пакета длительностью $\tau_i < \tau_0$ и шириной H с оптическим пучком диаметром d, на плоскость xoz.

В этих условиях, если считать, что система координат движется вдоль оси x со скоростью υ, то АОЛЗ можно рассматривать как линейную стационарную систему с прямоугольной импульсной характеристикой длительностью τ_i. Такая интерпретация физических процессов позволяет принять, что оптический пучок входить в указанную выше линейную стационарную систему со скоростью υ. В этом случае акустооптическое взаимодействие включает в себя только ту часть оптического пучка, которая находится в пределах площади поперечного сечения, равной

$$S_1(x) = \int_x^{x+\upsilon\tau_i} H'(x)dx\,,\ x_0 \le x \le x_0 + d + \upsilon\tau_i\,. \tag{19}$$

Уравнение для выходного напряжения АОЛЗ, полученное на основе (19), имеет следующий вид:

$$u_{out}(x) = c\int_x^{x+\upsilon\tau_i} H(x)dx\,,\ x_0 \le x \le x_0 + d + \upsilon\tau_i\,. \tag{20}$$

Переходя к временной плоскости, уравнение (20) можно переписать в виде

$$u_{out}(t) = c\upsilon\int_t^{t+\tau_i} H(t)dt\,,\ \tau \le t \le \tau + \tau_0 + \tau_i\,. \tag{21}$$

При вычислении интеграла в уравнении (21) необходимо различать три области. Первая область характеризуется входом упругого волнового пакета в апертуру оптического пучка. В этой области выходное напряжение АОЛЗ вычисляется по формуле

$$u_{out.1}(t) = c\upsilon\int_\tau^t H(t)dt\,,\ \tau \le t \le \tau + \tau_i\,. \tag{22}$$

Вторая область характеризуется процессом продвижения упругого волнового пакета в апертуре оптического пучка. Здесь расчет выполняется по уравнению

$$u_{out.2}(t) = c\upsilon\int_{t-\tau_i}^t H(t)dt\,,\ \tau + \tau_i \le t \le \tau + \tau_0\,. \tag{23}$$

Третья область характеризуется процессом выхода упругого волнового пакета из апертуры оптического пучка. В этой области выходное напряжение АОЛЗ вычисляется по выражению

$$u_{out.3}(t) = c\upsilon\cdot\left[\int_\tau^{\tau+\tau_0} H'(t)dt - \int_\tau^{t-\tau_i} H'(t)dt\right],\ \tau + \tau_0 \le t \le \tau + \tau_0 + \tau_i\,. \tag{24}$$

Выходное напряжение АОЛЗ определяется на основе выражений (22)-(24) как сумма трех слагаемых

$$u_{out}(t) = u_{out.1}(t) + u_{out.2}(t) + u_{out.3}(t)\,,\ \tau \le t \le \tau + \tau_0 + \tau_i\,. \tag{25}$$

Формула для вычисления выходного напряжения ФЭУ получена из совместного анализа уравнений (22)-(25) в следующем виде:

$$\begin{gathered} u_{out}(t) = u_{out.1}(t)\cdot\left[\Phi(t-\tau) - \Phi(t-\tau-\tau_i)\right] + u_{out.2}(t)\cdot\left[\Phi(t-\tau-\tau_i) - \Phi(t-\tau-\tau_0)\right] + \\ u_{out.3}(t)\cdot\left[\Phi(t-\tau-\tau_0) - \Phi(t-\tau-\tau_0-\tau_i)\right] \end{gathered} \tag{26}$$

для $\tau \le t \le \tau + \tau_i + \tau_0$.

Обобщая принятые условия, установленные закономерности и полученные результаты можно постулировать, что при выполнении неравенства $\tau_i < \tau_0$ форма и параметры отклика АОЛЗ на прямоугольное входное воздействие могут быть вычислены по формуле (26).

Численное моделирование реакции АОЛЗ на прямоугольное входное воздействие длительностью $\tau_i = 0.2$ мкс, при следующих значениях параметров: $d = 1.6$ мм; $\upsilon = 3.63$ км/с; $\tau = 0.1$ мкс.

Нормированный график напряжения на выходе ФЭУ $u_{out}(t)/u_{out.\max}$, построенный по формуле (26), показан на рис. 5.

Из графика на рис. 5 можно легко определить, что длительность импульса на выходе АОП приблизительно равна τ_0. В то же время, чем короче длительность входного импульса, тем ближе форма графика к конфигурации поперечного сечения лазерного пучка.

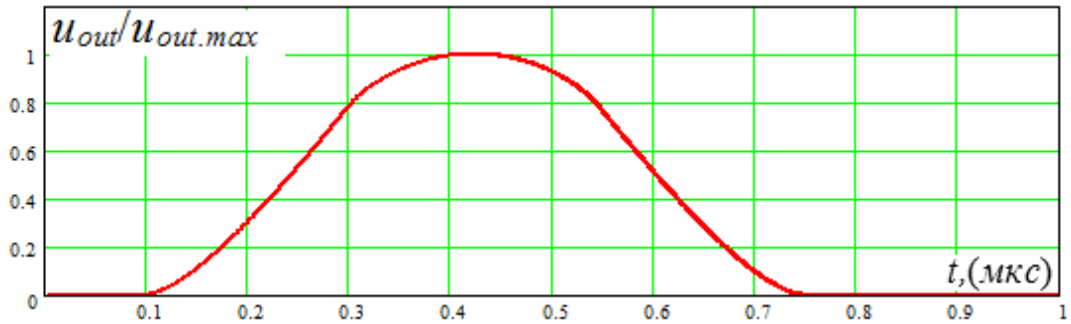


Рис. 5. *Нормированный график напряжения на выходе АОЛЗ при длительности входного импульса* $\tau_i = 0.2$ *мкс.*

Теперь предполагаем, что длительность упругого волнового пакета намного меньше τ_0, т.е. $\tau_i \ll \tau_0$. В этих условиях напряжение на выходе ФЭУ, определяемое уравнением (25), формируется за счет составляющей, которая определяется уравнением (23). В то же время вклады составляющих, определяемых уравнениями (22) и (24), становятся пренебрежимо малыми. Для большей убедительности повторим приведенное выше численное моделирование для случая, когда $\tau_i = 0.01$ мкс. Соответствующий график изображен на рис. 6.

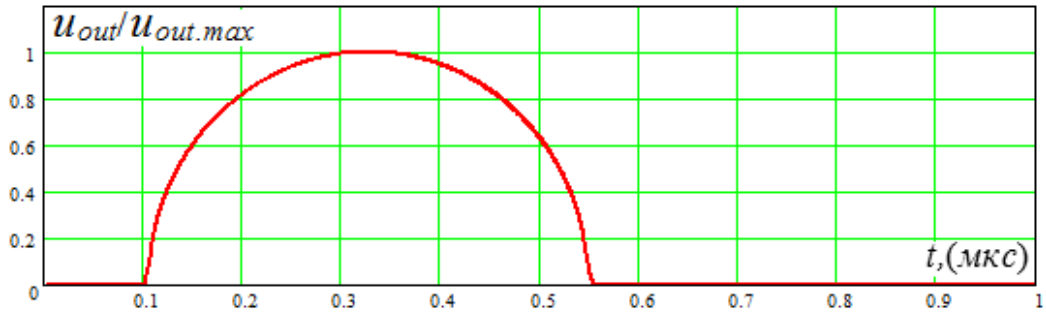


Рис. 6. *Нормированный график напряжения на выходе АОЛЗ при длительности входного импульса* $\tau_i = 0.01$ *мкс.*

Из графика на рис. 6 легко определить, что длительность импульса на выходе АОП также равна τ_0. Однако на рис. 5 длительность основания графика равна 0.64 мкс, т.е. сумме $\tau_i + \tau_0$. В то же время длительность основания графика на рис. 6 равна 0.45 мкс, т.е. также сумме $\tau_i + \tau_0$. Однако $\tau_i \ll \tau_0$ и, следовательно, форма графика практически повторяет конфигурацию поперечного сечения лазерного пучка. Особенности фотоупругого взаимодействия с такими свойствами могут быть использованы для изучения энерго-геометрических параметров лазерного излучения. Этот вопрос обсуждается в работе [21].

Таким образом, результаты численного анализа однозначно подтверждают действенность формул (18) и (26), полученных на основе аксонометрической проекции фотоупругого взаимодействия, для определения формы и расчета параметров отклика АОЛЗ на прямоугольное входное воздействие при различных соотношениях τ_i и τ_0.

Вышеприведенные уравнения легко моделируются в среде MathCad, что является очевидной предпосылкой успешного применения предложенной аксонометрической модели при проектировании, разработке и наладке АОЛЗ, как прямого детектирования, так и гетеродинного типа.

Экспериментальное исследование

Вышеустановленные закономерности и результаты численного моделирования проверены экспериментально. Схема макета для экспериментальных исследований, а также используемая измерительная аппаратура показаны на рис. 7. Здесь в качестве источника когерентного света используется полупроводниковый лазер. Световой пучок падает в апертуру АОМ под углом Брэгга. АОМ выполнен на стеклообразном фотоупругом материале ТФ-7 со следующими параметрами: $\upsilon = 3630$ м/с, $M = 5.12 \cdot 10^{-18}$ с^3/кг. В качестве ЭАП используется кристалл $LiNbO_3$ размерами $L = 7$ мм, $H = 4$ мм и толщиной 3 мм. Центральная частота *АОМ* составляет 80 МГц. В экспериментах использовалось фотоприемное устройство на основе ФЭУ-114, разработанное в лаборатории [22].

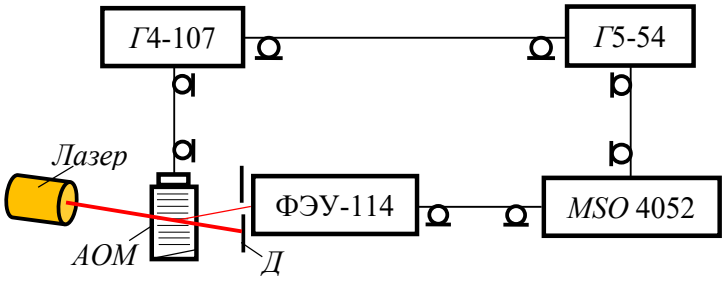


Рис. 7. *Схема макета для экспериментальных исследований.*

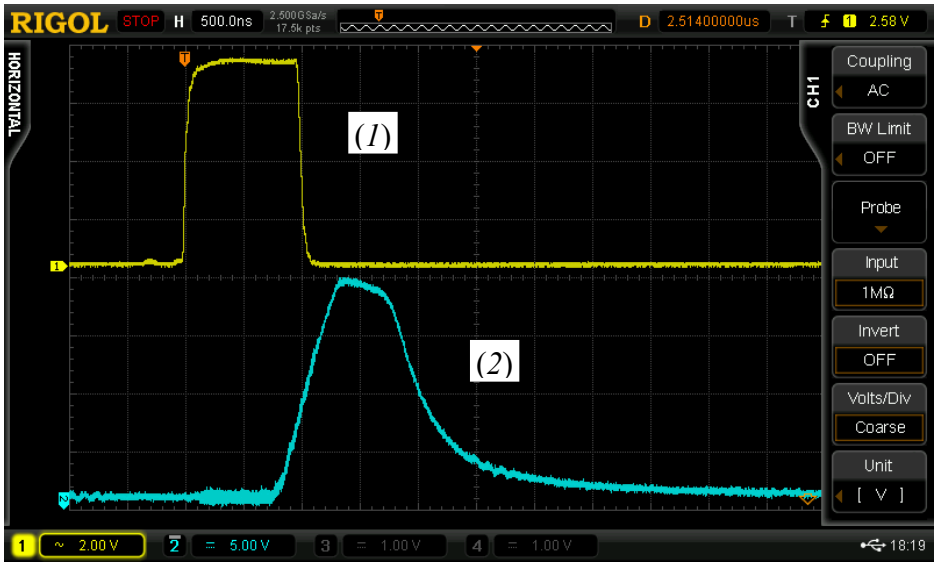


Рис. 8. *Осциллограммы импульсов на входе* (1) *и выходе* (2) *АОЛЗ с параметрами* $\tau_i \approx 1.0$ *мкс;* $\upsilon = 3630$ *м/с;* $d = 1.6$ *мм.*

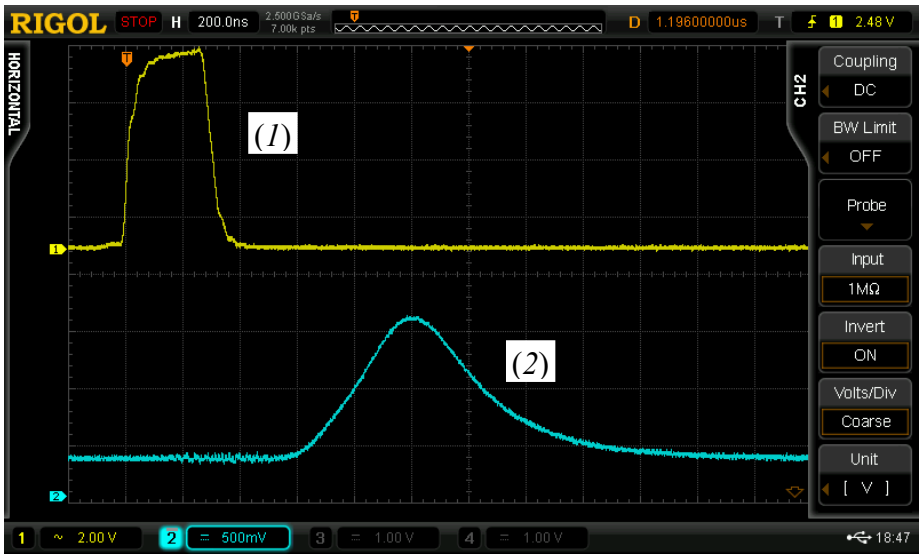


Рис. 9. *Осциллограммы импульсов на входе* (1) *и выходе* (2) *АОЛЗ с параметрами* $\upsilon = 3630$ *м/с,* $d = 1.6$ *мм.*

Отметим, что при необходимости реализации больших задержек наилучшие результаты можно получить, используя в качестве ФУС кристаллы парателлурита TeO_2. Так как скорость поперечных волн в этих материалах составляет примерно 616 м/с. Однако следует учитывать, что эти материалы обладают анизотропией [23].

Прямоугольный импульс, генерируемый в генераторе Г5–54, модулирует колебания высокочастотного генератора Г4–107 (работает в режиме внешней импульсной модуляции) и синхронизирует осциллограф MSO4052. Частота колебаний генератора Г4–107 выбирается равной центральной частоте АОМ ($f_0 = 80$ МГц). Отклоненный свет через щель в диафрагме (Д) падает на светочувствительную поверхность ФЭУ-114.

Экспериментально проверены следующие результаты теоретических исследований:

1. Если длительность прямоугольного импульса на входе $\tau_i > \tau_0$, то длительность импульса на выходе АОЛЗ τ_{out} равна τ_i, а время нарастания $\tau_н$ равно τ_0;
2. Если длительность прямоугольного импульса на входе $\tau_i < \tau_0$, то длительность импульса на выходе АОЛЗ τ_{out} не зависит от длительности входного импульса и равна τ_0.

Осциллограммы напряжений на входе и выходе АОЛЗ для случая $\tau_i > \tau_0$ приведены на рис. 8. Длительность входного импульса (определяется по осциллограмме на уровне 0.5 от максимального значения) равна $\tau_i \approx 1.0$ мкс. Время нарастания, т.е. время, в течение которого выходное напряжение изменяется от 0.1 до 0.9 своего максимального значения, составляет примерно 0.44 мкс, что равно времени пересечения акустическим волновым пакетом оптического пучка диаметром $d = 1.6$ мм. Длительность выходного импульса 1.0 мкс. Таким образом, положения первого пункта однозначно подтверждаются.

Ситуация для случая $\tau_i < \tau_0$ показана на рис. 9, на котором приведены осциллограммы напряжений на входе и выходе АОЛЗ с указанными выше параметрами.

Длительность входного импульса (определяется по осциллограмме на уровне 0.5 от максимального значения) равна $\tau_i \approx 300$ нс. Время нарастания, т.е. время, в течение которого выходное напряжение изменяется от 0.1 до 0.9 своего максимального значения, составляет примерно 300 нс, что равно длительности входного импульса и полностью соответствует вышеприведенному утверждению. Длительность выходного импульса составляет 440 нс, что также соответствует вышеустановленному положению.

Обратите внимание, что длительность выходного импульса, показанного на рис. 9.2, равна времени нарастания выходного импульса, показанного на рис. 8.2. Это обусловлено тем, что оба параметра формируются отношением d / υ.

Некоторые отличия осциллограмм выходного импульса от расчетных графиков объясняется тем, что излучение используемого лазера имеет круглое сечение и неравномерное распределение в нем плотности потока мощности. Помимо всего вышеперечисленного, форма входного импульса не идеальна.

Установлена зависимость длительности выходного импульса τ_{out} от длительности входного импульса τ_i. График этой зависимости изображен на рис. 10.

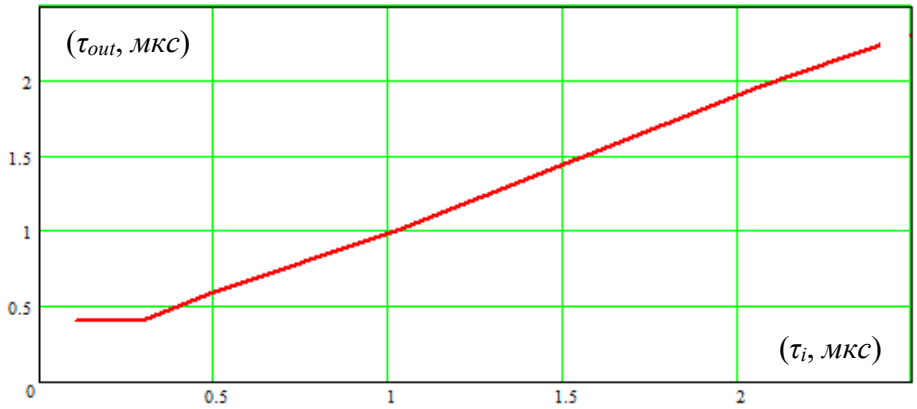


Рис. 10. *Экспериментальный график зависимости* τ_{out} (τ_i).

Из экспериментального графика на рис. 10 очевидны следующие особенности формирования выходного импульса: 1. Если длительность входного импульса меньше времени пересечения оптического пучка акустическим волновым пакетом (в данном случае оно составляет примерно 0.4 мкс), то длительность выходного импульса определяется величиной d / υ и практически не зависит от длительности входного импульса; 2. Если длительность входного импульса больше времени пересечения оптического пучка акустическим волновым пакетом, то длительность выходного импульса равна длительности входного импульса. Следует отметить, что незначительные отклонения экспериментальной кривой от расчетных значений в основном обусловлены неточностью измерений.

Таким образом, результаты экспериментальных исследований подтверждают вышеизложенные утверждения и совпадают с результатами численного анализа.

Полезные рекомендации

1. По осциллограмме отклика АОЛЗ (рис. 8.2) время нарастания $\tau_н$ выходного импульса определяется как время, в течение которого амплитуда импульса изменяется от 0.1 до 0.9 от максимального значения. Затем по формуле

$$f_s = \ln(0.9/0.1)/(2\pi\tau_н) = 0.35\tau_н$$

вычисляют частоту среза амплитудно-частотной характеристики конкретной реализации АОЛЗ. В этом случае определенное по рис. 8.2 время нарастания $\tau_н \approx 440$ нс. Соответственно, частота среза $f_s = 795$ кГц. Рекомендация действительна только для случая $\tau_i > \tau_0$.

2. Согласно осциллограмме отклика АОЛЗ (рис. 9.2) определяется длительность выходного импульса τ_{out}, на уровне 0.5 от максимального значения. Затем реальный диаметр светового пучка вычисляется по формуле $d = \upsilon \cdot \tau_{out}$. В этом случае длительность выходного импульса, определенная по рис. 9.2, составляет $\tau_{out} \approx 440$ нс. Соответственно, фактический диаметр светового пучка составляет $d \approx 1.6$ мм. Рекомендация действительна только для случая $\tau_i < \tau_0$.

Выводы

Наглядное, пространственно-временное представление взаимодействия светового пучка и акустического импульса значительно облегчает физическое понимание процессов, протекающих в АОЛЗ и упрощает расчет параметров отклика АОЛЗ с заданными конструктивными характеристиками и параметрами на входное воздействие в виде прямоугольного импульса. В этом случае решающими являются три параметра: длительность входного импульса, скорость распространения упругой волны в ФУС и диаметр светового пучка. Соотношение этих параметров однозначно определяет форму и параметры выходного сигнала АОЛЗ. Путем простых вычислений можно легко установить, что предложенная модель справедлива для всех типов АОЛЗ с прямым детектированием и гетеродинного типа.

На основе результатов численного моделирования и экспериментальной апробации сформулированы два постулата: 1) если длительность импульса на входе АОЛЗ больше времени пересечения оптического пучка упругим волновым пакетом, то длительность выходного импульса равна длительности входного импульса; 2) если длительность импульса на входе АОЛЗ меньше времени пересечения оптического пучка упругим волновым пакетом, то длительность выходного импульса равна времени пересечения оптического пучка упругим волновым пакетом.

По осциллограмме выходного отклика конкретной реализации АОЛЗ можно определить, как частоту среза, так и диаметр светового пучка, падающего на поверхность фотоприемника. Для этого достаточно выбрать $\tau_i > \tau_0$ и $\tau_i < \tau_0$ соответственно.

Список литературы

1. *Mandal, J., Mandal, M. K.* An Electronically Tunable Delay Line with Continuous Control of Slope and Peak Delay // IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques. 2019. Vol. 67. Iss. 12. P. 4682–4691. DOI: 10.1109/TMTT.2019.2947474
2. *Manzaneque, T., Lu, R.C., Yang, Y.S., and Gong, S.B.* Low-Loss and Wideband Acoustic Delay Lines // IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques. 2019. Vol. 67. Iss. 4. P. 1379–1391. DOI: 10.1109/TMTT.2019.2900246
3. *Kao, S.K.* Multi-Phases All-Digital DLL with Multi-Input and Wide-Range Delay Line // International Journal of Electronics. 2021. Vol. 108. Iss. 3. P. 345–360. DOI: 10.1080/00207217.2020.1793416
4. *Kim, K., Moon, H., Chung, Y.* Tunable Optical Delay Line Based on Polymer Single-Ring Add/Drop Filters and Delay Waveguides // Korean Journal of Optics and Photonics. 2016. Vol. 27. Iss. 5. P. 174–180. DOI: 10.3807/KJOP.2016.27.5.174
5. *Pavan, S., Klumperink, E.* Analysis of the Effect of Source Capacitance and Inductance on N-Path Mixers and Filters // IEEE Transactions on Circuits and Systems I-Regular Papers. 2018. Vol. 65. Iss. 5. P. 1469–1480. DOI: 10.1109/TCSI.2017.2754342
6. *Diewald, A.R., Steins, M., Mьller, S.* Radar Target Simulator with Complex-Valued Delay Line Modeling Based on Standard Radar Components // Advances in Radio Science. 2018. Vol. 16. P. 203–213. DOI: 10.5194/Ars-16-203-2018
7. *Li, M.H., Lu, R.C., Manzaneque, T., Gong, S.B.* Low Phase Noise RF Oscillators Based on Thin-Film Lithium Niobate Acoustic Delay Lines. 2020. Vol. 29. Iss. 2. P. 129–131. DOI: 10.1109/JMEMS.2019.2961976
8. *Chen, W.J., Zhu, D., Pan, S.L.* Compact Photonic Triangular Waveform Generator with Wideband Tenability // Optical Engineering. 2018. Vol. 57. Iss. 10. P. 106106. DOI: 10.1117/1.OE.57.10.106106
9. *Shakin, O.V., Nefedov, V.G., Churkin, P.A.* Application of Acoustooptics in Electronic Devices // Wave Electronics and its Application in Information and Telecommunication Systems. 2018. P. 1–4. DOI: 10.1109/WECONF.2018.8604351
10. *Yushkov, K.B., Molchanov, V.Ya., Ovchinnikov, A.V., and Chefonov, O.V.* Acousto-Optic Replication of Ultrashort Laser Pulses // Physical Review. 2017. Vol. 96. Iss.4. P. 043866. DOI: 10.1103/PhysRevA.96.043866
11. *Schubert, O., Eisele, M., Crozatier, V., Forget, N., Kaplan, D., Huber, R.* Rapid-Scan Acousto-Optical Delay Line with 34 kHz Scan Rate and 15 as Precision // Optics Letters. 2013. Vol. 38. P. 2907–2910. DOI: 10.1364/OL.38.002907
12. *Chandezon, J., Rampnoux, J.-M., Dilhaire, S., Audoin, B., and Guillet, Y.* In-Line Femtosecond Common-Path Interferometer in Reflection Mode // Optics Express. 2015. Vol. 23. P. 27011–27019. DOI: 10.1364/OE.23.027011
13. *Гасанов А. Р., Гасанов Р. А.* Акустооптические линии задержки низкочастотных и высокочастотных электрических сигналов // Специальная техника. 2013. № 1. С. 11–21.
14. *Гасанов Р. А.* Некоторые особенности расчета выходного отклика АОЛЗ с прямым детектированием // Специальная техника. 2014. № 5. С. 28–39.

15. *Балакший В. И., Парыгин В. И., Чирков Л. Е.* Физические основы акустооптики. М.: Радио и связь, 1985. 280 с.
16. *Davis C. C.* Lasers and Electro-Optics. Cambridge University Press, 2014. 720 p.
17. *Ахмедов Р. А., Гасанов А. Р., Гасанов Р. А., Гусейнов А. Г.* Переходная характеристика акустооптической линии задержки и ее применения // Физические основы приборостроения. 2020. Т. 9. № 1(35). С. 71–78. DOI: 10.25210/jfop-2001-071078
18. *Lee, J.N., Van Der Lugt, A.* Acousto-Optic Signal Processing and Computing // Proceedings of the IEEE. 1989. Vol. 77. Iss. 10. P. 158–192.
19. *Гасанов А. Р., Гасанов Р. А., Ахмедов Р. А., Агаев Э. А.* Временные и частотные характеристики акустооптической линии задержки с прямым детектированием // Измерительная техника. 2019. № 9. С. 46. DOI: 10.32446/0368-1025it.2019-9-46-52
20. *Гасанов А. Р., Гасанов Р. А., Ахмедов Р. А., Садыхов М. В.* Функциональные возможности акустооптической линии задержки за пределами граничной частоты // Известия высших учебных заведений. Электроника. 2021. Т. 26. № 1. С. 74–83. DOI: 10.24151/1561-5405-2021-26-1-74-83
21. *Гасанов А. Р., Гасанов Р. А., Ахмедов Р. А., Агаев Э. А.* Акустооптический метод измерения энергогеометрических параметров лазерного излучения. Приборы и техника эксперимента. 2020. № 2. С. 109–112. DOI: 10.31857/S0032816220020111
22. *Гасанов Р. А.* Фотоприемные устройства для акустооптических линий задержки. Приборы и системы // Управление, контроль, диагностика. 2015. № 12. С. 31–36.
23. *Akhmedzhanov, F., Mirzaev, S., and Saidvaliev, U.* Singularities of Anisotropy of Acoustic Attenuation in Paratellurite Crystals // Proceedings of Meetings on Acoustics. 2018. Vol. 34. Iss. 1. P. 045045. DOI: 10.1121/2.0000937

Поступила 10 января 2023 г.

SPATIOTEMPORAL SIMULATION OF PHOTOELASTIC INTERACTION IN AN ACOUSTO-OPTIC DELAY LINE

E. A. AGAYEV, R. A. AHMADOV, A. R. HASANOV, R. A. HASANOV, A. R. RUSTAMOV, M. V. SADIKHOV, AND V. S. EYNULLAYEV

doi: 10.25210/jfop-2302-QRJWXA | **edn:** QRJWXA

Signal processing in the time domain is one of the necessary operations in many radio-engineering systems. It is used, for example, in the implementation of radar simulators, matched filters, signal generators of various shapes.

To solve this problem, electromagnetic, acoustic, digital and optical delay lines (DL) are used. In all types of DLs, the signal delay is due to the finite speed of the physical processes occurring in them. The fact that the speed of propagation of acoustic oscillations is approximately 105 times less than that of electromagnetic ones explains the undeniable advantages of acoustic DLs in comparison with electromagnetic and optical ones when it is necessary to obtain large delays in analog signals. A significant disadvantage of acoustic DLs is the impossibility of obtaining a smoothly adjustable signal delay. In the context of continuously adjustable delay of broadband analog signals, acousto-optic delay lines (AODL) are irreplaceable technical means.

For rational design and development of AODL, a mathematical model of photoelastic interaction suitable for engineering calculations is needed. This problem is solved in the article on the basis of spatiotemporal representation of the AODL operation. The spatiotemporal representation of the photoelastic interaction significantly improves the perception of this physical process and simplifies the calculation of the response parameters of AODL with given design characteristics and parameters to the input action in the form of a rectangular pulse.

In accordance with the AODL operation algorithm, the basic modeling parameters are the diameter of the light beam and the speed of propagation of an acoustic wave in a photoelastic medium, which are optimized with respect to the duration of the input pulse. It is shown that for different ratios of the basic parameters and the duration of the input pulse, the voltage at the output of the AODL is formed by various mechanisms. It is established that in all cases this voltage is found as the sum of three components. The corresponding equations are obtained for calculating the shape and parameters of the output pulse for a rectangular input pulse. It is shown that if the duration of the pulse at the input of the AODL is longer than the time of crossing the optical beam by the elastic wave packet, then the duration of the pulse at its output will be equal to the duration of the input pulse. In the case when the duration of the input pulse is less than the time of crossing the optical beam by an elastic wave packet, the duration of the output pulse will be determined by the time of propagation of the elastic wave packet in the aperture of the optical beam.

The obtained equations, established provisions and regularities are confirmed by numerical calculations. The results of the numerical analysis were verified experimentally on the AODL layout. A comparative analysis of the results of theoretical and experimental studies is carried out, confirming the unambiguous adequacy of the developed model of photoelastic interaction in AODL.

ПРИБОРЫ И МЕТОДЫ ФИЗИКИ И ТЕХНИКИ СВЧ ДИАПАЗОНА

УДК 537.86

ИССЛЕДОВАНИЕ ЗАТУХАНИЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ВОЛН В ТРЕХСЛОЙНОМ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКОМ ВОЛНОВОДЕ

© Авторы, 2023
doi: 10.25210/jfop-2302-VMCVBO | **edn:** VMCVBO

Заргано Г. Ф. — д.ф.-м.н., заведующий кафедрой радиофизики, физический факультет, ФГАОУ ВО «Южный федеральный университет», Ростов-на-Дону. E-mail: gfzargano@sfedu.ru

Харланова Т. С. — ассистент кафедры физики, ФГБОУ ВО «Волгоградский государственный технический университет», Волгоград. E-mail: harlanova.ts@yandex.ru

Аннотация

Рассматривается распространение электромагнитных волн электрического (E), магнитного (H) и гибридного (HE) типов в регулярном трехслойном диэлектрическом волноводе круглого поперечного сечения с учетом затухания. Представлены выражения для компонент E- и H- волн в отдельных слоях волновода. Приведены результаты численного моделирования методом конечных элементов распределения электрического поля в слоях волновода. Для некоторых частных случаев представлены графики зависимости электрического поля электромагнитных волн от радиальной координаты в поперечном сечении волновода при увеличении мнимой части относительной диэлектрической проницаемости и графики распределения плотности мощности при отсутствии и наличии затухания. Приведено сравнение результатов аналитических расчетов и компьютерного моделирования.

