

М.В. Кабанов, А.А. Тихомиров

Научное приборостроение: от разработок для исследований по атмосферной оптике к промышленным образцам для контроля природных и техногенных систем

Институт мониторинга климатических и экологических систем СО РАН, г. Томск

Поступила в редакцию 9.02.2007 г.

Обсуждаются итоги деятельности Института мониторинга климатических и экологических систем СО РАН в области научного приборостроения за 35-летний период на разных этапах его развития от СКБ научного приборостроения «Оптика» до научно-исследовательского академического института. Представлены краткие описания основных разработок в области атмосферной оптики, которые нашли практическое применение и выпускались малыми сериями в период 1972–1992 гг. Основное внимание уделено новым техническим средствам, основанным на эффектах взаимодействия оптических, акустических и радиоволн с объектами окружающей среды. Созданные в последнее десятилетие новые приборы удовлетворяют необходимым требованиям и предназначены для сетевого мониторинга климатических и экологических систем, включая контроль техногенных систем.

Введение

Пятидесятилетний юбилей Сибирского отделения РАН фактически совпадает с 50-летием возникновения одного из тех научных направлений, которое со временем стало основой для ведущей научной школы академика Владимира Евсеевича Зуева и для создания академической науки в Томске [1]. Именно в 1957 г. группой ученых под руководством тогда доцента В.Е. Зуева был подготовлен первый отчет по исследованиям распространения инфракрасных излучений в атмосфере, проведенным по правительственному заданию и давшим старт широким исследованиям по атмосферной оптике в Томске. В этом же году были выполнены первые курсовые работы по данной тематике студентами, о которых впоследствии академик В.Е. Зуев написал [1]: «... в январе 1956 года после принятия экзаменов по первому семестру отобрал понравившихся мне четырех студентов: М. Кабанова, С. Хмелевцова, С. Творогова и М. Эляшберга и на протяжении трех с половиной лет вел с ними научный студенческий кружок еженедельно. Каждый из них делал доклад по теме, которую заранее подбирал, включая литературу. При этом сам тщательно готовился к каждому занятию. К пятому курсу все они были уже подготовлены как специалисты по оптике атмосферы. Трое из них после окончания университета поступили в аспирантуру и в срок защитили кандидатские диссертации, а затем и докторские, а М. Кабанов и С. Творогов были избраны членами-корреспондентами РАН».

Отличительная особенность нового для Сибири научного направления состояла в том, что экспериментальные исследования приходилось проводить

в полевых условиях при различных метеорологических ситуациях во все сезоны года. Отечественные или зарубежные приборы для таких исследований отсутствовали. Более того, даже комплектующие для приборов (детекторы и источники оптического излучения, регистрирующие узлы и т.д.) имелись лишь в опытных образцах. Поэтому основное время для любого натурального физического эксперимента затрачивалось на создание необходимых измерительных приборов.

Вынужденная ориентация с самого начала на самообеспечение полевых экспериментальных исследований предопределила и дальнейшее их развитие. Когда были изобретены первые лазеры, в лаборатории инфракрасных излучений Сибирского физико-технического института при ТГУ, возглавляемой В.Е. Зуевым, была организована специальная группа по изготовлению лазеров, а ученые лаборатории с их помощью провели пионерные исследования по распространению лазерного излучения в атмосфере. Результаты этих фундаментальных исследований, в том числе и ряд впервые обнаруженных атмосферно-оптических эффектов, были опубликованы в ведущих отечественных и зарубежных журналах, широко обсуждены на международных и отечественных научных конференциях, а также на приглашенных лекциях в зарубежных университетах и получили мировое признание. Встал вопрос о дальнейшем использовании этих результатов, о расширении в связи с этим комплексных исследований и о создании на базе лаборатории академического института.

В стартовавшем в 1969 г. под руководством В.Е. Зуева Институте оптики атмосферы (ИОА) проблема разработки сложных оптико-электронных

и лазерных систем поднялась на новый уровень. Возникла необходимость создания таких систем не только для обеспечения научных исследований, но и для опережающего решения многих прикладных задач, связанных с применением лазеров при работе через атмосферу. Высокие требования к техническим характеристикам разрабатываемых систем потребовали существенного усиления инженерного обеспечения. Поэтому уже в 1972 г. было открыто новое академическое учреждение — Специальное конструкторское бюро научного приборостроения «Оптика» (СКБ «Оптика»), которое в течение 20 лет работало в тесном контакте с учеными и под научным руководством ИОА. За эти годы были совместно разработаны многие, в том числе и уникальные, оптико-электронные системы. Некоторые из них модернизируются и успешно функционируют до настоящего времени.

Новый этап в работе СКБ «Оптика» и в развитии в нем научного приборостроения начался в 1992 г., когда СКБ «Оптика» было переименовано в Конструкторско-технологический институт «Оптика», а директором был назначен чл.-кор. РАН М.В. Кабанов. Для организации научно-исследовательского сектора из ИОА была переведена группа научных сотрудников. В сложных условиях обвального сокращения финансирования началась вынужденная конверсия всей тематики Института с целевой ориентацией не только на разработку новых приборов, но и на проведение научных исследований с их помощью.

