

ПОРТАТИВНЫЙ ФУРЬЕ-СПЕКТРОРАДИОМЕТР С НЕОХЛАЖДАЕМЫМ ФОТОПРИЕМНИКОМ

© 2006 г. С. К. Дворук; В. Н. Корниенко, канд. физ.-мат. наук; И. В. Кочиков, доктор физ.мат.-наук; М. В. Лельков; А. Н. Морозов, доктор физ.-мат. наук; М. Л. Поздышев, канд. техн. наук; С. И. Светличный, канд. физ.-мат. наук; С. Е. Табалин

Кафедра физики и Центр прикладной физики Московского государственного технического университета им. Н.Э. Баумана, Москва

E-mail: amor@mx.bmstu.ru

Представлен портативный фурье-спектрометр с разрешением 8 см^{-1} , работающий в диапазоне $7\text{--}14 \text{ мкм}$ с неохлаждаемым одноэлементным пироэлектрическим фотоприемником МГ-32. Приведены результаты лабораторных и полевых испытаний разработанного макетного образца. Разработанный фурье-спектрометр с неохлаждаемым фотоприемником предназначен для дистанционного определения паров загрязняющих веществ в открытой атмосфере, а также утечек метана на газопроводах.

Коды OCIS: 120.5630, 280.1120.

Поступила в редакцию 17.05.2006.

Введение

Решение проблемы обнаружения и идентификации загрязняющих веществ в открытой атмосфере возможно при использовании фурье-спектрометра (ФСР), чувствительность которого должна обеспечивать возможность проведения измерений при небольшом яркостном температурном контрасте, который для приземных трасс обычно не превышает $2\text{--}5 \text{ К}$ [1, 2]. Стремление создать ФСР с максимально высокой чувствительностью приводит к применению охлаждаемых фотоприемных устройств (ФПУ). Среди них рекордными характеристиками обладают фотоспротивления и фотодиоды на основе тройного соединения кадмий–ртуть–теллур (КРТ) с рабочей температурой около 80 К [3]. Их типичная обнаружительная способность составляет $D_{\lambda_{\max}}^* = (1\text{--}3) \times 10^{10} \text{ см Гц}^{1/2}/\text{Вт}$. Для охлаждения КРТ-фотоприемников применяют или криостат с жидким азотом, или микрокриогенную систему охлаждения на основе холодильников Стирлинга (интегрированного типа или сплит-систему). Оба варианта не всегда оптимальны. Первый вариант требует периодической дозаправки, второй – дорог и имеет ограниченный ресурс работы. Кроме того, применение криогенных КРТ-фотоприемников лимитирует массогабаритные параметры ФСР, что делает практически невозможным создание портативных приборов, способных работать с рук.

В настоящее время ведутся разработки миниатюрных фурье-спектрометров с использованием достижений микросистемной технологии. Примером миниатюризации может служить описанный в [4] фурье-спектрометр, имеющий размеры интерферометра всего $4 \times 5 \text{ мм}$ и предназначенный для ра-

боты в видимом диапазоне длин волн. Очевидно, что прямое использование этого фурье-спектрометра для решения задач мониторинга открытой атмосферы невозможно, но эта работа позволяет указать достижимый уровень миниатюризации ФСР.

Стремление перейти на использование неохлаждаемых ФПУ приводит к уменьшению чувствительности ФСР. Но для решения ряда прикладных задач, где длина трассы наблюдения невелика, а ее яркостный контраст достаточно высок, указанное снижение чувствительности допустимо. Кроме упрощения конструкции ФСР, применение неохлаждаемых ФПУ позволяет существенно уменьшить энергопотребление и габариты прибора.

Целью настоящей работы являлось создание, тестирование работы созданного макетного образца фурье-спектрометра с неохлаждаемым фотоприемником и определение его основных характеристик.