Ключевые слова: *многослойный диэлектрический волновод, диэлектрическая проницаемость, СВЧ, затухание, распределение поля, плотность мощности, H- и E-волны, гибридные волны*

Abstract

The propagation of electromagnetic waves of electric (E), magnetic (H) and hybrid (HE) types in a regular three-layer dielectric waveguide of circular cross section with regard to attenuation is considered. Expressions for the E- and H-wave components in individual layers of the waveguide are presented. The results of numerical modeling by finite element method for electric field distribution in the waveguide layers are presented. For some particular cases graphs of dependence of electric field of electromagnetic waves on the radial coordinate in the cross section of the waveguide at increase of imaginary part of relative permittivity and graphs of power density distribution in the absence and presence of attenuation are presented. A comparison of the results of analytical calculations and computer simulations is presented.

Keywords: *multilayer dielectric waveguide, dielectric constant, microwave, attenuation, field distribution, power density, H- and E-waves, hybrid waves*

Введение

В настоящее время большое внимание уделяется миниатюризации электронных приборов и компонентов радиотехнических устройств, использующих слоистые диэлектрические структуры. Для более качественной передачи и обработки сигнала очень важен правильный выбор характеристик волноведущих структур, а также понимание характера поведения электромагнитных волн на различных частотах. Вообще, электродинамический анализ и численное моделирование многослойных диэлектрических волноводов является достаточно актуальной задачей. Так, в ряде работ, связанных с исследованием распространения электромагнитных волн в многослойных диэлектрических волноводах, рассматриваются как гибридные типы волн, так и электрические (E), и магнитные (H) волны, анализа которых в частных случаях достаточно для понимания общих закономерностей волновых процессов. В работах [1,2] описываются подходы к классификации и анализу гибридных волн различных типов в многослойных волноводных структурах. В статье [3] рассматриваются моды H_{10} и E_{11}, исследуется метод возбуждения моды E_{11} в цилиндрических волноводах с помощью Т-волн в СВЧ и КВЧ диапазонах. Высказывается идея, что волна E_{11} подходит для работы усилителя обратной волны с достаточно широкой полосой пропускания. В работах [4, 5] рассматриваются гребневые волноводы с диэлектрическим включением, предлагается алгоритм электродинамического расчета, и визуализация электромагнитных полей гибридных волн в таких волноводах с учетом потерь. Имеются различные подходы к аналитическому описанию как поперечных, так и гибридных типов волн в многослойных цилиндрических диэлектрических волноводах и в коаксиальных волноводных структурах [6–17].

Заргано Г.Ф., Харланова Т.С. Исследование затухания электромагнитных волн в трехслойном диэлектрическом волноводе // Физические основы приборостроения. 2023. Т. 12. № 2(48). С. 50-59. DOI: 10.25210/jfop-2302-VMCVBO. EDN: VMCVBO

Немаловажным является тот факт, что характерные особенности E- и H-волн часто исследуются с учетом комплексной диэлектрической проницаемости. Во многих работах эти исследования проводятся с помощью численно-аналитических методов расчетов, или с помощью численного моделирования, а также экспериментально [7–12]. Действительно, в реальных диэлектрических волноводах при распространении электромагнитных волн амплитуда поля уменьшается по мере продвижения волны вдоль продольной оси волновода, наблюдаются потери мощности и изменение структуры электромагнитного поля.

Исследования вышеперечисленных процессов в рассматриваемой диэлектрической структуре в полной мере не освещены в известной литературе и представляют научно-практический интерес при решении ряда практических задач радиофизики, электроники и приборостроения. Особенно в тех случаях, когда принципиально важен выбор рабочих частот и используемых типов волн для эффективной передачи сигналов в СВЧ диапазонах с учетом потерь в диэлектрических слоях.

Постановка задачи

В работе рассматривается трехслойный регулярный диэлектрический волновод круглого поперечного сечения (рис. 1), действительные части относительных диэлектрических проницаемостей отдельных слоев которого удовлетворяют соотношению: $\varepsilon_1 > \varepsilon_2 > \varepsilon_3$. Зависимость от времени принята $\exp(-i\omega t)$.

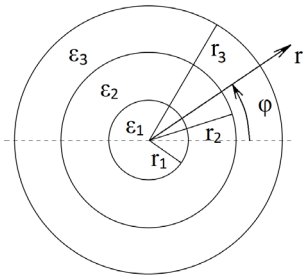


Рис. 1. *Поперечное сечение трехслойного диэлектрического волновода.*

Каждый из слоев состоит из однородного и изотропного диэлектрика. Рассматривается несколько случаев, когда затухание имеет место в отдельных слоях, а также исследуется характер изменения частот, при которых наблюдается сосредоточение основного потока электромагнитных волн в диэлектрическом канале (среднем слое) трехслойного волновода. Анализируется характер распределения электрического поля при увеличении затухания в слоях волновода.

Методика исследования

Исследуются волны H_{11}, E_{01}, H_{01}, E_{11} и гибридная волна HE_{11}. Моделирование распространения электромагнитных волн в волноводе проводится в программном пакете CST Studio Suite [18]. На вход волновода подается сигнал мощностью $P_{\text{in}} = 1$ Вт.

В общем виде для поперечных и продольных компонент электромагнитного поля для волн электрического и магнитного типа в отдельных слоях волновода справедливы выражения [9, 16, 17], представленные ниже.

При $r \le r_1$:

$$
\begin{aligned}
&E^e_{r_1} = -i\frac{\beta}{k_1}J'_m(k_1 r)A\cos m\varphi e^{-i\beta z}, E^e_{\varphi_1} = i\frac{\beta m}{rk_1^2}J_m(k_1 r)A\sin m\varphi e^{-i\beta z},\\
&E^e_{z_1} = J_m(k_1 r)A\cos m\varphi e^{-i\beta z},\\
&H^e_{r_1} = -i\frac{\omega\varepsilon_1 m}{rk_1^2}J_m(k_1 r)A\sin m\varphi e^{-i\beta z}, H^e_{\varphi_1} = -i\frac{\omega\varepsilon_1}{k_1}J'_m(k_1 r)A\cos m\varphi e^{-i\beta z},\\
&H^e_{z_1} = 0,\\
&H^m_{r_1} = -i\frac{\beta}{k_1}J'_m(k_1 r)B\cos m\varphi e^{-i\beta z}, H^m_{\varphi_1} = i\frac{\beta m}{rk_1^2}J_m(k_1 r)B\sin m\varphi e^{-i\beta z},\\
&H^m_{z_1} = J_m(k_1 r)B\cos m\varphi e^{-i\beta z},\\
&E^m_{r_1} = i\frac{\omega\mu_1 m}{rk_1^2}J_m(k_1 r)B\sin m\varphi e^{-i\beta z}, E^m_{\varphi_1} = i\frac{\omega\mu_1}{k_1}J'_m(k_1 r)B\cos m\varphi e^{-i\beta z},\\
&E^m_{z_1} = 0.
\end{aligned}
\tag{1}
$$

При $r_1 < r \le r_2$:

$$
\begin{aligned}
&E^e_{r_2} = -i\frac{\beta}{k_2}\left[CJ'_m(k_2r)+DN'_m(k_2r)\right]\cos m\varphi e^{-i\beta z}, E^e_{\varphi_2} = i\frac{\beta m}{rk_2^2}\left[CJ_m(k_2r)+DN_m(k_2r)\right]\sin m\varphi e^{-i\beta z},\\
&E^e_{z_2} = \left[CJ_m(k_2r)+DN_m(k_2r)\right]\cos m\varphi e^{-i\beta z},\\
&H^e_{r_2} = -\frac{\omega\varepsilon_2 m}{rk_2^2}\left[CJ_m(k_2r)+DN_m(k_2r)\right]\sin m\varphi e^{-i\beta z}, H^e_{\varphi_2} = i\frac{\omega\varepsilon_2}{k_2}\left[CJ'_m(k_2r)+DN'_m(k_2r)\right]\cos m\varphi e^{-i\beta z},\\
&H^e_{z_2} = 0,\\
&H^m_{r_2} = -i\frac{\beta}{k_2}\left[CJ'_m(k_2r)+DN'_m(k_2r)\right]\cos m\varphi e^{-i\beta z}, H^m_{\varphi_2} = i\frac{\beta m}{rk_2^2}\left[EJ_m(k_2r)+FN_m(k_2r)\right]\sin m\varphi e^{-i\beta z},\\
&H^m_{z_2} = \left[EJ_m(k_2r)+FN_m(k_2r)\right]\cos m\varphi e^{-i\beta z},\\
&E^m_{r_2} = \frac{\omega\mu_2 m}{rk_2^2}\left[CJ_m(k_2r)+DN_m(k_2r)\right]\sin m\varphi e^{-i\beta z}, E^m_{\varphi_2} = i\frac{\omega\mu_2}{k_2}\left[EJ'_m(k_2r)+FN'_m(k_2r)\right]\cos m\varphi e^{-i\beta z},\\
&E^m_{z_2} = 0.
\end{aligned}
\tag{2}
$$

При $r_2 < r \le r_3$:

$$
\begin{aligned}
&E^e_{r_3} = i\frac{\beta}{k_3}K'_m(k_3r)G\cos m\varphi e^{-i\beta z}, E^e_{\varphi_3} = -i\frac{\beta m}{rk_3^2}K_m(k_3r)G\sin m\varphi e^{-i\beta z},\\
&E^e_{z_3} = K_m(k_3r)G\cos m\varphi e^{-i\beta z},\\
&H^e_{r_3} = i\frac{\omega\varepsilon_3 m}{rk_3^2}K_m(k_3r)G\sin m\varphi e^{-i\beta z}, H^e_{\varphi_3} = i\frac{\omega\varepsilon_3}{k_3}K'_m(k_3r)G\cos m\varphi e^{-i\beta z},\\
&H^e_{z_3} = 0,\\
&H^m_{r_3} = i\frac{\beta}{k_3}K'_m(k_3r)G\cos m\varphi e^{-i\beta z}, H^m_{\varphi_3} = -i\frac{\beta m}{rk_3^2}K_m(k_3r)H\sin m\varphi e^{-i\beta z},\\
&H^m_{z_3} = K_m(k_3r)H\cos m\varphi e^{-i\beta z},\\
&E^m_{r_3} = -i\frac{\omega\mu_3 m}{rk_3^2}K_m(k_3r)H\sin m\varphi e^{-i\beta z}, E^m_{\varphi_3} = -i\frac{\omega\mu_3}{k_3}K'_m(k_3r)H\cos m\varphi e^{-i\beta z},\\
&E^m_{z_3} = 0.
\end{aligned}
\tag{3}
$$

Верхний индекс m у компонент поля указывает на волны магнитного типа, e — электрического типа; индексы 1, 2 и 3 показывают номер слоя волновода; *A, B, C, D, E, F, G, H* — безразмерные амплитудные коэффициенты; ω — частота распространения волны; φ — азимутальный угол; k_1, k_2, k_3 — поперечные волновые числа слоев, β — продольное волновое число, J_m — функция Бесселя первого рода, N_m — функция Бесселя второго рода (функция Неймана), K_m — модифицированная функция Бесселя второго рода (функция Макдональда), знак штриха показывает производную функции по аргументу.

Для расчета мощности в общем случае используется следующая формула:

$$P = \frac{1}{2}\int_S \left[\mathbf{E}_\perp, \mathbf{H}^*_\perp\right]\mathbf{e}_z dS, \tag{4}$$

где $\mathbf{E}_\perp$ — вектор напряженности электрического поля, $\mathbf{H}^*_\perp$ — комплексно-сопряженный вектор напряженности магнитного поля, $\mathbf{e}_z$ — единичный вектор оси z, S — площадь поперечного сечения волновода.

Для каждого вида волн сначала при отсутствии затухания подбираются частоты, а именно: v_1 — частота, при которой волны распространяются вдоль волновода во всех слоях; v_2 — частота, при которой поток преимущественно сосредоточен в диэлектрическом канале, или на границе внутреннего и среднего слоев. Затем при данных частотах исследуются случаи, когда затухание имеет место во всех слоях, т.е.

$$\varepsilon_1 = \varepsilon'_1 + i\varepsilon''_1,\ \varepsilon_2 = \varepsilon'_2 + i\varepsilon''_2,\ \varepsilon_3 = \varepsilon'_3 + i\varepsilon''_3.$$

В диэлектрическом волноводе существуют только диэлектрические потери. В исследуемой структуре потери вводятся через углы диэлектрических потерь, или соответствующие значения их тангенсов:

$$\varepsilon(\omega) = \varepsilon'(\omega) + i\varepsilon''(\omega) = \varepsilon'(\omega)\left[1 - tg(\delta)\right]. \tag{5}$$

Значения тангенсов определяются отношением между мнимой и действительной частями комплексных проницаемостей:

$$tg(\delta) = \frac{\varepsilon''(\omega)}{\varepsilon'(\omega)}. \quad (6)$$

Средняя объемная плотность мощности потерь в диэлектрике определяется по формуле

$$p_д = \omega\varepsilon_a tg\delta |E|^2, \quad (7)$$

где ε_a — абсолютная диэлектрическая проницаемость, $tg(\delta)$ — тангенс диэлектрических потерь, $|E|$ — модуль напряженности электрического поля.

Если известно распределение электромагнитного поля в слоях волновода и дисперсионные свойства материалов, то величину объемных потерь можно найти по формуле:

$$P_{об.потерь} = \pi\nu\varepsilon_0\varepsilon tg\delta \int |E|^2 \partial V. \quad (8)$$

В исследуемом случае общая мощность объемных потерь принимает следующий вид:

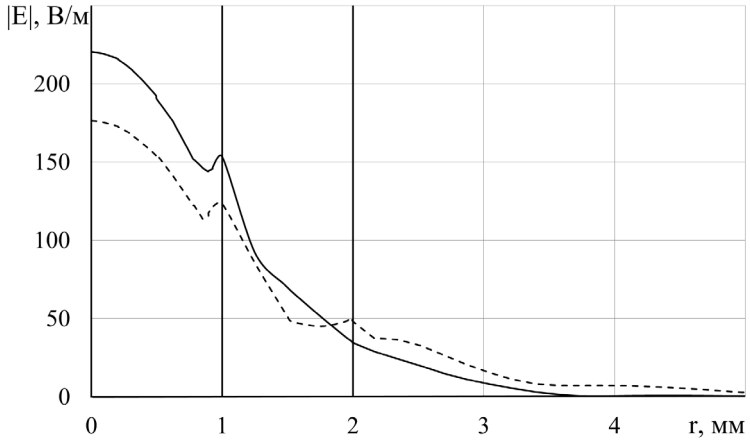
$$P_{об.потерь_{общ}} = \pi\nu\varepsilon_0 \sum_{n=1}^{3} \varepsilon_n tg\delta_n \iiint_{r\varphi z} r|E_n|^2 dr\, d\varphi\, dz, \quad (9)$$

где n — номер слоя волновода, φ принимает значения от 0 до 2π, ε_n и $tg\delta_n$ — относительная диэлектрическая проницаемость и тангенс диэлектрических потерь n слоя,

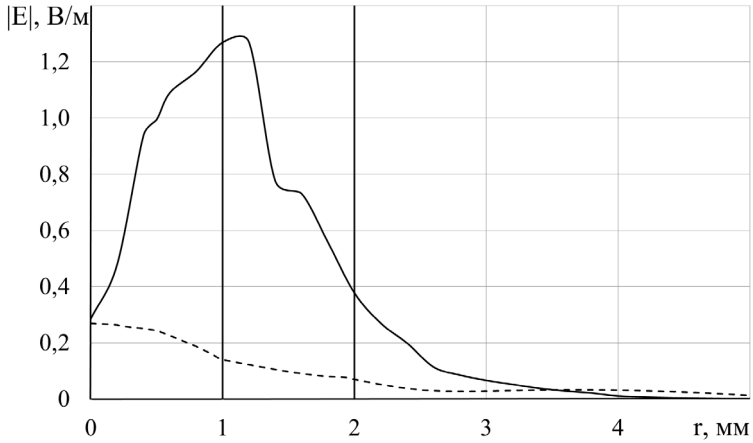
$$|E_n|^2 = |E_{\varphi n}|^2 + |E_{rn}|^2 + |E_{zn}|^2. \quad (10)$$

Анализ результатов расчетов

Значения относительных диэлектрических проницаемостей и частот для отдельных мод волн, использованные для моделирования, представлены в табл. 1, 2. Относительные магнитные проницаемости всех слоев $\mu_n = 1$.



а)



б)

Рис. 2. *Распределение модуля напряженности электрического поля в сечении волновода для* H_{11} *при частотах* 24 (*а*) *и* 35 (*б*) *ГГц.*

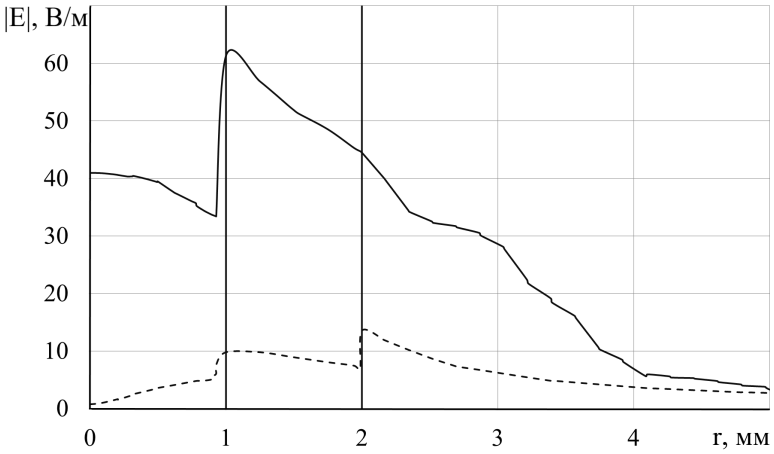
Таблица 1. *Параметры исследуемого волновода*

n — номер слоя	r_n — радиус слоя, мм	ε_n
1	1	$20+i\varepsilon_1''$
2	2	$10+i\varepsilon_2''$
3	5	$5+i\varepsilon_3''$

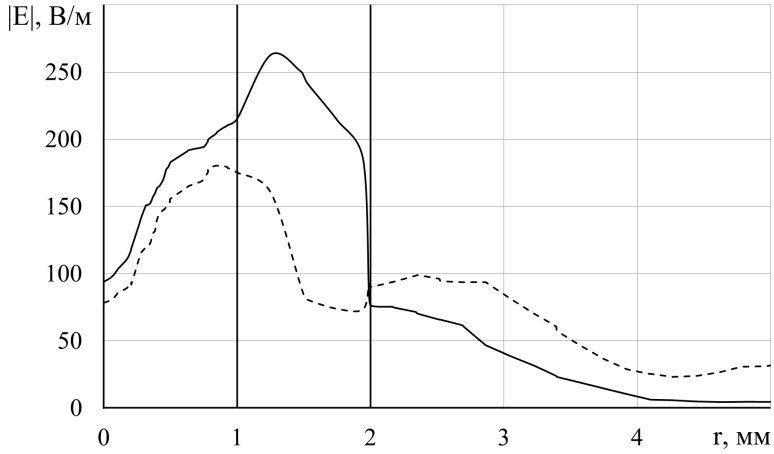
Таблица 2. *Исследуемые значения частот для отдельных мод волн*

Тип волны	**Диапазон частот, ГГц**	**Исследуемые частоты ν, ГГц**
H_{11}	30.0–40.0	24.0; 35.0
E_{01}	30.0–40.0	20.0; 36.0
H_{01}	30.0–40.0	29.0; 35.0
E_{11}	35.0–45.0	35.0; 41.3
HE_{11}	5.0–20.0	9.0

На рис. 2–4 представлены графики распределения модуля напряженности электрического поля и плотности мощности на рис. 5, 6 для волн типа H_{11}, E_{01}, E_{11}, HE_{11} при частотах, приведенных в табл. 2, и при значениях тангенсов диэлектрических потерь в отдельных слоях $tg\delta_1 = 0{,}2$; $tg\delta_2 = 0{,}1$; $tg\delta_3 = 0{,}1$. На каждом из графиков сплошная кривая соответствует случаю отсутствия затухания, штриховая линия — при наличии затухания в слоях волновода. Отмечены границы первого (1 мм) и второго (2 мм) слоев.



а)



б)

Рис. 3. *Распределение модуля напряженности электрического поля в сечении волновода для волны E_{01} на частотах 20 (а) и 36 (б) ГГц.*

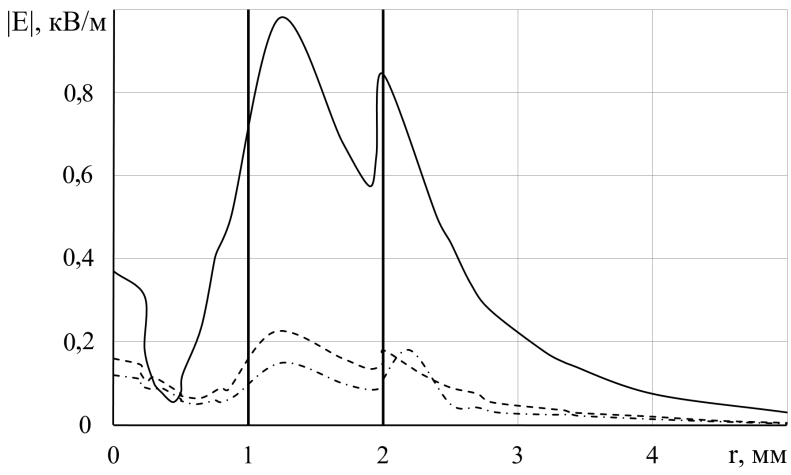


Рис. 4. *Распределение модуля напряженности электрического поля в сечении волновода для волны* E_{11}.

На рис. 4 представлены результаты аналитических расчетов зависимости модуля напряженности электрического поля при распространении электромагнитной волны E_{11} на частоте $\nu = 41.3$ ГГц. Относительная диэлектрическая проницаемость первого (внутреннего) слоя в общем виде может быть представлена как $\varepsilon_1 = \varepsilon_1' + i\varepsilon_1''$, где $\varepsilon_1' = 20$ — действительная часть, ε_1'' — мнимая часть, которая принимает значения от 0 до 2. Сплошная линия соответствует $\varepsilon_1'' = 0$, штриховая — $\varepsilon_1'' = 1$, штрих-пунктирная — $\varepsilon'' =$.

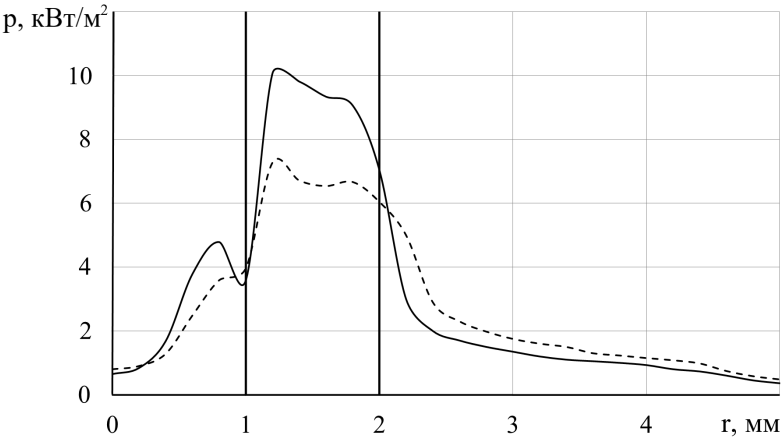


Рис. 5. *Распределение плотности мощности волны* E_{11} *при частоте* 41.3 *ГГц.*

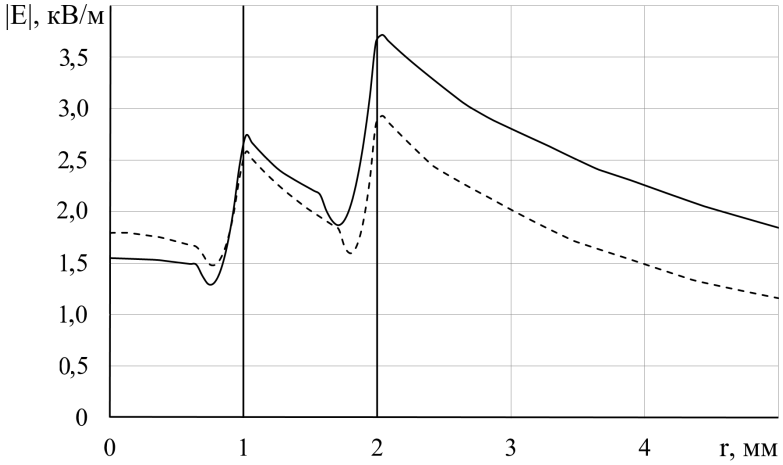


Рис. 6. *Распределение модуля напряженности электрического поля гибридной волны* HE_{11} *при частоте* 9 *ГГц.*

На рис. 5 показано распределение плотности мощности электромагнитных волн для случая E_{11} волн при отсутствии (сплошная кривая) и наличии затухания во всех слоях (пунктирная линия). Как видно, качественно картина распределения сохраняется при появлении затухания, основная часть плотности мощности преимущественно локализуется в среднем слое.

Также рассматривается случай распространения гибридной волны HE_{11} на частотах порядка 5–20 ГГц. В случаях, когда частота принимает значения от 8 до 12 ГГц, большая часть энергии сосредоточена в среднем слое волновода. Для частного случая при ν = 9 ГГц при отсутствии и наличии затухания в слоях волновода на рисунке 6 представлено распределение модуля напряженности электрического поля, на рис. 7 — графики распределения плотности мощности. На рис. 8 представлен график распределения объемной плотности потерь мощности при частоте 9 ГГц и значениях тангенсов диэлектрических потерь в отдельных слоях $tg\delta_1 = 0{,}2$; $tg\delta_2 = 0{,}1$; $tg\delta_3 = 0{,}1$.

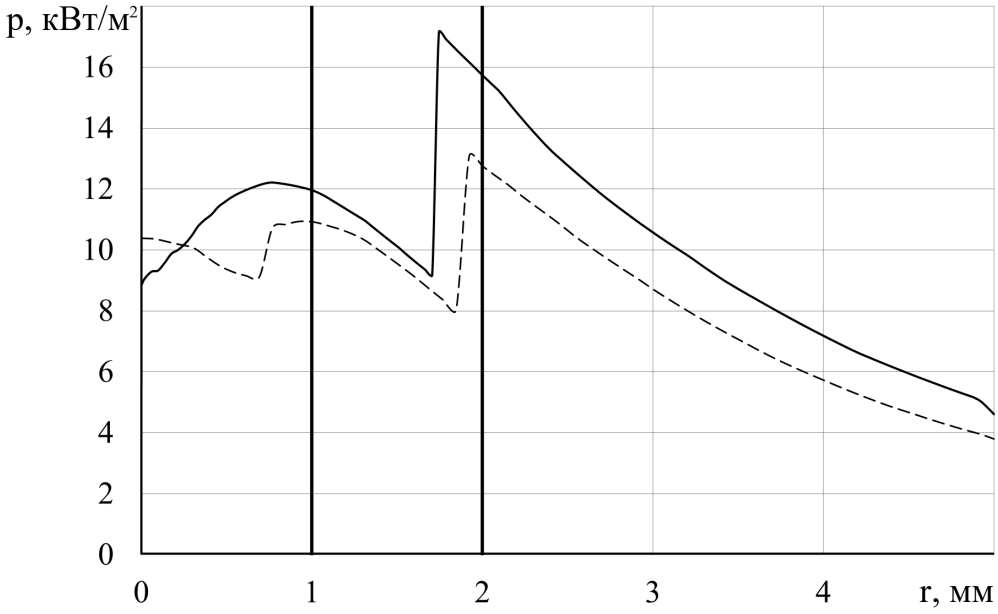


Рис. 7. *Распределение плотности мощности гибридных волн* HE_{11} *при частоте* 9 *ГГц.*

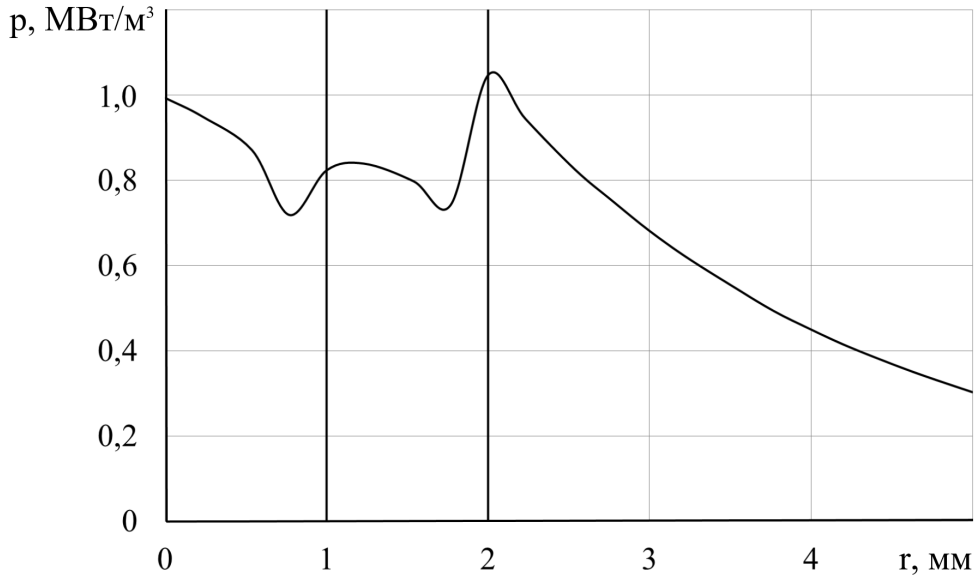


Рис. 8. *Распределение объемной плотности потерь мощности* HE_{11}*-волн при частоте* 9 *ГГц.*

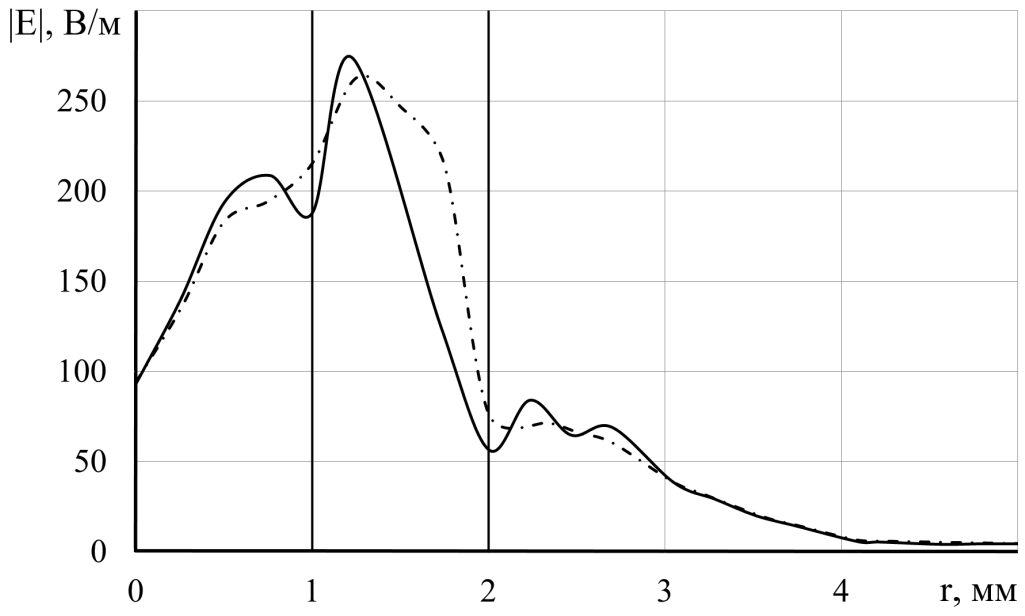


Рис. 9. *Сравнение результатов аналитических расчетов и моделирования распределения* |E| *для случая* E_{01}*-волн.*

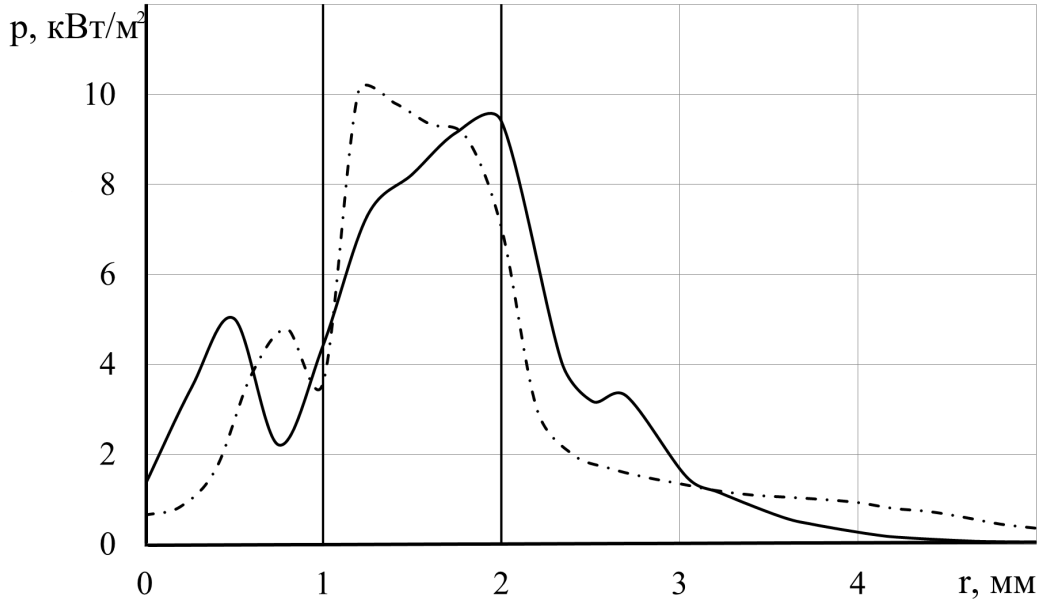


Рис. 10. *Сравнение расчетных значений и компьютерного моделирования плотности мощности для случая* E_{11}.

