



Применение спектральных приборов в оптическом производстве и научных исследованиях

Г. И. Кропотов¹, А. А. Шахмин¹, И. А. Каплунов²,
В. Е. Роголин³

¹ ООО «Тидекс», Санкт-Петербург, Россия

² Тверской государственный университет, Тверь, Россия

³ Институт электрофизики и электроэнергетики РАН,
Санкт-Петербург, Россия

Представлена современная приборная база и методики измерений оптически прозрачных материалов в широком спектральном диапазоне – от ультрафиолетового до терагерцевого. Особое внимание уделено терагерцевому диапазону – сравнительно новому направлению оптики, находящемуся на стыке с радиофизикой.

Ключевые слова: оптические измерения, спектральный контроль, оптические характеристики прозрачных материалов

Статья получена: 03.08.2023

Статья принята: 31.08.2023

ВВЕДЕНИЕ

При производстве оптических изделий (приборов, устройств различного назначения) все выпускаемые оптические элементы после изготовления должны проходить аттестацию по своим спектральным характеристикам [1]. Большинство современных производств располагают лабораториями (структурными подразделениями аналогичного типа), в которых проводят спектральные измерения оптических изделий из различных материалов, в том числе со сложными многослойными интерференционными оптическими покрытиями. В зависимости от специализации предприятий

Application of Spectral Devices in the Optical Engineering and Scientific Research

G. I. Kropotov¹, A. A. Shakhmin¹, I. A. Kaplunov², V. E. Rogalin³

¹ Tydex LLC, Saint Petersburg, Russia

² Tver State University, Tver, Russia

³ Institute of Electrophysics and Power Engineering of the
Russian Academy of Sciences, Saint Petersburg, Russia

The up-to-date tools, instruments and measurement methods for the optically transparent materials in a wide spectral range (from ultraviolet to terahertz) are presented. Particular attention is paid to the terahertz range, a relatively new area in optics being at the interface with radiophysics.

Keywords: optical measurements, spectral control, optical specifications of transparent materials

Article received: 03.08.2023

Article accepted: 31.08.2023

INTRODUCTION

During the production of optical devices (instruments, tools for various purposes), all produced optical elements must be certified in terms of their spectral specifications [1]. Most existent production facilities have the laboratories (structural subdivisions of a similar type) where the spectral measurements of optical products made of various materials are performed, including those with the comprehensive multilayer interference optical coatings. Depending on the business field of enterprises and the need for product control, it is possible to apply the special tools and devices providing measurements in various spectral ranges that can cover, in general, a wide spectral region, namely from ultraviolet to the millimeter (terahertz) wavelengths.

The main role of spectral instruments in the optical production is spectral control of the materials used and optical coatings applied to the products obtained. Prior to the final application of optical coatings, the structure and thickness of the coating layers are calculated to obtain the required spectral specifications, followed by the coating deposition on the test samples and mea-



и потребности в контроле конкретных изделий используют приборы, обеспечивающие проведение измерений в разных спектральных диапазонах, которые могут охватывать в целом широкую спектральную область – от ультрафиолетового до миллиметрового (терагерцевого) диапазона длин волн.

Основная роль спектральных приборов на оптическом производстве состоит в спектральном контроле используемых материалов и оптических покрытий, наносимых на изготавливаемые изделия. Для оптических покрытий перед итоговым нанесением производится расчет структуры и толщины слоев в покрытии для достижения необходимых спектральных характеристик с последующим напылением покрытия на тестовые образцы и измерением спектральных характеристик покрытий. Итоговое покрытие наносится только после того, как оно откалибровано и протестировано. В качестве стандартных образцов для измерения характеристик оптических покрытий на изделиях используются свидетели напыления из того же материала диаметром от 20 до 45 мм в виде плоскопараллельного окна с двумя полированными поверхностями или клинья с одной полированной и одной матовой поверхностью.

Исследовательские материаловедческие лаборатории организаций, занимающиеся синтезом оптических материалов, требуют наличия собственных приборов или возможностей выполнения измерений в специализированной лаборатории. Прежде всего в подобных лабораториях измеряют такие оптические характеристики как пропускание, отражение и коэффициент преломления в спектральном диапазоне, предназначенном для эксплуатации конечных изделий.

Целью настоящей работы является демонстрация возможностей измерений оптических характеристик в широком спектральном диапазоне на базе лаборатории оптической спектроскопии ООО «Тидекс» (г. Санкт-Петербург).

ПРИБОРЫ И ИХ ХАРАКТЕРИСТИКИ

Широкая область электромагнитного спектра от ультрафиолетового (УФ) до терагерцевого (ТГц) диапазона длин волн охватывает практически все ниши приборостроения, связанные с генерацией и детектированием излучений, с формированием и передачей изображений, с возможностью управления направлением распространением и преобразованием потоков электромагнитных волн и с иными, более многочисленными задачами науки и техники. Для исследований характери-

surement of the coating spectral properties. The final coating shall be applied only after its calibration and testing. As the standard samples for measuring the optical coatings properties of the products, the deposition witnesses made of the same material with a diameter of 20 to 45 mm shall be used in the form of a plane-parallel window with two polished surfaces or wedges with one polished surface and one matte surface.

The research materials science laboratories of the enterprises engaged in the synthesis of optical materials require their own tools and instruments or the ability to perform spectral measurements in a specialized laboratory. First of all, there is a need for such optical properties as transmission, reflection and refraction index in the spectral range designed for the operation of final products.

The purpose of this paper is to demonstrate the possibilities of spectral properties measurements in a wide spectral range on the basis of the optical spectroscopy laboratory of Tydex LLC (Saint Petersburg).

DEVICES AND THEIR SPECIFICATIONS

For measurements in a wide range of electromagnetic spectrum (from the ultraviolet to the terahertz wavelength range) covering almost all tool applications related to the radiation generation and detection, with the image formation and transmission, an ability to control the direction of propagation and transformation of electromagnetic wave flows, and many more research and technological issues, the following devices can be efficiently used:

- Wave spectrometer Photon RT by EssentOptics;
- Fourier spectrometer Vertex 70 by Bruker;
- Spatio-temporal THz spectrometer TERA K8 by Menlo Systems, the range of use of which is given in Table 1.

SPECTRAL MEASUREMENT PROCEDURE BY PHOTON RT

The measurements in the shortest wavelength regions (ultraviolet, visible and near IR) can be made using the Photon RT wave spectrophotometer (EssentOptics) (Figure 1). The spectrophotometer Photon RT is designed to measure the spectral transmittance, reflection, optical density of flat optical elements with a coating in the polarized and non-polarized light in the spectral emission range from 185 to 1700 nm. The original optical circuit of the device with a reference channel and a radiation receiver rotating around the sample allows to perform the measurements at various incidence and reflection angles to the sample surface. The minimum sample dimensions are 12×10 mm, the maximum diameter with the device cover closed is up to 120 mm.



стик оптических элементов в диапазоне УФ-ТГц длин волн современные материаловедческие лаборатории эффективно применяют следующие приборы:

- волновой спектрометр Photon RT компании EssentOptics;
- фурье-спектрометр Vertex 70 компании Bruker;
- пространственно-временной ТГц-спектрометр TERA K8 компании Menlo Systems.

Популярность эти приборы снискали, благодаря высокому разрешению, автоматизации процесса измерений и удобству использования при определении параметров оптических элементов самых разных размеров и форм, что обычно придает сложность при решении подобных задач. Диапазон использования приборов представлен в табл. 1.

МЕТОДИКА СПЕКТРАЛЬНЫХ ИЗМЕРЕНИЙ НА ПРИБОРЕ PHOTON RT

Измерения спектрального коэффициента пропускания, отражения, оптической плотности плоских оптических деталей с покрытием в поляризованном и неполяризованном свете в диапазоне от 185 до 1700 нм, охватывающем УФ-, видимую и ближнюю ИК-области спектра, можно провести на волновом спектрофотометре Photon RT (EssentOptics) (рис. 1). Оригинальная оптическая схема прибора с опорным каналом и приемником излучения, вращающимся вокруг образца, позволяют проводить измерения под различными углами падения и отражения луча к поверхности образца. Минимальный размер детали, параметры которой необходимо измерить, составляет 12×10 мм, максимальный диаметр – до 120 мм (с закрытой крышкой прибора). Спектральное разрешение до 0,3 нм и точность измерения до 0,01% соответствуют современным требованиям, предъ-

The spectral resolution up to 0.3 nm and measurement accuracy up to 0.01% meet the current requirements for the similar research tools (Table 2).

Applied capabilities of the PHOTON RT spectrophotometer:

- Spectral range from 185 nm to 1700 nm;
- Measurements in the polarized light from 220 nm to 1700 nm;
- Measurement of transmission T , T_s , T_p (for the angles 0–75°), calculation of $T(s+p)/2$, for a given light incidence angle;
- Measurement of absolute reflection R , R_s , R_p (for the angles 8–75°), calculation of $R(s+p)/2$, for a given light incidence angle;
- Measurement of the substrate material absorbance;
- Automatic measurement and calculation of the complex refractive index and layer thickness for single-layer homogeneous coatings;
- Measurement of the polarization and beam-splitting cubes;
- Automatic beam shift compensation when measuring the thick sample transmission at various angles;
- Calculation of the average R and T values in a given spectral range.