Завершающим годом проведенной конверсии можно считать 2003 г., когда произошли объединение Института с Томским филиалом Института леса СО РАН и его переименование в Институт мониторинга климатических и экологических систем СО РАН (ИМКЭС). Основное научное направление ИМКЭС, утвержденное в следующей формулировке, полностью отражает теперь многодисциплинарную тематику Института: *научные и технологические основы мониторинга, моделирования и прогнозирования климатических и экосистемных изменений под воздействием природных и антропогенных факторов.*

В этой формулировке под словами «научные и технологические основы мониторинга» имеется в виду и разработка новых информационно-измерительных систем, необходимость в которых определяется актуальными задачами инструментальных исследований наблюдаемых природно-климатических изменений.

В ИМКЭС от бывшего СКБ «Оптика» сохранилось Отделение научного приборостроения, объединяющее в своем составе (существенно сокращенном по численности) инженерные кадры и вспомогательные службы для разработки новых приборов и некоторых наукоемких комплектов. Как следует из нижеприведенного обзора, в Отделении ряд разработанных приборов доведен до сертифицированных промышленных образцов, что является особенно ценным как для проведения систематических полевых экспериментальных исследований Инсти-

тута, так и для перспективного развития его инновационной деятельности. Следует также отметить, что в начале 2007 г. ИМКЭС отметил свой 35-летний юбилей.

Разработка измерительных средств для исследований по атмосферной оптике

Основными задачами созданного в 1972 г. СКБ «Оптика» стали разработка, изготовление и поставка в ИОА экспериментальных и опытных образцов приборов, устройств и комплексов для обеспечения фундаментальных исследований по атмосферной оптике как контактными, так и дистанционными методами. Описание ряда первых созданных технических средств приведено в сборниках [2–4], которые издавались до организации выпусков журнала «Оптика атмосферы и океана». Характеристики основных измерительных устройств и приборов, созданных в СКБ «Оптика», представлены также в [5–8]. Изготовленные экспериментальные образцы проходили испытания в полевых условиях, затем дорабатывались и совершенствовались как по показателям назначения, так и по условиям эксплуатации.

Автоматизированные оптико-метеорологические комплексы

В 1970–1980-х гг. для ИОА и его генеральных заказчиков было создано более 15 образцов автоматизированных комплексов сухопутного и морского исполнения для оперативного измерения оптико-метеорологических параметров атмосферы на испытательных полигонах. Идеология построения таких комплексов определялась в ИОА, а конкретные схемотехнические решения, конструкторская разработка, изготовление и приемосдаточные испытания выполнялись в СКБ «Оптика». В состав комплексов обычно входили: многочастотные измерители прозрачности атмосферы вдоль приземной трассы; устройства для определения структурных характеристик показателя преломления атмосферного воздуха и атмосферной рефракции; устройства для измерения флуктуации интенсивности и геометрии пятна лазерного излучения; стандартные измерители основных метеорологических величин на многоуровневой метеорологической мачте; лидары для определения пространственных профилей различных атмосферных параметров [2–4, 7]. Обязательной составной частью комплекса было устройство автоматизированной обработки измеряемых данных и управления работой отдельных составных частей комплекса, а степень автоматизации определялась возможностями вычислительной техники того времени. Комплексы обеспечивали оперативное измерение параметров оптической погоды в месте их расположения. Одновременно проводилась разработка и изготовление отдельных оптико-электронных измерительных устройств, среди которых значительное место занимали лидары.

Лидары

Преимущество лидара как измерительного средства заключается в возможностях дистанционного измерения профилей аэрозольных и газовых компонентов атмосферы вдоль трассы распространения лазерного луча и оперативного контроля динамики их изменения в процессе наблюдения. Кроме специальных лидаров, входящих в состав комплексов оперативного определения параметров атмосферы, в первое десятилетие для научно-исследовательских целей создавались мобильные аэрозольные лидары, например «ЛОЗА-3», для экологического мониторинга атмосферных загрязнений [11].

При разработке лидаров в СКБ «Оптика» разрабатывались методы их проектирования, связанные с оптимизацией приемных и передающих устройств, в том числе методы расчета энергетического потенциала лидара и оценки динамического диапазона лидарных сигналов. Были разработаны различные типы пространственных фильтров для лидаров разного назначения и проведены исследования по оптимальным режимам питания фотодетекторов и способов временной регулировки их чувствительности при регистрации быстроизменяющихся лидарных сигналов. Полученные результаты по оптимальному проектированию лидаров систематизированы в [10].

Приобретенный при проектировании наземных лидаров опыт позволил в конце 70-х гг. перейти к созданию самолетных поляризационных лидаров [9, 10]. При их разработке были созданы инженерные основы синтеза передающей и приемной систем, обеспечивающие измерения компонент вектора Стокса лидарного сигнала, а затем элементов матрицы рассеяния при зондировании дисперсных сред. Были отработаны технологии зондирования при сканировании лазерного излучения наземными, самолетными и космическими лидарами [8, 10].

Опыт, накопленный при разработке наземных и самолетных лидаров, позволил в кооперации с ИОА и рядом отраслевых НПО Минобщмаша СССР разработать и изготовить первый отечественный космический лидар «БАЛКАН» [12]. Сотрудниками СКБ «Оптика» был разработан полный комплект конструкторской документации на лидар, изготовлены ряд его блоков, технологический и тренажерные макеты и проведен весь требуемый цикл наземных отработочных и приемоиспытаний. В конце 1990 г. лидар был поставлен в РКК «Энергия», где были проведены наземные совместные испытания лидара в составе модуля «Спектр» орбитальной станции «Мир». В мае 1995 г. лидар был выведен на орбиту, включен в состав научной аппаратуры орбитальной станции «Мир» и в течение двух лет работал как первый лидар космического базирования. С его помощью проводилась отработка технологий космического зондирования атмосферы и подстилающей поверхности Земли [13]. Разгерметизация модуля «Спектр», произошедшая летом 1997 г., не позволила провести весь цикл запланированных экспериментов (лидар отработал только 10% назначенного ресурса).