Сравнение графиков, полученных в результате аналитических расчетов (сплошная линия) и компьютерного моделирования (штрих-пунктирная линия), приведены на рис. 9, 10. На рис. 9 показаны графики распределения модуля напряженности электрического поля в зависимости от радиальной координаты для случая E_{01} при частоте 36 ГГц. На рис. 10 представлено сравнение зависимостей плотности мощности от радиальной координаты.

В ходе моделирования распространения волн электрического, магнитного и гибридного типов в диапазоне порядка 5–45 ГГц были выявлены некоторые особенности поведения волн. При отсутствии затухания или наличии небольшого затухания основной поток сосредоточен преимущественно на границе первого и второго слоев для волн E_{01} (20 ГГц), E_{11} (35 ГГц), H_{11} (35 ГГц), H_{01} (29 ГГц, 35 ГГц), в области диэлектрического канала — для волн E_{01} (36 ГГц), E_{11} (41,3 ГГц), HE_{11} (9 ГГц), преимущественно в первом слое — для волн H_{11} (24 ГГц).

Наибольшая концентрация плотности мощности в среднем слое и на границах слоев для E_{11} — волн наблюдается при частоте 41,3 ГГц как при отсутствии, так и при наличии затухания, а также для HE_{11} при частотах в диапазоне от 8 до 12 ГГц. Для H_{11} — волн при частоте $\nu_1 = 24$ ГГц наблюдается большая устойчивость к затуханию.

Заключение

Как было показано выше, полученные в результате аналитических расчетов графики достаточно хорошо совпадают с результатами компьютерного моделирования.

При увеличении затухания в слоях волновода в случае волн электрического типа в значительной мере перераспределяется электрическое поле, изменяется локализация основного потока; как у магнитных, так и у электрических типов волн максимум модуля напряженности электрического поля наблюдается на границах слоёв волновода.

Для гибридного типа волн концентрация основного поля в диэлектрическом канале наблюдается в более широком диапазоне частот, чем для волн электрического и магнитного типа при тех же параметрах волновода.

Волноводная линия передач, представляющая собой структуру из соосных диэлектрических слоев, играет важную роль при использовании в миллиметровом диапазоне электромагнитных волн. Понимание влияния затухания на различные типы волн является важным для разработки эффективных систем связи и передачи данных, а также для выбора оптимальных параметров волновода для конкретных технологических задач.

Список литературы

1. *Kapoor, A., Singh, G. S.* Mode classification in cylindrical dielectric waveguides // Journal of Lightwave Technology. 2000. Vol. 18. No. 5. P. 849–852.
2. *Snitzer, E.* Cylindrical Dielectric Waveguide Modes // Journal of the Optical Society of America. 1961. Vol. 51. No. 5. P. 491-498. DOI: 10.1364/JOSA.51.000491
3. *Wang, M.* Exciting Circular TM11 Mode Using Symmetric Probes Based on Ridge Gap Waveguide // IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques. 2022. Vol. 70. No. 1. P. 334-342. DOI: 10.1109/TMTT.2021.3121324
4. *Donchenko, A., Zargano, G.F., and Zemlyakov, V.V.* Electrodynamic Analysis of Electromagnetic Hybrid Waves in a Ridged Waveguide // Radiophysics and Quantum Electronics. 2018. Vol. 60. No. 10. P. 786–796. DOI: 10.1007/s11141-018-9847-x
5. *Zargano, G.F., Sinyavskii, G.P., Tkachenko, V.P.* Electrodynamic Analysis of Electromagnetic Fields of Hybrid Waves in Single- And Double-Groove Waveguides // Journal of Communications Technology and Electronics. 1998. Vol. 43. No. 12. P. 1330-1336.
6. *Джексон Дж.* Классическая электродинамика: Пер. с англ. Г.В. Воскресенского и Л.С. Соловьева. М.: Мир, 1965.
7. *Petrov, D.A., Rozanov K.N., Koledintseva, M.Y.* Influence of Higher-order Modes in Coaxial Waveguide on Measurements of Material Parameters // IEEE Symposium on Electromagnetic Compatibility, Signal Integrity and Power Integrity. 2018. P. 66-70. DOI: 10.1109/EMCSI.2018.8495305
8. *Decrossas, E., El Sabbagh, M.A., Hanna, V.H., El-Ghazaly, S.M.* Mode matching technique-based modeling of coaxial and circular waveguide discontinuities for material characterization purposes // International Journal of Microwave and Wireless Technologies. 2011. Vol. 3. No. 6. P. 679-690. DOI: 10.1017/S1759078711000808
9. *Федоров Н.Н.* Основы электродинамики: учебное пособие для вузов. М.: Высш. школа, 1980.
10. *Herhil, Y., Piltyay, S., Bulashenko, A., Bulashenko, O.* Characteristic Impedances of Rectangular and Circular Waveguides for Fundamental Modes // IEEE 3rd Ukraine Conference on Electrical and Computer Engineering. 2021. P. 46-51. DOI: 10.1109/UKRCON53503.2021.9575359
11. *Sihvola, A.* Mixing Rules with Complex Dielectric Coefficients // Subsurface Sensing Technologies and Applications. 2000. Vol. 1. No. 4. P. 393–415. DOI: 10.1023/A:1026511515005
12. *Yeh, C.* Shimabukuro, F.I. The essence of dielectric waveguides. Springer. 2008.
13. *Belous, R.I.* Propagation constant of eigen electromagnetic waves in three-layer cylindrical waveguide // MSMW'2001 Symposium Proceedings. 2001. Vol. 1. P. 205-207. DOI: 10.1109/MSMW.2001.946789
14. *Smolkin, E.Y.* On the problem of propagation of nonlinear coupled TE-TM waves in a double-layer nonlinear inhomogeneous cylindrical waveguide // Days on Diffraction. 2015. P. 1-5. DOI: 10.1109/DD.2015.7354884
15. *Мительман Ю. Е., Шабунин С. Н.* Электродинамика многослойных цилиндрических направляющих систем. 2013.
16. *Заргано Г.Ф., Шеин А.Г., Харланова Т.С.* Исследование условий максимальной концентрации мощности в диэлектрическом волноводном канале // Физические основы приборостроения. 2021. Т. 10. № 1. С. 48-56.
17. *Shein, A.G., Kharlanova, T.S.* Features of electromagnetic wave propagation in two- and three-layer cylindrical dielectric waveguides // ITM Web of Conferences. 2019. Vol. 30. P. 06006. DOI: 10.1051/itmconf/20193006006
18. *Курушин А.А., Пластиков А.Н.* Проектирование СВЧ устройств в среде CST Microwave Studio. М.: Издательство МЭИ, 2011.

Поступила 23 апреля 2023 г.

STUDY OF ELECTROMAGNETIC WAVE ATTENUATION IN A THREE-LAYER DIELECTRIC WAVEGUIDE

G.F. ZARGANO, T.S. KHARLANOVA

doi: 10.25210/jfop-2302-VMCVBO | **edn:** VMCVBO

Attenuation of electromagnetic waves of electric (E), magnetic (H) and hybrid (HE) types in a regular three-layer circular dielectric waveguide is considered in this paper. Expressions for the E- and H-wave components in each layer of the waveguide are presented. The results of numerical modeling by finite element method for electric field distribution in the waveguide layers are presented. For some particular cases graphs of dependence of electric field of electromagnetic waves on the radial coordinate in the cross section of the waveguide at increase of imaginary part of relative permittivity and graphs of power density distribution in the absence and presence of attenuation are presented. The results of analytical calculations and computer modeling are compared.

Several cases are considered, when the attenuation takes place in separate layers, and the character of frequency changes, at which the concentration of the main electromagnetic wave flow in the dielectric channel (middle layer) of the three-layer waveguide is observed, are investigated. The character of the electric field distribution is analyzed as the attenuation in the waveguide layers increases.

With increasing attenuation in the layers of the waveguide in the case of electric waves, the electric field is redistributed to a large extent, the localization of the main flow changes; for both magnetic and electric wave types, the maximum electric field strength module is observed at the boundaries of the waveguide layers.

For the hybrid type of waves, the concentration of the main field in the dielectric channel is observed in a wider frequency range than for the electric and magnetic wave types for the same parameters of the waveguide.

The waveguide transmission line, which is a structure of coaxial dielectric layers, plays an important role when used in the millimeter range of electromagnetic waves. Understanding the effects of attenuation on different types of waves is important for the development of efficient communication and data transmission systems, as well as for the selection of optimal waveguide parameters for specific technological applications.

Уважаемые читатели!

Журнал включен:

- В ***Российский индекс научного цитирования*** (***РИНЦ***).
- В базу данных ***Russian Science Citation Index*** (***RSCI***) на платформе ***Web of Science.***
- В ***Перечень рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук.***

ПРИБОРЫ И МЕТОДЫ ФИЗИКИ И ТЕХНИКИ СВЧ ДИАПАЗОНА

УДК 621.385.6

КЛИНОТРОН НА ОТКРЫТОМ РЕЗОНАТОРЕ С СИММЕТРИЧНЫМИ КОНИЧЕСКИМИ ГОФРИРОВАННЫМИ ЗЕРКАЛАМИ — ГОРАТРОН

© Авторы, 2023
doi: 10.25210/jfop-2302-UEXSFC | **edn:** UEXSFC

Кравченко В. Ф.— заслуженный деятель науки РФ, д.ф.- м.н., гл.н.с., Институт радиотехники и электроники им. В. А. Котельникова РАН; Научно-технологический центр уникального приборостроения РАН; профессор кафедры высшей математики ФН-1, Московский государственный технический университет им. Н. Э. Баумана, Москва. E-mail: kvf-ok@mail.ru

Кураев А. А.— заслуженный деятель науки Республики Беларусь, д.ф.-м.н., профессор кафедры информационные радиотехнологии, Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, Республики Беларусь, Минск. E-mail: kurayev@bsuir.by

Матвеенко В. В.— к.ф.-м.н., доцент кафедры вычислительных методов и программирования, Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, Республики Беларусь, Минск. E-mail: vladzimir66@bsuir.by

Матвеенко И. П. — к.т.н., доцент кафедры автоматизированных систем управления производством, Белорусский государственный аграрный технический университет, Республика Беларусь, Минск. E-mail: mira37@tut.by

Аннотация

Представлено дальнейшее развитие идеи радиального клинооротрона — клинотрон с симметричными коническими радиально гофрированными зеркалами резонатора — горатрон (ГОфрированные РАдиально зеркала, ТРОН — прибор). В таком приборе образуется сильная связь объемного поля и поверхностных резонансных полей сдвоенных конических зеркал, благодаря чему поле синхронной гармоники присутствует вблизи верхнего и нижнего зеркал. Это делает возможным использование двухлучевого ЭП. Коническая же геометрия зеркал обеспечивает клинотронный эффект. В результате повышается не только допустимая мощность прибора, но его КПД по сравнению с обычным радиальным клинооротроном. Приведены результаты расчета варианта горатрона при β_0=0.128. Решение двумерной краевой задачи для потенциала $V(r, z)=rB_\varphi(r, z)$, определяющего осесимметричное колебание резонатора горатрона E_{0m2}, проводилось с использованием стандартных пакетов для решения общих дифференциальных уравнений в частных производных с использованием конечных элементов. Анализ распределений $E_r(r, z)$, $E_z(r, z)$, $B_\varphi(r, z)$ показывает, что периодическая компонента поля существует во всем пространстве между гребенчатыми зеркалами. Такая особенность позволяет использовать двухлучевой электронный поток (ЭП). Модель ЭП горатрона содержала 3 слоя на каждый луч ±z по Δz=0.1, уравнения движения — релятивистские. Средний по всем слоям электронный КПД составил более 30%, что в 1.5 раза больше, чем получено в расчетах КПД радиального клинотрона.

Ключевые слова: *клинооротрон, открытый резонатор, гофрированные конические зеркала, радиальный электронный поток, терагерцы*

Abstract

The further development of the radial klynoorotron idea — klynotron with symmetric conical radial corrugated resonator mirrors are presented. Strong coupling volume and surface resonance fields in the double conical mirrors in such a device is formed due to which the synchronous harmonic field is near the upper and lower mirrors. All saying above makes possible to use a two-beam electronic flow. The conical mirror geometry provides a klynotron effect. As a result, not only the permissible device power is increased, but also its efficiency in compared to a conventional radial klynoorotron. The article presents the calculating results of the GORATRON at β_0=0.128. The solution of the two-dimensional boundary value problem for the potential $V(r, z) = rB_\varphi(r, z)$, which determines GORATRON resonator axisymmetric oscillation E_{0m2}, was carried out by standard packages for solving general partial differential equations using finite elements. The distribution analysis $E_r(r, z)$, $E_z(r, z)$, $B_\varphi(r, z)$ shows that the field periodic component exists in the entire space between the comb mirrors. Given feature allows the use of a two-beam electronic flow. GORATRON electron flow model contains 3 layers for each beam ±z for Δz=0.1, the equations of motion were relativistic. The electronic efficiency averaged over all layers is more than 30%, which is 1.5 times higher than that obtained in the radial klynotron efficiency calculations.

Keywords: *klynoorotron, open resonator, corrugated conical mirrors, radial electron flow, terahertz*

Кравченко В.Ф., Кураев А.А., Матвеенко В.В., Матвеенко И.П. Клинотрон на открытом резонаторе с симметричными коническими гофрированными зеркалами — горатрон // Физические основы приборостроения. 2023. Т. 12. № 2(48). С. 60-65. DOI: 10.25210/jfop-2302-UEXSFC. EDN: UEXSFC

Введение

Оротроны –генераторы на открытом резонаторе с дифракционной решеткой на одном из зеркал — сыграли определенную роль на первоначальном освоении миллиметрового и субмиллиметрового диапазонов длин волн благодаря их разработке в ИРЭ АН СССР (Москва) и ИРЭ АН УССР (Харьков) [1]. Однако оротроны имели невысокую эффективность (КПД) и поэтому к 1980 г. появились их улучшенные модификации: с двойной решеткой (ИРЭ АН СССР) и двойной гребенкой, нормальной к плоскости нижнего зеркала (орботрон — ИРЭ АН УССР). Введение дополнительного ступенчатого трансформатора на нижнем зеркале перед сдвоенной гребенкой значительно улучшило КПД орботрона [2]. Однако оставалась еще одна проблема — жесткое ограничение на толщину электронного потока: она должна быть значительно меньше четверти длины волны. Для преодоления этого ограничения были предложены и рассчитаны оротроны с использованием клинотронного эффекта: коаксиальный клинотрон [3] и радиальный клинооротрон [4].

Клинотронный эффект был обнаружен в ИРЭ АН УССР Г.Я. Левиным в 1956 году. Этот эффект состоит в том, что при наклонном падении под малым углом на периодическую замедляющую систему (ПЗС) все слои электронного потока (ЭП) конечной толщины последовательно вступают во взаимодействие с интенсивным полем на поверхности ПЗС. Благодаря этому повышается как мощность генератора (относительно широкий ЭП), так и его эффективность (интенсивное взаимодействие всех слоев ЭП). Клинотронный эффект нашел широкое применение в клинотронах миллиметрового и субмиллиметрового диапазонов длин волн. Обзор работ (экспериментальных и теоретических), содержащий ссылки на 101 публикацию, приведен в [5].

В настоящей статье представлено дальнейшее развитие идеи радиального клинооротрона — клинотрон с симметричными коническими радиально гофрированными зеркалами резонатора — горатрон (ГОфрированные РАдиально зеркала, ТРОН — прибор). В таком приборе образуется сильная связь объемного поля и поверхностных резонансных полей сдвоенных конических зеркал, благодаря чему поле синхронной гармоники присутствует во всем межзеркальном пространстве. Это делает возможным использование двухлучевого ЭП. Коническая же геометрия зеркал обеспечивает клинотронный эффект. В результате повышается не только допустимая мощность прибора, но его КПД по сравнению с обычным радиальным клинооротроном.

Принципиальная схема горатрона

Схема поперечного сечения горотрона в плоскости *r, z* приведена на рис. 1.

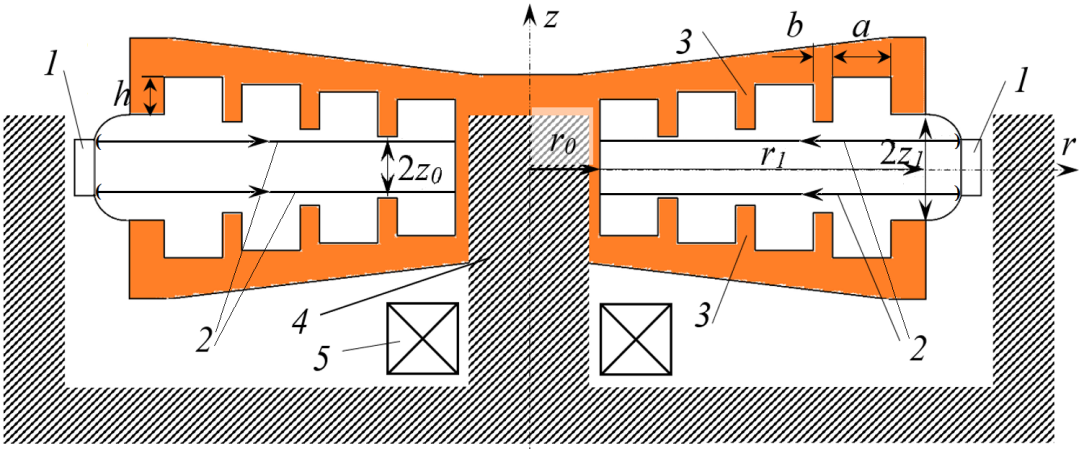


Рис. 1. *Поперечное сечение горатрона в плоскости r, z:* 1 — *кольцевая электронная пушка, формирующая два симметричных по z радиально сходящихся плоских электронный потоков* — 2; 3 — *конические гребенки открытого резонатора* (*ОР*) *горатрона. h–глубина азимутальных канавок, a–ширина канавок, b — ширина зуба гребенок; a+b — радиальный период гребенок;* 4 — *магнитопровод фокусирующего ЭП электромагнита;* 5 — *катушка питания электромагнита.* r_0 — *начальный радиус гребенчатых зеркал,* r_1 — *конечный радиус;* z_0 — *начальное расстояние зеркал от плоскости симметрии* ($r = 0$) *ОР при* r_0, z_1 — *конечное расстояние при* $r = r_1$. *Таким образом, длина области взаимодействия по r равна* $L = r_1 - r_0$.

Все приведенные величины приводятся в безразмерной форме: $r = r'k$, $z = z'k$. Здесь $k = 2\pi/\lambda$, λ — длина волны генератора, величины со штрихом — размерные. На схеме для упрощения рисунка изображено только 4 периода гребенок. На самом деле их должно быть 20–80. Выводы энергии и каналы водяного охлаждения на схеме не указаны.

Электродинамическая задача

Электромагнитное поле электродинамической системы радиального клинооротрона-горатрона представляет собой связаное колебание азимутально-симметричного типа колебаний открытого резонатора E_{012} и синфазного колебания T_{01} мод коаксиальных ячеек двух решеток.

Ввиду азимутальной симметрии искомого E-поля краевая задача для него оказывается скалярной. В качестве скалярной переменной можно выбрать z — составляющую электрического вектора Герца $\dot{\Pi}_z^e$, можно B_φ (единственная составляющая магнитного поля колебания). Последнее предпочтительнее, поскольку составляющие электрического поля (по второму уравнению Максвелла) находятся через однократное дифференцирование B_φ — $rot\left(\vec{\varphi}_0 B_\varphi\right)$, а через $\dot{\Pi}_z^e$ необходимо двукратное дифференцирование $\dot{\Pi}_z^e$ [6].

Однако и выбор B_φ в качестве потенциала краевой задачи неоптимален: дифференцирование в $rot\left(\vec{\varphi}_0 B_\varphi\right)$ производится не от B_φ, а от rB_φ. Таким образом, за потенциал краевой задачи следует принять $V(r, z) = rB_\varphi(r, z)$.

Уравнение Гельмгольца для B_φ имеет вид

$$\nabla^2 B_\varphi + k^2 B_\varphi - B_\varphi / r'^2 = 0,\ k = \omega/c.$$

В соответствии с ним уравнение для V в безразмерных переменных записывается как

$$\frac{\partial}{\partial r}\left(\frac{1}{r}\frac{\partial V}{\partial r}\right) + \frac{\partial}{\partial z}\left(\frac{1}{r}\frac{\partial V}{\partial z}\right) + W^2 V = 0. \tag{1}$$

Здесь $r = k_0 r'$, $z = k_0 z'$, $k_0 = \omega_0/c$, $W = \omega/\omega_0$, ω_0 — резонансная частота, c — скорость света в пустоте, штрихованные координаты — размерные.

Компоненты электромагнитного поля выражаются через $V(r, z)$ следующим образом:

$$\dot{E}_r = \frac{j}{W}\frac{\partial V}{r\partial z},\quad \dot{E}_z = -\frac{j}{W}\frac{\partial V}{r\partial r},\quad \dot{B}_\varphi = \frac{V}{r}. \tag{2}$$

Граничные условия к (1) в соответствии с (2) задаются следующим образом:

$$\begin{aligned} &\text{на металлических поверхностях } \frac{\partial V}{\partial \vec{n}} = 0,\ \left(\vec{E}_r = 0\right);\\ &\text{на открытой границе резонатора } V = 0,\ \left(B_\varphi = 0\right);\\ &\text{на оси симметрии z (r = 0) } \frac{V}{r} = 0,\ \left(\vec{B}_\varphi = 0\right). \end{aligned} \tag{3}$$

Выражения (2) относятся к безразмерным компонентам поля: $\dot{\vec{E}} = \frac{\dot{\vec{E}}'}{E_m}$, $\dot{\vec{B}} = \frac{\dot{\vec{B}}' c}{E_m}$, $E_m = m_0\omega_0 c/e$; e, m_0 — заряд и масса покоя электрона. Штрихованные компоненты размерные.

Уравнения движения электронов

Безразмерные релятивистские уравнения движения крупных частиц-электронов, моделирующих ЭП, имеют вид

$$\begin{aligned} \frac{dP_{rli}}{d\theta} &= -\left(\frac{\gamma_{li}\beta_{\varphi li}^2}{r} - E_r + \beta_{zli} B_\varphi\right),\\ \frac{dP_{\varphi li}}{d\theta} &= -\left(\frac{\gamma_{li}\beta_{rli}\beta_{\varphi li}}{r} - \beta_{zli} F_r\right),\\ \frac{dP_{zli}}{d\theta} &= -\left(-E_z - \beta_{rli} B_\varphi + \beta_{\varphi li} F_z\right), \end{aligned} \tag{4}$$

$$\frac{dz_{li}}{d\theta} = -\beta_{zli},\ \frac{dr_{li}}{d\theta} = -\beta_{rli},\ P_{li} = \gamma_{li}\beta_{li},\ \beta_{li} = \frac{v_{li}}{c},\ \gamma_{li} = \sqrt{1 + P_{rli}^2 + P_{\phi li}^2 + P_{zli}^2},\ \theta = \omega t.$$

Начальные условия для слоя ЭП с индексом l и электронов этого слоя с фазовым номером i имеют вид

$$r_{li}(0) = r_1,\quad z_{li}(0) = l\Delta z,\quad l = \overline{1, N_s},\quad \theta_i(0) = \frac{2\pi i}{N},\quad i = \overline{1, N}. \tag{5}$$

Безразмерные компоненты полей в (4) записываются как

$$F_r = \frac{F_0}{r},\ F_0 = r_1\frac{B_0(r_1)e}{m_0\omega},\ \dot{\vec{E}} = \frac{e\dot{\vec{E}}'}{m_0\omega_0 c} = A\cdot\vec{E}^0 e^{j\theta},$$

$$A = \frac{eE'_{\max}}{m_0\omega_0 c},\ \vec{E}^0 = \frac{\vec{E}'}{E_{\max}},\ \vec{E} = \mathrm{Re}\dot{\vec{E}} = A\vec{E}^0(r,z)\cos\theta,$$

$$\dot{\vec{B}} = -jA\cdot\vec{B}^0 e^{j\theta},\ \vec{B}^0 = \frac{\vec{B}'}{B_{\max}},\ \vec{B} = \mathrm{Re}\dot{\vec{B}} = A\vec{B}^0(r,z)\sin\theta,\ \theta = \omega t.$$

Конец интегрирования траектории электрона с индексами (li) определяется условиями: z_{li} и r_{li} попадают на границу гребенки ($Q_\perp$ или $Q_\parallel$), т.е. на торец или боковую поверхность зуба гребенки, или достигают $r = r_0$.

Как показано в [5], поле пространственного заряда ЭП несущественно в клинотронах из-за большого сечения ЭП и, соответственно, малой плотности заряда. В рассматриваемом случае горатрона — тем более, поскольку поле резонатора значительно интенсивнее, чем поле бегущей волны в клинотроне. По этим причинам поле пространственного заряда в модели горатрона не учитывается.

Электронный КПД слоя l определяется как

$$\eta_l^e = \frac{1}{N_{es}} \sum_{l=1}^{N_{es}} \frac{\gamma_0 - \gamma_{li}(k)}{\gamma_0 - 1},$$

где $\gamma_{li}(k)$ — значение γ_{li} в конечной точке, т.е. в точке оседания на поверхность зуба гребенки.

Суммарный по слоям КПД

$$\eta^e = \frac{1}{N_s} \sum_{l=1}^{N_s} \eta_l^e \tag{6}$$

Нагруженная добротность резонатора, при которой достигается полученное в расчете и оптимизации значение A, определяется как

$$Q_н = \frac{\omega_0 W_v}{\eta^e I_0 V_0} \approx \frac{2 \cdot 10^8 A^2}{\eta^e I_0 V_0} \int_D B_\varphi^0 r dr dz, \tag{7}$$

где D — область вертикального сечения (r, z) резонатора, W — запасаемая энергия в резонаторе, I_0 — ток ЭП в амперах, V_0 — напряжение пучка в вольтах.

Результаты расчета горатрона

Рассчитывая вариант горатрона при $\beta_0 = 0.128$ (ускоряющее напряжение ЭП $V_0 = 4.24$ кВ) со следующими параметрами резонатора $r_0 = 20$, $r_1 = 32.5$, $z_0 = 0.84$, $z_1 = 0.95$, $h = 0.6708$, $a = 0.1562$, $b = 0.4688$. Число ячеек гребенок зеркал $n = 10$. Тип объемного поля открытого резонатора E_{012}. Относительная фазовая скорость обратной волны гребенки при указанных параметрах составляет $\beta_ф = v_ф/c = 0.105$. Таким образом, режим работы соответствует отстройке от синхронизма: $\beta_0 > \beta_ф$.

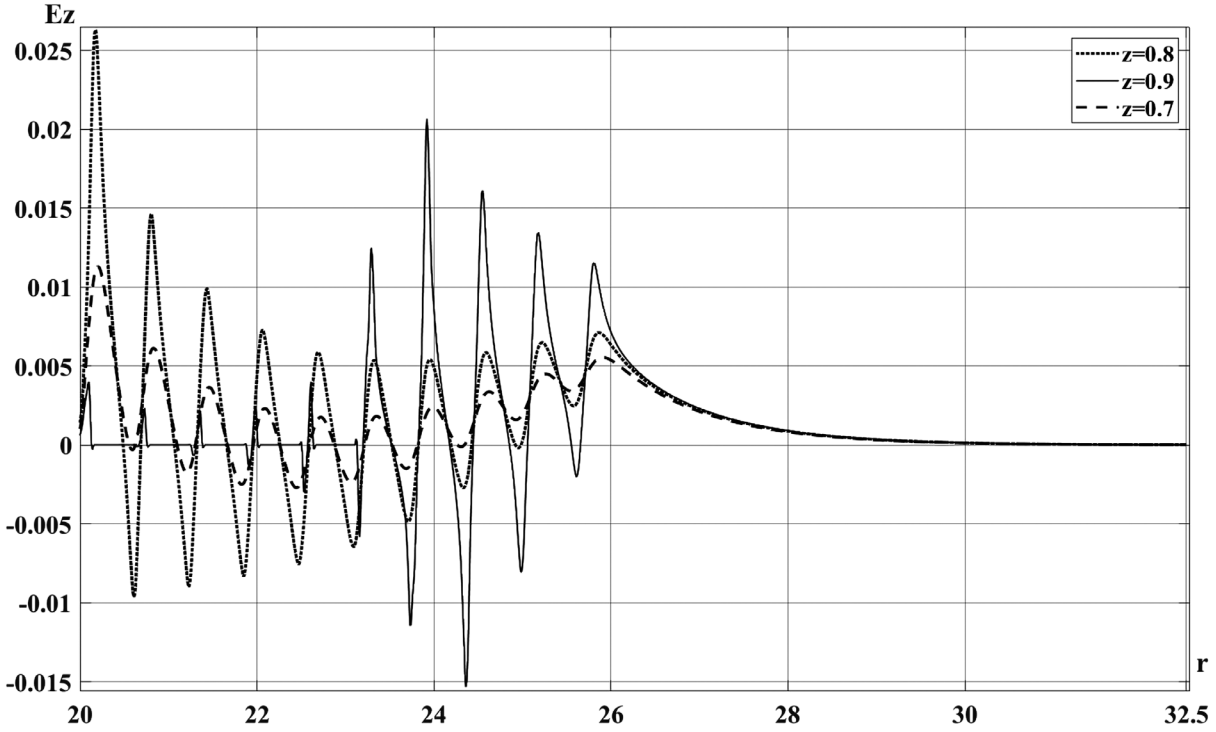


Рис. 2. *Распределение $E_z°(r, z)$: а — $z = \pm0.7, \pm0.8, \pm0.9$.*

Функция $V(r, z)$, как результат решения краевой задачи (1), (3), получено на основе стандартных пакетов для решения общих дифференциальных уравнений в частных производных с использованием конечных элементов. Поля E_r, E_z, B_φ вычислялись по формулам (2). Распределения нормированной $E_z°$ на трех уровнях z: ±0.7, ±0.8, ±0.9 приведены на рис. 2. Из рисунка видно, что на обоих уровнях объемное поле резонатора промодулировано периодическим полем гребенок, т.е. существует сильная связь этих полей во всем пространстве взаимодействия.