A deuterium discharge lamp, a halogen lamp, and a calibration mercury-argon lamp are used as the radiation sources. The dimensions of the light spot on the sample are 6×2 mm. The beam is collimated in the measurement channel, the beam divergence is $\pm 1^\circ$. The spectral measurements of the product transmission

Таблица 1. Рабочие спектральные диапазоны спектральных приборов

Table 1. Operating spectral ranges of spectral devices

Название прибора Name of the device	Диапазон длин волн Wavelength range
Photon RT EssentOptics	185–1 700 нм 185–1 700 nm
Bruker Vertex 70	0,67–670 мкм 0,67–670 μm
TERA K8 Menlo Systems	2–0,2 ТГц или 150–1 500 мкм 2–0,2 THz or 150–1 500 μm

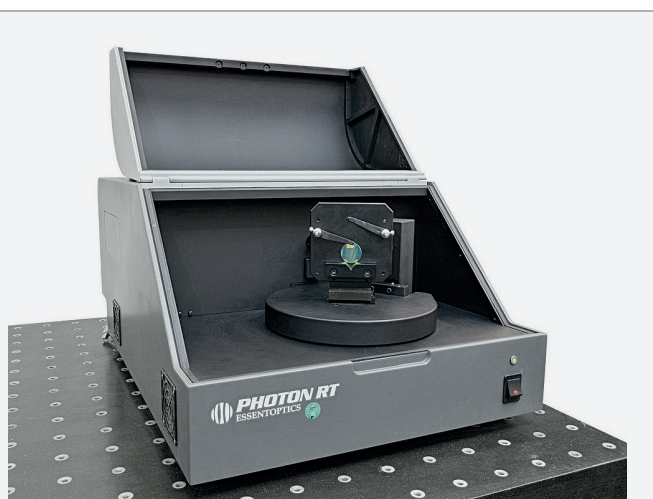


Рис. 1. Спектрофотометр PHOTON RT (EssentOptics) [2]

Fig. 1. Spectrophotometer PHOTON RT (EssentOptics) [2]



являемым к подобным приборам исследовательского класса (табл. 2).

Используемые возможности спектрофотометра PHOTON RT:

- спектральный диапазон от 185 нм до 1700 нм;
- измерения в поляризованном свете от 220 нм до 1700 нм;
- измерение пропускания T , T_s , T_p (для углов $0-75^\circ$), расчет $T(s+p)/2$, для заданного угла падения света;
- измерение абсолютного отражения R , R_s , R_p (для углов $8-75^\circ$), расчет $R(s+p)/2$, для заданного угла падения света;
- измерение поглощения материала подложки.
- автоматическое измерение и расчет комплексного показателя преломления и толщины слоя для однослойных однородных покрытий;
- измерение поляризационных и светоделительных кубиков;
- автоматическая компенсация смещения луча при измерении пропускания толстых образцов под различными углами;
- расчет средних значений R и T в заданном спектральном интервале.

В качестве источников излучения используются дейтериевая лампа, галогенная лампа, калибровочная ртутно-аргоновая лампа. Размер светового пятна, формируемого на образце, равен 6×2 мм. В измерительном канале луч является коллимированным, расходимость луча равна $\pm 1^\circ$. Спектральные измерения пропускания изделий производятся при заданном угле падения излучения на образец – от 0 до 75° градусов, а отражения – при угле падения от 8 до 75° градусов. При переходе от измерений пропускания к измерениям отражения для регистрации интенсивности света фотодетектор автоматически перемещается вокруг держателя образца на ось отраженного светового луча, держатель образца поворачивается на установленный угол к падающему излучению. Это позволяет проводить измерения коэффициентов пропускания и отражения в одной и той же локальной поверхностной зоне оптической детали, не вынимая дополнительно деталь из измерительного отсека. В качестве фонового сигнала измеряется пустой канал без образца как для измерений коэффициентов пропускания, так и отражения.

ПРОВЕДЕНИЕ ИЗМЕРЕНИЙ

Для управления прибором Photon RT, установки рабочих параметров измерений и вывода результатов измерений через компьютер используется

values are performed at a given radiation incidence angle to the sample (from 0 to 75°), and the reflection measurements are performed at an angle of incidence from 8° to 75° . When switching from the transmission measurements to the reflection measurements for the light intensity registration, the photodetector is automatically moved around the sample holder on the reflected light beam axis, the sample holder is rotated by a set angle to the incident radiation. Such design features makes it possible to measure the transmission and reflection coefficients in the same local surface area of an optical element without an ele-

Таблица 2. Характеристики прибора Photon RT

Table 2. Specifications of Photon RT

Диапазон измерений Spectral range	185–1 700 нм
Спектральное разрешение в указанном диапазоне Spectral resolution in the specified range	0,3 нм (185–330 нм) 0,6 нм (350–990 нм) 1,2 нм (990–1 650 нм)
Минимальный шаг сканирования Minimum scanning pitch	0,25 нм
Воспроизводимость длины волны Wavelength reproducibility	0,12 нм
Точность установки длины волны Wavelength accuracy	$\pm 0,24$ нм
Угол разворота образца при измерении пропускания Sample rotation angle for transmittance measurement	$0-75^\circ$
Угол разворота образца при измерении отражения Sample rotation angle for reflection measurement	$8-75^\circ$
Шаг перестройки угла поворота столика Adjustment step for the table rotation angle	$0,1^\circ$
Шаг перестройки угла поворота фотоприемника Adjustment step for the photodetector rotation angle	$0,1^\circ$
Точность установки угла поворота столика Setting accuracy of the table rotation angle	$0,05^\circ$
Размер светового пятна на образце Light spot size on the sample	6×2 мм
Угол расходимости луча Beam divergence angle	2°

программное обеспечение PhotonSoft. Согласно процедуре спектрометр после включения необходимо прогреть не менее 30 минут. Рабочие параметры, которые задаются перед измерением, включают в себя диапазон сканирования, шаг сканирования, количество усреднений, метод сглаживания, тип поляризации. Далее приступают к процессу калибровки спектрометра, который производится только после определения, что оптический канал пуст. По результатам калибровки на экране будет наблюдаться спектральная кривая со значением спектра 100% во всем установленном диапазоне. Следующим шагом является установка образца на предметный столик. Затем задается режим (отражение или пропускание) и угол поворота столика, после чего производится измерение спектра исследуемого образца (рис. 2). Результаты в виде спектральной кривой значений коэффициента пропускания или отражения выводятся в программе, обрабатываются, сохраняются в виде числовых данных и распечатываются в виде графиков (рис. 3).

МЕТОДИКА СПЕКТРАЛЬНЫХ ИЗМЕРЕНИЙ НА ПРИБОРЕ BRUKER VERTEX 70

При необходимости проведения измерений в NIR, MIR и FIR спектральных диапазонах, измерения производятся на фурье-спектрометре Bruker Vertex 70 (рис. 4). Спектрометры Vertex выделяются среди исследовательских ИК-фурье-спектрометров универсальностью, которую обеспечивает инновационная конструкция оптической системы. При этом для проведения измерений в различных частях ИК-диапазона используют разные комбинации источников и приемников излучения, а также сменные светоделители в интерферометре Майкельсона (табл. 3).

При стандартных измерениях на приборе Vertex 70 для диапазонов NIR, MIR устанавливается спектральное разрешение изме-

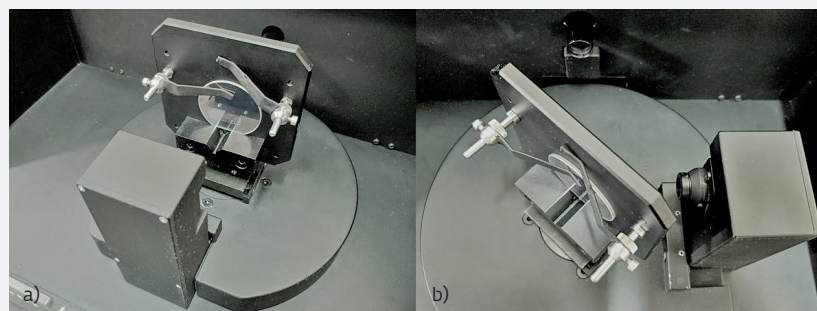


Рис. 2. Конфигурация источника, образца и приемника: а) измерение пропускания, б) измерение отражения под углом 45 градусов

Fig. 2. Source, sample and receiver configuration: a) transmission measurement, b) reflection measurement at an angle of 45 degree

ment removal from the measurement compartment. The background signal is measured as an empty channel without any sample, both for the transmission and reflection measurements.