Для метрологического обеспечения лидаров создавались также комплекты контрольно-поверочной аппаратуры. В частности, были разработаны специальные оптические имитаторы лидарных сигналов, позволяющие моделировать различные временные зависимости излучаемой мощности [14]. Подавая оптический сигнал известной формы на вход приемной системы, можно по ее отклику проводить калибровку лидара и получать контролируемый конечный результат на выходе регистрирующего устройства.

Другие оптические приборы и элементная база

Для определения коэффициентов ослабления излучения в видимом и ИК-диапазонах были разработаны двухволновые (0,63 и 10,6 мкм) лазерные измерители горизонтальной прозрачности атмосферы с выносным отражателем, размещаемым на расстояниях 0,5–1,0 км от приемопередающего блока [2–4, 7]. Выпущенные малой серией такие измерители входили в состав оптико-метеорологических комплексов.

Созданные измерители атмосферной рефракции определяли флуктуации углов прихода до 5 угл. мин в частотном диапазоне флуктуаций, до 100 Гц на приземных горизонтальных трассах длиной до 6 км, а для оценки влияния турбулентности атмосферы на распространение лазерного излучения были разработаны оптические измерители структурной характеристики флуктуаций показателя преломления C_n^2 [2, 3]. Было также разработано несколько модификаций звездно-солнечных электрофотометров на основе стандартного телескопа АЗТ-7 для измерения оптической прозрачности атмосферы на протяженных наклонных трассах в дневное и ночное время в видимом и ближнем ИК-диапазонах [3].

Одним из важных достижений была разработка анализатора ртути РГА-11, выпускаемого с 1990 г. малой серией. Портативный прибор без предварительного пробоотбора определял концентрацию паров ртути в атмосферном воздухе, а специальные приставки позволяли измерять содержание ртути в почве, воде и биологических объектах [15]. Прибор вместе с соответствующими методиками измерений прошел метрологическую аттестацию в НПО «ВНИИМ им. Д.И. Менделеева» и был занесен в Государственный реестр средств измерений.

Гибкая производственно-технологическая база обеспечивала разработку и изготовление метрологически аттестованных единичных или мелкосерийных образцов оптических систем и элементов, из различных марок стекла, кварца, ситалла и кристаллов для работы в диапазоне от УФ- до ближней ИК- (13 мкм) областей спектра. Высокое качество изготавливаемой оптики достигалось комплексным контролем на всех стадиях – от проектирования до производственно-технологических процессов. Для этого были разработаны высокоточные

интерферометрические методы и приборы для оперативного контроля качества оптических деталей. Отсутствие в 70-х гг. широкой номенклатуры лазеров, являющихся основным элементом создаваемых систем, потребовало организации в 1974 г. специального подразделения, занимающегося созданием лазеров на парах металлов. В результате была разработана серия лазеров на парах меди – «МИЛАН» [2, 3]. Одна из модификаций этого лазера использована в лидаре на основе комбинационного рассеяния [16], который был создан сотрудниками ИОА.

Для расширения частотного диапазона генерируемого монохроматического излучения со второй половины 80-х гг. в СКБ «Оптика» стало развиваться направление нелинейной оптики. Лазеры с перестройкой частоты предполагалось использовать в лидарных и трассовых газоанализаторах. Исследования продолжаются и в настоящее время как по отработке высокоэффективной ростовой технологии [17], так и по исследованию характеристик параметрических преобразователей частоты среднего ИК-диапазона на основе различных кристаллов, а также твердых растворов [10, 18].

Новые научные задачи и разработки в Институте

Наиболее сложным этапом в развитии Института был период 1991–97-х гг., когда небольшая финансовая поддержка Сибирского отделения РАН в основном шла на вновь созданный научно-исследовательский сектор, занимавшийся главным образом проблемами климато-экологического мониторинга Сибири. В этой ситуации приборостроительному сектору Института необходимо было найти новую нишу для своей деятельности, используя имеющиеся заделы и наработки в области оптико-электронного приборостроения. Опыт, полученный при создании оптико-метеорологических комплексов, был использован при создании передвижной эколого-метеорологической станции «Эколид» [19], разработанной по заказу Восточно-Казахстанского управления экологии и биоресурсов (1993 г.).

Развитие методов оптического технологического контроля позволило создать на Кузнецком металлургическом комбинате сертифицированную систему для автоматизированного фотометрического контроля прямолинейности поверхности железнодорожных рельсов в процессе их транспортировки на рольганге прокатного стана (1995 г.). Было налажено мелкосерийное производство установок для проведения лабораторного практикума по физической оптике (1993–1997 гг.). Сотрудники, занимавшиеся ранее разработкой лазерных навигационных систем, переключились на мелкосерийное производство лазерных терапевтических устройств, а затем лазерных шоу (1990–1997 гг.).

