

УДК 520.35; 681.7; 535.33/34

© В. Э. Пожар, А. А. Балашов, М. Ф. Булатов

СОВРЕМЕННЫЕ СПЕКТРАЛЬНЫЕ ОПТИЧЕСКИЕ ПРИБОРЫ НТЦ УП РАН

Представлен обзор современных спектральных оптических средств получения информации, созданных и разрабатываемых в Научно-технологическом центре уникального приборостроения РАН: спектрометров, гиперспектрометров, стереоспектрометров и других спектральных устройств на основе акустооптических перестраиваемых фильтров, фурье-спектрометров, а также других оптических приборов и элементов, используемых для спектральных исследований. Приведена классификация приборов по основным свойствам и характеристикам, принципу работы, назначению и области применения.

Кл. сл.: спектральные приборы, фурье-спектроскопия, акустооптика

ВВЕДЕНИЕ

Оптическая спектроскопия и связанные с ней методы анализа широко используются в фундаментальных научных и прикладных исследованиях. Они дают возможность определять состав образцов, их структуру, состояние. Эти методы позволяют осуществлять неразрушающий контроль объектов, проводить измерения бесконтактно и удаленно. Многие из этих методов могут быть реализованы с помощью приборов, разработанных в Научно-технологическом центре уникального приборостроения Российской академии наук (НТЦ УП РАН). В статье представлен краткий обзор этих приборов: фурье-спектрометров на основе интерферометров, спектральных устройств на ос-

нове акустооптических перестраиваемых фильтров (спектрометров, гиперспектрометров, стереоспектрометров, эндовидеоспектрометров), а также других средств оптических спектральных исследований. Сделана попытка их классификации по основным свойствам и характеристикам.

Все оптические приборы, разработанные в НТЦ УП РАН, можно разделить на группы по следующим признакам.

1. По спектральному диапазону. Приборы охватывают широкую область оптического спектра: от ультрафиолетового (УФ) до далекого инфракрасного (ИК) диапазона (рис. 1). Имеется даже отдельная группа спектральных устройств на основе поверхностных плазмон-поляритонов, работающих в терагерцевом диапазоне [1].

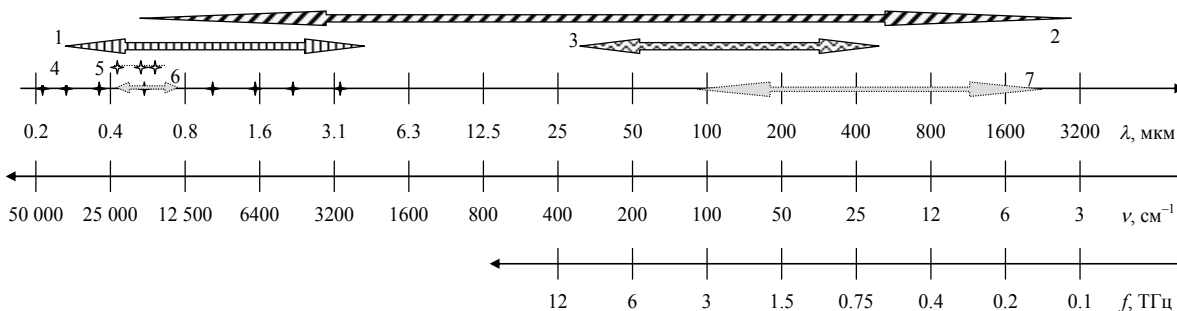


Рис. 1. Рабочий спектральный диапазон созданных и разрабатываемых в НТЦ УП РАН спектрометров и источников света по шкалам длин волн (λ), оптических пространственных частот ($\nu = 1/\lambda$) и частот колебаний ($f = \omega / (2\pi)$).

1 — акустооптические спектрометры; 2 — фурье-спектрометры; 3 — спектрометры для поверхностных плазмон-поляритонов; 4 — твердотельные лазеры; 5 — RGB-лазер; 6 — проектируемый перестраиваемый источник видимого излучения; 7 — проектируемый перестраиваемый источник терагерцевого излучения

2. По способу определения спектральных характеристик: интерферометрические устройства, использующие для анализа преобразование Фурье, узкополосные программно-перестраиваемые фильтры и устройства углового разложения спектра (рис. 2).

3. По используемым спектральным методам: эмиссионной, абсорбционной (трансмиссионной), люминесцентной (флуоресцентной), модуляционной, дифференциальной, корреляционной, лазерной, многоволновой (фрагментарной) спектроскопии; спектроскопии комбинационного рассеяния (КР); по геометрии измерений (на проход, на отражение), а также по иным используемым приемам: мультипликативной схеме, методике измерений (рис. 2).

4. По носителю сигналов. Кроме световых волн в некоторых устройствах для анализа образцов используются поверхностные плазмон-поляритонные (ППП) волны [1], а ультразвуковые волны используют для передачи управляющих сигналов — для создания динамических брэгговских решеток, на которых производится преобразование и обработка световых волн.