EXECUTION OF MEASUREMENTS

The “PhotonSoft” software is used to control Photon RT, set the measurement parameters and display the measurement results on the computer screen. After initiation, the spectrometer needs to warm up for at least 30 minutes. Prior to the measurements, the necessary parameters shall be set, including the scanning range, scanning pitch, number of averagings, smoothing mode, polarization. Further, having determined that the optical channel is empty, the spectrometer shall be calibrated, according to the results of which a spectral curve will be observed on the screen, with a spectrum

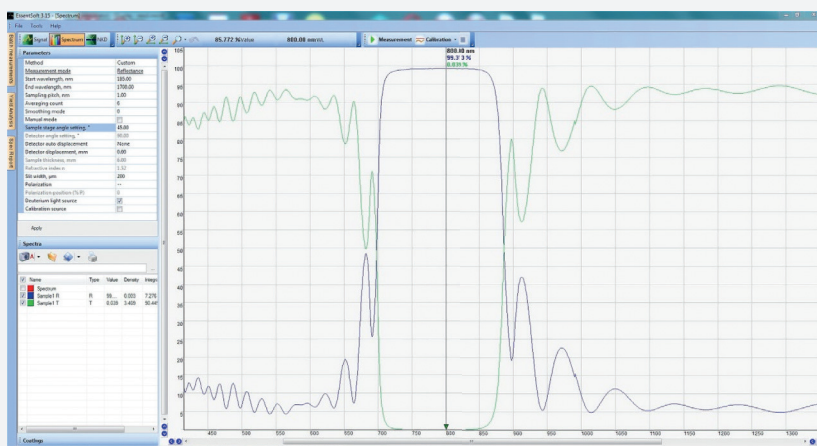


Рис. 3. Внешний вид интерфейса программы PhotonSoft

Fig. 3. Appearance of the PhotonSoft program interface

рений 8 см^{-1} , для диапазона FIR – 4 см^{-1} , для диапазона FFIR – 2 см^{-1} . При необходимости проведения высокоточных измерений существует возможность перейти к более высокому спектральному разрешению до $0,5 \text{ см}^{-1}$ в любом рабочем диапазоне.

Оптическая схема фурье-спектрометра построена на основе двухлучевого интерферометра, в котором при перемещении одного из зеркал меняется разность хода между интерферирующими лучами. Для уменьшения влияния внешних воздействий интерферометр модификаций Vertex 70 построен по схеме с зеркалами в виде угловых светоотражателей. Vertex 70 оборудован He-Ne лазером с длиной волны излучения 633 нм. Выходная номинальная мощность – 1 мВт. Лазер управляет позицией и скоростью подвижного зеркала интерферометра и используется для того, чтобы определять позиции выборки данных. В качестве источника NIR-излучения (ближнего ИК-излучения) используется вольфрамовая лампа в галогенной атмосфере. В качестве источника MIR- и FIR-излучения (среднего и дальнего ИК-излучения) используется глобар, источник излучения, представляющий собой U-образную дугу из карбида кремния, который раскаляется и излучает при пропускании через него электрического тока (сочетание двух слов – glow (свечение) и bar (панель) – породило технический термин «глобар» от составного английского слова globar). Для дальнего диапазона длин волн FFIR (до 670 мкм) используется непрерывный спектр излучения ртутной дуговой лампы. Лампа расположена в отдельном корпусе с водяным охлаждением, излучение лампы входит в спектрометр через внешнее окно в корпусе. Размер засвечиваемой области на образце как при измерении

Таблица 3. Характеристики прибора Bruker Vertex 70

Table 3. Specifications of Bruker Vertex 70

Диапазон измерений Spectral range	Общий (0,67–670 мкм) NIR (0,67–8 мкм) MIR (1,33–27 мкм) FIR (14–335 мкм) FFIR (185–670 мкм)
Спектральное разрешение Spectral resolution	$0,5\text{--}8 \text{ см}^{-1}$
Точность волнового числа Wave number accuracy	$0,01 \text{ см}^{-1}$ на 2000 см^{-1}
Фотометрическая точность Photometric accuracy	0,1% T
Отношение сигнал/шум Signal to noise ratio	>7000:1

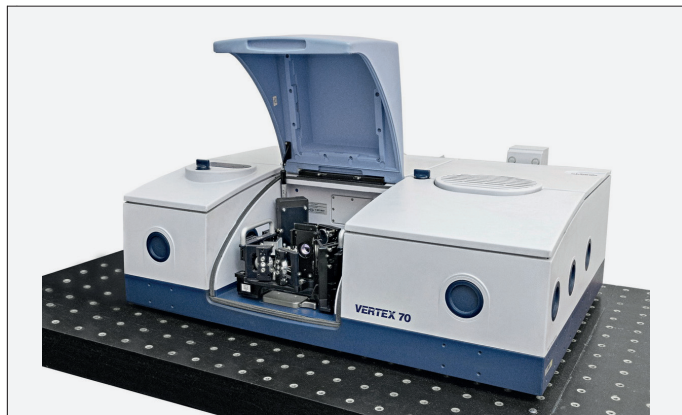


Fig. 4. Fourier spectrometer Vertex 70 with an attachment to measure the reflection spectrum from the sample [2]

Рис. 4. Фурье-спектрометр Vertex 70 с приставкой для измерения спектра отражения от образца [2]

value of 100% in the entire set range. The next stage is to place the sample on the object table, then set the mode (reflection or transmission) and the table rotation angle, then the spectrum of sample under study shall be measured (Figure 2). The results in the form of a spectral curve of transmittance or reflectance values are displayed in the program, processed, stored as the numerical data and printed as the graphs (Figure 3).

SPECTRAL MEASUREMENT PROCEDURE BY BRUKER VERTEX 70

If it is necessary to perform the measurements in the NIR, MIR and FIR spectral ranges, one can use the Bruker Vertex 70 Fourier spectrometer (Figure 4). The Vertex spectrometers stand out from the research FTIR spectrometers due to the versatility provided by the innovative optical system design. In this case, the appropriate combinations of radiation sources and receivers are used in various parts of the infrared range, as well as the replaceable beam splitters in the Michelson interferometer (Table 3).

When performing the standard measurements by Vertex 70, the spectral resolution of measurements for the NIR, MIR ranges is set to 8 см^{-1} , for the FIR range – 4 см^{-1} , for the FFIR range – 2 см^{-1} ; if the high-precision measurements are required, it is possible to set the spectral resolution up to $0,5 \text{ см}^{-1}$ in any operating range.

The basis of the Fourier spectrometer is a double-beam interferometer: when one of the mirrors is moved, the path difference between the interfering beams is changed. To reduce the external influences, the Vertex 70 interferometer is designed according to the circuit with mirrors in the form of corner reflectors. Vertex 70 is equipped with a 633 nm HeNe laser. The rated power



пропускания, так и отражения составляет 1 см в диаметре.

Спектрометр оборудован DLATGS детектором DigiTest со встроенным предусилителем. Эта сборка детектора содержит аналого-цифровой преобразователь, который преобразовывает аналоговый сигнал в цифровой непосредственно в детекторе. Этот цифровой сигнал передается схеме обработки данных блока электроники спектрометра. Стандартный детектор для NIR- и MIR-диапазонов – пироэлектрический RT-DLaTGS w/KBr детектор, который перекрывает диапазон спектра от 12,000 до 250 см^{-1} , функционирует при комнатной температуре и имеет чувствительность $D^* > 2 \cdot 10^8$ ($\text{см Гц}^{1/2} \text{Вт}^{-1}$). В качестве приемника для FIR и FFIR областей используется RT-DTGS w/PE детектор, перекрывающий 700–10 см^{-1} область спектра с чувствительностью $D^* > 4 \times 10^8$ ($\text{см Гц}^{1/2} \text{Вт}^{-1}$) и также работающий без охлаждения при комнатной температуре.

Источники, детекторы и светоделители на Vertex 70 имеют электронное кодирование для распознавания прибором, соответствующие параметры загружаются автоматически. Техническое состояние всех узлов спектрометра постоянно контролируется системой самодиагностики и информирования через управляющую программу, что упрощает работу со спектрометром и позволяет диагностировать неисправности.

Все функции управления фурье-спектрометром Vertex 70 выполняются в программе OPUS от компании Bruker, которая обеспечивает: регистрацию интерферограмм; Фурье-преобразование интерферограмм в спектр с использованием фазовой коррекции и аподизации; математическую обработку спектров; представление данных в графическом и цифровом виде на экране монитора с сохранением в файл. Также в программе можно проводить настройку и тестирование состояния прибора и получать отчеты для аттестации фурье-спектрометра.