В 1997 г. было принято решение о ликвидации Объединенного института оптики атмосферы, а деятельность конструкторско-производственной части

Института была полностью переориентирована на создание инструментария, обеспечивающего проведение мониторинга окружающей среды и контроля состояния техногенных систем [20]. Наряду с приборами, основанными на оптических эффектах, в новых разработках стали использоваться эффекты взаимодействия акустических и радиоволн с окружающей средой. Несмотря на то что некоторые из обсуждаемых ниже и разработанных в Институте инструментальных средств имеют зарубежные аналоги, по большинству параметров они превосходят аналоги и являются импортозамещающим оборудованием.

Автоматизированный ультразвуковой метеорологический комплекс АМК-03

Работы по созданию надежного ультразвукового термоанемометра, проводимые в Институте более 15 лет, завершились созданием метеорологического комплекса АМК-03, который имеет стационарные, переносные и бортовые модификации. Последние образцы комплекса, созданные совместно с ООО «Сибаналитприбор» по заказам МО РФ, имеют достаточно широкие диапазоны измерения: температура окружающего воздуха от -50 до $+50$ °С; скорость горизонтального ветра $0 \dots 40$ м/с; скорость вертикального ветра до 15 м/с; относительная влажность $15 \dots 100\%$; атмосферное давление $560 \dots 800$ мм рт. ст. [21]. Образцы прошли государственные сертификационные испытания и рекомендованы для серийного производства.

Основным отличием от зарубежных и отечественных аналогов является жесткость конструкции головки термоанемометра, представляющей собой два ортогональных трубчатых кольца, на которых закреплены восемь ультразвуковых пьезокерамических преобразователей (рис. 1).

Последние образуют четыре пары излучателей и приемников, располагающихся в противоположных вершинах куба. Высокая частота опроса датчиков (до 160 Гц) позволяет измерять мгновенные значения температуры и трех ортогональных компонентов скорости ветра с пороговой чувствительностью не хуже $0,01$ °С и $0,01$ м/с соответственно. По этим данным можно оценивать до 60 числовых характеристик, используемых для описания и анализа атмосферной турбулентности. Модификации АМК-03 дополнительно комплектуются соответствующим программным обеспечением, которое позволяет накапливать данные измерений за любой срок наблюдений с последующим воспроизведением результатов из банка данных и представлением их в виде таблиц, гистограмм, графиков и т.п. [21].

Изготовлено несколько десятков модификаций АМК-03, которые используются не только в исследовательских целях в институтах СО РАН и вузах, но и на промышленных предприятиях России и за рубежом. Разработана также программа краткосрочного прогноза изменения основных метеороло-

гических величин по результатам текущих измерений АМК-03 [22].

Газоанализаторы для непрерывного контроля техногенных газов

Для контроля загрязнений атмосферного воздуха в Институте в течение последних 10 лет разрабатывались стационарные газоанализаторы непрерывного действия для измерения концентрации основных техногенных газов в дымовых выбросах топливосжигающих установок с целью определения превышения уровней ПДВ, а также для оптимизации режимов работы этих установок. Работа газоанализаторов основана на методе дифференциального поглощения в оптическом диапазоне. Создано несколько модификаций газоанализаторов серии «ДОГ» УФ-диапазона для измерения концентрации NO и SO₂ в дымовых выбросах котлов ТЭС (рис. 2) [23, 24]. Технические решения, заложенные в конструкцию газоанализаторов ДОГ-1М и ДОГ-4, защищены патентами РФ, газоанализаторы занесены в Государственный реестр средств измерений РФ.

Создан также экспериментальный образец газоанализатора для контроля содержания окиси углерода СО в дымовых выбросах, работающий в ИК-диапазоне [25].

Новая модификация анализатора ртути

В начале XXI в. была проведена модернизация анализатора ртути РГА-11 [15], в котором использовался метод дифференциального поглощения резонансной спектральной линии ртути с длиной волны $\lambda = 253,7$ нм на основе продольного эффекта Зеемана. В новом приборе используется поперечный эффект Зеемана [26]. При этом чувствительность анализатора слабо зависит от применяемого в газоразрядной лампе изотопа ртути. Линейная поляризация зеемановских компонент упрощает процедуру попеременного их выделения (не требуется фотоупругий модулятор поляризации). Это упрощает настройку оптического тракта прибора. Изменена также электронная часть прибора за счет применения современной электронной базы. Внешняя конструкция прибора не претерпела особых изменений (рис. 3).

Для проведения полевых работ прибор снабжен GPS-приемником и FLASH-памятью, куда заносятся измеренные значения концентрации паров ртути, время и координаты места измерения. Прибор имеет выход, обеспечивающий передачу информации, полученной за суточный сеанс измерений, в компьютер. По своим техническим характеристикам анализатор не уступает другим отечественным и зарубежным приборам аналогичного класса и используется в Институте для определения концентрации ртути в воздухе при маршрутных съемках и при проведении ртутного мониторинга торфоболотных систем.