5. По уровню решаемых задач. Все разрабаты-

ваемые средства можно разделить на три класса: 1) оптические элементы и устройства, выполняющие отдельные операции с оптическим излучением; 2) приборы, решающие целый класс задач, определяемых их назначением; 3) системы, спроектированные для решения специализированных задач спектрально-оптическими методами.

6. По назначению. Выделяются измерительные приборы, исследовательские установки и вспомогательное оборудование.

7. По условиям эксплуатации. Представлены как лабораторные приборы, так и мобильные приборы для исследований в полевых или заводских условиях.

8. По области применения. Приборы предназначены для научных исследований, для технологического контроля, медико-биологических исследований, мониторинга окружающей среды, изучения материалов в естественных и экстремальных условиях (см. таблицу).

Далее представлены основные типы приборов и систем: фурье-спектрометры, акустооптические спектрометры (АО), другие устройства, включая ППП-спектрометры, лазеры и вспомогательное оборудование.

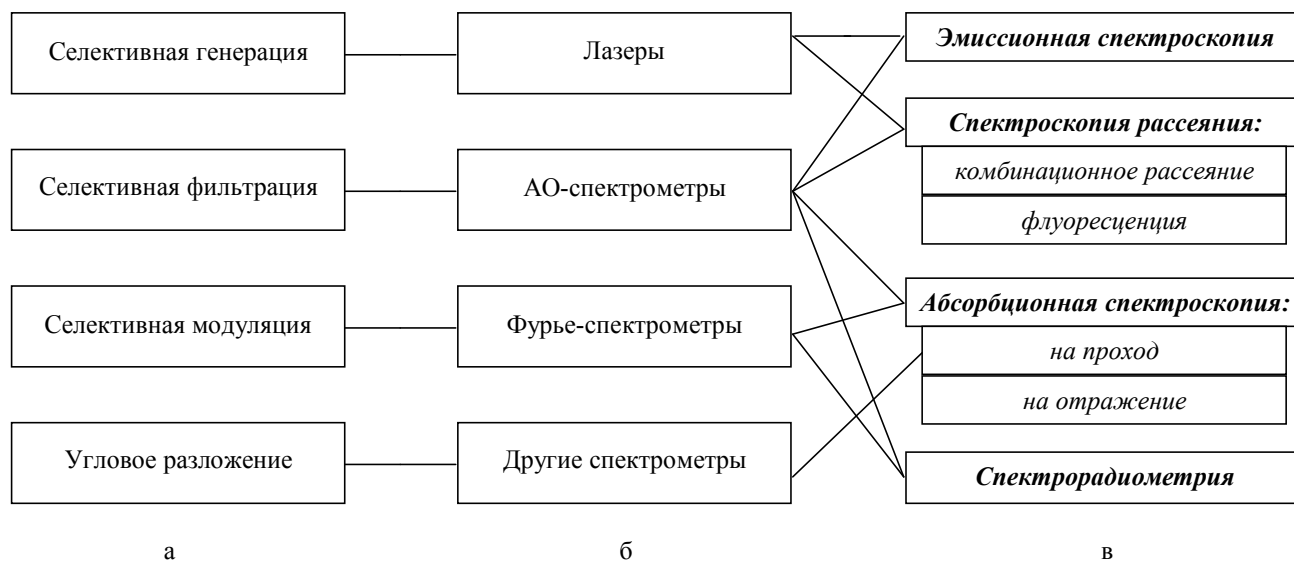


Рис. 2. Используемые в приборах принципы работы (а), основные типы приборов для спектральных исследований (б) и используемые методы спектроскопии (в)

Основные области применения спектральных приборов

Область применения	Фурье-спектрометры	АО-спектрометры	Другие спектрометры	Лазеры
Научные исследования	+	+	+	+
Материаловедение	+	+	+	+
Промышленные технологии	+	+	–	+
Медицина и биохимия	–	+	–	+
Мониторинг	+	+	–	+

ФУРЬЕ-СПЕКТРОМЕТРЫ И СИСТЕМЫ

Эта группа приборов (рис. 3) использует селективную модуляцию спектральных составляющих светового потока с помощью интерферометров разного типа. Спектр излучения вычисляют по зарегистрированным интерферограммам путем преобразования Фурье по оптической частоте. Эти приборы работают в ИК и ТГц диапазонах (1–100 мкм) и имеют различные специализированные модификации (лабораторные, внелабораторные, высокоточные, высокоразрешающие, высокоскоростные).

1. Лабораторные ИК фурье-спектрометры (АФ-1, АФ-3)

Приборы разработаны для исследований в ближнем ($3500\text{--}10\,000\text{ см}^{-1}$) и среднем ИК-диапазоне ($400\text{--}5000\text{ см}^{-1}$) со спектральным разрешением $0.1\text{--}8\text{ см}^{-1}$ [2] (рис. 4, а).

2. Портативный фурье-спектрометр (ПАК-Б)

Прибор предназначен для использования в лабораторных и полевых условиях для измерений спектров жидких и твердых образцов в среднем ИК-диапазоне с разрешением 2 см^{-1} [3] (рис. 4, б).