На рис. 3 представлено распределение нормированной компоненты E_r° при z = ±0.7, ±0.8, ±0.9. Здесь также видна сильная связь полей решеток и объемного поля.

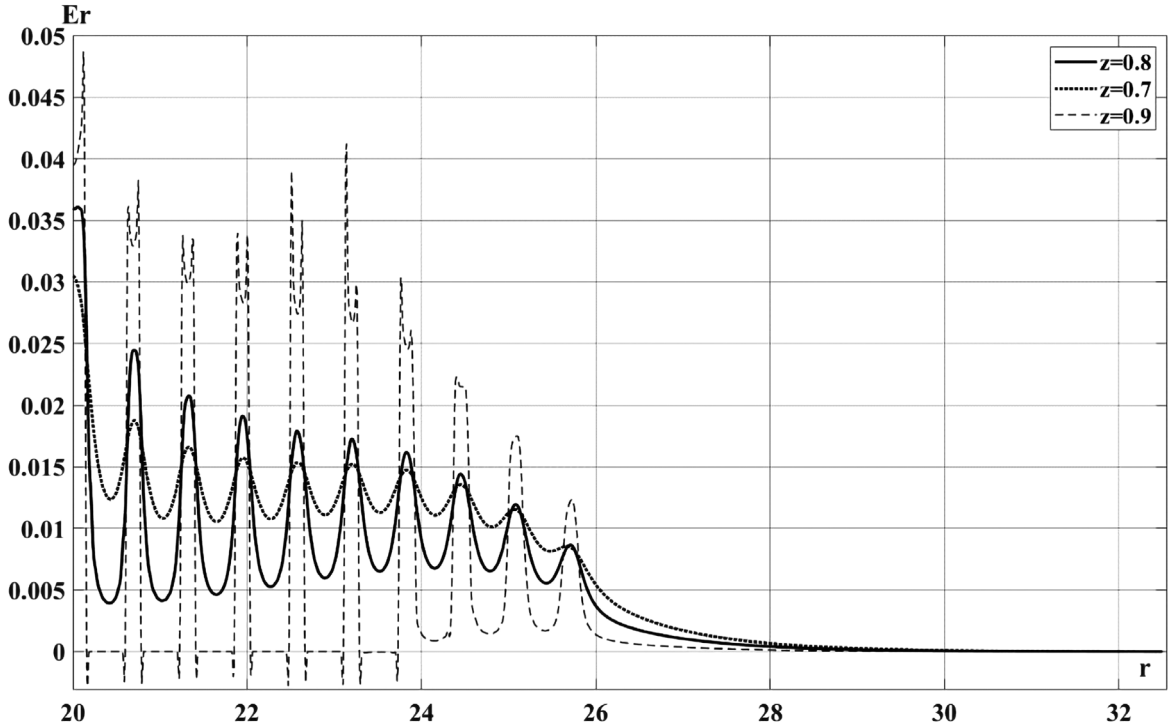


Рис. 3. *Распределение* $E_r^\circ(r, z)$*:* z = ±0.7, ±0.8, ±0.9.

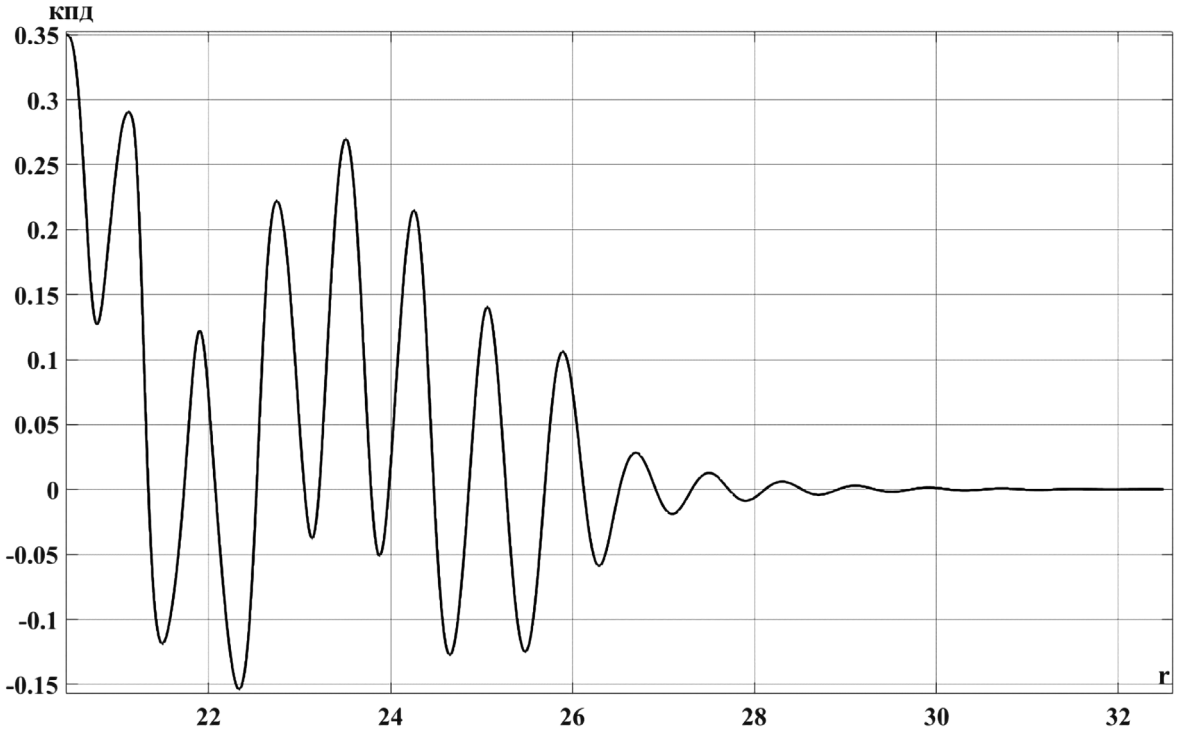


Рис. 4. *Распределение* $\eta^e(r)$ *при* l =1.

При решении уравнений движения электронов (4) ЭП разбивался на l = 1 слоев при $r = r_1$: z = 0.8. При F_0 = 0.3077 и A = 0.055 КПД горатрона составил 35%. График прироста $\eta^e(r)$ при l=1 в пространстве взаимодействия по r представлен на рисунке 4. Просматривается участки медленного и быстрого роста КПД. Такое чередование обусловлено периодичностью группирования электронов в сложном комбинированном поле резонатора горатрона при отстройке от синхронизма ($\beta_0 > \beta_ф$). Рабочая нагруженная добротность резонатора для этого варианта горатрона $Q = 4.4/I_0[A]$ в соответствии с формулой (7).

Заключение

Горатрон, как развитие идеи радиального клинооротрона, представляется перспективной конструкцией, обеспечивающий повышение КПД клинотронов и их мощности за счет пространственно развитого электронного пучка. Пучок имеет большой начальный радиус ($r_1 \approx 32.5$). КПД горотрона превосходит КПД радиального клинортрона в 1.5 раза. При этом надо иметь ввиду, что полная оптимизация по КПД конструкции горатрона может существенно повысить его величину. Следует также отметить особенность режима работы горатрона при отстройке от синхронизма ($\beta_0 > \beta_ф$).

Список литературы

1. *Мясин Е. А.* Оротрон и его модификации // В сб. «Генерация и усиление сигналов терагерцового диапазона». Изд СРТУ, Саратов, 2016. С. 160–194.
2. *Кравченко В. Ф., Кураев А. А., Матвеенко В. В.* Орбиктроны-генераторы субмиллиметрового и миллиметрового диапазонов. Часть I // Физические основы приборостроения. 2016. Т. 5. № 2. С. 102–115.
3. *Кураев А. А., Синицын А. К.* Клинооротрон на коаксиальном резонаторе // Доклады БГУИР. 2010. № 7 (47). С. 12–18.
4. *Кураев А. А., Синицын А. К.* Радиальный клинооротрон // Доклады БГУИР. 2012. № 3 (65). С. 98–104.
5. *Еремка В. Д., Пишко О. Ф.* Применение клинотронного эффекта в вакуумных источниках терагерцовых электромагнитных колебаний // Радиофизика та електроника. 2018. Т. 23. № 3. С. 8–39.
6. *Кураев А. А., Попкова Т. Л., Синицын А. К.* Электродинамика и распространение радиоволн. М.: ИНФРА-М, 2016. 424 с.

Поступила 5 апреля 2022 г.

KLYNOTRON WITH USING THE OPEN RESONATOR AND SYMMETRIC CONICAL CORRUGATED MIRRORS — GORATRON

V. F. KRAVCHENKO, A.A. KURAYEV, V.V. MATVEYENKA, AND I.P. MATVEYENKA

doi: 10.25210/jfop-2302-UEXSFC | **edn:** UEXSFC

This article presents a further development of the radial klynoorotron idea — klynotron with symmetric conical radial corrugated resonator mirrors. Strong coupling volume and surface resonance fields in the double conical mirrors in such a device is formed due to which the synchronous harmonic field is near the upper and lower mirrors. All saying above makes possible to use a two-beam electronic flow. The conical mirror geometry provides a klynotron effect. As a result, not only the permissible device power is increased, but also its efficiency in compared to a conventional radial klynoorotron. The article presents the calculating results of the GORATRON at β_0=0.128. The solution of the two-dimensional boundary value problem for the potential $V(r, z) = rB_\varphi(r, z)$, which determines GORATRON resonator axisymmetric oscillation E_{0m2}, was carried out by standard packages for solving general partial differential equations using finite elements. The distribution analysis $E_r(r, z)$, $E_z(r, z)$, $B_\varphi(r, z)$ shows that the field periodic component exists in the entire space between the comb mirrors. Given feature allows the use of a two-beam electronic flow. GORATRON electron flow model contains 3 layers for each beam ±z for Δz=0.1, the equations of motion were relativistic. The electronic efficiency averaged over all layers is more than 30%, which is 1.5 times higher than that obtained in the radial klynotron efficiency calculations.

СПЕКТРАЛЬНЫЕ МЕТОДЫ И УСТРОЙСТВА

УДК 681.785.5

ДВУХЗОНДОВЫЙ ФУРЬЕ-СПЕКТРОМЕТР СРЕДНЕГО ИК-ДИАПАЗОНА

© Авторы, 2023
doi: 10.25210/jfop-2302-AXRPDF | **edn:** AXRPDF

Вагин В. А. — д.т.н., г.н.с., НТЦ УП РАН, Москва. E-mail: vaguine@mail.ru
Кузнецова Д. Ю. — аспирант, НТЦ УП РАН, Москва. E-mail: darijez@mail.ru
Хорохорин А. И. — с.н.с., НТЦ УП РАН, Москва. E-mail: sandervan@mail.ru

Аннотация
Приведено описание и даны характеристики созданного двухзондового Фурье-спектрометра для среднего инфракрасного диапазона (ИК). В основу прибора заложена схема интерферометра Майкельсона с уголковыми отражателями, перемещение подвижного отражателя осуществляется посредством параллелограммного привода. Светоделитель и компенсатор выполнены из бромида калия. На светоделитель нанесено покрытие для обеспечения необходимого уровня пропускания в диапазоне 2.8...18 мкм и для работы на длине волны референтного излучения. Рабочую скорость изменения оптической разности хода (ОРХ) в интерферометре обеспечивает референтный канал с He-Ne лазером.
Электронная часть прибора и компьютер с программным обеспечением (ПО) объединены в систему управления, регистрации и обработки спектральной информации, которая позволяет выполнять одновременную регистрацию двух интерферограмм и получение спектров исследуемого вещества. Разработанное ПО предназначено для управления прибором, регистрации интерферограмм, получения и хранения спектров, а также их вывода на средства отображения. Особенностью спектрометра является одновременная регистрация интерферограмм с двух приемников излучения. В приборе реализована методика нарушенного полного внутреннего отражения (НПВО). Для проведения измерений используется волоконный жгут, состоящий из двух совмещенных зондов с НПВО-кристаллами из селенида цинка. Возможности прибора демонстрируются рядом спектральных измерений.

Ключевые слова: *фурье-спектрометр с уголковыми отражателями, интерферометр, регистрация интерферограммы, референтный канал, оптоволоконный зонд, спектральные измерения*

Abstract
The article presents the description of the created two-probe Fourier spectrometer for the mid-infrared (IR) range. The device is based on the Michelson interferometer with corner reflectors; movable reflector displacement is carried out using a parallelogram drive. The beamsplitter and compensator are made of potassium bromide and coated to provide the required level of transmission in the range of 2.8...18 μm and operate at the reference laser wavelength. The operating speed of change in the optical path difference (OPD) in the interferometer is provided by the reference He-Ne laser.
The electronic part of the device and a computer with software are combined into a system for controlling, recording and processing spectral information, which allows simultaneous recording of two interferograms and obtaining spectra of the test substance. The developed software is designed for device control, interferograms registration, spectra acquisition, storing and displaying. A special feature of the spectrometer is the simultaneous recording of interferograms from two detectors. The device implements the attenuated total internal reflection (ATR) technique. For measuring a multiple fiber, consisting of two combined probes with ATR crystals made of zinc selenide, is used. The capabilities of the device are demonstrated by a number of spectral measurements.

Keywords: *Fourier spectrometer, interferometer, corner reflectors, reference channel, interferogram registration, fiber-optic probe, spectral measurements*

Современные спектрометры позволяют осуществлять спектральный анализ не только во взятых пробах, но и непосредственно внутри исследуемых объектов с помощью оптоволоконных зондов, что дает возможность проводить измерения без пробоподготовки в удаленных, труднодоступных и опасных для человека местах. Актуальной задачей является создание спектрометров, которые могут работать одновременно с несколькими зондами и проводить измерения в каждом канале. Такие приборы позволят осуществлять контроль сразу за несколькими фазами (диапазонами) химических, физических или технологических процессов. В Научно-технологическом центре уникального приборостроения Российской академии наук (НТЦ УП РАН) разработан специализированный спектрометр, ориентированный на работу с несколькими оптоволоконными зондами [1, 2]. Фурье-спектрометр (рис. 1) представляет собой настольный прибор, состоящий из основного блока, включающего в себя оптический и электронный узлы, персонального компьютера (ПК) и жгута из двух волоконных зондов.

Оптическая часть

Световой поток (рис. 2) от источника ИК-излучения 1 с помощью параболического зеркала 2 преобразуется в коллимированный пучок, который направляется на светоделитель 3, где делится на два пучка, идущих соответственно на подвижный 4 и неподвижный 5 уголковые отражатели. Отразившись, излучение

Вагин В.А., Кузнецова Д.Ю., Хорохорин А.И. Двухзондовый фурье-спектрометр среднего ИК-диапазона // Физические основы приборостроения. 2023. Т. 12. № 2(48). С. 66-71. DOI: 10.25210/jfop-2302-AXRPDF. EDN: AXRPDF

возвращается на светоделитель 3, где и происходит интерференция возвращающихся лучей. Результирующее излучение с помощью зеркала 6 и фокусирующей линзы 7 направляется на опторазъем 8, к которому подключен вход двухканального оптоволоконного зонда. С выходов зонда через опторазъемы 9 и 10 исследуемое ИК-излучение с помощью линз 10 и 12 фокусируется на приемную площадку приемников ИК-излучения 13 и 14 соответственно. Изменение ОРХ в интерферометре осуществляется посредством перемещения подвижного уголкового отражателя 4, укрепленного на параллелограммном приводе 15.

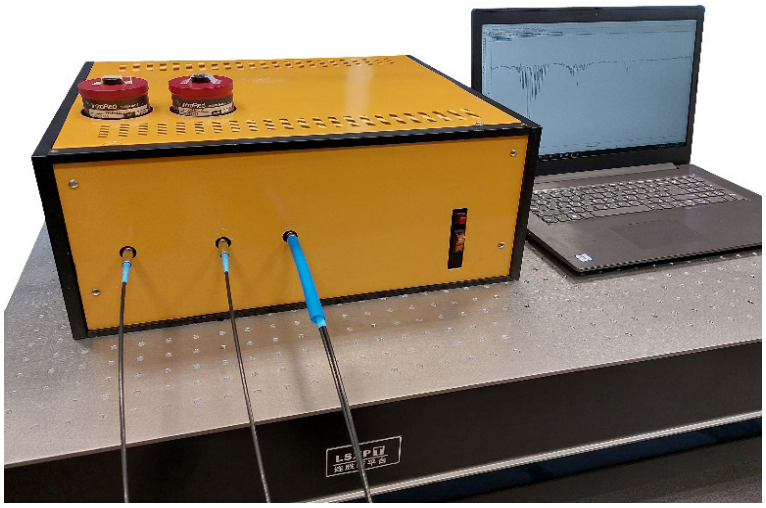


Рис. 1. *Двухзондовый фурье-спектрометр.*

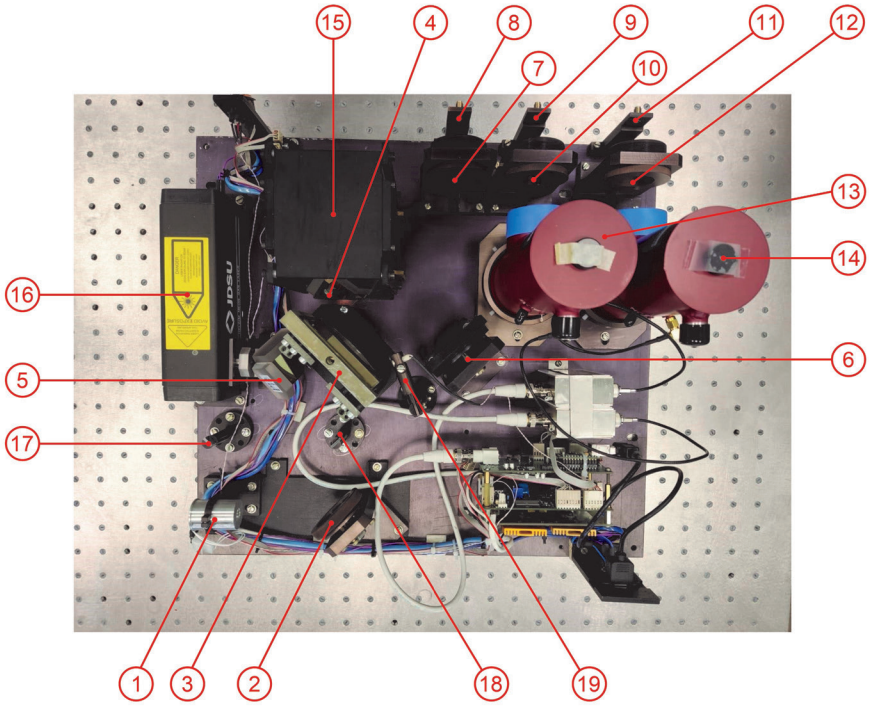


Рис. 2. *Оптический узел спектрометра:* 1 — *источник ИК-излучения;* 2 — *внеосевое параболическое зеркало;* 3 — *светоделитель с компенсатором;* 4 — *подвижный уголковый отражатель;* 5 — *неподвижный уголковый отражатель;* 6 — *вспомогательное зеркало;* 7, 10, 12 — *фокусирующие линзы;* 8, 9, 11 — *опторазъемы;* 13, 14 — *детекторы ИК-излучения;* 15 — *привод подвижного отражателя;* 16 — *референтный лазер;* 17, 18 — *плоские зеркала;* 19 — *детектор референтного излучения.*

Контроль ОРХ в интерферометре осуществляется с помощью референтного канала, в котором используется He-Ne лазер (0.633 мкм). Излучение лазера 16 посредством двух плоских зеркал 17 и 18 заводится в интерферометр, где проходит тот же путь, что и основной пучок ИК-излучения. С выхода интерферометра проинтерферировавшее лазерное излучение направляется на приемник опорного излучения 19 и преобразуется в электрический сигнал. Сигнал представляет собой гармоническое колебание с частотой, определя-

емой скоростью изменения ОРХ в плечах интерферометра. Компаратор, срабатывая при прохождении этого сигнала через ноль, создает управляющий сигнал на АЦП, обеспечивая измерение интерферограммы с шагом λ/2, где λ — длина волны лазерного излучения. Посредством референтного канала (оптической части и соответствующей платы управления перемещением подвижного зеркала) достигается необходимая стабилизация скорости изменения ОРХ в интерферометре.

Интерферометр построен по схеме, использующей уголковые зеркальные отражатели. В качестве привода, обеспечивающего перемещение подвижного отражателя, используется оригинальное параллелограммное механическое устройство [3, 4]. Светоделитель и компенсатор интерферометра выполнены из монокристаллического бромида калия. На гранях светоделителя нанесено германиевое покрытие, обеспечивающее коэффициент пропускания в диапазоне 2.8...18 мкм в пределах 0.5±0.1, и диэлектрическое покрытие для работы на длине волны излучения He-Ne лазера.

Уголковый отражатель (зеркальный триэдр) отражает падающее на него излучение строго обратно независимо от его угловых наклонов при перемещении, что позволило создать параллелограммное устройство перемещения подвижного отражателя без использования точных направляющих. Данное устройство маятникового типа включает в себя жесткий каркас, состоящий из нижней и верхней платформы и жестко связанных между собой двух боковых стоек, подвижную платформу зеркального отражателя, штанги подвеса, привод параллелограммного механизма и демпфирующий магнит.

В качестве приемников исследуемого ИК-излучения используются детекторы на полупроводниковом соединении кадмий-ртуть-теллур (КРТ), охлаждаемые жидким азотом. Их спектральный диапазон — 2...16 мкм, размеры приемной площадки — 10×10 мм^2, обнаружительная способность — более $3\cdot10^{10}$ см·Гц$^{1/2}$·Вт$^{-1}$.

Электронная часть

Электронная часть прибора и ПК с программным обеспечением (ПО) объединены в систему управления, регистрации и обработки спектральной информации фурье-спектрометра (СУ ФС). Она обеспечивает одновременную регистрацию двух интерферограмм в реальном времени и передачу их на ПК с целью обработки и получения спектров. СУ ФС (рис. 3) состоит из модуля привода отражателя, детекторов ИК-излучения, АЦП, драйверов АЦП, микроконтроллера и USB-интерфейса для связи с ПК.

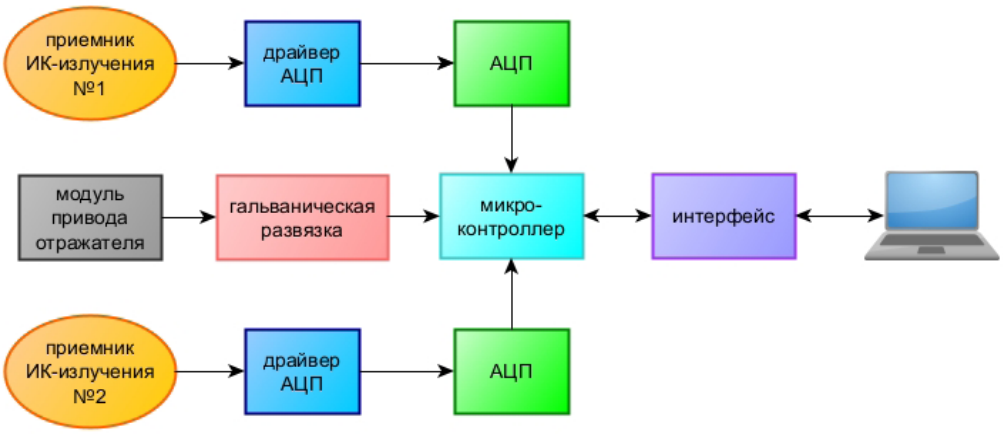
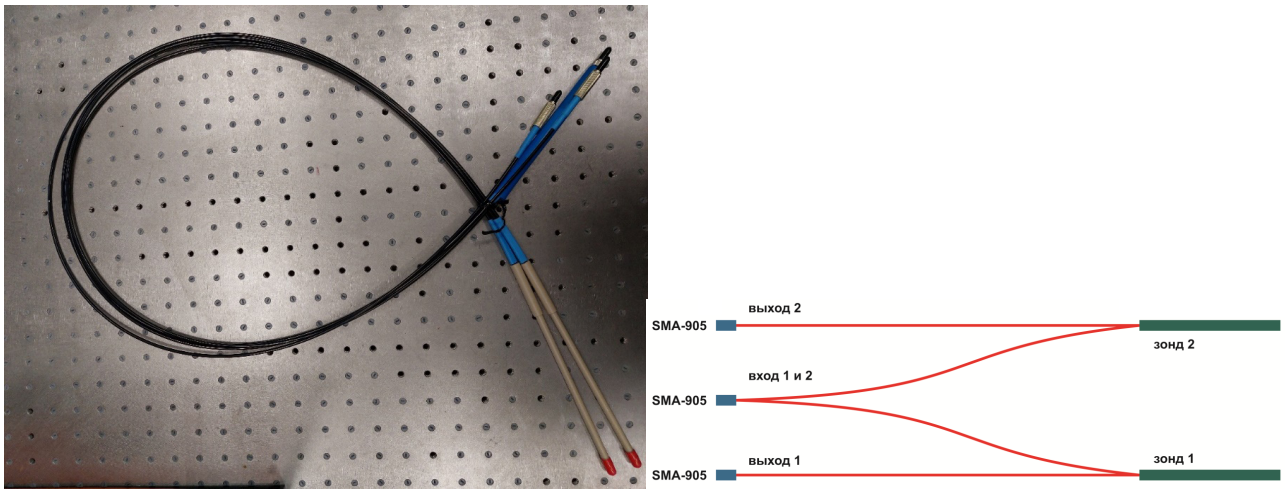


Рис. 3. *Структурная схема СУ ФС.*

Параметры измерений задаются оператором в диалоговом окне управляющей программы, которые далее заносятся в микроконтроллер (МК). МК, АЦП и USB-интерфейс составляют модуль регистрации интерферограммы и объединены восьмиразрядной шиной данных. АЦП функционируют параллельно по сигналам: запуска CNV, выбора байта A0 и A1, чтения RD и занятости BUSY. Единственный индивидуальный сигнал для каждого АЦП — сигнал выбора микросхемы.

Работа программы МК начинается с инициализации его портов и указателя стека. Для каждого вывода составляющего порта устанавливается направление передачи данных. По окончании инициализации МК ждет от ПК передачи заданных параметров (спектральное разрешение, число сканов). Принятые параметры помещаются в оперативную память МК.

В многоканальных системах приема и обработки аналоговых сигналов обычно используют единственное АЦП и коммутатор каналов. В связи с тем, что отсчеты интерферограмм по обоим каналам должны быть привязаны к одним и тем же координатам перемещения отражателя, в разработанной СУ ФС используются два АЦП. Запуск обоих АЦП происходит одновременно по меткам референтного канала спектрометра, а считывание результата преобразования — последовательно.



а) *б*)

Рис. 4. *Двухканальный оптоволоконный НПВО зонд (а). Схематичное изображение оптоволоконного жгута (б).*

Модуль привода отражателя предназначен для управления двигателем привода подвижного отражателя интерферометра. Основное требование к системе управления двигателем подвижного отражателя — обеспечение постоянной скорости изменения ОРХ с помощью ПИД-регулятора. Скорость сканирования поддерживается постоянной в обоих направлениях, что позволяет измерять интерферограммы и на обратном ходе отражателя.

Программное обеспечение прибора выполняет следующие функции:

- обеспечение регистрации интерферограмм с необходимыми предустановками (спектральным разрешением, рабочим спектральным интервалом, числом одновременно регистрируемых интерферограмм, числом накопления — когерентно суммируемых интерферограмм и т.д.);
- обработка интерферограмм путем восстановления соответствующих спектров с помощью фазовой коррекции, аподизации и Фурье-преобразования;
- обеспечение хранения полученных интерферограмм и восстановленных спектров и их вывод на средства отображения (экран монитора и принтер).

Особенность программного обеспечения — возможность одновременной регистрации интерферограмм от двух приемников ИК-излучения, соответствующих двухканальному зонду.

Следует отметить использование ПО при спектральных измерениях с временным разрешением. В этом режиме возможно наблюдение и анализ временных вариаций изменения интенсивности спектральных фрагментов исследуемых спектров, а также регистрация интерферограмм (с заданным числом накопления и другими параметрами). С использованием очередной интерферограммы восстанавливается и сохраняется спектр, через заданный временной «интервал» эта процедура повторяется. Таким образом, получаем семейство спектров (количество задается «числом файлов» сохранения) с временным шагом, равным заданному «интервалу».

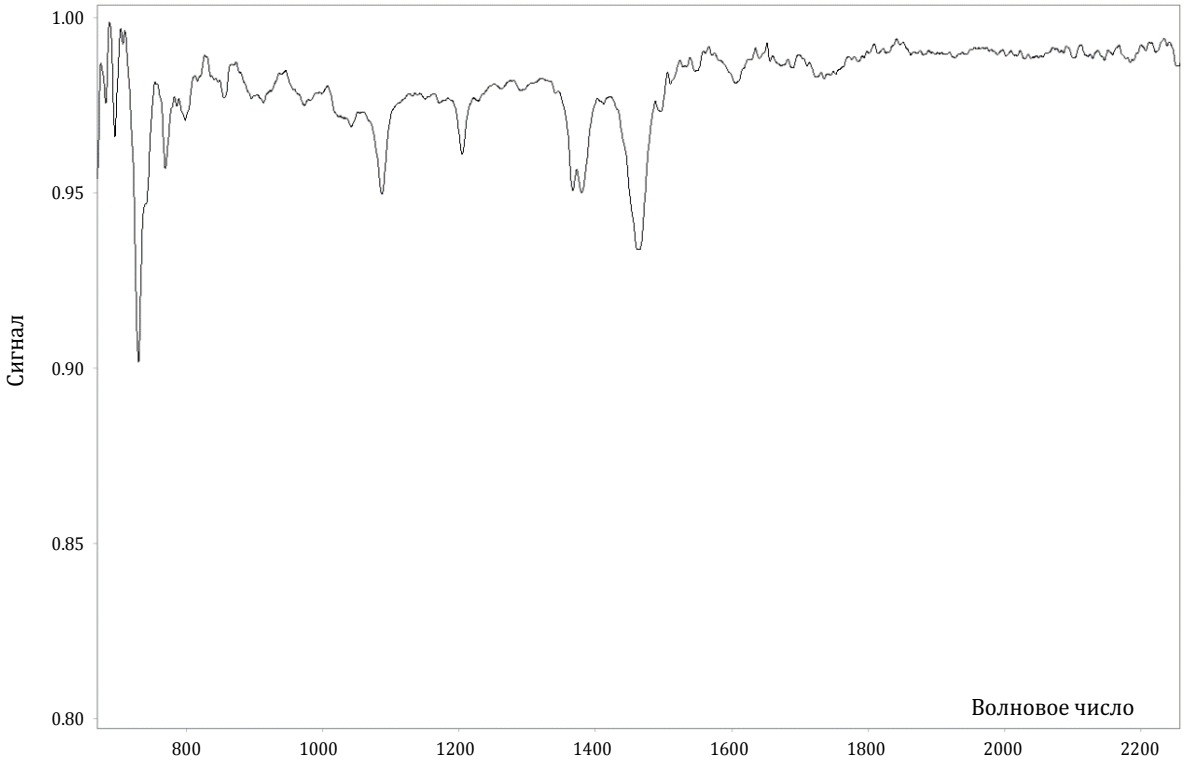
Двухканальный оптоволоконный жгут

Для проведения спектральных измерений с помощью предлагаемого фурье-спектрометра использован экспериментальный образец двухканального оптоволоконного зонда для среднего ИК-диапазона производства art photonics Gmb H. Жгут (рис. 4(а)) содержит два совмещенных оптоволоконных зонда, на одном конце которых находятся НПВО-элементы, а на другом — разъемы типа SMA для подключения к прибору.