Выбор элементов ФСР и определение его параметров

Базовым элементом ФСР является фотоприемное устройство. Именно оно определяет чувствительность, время скана интерферограммы и рабочий спектральный диапазон. Для оптического диапазона $700\text{--}1400 \text{ см}^{-1}$ ($7\text{--}14 \text{ мкм}$) выбор возможных претендентов не столь широк и сегодня реально представлен двумя типами ФПУ: КРТ-фоторезисторами с термоэлектрическим охлаждением и пироэлектрическими фотоприемниками. Сравнение параметров фоторезисторов с термоэлектрическим охлаждением, описанных в работе [5], и пироэлектрического фотоприемника МГ-32 [6] при размерах фоточувствительной площадки $1 \times 1 \text{ мм}$ показывает,

что они обладают практически одинаковой обнаружительной способностью $D_{\lambda_{\max}}^* = 2 \times 10^8$ см Гц^{1/2}/Вт, что соответствует минимально регистрируемой разности яркостных температур около 0,1–0,2 К. Хотя обнаружительная способность этих фотоприемников существенно ниже, что у криогенных ФПУ, но для последних реальная чувствительность обычно ограничена акустическими шумами и электромагнитными наводками.

Время фотоотклика для фоторезисторов КРТ с термоэлектрическим охлаждением составляет величину не более 0,3 мкс. Для МГ-32 частотный диапазон ограничен полосой от 50 до 500 Гц, но спектральный диапазон существенно шире (от 2 до 20 мкм), что обеспечивает потенциальную возможность работы в двух окнах прозрачности атмосферы 3–5 и 7–14 мкм. Дальнейшее сопоставление их характеристик – спектральной чувствительности, габаритов и энергопотребления – дает преимущество пироэлектрическому фотоприемнику МГ-32, который и был выбран при создании ФСР.

Частотный диапазон работы пироприемника МГ-32 определяет допустимую величину скорости движения подвижного зеркала ФСР. Считая, что верхняя граничная частота фотоприемника МГ-32 $f_{\max} \leq 450$ Гц соответствует границе спектрального диапазона $\nu_{\max} = 1500$ см⁻¹, легко оценить скорость физического смещения подвижного зеркала фурье-спектрометра $V = f_{\max}/2\nu_{\max} \leq 0,15$ см/с. Нижняя граница частотного диапазона, соответствующая $\nu_{\min} = 500$ см⁻¹, $f_{\min} \geq 150$ Гц.

При определении загрязняющих веществ в открытой атмосфере время скана не должно превышать значения $\tau \leq 1$ с, что обусловлено временной стабильностью атмосферы [7]. При этом физическое смещение зеркала интерферометра составляет не более $l_{\max} = V\tau \leq 0,15$ см. При регистрации двусторонней интерферограммы указанное ограничение приводит к спектральному разрешению ФСР на уровне $\delta\nu \approx 8$ см⁻¹ (разрешающая способность $R = \nu_{\max}/\delta\nu \approx 200$) и вполне достаточно для идентификации сложных органических молекул с характерной шириной полос поглощения 20–50 см⁻¹ [8]. Значение разрешающей способности определяет предельный телесный угол расходимости веера пучков света в интерферометре $\Omega = 2\pi/R \approx 0,03$ ср. Это соответствует значению плоского угла около 12° по диагонали квадрата приемной площадки ФПУ или 8° по его стороне.

Поскольку телесный угол поля зрения ФПУ, ограниченный установленной перед ним диафрагмой, $\Omega_0 \approx 1$ ср, характерный световой диаметр оптических элементов ФСР можно оценить по формуле $D = L\sqrt{\Omega_0/\Omega} > 10$ мм, где L – размер фотоприемной площадки по диагонали. Эта величина определяет

минимальный характерный размер интерферометра ФСР, который с учетом расходимости лучей вряд ли может быть менее 50–60 мм. На размер фурье-спектрометра влияют также габариты используемого лазера референтного канала. В случае применения газового He–Ne-лазера его длина не может быть меньше 110 мм, что связано с фундаментальными ограничениями на устойчивую генерацию таких лазеров. Анализ показывает, что применение твердотельных и полупроводниковых лазеров не приводит к выигрышу в габаритах, так как для их устойчивой работы в полевых условиях необходима достаточно жесткая термостабилизация.

Конструкция ФСР

Приведенные оценки и послужили отправной точкой создания конструкции ФСР. Общая структурная схема ФСР приведена на рис. 1. В качестве основы интерферометра была выбрана классическая схема Майкельсона с подвесом подвижного зеркала на пружинном параллелограмме. Особенностью конструкции являлось применение отдельного интерферометра референтного канала с общим подвижным зеркалом и отдельным опорным. Опорное зеркало 3 референтного канала было слегка заклонено так, чтобы на площадках двухэлементного фотодиода формировалась интерференционная картина с разностью фаз $\pi/2$, необходимая для вычисления направления движения.