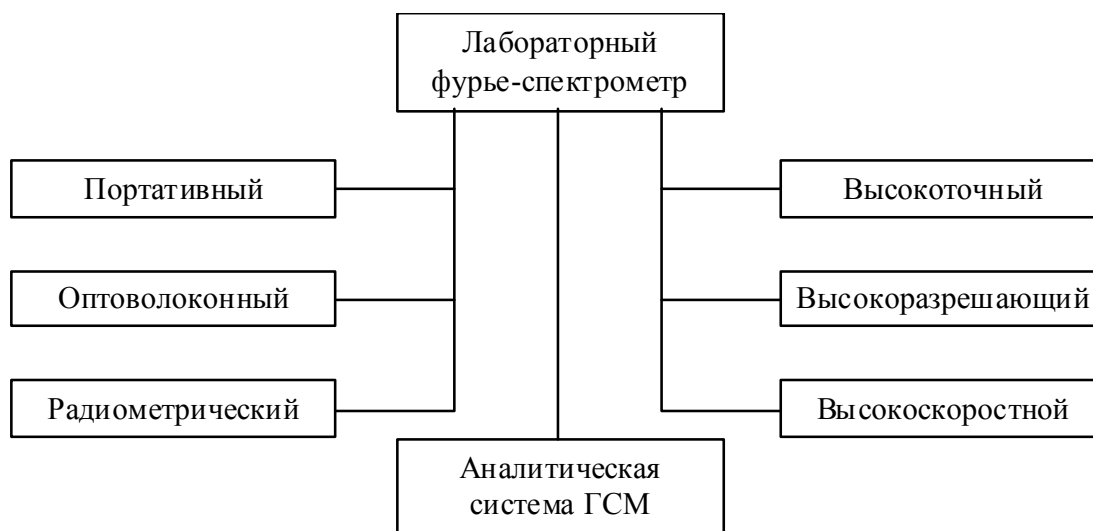


Рис. 3. Семейство разработанных в НТЦ УП РАН фурье-спектрометров. Базовый прибор (вверху), приборы для внелабораторных задач (слева), приборы с высшими характеристиками (справа) и мобильная прецизионная измерительная система (внизу)

3. Фурье-спектрометр с оптоволоконным зондом (ФСВ)

Прибор создан для экспресс-идентификации жидких органических соединений и контроля их состава в среднем ИК-диапазоне с разрешением 2 см^{-1} [4]. Позволяет проводить контроль в труднодоступных или опасных местах, в частности в технологических линиях (рис. 4, в).

4. Фурье-спектрорадиометр (ФСР-03)

Прибор предназначен для мониторинга атмосферы в инфракрасном диапазоне излучения и обнаружения загрязняющих веществ в атмосфере, в частности для обнаружения паров химически опасных и отравляющих веществ в воздухе, их идентификации и количественной оценки их содержания [5]. Трассовый спектрорадиометр способен работать как в активном режиме (с собственным источником излучения), так и в пассивном (по собственному тепловому излучению атмосферы). Он работает в среднем ИК-диапазоне ($800\text{--}4000\text{ см}^{-1}$) с программно-регулируемым спектральным разрешением $0.3\text{--}8\text{ см}^{-1}$ (рис. 4, г).

5. Двухканальный фурье-спектрометр (ФС-02)

Прибор среднего ИК-диапазона разработан для решения широкого круга научных задач, связанных с исследованиями слабых сигналов в условиях низкого контраста, таких как задачи химической аналитики малых составляющих, задачи биофизики клетки [6]. В основу конструкции положена схема двулучевого интерферометра с высокоточным узлом сканирования на воздушной подушке.

6. Фурье-спектрометры высокого разрешения (ФС-01, УФС-02)

Лабораторный прибор ФС-01 предназначен для спектральных исследований твердых, жидких и газообразных образцов в широкой области спектра ($100\text{--}5000\text{ см}^{-1}$) с разрешением 0.1 см^{-1} в режимах на пропускание и на отражение, а также

по собственному их излучению [6]. Сверхвысоко-разрешающая (0.005 см^{-1}) спектрометрическая система (УФС-02) была разработана для решения задач, связанных с исследованием спектров атомов, ионов и молекул как в газовой, так и в конденсированной фазе при низких температурах в широком спектральном диапазоне $100\text{--}10\,000\text{ см}^{-1}$.

7. Высокоскоростной фурье-спектрометр (БФС-01)

Прибор [6] был создан для измерения спектральной яркости поляризованного электромагнитного излучения высокотемпературной электронной плазмы с высоким временным разрешением в миллиметровом и субмиллиметровом диапазонах спектра ($2\text{--}100\text{ см}^{-1}$). Время записи одной интерферограммы составляет 5 мс (с разрешением 0.1 см^{-1}).

8. Специализированная система контроля качества горючего на основе фурье-спектрометров

Автоматизированная система идентификации и контроля качества горючего (АСИ ККГ-01) была создана на базе лабораторного фурье-спектрометра АФ-1 для оперативного определения марки анализируемого горючего и соответствия его качества требованиям стандартов и технических условий [7]. Система сертифицирована как средство измерения горюче-смазочных материалов.