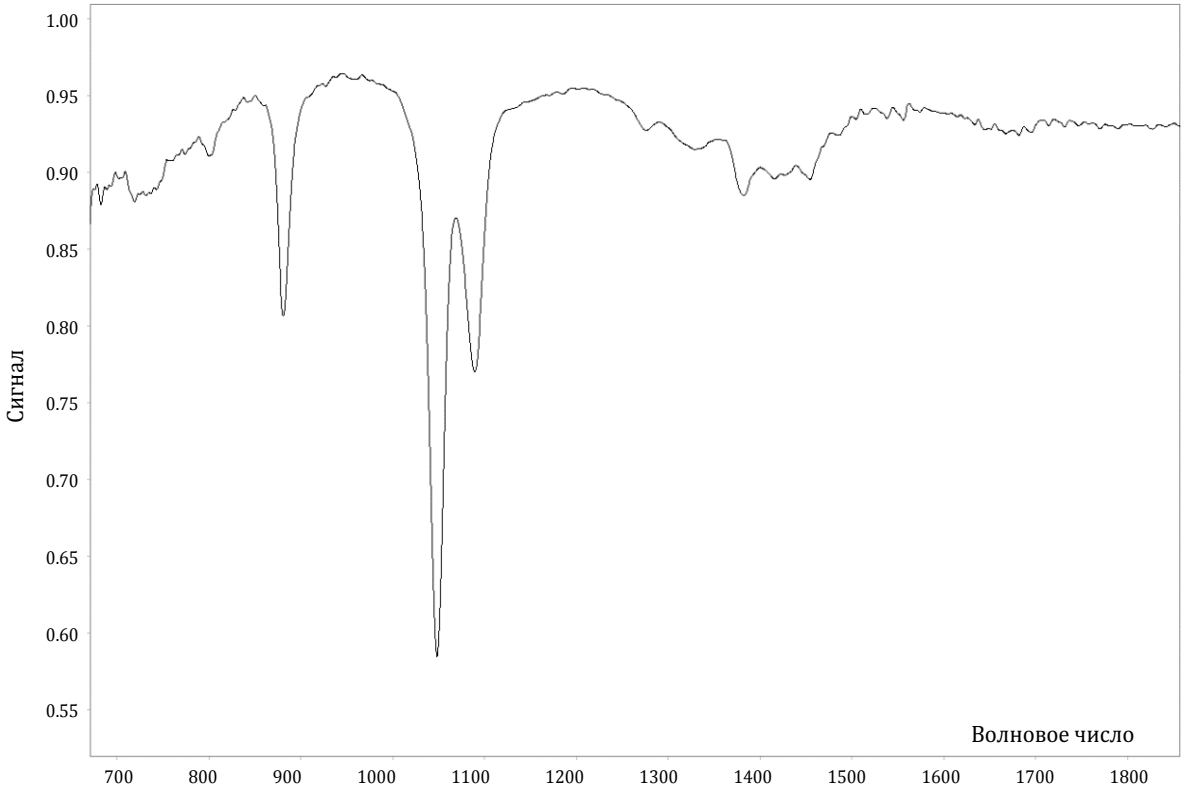
Зонды выполнены из поликристаллического волокна на основе твердого раствора галогенидов серебра, а НПВО-элементы (призмы) — из селенида цинка и представляют собой конус с углом 90° при вершине, что обеспечивает два внутренних отражения. Защитная оболочка наконечника выполнена из политетрафторэтилена, оболочка волокна — из полиэфирэфиркетона. Входное волокно предназначено для направления излучения на выход зонда, выходное волокно соединяется непосредственно с детекторами и предназначено для регистрации отраженного излучения (рис. 4(б)). Представленный зонд предназначен для исследования веществ в жидкой фазе (водных растворов, паст, гелей, полимеров и др.) методом НПВО [5, 6].

Спектральные измерения

С помощью опытного образца двухзондового фурье-спектрометра был проведен ряд спектральных измерений, которые продемонстрировали функционирование, возможности и проблемы в работе с прибором.



а)



б)

Рис. 5. *НПВО-спектр бензина в диапазоне от* 2250 *до* 700 *см*$^{-1}$ (*а*).
НПВО-спектр этилового спирта в диапазоне от 1900 *до* 675 *см*$^{-1}$ (*б*).

Получены спектры поглощения этилового спирта и бензина в режиме НПВО в диапазоне 2250...700 см$^{-1}$ (рис. 5(а)) и 1900...675 см$^{-1}$ (рис. 5(б)). Выбор указанных веществ для апробации прибора и методики измерений обусловлен тем, что их характеристические частоты ярко проявляются в среднем ИК-диапазоне (и используются для решения ряда научных и технических задач).

Образцы располагались на расстоянии до 1.5 м от прибора. Линии поглощения исследуемых веществ в указанных диапазонах на полученных ИК-спектрах соответствуют справочным [7] и представленным в литературе [8–10] данным. Результаты экспериментов подтверждают возможность использования данного прибора для проведения параллельных дистанционных измерений без пробоподготовки.

Выводы

Таким образом, представлено описание устройства и принципа работы, созданного в НТЦ УП РАН двухзондового фурье-спектрометра для среднего ИК-диапазона. Подробно рассмотрены компоненты оптического и электронного узлов прибора. С помощью опытного образца спектрометра на примере таких веществ, как этиловый спирт и бензин продемонстрированы возможности прибора для проведения параллельных дистанционных измерений различных веществ в жидкой и аморфной форме без пробоподготовки.

Список литературы

1. *Балашов А.А., Вагин В.А., Голяк И.С. и др.* Многоканальный динамический ИК-фурье-спектрометр // Журнал прикладной спектроскопии. 2017. Т. 84. № 4. С. 643–647.
2. *Вагин В. А., Хорохорин А. И.* Система управления, регистрации и обработки спектральной информации многозондового ИК Фурье-спектрометра // Физические основы приборостроения. 2018. Т. 7. № 3 (29). С. 10–17.
3. *Вагин В. А., Мошкин Б. Е.,* Фурье-спектрометр // Патент России, RU 2287784 C1, Опубликовано 20.11.2006, Бюл. № 32. (https://new.fips.ru/registers-doc-view/fips_servlet?db=rupat&docnumber=0002287784)
4. *Вагин В. А., Мошкин Б. Е.,* Параллелограммный интерферометр для фурье-спектрометров // Оптический журнал. 2019. Т. 86. № 2. С. 52–54.
5. *Смит А.* Прикладная ИК спектроскопия. М.: Мир, 1982. 328 с.
6. *Харрик Н.* Спектроскопия внутреннего отражения. М.: Мир, 1970. 336 с.
7. Database of ATR-FT-IR Spectra of Various Materials. Ethanol: https://spectra.chem.ut.ee/conservation_materials/ethanol/
8. *Бочаров В. Н., Ганеев А. А., Конюшенко И. О., Немец В. М., Пеганов С. А.* Исследование многомерных абсорбционных аналитических сигналов бензинов в среднем ИК-диапазоне // Журнал аналитической химии. 2019. Т. 74. № 5. С. 356–364.
9. *Тарасевич Б. Н.* ИК спектры основных классов органических соединений: справочные материалы. М.: МГУ, 2012. 54 с.
10. *Corsetti S., Zehentbauer F. M., McGloin D., Kiefer J.* Characterization of Gasoline/Ethanol Blends by Infrared and Excess Infrared Spectroscopy. // Fuel. 2015. Vol. 141. P. 136–142.

Поступила 14 июня 2023 г.

TWO-CHANNEL FOURIER SPECTROMETER OF THE MID-IR RANGE

V.A. VAGUINE, D.YU. KUZNETSOVA, AND A.I. KHOROKHORIN

doi: 10.25210/jfop-2302-AXRPDF | **edn:** AXRPDF

The article presents the description of the created two-probe Fourier spectrometer for the mid-infrared (IR) range. The device is based on the Michelson interferometer with corner reflectors; movable reflector displacement is carried out using a parallelogram drive. The beamsplitter and compensator are made of potassium bromide and coated to provide the required level of transmission in the range of 2.8…18 μm and operate at the reference laser wavelength. The operating speed of change in the optical path difference (OPD) in the interferometer is provided by the reference He-Ne laser.

The electronic part of the device and a computer with software are combined into a system for controlling, recording and processing spectral information, which allows simultaneous recording of two interferograms and obtaining spectra of the test substance. The developed software is designed for device control, interferograms registration, spectra acquisition, storing and displaying. A special feature of the spectrometer is the simultaneous recording of interferograms from two detectors. The device implements the attenuated total internal reflection (ATR) technique. For measuring a multiple fiber, consisting of two combined probes with ATR crystals made of zinc selenide, is used. The capabilities of the device are demonstrated by a number of spectral measurements.

СПЕКТРАЛЬНЫЕ МЕТОДЫ И УСТРОЙСТВА

УДК 658.264

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ НОВЫХ СПЕКТРОРАДИОМЕТРОВ В СИСТЕМАХ АВТОМАТИЧЕСКОГО КОНТРОЛЯ

© Авторы, 2023
doi: 10.25210/jfop-2302-JJSZAU | **edn:** JJSZAU

Старых А. В. — аспирант, РГУ им. А.Н. Косыгина, Москва. E-mail: novacompet@mail.ru
Костюковский С. Р. — н.с., Научно-технологический центр уникального приборостроения Российской академии наук, Москва. E-mail: 5063512@mail.ru
Любская О. Г. — д.мед.н., проф., РГУ им. А.Н. Косыгина, Москва. E-mail: lyubskaya-og@rguk.ru

Аннотация
Системы автоматического контроля и учета промышленных выбросов в атмосферу призваны выявлять факты загрязнения атмосферного воздуха опасными веществами (газами) в концентрациях, превышающих предельно допустимые значения. В нашей стране подобный мониторинг атмосферного воздуха, как правило, производится с помощью забора проб, а если используются дистанционные методы, то они носят активный характер (воздействуют на объект анализа), приборная и элементная база мониторинга включает импортные компоненты. Целью статьи являлось описание физических основ спектрорадиометрии, перспектив ее применения в системах автоматического контроля атмосферы и принципов работы газоанализатора (спектрорадиометра, разработанного Научно-технологическим Центром Уникального Приборостроения РАН), полностью созданного на отечественной компонентной базе.

Ключевые слова: *спектрорадиометрия; инфракрасное излучение; тепловое излучение; газоанализатор*

Abstract
The systems of automatic control and accounting of industrial emissions into the atmosphere are designed to identify the facts of atmospheric air pollution with hazardous substances (gases) in concentrations exceeding the maximum permissible values. In our country, such monitoring of atmospheric air is usually carried out by sampling, and if remote methods are used, they are active (they affect the object of analysis), the instrument and element base of monitoring includes imported components. The purpose of the article was to describe the physical foundations of spectroradiometry, the prospects for its application in automatic atmospheric control systems and the principles of operation of a gas analyzer (a spectroradiometer developed by the Scientific and Technological Center of Unique Instrumentation of the Russian Academy of Sciences), completely created on a domestic component base.

Keywords: *radiometry; infrared radiation; thermal radiation; gas analyzer*

Введение

Мониторинг выбросов предельно допустимых концентраций (ПДК) опасных веществ в атмосферу, производимых предприятиями теплоэнергетики, например — котельными коммунального сектора, осуществляется в соответствие с Национальным стандартом Российской Федерации [1] и отраслевыми стандартами [6]. Если Национальный стандарт регламентирует вопросы, связанные с системами автоматического контроля и учета промышленных выбросов в атмосферу (САК) в целом, то Правила указывают на технологические аспекты производимых процедур, используемое аналитическое оборудование. Практика показывает, что под мониторингом часто понимают проведение разовых замеров (ручной замер выбросов с помощью пробоотборных газоанализаторов), либо применение размещаемых непосредственно в трубе зондов (датчик сигнализирует о превышении допустимого значения вредного выброса по 1–2 заранее известным веществам).

Мировая практика придерживается иного, дистанционного, подхода к выявлению и анализу опасных промышленных выбросов (например, в странах Европы, Китае [7]). Большое внимание уделяется в современных научных публикациях разработке методик дистанционного анализа в сферах экологии и природопользования [10, 11], обеспечения безопасности техносферных объектов [12].

Цель данной статьи — описание физических принципов работы беспробоотборного газоанализатора — спектрорадиометра, разработанного Научно-технологическим Центром Уникального Приборостроения РАН (далее НТЦ УП РАН). Основная задача — демонстрация полезных свойств и преимуществ указанного типа приборов применительно к дистанционному мониторингу опасных выбросов в атмосферу и в составе промышленных систем автоматического контроля (САК).

Методы спектрорадиометрии, применяемые в приборе

Тепловое излучение, различные аспекты оптической молекулярной спектроскопии в целом достаточно широко изучены [2,3,4]. Как известно, основой теории теплового излучения служит формула Планка,

Старых А.В., Костюковский С.Р., Любская О.Г. Использование новых спектрорадиометров в системах автоматического контроля // Физические основы приборостроения. 2023. Т. 12. № 2(48). С. 72-77. DOI: 10.25210/jfop-2302-JJSZAU. EDN: JJSZAU

согласно которой тепловое излучение является производной от простого гармонического колебания линейных атомных осцилляторов, которые осуществляют эти колебания определенными периодами (дискретными квантами). Исследованиями [5, 8] подтверждено, что энергия E этих квантовых колебаний является функцией частоты излучения v

$$E = hv\,, \tag{1}$$

где h — постоянная Планка.

Любой физический объект, исходя из теории, характеризуется своим присущим ему уровнем теплового излучения: поэтому зная величину излучения и применив постоянную Планка можно обнаружить частоту излучения, свойственную определенному веществу (фактически идентифицировать вещество). И напротив — зная частоту излучения, присущую данному веществу, определить энергию теплового излучения объекта. Для определения веществ и их концентрации по спектрам поглощения или излучения используют также закон Бугера-Ламберта-Бера, который показывает степень ослабления монохроматического света при поглощении его слоем вещества.

$$dI = -I \cdot \varepsilon \cdot C \cdot dl\,, \tag{2}$$

где I — интенсивность света, направленного на слой вещества толщиной dl, C — концентрация поглощающих частиц, ε — коэффициент, характеризующий поглощение и зависящий от длины волны (частоты) падающего света.

Оптическая молекулярная спектроскопия использует свойство молекул вещества образовывать уникальный спектральный рисунок (сочетание линий), фиксируемый в инфракрасном диапазоне. Исходя из этого, любой газ или смесь газов могут быть распознаны на основании только им присущих спектральных характеристик, при этом не требуется ни взятия проб, ни проведения каких-либо иных аналитических процедур, кроме сравнения излучаемых спектров и каталога эталонов, имеющихся в наличие (или в памяти прибора, или во внешнем хранилище эталонов).

Подобная идентификация веществ осуществляется с помощью фурье-спектрорадиометра в инфракрасном спектре [2, 3], позволяя определять и качественный состав смеси, и концентрацию каждого компонента в ней. Такое дистанционное обнаружение опасных веществ чрезвычайно востребовано [6], так как рядом научных разработок выявлены газообразные вещества (бутилен, гексан, диоксид азота, оксид углерода, сероводород, формальдегид, фенол и другие), обладающие свойствами накапливаться в атмосфере в виде опасных смесей, что создает угрозы как техногенного, так и экологического характера.

Технически процедура по дистанционному выявлению газов (без отбора проб) может быть проведена с применением активного (воздействующего на объект) либо пассивного методов. В первом случае (активный/трассовый способ) внешний источник инфракрасного излучения применяется для «подсвечивания» объекта. Как правило, температура внешнего источника значительно выше температуры окружающего воздушного пространства. Поэтому в измеряемом спектре вещества присутствуют линии поглощения. Для осуществления процесса идентификации требуется излучатель, источник питания и формирующая оптика с большой апертурой. Техническим недостатком методики является ее ограничение трассой, вне которой определение осуществляться не может.

Более широкими возможностями характеризуется второй — пассивный способ. В данном случае прибор регистрирует собственное тепловое излучение исследуемого газа, без какого-либо активного воздействия на него. Определение искомого вещества проходит с учетом излучения подстилающей поверхности («шума»), в частности атмосферы, различных поверхностей.

Так как в нормальных температурных условиях определяемая длина волны 3–14 мкм характерна для большинства природных и промышленных объектов, «окна прозрачности» земной атмосферы позволяют проводить измерения на удалении от измеряемого объекта (газовых облаков, источника выброса), фиксируя линии поглощения (пропускания)молекул различных веществ.

Так, например, при выявлении содержания аммиака (рис. 1), в эталоне определяемое вещество характеризуется «загущением» линии спектра в диапазоне значений волнового числа 1000, 1600, с нижним пиком на значении 2400. Аналогичным образом распределены значения волновых чисел при визуализации спектра пропускания (рис. 2), хотя в целом линия спрямлена.

Спектральный рисунок окружающего образец воздуха в эталоне имеет пик на уровне волнового числа 1100, аналогичную аммиаку подчеркнутую область в районе значение 1600, и нижний пик на значении 2400 (рис. 3). В отличие от спектра эталона спектр пропускания для атмосферного воздуха (рис. 4) также как и в случае с аммиаком отличается «спрямлением» общего рисунка, особенно ярко выраженным на участке значений волнового числа от 600 до 2300. Отметим, что нижний пик на значении 2400 также присутствует, хотя и менее выделяется визуально.

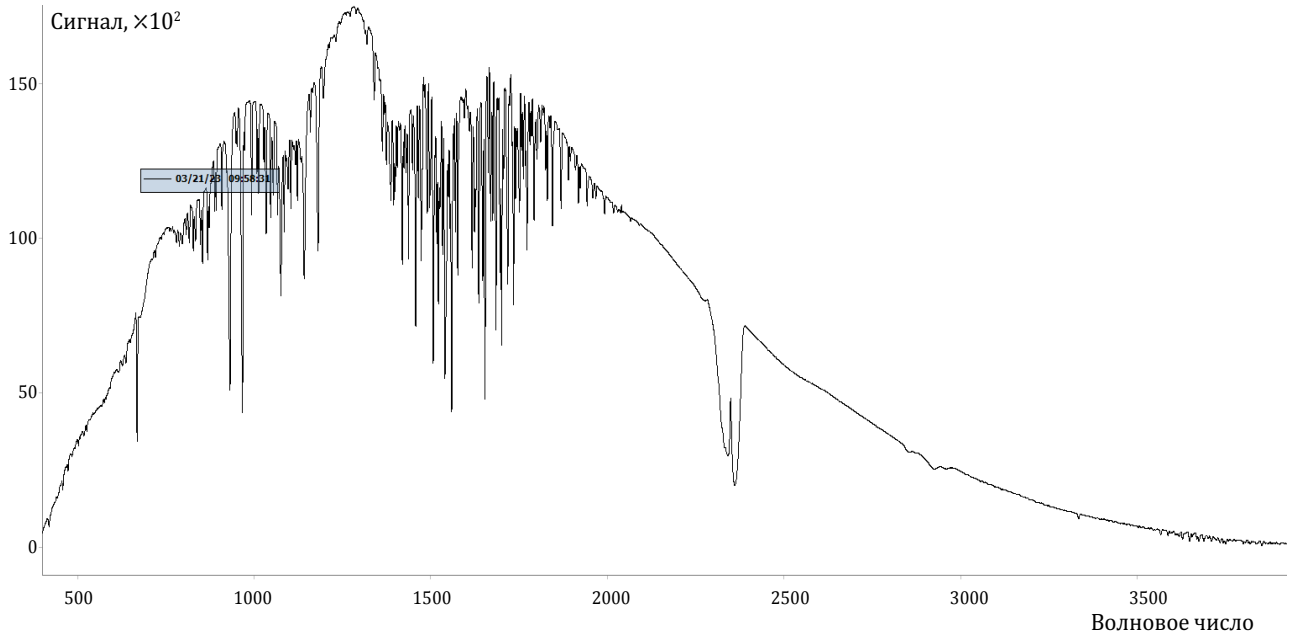


Рис. 1. *Аммиак. Спектр эталонного образца. Разрешение* 1 *см*$^{-1}$.

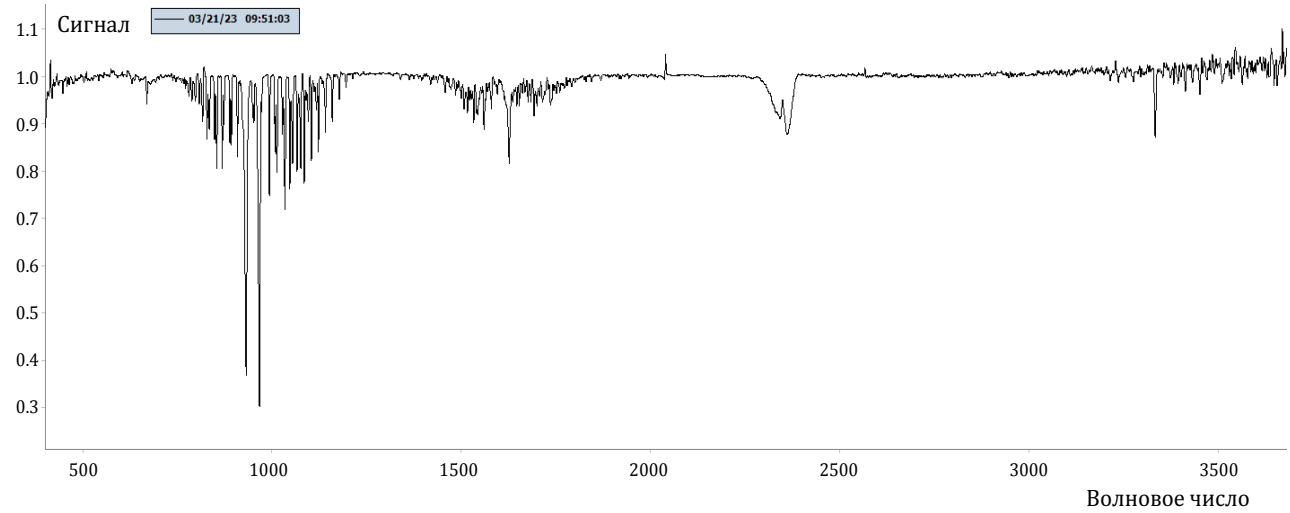


Рис. 2. *Аммиак. Спектр пропускания. Разрешение* 1 *см*$^{-1}$.

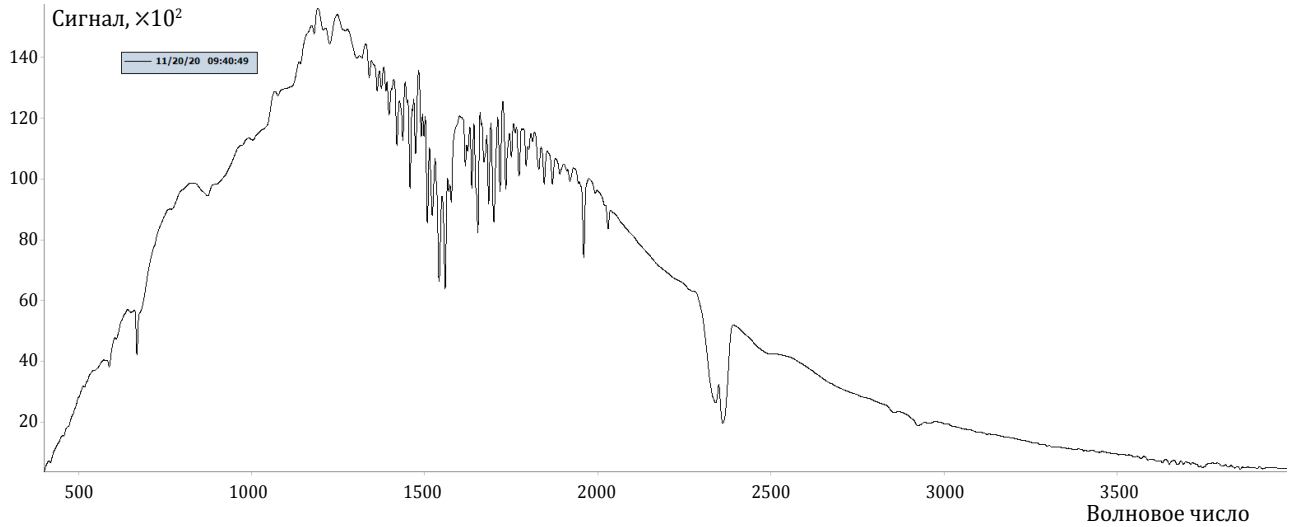


Рис. 3. *Атмосферный воздух. Спектр эталонного образца. Разрешение* 1 *см*$^{-1}$.

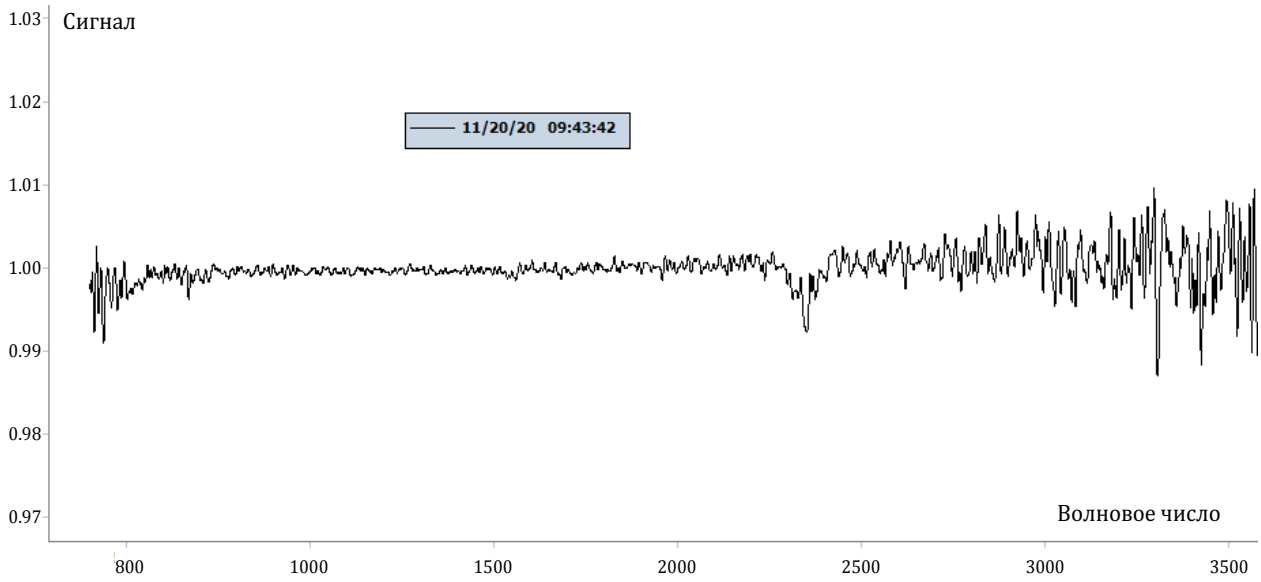


Рис. 4. *Атмосферный воздух. Спектр пропускания. Разрешение* 1 *см*$^{-1}$.

Спектрорадиометр НТЦ УП РАН

Описанные выше подходы к идентификации веществ в газовой смеси (атмосфере), используются в новом спектрорадиометре НТЦ УП РАН, который разработан в 2020 г. (патент на полезную модель № 203288, срок действия 28.12.2030 г.).

В наиболее общем плане спектрорадиометр НТЦ УП РАН представляет собой фурье-спектрорадиометр с оптическим объективом, имеющий подключение к электропитанию и сети Интернет для передачи управляющих сигналов и результатов измерений.

Рис. 5. *Общий вид и внутреннее строение прибора.*

Металлический корпус прибора закреплен на штативе или любом ином подъемном/крепежном механизме и имеет небольшие габариты (300×300×300 мм), при массе не более 10 кг. Успешное функционирование прибора осуществляется в широком температурном интервале от –28 до +50 °С, что позволяет использовать прибор в различных климатических зонах, размещая как внутри, так и снаружи объектов

инфраструктуры. Особенностью спектрорадиометра НТЦ УП РАН является повышенная чувствительность. Благодаря этому свойству точность определения содержания вещества увеличивается с 95 до 99 %, что превосходит близкие зарубежные аналоги.

Функциональность прибора — это выявление, идентификация (сравнение с эталоном) и передача сигнала о выявленных вредных газах и их концентрациях. Прибор способен подавать сигнал о превышении ПДК (звуковой, световой), а также осуществлять посредством сети Интернет прием/передачу сигналов на центральное устройство (ПК). Такой принцип, с одной стороны, позволяет уменьшить размеры и вес прибора, не перегружая спектрорадиометр компонентами. С другой стороны, полученный прибором результат может быть визуализирован на рабочем месте оператора, зафиксирован в журнале измерений: оцифрованный сигнал легко передать для дальнейшего анализа, вести учет в динамике, отражать в аналитике и статистике, наносить на картографическую подоснову. Иными словами, данный прибор может рассматриваться как базовый для создания программно-аппаратных комплексов систем автоматического контроля и дистанционного мониторинга вредных выбросов в атмосферу.

Порядок проведения процедуры мониторинга следующий:

- прибор, установленный на границе контролируемой области, осуществляет непрерывный автоматический анализ на предмет идентификации в спектре воздуха опасных компонентов (вредных, отравляющих веществ) путем сверки спектрального рисунка атмосферного воздуха с реестром эталонов опасных веществ;
- в случае, если устройство обнаруживает в воздушной смеси опасное вещество, прибор переходит к анализу концентрации этого опасного вещества и фиксированию месторасположения выброса (данные записываются в блок памяти);
- при выявлении ПДК опасного вещества устройство автоматически подает сигнал индикаторами звука и света, осуществляет передачу информации о выявленном опасном веществе, его концентрации и возможном расположении облака на пульт оператора (либо в центр управления САК).

Преимуществом прибора является способность идентифицировать содержание вредных веществ в смесях, улавливать колебания концентрации на расстоянии более 150 метров без использования шлангов, насосов или кювет для пробозабора. Это свойство позволяет также объединять в программно-аппаратных комплексах на базе САК сразу несколько подобных спектрорадиометров (располагая их по периметру контролируемой области), что выводит мониторинг на уровень крупных промышленных объектов, или даже целых территориальных образований.

Отметим, что спектрорадиометр НТЦ УП РАН выполняется на российской элементной базе, что нивелирует большинство рисков, связанных с недостатками высокотехнологичной продукции, которые содержат импортные компоненты или расходные материалы.

Выводы

Отечественный газоанализатор-спектрорадиометр НТЦ УП РАН способен адаптироваться под широкий класс задач дистанционного мониторинга атмосферных выбросов в рамках САК, связанных как с текущей эксплуатацией промышленных объектов, так и с предупреждением и ранним выявлением техногенных аварий (утечек, выхлопов, проливов и т.п.).

Естественным следствием адаптации прибора для нужд САК и дистанционного мониторинга станет значительный экономический эффект: сокращение расходов на покупку, обслуживание и ремонт/замену многочисленных датчиков, зондов, кабельной сети, соединяющей и питающей газоаналитические приборы и комплексы САК на основе отбора проб. Выполненный из отечественных материалов спектрорадиометр НТЦ УП РАН окажется также значительно дешевле совокупности ранее используемых приборов и их комплектующих, в том числе за счет доступности технического обслуживания.

На взгляд авторов, перспективы массового промышленного производства спектрорадиометра НТЦ УП РАН связаны с подготовкой нормативной базы для введения указанного класса приборов в отраслевые регламенты и технические стандарты, а также с выпуском отраслевых модификаций под определенные узкие классы веществ или их группы (что снизит стоимость прибора, облегчит работу с эталонами). Приборы же с более широкими базами эталонов могут быть использованы для создания универсальных аналитических комплексов с целью проведения научно-исследовательских работ.