Используемые возможности фурье-спектрометра VERTEX 70:

- спектральный диапазон от 0,670 мкм до 670 мкм;
- измерение пропускания T в сфокусированном на образце или коллимированном луче;
- измерение отражения R для углов 11–85°;
- измерение в поляризованном свете во всех диапазонах;
- расчет средних значений R и T в заданном спектральном интервале;

output is 1 MW. The laser controls the position and speed of the interferometer's moving mirror and is applied to determine the data sample positions. The source of NIR radiation (near infrared radiation) is a tungsten lamp in a halogen atmosphere. A globar lamp is used as a source of MIR and FIR radiation (medium and far infrared radiation) being a U-shaped silicon carbide arc that heats up and radiates when an electric current is passed. For the far FFIR wavelength range (up to 670 μm), a continuous spectrum of mercury arc lamp radiation is used. The lamp is located in a separate water-cooled housing; the lamp radiation enters the spectrometer through an external opening in the case. The illuminated area size on the sample, both during the transmission and reflection measurements, has the diameter of 1 cm.

The spectrometer is equipped with a DigiTest DLATGS detector with a built-in preamplifier. Such a detector assembly contains an A/D converter that converts the analog signal to the digital one directly in the detector. This digital signal is transmitted to the data processing circuit of the spectrometer's electronics module. The standard detector for NIR and MIR bands is the pyroelectric RT-DL-TGS w/KBr detector that covers the spectral range from 12,000 to 250 см^{-1} , operates at the room temperature and has a sensitivity of $D^* > 2 \times 10^8$ ($\text{см Гц}^{1/2} \text{Вт}^{-1}$). An RT-DTGS w/PE detector is applied as a receiver for the FIR and FFIR bands, covering the 700–10 см^{-1} spectral region with a sensitivity of $D^* > 4 \times 10^8$ ($\text{см Гц}^{1/2} \text{Вт}^{-1}$) and operating without cooling at the room temperature.

The Vertex 70 sources, detectors and beamsplitters are electronically coded to be recognized by the devices, and the appropriate parameters are loaded automatically. The technical condition of all spectrometer's modules is constantly controlled by the self-diagnostics and information system through the control program that simplifies operation of the spectrometer and allows diagnosing any malfunctions.

All control functions of the Vertex 70 Fourier spectrometer are performed in the OPUS program by Bruker that provides the following: registration of interferograms; Fourier transform of interferograms into the spectrum using the phase correction and apodization; mathematical spectra processing; data presentation in the graphical and digital form on the display with saving as a file. Moreover, it is possible configure and test the device condition and receive reports for the Fourier spectrometer certification in the program.

Applied capabilities of the VERTEX 70 Fourier spectrometer:

- Spectral range from 0.670 μm to 670 μm ;
- Measurement of transmission T in a sample-focused or collimated beam;

- математические преобразования спектральных кривых R и T;
- определение степени поляризации и экстинкции для поляризаторов;
- определение эллиптичности волновых пластин из кристаллического кварца;
- объединение спектров со всех спектральных диапазонов Vertex 70 и других спектральных приборов.

Прибор оснащен набором дополнительных приставок для измерения пропускания в сфокусированном луче, пропускания в коллимированном луче, зеркального отражения при минимальном фиксированном угле падения луча 11 градусов, зеркального отражения с переменным углом падения луча от 13 до 85 градусов (рис. 5). Каждая приставка может быть дополнена держателем для вращения поляризаторов с шагом 0,5° с управляемым мотором, а также имеется возможность установить поляризатор излучения до и/или после измеряемого образца для измерений в поляризованном свете во всем рабочем диапазоне длин волн.

Vertex 70 снабжен системой продувки сухим воздухом; кюветный отсек и внутренняя часть корпуса спектрометра продуваются отдельно. Продувка камер сухим воздухом и их осушка с помощью силикагеля позволяет существенным образом уменьшить негативное влияние углекислого газа и паров воды, находящихся в воздухе, на результаты измерения спектров.

ПРОВЕДЕНИЕ ИЗМЕРЕНИЙ

Для каждого спектрального диапазона измерений на приборе Vertex 70 устанавливаются необходимые источник излучения, светоделитель и окна во фланцах на внутренних стенках кюветного отсека, выбирается приемник излучения. После чего в программном обеспечении OPUS выбираются необходимые параметры измерений для конкретного диапазона.

При измерении пропускания образца сначала измеряется интерферограмма пустого канала в отсутствие образца, которая принимается в каче-

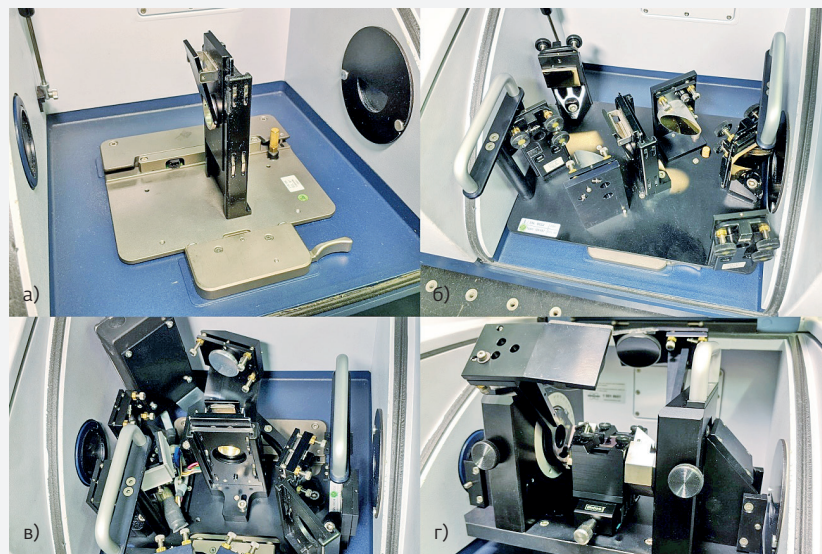


Рис. 5. Используемые приставки: а) Стандартная приставка для измерения пропускания; б) Приставка с коллимированным лучом для измерения пропускания; в) Приставка для измерения отражения под углом 11°; д) Приставка для измерения отражения при углах от 13 до 85°

Fig. 5. Attachments used: a) Standard attachment for transmission measurement; b) Attachment with a collimated beam for transmission measurement; c) Attachment for reflection measurement at an angle of 11°; d) Attachment for reflection measurement at the angles from 13 to 85°

- Measurement of reflection R for the angles 11–85°;
- Measurement in the polarized light in all bands;
- Calculation of the average R and T values in a given spectral range;
- Mathematical transformations of the R and T spectral curves;
- Determination of the polarization and extinction degree for the polarizers;
- Determination of ellipticity of the wave plates made of crystalline quartz;
- Spectra consolidation from all spectral ranges of Vertex 70 and other spectral tools.

The device is equipped with a set of additional attachments to measure transmission in a focused beam, transmission in a collimated beam, specular reflection at a minimum fixed beam incidence angle of 11 degrees, specular reflection at a variable beam incidence angle from 13 to 85 degrees (Figure 5). Each attachment can be supplemented with a holder for polarizer rotation by controlled motor with 0.5° increments. Moreover, it is possible to install a radiation polarizer before and/or after the measured sample for measurements in the polarized light over the entire operating wavelength band.

Vertex 70 is equipped with a dry air purging system; the sample compartment and internal part of the spec-

стве фоновый или опорный сигнала, затем измеряется интерферограмма исследуемого образца. В результате обратного Фурье-преобразования данных интерферограмм восстанавливаются спектры образца и фоновый сигнал. Для устранения артефактов преобразования автоматически применяются процедура аподизации и фазовой коррекции. Путем деления первого спектра на второй определялся спектр пропускания образца. В программном обеспечении автоматически исключается спектральная зависимость интенсивности источника излучения, спектральные характеристики светоделиителя и других элементов оптического тракта, спектр чувствительности детектора. В программном обеспечении присутствует возможность исключить из итогового спектра атмосферное поглощение паров воды и CO_2 .

При измерении отражения в качестве фона измеряется интерферограмма отраженного сигнала от золотого зеркала, устанавливаемого на место образца, а затем измеряется интерферограмма отраженного сигнала от самого исследуемого образца. В результате обратного Фурье-преобразования данных интерферограмм восстанавливаются спектры образца и фоновый сигнал. Результат деления спектра образца на фоновый сигнал затем умножается на известный спектр отражения эталонного зеркала с зеркальным золотым покрытием (рис. 6). В диапазоне длин волн, превышающих 10 мкм, коэффициент отражения зеркала считается постоянным ($R_{\text{Au}} = 98,5\%$). Число циклов сканирования для измерения фоновый сигнал и образца устанавливается равным 32, по окончании измерений все циклы усредняются в один спектр.

Как видно из табл. 3, спектральные диапазоны NIR, MIR, FIR и FFIR частично перекрываются. Объединение отдельных спектров в единый спектр, охватывающий диапазон 0,670–670 мкм, осуществляется с помощью функции «Merge Spectra» программного пакета OPUS от компании Bruker (рис. 7). Итоговые результаты измерений в виде спектральной кривой значений коэффициента пропускания или отражения сохраняются в виде числовых данных и распечатываются в виде графиков.