9. Динамический плазмонный спектрометр ИК и ТГц диапазонов для исследования проводящей поверхности и ее переходного слоя [8, 9]

Спектрометр содержит перестраиваемый по частоте источник излучения (например, лазер на свободных электронах или квантово-каскадный лазер) и подвижный элемент преобразования поверхностной волны в объемную; позволяет исследовать слои субволновой толщины (до $\lambda/1000$).



Рис. 4. Выпускаемые фурье-спектрометры: АФ-3 (а), ПАК-Б (б), ФСВ (в), ФСР-03 (г)

10. Статический плазмон-поляритонный фурье-спектрометр ИК-диапазона

Позволяет определять спектр комплексной диэлектрической проницаемости тонкослойных объектов. Предназначен для исследования быстропротекающих процессов на проводящей поверхности [10, 11].

СПЕКТРАЛЬНЫЕ УСТРОЙСТВА, ПРИБОРЫ И СИСТЕМЫ НА АКУСТООПТИЧЕСКИХ ФИЛЬТРАХ

Этот класс приборов (рис. 5) использует перестраиваемые ультразвуком оптические фильтры (акустооптические фильтры). Эти фильтры осуществляют спектральную фильтрацию световых пучков без существенных искажений переносимых ими изображений, что обеспечивает возможность их использования для видеоспектрометрии. Кроме того, они могут быть использованы во внелабораторных условиях.

Основу приборов этого класса составляют спектрометры и приборы получения спектральных изображений (рис. 5). Их развитием являются гиперспектрометры, стереоспектрометры, оптические когерентные томографы с регистрацией спектра, приборы для спектральной цифровой голографии, дифференциальные спектрометры, спектрометры с временным разрешением [12].

Спектрометры (spectrometers)

Семейство приборов, регистрирующих спектр входящего излучения $S(\lambda)$. Реализуют методы аб-

сорбционной и эмиссионной спектроскопии, спектрометриии, спектроскопии с лазерным освещением (фотолюминесценция, КР). Мобильная конструкция допускает их использование в различной обстановке. Рабочий диапазон охватывает одну октаву по частоте в пределах от 0.25 мкм до 4 мкм; спектральное разрешение — от 6 см⁻¹ до 60 см⁻¹. После предварительной калибровки спектрометры позволяют измерять абсолютные значения спектральной плотности энергетической яркости. Допускают ввод излучения через объектив или оптическое волокно.

Приборы получения спектральных изображений (spectral imaging devices)

Устройства получения спектральных изображений представляют собой насадки на микроскоп и на эндоскоп [13], что существенно расширяет возможности этих стандартных устройств. Получение спектрального изображения $I(x, y; \lambda)$ на длине волны λ , которая соответствует линии поглощения излучения или рассеяния определенного вещества, позволяет визуализировать распределение этого вещества в анализируемом образце (рис. 6, в).

Гиперспектрометры (hyperspectral imagers)

Приборы, обеспечивающие получение гиперспектральной информации $I(\lambda, x, y)$, т. е. данных о спектральных и пространственных свойствах объекта, должны обеспечивать определение спектра в каждой точке объекта. Это может использоваться для бесконтактного определения

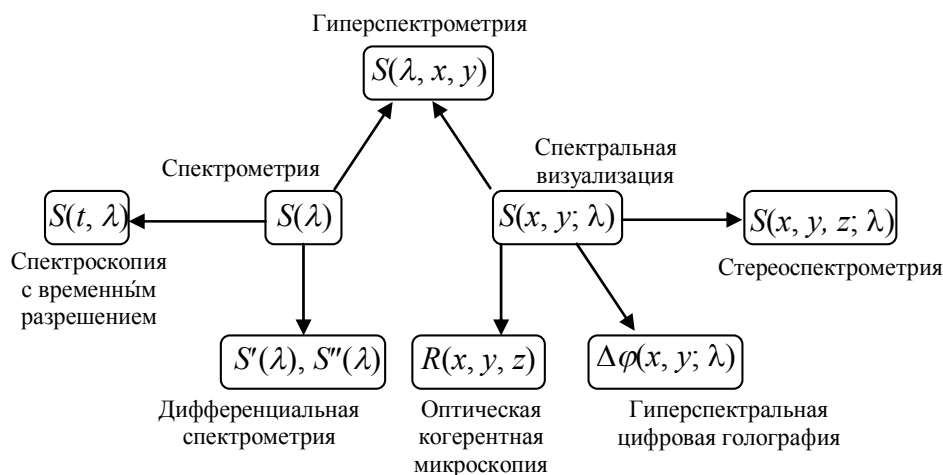


Рис. 5. Семейство спектральных приборов на АО-фильтрах. Стрелками показаны связи, отображающие развитие направлений

распределения температуры неоднородно нагретых тел [14]. Для этого приборы должны регистрировать изображения, свободные от хроматических аберраций, или быть калиброванными соответствующим образом [15, 16]. Используемые двойные АО-монокроматоры обеспечивают первое качество [17]. Такие приборы, установленные на беспилотный летательный аппарат, способны обеспечить реализацию автономного режима анализа объектов с использованием методов спектральной визуализации (рис. 6, а).