Список литературы

1. ГОСТ Р 113.38.03–2021 «Системы автоматического контроля и учета выбросов загрязняющих веществ тепловых электростанций в атмосферный воздух. Основные требования».—URL:https://docs.cntd.ru/document/1200181927
2. *Балашов А. А., Вагин В. А., Котлов В. И., Мошкин Б. Е., Хитров О. В., Хорохорин А. И.* Портативный переносной инфракрасный Фурье-спектрометр ПАК-Б // ПТЭ. 2008. № 1. С. 179.
3. *Балашов А. А., Вагин В. А., Хорохорин А. И.* Фурье-спектрорадиометр ФСР-03 // ПТЭ. 2013. № 3. С. 142–143.
4. *Костюковский С. Р.* Экологические обследования окружающей среды арктических зон на основе диагностики тепловых полей в различных спектрах с целью мониторинга применения технологий энергосбережения // Сборник избранных трудов по материалам Всероссийской научно-практической конференции с международным участием. 2017. С. 527–529.
5. *Морозов А. Н., Мохов А. И.* Основы фурье-спектрорадиометрии. М.: Наука, 2014. 455 с.
6. Правила организации контроля выбросов в атмосферу на тепловых электростанциях и в котельных. РД 153–34.0–02.306–98. [Электронный ресурс]. Режим доступа: https://ohranatruda.ru/upload/iblock/9ad/4294844841.pdf
7. *Толоконникова Е. В.,* Государственная политика Китая в решении проблем экологии. — [Электронный ресурс]. — Режим доступа: https://cyberleninka.ru/article/n/gosudarstvennaya-politika-kitaya-v-reshenii-problem-ekologii/viewer (дата обращения 23.11.2023 г.)-
8. V. Domanskiy, S. Kostyukovskiy, I. Iuninger, I. Sobakin, S. Koshelev. Pyrometers — Devices for Non-Contact Measurement and Display of Energetic Materials Temperature. Performance Improvement // New Trends in Research of Energetic Materials. 2017. P. 548.
9. *Григорьевский В. И., Каленов Д. М., Садовников В. П., Тезадов Я. А., Элбакидзе А. В.* Измерение дневных, сезонных и годовых вариаций фона метана оптическим лидаром на северо-востоке Московской области. // Журнал радиоэлектроники. 2023. №11. https://doi.org/10.30898/1684–1719.2023.11.3
10. *Гарягдыев Г. Ч., Худайназаров С. А., Шамурадов А. А.* Важность цифрового картографирования посевных площадей и повышение урожайности при дистанционном надзоре // Символ науки. 2023. № 4–2. URL: https://cyberleninka.ru/article/n/vazhnost-tsifrovogo-kartografirovaniya-posevnyh-ploschadey-i-povyshenie-urozhaynosti-pri-distantsionnom-nadzore (дата обращения: 30.11.2023).
11. *Бабаева Г. Р., Рагимов Р. М.* Вопросы валидации результатов при наземно-бортовом спектральном определении влажности почвы // Почвы и окружающая среда. 2023. № 1. URL: https://cyberleninka.ru/article/n/voprosy-validatsii-rezultatov-pri-nazemno-bortovom-spektralnom-opredelenii-vlazhnosti-pochvy (дата обращения: 30.11.2023).
12. Чичкова Елена Федоровна, Кочин Дмитрий Александрович, Рогачев Сергей Александрович Информационно-аналитический сервис и технологии мониторинга потенциально опасных зон по данным спутникового многоспектрального зондирования // Космические аппараты и технологии. 2023. № 2. URL: https://cyberleninka.ru/article/n/informatsionno-analiticheskiy-servis-i-tehnologii-monitoringa-potentsialno-opasnyh-zon-po-dannym-sputnikovogo-mnogospektralnogo (дата обращения: 30.11.2023).

Поступила 7 апреля 2023 г.

THE USE OF NEW SPECTRORADIOMETERS IN AUTOMATIC CONTROL SYSTEMS

A.V. STARYKH, S.R. KOSTYUKOVSKY, AND O.G. LYUBSKAYA

doi: 10.25210/jfop-2302-JJSZAU | **edn:** JJSZAU

The systems of automatic control and accounting of industrial emissions into the atmosphere are designed to identify the facts of atmospheric air pollution with hazardous substances (gases) in concentrations exceeding the maximum permissible values. In our country, such monitoring of atmospheric air is usually carried out by sampling, and if remote methods are used, they are active (they affect the object of analysis), the instrument and element base of monitoring includes imported components. The purpose of the article was to describe the physical foundations of spectroradiometry, the prospects for its application in automatic atmospheric control systems and the principles of operation of a gas analyzer (a spectroradiometer developed by the Scientific and Technological Center of Unique Instrumentation of the Russian Academy of Sciences), completely created on a domestic component base.

ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ СИСТЕМЫ

УДК 620.179.16

РАЗРАБОТКА ОСНОВНЫХ КОНСТРУКТИВНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ УСТРОЙСТВА ПОЗИЦИОНИРОВАНИЯ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ УСТАНОВКИ КОМПЛЕКСНОГО НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ

© Авторы, 2023
doi: 10.25210/jfop-2302-QLMRLT | **edn:** QLMRLT

Губин М. С. — Национальный исследовательский университет ИТМО, Санкт-Петербург. E-mail: gubin.maxim@mail.ru

Малый В. В. — Национальный исследовательский университет ИТМО, Санкт-Петербург. E-mail: banqvalera@mail.ru

Федоров А. В. — д.т.н., проф., Национальный исследовательский университет ИТМО, Санкт-Петербург. E-mail: afedor62@yandex.ru

Кинжагулов И. Ю. — к.т.н., доцент., Национальный исследовательский университет ИТМО, Санкт-Петербург. E-mail: kinzhiki@mail.ru

Сергеев Д. С. — к.т.н., Учреждение науки ИКЦ СЭКТ, Санкт-Петербург. E-mail: dmt.sergeev.job@gmail.com

Аннотация

Рассмотрены существующие проблемы неразрушающего контроля дефектов в поверхностных и подповерхностных слоях покрытия сложно-профильных изделий при вихретоковом методе контроля. Определено влияние зазора между преобразователем и поверхностью сложно-профильного изделия, а также отклонения преобразователя от нормали к поверхности на результаты измерения. Для устранения этих факторов используют механизм позиционирования преобразователя с жесткой управляющей программой с заранее установленным заданием. Определено влияние первичных погрешностей механизма на погрешность позиционирования преобразователя относительно поверхноти сложно-профильного изделия. Выполнена доработка конструктивными элементами, оснащенными обратной связью, необходимой для осуществления контакта между преобразователем и поверхностью сложно-профильного изделия, позиционирования по нормали преобразователя к поверхности сложно-профильного изделия в любой момент времени в процессе контроля.

Ключевые слова: *неразрушающий контроль, вихретоковый контроль дефектов, автоматизация, устройство позиционирования*

Abstract

The existing problems of non-destructive testing of defects in the surface and subsurface coating layers of complex-profile products with the eddy current control method are considered. The influence of the gap between the transducer and the surface of a complex profile product, as well as the deviation of the transducer from the normal to the surface on the measurement results is determined. To eliminate these factors, a positioning mechanism of the converter with a rigid control program with a pre-set task is used. The influence of the primary errors of the mechanism on the positioning error of the transducer relative to the surface of a complex profile product is determined. The modification was carried out with structural elements equipped with feedback necessary for making contact between the converter and the surface of a complex-profile product, positioning the converter along the normal to the surface of a complex-profile product at any time during the control process.

Keywords: *non-destructive testing, eddy current defect control, automation, positioning device*

Введение

В некоторых агрегатах специального машиностроения для изменения скорости проходящего высокотемпературного газового потока используются изделия, имеющие сложную геометрическую форму, представляющие собой тела вращения, напоминающие сопло Лаваля (см. рис. 1). Для предотвращения уноса внутренней стенки сложно-профильного изделия, технологическим процессом предусматривается нанесение защитного никель-хромового покрытия [1]. Толщина покрытия и размеры дефектов в поверхностных

Губин М.С., Кинжагулов И.Ю., Малый В.В., Сергеев Д.С., Федоров А.В. Разработка основных конструктивных элементов устройства позиционирования преобразователей автоматизированной установки комплексного неразрушающего контроля // Физические основы приборостроения. 2023. Т. 12. № 2(48). С. 78-85. DOI: 10.25210/jfop-2302-QLMRLT. EDN: QLMRLT

и подповерхностных слоях должны находиться в допустимых диапазонах. На работоспособность сложно-профильного изделия оказывают влияние трещины с глубиной от 0.1 мм.

Предусматривается неразрушающий контроль (НК) основных параметров покрытия сложно-профильного изделия. В части НК толщины покрытия используются средства измерения (СИ), основанные на пондеромоторном и магнитодинамическом методе, в части НК размеров дефектов используются СИ, базирующиеся на вихретоковом методе [2].

Рис. 1. *Сложно-профильное изделие.*

При использовании СИ, базирующихся на данных методах, необходимо удовлетворять основным требованиям в части обеспечения контакта преобразователя с поверхностью сложно-профильного изделия, перемещения преобразователя с заданной скоростью и позиционирования по нормали преобразователя к поверхности сложно-профильного изделия. Соответственно на результаты измерения влияют:

- отклонение от нормали преобразователя к поверхности сложно-профильного изделия;
- величина зазора между поверхностью сложно-профильного изделия и преобразователя.

При осуществлении ручного контроля основных параметров покрытия сложно-профильного изделия, возникает ряд трудностей, связанных с удовлетворением основных требований, что влияет на погрешность измерения, увеличивая до недопустимых значений. Как показывают исследования, проведенные в работе [3], амплитуда сигнала, отраженного от трещины с глубиной 0.1 мм, уменьшается с увеличением зазора между поверхностью контролируемого изделия и преобразователя. При зазоре 0.5 мм дефект выявляется с вероятностью 50%. При отклонении от нормали, превышающем 10 градусов, вероятность выявления дефекта уменьшается. Поэтому снижение погрешности измерений за счет внедрения автоматизированных технологий неразрушающего контроля является актуальной задачей.

Механизм позиционирования преобразователя с жесткой управляющей программой

Технология контроля представляет собой совокупность контрольных операций и технологических средств контроля, включенных в общий технологический процесс, с обозначением мест и содержанием операций контроля. Технологические средства автоматизированного НК включают [4]:

- средства неразрушающего контроля, включая преобразователь (датчик);
- механизм (механизмы) позиционирования преобразователя (датчика);
- программное обеспечение с пользовательским интерфейсом;
- блок управления движением исполнительных механизмов.

Рассмотрим решение данной проблемы в части обеспечения необходимого зазора между преобразователем и поверхностью сложно-профильного изделия и нормали к поверхности сложно-профильного изделия за счет применения механизма позиционирования преобразователя, разработанного в работе [5], с жесткой управляющей программой с заранее установленным заданием.

Рассмотрим позиционирование преобразователей в точке (x, y) на поверхности сложно-профильного изделия. Положение преобразователя в точке (x, y) является результатом поворота на определенные углы α, β и линейное смещение по оси y (рис. 2). Определим положение преобразователя с учетом влияния погрешностей основных параметров. В качестве погрешностей рассмотрим:

Δq_1 — несоосность сложно-профильного изделия и механизма позиционирования преобразователя;

Δq_2 — предельное отклонение длины звена № 1;

Δq_3 — предельное отклонение длины звена № 2;

Δq_4 — предельное отклонение длины звена № 3.

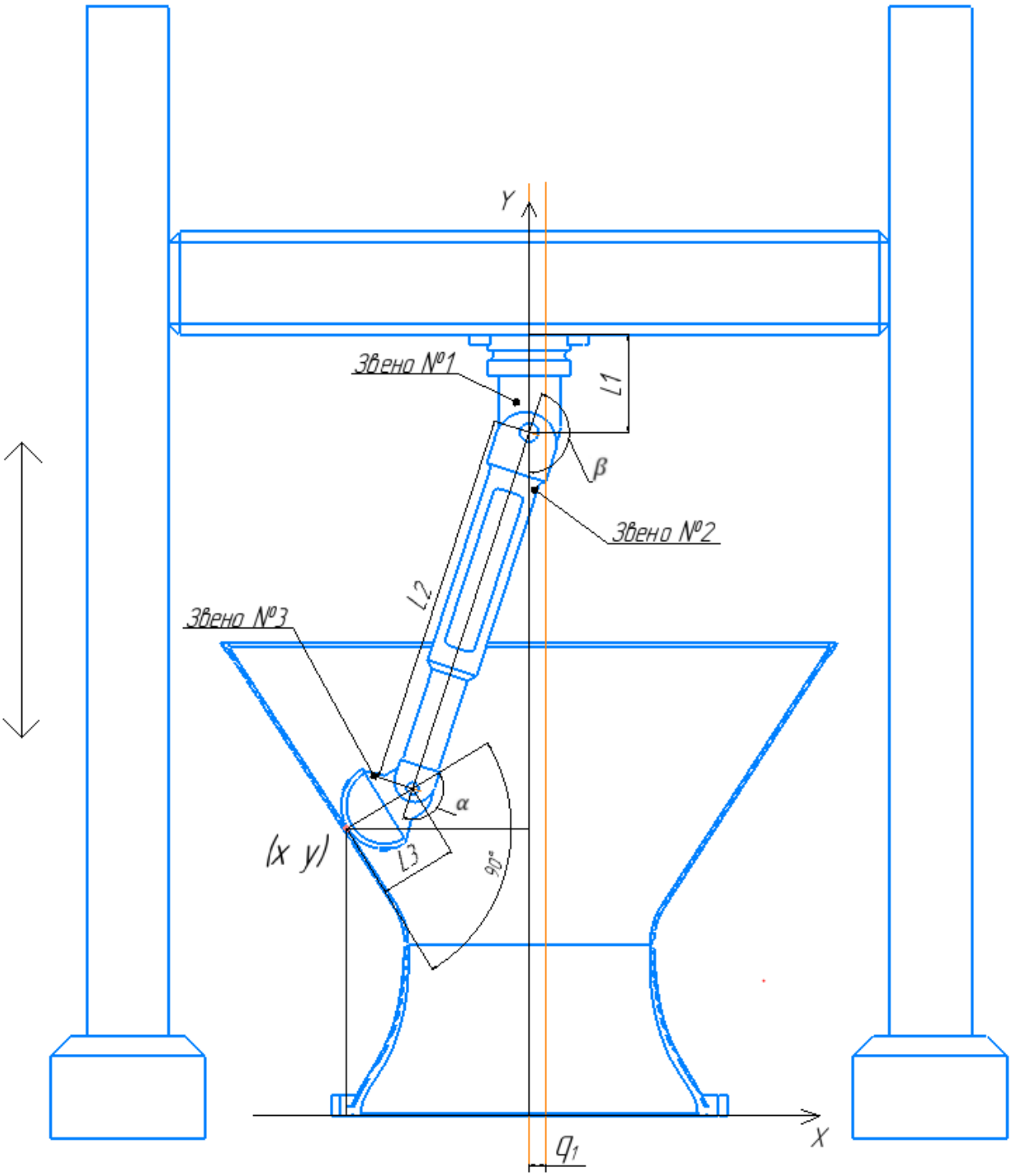


Рис. 2. *Механизм позиционирования преобразователей.*

Для определения положения преобразователя воспользуемся методом преобразованных механизмов [6]. На основании математической модели механизма позиционирования преобразователей, построенным планом малых перемещений для преобразованного механизма, определено влияние первичных погрешностей на погрешность положения выходного звена (преобразователя)

$$\Delta\varphi_{x\Delta q_1} = \Delta q_1,\ \Delta\varphi_{y\Delta q_1} = 0,\ \Delta\varphi_{x\Delta q_2} = 0,\ \Delta\ \ {}_{y\Delta q_2} = \Delta q_2,\ \Delta\varphi_{x\Delta q_3} = \Delta q_3 \sin\sin\beta,$$

$$\Delta\varphi_{y\Delta q_3} = \Delta q_3 \cos\cos\beta,\ \Delta\varphi_{x\Delta q_4} = \Delta q_4 \sin\sin(\alpha+\beta),\ \Delta\varphi_{y\Delta q_4} = \Delta q_4 \cos\cos(\alpha+\beta),$$

$$\sum\varphi_x = \Delta q_1 + \Delta q_3 \sin s\beta + \Delta q_4 \sin(\alpha+\beta), \quad (1)$$

$$\sum\varphi_y = \Delta q_2 + \Delta q_3 \cos\beta + \Delta q_4 \cos(\alpha+\beta), \quad (2)$$

где φ_x — суммарная погрешность положения выходного звена по оси x,

$$\Delta\varphi_{x\Delta q_1},\ \Delta\varphi_{x\Delta q_2},\ \Delta\varphi_{x\Delta q_3},\ \Delta\varphi_{x\Delta q_4}$$

— погрешности положения звеньев по оси x, φ_y — суммарная погрешность положения выходного звена по оси y,

$$\Delta\varphi_{y\Delta q_1},\ \Delta\varphi_{y\Delta q_2},\ \Delta\varphi_{y\Delta q_3},\ \Delta\varphi_{y\Delta q_4}$$

— погрешности положения звеньев по оси .

Получим возможное положение выходного звена с учетом влияния первичных погрешностей формул (1), (2). Примем несоосность сложно-профильного изделия и механизма позиционирования преобразователя равной 1 мм, а погрешности длин звеньев в соответствии с полем допуска h10

$$\Delta q_1 = 0.1 \text{ мм},\ \Delta q_2 = 0.35 \text{ мм},\ \Delta q_3 = 0.57 \text{ мм},\ \Delta q_4 = 0.3 \text{ мм}.$$

В соответствии с полученными результатами определено, что при позиционировании по жестко управляющей программе на положение преобразователя влияет множество факторов, в данной работе рассматривались такие как: несоосность сложно-профильного изделия и механизма позиционирования преобразователей, погрешности длин звеньев. При изготовлении *с* допуском h10 и несоосностью 0.1 мм возможные зазоры составляют от 0.3 до 0.6 мм, что влияет на выявление дефекта.

При этом не учитывались следующие факторы:

- погрешность линейного смещения по оси y;
- погрешность поворота на угол α;
- погрешность поворота на угол β;
- предельные отклонения размеров объекта контроля;
- допуски формы и расположения объекта контроля.

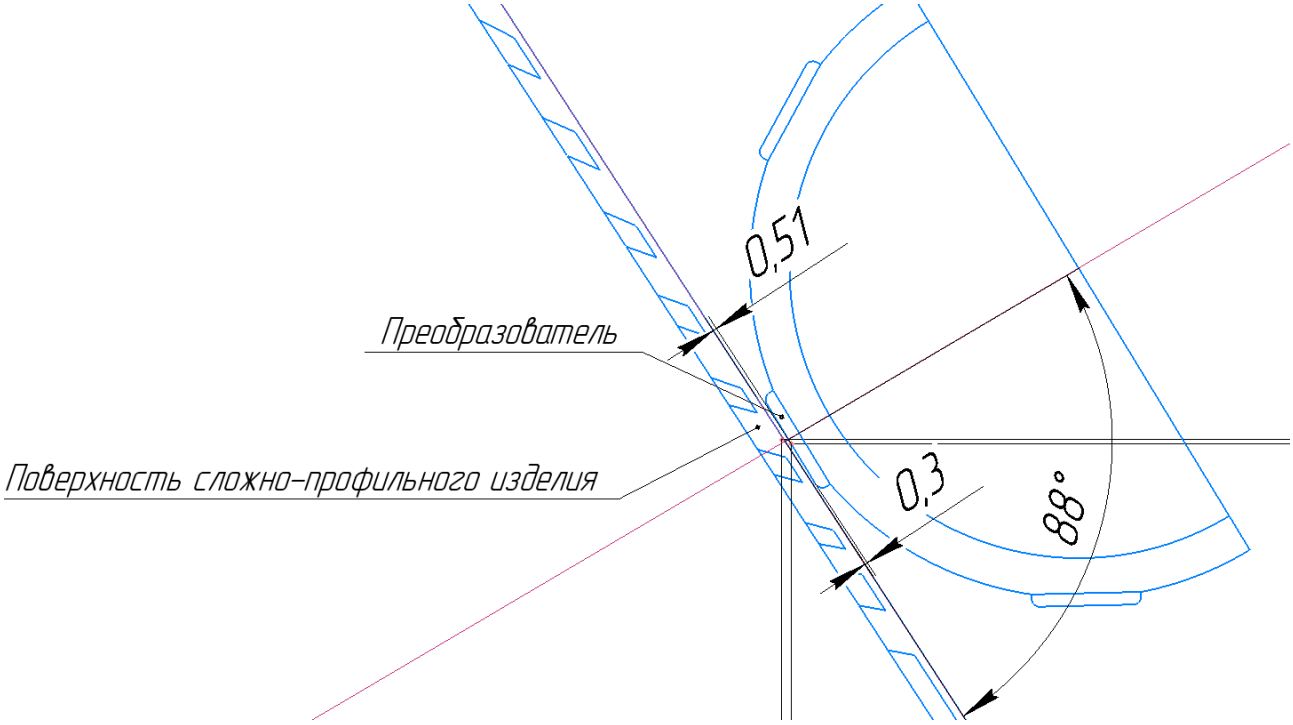


Рис. 3. *Положение преобразователя относительно поверхности сложно-профильного изделия с учетом первичных погрешностей при x = 177, y = 279.*

Таблица 1. *Влияние погрешностей на координаты выходного звена*

Координаты преобразователя		Координаты преобразователя с учетом первичных погрешностей		Зазор	Отклонение от нормали
x	y	x	y_φ	мм	град
177.0	279	176	278.6	0.3...0.51	2.0
124.0	196.5	122.8	195.9	0.37...0.55	2.7
117.5	146.5	116.9	145.8	0.34...0.52	3
130.0	71	129	70.4	0.4...0.6	2.5

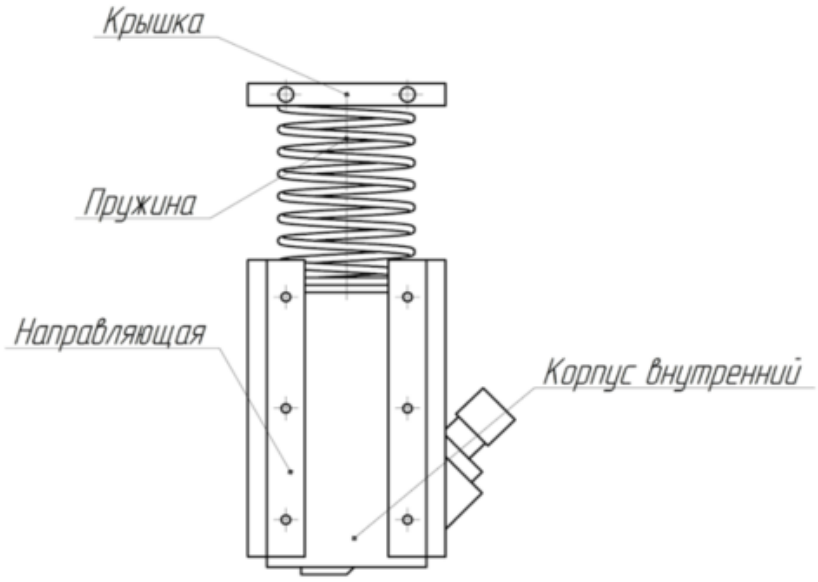


Рис. 4. *Общий вид подпружиненного преобразователя.*

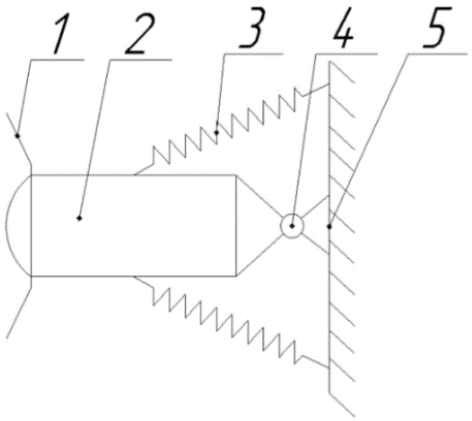


Рис. 5. *Схема оснастки позиционирования преобразователя* (1 — *лапки позиционирующие,* 2 — *преобразователь,* 3 — *пружина растяжения,* 4 — *шарнир,* 5 — *основание*).

Применение данного механизма позиционирования преобразователей с жесткой управляющей программой не является целесообразным решением для измерения дефектов в поверхностных и подповерхностных слоях хром-никелевого покрытия.

Использование дополнительной оснастки рис. 4, в корпусе которой размещается преобразователь, способно обеспечить контакт с сложно-профильным изделием, но решает проблему частично.

Существует ряд факторов, делающих применение данной оснастки невозможным:

- подпружиненный преобразователь не имеет возможности обеспечивать тарированный прижим;
- производитель не предоставляет данные о некоторых ключевых размерах преобразователя;
- большие габариты преобразователя не позволяют его использовать для контроля всей поверхности объекта.

Разработка оснастки с обратной связью

Для решения описанных проблем разработана оснастка оригинальной конструкции,-которая обладает обратной связью, реализованной на базе тензометрических СИ. Для осуществления позиционирования по нормали и обеспечения контакта преобразователя с поверхностью объекта контроля предлагается дополнить конструктив звена № 3.

Данная оснастка включает лапки позиционирующие, угол между которыми зависит от кривизны сложно-профильного изделия рис. 5. Нормаль преобразователя к поверхности достигается при контакте двух лапок. Шарнирное соединение позволяет преобразователю подстраиватся к поверхности сложно-профильного изделия. Пружины предотвращают поворот преобразователя под собственным весом.

На обратной стороне лапок позиционирующих (рис. 6) размещаются тензорезисторы позиция 1. При контакте лапок с поверхностью сложно-профильного изделия осуществляется деформация лапок и соответственно тензорезисторов, изменяется сопротивление, что сигнализирует о контакте с поверхностью. Изменение сопротивления на двух тензорезисторах отражает установку по нормали преобразователя и контакт с поверхностью.

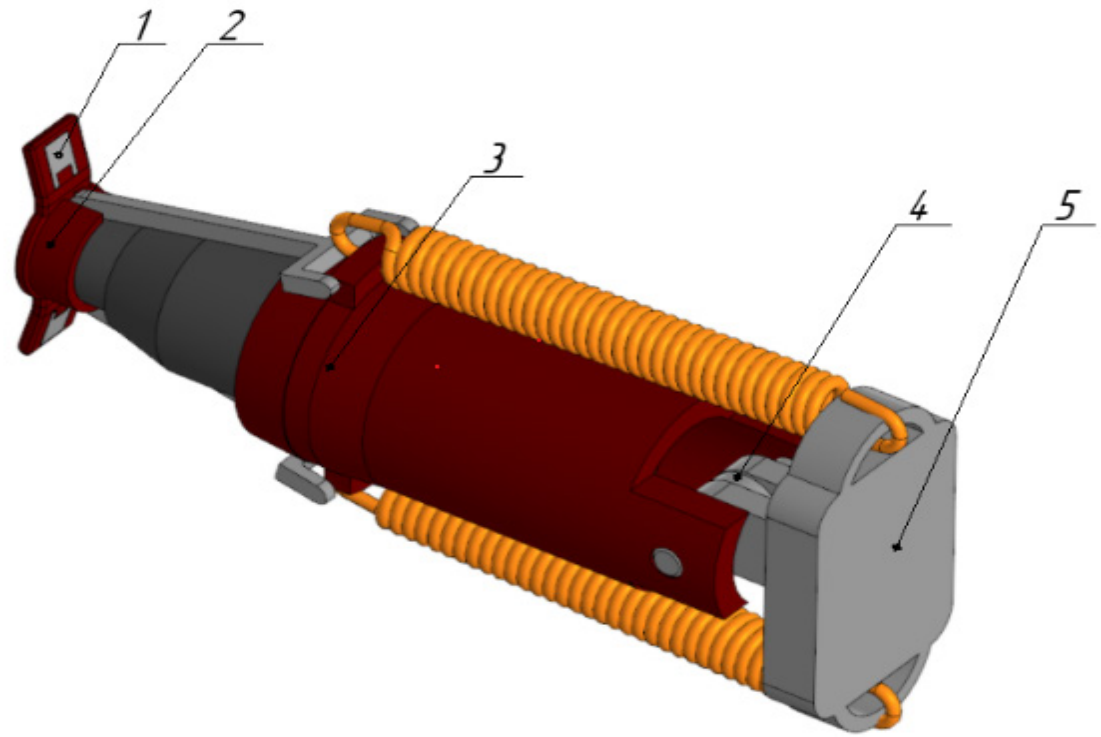


Рис. 6. *Общий вид оснастки позиционирования преобразователя*
(1 — *тензорезистор,* 2 — *лапки позиционирующие,* 3 — *корпус,* 4 — *шарнир,* 5 — *основание*).

Оснастка с преобразователем подводится к заданной области сканирования выбранного сечения (рис. 7). В дальнейшем осуществляется позиционирование, результатом которого является выставленный по нормали преобразователь с контактом к поверхности. После чего осуществляется вращение устройства позиционирования, преобразователь совершает перемещение по выбранному сечению. При наличии радиального биения, отклонения от круглости, образуется зазор, который влияет на сопротивление тензорезисторов. Данное изменение фиксируется и осуществляется поджим преобразователя к поверхности сложно-профильного изделия.

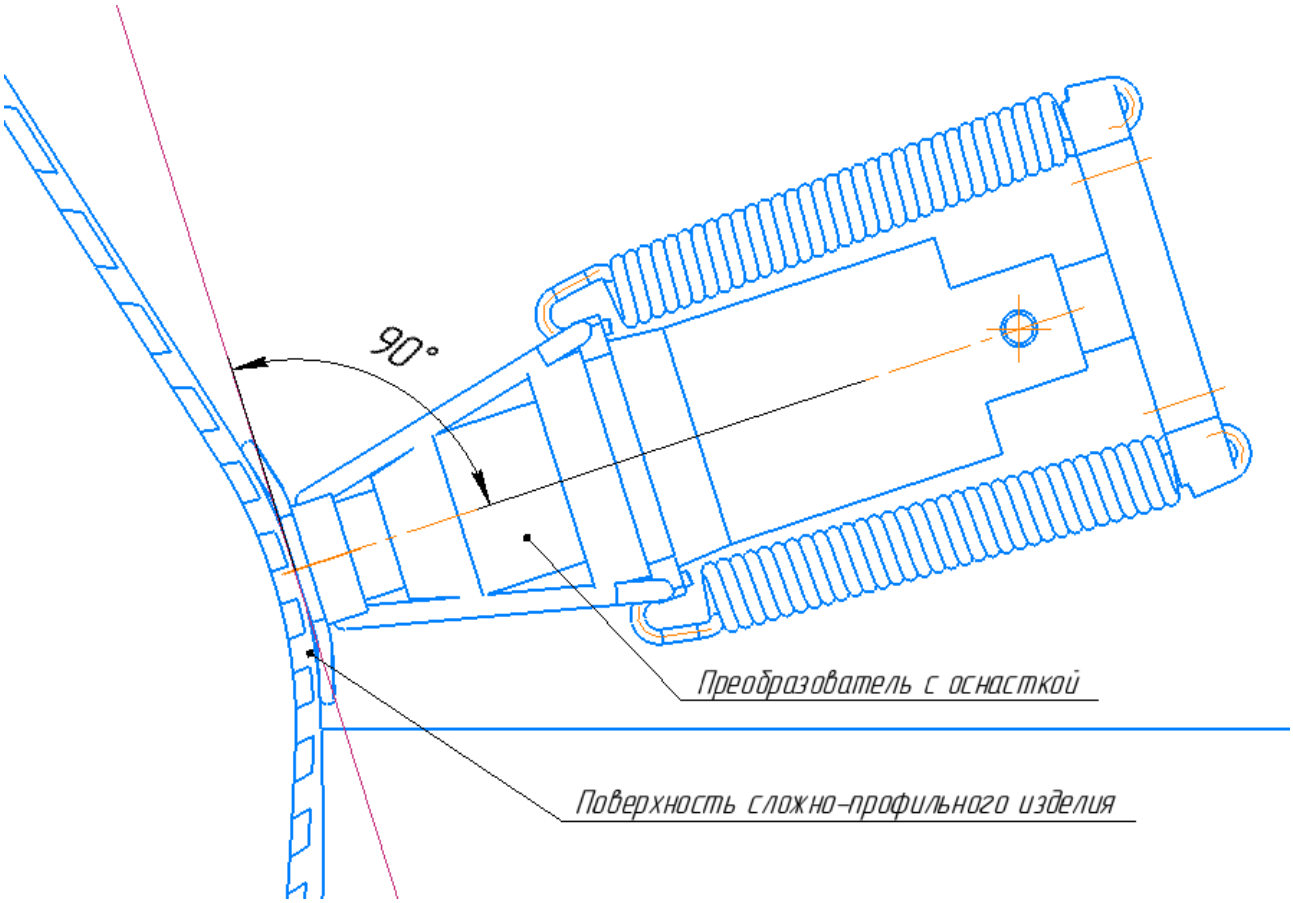


Рис. 7. *Позиционирование преобразователя относительно поверхности сложно-профильного изделия.*

Выводы

По результатам работы обоснована нецелесообразность применения механизированных устройств с жесткой управляющей программой из-за множества факторов, влияющих на погрешность позиционирования. Обоснована невозможность применения существующих оснасток, основанных на подпружинивании преобразователя с целью устранения зазора в процессе контроля. Разработана оснастка, включающая тензорезисторы, которая позволяет осуществлять позиционирование по нормали преобразователя с контактом к поверхности, уменьшая погрешность измерения размеров дефектов в поверхностных и подповерхностных слоях сложно-профильного изделия.