Поддержание постоянной скорости движения подвижного зеркала ФСР осуществлялось с помощью цифровой системы управления на основе программируемых логических интегральных схем (ПЛИС). Сигнал с выхода лазерного референтного канала принимался двухэлементным фотодиодом и поступал на двухканальный усилитель и затем на компараторы, работающие по нулевому уровню. Измеренный временной интервал $T(t)$ поступал в ПЛИС, где проводилось вычисление скорости (и ее знака) $V(t) = \lambda/2T(t)$, λ – длина волны лазера референтного канала. Полученное значение скорости использовалось для выработки управляющего сигнала $\Delta U(t)$, который зависел не только от величины рассогласования скорости $\Delta V(t) = V(t) - V_0$ от заданного значения V_0 , но также от значений интеграла и производной от этого рассогласования:

$$\Delta U(t) = \Delta V(t) + T_p \Delta \dot{V}(t) + (1/T_s) \int_0^t \Delta V(t) dt,$$

где T_p и T_s – постоянные времени дифференцирования и интегрирования.

Управляющий сигнал через экстраполятор и широтно-импульсный модулятор подавался на уси-

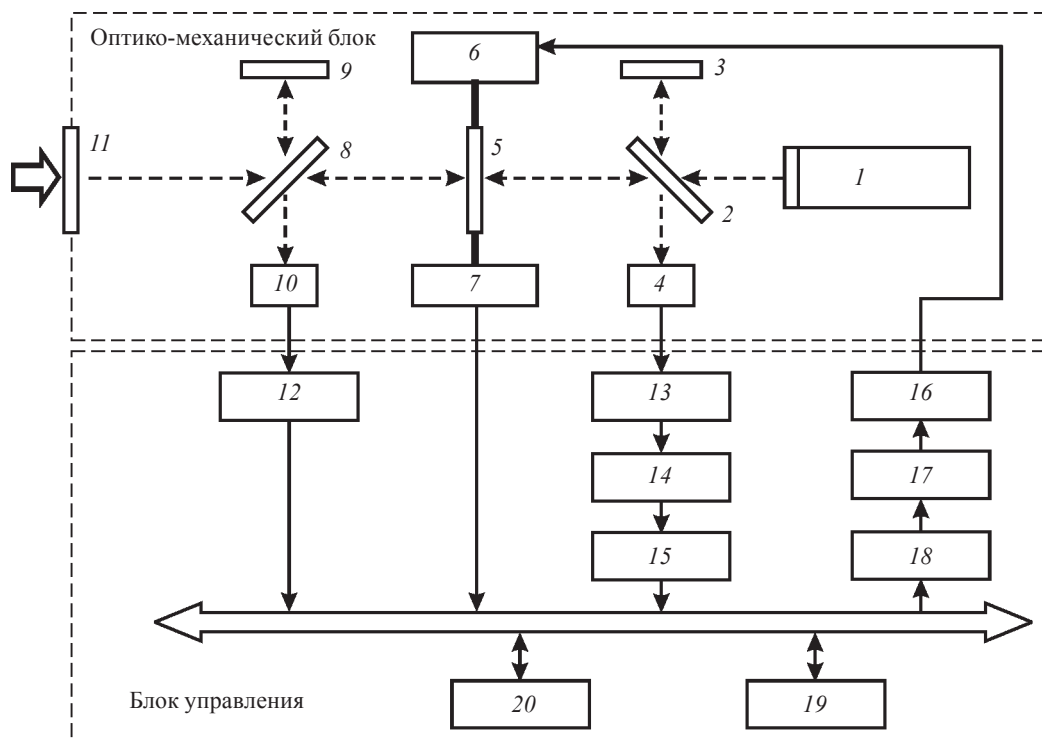


Рис. 1. Структурная схема фурье-спектрометра. 1 – He-Ne-лазер; 2, 8 – светоделители; 3, 5, 9 – зеркала, 4 – ФПУ, 6 – линейный двигатель, 7 – концевые датчики, 10 – ИК ФПУ, 11 – защитное окно, 12 – АЦП, 13 – усилитель-компаратор, 14 – блок выделения фронтов, 15 – измеритель периода, 16 – усилитель мощности, 17 – широко-импульсный модулятор, 18 – экстраполятор, 19 – блок индикации, 20 – ЦСП.

литель мощности электромагнита привода линейного двигателя, который и поддерживал постоянную скорость движения зеркала. Переключение направления движения зеркала обеспечивалось концевыми датчиками Холла. Оцифровка сигнала ИК канала проводилась с помощью 12-разрядного аналого-цифрового преобразователя (АЦП) под управлением ПЛИС. Для контроля температуры и напряжений питания использовался дополнительный АЦП, имеющий четыре аналоговых входа и встроенный датчик температуры.

Сигнал ИК канала с фотоприемника МГ-32, после АЦП, поступал в центральный сигнальный процессор (ЦСП), который выполнял преобразование Фурье, проводил фазовую коррекцию и процедуру учета собственного фонового излучения. Полученный спектр сравнивался с эталонными спектрами из базы данных. Результат сравнения отображался блоком индикации. Роль ЦСП на первом этапе выполняла ЭВМ типа NoteBook PC. В дальнейшем предполагается ее замена на встроенный сигнальный процессор, в качестве которого может использоваться процессор типа Analog Device ADSP-2191M или аналогичный ему.

В целом макетный образец фурье-спектрометра представляет собой единый модуль размером 280 × 120 × 90 мм с оптическим визиром (рис. 2).



Рис. 2. Фотография макетного образца портативного ФСП.

Конструкция модуля предусматривает последующую установку в нем ЦСП и малогабаритного дисплея.

Лабораторные исследования

В лабораторных условиях были проведены экспериментальные работы, целью которых являлось определение аппаратных функций ФСР, корректировка спектральной базы данных и определение минимально обнаружимых концентраций паров различных веществ в воздухе. Для выполнения указанных исследований была использована однопроходная оптическая кювета (статическая камера) длиной 8 м и сечением $0,8 \times 0,8$ м с принудительным механическим перемешиванием и вентилированием объема [1, 2]. В качестве источника ИК подсветки применялся широкоапертурный, термостабилизированный источник излучения, близкий по параметрам к абсолютно черному телу (АЧТ) с яркостной температурой от 277 до 323 К. Для контроля величин концентраций в камере применялись как спектральные, так и пробоотборные методики.

Для определения аппаратных функций ФСР проводились несколько измерений при различных температурах источника ИК подсветки и интерферометра ФСР. Далее в соответствии с [9] вычислялись аппаратные функции – спектральный коэффициент пропускания $R_0(\nu)$ и спектральный коэффициент черноты $\varepsilon_0(\nu)$. На рис. 3 приведена зависимость $R_0(\nu)$. Как следует из приведенного графика, максимум чувствительности ФСР расположен в области $\nu = 900\text{--}1000$ см^{-1} , что связано с диапазоном просветления оптических элементов интерферометра. Измерения показали, что во всем рабочем диапазоне $\varepsilon_0(\nu) \approx 1$. Этот результат достаточно очевиден, так как обратное излучение в интерферометре формируется его элементами, включая неохлаж-

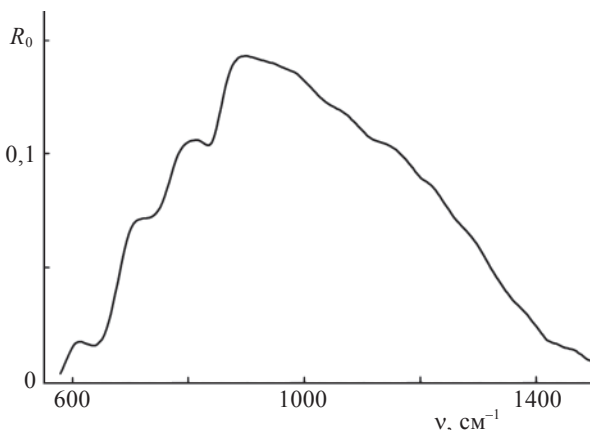


Рис. 3. Спектральный коэффициент пропускания ФСР.

даемый ФПУ, излучение которых по своему спектральному составу близко к АЧТ.