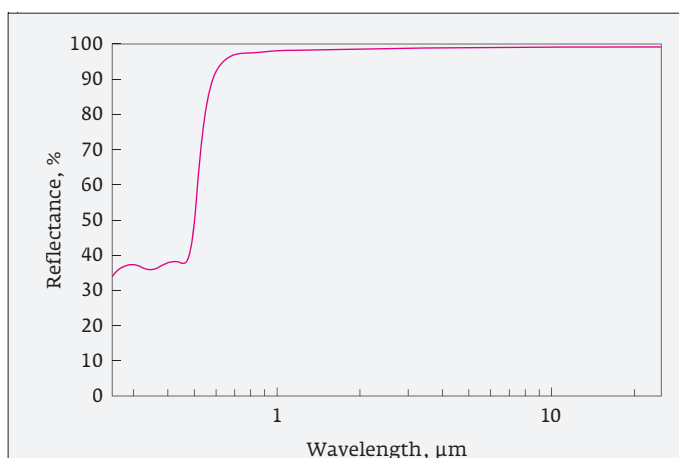


Рис. 6. Спектр отражения эталонного зеркала с зеркальным золотым покрытием

Fig. 6. Reflection spectrum of a reference mirror with specular gold coating

trometer case are purged separately. The chamber purging with dry air and drying with silica gel can significantly reduce the negative impact of carbon dioxide and water vapor in the air on the spectrum measurement results.

EXECUTION OF MEASUREMENTS

The necessary radiation source, beam splitter and windows in the flanges on the inner walls of the sample compartment are installed on Vertex 70 for each spectral measurement range, and a radiation receiver is selected. After that, the required measurement parameters for a specific band are selected in the OPUS software.

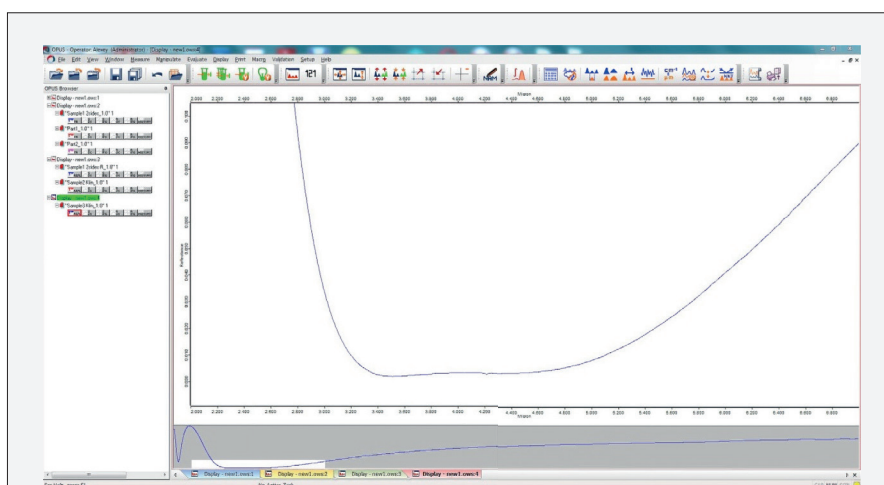


Рис. 7. Внешний вид интерфейса программы OPUS Bruker

Fig. 7. Interface appearance of the OPUS Bruker program

МЕТОДИКА СПЕКТРАЛЬНЫХ ИЗМЕРЕНИЙ НА ПРИБОРЕ TERA K8

Для работы в более длинноволновом диапазоне (до $\lambda=1500$ мкм) используется метод ТГц-спектроскопии с разрешением по времени (THz time-domain spectroscopy, THz-TDS). Измерения проводятся на установке TERA K8 THz-TDS system (Menlo Systems) (рис. 8). ТГц-спектрометр TERA K8 представляет собой законченное решение для проведения пространственно-временной ТГц-спектроскопии. Открытая конструкция позволяет использовать данный спектрометр в различных научных применениях. В состав TERA K8 входит перестраиваемый фемтосекундный лазер накачки с длиной волны 780 нм или 1560 нм, оптическая линия задержки, ТГц-эмиттер и два детектора, ТГц-оптика и компьютер со специализированным программным обеспечением для обработки полученных данных.

Техника спектроскопии с временным разрешением основана на когерентном детектировании импульсов ТГц-излучения, прошедшего или отраженного от исследуемого образца с помощью одного и того же лазерного импульса. Важной отличительной особенностью этой методики является возможность с высоким разрешением измерять электрическое поле терагерцевого импульса, несущего информацию не только об амплитуде, как в случае фурье-спектроскопии, но и о фазе сигнала.

Ультракороткий лазерный импульс разделяется на импульс накачки и зондирующий импульс. Импульс накачки используется для генерации терагерцевого импульса, который образуется в результате воздействия лазерного излучения на фотопроводящую антенну. Зондирующий лазерный импульс взаимодействует с определенным участком терагерцевого импульса в детекторе. С помощью механической линии задержки изменяется время прихода зондирующего импульса на детектор, относительно импульса накачки, в результате сканирования интервала временной задержки между зондирующим импульсом и импульсом накачки измеряются разные участки импульса с временным разрешением, соответствующим длительности зондирующего импульса. Таким образом, в детекторе электрическое поле терагерцевого импульса регистрируется как функция временной задержки зондирующего импульса и измеряется вся временная форма терагерцевого импульса.

Для генерации и детектирования широкополосного ТГц-излучения используются полупроводни-

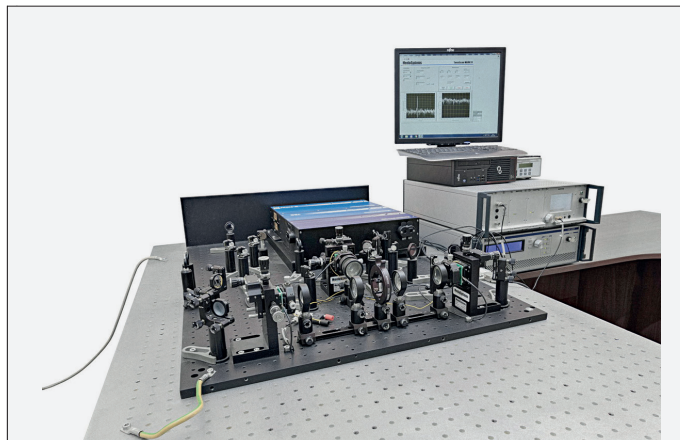


Рис. 8. Внешний вид THz-TDS спектрометра TERA K8 (Menlo Systems) [2]

Fig. 8. Appearance of the TERA K8 THz-TDS spectrometer (Menlo Systems) [2]

When measuring the sample transmission, it is necessary to measure the empty channel interferogram in the absence of a sample. It is taken as a background or reference signal, then the interferogram of sample under study is measured. As a result of the inverse Fourier transform of these interferograms, the spectra of sample and background signal are restored. The apodization and phase correction procedures are automatically applied to eliminate the transformation artifacts. By dividing the first spectrum by the second, the transmission spectrum of the sample is determined. The software automatically excludes the spectral dependence of the radiation source intensity, spectral properties of the beam splitter and other optical system elements, and sensitivity spectrum of the detector. The software is able to exclude the atmospheric absorption of water vapor and CO₂ from the final spectrum.

When measuring reflection, the interferogram of reflected signal from the gold mirror installed in place of the sample, is measured as a background, and then interferogram of the reflected signal from the sample is measured. As a result of the inverse Fourier transform of these interferograms, the spectra of sample and background signal are restored. The result of dividing the sample spectrum by the background signal is then multiplied by the well-known reflectance spectrum of the reference mirror with specular gold coating (Figure 6). In the wavelength band exceeding 10 μm , the mirror reflectance is assumed to be constant ($R_{\text{Au}}=98.5\%$). The number of scanning cycles to measure the background signal and the sample is set equal to 32. Upon completion of measurements, all cycles are averaged into one spectrum.



ковые антенны TERA8-1 LT-GaAs, возбуждаемые фемтосекундным лазером. ТГц-эмиттер и детектор имеют микрополосковую антенну фоторезистора, выращенную на GaAs (LT-GaAs) подложке при низкой температуре. Встроенная полусферическая кремниевая линза, установленная на платформе XY, собирает и коллимирует ТГц-излучение. Геометрия фотосопротивления антенны, параметры кремниевых линз, а также свойства эпитаксиальных слоев LT-GaAs оптимизированы для максимальной эффективности выходного ТГц-излучения, сохраняя при этом оптимальную пропускную способность. Характеристики прибора TERA K8 Menlo Systems представлены в табл. 4.

Используемые возможности THz-TDS спектрометра TERA K8:

- спектральный диапазон от 150 мкм до 1500 мкм;
- измерение пропускания T в сфокусированном на образце или коллимированном луче;
- измерение отражения R под углом 45° ;
- измерение в поляризованном свете;
- полное амплитудное и фазовое детектирование;
- определение степени поляризации и экстинкции для поляризаторов;
- определение эллиптичности волновых пластин из кристаллического кварца;
- определение показателя преломления материалов;
- получения ТГц-зображения.