Приборы на основе использования эффектов электромагнитной эмиссии твердых тел

Для контроля природных и техногенных сред в Институте с 2001 г. развивается направление по разработке методов и технических средств, основанных на регистрации радиочастотной электромагнитной эмиссии (ЭМЭ) твердых тел и естественного импульсного электромагнитного поля Земли (ЕИЭМПЗ) в диапазоне десятков и сотен килогерц. В параметрах сигнала ЭМЭ содержится информация об упругих свойствах материала и информация, связанная с изменением их электрического состояния. На основе регистрации напряженности электрической составляющей импульсов ЭМЭ, возникающей при механическом воздействии на диэлектрические тела, разработан специализированный регистратор для определения качества бетона «Прочность» [27]. Погрешность определения прочности бетона не превышает 10%, объем обследования при однократном измерении примерно 0,4 м³, время измерения в одной точке не более 5 с. Площадные измерения позволяют получить топограмму распределения прочности конструкции с определением дефектных областей. Регистратор «Прочность» успешно применяется при оценке технического состояния бетонных сооружений, дорожных покрытий и мостов в строительных организациях.

Многоканальный геофизический регистратор МГР-01

Исследования, проведенные в 70-х гг. прошлого века в Томском политехническом институте, показали, что источником электромагнитных импульсов радиодиапазона является также и земная кора. В структуре эмиссии ЕИЭМПЗ существуют импульсы, связанные с механоэлектрическими преобразованиями энергии в земной коре и возникающие на границах блоков земной коры, а также структурных неоднородностей в результате непрерывного геодинамического движения оболочки планеты.

Для регистрации этих импульсов был создан многоканальный геофизический регистратор МГР-01. Он представляет собой совокупность датчиков электрической и магнитной составляющей ЕИЭМПЗ, объединенных в антенный блок, и блок регистрации (рис. 4).

Электрический датчик регистрирует импульсы в частотном диапазоне от 500 Гц до 100 кГц, магнитный датчик работает в узкой полосе на частоте 14,5 кГц. Многолетние исследования позволили выяснить, что имеются суточный и сезонный ходы числа импульсов ЕИЭМПЗ, причем в зависимости от сезона меняется время появления максимального числа импульсов (днем или ночью) [28].

Детальные наблюдения за сезонными вариациями ЕИЭМПЗ выявили определенные закономерности, связанные с напряженными состояниями земной коры и возникновением землетрясений, что позволяет использовать МГР-01 в качестве стационарной

районной станции при решении задачи оперативного прогноза землетрясений. Было выявлено, что накануне землетрясения интенсивность ЕИЭМПЗ в значительной степени снижается. При создании соответствующей сети наблюдения за ЕИЭМПЗ появляется возможность прогнозирования времени и места появления землетрясения [29]. В настоящее время подобные приборы размещены в 8 точках Западной и Восточной Сибири. МГР-01 занесен в Госреестр средств измерений РФ. Прибор также применяется для отработки геофизических методов картирования литологических неоднородностей, оценки напряженно деформируемого состояния горных массивов и поиска месторождений полезных ископаемых.

Приборы для экспресс-диагностики технического состояния дорожных сооружений

Ультразвуковое излучение используется также в многоканальной системе измерения прогибов пролетных строений «Фаза», предназначенной для экспресс-диагностики технического состояния мостов, путепроводов, виадуков. Принцип работы измерительных датчиков основан на акустической локации, при этом оригинальное программное обеспечение и применение специальных контроллеров исключают влияние температуры, давления, влажности и перемещения воздушного потока на результаты измерений [30]. Датчики размещаются на растяжках таким образом, что акустический излучатель жестко прикрепляется к исследуемому сооружению, а приемник – к грунту (рис. 5).

Система одновременно измеряет как статические прогибы, так и амплитуды колебаний пролетных строений с погрешностью не хуже 10 мкм в частотном диапазоне измеряемых перемещений 0 ... 40 Гц. Количество измерительных каналов – 10. В режиме обработки результатов динамических испытаний автоматически определяются собственная частота колебаний, динамический коэффициент и логарифмический декремент затухания выбранной конструкции. Система «Фаза» занесена в Госреестр средств измерений РФ.

Элементная база. Нелинейные кристаллы

Как отмечалось выше, в Институте продолжает развиваться направление, связанное с разработкой методов и технологий создания оптических элементов для систем лазерного газоанализа [10, 17, 18]. Разработана математическая модель процессов параметрического преобразования частоты в твердых растворах, имеющих пространственные вариации отношения смещения компонентов x . Модель учитывает как параметры оптического пучка накачки, так и параметры неоднородности твердого раствора и эффекта сноса пучков, влияющие на условия фазового синхронизма и эффективность преобразования. Рассчитаны оптимальные значения длины рабочего элемента и условия фазового согласования,

отличные от условий полного фазового синхронизма, которые обеспечивают максимальные эффективности процессов генерации второй гармоники, комбинационных частот и параметрической генерации в $\text{LiGa}(\text{Se}_{1-x}\text{S}_x)_2$, $\text{LiIn}(\text{Se}_{1-x}\text{S}_x)_2$, $\text{AgGa}_{1-x}\text{In}_x\text{Se}_2$, $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Ga}_2\text{S}_4$, на основе экспериментально определенных значений вариаций x .

В последние годы завершены также разработка и испытания новой прецизионной термической установки на базе оригинальных планарных конструкций, обеспечивающих необходимое пространственное разрешение и точность системы терморегуляции для выращивания монокристаллов ZnGeP_2 с рекордными размерами (до $\text{Ø}30 \times 150$ мм) для источников мощных импульсов когерентного излучения ИК- и терагерцового диапазонов. Разработана технология роста эпитаксиальных слоев ZnGeP_2 с более низкой концентрацией дефектов, чем у материалов подложек, для создания планарных волноводных структур и повышения порога оптического пробоя нелинейных элементов ZnGeP_2 .