Список литературы

1. *Добровольский М. В.* Жидкостные ракетные двигатели. Основы проектирования: учебник для высших учебных заведений. М.: Издательство МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2016. 461 с.
2. *Калошин В. А.* Исследование и разработка метода неразрушающего контроля качества никелевых и никель-хромовых покрытий узлов жидкостных ракетных двигателей. Диссертация, к.т.н. 2013. 173 с.
3. *Ганзен М. И.* Роботизированный вихретоковый контроль деталей ГТД с использованием нейронных сетей // Вестник РГАТА имени П.А. Соловьева. 2019. С. 65–70.
4. *Дорохов А. С., Загоруйко М. Г., Давыдова С. А., Павкин Д. Ю., Чилингарян Н. О., Гршин А. А., Катаев Ю. В., Алешин А. К., Чернецов Р. А., Терехова А. Н., Глазунов В. А., Шалюхин К. А., Скворцов С. А., Гебель Е. С., Прохорович В. Е., Сергеев Д. С., Губин М. С., Шолохов М. А., Бузорина Д. С., Хейло С. В., Царьков А. В., Гаврюшин С. С., Ганыш С. М., Ефимов С. В., Яцун С. Ф., Яцун А. С., Князев С. И., Скворцов П. А.* Новые механизмы робототехнических и измерительных систем. Гл. 4. Робототехнические комплексы в неразрушающем контроле. 2022. С. 123.
5. *Губин М. С.* Автоматизация технологии комплексного неразрушающего контроля качества покрытий изделий сложной геометрической формы // Технико-технологические проблемы сервиса. 2023. № 63. С. 3–7.
6. *Легаев В. П.* Точность измерительных устройств: учеб.-практ. пособие. Владимир: Изд-во ВлГУ, 2020. 87 с.
7. ГОСТ 27843-2006 Испытания станков. Определение точности и повторяемости позиционирования осей с числовым программным управлением. М.: Стандартинформ, 2020. 2 с.

Поступила 4 июля 2023 г.

DEVELOPMENT OF THE MAIN STRUCTURAL ELEMENTS OF THE POSITIONING SENSOR OF THE AUTOMATED INSTALLATION OF COMPLEX NON-DESTRUCTIVE TESTING

M.S. GUBIN, I.YU. KINZHAGULOV, V.V. MALY, D.S. SERGEYEV, AND A.V. FEDOROV

doi: 10.25210/jfop-2302-QLMRLT | **edn:** QLMRLT

There are complex profile products designed to change the velocity of a passing high-temperature gas flow, geometrically representing the body of rotation. The manufacturing process of these products is laborious and has a high cost, includes a number of mechanical treatments, assembly operations. The main stage in the technological process is the application of a protective coating on the inner wall of a complex profile product to prevent the destruction of the wall by high-temperature gas flows. The final stage of the technological process is the quality control of coatings. The thickness of the coating and the dimensions of surface and subsurface defects are measured. Deviation from the permissible ranges may lead to premature failure of the product, which is unacceptable.

At the moment, non-destructive testing of the main coating parameters is carried out manually. Measuring instruments for thickness control based on the magnetodynamic, ponderomotor method are used, measuring instruments based on the eddy current method are used to control the size of defects. The main problem of quality control of coatings of complex profile products in manual mode is low reliability, high labor intensity. During manual control, a number of difficulties arise in terms of ensuring the normality of the sensor to the surface of a complex profile product; contact with the surface throughout the entire scanning time; the set speed of movement of the transducer over the surface of a complex profile product.

To increase reliability and reduce labor intensity, it is proposed to use an automated technology of complex non-destructive testing, which includes a mechanism for positioning transducers. The process of developing this mechanism depends on the geometry of the complex profile product and the requirements formed as a result of the analysis of methods. As a result of the conducted research, it was determined that small values of the primary errors of the mechanism affect the positioning error of the output link, forming an unacceptable gap between the surface of a complex profile product and the transducer, which affects the measurement results. The solution to this problem is achieved by adding feedback to the positioning mechanism, which signals contact with the surface and normal positioning.

Уважаемые читатели!

Журнал включен:

- В ***Российский индекс научного цитирования*** (***РИНЦ***).
- В базу данных ***Russian Science Citation Index*** (***RSCI***) на платформе ***Web of Science.***
- В ***Перечень рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук.***

ПРИБОРЫ И МЕТОДЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ ФИЗИКИ

УДК 534.6

СТЕНД ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ СЕРДЕЧНО-СОСУДИСТОЙ СИСТЕМЫ DANIO RERIO МЕТОДАМИ АКУСТИЧЕСКОЙ И ОПТИЧЕСКОЙ МИКРОСКОПИИ

© Авторы, 2023
doi: 10.25210/jfop-2302-DYCSOQ | **edn:** DYCSOQ

Титов С. А. — д.т.н., доцент, с.н.с., Научно-технологический центр уникального приборостроения Российской академии наук, Москва. SPIN-код: 4319–7648. E-mail: sergetitov@mail.ru

Богаченков А. Н. — к.т.н., доцент, с.н.с., Институт биохимической физики им. Н.М, Эмануэля Российской академии наук, Москва. E-mail: anbogat@mail.ru

Зыкова Л. А. — м.н.с., Научно-технологический центр уникального приборостроения Российской академии наук, Москва. SPIN-код: 4534–6349. E-mail: lida_zykova@mail.ru

Гурылева А. В. — к.т.н., н.с., Научно-технологический центр уникального приборостроения Российской академии наук, Москва. SPIN-код: 2873–8095. E-mail: guryleva.av@ntcup.ru

Бурлаков А. Б. — д.б.н., проф., в.н.с., Московский государственный университет М.В. Ломоносова, Москва. E-mail: burlakovao@mail.ru

Мачихин А. С. — д.т.н., доцент, в.н.с., Научно-технологический центр уникального приборостроения Российской академии наук, Москва. SPIN-код: 4060–7193. E-mail: machikhin@ntcup.ru

Аннотация

Разработан экспериментальный стенд, предназначенный для исследования in vivo сердечно-сосудистой системы рыбы Danio rerio методами акустической и оптической микроскопии. Он позволяет одновременно записывать ультразвуковые и оптические данные с противоположных сторон организма, обеспечивая их пространственную и временную синхронизацию. С помощью стенда исследованы особи Danio rerio, находящиеся на эмбриональной, личиночной и мальковой стадиях развития. Показано, что совместная обработка акустических и оптических данных позволяет определять пространственно-временное распределение скорости кровотока в области сердца и измерять размеры его камер в различных направлениях.

Ключевые слова: *danio rerio, акустическая микроскопия, оптическая микроскопия, сердечно-сосудистая система, мультимодальный стенд*

Abstract

An experimental setup has been developed for in vivo studying the cardiovascular system of the fish Danio rerio using acoustic and optical microscopy. The setup simultaneous spatiotemporal synchronization and acquisition of ultrasound and optical data from opposite sides of the fish's body. Individuals of Danio rerio at the embryonic, larval and juvenile stages were experimentally studied. It is shown that joint processing of acoustic and optical data allows to determine the spatiotemporal distribution of blood flow velocity in the heart area and measure the dimensions of its chambers in various directions.

Keywords: *danio rerio, acoustic microscopy, optical microscopy, cardiovascular system, multi-modal setup*

Введение

На протяжении последних десятилетий рыба *Danio rerio* приобрела большую популярность в качестве модельного организма для исследований в биологии развития и биомедицине для моделирования и изучения различных сердечно-сосудистых заболеваний человека [1–3]. Было показано, что оптическая микроскопия представляется эффективным методом визуализации сердечно-сосудистой и мышечной систем *Danio rerio* на эмбриональной и личиночной стадиях развития благодаря их прозрачности [4–6]. Оптическая микроскопия обеспечивает визуализацию с высоким разрешением области сердца и движения его компонентов в фокальной плоскости, однако одновременное получение изображений в плоскостях, смещенных по отношению к фокальной, является затруднительной без перестройки оптической системы. Этот недостаток можно преодолеть, используя ультразвуковые методы визуализации. Отправляя и получая ультразвуковые волны перпендикулярно плоскости оптического изображения и выполняя механическое сканирование в этой плоскости, акустический прибор потенциально способен получать трехмерные данные. Известно успешное применение высокочастотной ультразвуковой визуализации для исследования сердца как взрослых *Danio rerio*, которые являются непрозрачными для оптического излучения [7–9], так и полупрозрачных особей на ранних этапах развития [10–12].

Титов С.А., Богаченков А.Н., Зыкова Л.А., Гурылева А.В., Бурлаков А.Б., Мачихин А.С. Стенд для исследования сердечно-сосудистой системы Danio rerio методами акустической и оптической микроскопии // Физические основы приборостроения. 2023. Т. 12. № 2(48). С. 86-93. DOI: 10.25210/jfop-2302-DYCSOQ. EDN: DYCSOQ

В работе предложена методика исследования in vivo сердечно-сосудистой системы рыб *Danio rerio* на ранних стадиях развития, основанная на комбинации оптической и акустической микроскопии. Разработанный экспериментальный стенд позволяет одновременно записывать ультразвуковые и оптические данные с противоположных сторон объекта, что существенно повышает информативность исследований.

1. Описание мультимодального стенда

Схема разработанного мультимодального стенда представлена на рис. 1. Анестезированная особь *Danio rerio* 1 помещалась в иммерсионную ячейку 2 с водой, имеющую прозрачное дно из оптического стекла. Ультразвуковой преобразователь 3 излучал импульсные сфокусированные волны и принимал рассеянные образцом ультразвуковые эхо-сигналы. Принятые электрические сигналы усиливались в согласующем устройстве 4, обрабатывались в двухканальном аналоговом блоке 5 и после аналого-цифрового преобразования в блоке 6 сохранялись в компьютере 7. Для регистрации пространственной структуры ультразвуковых сигналов использовался механический сканер 8, управляемый контроллером 9. Более подробно компоненты ультразвуковой системы описаны в [13].

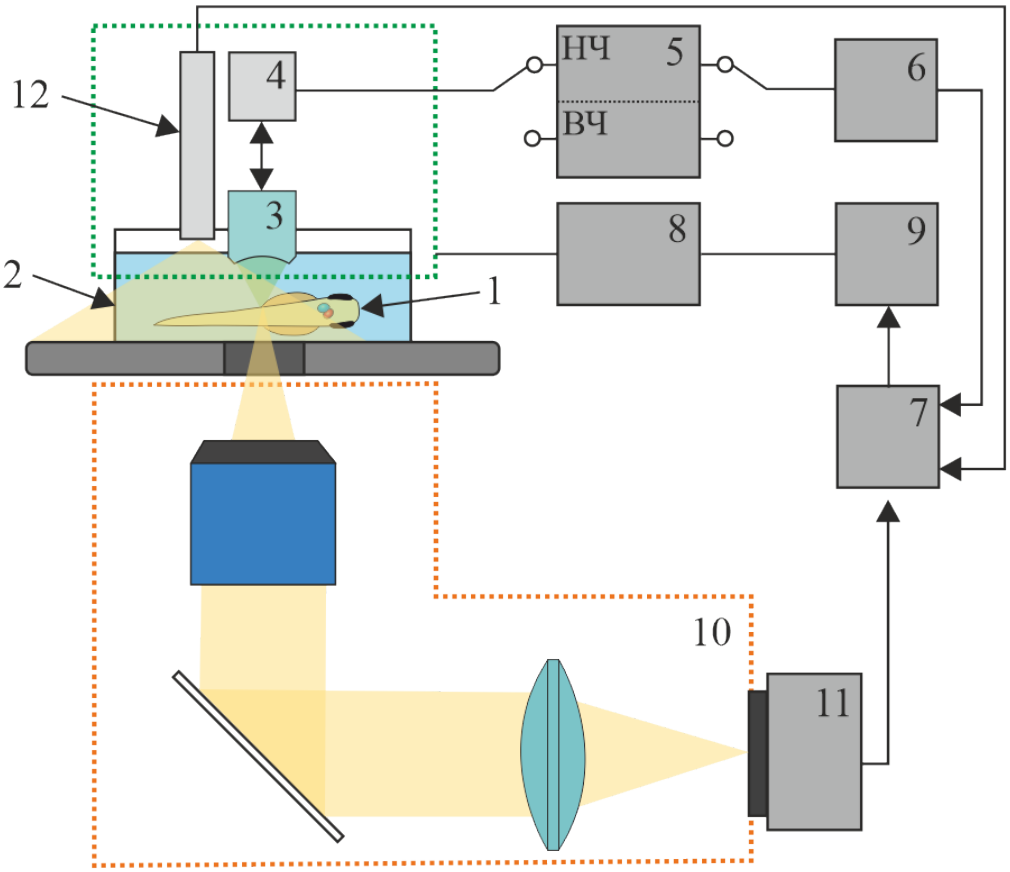


Рис. 1. *Схема экспериментального стенда:* 1 — *исследуемый организм,* 2 — *иммерсионная ячейка,* 3 — *ультразвуковой преобразователь,* 4 — *согласующее устройство,* 5 — *аналоговый блок,* 6 — *аналого-цифровой преобразователь,* 7 — *компьютер,* 8 — *механический сканер,* 9 — *контроллер,* 10 — *инвертированный микроскоп,* 11 — *видеокамера,* 12 — *малогабаритный микроскоп.*

Особенностью данного стенда является наличие высокочастотного и низкочастотного каналов в составе аналогового блока 5, оптимизированных для исследования мелких особей на ранних стадиях развития и более крупных старших организмов, соответственно. Структурная схема аналогового блока, соединенного с согласующим устройством, показана на рис. 2. В передающем тракте предусмотрено два независимых канала. Низкочастотный генератор зондирующих импульсов, содержащий логические элементы и оконечный усилитель, используется для возбуждения преобразователей с частотой от 10 до 100 МГц. Индивидуальная настройка на определенный преобразователь и режим работы обеспечивается регулировками длительности импульса от 10 до 100 нс, длительности фронта импульса от 5 до 20 нс и амплитуды от 10 до 60 В. Высокочастотный генератор импульсов может работать с преобразователями с частотой до 200 МГц. Он обеспечивает генерацию импульсов с длительностями фронта порядка 1 нс, амплитудой до 300 В, что достигается использованием в выходном каскаде лавинных диодов [14, 15].

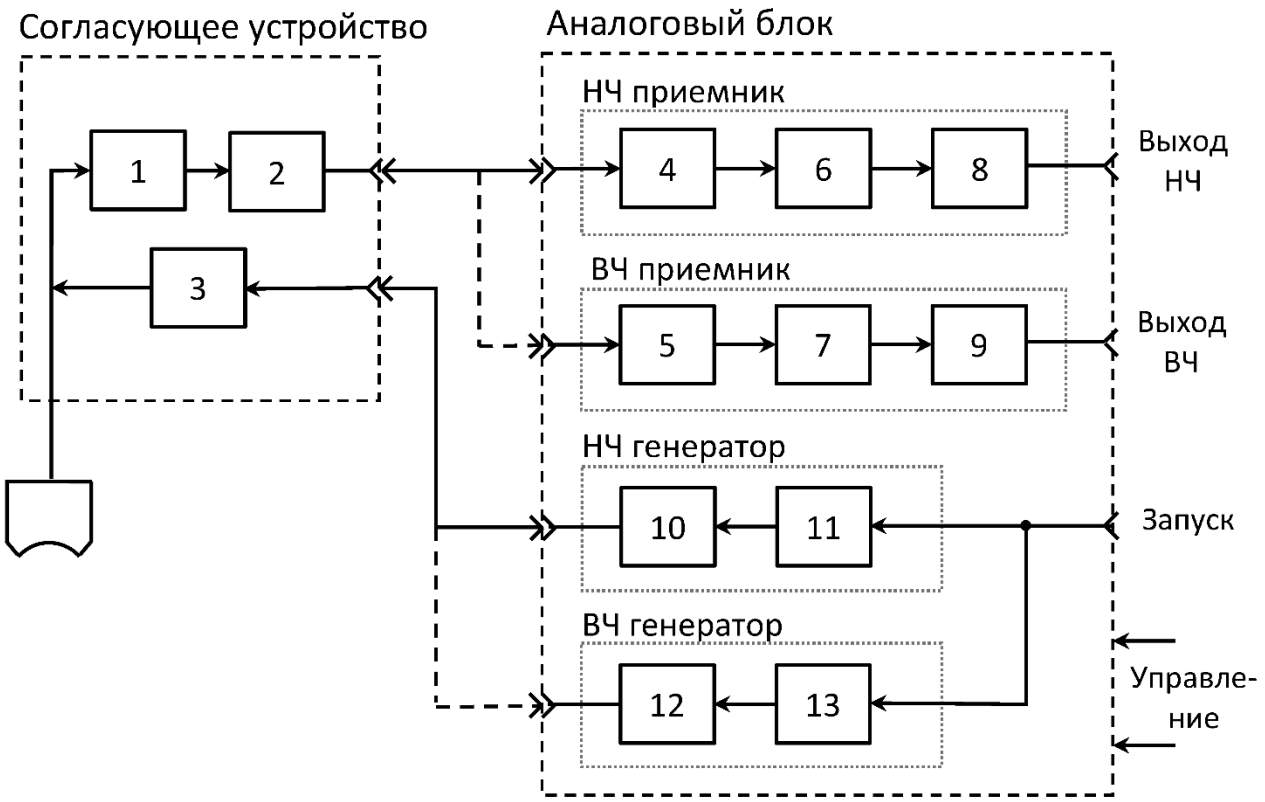


Рис. 2. *Схема двухканального аналогового блока с согласующим устройством:* 1 — *диодный или транзисторный ограничитель,* 2 — *предварительный широкополосный усилитель,* 3 — *схема развязки принимаемого сигнала и сигнала генератора,* 4, 5 — *фильтры низкочастотного и высокочастотного приемника,* 6 — *усилитель с регулируемым коэффициентом усиления,* 7 — *усилитель с цифровым аттенюатором,* 8, 9 — *выходные каскады низкочастотного и высокочастотного приемника,* 10 — *оконечный каскад усилительного типа,* 11 — *логика формирования импульса НЧ генератора,* 12 — *формирователь импульсов на лавинном диоде,* 13 — *усилитель раскачки формирователя импульсов.*

Низкочастотный приемный тракт оптимизирован для работы в полосе частот 5...50 МГц, высокочастотный — 50...200 МГц. Каждый из каналов имеет переключаемые фильтры для согласования с полосой пропускания ультразвуковых преобразователей. В низкочастотном приемнике применен усилитель с аналоговой регулировкой коэффициента усиления, что обеспечивает минимальный уровень помех в данной полосе частот. В высокочастотном приемнике используется двухкаскадный цифровой аттенюатор с высоким быстродействием.

Между аналоговым блоком и ультразвуковым преобразователем в непосредственной близости от него расположено согласующее устройство с малошумящим предварительным широкополосным усилителем, который позволяет заметно снизить уровень шумов и помех в отраженном сигнале.

Основой оптической части стенда (рис. 1) является инвертированный металлографический микроскоп 10 Altami MET 1C, на предметном столе которого располагается иммерсионная ячейка 2 с образцом 1 и к основанию которого прикрепляется механический сканер 8 с ультразвуковым преобразователем 3 и согласующим устройством 4. С помощью объектива PL L 20X/0.40 ∞/0 и цифровой видеокамеры 11 с частотой кадров 50 Гц возможно получение последовательности изображений сердца, по которым вырабатываются сигналы синхронизации ультразвуковых данных и оцениваются поперечные размеры камер сердца в процессе его работы [16].

Дополнительно в состав стенда входит малогабаритный цифровой USB микроскоп Andonstar A1 12 (рис. 1) с перестраиваемым фокусным расстоянием и светодиодной подсветкой. Он жестко крепился относительно ультразвукового преобразователя 3 и использовался в качестве вспомогательного микроскопа для наблюдения за позиционированием объекта и контроля его состояния в процессе измерений. Увеличение микроскопа устанавливалось таким образом, чтобы в поле зрения помещался весь организм или его большая часть.

Согласование акустической и оптических осей обоих микроскопов производилось путем формирования ультразвукового и оптических изображений калибровочного объекта в виде перекрестия, имеющего высокий контраст, как для ультразвуковых, так и для световых волн.

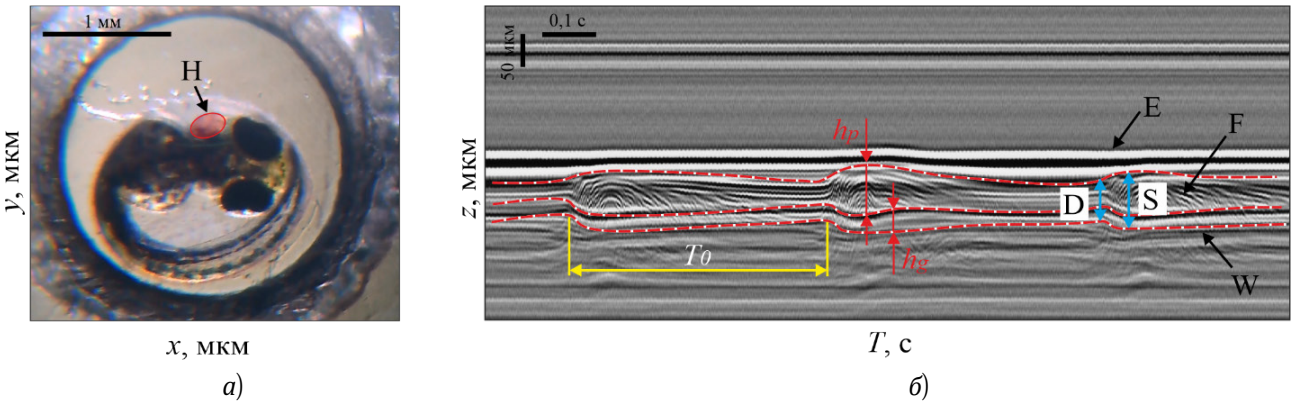
В процессе измерений анестезированный организм помещался в иммерсионную ячейку стенда в необходимой ориентации под наблюдением с помощью верхнего микроскопа 12 (рис. 1). Для непрозрачных особей, находящихся на зрелых стадиях развития, позиционирование относительно оптической оси микроскопа производилось поперечными механическими трансляторами предметного стола. После этого осуществлялось перемещение ультразвукового блока и жестко связанного с ним верхнего микроскопа до совмещения оптической и акустической осей и производилась регистрация ультразвуковых сигналов. При этом объект выходил из поля зрения микроскопа 12, и одновременная регистрация ультразвуковых и оптических данных была невозможной. Для прозрачных объектов точное позиционирование объекта осуществлялось по изображениям, получаемым с помощью инвертированного микроскопа 10 (рис. 1). В этом случае оказывается возможной одновременная регистрация оптических и ультразвуковых данных благодаря двухстороннему доступу к объекту.

2. Результаты экспериментальных исследований

В качестве примеров, демонстрирующих возможности разработанного стенда, на рис. 3–5 представлены результаты исследования *Danio rerio* на трех стадиях развития: на эмбриональной до вылупления (рис 3), личиночной после вылупления (рис. 4) и ювенальной (рис. 5). На эмбриональной и личиночной стадиях организм *Danio rerio* является оптически полупрозрачным. Оптические изображения эмбриона возрастом 40 часов после оплодотворения и личинки возрастом 70 часов после оплодотворения, полученные с помощью верхнего микроскопа стенда, показаны на рис. 3(а) и рис. 4(а), соответственно. Видно, что эмбрион находится внутри оболочки в свернутом виде рис. 3(а), а после вылупления личинка распрямляется рис. 4(а). На изображениях видны границы пластиковых лунок, в которые помещаются организмы в иммерсионной ячейке, а также области расположения сердца H.

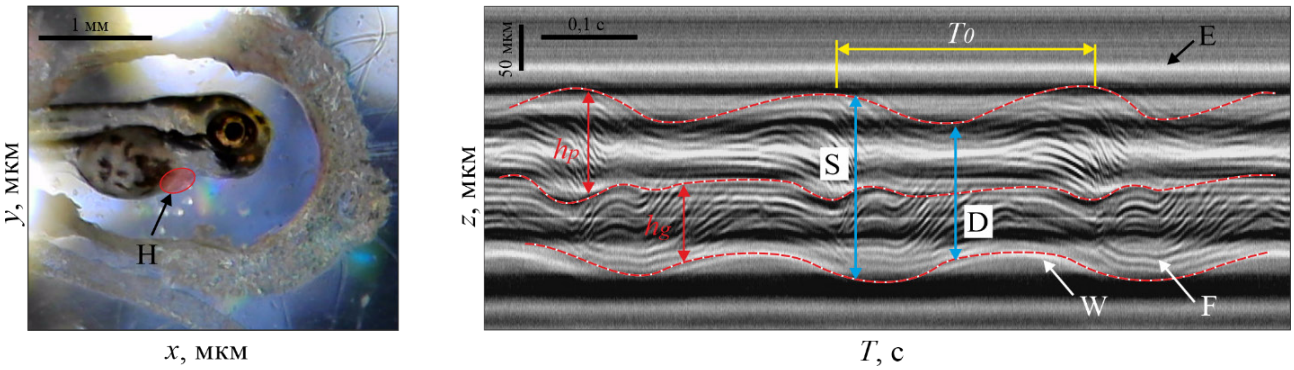
Ультразвуковые М-сканы $s(z, T)$, измеренные в области сердца исследуемых особей на трех стадиях развития, показаны на рис. 3(б), 4(б) и 5. Для исследования эмбриона и личинки использовался ультразвуковой преобразователь с номинальной частотой пьезоэлемента 100 МГц и угловой апертурой 40°, подключенный к высокочастотному аналоговому блоку стенда. Поскольку размеры *Danio rerio* и его сердца на ювенальной стадии развития существенно больше, чем у эмбриона и личинки, для его исследования был использован преобразователь с меньшей частотой, обеспечивающий большее рабочее расстояние и глубину резкости. Этот преобразователь, подключаемый к низкочастотному аналоговому блоку стенда, имел номинальную частоту пьезоэлемента 50 МГц и угловую апертуру 17°. Расчетные значения поперечного пространственного разрешения этих преобразователей составляют приблизительно 15 и 60 мкм, соответственно.

Ультразвуковые пространственно-временные сигналы $s(z,T)$, записанные в области сердца исследуемых особей, представлены в виде полутоновых изображений (рис. 3–5). На изображениях присутствуют отклики, образованные отражением ультразвуковых волн от структурных элементов, располагающихся на различной глубине z вдоль оси преобразователя, форма и положение которых меняются со временем T в соответствии с работой сердца. Приведенные данные демонстрируют квазипериодическое поведение, определяемое периодом сердечных сокращений T_0. Также полученные М-сканы показывают, что размеры сердца и глубина его залегания растут с возрастом организма.



а) б)

Рис. 3. *Оптическое изображение (а) и ультразвуковой М-скан (б) эмбриона Danio rerio возрастом 40 часов.* $T_0 \approx 0.78$ *с.*



а) б)

Рис. 4. *Оптическое изображение (а) и ультразвуковой М-скан (б) личинки Danio rerio возрастом 70 часов после оплодотворения.* $T_0 \approx 0.29$ *с.*

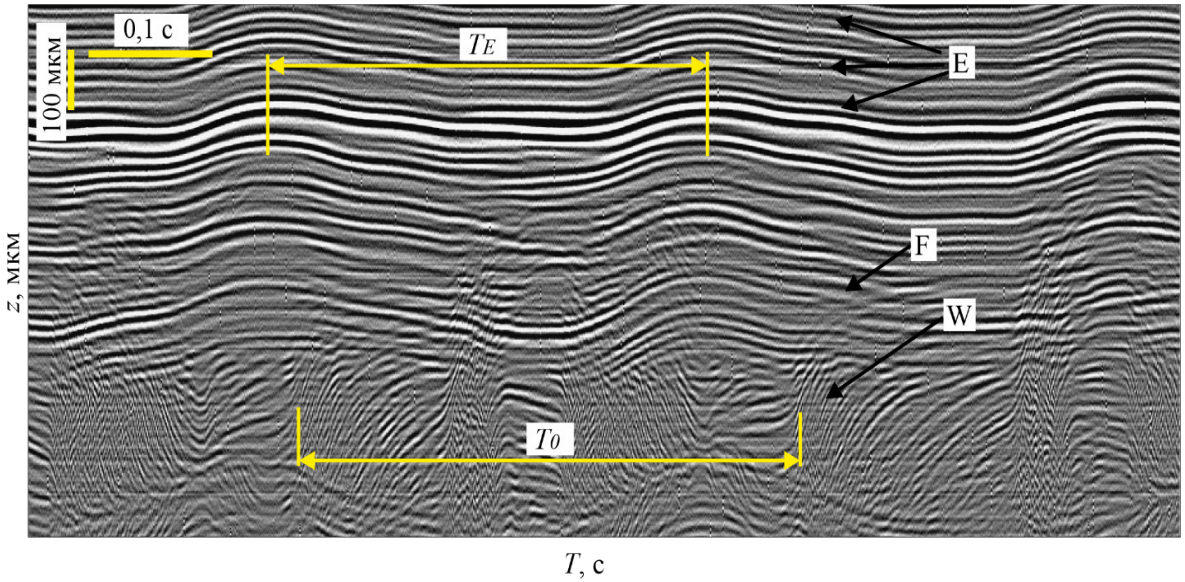


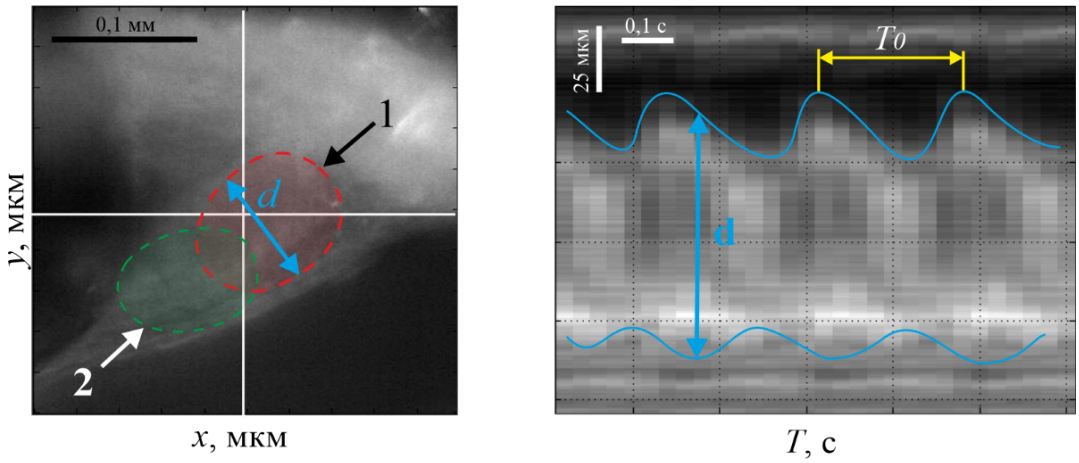
Рис. 5. *М-скан сердца малька Danio rerio возрастом 3 месяца.* $T_0 \approx 0.4$ *с,* $T_E \approx 0.35$ *с.*

Сигналы E формируются за счет отражения ультразвукового импульса от внешних покровов организма, расположенных ближе к ультразвуковому преобразователю. Их форма и положение почти не зависят от времени T для эмбриона и личинки (рис. 3, 4), что свидетельствует о достаточной степени иммобилизации объекта. Для особи ювенального возраста (рис. 5) сигнал E имеет множественную структуру, образованную отражениями ультразвука в нескольких сравнительно толстых наружных покровах. Вследствие невозможности применения глубокой анестезии для организмов данного возраста, у них сохраняются движения жабр, что приводит к дополнительному перемещению внешних тканей, которое накладывается на движения элементов сердца. На М-скане они проявляются в виде волнистых линий E с периодом $T_E \approx 0.35$ с, который заметно отличается от периода сердечных сокращений $T_0 \approx 0.4$ с.