Просторная зона для образцов позволяет легко интегрировать дополнительное оборудование, например, поляризаторы излучения, ротаторы, специальные держатели для образцов с нагревательными или охлаждающими элементами, механические подвижки образцов, синхронизированные приемники излучения. Для получения ТГц-изображения в данном спектрометр используется специальный блок TERAImage, который включает в себя двухкоординатную моторизованную подвижку с держателем образца и программное обеспечение для получения и реконструкции изображений.

ПРОВЕДЕНИЕ ИЗМЕРЕНИЙ

В случае измерения спектра пропускания образца излучающая и приемная антенны располагаются на одной линии и одной высоте, на пути ТГц-импульса излучения установлены 4 линзы из ТРХ с фокусным расстоянием 54 мм (ТРХ – термопластичный полиолефин, прозрачен во всем ТГц-диапазоне, ТРХ является торговой маркой японской химической компании Mitsui Chemicals).

Таблица 4. Характеристики прибора TERA K8 Menlo Systems

Table 4. Specifications of TERA K8 Menlo Systems

Диапазон сканирования Spectral range	2,5–0,2 ТГц (150–1500 мкм)
Спектральное разрешение Spectral resolution	1 ГГц
Динамический диапазон Dynamic range	60 дБ
Перестраиваемый фемтосекундный лазер накачки Tunable femtosecond pump laser	Импульс длина волны 780 нм/1560 нм, длительность 85 фс, частота 100 МГц, мощность 30 мВт Pulse wavelength 780 nm/1560 nm, duration 85 fs, frequency 100 MHz, power 30 mW
Диапазон сканирования Scanning range	> 850 пс
Скорость сканирования Scanning speed	до 20 Гц
Режим сканирования Scanning mode:	быстрый или пошаговый fast or step by step

Table 3 shows that the NIR, MIR, FIR and FFIR spectral bands are overlapped. The merging of individual spectra into a single spectrum covering the range from 0.670 to 670 μm is performed using the Merge Spectra function of the OPUS software by Bruker (Figure 7). The final measurement results in the form of a spectral curve of transmittance or reflectance values are stored as the numerical data and printed as the graphs.

SPECTRAL MEASUREMENT PROCEDURE BY TERA K8

In order to work in a longer wavelength band (up to $\lambda=1500 \mu\text{m}$), the THz time-domain spectroscopy method (THz-TDS) is applied. The measurements are performed using a TERA K8 THz-TDS system (Menlo Systems) setup (Figure 8). The TERA K8 THz spectrometer is a turnkey solution for the spatio-temporal THz spectroscopy. The open design allows this spectrometer to be used in a variety of scientific fields. TERA K8 includes a tunable femtosecond pump laser with a wavelength of 780 nm or 1560 nm, an optical delay line, a THz emitter and two detectors, the THz optical elements, and a computer with the specialized software for the obtained data processing.

Конфигурация этих линз и их положение на измерительное рельсе выстраивается таким образом, чтобы излучение фокусировалось в минимальную апертуру в месте расположения образца и передавало максимальную мощность от излучающей антенны к приемной антенне. Минимальная апертура, в которую удастся сфокусировать излучение, составляет 5 мм. В случае измерения спектра отражения от образца конфигурация излучающей и приемной антенны меняется, они устанавливаются под углом 90 градусов друг к другу. Образец устанавливается в точку фокусировки под углом 45 градусов к падающему излучению. Таким образом, измерение отражения от образца осуществляется только под углом 45 градусов относительно нормали к поверхности образца. В схеме прибора используется две приемные антенны: одна для измерения пропускания, а другая для измерения отражения, что позволяет не перестраивать прибор при смене режима измерений (рис. 9).

Временные зависимости фототока приемной антенны измеряются с помощью программы K8 TeraScan, поставляемой со спектрометром (рис. 10). Поиск временной формы импульса, настройка наилучшего положения линз на оптической линии, а также тонкая подстройка положения кремниевых линз излучающей и приемной антенны осуществляются с помощью функции быстрого сканирования линии задержки. Далее в программе TeraScan задаются параметры сканирования, и производится измерение временной зависимости амплитуды ТГц-импульса. Для получения спектральной характеристики исследуемого образца в случае измерения сигнала пропускания в качестве фона измеряется волновая форма импульса излучения, прошедшего через пустой канал. Затем измеряется волновая форма импульса, прошедшего через образец, помещенный в точку фокуса фокусирующей линзы. В случае измерений сигнала отражения в качестве фона измеряется отражение волновой формы импульса от зеркала с золотым покрытием, зеркало устанавливается в то же положение, что и измеряемый образец.

Обратное Фурье-преобразование временной формы импульса измеренного фона и образца производится с помощью программы TeraMat, результаты

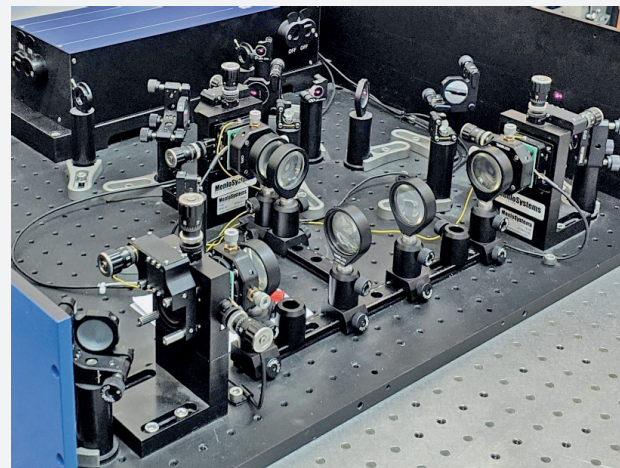


Рис. 9. Конфигурация оптической линии для измерений пропускания и отражения на Tera K8. (Образец устанавливается в центре, слева излучающая ТГц антенна, справа детектор ТГц излучения при измерении пропускания, сверху детектор ТГц излучения при измерении отражения)

Fig. 9. Optical line configuration for transmission and reflection measurements by Tera K8 (the sample is installed in the center, a THz radiating antenna is on the left, a THz radiation detector for transmission measurement is on the right, a THz radiation detector for reflection measurement is on the top)

The time-domain spectroscopy method is based on the coherent detection of terahertz radiation pulses transmitted or reflected from the sample under study using the same laser pulse. An important distinctive feature of this method is the ability to measure the electric field of a terahertz pulse with high resolution. Such

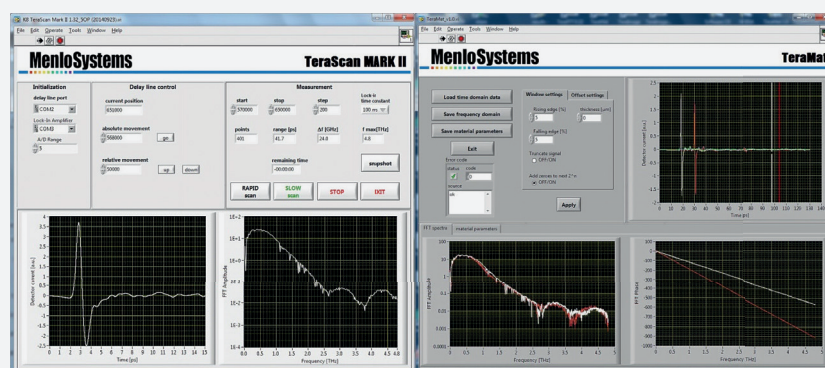


Рис. 10. Внешний вид интерфейса программ TeraScan, TeraMat Menlo Systems
Fig. 10. Interface appearance of the TeraScan, TeraMat Menlo Systems software



сохраняются в файл в цифровом виде. Также в этой программе можно провести расчет показателя преломления материала образца. Дальнейшая обработка результатов измерений заключается в делении сигнала образца на сигнал от фона и возведении величины в квадрат, чтобы преобразовать спектральную зависимость амплитуды электрического поля электромагнитной волны в спектр интенсивности излучения. Для получения полного спектра от 185 нм до 1500 мкм все спектры с трех приборов подготавливаются и импортируются в программу OPUS и сшиваются с помощью специальной функции «Merge Spectra».

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Представленные приборы и методики проведения с их помощью спектральных измерений позволяют реализовывать исследовательские задачи по изучению оптических характеристик материалов, перспективных для использования в технике, работающей в различных спектральных диапазонах (от УФ до ТГц) [3–21].

Оптические изделия, компоненты оптических систем и приборы для науки и промышленности, в производстве которых для получения спектральных характеристик используются рассмотренные приборы, представлены на сайте ООО «Тидекс» (г. Санкт-Петербург) [2]. Современная приборная база лаборатории позволяет вести отработку технологических процессов производства оптических элементов и деталей терагерцевого диапазона – сравнительно новой рыночной ниши, демонстрирующей высокие темпы инноваций.