Элементная база. Металлы с памятью формы

Работы по созданию конструкций и устройств на основе металлов с памятью формы ведутся в Институте с 1994 г. Основное практическое использование таких металлов основано на их свойстве восстанавливать первоначальную форму, заданную путем специальной термомеханической обработки. При этом форма может воспроизводиться миллионы раз. Восстанавливая форму, элемент развивает большие усилия (на уровне предела прочности металла) и может совершать при этом полезную работу. В отличие от традиционных чувствительных элементов металлы с памятью формы имеют существенные преимущества: по величине перемещений, развиваемым усилиям, сложности конфигураций восстанавливаемых форм, величине диапазона рабочих температур, стойкости к агрессивным средам, ресурсу рабочих циклов, экологической безопасности и т.д.

Благодаря способности элементов с памятью формы реагировать на изменение внешних параметров окружающей среды (температуры, влажности и солнечной радиации), их можно использовать в качестве исполнительных механизмов в образцах приборов. К настоящему времени разработан материал на основе соединения Ti-Ni-Cu (ТУ-2-02-87-94), способный выполнять одновременно функции датчика и исполнительного органа в области мониторинга и контроля окружающей среды по температуре, влажности и солнечной радиации [31]. Показана принципиальная возможность использования этого материала в приборах, действующих в автономном режиме десятки лет.

Заключение

Перспективы дальнейшего развития научного приборостроения в ИМКЭС определяются его ос-

новным научным направлением. Согласно приведенной во введении формулировке объектом инструментальных наблюдений являются «климатические и экосистемные изменения», которые, как показывают наблюдения, зависят от многих факторов природного и антропогенного происхождения и определяются многими процессами с разной временной структурой. Поэтому новые технические средства должны обеспечивать измерения не только средних значений параметров этих процессов, но и их высшие моменты. Такому важному требованию к полевым измерительным приборам в определенной мере соответствует метеокомплекс АМК-03, совершенствование которого по другим техническим характеристикам продолжается. В этом же направлении разрабатываются или модернизируются другие измерительные приборы.

Другое важное требование к полевым приборам для мониторинга климатических и экологических систем связано с наблюдаемой пространственной неоднородностью многофакторных природно-климатических изменений в масштабах регионов и субрегионов. Для учета этой неоднородности необходимы не точечные наблюдения, а региональная сеть мониторинга на территории нескольких характерных экосистем. Следовательно, для синхронизации инструментальных наблюдений и сбора информации необходимы не просто отдельные приборы, а информационно-измерительные системы с каналами дистанционного сбора информации. Разработка таких систем и соответствующих геоинформационных технологий для сети мониторинга относится к числу приоритетных направлений Института в области научного приборостроения.

Большая часть новых разработок, представленных выше, проводилась в течение 2004–2006 гг. в рамках проекта СО РАН 28.2.3 «Разработка новых методов, технологий и приборов на основе оптических, радиоволновых и акустических эффектов для контроля природных и техногенных систем, а также для решения специальных задач». В предстоящем трехлетии (2007–2009 гг.) работа будет продолжаться в рамках Программы СО РАН «Фундаментальные основы приборостроения для наук о Земле и решения специальных задач» по проекту 7.13.1.2 «Развитие методов и технических средств на основе оптических, радиоволновых и акустических эффектов для изучения природных и техногенных систем».

1. Зуев В.Е. История создания и развития академической науки в Томске. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 1999. 120 с.
2. Измерительные приборы для исследования параметров приземных слоев атмосферы: Сб. статей / Под ред. И.В. Самохвалова. Томск: Изд. ИОА СО АН СССР, 1977. 178 с.
3. Измерение оптико-метеорологических параметров атмосферы с использованием лазерного излучения: Сб. статей / Под ред. М.В. Кабанова. Томск: Изд. ИОА ТФ СО АН СССР, 1980. 167 с.
4. Прогноз и контроль оптико-метеорологического состояния атмосферы: Сб. статей / Под ред. Г.О. Задде. Томск: ТФ СО АН СССР, 1982. 154 с.