С использованием статической камеры в лабораторных условиях были зарегистрированы и внесены в базу спектральных данных спектры аммиака, метилового и этилового спиртов. Измерения проводились при эффективном температурном контрасте ~ 10 К. Была выполнена экспериментальная оценка минимально обнаружимых концентраций, для чего в статическую камеру вводилось заданное количество паров вещества (или смеси веществ, концентрации которых варьировались), контролировался момент срабатывания по обнаружению, правильность идентификации вещества (и/или компонент смеси) и определялись концентрации обнаруженных компонентов. Так, для аммиака минимально обнаружимая концентрация соответствовала 120, для метанола – 40 и для этанола – 50 мг/м^2 .

Полевые эксперименты

Целью полевого этапа экспериментов была экспериментальная оценка возможности определения веществ в открытой атмосфере с помощью ФСР с неохлаждаемым ФПУ и установление предельной дальности обнаружения паров.

При приведении экспериментов с созданием модельных облаков испытания начинались ранним утром в условиях минимальных яркостных контрастов трасс и продолжались до полудня, когда яркостные контрасты приземных трасс были максимальными. Мишенная обстановка создавалась с помощью специальной метательной машины с последующим принудительным распылом в воздухе вещества на высотах, не превышающих ~ 50 м. Испытания проводились на дистанциях до места распыла 300–1000 м. Угол возвышения для всех трасс наблюдений не превышал $10^\circ\text{--}12^\circ$ по отношению к горизонту. Температурный контраст в экспериментах составлял от 2 К при наблюдении на фоне земли и 5–6 К при наблюдении на фоне неба и при смешанных фонах.

Тестирование работы ФСР проводилось в режиме непрерывной записи результатов обнаружения и измеренных спектров в файл. При этом регистрировалась интегральная концентрация обнаруженного вещества, текущее время и коэффициент корреляции между экспериментальным спектром и спектром обнаруженного вещества из базы данных. Ведение поиска и обнаружение паров выполнялось как при работе прибора на штативе, так и при работе с рук.

На дальности 500 м обнаружены модельные облака паров при распыле 4 и 8 л 20%-ного раствора

аммиака, а также по 8 л 50%-ных растворов метилового, этилового и изопропилового спиртов. При дальности 1000 м надежно регистрировались пары аммиака при распыле 16 л 20%-ного раствора.

Результаты измерений иллюстрируют приведенные ниже экспериментальные графики. На рис. 4 приведены зависимости измеренных концентраций аммиака и коэффициента корреляции от времени при распыле 8 л 20%-ного раствора NH_3 на расстоянии 500 м. Рисунок 5 иллюстрирует аналогичные зависимости для распыла 8 л 50%-ного раствора метилового спирта. Как следует из этих графиков, на дальностях 500 м удастся не только регистрировать

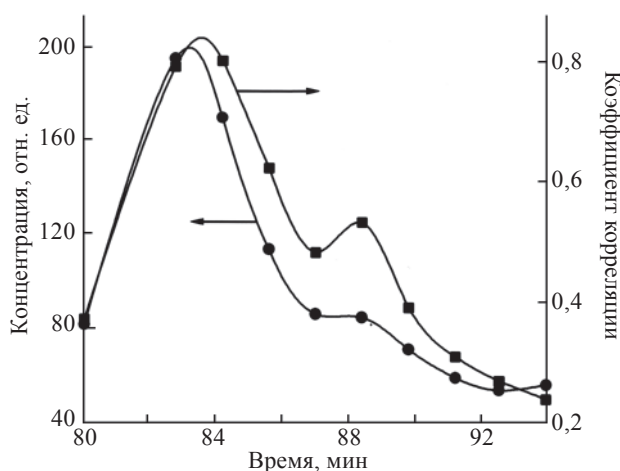


Рис. 4. Зависимости измеренной концентрации и коэффициента корреляции от времени при распыле 8 л 20%-ного раствора аммиака на расстоянии 500 м.

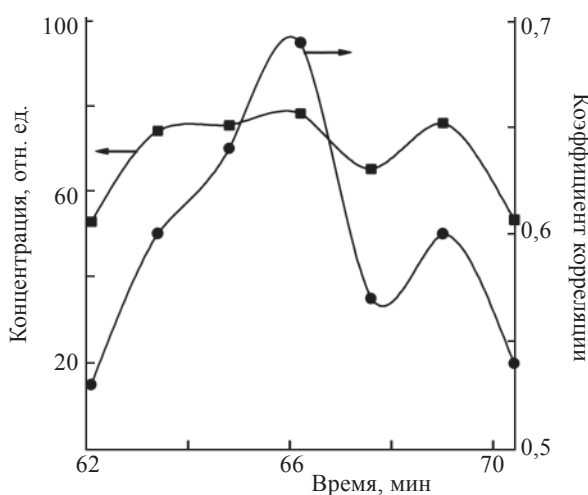


Рис. 5. Зависимости измеренной концентрации и коэффициента корреляции от времени при распыле 8 л 50%-ного раствора метанола на расстоянии 500 м.

сам факт наличия облака паров в открытой атмосфере, но и фиксировать изменение концентрации облака с течением времени.

Обнаружение утечек метана

Макет портативного ФСР был испытан на магистральных трубопроводах, газоперекачивающих станциях и газохранилищах для регистрации утечек метана. Испытания проводились в Московской области на газораспределительной станции (г. Троицк) и на подземном газохранилище (г. Щелково). В условиях открытых приземных трасс в дневное время была продемонстрирована возможность обнаружения искусственно создаваемых и естественных утечек метана на фоне различных подстилающих поверхностей. Дальность успешного обнаружения варьировалась в пределах 50–500 м. Для измерений использовалась спектральная база данных для метана, созданная непосредственно на объекте контроля.

Экспериментально были отработаны алгоритмы работы портативного ФСР для решения задач ручного и автоматического дистанционного контроля наличия метана в атмосферном воздухе над потенциально опасными объектами на примере подземного газохранилища.

Заключение

Выполненная разработка портативного фурье-спектрорадиометра с неохлаждаемым фотоприемным устройством и проведенные его лабораторные и полевые испытания подтверждают возможность создания полевого прибора, предназначенного для оперативного обнаружения и идентификации паров загрязняющих веществ в открытой атмосфере. Подобный прибор, обладая несколько меньшей чувствительностью, чем фурье-спектрорадиометры с криогенными фотоприемниками, тем не менее, за счет своих малых размеров, массы и энергопотребления может найти свою нишу среди пассивных дистанционных газоанализаторов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Дворук С.К., Корниенко В.Н., Кочиков И.В., Лельков М.В., Морозов А.Н., Светличный С.И., Табалин С.Е. Мониторинг загрязняющих веществ в атмосфере с помощью фурье-спектрорадиометра // Оптический журнал. 2004. Т. 71. № 5. С. 7–13.
2. Глаголев К.В., Морозов А.Н., Назаренко Б.П., Табалин С.Е., Чубурков А.В., Светличный С.И., Никитав С.Н., Рожнов А.В., Филиппов В.И., Григорьев А.А. Мониторинг открытой атмосферы с помощью фурье-

- спектрометра // Вест. МГТУ. Сер. Естеств. науки. 2005. № 3. С. 9–25.
3. Аксененко М.Д., Бараночников М.Л. Приемники оптического излучения. Справочник. М.: Радио и связь, 1987. 296 с.
 4. Manzardo O., Herzig H.P., Marxer C.R., de Rooij N.F. Miniaturized time-scanning Fourier spectrometer based on silicon technology // Opt. Lett. 1999. V. 24. № 23. P. 1705–1707.
 5. Ларцев И.Ю., Никитин М.С., Чеканова Г.В. Фотоэлектрические параметры КРТ фоторезисторов с термоэлектрическим охлаждением // Прикл. физ. 2003. № 4. С. 80–86.
 6. <http://www.nsk.su/~vostok/Fpu/MG32.html>.
 7. Межерис Р. Лазерное дистанционное зондирование / Пер. с англ. М.: Мир, 1987. 550 с.
 8. Сильверстейн Р., Басслер Г., Морил Т. Спектрометрическая идентификация органических соединений / Пер. с англ. М.: Мир, 1977. 590 с.
 9. Дворук С.К., Корниенко В.Н., Кочкиков И.В., Лельков М.В., Морозов А.Н., Поздняков В.А., Светличный С.И., Табалин С.Е. Обработка двусторонних интерферограмм с учетом собственного фонового излучения фурье-спектрометра // Опт. и спектр. 2002. Т. 93. № 5. С. 884–889.
-