REFERENCES

1. **Okatov M. A.** *Optical Technician's Handbook*. – St. Petersburg: Politekhnik. 2004. 679 p. ISBN 5-7325-0236-X. (In Russ.).
Окатов М. А. *Справочник технолога-оптика*. – СПб.: Политехника. 2004. 679 с. ISBN 5-7325-0236-X.
2. <http://www.tydexoptics.com>.
3. **Kropotov G. I., Rogalin V. E., Kaplunov I. A., Shakhmin A. A., Filin S. A., Bulanov A. D.** Isotopic Shift in the IR of Germanium Single Crystals. *Optics and Spectroscopy*. 2023; 131(6): 872–876.
Кропотов Г. И., Роголин В. Е., Каплунов И. А., Шахмин А. А., Филин С. А., Буланов А. Д. Изотопический сдвиг ИК полос поглощения монокристаллов германия. *Оптика и спектроскопия*. 2023; 131(6): 888–892. DOI: 10.21883/OS.2023.06.55926.4334-22.
4. **Kropotov G. I., Bulanov A. D., Rogalin V. E., Kaplunov I. A., Shakhmin A. A.** Dependence of the position of phonon ir absorption bands of germanium isotopes on their mass number. *J. Doklady Physics*. 2023; 511: 10–15. (In Russ.).
Кропотов Г. И., Буланов А. Д., Роголин В. Е., Каплунов И. А., Шахмин А. А. Зависимость положения фононных полос ИК поглощения изотопов германия от их массового числа. *ДАН*. 2023; 511: 10–15. DOI: 10.31857/S2686740023040077.
5. **Grebenchukov A. N., Kropotov G. I., Khodzitsky M. K., Ivanova V. I., Suslov A. V.** Broadband terahertz isolator. *IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology*. 2022; 12(1): 81–86. DOI: 10.1109/THZ.2021.3122580.
6. **Kaplunov I. A., Kropotov G. I., Rogalin V. E. and Shakhmin A. A.** pulse provides information not only in relation to the amplitude, as in the case of Fourier spectroscopy, but also in relation to the signal phase.
The ultrashort laser pulse is divided into a pump pulse and an probe pulse. The pump pulse is used to generate a terahertz pulse being formed as a result of the laser radiation impact on a photoconductive antenna. The probe laser pulse interacts with a certain section of the terahertz pulse in the detector. By using the mechanical delay line, the arrival time of the probe pulse at the detector is changed in relation to the pump pulse; as a result of scanning the time delay interval between the probe pulse and the pump pulse, various pulse sections are measured with a time resolution corresponding to the probe pulse duration. Thus, the electric field of terahertz pulse is recorded in the detector as a time delay function of the probe pulse, and the entire temporal shape of the terahertz pulse is measured.
To generate and detect the broadband THz radiation, it is possible to apply the TERA8-1 LT-GaAs semiconductor antennas excited by a femtosecond laser. The THz emitter and detector have a microstrip photoresistor antenna grown on a GaAs (LT-GaAs) substrate at low temperature. The terahertz (THz) radiation is obtained and collimated by a built-in hemispherical silicon lens mounted on the XY platform. The antenna photoresistance geometry, silicon lens parameters, and properties of the LT-GaAs epitaxial layers are optimized for the maximum terahertz (THz) output efficiency while maintaining the optimal bandwidth. The specifications of TERA K8 Menlo Systems are given in Table 4.
Applied capabilities of the TERA K8 THz-TDS spectrometer:
 - Spectral range from 150 μm to 1500 μm ;
 - Measurement of transmission T in a sample-focused or collimated beam;
 - Measurement of reflection R at an angle of 45° ;
 - Measurement in the polarized light;
 - Full amplitude and phase detection;
 - Determination of the polarization and extinction degree for the polarizers;
 - Determination of ellipticity of the wave plates made of crystalline quartz;
 - Determination of the refractive index of materials;
 - THz image acquisition.The spacious sample area allows easy integration of additional equipment such as the polarizers, rotators, special sample holders with the heating or cooling elements, mechanical sample advancers, or synchronized radiation receivers. To obtain a THz image, this spectrometer applies a special TERAImage unit including a two-dimensional motorized slider with a sample holder and software for the image acquisition and reconstruction.



Transmittance of CsI, AgCl, KRS-5, and KRS-6 Crystals in the Terahertz

Range. *Optics and Spectroscopy*. 2021; 129(6): 872–876. DOI: 10.1134/S0030400X21060059. Каплунов И. А., Кропотов Г. И., Роголин В. Е., Шахмин А. А. Пропускание кристаллов CsI, AgCl, KPC-5, KPC-6 в терагерцовой области спектра. *Оптика и спектроскопия*. 2021; 129(6): 773–777. DOI: 10.21883/OS.2021.06.50992.1831-21.

7. **Kaplunov I. A., Kropotov G. I., Rogalin V. E., Shakhmin A. A.** Optical properties of some crystalline fluorides in the terahertz region of the spectrum. *Optical Materials*. 2021; 115: 111019 DOI: 10.1016/j.optmat.2021.111019.
8. **Kaplunov I. A., Kropotov G. I., Rogalin V. E., Shahmin A. A.** On the Transparency of Alkali-Halide Crystal in the Terahertz Spectral Range. *Optics and Spectroscopy*. 2020; 128(10): 1583–1587. DOI: 10.1134/S0030400X20100136. Каплунов И. А., Кропотов Г. И., Роголин В. Е., Шахмин А. А. О прозрачности щелочно-галогидных кристаллов в терагерцовой области спектра. *Оптика и спектроскопия*. 2020; 128(10): 1473–1477. DOI: 10.21883/OS.2020.10.50017.128-20.
9. **Kaplunov I., Kropotov G., Rogalin V., Shahmin A.** Optical properties of alkali halide crystals. *J. Physics: Conf. Ser.* 2020; 1697: 012253. DOI: 10.1088/1742-6596/1697/1/012253.
10. **Kaplunov I. A., Rogalin V. E.** Optical properties and application of germanium in photonics. *Photonics Russian*. 2019; 13(1): 88–106. DOI: 10.22184/FRos.2019.13.1.88.106. Каплунов И. А., Роголин В. Е. Оптические свойства и области применения германия в фотонике. *Фотоника*. 2019; 13(1): 88–106. DOI: 10.22184/FRos.2019.13.1.88.106.
11. **Kaplunov I. A., Kolesnikov A. I., Kropotov G. I., Rogalin V. E.** Optical Properties Single-Crystal Germanium in the THz Range. *Optics and Spectroscopy*. 2019; 126(3): 191–194. DOI: 10.1134/S0030400X19030093. Каплунов И. А., Колесников А. И., Кропотов Г. И., Роголин В. Е. Оптические свойства монокристаллического германия в терагерцовой области спектра. *Оптика и спектроскопия*. 2019; 126(3): 271–274. DOI: 10.21883/OS.2019.03.47365.194-18.
12. **Rogalin V. E., Kaplunov I. A., Kropotov G. I.** Optical Materials for the THz Range. *Optics and Spectroscopy*. 2018; 125(6): 1053–1064. DOI: 10.1134/S0030400X18120172. Роголин В. Е., Каплунов И. А., Кропотов Г. И. Оптические материалы для THz диапазона. *Оптика и спектроскопия*. 2018; 125(6): 851–863. DOI: 10.21883/OS.2018.12.46951.190-18.
13. **Agafonov A. N., Volodkin B. O., Kachalov D. G., Tukmakov K. N., Pavelyev V. S., Kaveev A. K., Knyazev B. A., Choporova Y. Y., Kropotov G. I., Tsyphishka D. I.** Focusing of Novosibirsk free electron laser (novofel) radiation into paraxial segment. *J. Modern Optics*. 2016; 63(11): 1051–1054. DOI: 10.1080/09500340.2015.1118163
14. **Agafonov A. N., Choporova Y. Y., Kaveev A. K., Knyazev B. A., Pavelyev V. S., Tukmakov K. N., Volodkin B. O., Kropotov G. I.** Control of transverse mode spectrum of Novosibirsk free electron laser radiation. *Applied Optics*. 2015; 54(12): 3635–3639. DOI: 10.1364/AO.54.003635.
15. **Agafonov A. N., Volodkin B. O., Volotovskiy S. G., Tykumakov K. N., Pavelyev V. S., Kaveev A. K., Kropotov G. I., Tsygankova E. V., Tsyphishka D. I., Knyazev B. A., Choporova Y. Y.** Optical elements for focusing of terahertz laser radiation in a given two-dimensional domain. *Optical Memory*

EXECUTION OF MEASUREMENTS

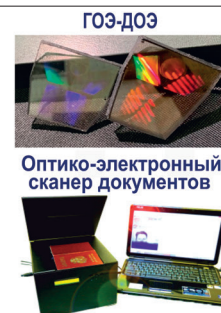
In the case of measuring the transmission spectrum of a sample, the radiating and receiving antennas are located on the same line and at the same height; four TPX lenses with a focal length of 54 mm are installed in the path of the THz radiation pulse. The configuration of these lenses and their position on the measuring rail is arranged in such a way that the radiation is focused into the minimum aperture at the sample location and transmits the maximum power from the radiating antenna to the receiving antenna. The minimum aperture into which radiation can be focused is 5 mm. In the case of measuring the reflection spectrum from a sample, configuration of the radiating and receiving antennas is changed, they are installed at an angle of 90 degrees to each other. The sample is placed at the focal point at an angle of 45 degrees to the incident radiation. Thus, the reflection measurement from the sample is performed only at an angle of 45 degrees relative to the normal line to the sample surface. The device circuit includes two receiving antennas: one for the transmission measurement, and one for the reflection measurement that allows not to rebuild the device when changing the measurement mode (Figure 9).