5. Кабанов М.В., Тихомиров А.А. Конструкторско-технологическое обеспечение фундаментальных исследований по атмосферной оптике: итоги деятельности КТИ «Оптика» СО РАН за 25 лет // Оптика атмосфер. и океана. 1997. Т. 10. № 4–5. С. 382–402.
6. Зуев В.Е., Кабанов М.В. 30 лет Институту оптического мониторинга СО РАН: основные этапы формирования и развития научного направления // Оптика атмосфер. и океана. 2002. Т. 15. № 1. С. 6–11.
7. Солдаткин Н.П., Тихомиров А.А. Приборное обеспечение климато-экологического мониторинга // Оптика атмосфер. и океана. 2002. Т. 15. № 1. С. 44–50.
8. Красненко Н.П., Тихомиров А.А. Технические средства и технологии дистанционного зондирования атмосферы и подстилающей поверхности // Оптика атмосфер. и океана. 2002. Т. 15. № 1. С. 51–61.
9. Региональный мониторинг атмосферы. Ч. 2. Новые приборы и методики измерений / Под общей ред. М.В. Кабанова. Томск: Изд-во ИОА СО РАН, 1997. 295 с.
10. Андреев Ю.М., Воеводин В.Г., Гейко П.П., Горобец В.А., Ланская О.Г., Петухов В.О., Солдаткин Н.П., Тихомиров А.А. Лидарные системы и их оптико-электронные элементы / Под общей ред. М.В. Кабанова. Томск: Изд-во ИОА СО РАН, 2004. 526 с.
11. Аршинов Ю.Ф., Балин Ю.С., Даничкин С.А., Зуев В.Е., Кутелев А.Ф., Самохвалов И.В., Тихомиров А.А. Наземные стационарные и мобильные комплексы аппаратуры дистанционного зондирования атмосферы // Докл. Болгарско-советского семинара «Лазерные методы и средства измерения и контроля параметров окружающей среды». София: Ин-т электроники БАН, 1985. С. 83–88.
12. Балин Ю.С., Знаменский И.В., Зуев В.Е., Мельников В.Е., Тихомиров А.А., Самойлова С.В. Российский космический лидар «Балкан» // Оптика атмосфер. и океана. 1995. Т. 8. № 9. С. 1332–1343.
13. Балин Ю.С., Тихомиров А.А. Лазерное зондирование Земли из космоса. II. Методологические основы лидарных измерений с борта орбитальной станции // Космічна наука і технологія. 1997. Т. 3. № 1/2. С. 26–33.
14. Береснев В.А., Гончаров А.Н., Номикос О.Н., Тихомиров А.А. Программируемый генератор оптического сигнала // Приборы и техн. эксперим. 1985. № 5. С. 249.
15. Антипов А.Б., Генина Е.Ю., Кашкан Г.В., Мельников Н.Г. Ртутный мониторинг // Оптика атмосфер. и океана. 1994. Т. 7. № 11–12. С. 1630–1635.
16. Аршинов Ю.Ф., Бобровников С.М., Сериков И.Б., Шелефонтьев Д.И., Шумский В.К., Базылев П.В., Луговой В.А., Столяров Н.Н. Калибровка КР-лидарного газоанализатора выбросов в атмосферу из труб предприятий с помощью удаленной газовой кюветы // Оптика атмосфер. и океана. 1997. Т. 10. № 3. С. 353–359.
17. Грибенюков А.И. Нелинейно-оптические кристаллы ZnGeP₂: ретроспективный анализ технологических исследований // Оптика атмосфер. и океана. 2002. Т. 15. № 1. С. 71–80.
18. Андреев Ю.М., Гейко П.П. Нелинейно-оптические преобразователи частоты как элементная база ИК-лидаров // Оптика атмосфер. и океана. 2002. Т. 15. № 1. С. 62–70.
19. Барышников В.Ф., Земляновский Л.Д., Ивакин Ю.А., Перовский В.Л., Телеганов А.А., Тихомиров А.А., Черепанов А.П., Шапиро И.Я. Автоматизированная мобильная станция диагностики промышленного за-

- грязнения атмосферы «Эколид» // Оптика атмосфер. и океана. 1994. Т. 7. № 2. С. 177–181.
20. Кабанов М.В., Тихомиров А.А. Приборы и устройства для мониторинга природных и техногенных систем // Геогр. и природ. ресурсы. 2004. Спецвыпуск. С. 19–28.
 21. Азбукин А.А., Богусевич А.Я., Ильичевский В.С., Корольков В.А., Тихомиров А.А., Шелевой В.Д. Автоматизированный ультразвуковой метеорологический комплекс АМК-03 // Метеорол. и гидрол. 2006. № 11. С. 89–97.
 22. Богусевич А.Я. Краткосрочный прогноз временной эволюции метеорологических параметров в атмосфере из данных измерений ультразвуковой метеостанции // Матер. 6-го Сибирского совещания по климато-экологическому мониторингу. Томск: ИМКЭС СО РАН, 2005. С. 83–88.
 23. Азбукин А.А., Булдаков М.А., Королев Б.В., Корольков В.А., Матросов И.И. Оптические газоанализаторы серии «ДОГ» // Оптика атмосфер. и океана. 2002. Т. 15. № 1. С. 87–90.
 24. Азбукин А.А., Булдаков М.А., Королев Б.В., Корольков В.А., Матросов И.И., Тихомиров А.А. Стационарный газоанализатор оксидов азота и серы // Приборы и техн. эксперим. 2006. № 6. С. 105–109.
 25. Азбукин А.А., Булдаков М.А., Королев Б.В., Корольков В.А., Матросов И.И., Тихомиров А.А. Оптимизация оптических параметров ИК-газоанализатора окиси углерода на основе интерферометра Фабри–Перо // Оптика атмосфер. и океана. 2006. Т. 19. № 11. С. 986–990.
 26. Азбукин А.А., Булдаков М.А., Королев Б.В., Корольков В.А., Матросов И.И., Тихомиров А.А. Портативный оптический анализатор концентрации паров ртути «ДОГ-05» // Приборы и техн. эксперим. 2006. № 6. С. 142–143.
 27. Гордеев В.Ф., Шталин С.Г. Прибор для неразрушающего контроля качества бетона по параметрам электромагнитной эмиссии // Докл. ТУСУР «Автоматизированные системы обработки информации, управления и проектирования». Томск, 2001. Т. 6. С. 188–193.
 28. Малышков Ю.П. Электромагнитная эмиссия и ее применение / Ин-т оптического мониторинга СО РАН. Томск, 2002. 231 с. Деп. в ВИНТИ 16.05.2002, № 863-В2002.
 29. Пат. РФ № 2238575, МКП⁷, V 9/00. Способ прогноза землетрясений / Малышков Ю.П., Джумбаев К.Б., Малышков С.Ю., Гордеев В.Ф., Шталин С.Г., Мясальский О.К. Изобретения. 2004. Бюл. № 29.
 30. Малышков С.Ю., Поливач В.И., Хорсов Н.Н., Куряков С.А. Определение деформаций, прогибов и колебаний пролетных строений мостов методом акустической дальнометрии // Тезисы докл. II Междунар. научно-техн. конф. «Автомобильные дороги Сибири». Омск, 1998. С. 383–385.
 31. Пат. РФ № 2201582, МКП⁷, G 01 K 5/62. Сигнализатор температуры / Ерофеев В.Я., Кабанов М.В., Нявро А.В., Теодорович С.Б. 2003. Бюл. № 9.

M.V. Kabanov, A.A. Tikhomirov. Scientific instrument making: from development of devices for atmospheric optics study to commercial specimens for control of natural and technogenous systems.

Results of activity of IMCES SB RAS for 35 years at different stages of its development are under discussion. Principal devices for the atmospheric optics investigation being produced by small series and used in practice between 1972 and 1992 are described. New technical means, based on effects of interaction between optical, acoustic and radio-waves with environmental objects, are underlined, which operate in net monitoring of climatic, ecologic, and technogenous systems.

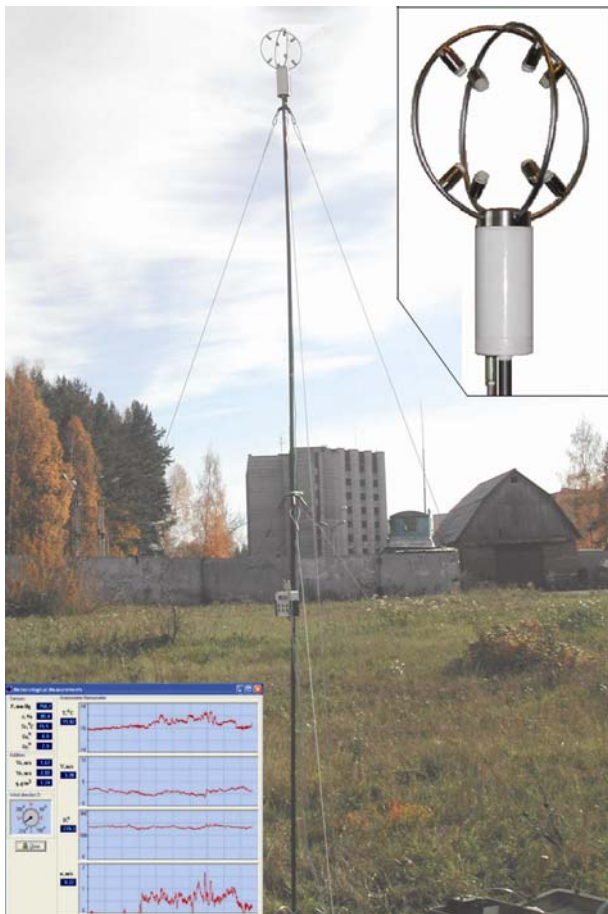


Рис. 1. Переносная модификация метеокомплекса АМК-03 (ранцевый вариант) в развернутом положении на 4-метровой мачте. Справа сверху – головка акустического термоанемометра, слева внизу – окно меню программного обеспечения с разверткой мгновенных значений (сверху вниз): температуры воздуха, скорости горизонтального ветра, направления ветра, скорости вертикального ветра



Рис. 2. Внешний вид газоанализатора ДОГ-4 для контроля концентрации выбросов NO и SO₂

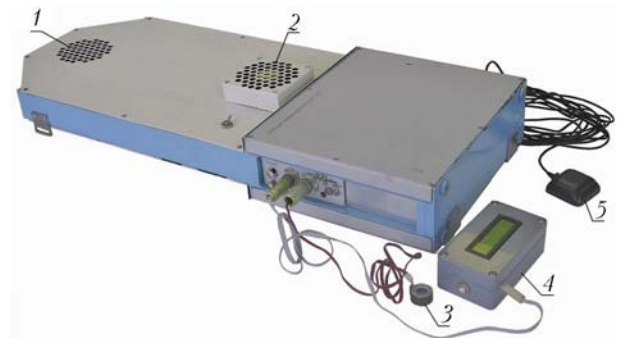


Рис. 3. Внешний вид анализатора ДОГ-05: 1 – отверстия для забора воздуха, прокачиваемого через многоходовую оптическую кювету; 2 – выпускные отверстия; 3 – эталонная кювета с регулируемой температурой; 4 – выносной блок управления и индикации; 5 – антенна GPS-приемника



Рис. 4. Многоканальный регистратор МГР-01 на полевых испытаниях: 1 – ноутбук для записи результатов; 2 – укладочный ящик с блоком регистрации; 3 – катушка с кабелем электропитания; 4 – выносной антенный блок



Рис. 5. Размещение системы «Фаза» под мостовым пролетом: 1 – акустические датчики; 2 – растяжки; 3 – ноутбук