На всех М-сканах можно обнаружить отклики W, претерпевающие периодические изменения с периодом сердечных сокращений T_0. Эти отклики образуются за счет отражения ультразвука от стенок и внутренних мышечных элементов сердца. Особенно четко структуру этих тканей можно распознать на изображениях эмбриона и личинки (рис. 3(б) и 4(б)). На М-сканах во внутренних областях сердца присутствуют шумоподобные сигналы F, которые генерируются за счет рассеяния волн на движущихся элементах крови, и тонкая структура которых не является периодической.

Учитывая особенности временного поведения откликов, в М-сканах можно различить функциональные периоды сердечного ритма и выделить фазы систолы S и диастолы D. В фазе диастолы D отклики W (рис. 3, 4) движутся в области желудочка в противоположных направлениях, в то время как в фазе систолы S они движутся навстречу друг другу. Движение сигналов F от крови носит пульсирующий характер, а вертикальная скорость элементов крови может превышать скорость стенок. В паузе между двумя фазами происходит плавное движение стенок и элементов крови, и направление кровотока различно в фазах диастолы и систолы.

По откликам F можно исследовать характер движения частиц крови в зависимости от времени T, а также проводить измерения скорости кровотока. Пространственно-временное распределение скорости потока можно получить корреляционным методом [17,18]. Вместе с тем скорость можно оценить в отдельных точках М-скана, разделив вертикальное смещение отклика Δz на соответствующий интервал времени ΔT [10, 12, 17]. Пиковые значения скорости, достигаемые в фазе систолы для эмбриона, личинки и малька составили 2.6, 3.7 и 10 мм/с, соответственно. Таким образом, наблюдается естественное увеличение скорости кровотока с возрастом организма.



а) *б*)

Рис. 6. *Оптическое изображение сердца личинки (а) и оптический М-скан (б).*

Вертикальные размеры предсердия сердца h_p и его желудочка h_g, могут быть определены по откликам W, различаемым в ультразвуковых М-сканах. Как видно из рис. 3 и 4, эти размеры изменяются с течением времени согласно фазам сердечного ритма. Характерные размеры камер сердца находятся в диапазоне 40–60 мкм и 60–80 мкм для эмбриона и личинки, соответственно. На М-скане, полученном для старшей особи (рис. 5), корректно выделить отклики W представляется затруднительным, однако границы камер могут быть обнаружены по краям областей с интенсивным движением элементов крови. Видно, что в этом случае вертикальные размеры могут достигать приблизительно 300 мкм.

Поперечные размеры сердца могут быть получены из оптических изображений в соответствии с известной методикой [4–6]. На рис. 6(а) показано одно из изображений, полученных с помощью инвертированного микроскопа синхронно с ультразвуковыми данными. На изображении обведены контуры желудочка личинки с поперечным размером d. Временная зависимость размера хорошо прослеживается на оптическом М-скане, который отображает интенсивность вдоль линии измерения в зависимости от времени (рис. 6(б)). Видно, что поперечный размер желудочка изменяется в пределах 70–90 мкм, что близко к диапазону вертикального размера h_g (рис. 4(б)).

Заключение

В данной работе разработан экспериментальный стенд и соответствующие методики неинвазивного исследования *in vivo* рыбок Danio rerio на ранних стадиях их развития. Особенностью предложенного и реализованного метода является объединение оптической и акустической микроскопии для одновременной регистрации видео и акустических данных, что позволяет повысить информативность исследований. Оптические и ультразвуковые сигналы, измеряемые с противоположных сторон объекта, синхронизируются во времени посредством цифровой постобработки записанных данных. Пространственная синхронизация осуществляется путем юстировки оптической и акустической систем с помощью калибровочных образцов. Экспериментальные исследования *Danio rerio* на эмбриональной, личиночной и мальковой стадиях развития, выполненные с помощью разработанного мультимодального стенда, демонстрируют возможность измерения пространственно-временного распределения скорости кровотока в камерах сердца и оценки их размеров. Совместная обработка ультразвуковых и оптических данных позволяет получить временные зависимости как продольных, так и поперечных размеров камер для особей на эмбриональной и личиночной стадиях. Следует отметить, что наличие в стенде высококачественной оптической системы дает возможность применения хорошо отработанных методов фотоплетизмографии, видеокапилляроскопии и кроссполяризационной микроскопии [19, 20] без изменения положения исследуемого организма.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект № 22–49–08012).

Список литературы

1. *Schlaeppi, A., Graves, A., Weber, M., and Huisken, J.* Light sheet microscopy of fast cardiac dynamics in Zebrafish embryos // J. Vis. Exp. 2021. Vol. 174. DOI: 10.3791/62741
2. *Salehin, N., Villarreal, C., Teranikar, T., Dubansky, B., Lee, J., and Chuong, C.J.* Assessing pressure-volume relationship in developing heart of Zebrafish in-vivo // Ann. Biomed Eng. 2021. Vol. 49. No. 9. P. 2080–2093. DOI: 10.1007/s10439-21-02731-0
3. *Lee, J., Fei, P., Packard, R.R., Kang, H., Xu, H., Baek, K.I., Jen, N., Chen, J., Yen, H., Kuo, C.C., Chi, N.C., Ho, C.M., Li, R., and Hsiai, T.K.* 4-Dimensional light-sheet microscopy to elucidate shear stress modulation of cardiac trabeculation // J. Clin. Invest. 2016. Vol. 126. No. 5. P. 1679–1690. DOI: 10.10172/JCI83496
4. *Benslimane, F.M., Zakaria, Z.Z., Shurbaji, S., Abdelrasool, M.K.A., Al-Badr, M.A.H.I., Al Absi, E.S.K., and Yalcin, H.C.* Cardiac function and blood flow hemodynamics assessment of Zebrafish (Danio rerio) using high-speed video microscopy // Micron. 2020. Vol. 136. DOI: 10.1016/j.micron.2020.102876
5. *Shin, J.T., Pomerantsev, E.V., Mably, J.D., and MacRae, C.A.* High-resolution cardiovascular function confirms functional orthology of myocardial contractility pathways in Zebrafish // Physiol Genomics. 2010. Vol. 42. No. 2. P. 300–309. DOI: 10.11152/physiolgenomics.00206.2009
6. *Kurnia, K.A., Saputra, F., Roldan, M.J.M., Castillo, A.L., Huang, J.-C., Chen, K.H.-C., Lai, H.-T., and Hsiao, C.-D.* Measurement of multiple cardiac performance endpoints in Daphnia and Zebrafish by Kymograph // Inventions. 2021. Vol. 6. No. 1. DOI: 10.3390/inventions6010008
7. *Liu, T.Y., Lee, P.Y., Huang, C.C., Sun, L., and Shung, K.K.* A study of the adult zebrafish ventricular function by retrospective Doppler-gated ultrahigh-frame-rate echocardiography // IEEE Trans. Ultrason. Ferroelec. Freq. Contr. 2013. Vol. 60. No. 9. P. 1827–1837. DOI: 10.1109/TUFFC.2013.2769
8. *Ho-Chiang, C., Huang, H., and Huang, C.C.* High frequency ultrasound deformation imaging for adult zebrafish during heart regeneration // Quant. Imaging Med. Surg. 2019. Vol. 10. No. 1. P. 66–75. DOI: 10.21037/qims.2019.09.20
9. *Chang, C.C., Chen, P.Y., Huang, H., and Huang, C.C.* In vivo visualization of vasculature in adult zebrafish by using high-frequency ultrafast ultrasound imaging // IEEE Trans. Biomed. Eng. 2019. Vol. 66. No. 6. P. 1742–1751. DOI: 10.1109/TBME.2018.2878887
10. *Титов С.А., Бурлаков А.Б., Богаченков А.Н.* Сонография сердца вьюна Misgurnus fossilis на предличиночной стадии развития // Акустический журнал. 2021.Т. 67. № 5. С. 571–580. DOI: 10.31857/S0320791921050105
11. *Machikhin, A.S., Zykova, L.A., Burlakov, A.B., Titov, S.A., Bogachenkov, A.N., and Huang, C.C.* Development of ultrasound echocardiography technique for imaging of the cardiovascular system of small organism in vivo // J. Phys.: Conf. Ser. 2021. Vol. 2127. DOI: 10.1088/1742-6596/2127/1/012061. EDN: EZTYDO
12. *Titov, S.A., Zykova, L.A., Burlakov, A.B., Huang C.C., and Bogachenkov, A.N.* High-Frequency Ultrasound Echocardiography of heart activity of Danio rerio Embryo // 2022 Wave Electronics and its Application in Information and Telecommunication Systems (WECONF), IEEE Xplore. 2022. Vol. 5. No. 1. P. 484–487. DOI: 10.1109/WECONF55058.2022.9803424. EDN: BWWFVA
13. *Бурлаков А.Б., Титов С.А., Богаченков А.Н.* Применение акустической микроскопии для визуализации структурных перемещений при развитии эмбрионов рыб // Радиотехника и электроника. 2022. Т. 67. № 4. С. 377–383 DOI: 10.31857/S0033849422040027. EDN: OUAINB
14. *Коротков С.В., Воронков В.Б., Аристов Ю.В.* Генератор наносекундных импульсов с оптимизированным диодным коммутатором // Приборы и техника эксперимента. 2015. № 4. С. 48–50. DOI: 10.7868/S0032816215040072
15. *Wu, Z., Wang, Y., Zhang, J., Meng, F., Zhang, H., and Hou, X.* Analysis and Experiment of Nanosecond Pulse Circuit Based on Commercial Si-p-i-n Rectifier Diode // IEEE Trans. Plasma Sci. 2022. Vol. 50. No. 9. P. 3077–3084. DOI:10.1109/TPS.2022.3188137
16. *Титов С.А., Бурлаков А.Б., Богаченков А.Н., Мачихин А.С., Хохлов Д.Д.* Способ ультразвуковых исследований живых биологических объектов. Патент RU 2775460 C1. Выдан 01.07.2022.
17. *Titov, S.A., Zykova, L.A., Burlakov A.B., and Huang, C.C.* Estimation of Blood Flow Velocity in the Heart of the Danio rerio Embryo Using Correlation of Ultrasonic Signals // 2022 International Conference on Information, Control, and Communication Technologies (ICCT). 2022. P. 1–4. DOI: 10.1109/ICCT56057.2022.9976605
18. *Loupas, T., Gill, R.W., and Peterson, R.B.* Experimental Evaluation of Velocity and Power Estimation for Ultrasound Blood Flow Imaging, by Means of a Two-Dimensional Autocorrelation Approach // IEEE Trans. Ultrason. Ferroelectr. Freq. Control. 1995. Vol. 42. No. 4. P. 689–699.
19. *Machikhin, A.S., Burlakov, A.B., Volkov, M.V., and Khokhlov, D.D.* Imaging photoplethysmography and videocapillaroscopy enable noninvasive study of zebrafish cardiovascular system functioning // J. Biophotonics. 2020. Vol. 13. No. 7. DOI:10.1002/jbio.202000061.
20. *Machikhin, A., Huang, C., Khokhlov, D., Galanova, V., and Burlakov A.* Single-shot Mueller-matrix imaging of zebrafish tissues: In vivo analysis of developmental and pathological features // J. Biophotonics. 2022. Vol. 15. No. 9. DOI: 10.1002/JBIO.202200088

Поступила 25 августа 2023 г.

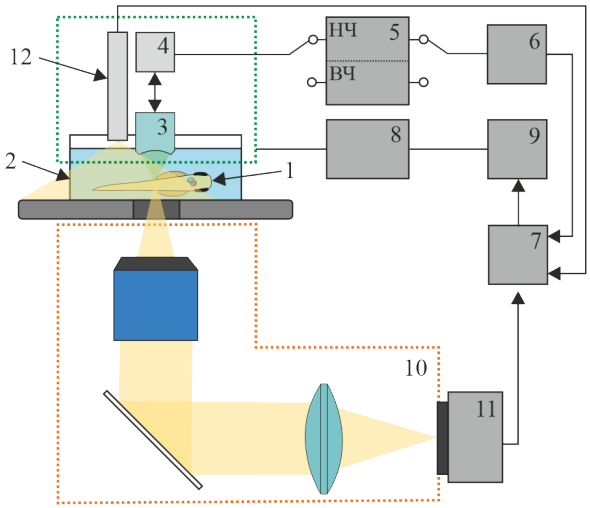
SETUP FOR STUDYING THE CARDIOVASCULAR SYSTEM OF DANIO RERIO USING ACOUSTIC AND OPTICAL MICROSCOPY

S.A. TITOV, A.N. BOGACHENKOV, L.A. ZYKOVA,
A.V. GURYLEVA, A.B. BURLAKOV, AND A.S. MACHIKHIN

doi: 10.25210/jfop-2302-DYCSOQ | **edn:** DYCSOQ

Over the past decades, Danio rerio has gained great popularity as a model organism in developmental biology and biomedicine for modeling and studying various human cardiovascular diseases. It has been shown that optical microscopy appears to be an effective method for visualizing the cardiovascular and muscular systems of zebrafish at embryonic and larval developmental stages due to their transparency. Optical microscopy provides high-resolution visualization of the heart and the movement of its components in the focal plane, but simultaneous acquisition of images in planes out from the focal plane is difficult without optical system readjustment. This disadvantage can be overcome by ultrasound imaging techniques. By sending and receiving ultrasonic waves perpendicular to the optical imaging plane and performing mechanical scanning in that plane, the acoustic miscroscope has the potential to acquire three-dimensional data.

In this study, we propose a method for in vivo analysis of Danio rerio at early stages based on a combination of optical and acoustic microscopy. The optical part of the setup is an inverted metallographic microscope, where the immersion cell with the organism under study is placed. Mechanical scanner of an acoustic microscope with an ultrasonic focusing transducer is attached to it. Additionally, the setup includes a handheld digital USB microscope necessary for the positioning of the specimen and monitoring its condition during the inspection. A special feature of this setup is the presence of high-frequency and low-frequency channels as part of the analogue unit of the acoustic microscope, optimized for the study of small individuals in the early stages of development and larger older organisms, respectively. The calculated values of the transverse spatial resolution of the ultrasonic transducers connected to these channels are 15 and 60 μm, respectively.



Experimental setup: 1 — inspected specimen, 2 — immersion cell, 3 — ultrasonic transducer, 4 — matching device, 5 — analog block, 6 — analog-to-digital converter, 7 — computer, 8 — mechanical scanner, 9 — controller, 10 — inverted microscope, 11 — video camera, 12 — handheld microscope.

The developed setup enables simultaneous acquisition of ultrasonic and optical data from opposite sides of the object. Optical and ultrasonic signals are synchronized in time through digital post-processing. Spatial synchronization is carried out by adjusting the optical and acoustic systems using calibration samples.

Experimental studies of *Danio rerio* at the embryonic, larval and juvenile developmental stages using the developed multi-modal setup, demonstrate the possibility of measuring the spatiotemporal distribution of blood flow velocity in the chambers of the heart and estimating their sizes. Joint processing of ultrasound and optical data allows to obtain temporal dependences of both longitudinal and transverse dimensions of chambers for individuals at the embryonic and larval stages. The presence of a high-quality optical system in the setup also allows to use well-developed methods of photoplethysmography, videocapillaroscopy and cross-polarization microscopy without repositioning the organism under study.

РУБРИКИ ЖУРНАЛА

Обзоры
Reviews
Математическое моделирование физических процессов
Mathematical Modeling of Physical Processes
Приборы и методы быстропротекающих физических процессов
Devices and Methods of Fast-Proceeding Physical Processes
Приборы и методы оценки погрешности физических величин
Devices and Methods of an Assessment of an Error of Physical Values
Приборы и методы физики и техники СВЧ диапазона
Microwave Range Devices and Methods of Physics and Techniques
Приборы и методы измерений в миллиметровом и субмиллиметровом диапазонах
Devices and Methods of Measurements in Millimeter and Submillimeter Ranges
Лазерная физика и техника
Laser Physics and Technique
Приборы и методы дистанционного зондирования
Devices and Methods of Remote Sensing
Радиолокационные средства и системы
Radars and Systems
Физические основы приборов и устройств метрологии
Physical Bases of Metrology Instruments and Devices
Проблемы оптического приборостроения на основе метаматериалов
Problems of Optical Instrumentation on the Basis of Metamaterials
Проблемы обработки сигналов и изображений в акустооптике и радиофизике
Problems of Signal and Image Processing in Acousto-Optics and Radiophysics
Проблемы атомной науки и техники
Problems of Atomic Science and Technology
Информационно-измерительные системы
Information-Measuring System
Методы радиолокационных и радиометрических измерений
Methods of Radar and Radiometric Measurements
Физические основы космического приборостроения
Physical Bases of Space Instrumentation
Физические основы приборостроения для биологии и медицины
Physical Bases of Instrumentation for Biology and Medicine
Методы высокоточных измерений и воспроизведения физических величин
Methods of High-Precision Measurements and Reproduction of Physical Values
Приборы и методы экспериментальной физики
The devices and methods of experimental physics
Физические основы приборов и устройств
Physical Bases of Instruments and Devices
Приборы и устройства
Instruments and Devices
Оптические материалы и технологии
Optical Materials and Technologies
Спектральные методы и устройства
Spectral Methods and Devices
Акустооптические и оптоакустические методы и устройства
Acousto-optic and Opto-Acoustic Methods and Devices
Физика плазмы в приборостроении
Plasma Physics in Instrumentation
Физика и техника плазмы
Physics and Technique of Plasma
Новые математические и физические методы
New Mathematical and Physical Methods
R-функции, атомарные функции, вейвлеты, фракталы и хаос в физике и технике
R-functions, Atomic Functions, Wavelets, Fractals, and Chaos in Physics and Engineering
Электродинамика искусственных сред и структур
Electrodynamics of Artificial Materials and Structures
Электродинамика низко и высокотемпературных сверхпроводящих структур
Electrodynamics of Low- and High-Temperature Superconducting Structures
Новости науки
Science News
Краткие сообщения
Brief Communications
Памятные даты
Memorable Dates
Наши юбиляры
Our Hero of the Day
В помощь экспериментатору
To Help the Experimenter
Информация
Information

ПРАВИЛА ОФОРМЛЕНИЯ РУКОПИСЕЙ, НАПРАВЛЯЕМЫХ В РЕДАКЦИЮ ЖУРНАЛА

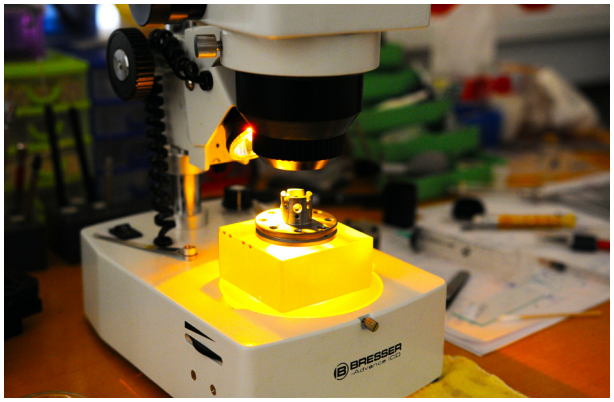
«ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ПРИБОРОСТРОЕНИЯ»

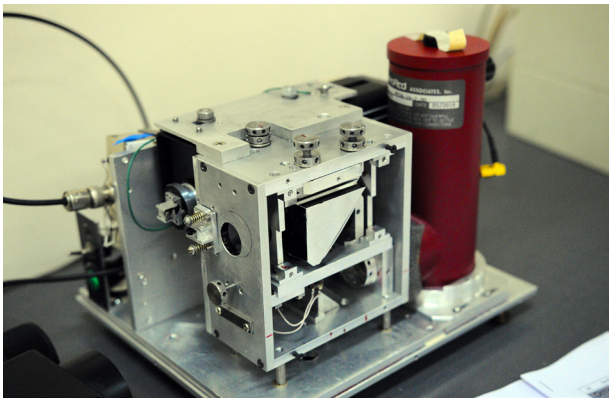
1. К публикации принимаются оригинальные работы, не предназначенные для публикации в других изданиях.
2. Необходимы следующие материалы:
   - сопроводительное письмо,
   - акт экспертизы,
   - соответствующий индекс универсальной десятичной классификации (УДК) литературы,
   - название на русском и английском языках,
   - фамилии и инициалы авторов на русском и английском языках (фамилии следуют в алфавитном порядке),
   - аннотацию на русском и английском языках,
   - ключевые слова на русском и английском языках,
   - краткое содержание статьи (реферат) на русском и английском языках объёмом 1–2 с,
   - текст статьи вместе с рисунками и таблицами,
   - список литературы в соответствии с ГОСТ Р 7.0.5-2008,
   - краткие сведения об авторах, включающие контактный телефон, фамилию, имя, отчество (полностью), ученую степень (звание), место работы, служебные и домашние адреса авторов с обязательным указанием почтового индекса и номеров телефонов, адрес электронной почты (на отдельной странице на русском и английском языках).
3. Статья представляется в виде файлов формата **MS Word 97-2003** (***.doc**) и одного экземпляра распечатки с полуторным межстрочным интервалом. Файлы могут быть записаны на оптический (CD, DVD) носитель, а также высланы по электронной почте редакции. Статья должна иметь сквозную нумерацию.
4. При наборе текста используются стандартный True Type шрифт — Times New Roman. Устанавливаемый размер бумаги — А4 (210×297 мм).
5. Формульные выражения, а также отдельные символы выполняются исключительно в редакторе формул **MathType**.
6. Иллюстрации выполняют в виде **графических файлов** (цветных/черно-белых) в **растровом** (*.tiff **с сжатием без потери качества** (LZW) или *.png) или **векторном** формате. Разрешение изображений дложно быть не хуже **300 dpi** и шириной не менее 8 см (абсолютные размеры изображения **не менее 1000×1000 точек**). Все иллюстрации сопровождаются подрисуночными подписями (не повторяющими фразы-ссылки на рисунки в тексте), включающими в себя номер, название и при необходимости условные обозначения.
   Рисунки должны соответствовать следующими требованиями:
   - буквенные и цифровые обозначения на рисунках по **начертанию** и **размеру** должны соответствовать обозначениям в тексте статьи,
   - текстовая информация и условные обозначения выносятся из рисунка в текст статьи или подрисуночные подписи,
   - для оформления рисунков **не допускается применять средства рисования Word**, а также таблицы. Режим обтекания только «в тексте» с выравниванием по центру.

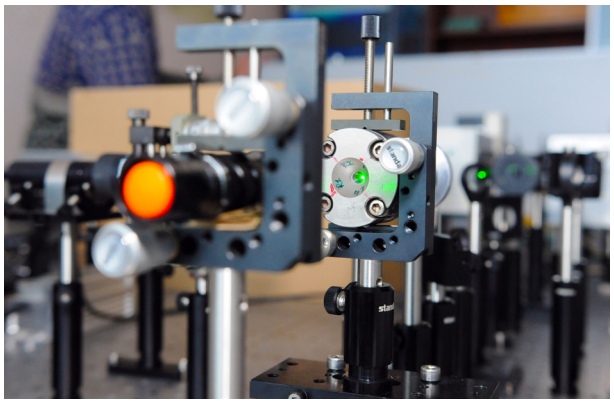
   Иллюстрации должны быть включены в текст, а также представлены отдельными графическими файлами.
7. Термины, определения и единицы физических величин должны соответствовать действующим ГОСТ.
8. В формулах латинские буквы следует набирать курсивом, а цифры, греческие строчные и прописные символы прямо. Векторы и матрицы следует набирать прямыми жирным шрифтом; «exp(·)» в значении экспоненты набирать прямым светлым шрифтом. В индексах сокращения от русских и английских слов следует набирать прямым шрифтом.
9. Формулы нумеруются в круглых скобках (например, (2)), литературные ссылки в прямых — [2], подстрочные замечания оформляются сноской.
10. На последней странице рукописи должны быть подписи всех авторов.
11. Редакция не ставит в известность авторов об изменениях и сокращениях рукописи, имеющих редакционный характер и не затрагивающих принципиальных вопросов.
12. Рукописи, в которых не соблюдены данные требования, возвращаются авторам ез рассмотрения.
13. Редакция оставляет за собой право использовать наиболее интересные статьи в периодических тематических сборниках библиотек журнала. Предоставление редакции рукописи является подтверждением согласия автора на указанное выше использование его произведения.
14. Авторы статей несут ответственность за полноту и достоверность цитируемой в них литературы, а также за публикацию заимствованного материала без ссылки на источник.
15. За достоверность сведений, изложенных в публикациях, редакция и издатель ответственности не несут.
16. За публикацию материалов, содержащих закрытые сведения, авторы несут персональную ответственность на основании действующих законодательных актов.
17. Итоговое решение об одобрении или отклонении представленного в редакцию материала принимается редакционной коллегией и является окончательным.

E-mail: red@jfop.ru, http://www.jfop.ru

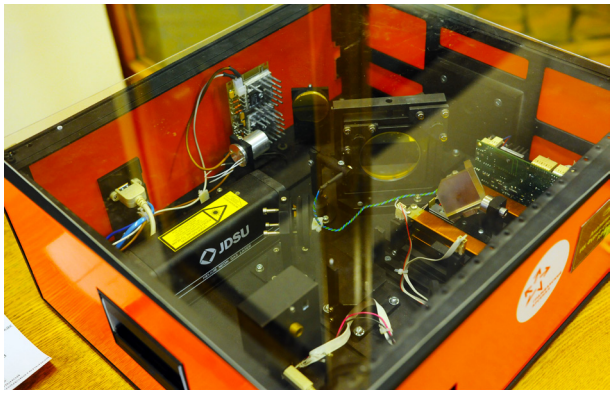
НАУЧНО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ ЦЕНТР
УНИКАЛЬНОГО ПРИБОРОСТРОЕНИЯ РАН

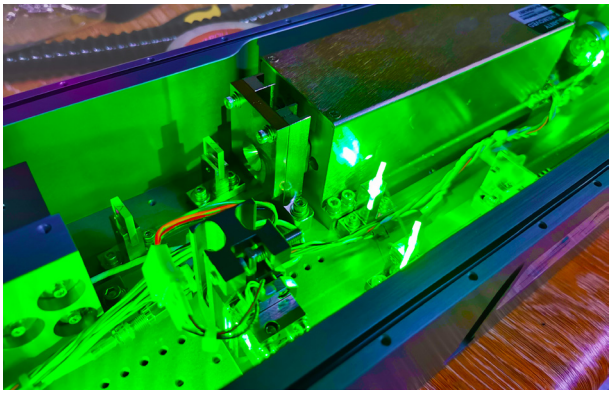

BRESSER

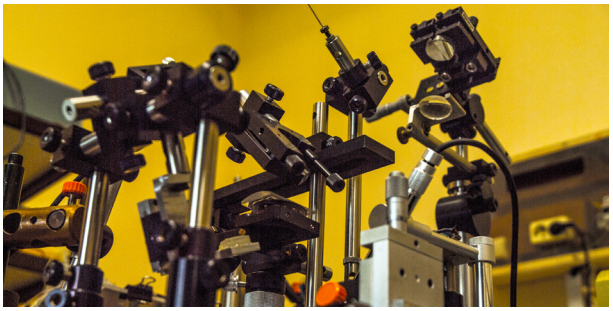




НТЦ УП РАН


JDSU





НТЦ УП РАН

В 2022 году Научно-технологический центр уникального приборостроения Российской академии наук отметил своё 65-летие.

Научно-технологический центр уникального приборостроения Российской академии наук (НТЦ УП РАН) является правопреемником Центрального конструкторского бюро уникального приборостроения Российской академии наук (ЦКБ УП РАН). ЦКБ УП РАН, созданное в 1957 г., являлось первенцем научного приборостроения АН СССР и второй за всю историю Российской академии наук общеакадемической организацией научного приборостроения после Инструментальной палаты Петербургской академии наук, основанной в 1726 г. и существовавшей до 1849 г.

За годы своей деятельности НТЦ УП РАН на базе проведенных фундаментальных и прикладных исследований в области информационных технологий, научного приборостроения и оптики разработал около 200 типов научных приборов и информационных систем (в том числе высшей категории сложности) выпустил и внедрил в исследовательскую практику более 3000 приборов, ряд которых имеет мировой приоритет.

НТЦ УП РАН располагает высококвалифицированными научными кадрами, докторами и кандидатами физико-математических и технических наук, работы которых в области информационных технологий, оптики и научного приборостроения имеют приоритетный характер.

Проводит обучение в аспирантуре по направлению подготовки кадров высшей квалификации 03.06.01 – Физика и астрономия. Действует диссертационный совет Д 002.135.01 по защите докторских и кандидатских диссертаций по специальности 01.04.01 — «приборы и методы экспериментальной физики» (физико-математические и технические науки).

Осуществляет фундаментальные, поисковые и прикладные исследования в области разработки приборов и систем измерения, анализа, управления и мониторинга, основанных на оптических и иных физических принципах по следующим приоритетным направлениям:

- разработка научных приборов и систем;
- оптические, акустические и акустооптические технологии;
- оптическая спектрометрия УФ, видимого, ИК и терагерцевого диапазонов;
- лазеры и лазерные системы для научных исследований и технологий;
- разработка систем распознавания образов;
- медицинские и физиотерапевтические технологии и устройства.

Издаёт Международный научный журнал «Физические основы приборостроения» (Physical Bases of Instrumentation) ISSN 2225-4293, включенный в перечень рецензируемых научных изданий.

Организует ежегодные Международные конференции «Акустооптические и радиолокационные методы измерений и обработки информации» (ARMIMP), «Современные технологии научного приборостроения и информационно-измерительных систем» (MTSIIMS).

Проводит ежегодную Выставку-семинар «Современные приборы для физических исследований». Основной тематикой является разработка приборов и технических систем для оптики, спектроскопии, радиотехники, передачи, хранения и обработки сигналов. Обсуждаются современные достижения в приборостроении и разработке технических систем. В рамках Выставки-семинара проводится пленарное заседание и круглый стол.

Опытный участок, который выполняет токарную и фрезерную обработку лёгких сплавов, поле обработки ЧПУ — 800×400×500 мм. Габариты изделий для токарной обработки — 250 мм, для фрезерной — 400×200 мм. Класс точности h_6-h_9. Имеется оборудование для резки заготовок, листовой гибки, полировки и покраски изделий.

Оптический участок изготавливает оптику широкого назначения: плоскопараллельные пластины (окна), фазовые пластинки, цилиндрические линзы, выпуклые, вогнутые линзы, мениски, зеркала, различные призмы. Обрабатываемые материалы: ZnSe, ZnS, CaF_2, BaF_2, MgF_2, плавленый кварц (КУ1, КВ, КИ), все марки отечественного оптического бесцветного и цветного стекла, все марки стекла производства компаний Schott и OHARA). Нестандартные оптические изделия сложной формы. Размеры оптических деталей от 4 до 500 мм, класс чистоты P (0-10; - V).

ISSN 2225-4293