Приборы получения спектральных стереоизображений (spectral stereo-imaging devices)

Разработанный макет системы позволяет зарегистрировать пары спектральных изображений объекта с двух разных ракурсов $I_{1,2}(x, y; \lambda)$ на разных длинах волн, что позволяет одновременно определять спектральные и пространственные объемные свойства объекта [18]. Это дает возможность применить известные методы спектральной визуализации для объемных объектов (рис. 6, г).

Прибор определения объемной структуры слабоотражающих объектов (SD OCT)

Созданный макет прибора позволяет измерить спектр отраженного от неоднородной прозрачной среды светового потока $I(x, y; \lambda)$ и методами спектральной оптической когерентной томографии (spectral-domain optical coherence tomography) определить распределение локального коэффициента

отражения по объему среды $R(x, y, z)$. Это позволяет выявить структуру полупрозрачных слабоотражающих объектов, таких как биологические ткани, слоистые объекты естественного или технического происхождения. Прибор может быть также эффективно использован в профилометрии [19] для определения локальной формы поверхности непрозрачного отражающего объекта (рис. 6, б, д).

Система определения оптической толщины прозрачных объектов (digital holography)

Созданный макет системы позволяет методами спектральной цифровой голографии определить распределение набег фазы $\Delta\varphi$ по сечению светового пучка, прошедшего через прозрачный ("фазовый") объект. По интерференционной картине $I(x, y; \lambda)$, образованной этим пучком и однородным опорным пучком, на разных длинах волн можно вычислить фазовый портрет объекта $\Delta\varphi(x, y; \lambda)$, который для гомогенного объекта определяется его показателем преломления $n(\lambda)$ и толщиной $d(x, y)$ объекта, а для неоднородного по сечению — $\Delta\varphi = (2\pi/\lambda) \cdot n \cdot d$.

Дифференциальные спектрометры (differential spectrometers)

Обеспечивают регистрацию на произвольных длинах волн λ_k дифференциальных свойств спектра, в частности производных $dS(\lambda)/d\lambda$, $d^2S(\lambda)/d\lambda^2$. Это позволяет "мгновенно" (без сканирования спектра) определить наличие веществ, поглощающих на этих длинах волн, исключив вклад неселективно поглощающих компонентов смеси.

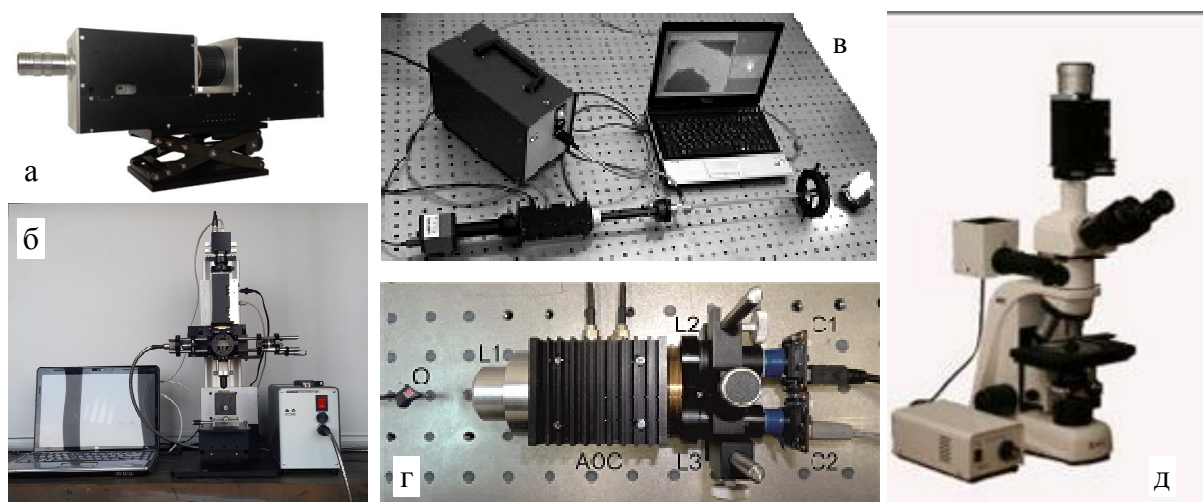


Рис. 6. АО-спектральные системы.

а — гиперспектрометр; б — система для профилометрии и оптической когерентной томографии (ОКТ); в — эндоскопический видеоспектрометр; г — стереоспектрометр; д — многофункциональная установка для ОКТ, микроскопии и спектральных измерений

Средства регистрации динамики спектральных характеристик (time-resolved system)

Лабораторная система регистрации позволяет исследовать изменение свечения объекта на выбранной длине волны $S(t; \lambda_k)$, например флуоресцентный отклик на лазерный импульс. Для объектов со временем изменения более 10 мкс с помощью АО-спектрометров возможен мониторинг на нескольких длинах волн, что позволяет контролировать технологические процессы или биодинамику прохождения лекарственных препаратов. Для медленных (например, суточных) процессов такой мониторинг можно вести трассовым абсорбционным спектрометром УФ-диапазона (газоанализатором ГАОС) методами фрагментарной спектральной регистрации [20].

Другие применения АО-приборов

Гиперспектральный АО-прибор используется в установке для исследования материалов при высоких давлениях и температурах [14]. В этой установке с помощью пары алмазных наковален создается давление, достигающее значений, характерных для ядра Земли, и осуществляется нагрев образца с помощью лазерного излучения. Регистрация серии изображений сжатого и нагретого образца на разных длинах волн с помощью АО-фильтра позволила впервые получать информацию о пространственном распределении температуры образца, что важно для исследований веществ в экстремальных условиях.

На основе АО-спектрометров также разработана система контроля содержания загрязняющих веществ в воздухе (газоанализатор) и система анализа примесных веществ в морской воде (подводный спектрометр комбинационного рассеяния и флуоресценции и надводный судовой спектрометр восходящего солнечного излучения).

ВСПОМОГАТЕЛЬНЫЕ УСТРОЙСТВА И ПРИБОРЫ ДЛЯ СПЕКТРОСКОПИИ

В число других вспомогательных средств входят лазерные и узкополосные перестраиваемые источники света на основе АО-монохроматоров, калиброванные по толщине (длине пути излучения) кюветы, отражатели, оптоволоконные зонды.

Лазеры включают импульсные и непрерывные твердотельные одномодовые лазеры ИК и видимого диапазонов на разные длины волн: 1.06 мкм, 532 нм, 355 нм, 266 нм, 212 нм, 1.57 мкм, 2.12 мкм. Также разработан RGB-лазер, содержащий 3 смешиваемые в разных пропорциях спек-

тральные компоненты: 632 нм, 532 нм и 451 нм. Ведется разработка перестраиваемого источника терагерцевого излучения на принципе генерации разностной частоты параметрических генераторов света ИК-диапазона. Разрабатывается перестраиваемый источник света видимого диапазона на основе АО-фильтра.

Стереоэндоскоп, содержащий видеокамеру и треугольную призму на дистальном конце, позволяет зарегистрировать пару разноракурсных изображений в труднодоступных полостях и построить их стереоизображения в белом свете.

Разработан ряд способов и устройств для управления ИК-поверхностными плазмон-поляритонами: элементы преобразования объемного излучения в ППП и обратно, передачи ППП-волн через воздушные зазоры, измерители характеристик ППП-волн, делители и дефлекторы ППП, болометры, рефрактометры и контроллеры качества металлических зеркал и др.

В качестве вспомогательного оборудования были разработаны и созданы кюветы, газовые (однопроходные и многоходовые) и жидкостные, использующиеся для измерения проб, а также приставки зеркального и диффузного отражения, предназначенные для ИК-фурье-спектрометров.

Таким образом, разнообразные спектральные оптические приборы и методы, разработанные в НТЦ УП РАН, позволяют решать множество исследовательских, измерительных, аналитических и контрольных задач разнообразных типов и областей науки и техники.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Совокупность спектральных устройств, приборов и систем, разработанных в НТЦ УП РАН, достаточна для проведения спектральных исследований объектов разного типа с помощью классических методов спектроскопии. Кроме того, они позволяют реализовать новые эффективные методы спектрального анализа.

При подготовке статьи использовались результаты грантов РФФИ 16-29-11802 и 16-08-01278.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Поверхностные поляритоны. Электромагнитные волны на поверхностях и границах раздела сред / Под ред. В.М. Аграновича и Д.Л. Миллса. М.: Наука, 1985. 525 с.
2. Балашов А.А., Вагин В.А., Висковатых А.В., Жижин Г.Н., Пустовойт В.И., Хорохорин А.И. Аналитический фурье-спектрометр АФ-1 широкого применения // Приборы и техника эксперимента. 2003. № 2.

- С. 87–89.
3. 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 // Приборы и техника эксперимента. 2008. № 1. С. 179–179.
 4. Балашов А.А., Вагин В.А., Хорохорин А.И. Инфракрасный фурье-спектрометр ФСВ // Приборы и техника эксперимента. 2016. № 1. С. 158–158.
 5. Балашов А.А., Вагин В.А., Хорохорин А.И., Крадецкий В.В., Морозов А.Н., Фуфурин И.Л., Шилов М.А. Фурье-спектрорадиометр ФСР-03 // Приборы и техника эксперимента. 2013. № 3. С. 142–143.
 6. Балашов А.А., Вагин В.А. Разработка фурье-спектрометров в ЦКБ уникального приборостроения АН СССР // Компьютерная оптика. 1989. № 4. С. 89–103.
 7. Алаторцев Е.И., Балашов А.А., Вагин В.А., Висковатых А.В., Калинин Л.Л., Хорохорин А.И., Чечкеев И.В. Автоматизированная система идентификации и контроля качества горючего на основе фурье-спектрометра АФ-1 // Оптический журнал. 1999. № 10. С. 113–114.
 8. Патент РФ № 2318192, 27.02.2008 г.
 9. Патент РФ № 2573617, 20.01.2016 г.
 10. Жижин Г.Н., Кирьянов А.П., Никитин А.К., Хитров О.В. Дисперсионная фурье-спектроскопия поверхностных плазмонов инфракрасного диапазона // Оптика и спектроскопия. 2012. Т. 112, № 4. С. 597–602.
 11. Патент РФ № 2477842, 20.03.2013 г.
 12. Пожар В.Э., Пустовойт В.И. Акустооптические спектральные технологии // Известия РАН. Серия физическая. 2015. Т. 79, № 10. С. 1375–1380.
 13. Мачихин А.С., Пожар В.Э., Батиев В.И. Акустооптический эндоскопический видеоспектрометр // Приборы и техника эксперимента. 2013. № 4. С. 117–121.
 14. Мачихин А.С., Батиев В.И., Зинин П.В. и др. Акустооптический видеоспектрометр для измерения пространственного распределения температуры микрообъектов // Приборы и техника эксперимента. 2017, № 3. С. 100–105.
 15. Мачихин А.С., Пожар В.Э. Метод коррекции спектральных искажений для спектрометра изображений // Приборы и техника эксперимента. 2009. № 6. С. 92–98.
 16. Мачихин А.С., Шурыгин А.В., Пожар В.Э. Пространственно-спектральная калибровка эндоскопического акустооптического видеоспектрометра // Приборы и техника эксперимента. 2016. № 5. С. 70–76.
 17. Мачихин А.С., Пожар В.Э. Пространственно-спектральные искажения изображения при дифракции обыкновенно поляризованного светового пучка на ультразвуковой волне // Квантовая электроника. 2015. Т. 45, № 2. С. 161–165.
 18. Висковатых А.В., Мачихин А.С., Пожар В.Э., Пустовойт В.И. Многофункциональный бесконтактный профилометр на основе перестраиваемого акустооптического фильтра изображений // Приборы и техника эксперимента. 2015. № 1. С. 117–121.
 19. Мачихин А.С., Батиев В.И., Пожар В.Э., Мазур М.М. Акустооптический стереоскопический спектрометр полного поля для восстановления объемной структуры объектов в произвольных спектральных интервалах // Компьютерная оптика. 2016. № 6. С. 871–877.
 20. Мазур М.М., Шорин В.Н., Пустовойт В.И., Пожар В.Э., Фадеев А.В. Газоаналитический акустооптический спектрометр // Приборы и техника эксперимента. 2011. Т. 54, № 2. С. 140–146.

Научно-технологический центр уникального приборостроения РАН, Москва

Контакты: Пожар Витольд Эдуардович
vitold@ntcup.ru

Материал поступил в редакцию 28.06.2018

MODERN SPECTRAL OPTICAL INSTRUMENTS DEVELOPED IN SCIENTIFIC TECHNOLOGICAL CENTER OF UNIQUE INSTRUMENTATION OF RUSSIAN ACADEMY OF SCIENCES

V.E. Pozhar, A.A. Balashov, M.F. Bulatov

*Scientific Technological Center of Unique Instrumentation of Russian Academy of Sciences
(STC UI RAS), Moscow, Russia*

Review of modern spectral instruments, which are developed in STC UI RAS, is presented. They comprise Fourier-spectrometers and spectrometers based on acousto-optical tunable filters (AOTF): hyperspectrometers, stereo-spectrometers, endoscopic imaging spectrometers, as well as some other devices applicable to spectral optical investigations like lasers. All the instruments are classified in accordance with basic features and characteristics. They includes optical passive and active elements, devices and specialized systems, which totally cover spectral range from 0.25 μm to 3.2 mm and operates with optical and microwave radiation as well as with terahertz plasmon-polaritons. They implement various spectroscopic techniques: emission, absorption, fluorescent, Raman, differential, multi-wavelengths, correlation and modulation spectroscopy. These devices can be exploited in out-of-lab environment and are promising for industrial control, biomedical researches, monitoring of environments, material analyses, including high pressure and high temperature investigations.

Keywords: spectral instruments, Fourier-spectroscopy, acousto-optics

REFERENCES

1. Agranovich V.M., Mills D.L. (eds). *Poverhnostnye polyaritony. Elektromagnitnye volny na poverhnostyakh i granichah razdela sred* [Superficial polaritons. Electromagnetic waves on surfaces and limits of the section of environments]. Moscow, "Nauka" Publ., 1985. 525 p. (In Russ.).
2. Balashov A.A., Vagin V.A., Viskovatyy A.V., Zhizhin G.N., Pustovoyt V.I., Horohorin A.I. [Analytical Fourier-spectrometer of AF-1 of broad application]. *Priory i tekhnika eksperimenta* [Devices and technique of an experiment], 2003, no. 2, pp. 87–89. (In Russ.).
3. Balashov A.A., Vagin V.A., Kotlov V.I., Moshkin B.E., Hitrov O.V., Horohorin A.I. [Portable infrared Fourier-spectrometer PACK-B]. *Priory i tekhnika eksperimenta* [Devices and technique of an experiment], 2008, no. 1, pp. 179–179. (In Russ.).
4. Balashov A.A., Vagin V.A., Horohorin A.I. [Infrared Fourier-spectrometer of FSV]. *Priory i tekhnika eksperimenta* [Devices and technique of an experiment], 2016, no. 1, pp. 158–158. Doi: 10.7868/S0032816216010304. (In Russ.).
5. Balashov A.A., Vagin V.A., Horohorin A.I., Kradeckij V.V., Morozov A.N., Fufurin I.L., Shilov M.A. [Fourier-spektroradiometr FSR-03]. *Priory i tekhnika eksperimenta* [Devices and technique of an experiment], 2013, no. 3, pp. 142–143. Doi: 10.7868/S0032816213020171. (In Russ.).
6. Balashov A.A., Vagin V.A. [Development of Fourier-spektroradiometr in CDB of unique instrument making of Academy of Sciences of the USSR]. *Komp'yuternaya optika* [Computer optics], 1989, no.4, pp. 89–103. (In Russ.).
7. Alatorcev E.I., Balashov A.A., Vagin V.A., Viskovatyy A.V., Kalinin L.L., Horohorin A.I., Chechkenov I.V. [The automated system of identification and quality control of fuel on the basis of AF-1 Fourier-spectrometer]. *Opticheskij zhurnal* [Journal of Optical Technology], 1999, no. 10, pp. 113–114. (In Russ.).
8. Patent RF no. 2318192. Prioritet 27.02.2008. (In Russ.).
9. Patent RF no. 2573617. Prioritet 20.01.2016. (In Russ.).
10. Zhizhin G.N., Kir'yanov A.P., Nikitin A.K., Hitrov O.V. [Dispersive Fourier-spectroscopy of superficial plasmons of infrared range]. *Optika i spektroskopiya* [Optics and Spectroscopy], 2012, vol. 112, no. 4, pp. 597–602. (In Russ.).
11. Patent RF no. 2477842. Prioritet 20.03.2013. (In Russ.).
12. Pozhar V.E., Pustovoyt V.I. [Optical-acoustic spectral technologies]. *Izvestiya RAN. Seriya fizicheskaya* [Bulletin of the Russian Academy of Sciences. Physics], 2015, vol. 79, no. 10, pp. 1375–1380. (In Russ.).
13. Machikhin A.S., Pozhar V.E., Batshev V.I. [Optical-acoustic endoscopic video spectrometer]. *Priory i tekhnika eksperimenta* [Devices and technique of an experiment], 2013, no. 4, pp. 117–121. Doi: 10.7868/S0032816213030233. (In Russ.).
14. Machikhin A.S., Batshev V.I., Zinin P.V. et al. [Optical-acoustic video spectrometer for measurement of spatial

- distribution of temperature of microobjects]. *Pribory i tekhnika eksperimenta* [Devices and technique of an experiment], 2017, no. 3, pp. 100–105. (In Russ.).
15. Machikhin A.S., Pozhar V.E. [Method of correction of spectral distortions for a spectrometer of images]. *Pribory i tekhnika eksperimenta* [Devices and technique of an experiment], 2009, no. 6, pp. 92–98. (In Russ.).
 16. Machikhin A.S., Shurygin A.V., Pozhar V.E. [Spatial spectral calibration of an endoscopic optical-acoustic video spectrometer]. *Pribory i tekhnika eksperimenta* [Devices and technique of an experiment], 2016, no. 5, pp. 70–76. Doi: 10.7868/S003281621604025X. (In Russ.).
 17. Machikhin A.S., Pozhar V.E. [Spatial and spectral image distortions caused by diffraction of an ordinary polarised light beam by an ultrasonic wave]. *Kvantovaya Elektronika* [Quantum Electronics], 2015, vol. 45, no. 2, pp. 161–165.
Doi: 10.1070/QE2015v045n02ABEH015385. (In Russ.).
 18. Viskovatyh A.V., Machikhin A.S., Pozhar V.E., Pustovoi V.I. [The multipurpose contactless profilometer on the basis of the reconstructed optical-acoustic filter of images]. *Pribory i tekhnika eksperimenta* [Devices and technique of an experiment], 2015, no. 1, pp. 117–121.
Doi:10.7868/S0032816215010139. (In Russ.).
 19. Machikhin A.S., Batshev V.I., Pozhar V.E., Mazur M.M. [Acousto-optical full-field stereoscopic spectrometer for 3D reconstruction in an arbitrary spectral interval]. *Komp'yuternaya optika* [Computer optics], 2016, no. 6, pp. 871–877. Doi:10.18287/2412-6179-2016-40-6-871-877. (In Russ.).
 20. Mazur M.M., Shorin V.N., Pustovoi V.I., Pozhar V.E., Fadeev A.V. [Gas-analytical optical-acoustic spectrometer]. *Pribory i tekhnika eksperimenta* [Devices and technique of an experiment], 2011, vol. 54, no. 2, pp. 140–146. (In Russ.).

Contacts: Pozhar Vitold Eduardovitch,
vitold@ntcup.ru

Article received in edition 28.06.2018