The time dependences of the receiving antenna photocurrent are measured using the K8 TeraScan software supplied with the spectrometer (Figure 10). The search for the pulse temporal shape, setting the best position of lenses along the optical line, as well as fine-tuning the silicon lens position of the radiating and receiving antennas are performed using the fast delay line scanning function. Next, the scanning parameters are set in the TeraScan program, and the time dependence of the THz pulse amplitude is measured. To obtain the spectral specifications of sample under study during the transmission signal measurements, the waveform of the radiation pulse

Оптико-голографические приборы



- проведение научно-исследовательских, опытно-конструкторских и опытно-технологических работ в области голографических технологий
- изготовление голограммных и дифракционных оптических элементов
- разработка и создание оптико-голографических устройств дополненной реальности (AR-технологии), устройств контроля подлинности защитных голограмм
- организация и проведение тематических конференций, школ, семинаров и выставок в области голографических технологий



ООО «ОГП» РФ, 107076, г. Москва, ул. Матросская тишина, д. 23, стр. 2, под. 1а, эт. 5, п. XXV, к. 18,
тел.: +7(499)263-63-44, e-mail: kus_a_s@mail.ru



- and Neural Networks. 2014; 23(3): 185–190. DOI: 10.3103/S1060992X14030023
16. Kaveev A. K., Kropotov G. I., Tsyphishka D. I., Tzibizov I. A., Vinerov I. A., Kaveeva E. G. Tunable wavelength terahertz polarization converter based on quartz waveplates. *Applied Optics*. 2014; 53(24): 5410–5415. DOI: 10.1364/AO.53.005410.
17. Kaufmann P., T. Fernandes L. O., Kudaka A. S., Bortolucci E. C., Marcon R., Abrantes A., Machado N., Marun A., Silva A., da Silva C. S., Kropotov G. I., Nikolaev V., Timofeevsky A. THz photometers for solar flare observations from space. *Experimental Astronomy*. 2014; 37(3): 579–598. DOI: 10.1007/s10686-014-9389-y.
18. Kaveev A. K., Kropotov G. I., Tsygankova E. V., Tzibizov I. A., Ganichev S. D., Danilov S. N., Olbrich P., Zoth C., Kaveeva E. G., Zhdanov A. I., Ivanov A. A., Deyanov R. Z., Redlich B. Terahertz polarization conversion with quartz waveplate sets. *Applied Optics*. 2013; 52(4): 60–69. DOI: 10.1364/AO.52.00060.
19. Kropotov G., Kaufmann P. THz Photometers for Solar Flare Observations from Space. *Photonics Russian*. 2013; 5(41): 40–50.
Кропотов Г., Кауфманн П. Терагерцевые фотометры для наблюдений солнечных вспышек из космоса. *Фотоника*. 2013; 5(41): 40–50.
20. Agaonov A. N., Volodkin B. O., Volotovskiy S. G., Kaveev A. K., Knyazev B. A., Kropotov G. I., Tykmaev K. N., Pavelyev V. S., Tsygankova E. V., Tsyphishka D. I. Silicon optics for focusing of terahertz laser radiation in a given two-dimensional domain. *Computer optics*. 2013; 37(4): 464–470. DOI: 10.18287/0134-2452-2013-37-4-464-470. (In Russ.).
Агаонов А. Н., Володкин Б. О., Волотовский С. Г., Кавеев А. К., Князев Б. А., Кропотов Г. И., Тукмаков К. Н., Павельев В. С., Цыганкова Е. В., Цыпишка Д. И., Чопорова Ю. Ю. Кремниевая оптика для фокусировки лазерного излучения терагерцевого диапазона в заданные двумерные области. *Компьютерная оптика*. 2013; 37(4): 464–470.
21. Agaonov A. N., Vlasenko M. G., Volodkin B. O., Gerasimov V. V., Kaveev A. K., Knyazev B. A., Kropotov G. I., Pavelyev V. S., Palchikova I. G., Soyfer V. A., Stupak M. F., Tukmakov K. N., Tsygankova E. V., Choporova Y. Y. Diffractive lenses for high-power terahertz radiation beams. *Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics*. 2013; 77(9): 1164–1166. DOI: 10.3103/S1062873813090037. (In Russ.).
Агаонов А. Н., Власенко М. Г., Володкин Б. О., Герасимов В. В., Кавеев А. К., Князев Б. А., Кропотов Г. И., Павельев В. С., Пальчикова И. Г., Сойфер В. А., Ступак М. Ф., Тукмаков К. Н., Цыганкова Е. В., Чопорова Ю. Ю. Дифракционные линзы для мощных пучков терагерцевого излучения. *Изв. РАН. Сер. физическая*. 2013; 77(9): 1330–1332. DOI: 10.7868/S0367676513090032.

АВТОРЫ

Каплунов Иван Александрович – зав. каф. прикладной физики, д.т.н., проф., Тверской государственный университет, e-mail: kaplunov.ia@tversu.ru, Тверь, Россия.

ORCID 0000-0002-1726-3451

Кропотов Григорий Иванович – ген. дир. ООО «Тидекс», к. ф.-м.н., Санкт-Петербург, Россия.

ORCID 0000-0001-9041-6701

Роголин Владимир Ефимович – зав. лаб., д.ф.-м.н.; Институт электрофизики и электроэнергетики РАН, Санкт-Петербург, Россия.

ORCID 0000-0002-2980-5385

Шахмин Алексей Александрович – вед. инж. ООО «Тидекс», к. ф.-м.н., Санкт-Петербург, Россия.

ORCID 0009-0003-9566-2823

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов. Все авторы приняли участие в написании статьи и дополнили рукопись в части своей работы.

ВКЛАД ЧЛЕНОВ АВТОРСКОГО КОЛЛЕКТИВА

Статья подготовлена на основе многолетней работы всех членов авторского коллектива.

transmitted through the empty channel is measured as the background, then the waveform of the pulse transmitted through the sample placed at the focus point of the focusing lens is measured. In the case of the reflection signal measurements, the pulse waveform reflection from a mirror with a gold coating is measured as a background, the mirror is set in the same position as the measured sample.

The inverse Fourier transform of the measured background and sample temporal waveforms is performed using the TeraMat program, the results are saved to a file in the digital form. Moreover, this program allows to calculate the refractive index of the sample material. Further processing of the measurement results consists in dividing the sample signal by the background and squaring to convert the spectral dependence of the electric field amplitude of the electromagnetic wave into the radiation intensity spectrum. To obtain a full spectrum from 185 nm to 1500 μm , all spectra from three devices shall be prepared and imported into the OPUS program and combined using the special Merge Spectra function.

CONCLUSION

The presented devices and spectral measurement methods allow completing the research tasks to study the optical properties of materials that are promising for use in the equipment operating in various spectral ranges (from ultraviolet to terahertz) [3–21].

The optical elements, components of optical systems and devices for the field of science and industry, during the production of which the considered devices are used to obtain spectral specifications, are given on the website of Tydex LLC (Saint Petersburg) [2].

The authors declare that they have no conflict of interest. All authors took part in the article preparation and supplemented the manuscript in terms of their work.

Contribution of composite authors: The article was prepared on the basis of long-term work experience of all composite authors.

ABOUT AUTHORS

Kaplunov Ivan A. – Dr. of Sc. (Eng.) Tver State University;

e-mail: kaplunov.ia@tversu.ru, Tver, Russia.

ORCID 0000-0002-1726-3451

Kropotov Grigory I. – Cand. of Sc. (Phys.&Math), General Manager TYDEX, LLC., St. Petersburg, RUSSIA.

ORCID 0000-0001-9041-6701

Rogalin Vladimir E. – Dr. of Sc. (Phys.&Math), Institute of Electrophysics and Electric Power, Russian Academy of Sciences, St. Petersburg, Russia.

ORCID 0000-0002-2980-5385

Shakhmin Alexey A. – Cand. of Sc. (Phys.&Math), lead engineer TYDEX, LLC., St. Petersburg, Russia.

ORCID 0009-0003-9566-2823

3-6 октября 2023 года, г. Пермь

ВСЕРОССИЙСКАЯ ДИАНОВСКАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ ПО ВОЛОКОННОЙ ОПТИКЕ

ВКВО

2023

Сайт
ВКВО-2023:



Генеральный
спонсор:



Спонсоры:

