

(21), (22) Заявка: **2011100198/28, 11.01.2011**

(24) Дата начала отсчета срока действия патента:  
**11.01.2011**

Приоритет(ы):

(22) Дата подачи заявки: **11.01.2011**

(45) Опубликовано: [20.06.2011](#)

#### (54) МАЛОГАБАРИТНЫЙ ТЕРАГЕРЦОВЫЙ СПЕКТРОМЕТР

(57) Реферат:

Полезная модель относится к устройствам терагерцовой спектроскопии, а именно к спектрометрам с разрешением во времени. Отличительной чертой подобных приборов является регистрация отклика исследуемой среды или материала на импульсное воздействие электромагнитного излучения длительностью порядка единиц пикосекунд. Технический эффект заявляемой полезной модели заключается в увеличении мощности и эффективности генерируемого терагерцового излучения, кроме того в возможности обеспечения малых габаритов. Преимуществом заявляемого малогабаритного терагерцового спектрометра является использование блока регистрации, который позволяет значительно уменьшить влияние лазерных шумов путем их вычитания и таким образом увеличить отношение сигнал/шум. Кроме того простота и более низкая стоимость производства блока генерации позволяет снизить стоимость конечного устройства и его обслуживания. Формула полезной модели содержит один независимый пункт и 11 зависимых пунктов.

Полезная модель относится к устройствам терагерцовой спектроскопии, а именно к спектрометрам с разрешением во времени. Отличительной чертой подобных приборов является регистрация отклика исследуемой среды или материала на импульсное воздействие электромагнитного излучения длительностью порядка единиц пикосекунд. Спектр функции отклика вычисляется путем применения к ней преобразования Фурье.

Терагерцовые спектрометры известны и выпускаются различными компаниями. Они предназначены для исследования свойств веществ и материалов в терагерцовой области электромагнитного спектра. Для исследования как прозрачных, так и сильно поглощающих материалов необходимо, чтобы спектрометр обладал достаточным динамическим диапазоном и отношением сигнал/шум. Кроме того, существуют специфические задачи, для которых требуется спектрометр с большой мощностью генерируемого терагерцового излучения. Для использования спектрометра специалистами разного профиля непосредственно на их рабочих местах необходимо уменьшение габаритов устройства.

Известно техническое решение, используемое в аппаратно-программных комплексах TPS spectra 3000 компании «TeraView», Великобритания (<http://www.teraview.com/terahertz/id/17>). Комплекс TPS spectra 3000 представляет собой многофункциональную систему терагерцовой спектроскопии. Система содержит дополнительные модули, которые позволяют проводить различные типы исследований, как например, исследование образца при температурах от 2,3 К до 550 К и терагерцовая визуализация. Рабочий спектральный диапазон TPS spectra 3000

лежит в пределах от 0,06 до 4 ТГц.

Недостатком известного комплекса являются большие габариты, так как в качестве источника фемтосекундного импульсного излучения используется титан-сапфировый лазер.

Известно техническое решение, используемое в устройствах T-ray 2000 и T-ray 4000 компании «Picometrix», США ([http://www.picometrix.com/pico\\_products/terahertz.asp](http://www.picometrix.com/pico_products/terahertz.asp)). Устройство T-ray 2000 представляет собой модульную систему, состоящую из генератора терагерцового излучения, приемника терагерцового излучения, управляющего модуля и компьютера с программным обеспечением. Модули соединены между собой силовыми сигнальными кабелями. Также модули генератор и приемник имеют разъем для соединения с оптоволоконным фемтосекундным лазером, который не входит в состав. Система имеет небольшие размеры и помещается на лабораторном столе. Устройство работает в полосе от 0,02 до 3,0 ТГц. Устройство T-ray 4000 представляет собой более компактный по сравнению с T-ray 2000 терагерцовый спектрометр и представляет собой корпус размером 445×495×178 мм, который подсоединяется к компьютеру со специализированным программным обеспечением. К корпусу подсоединены модули генератор и приемник терагерцового излучения посредством оптоволоконного и электрического кабеля. Система работает в полосе от 0,02 до 3,0 ТГц и его динамический диапазон достигает 70 дБ.

Известно техническое решение, используемое в аппаратно-программных комплексах Tera K8 и Tera K15 компании «Menlo Systems», Германия (<http://www.menlosystems.com/home/products.html?cat=10>). Обе системы размещаются на лабораторном столе и состоят из следующих модулей: импульсный волоконный лазер, управляющий модуль, компьютер с обслуживающим программным обеспечением и оптический модуль. Комплекс Tera K8 представляет собой терагерцовый спектрометр на базе фемтосекундного волоконного лазера с длиной волны излучения 780 нм. Tera K8 работает в полосе от 0,1 до 3 ТГц. Комплекс Tera K15 представляет собой терагерцовый спектрометр на базе фемтосекундного волоконного лазера с длиной волны излучения 1560 нм. Tera K15 работает в полосе от 0,1 до 2 ТГц. Динамический диапазон обеих систем достигает 60 дБ.

Недостатками известных технических решений является небольшой динамический диапазон и недостаточное соотношение сигнал/шум из-за использования фотопроводящей антенны для регистрации терагерцового излучения.

Известно техническое решение, используемое в устройствах Z-2 и Mini-Z компании ZOmega, США (<http://www.zomega-terahertz.com/products/index.html>). Устройство Z-2 представляет собой терагерцовый спектрометр на базе фемтосекундного волоконного лазера, длина волны которого определяется заказчиком. Его приблизительные размеры составляют 0,7×0,5×0,3 м. В комплект также входит обслуживающее программное обеспечение. Спектрометр работает в полосе от 0,1 до 3,5 ТГц, его динамический диапазон достигает 70 дБ. Устройство Mini-Z представляет собой терагерцовый спектрометр с небольшими габаритами 267×159×70 мм для использования с волоконным лазером (в комплект не входит). Спектрометр работает в полосе частот от 0,1 до 4,0 ТГц, его динамический диапазон достигает 70 дБ. Устройства Mini-Z и Z-2 отличает использование электрооптической схемы регистрации терагерцового излучения, которая позволяет уменьшить влияние лазерных шумов, и тем самым увеличить динамический диапазон и отношение сигнал/шум.

Недостатком всех вышеперечисленных технических решений является ограниченность максимальной мощности терагерцового излучения. Для его генерации используется возбуждение лазерными импульсами фотопроводящих антенн, которые представляет собой напыленные на поверхность полупроводника электроды, к которым приложено высокое напряжение. Мощность терагерцового излучения пропорциональна мощности лазерного излучения, неограниченное увеличение которого невозможно, так как превышение определенного предела приводит к пробое антенны и ее разрушению. Кроме того, высокая стоимость и сложность производства генераторов увеличивает стоимость конечного устройства и его обслуживания.

Известно устройство, представляющее собой аппаратно-программный комплекс, включающий: источник импульсного излучения волоконный лазер, светоделительный элемент, блок генерации, блок регистрации, систему фокусировки терагерцового излучения, блок оптической линии задержки, модулятор, блок управления линией задержки, блок сканирования, блок обработки, блок хранения информации (патент США US 7551269, приоритет 2009-05-03, МПК G01J 1100, G02F 101 «Apparatus and method for obtaining information related to terahertz waves») выбранное в качестве прототипа.

Недостатком данного устройства является то, что блок генерации выполнен с использованием фотопроводящей антенны или кристалла DAST. Фотопроводящая антенна - это сложное и дорогое в производстве устройство. Режим работы антенны не позволяет значительно увеличить мощность импульсного излучения волоконного лазера для увеличения мощности терагерцового, так как это приведет к электрическому пробое и выходу антенны из строя. Кристалл DAST лишен этих недостатков, но имеет неравномерный спектр генерации терагерцового излучения из-за собственного поглощения в терагерцовом диапазоне частот. Кроме того, недостатком данного устройства является то, что регистрация терагерцового излучения осуществляется с помощью фотопроводящей антенны, что ухудшает

отношение сигнал/шум и динамический диапазон спектрометра.

Перед авторами ставилась задача разработать малогабаритный терагерцовый спектрометр, обладающий высокой мощностью терагерцового излучения, позволяющий исследовать свойства материала в терагерцовом диапазоне.

Поставленная задача решается тем, что малогабаритный терагерцовый спектрометр, содержащий импульсный волоконный лазер, светоделительный элемент, блок генерации, блок регистрации, систему фокусировки терагерцового излучения, блок оптической линии задержки, модулятор, блок управления линией задержки, блок сканирования, блок обработки, блок хранения информации, дополнительно содержит фильтр лазерного излучения, а блок генерации выполнен содержащим генерирующий элемент в виде полупроводника M1M2 и магнитной системы, выполненной хотя бы из одного постоянного магнита, формирующей магнитное поле в плоскости генерирующего элемента, а блок регистрации выполнен регистрирующим напряженность терагерцового электромагнитного поля и содержащим электрооптический кристалл, четвертьволновую пластинку, поляризационный элемент, фотоприемники, дифференциальный усилитель и синхронный детектор, причем модулятор выполнен акустооптическим или механическим. Элемент M1 полупроводника M1M2 выполнен в виде элемента группы III таблицы Менделеева, а элемент M2 выполнен в виде элемента группы V таблицы Менделеева, причем при длине волны источника импульсного излучения 775 нм элемент группы III таблицы Менделеева выполнен в виде In, а элемент группы V таблицы Менделеева выполнен в виде As, а при длине волны источника импульсного излучения 1550 нм элемент группы III таблицы Менделеева выполнен в виде In, а элемент группы V таблицы Менделеева выполнен в виде Sb. Так же электрооптический кристалл выполнен в виде кристалла теллурида цинка (ZnTe) при длине волны источника импульсного излучения 775 нм, а при длине волны источника импульсного излучения 1550 нм электрооптический кристалл выполнен в виде кристалла арсенида галлия (GaAs). Кроме того, в блоке регистрации поляризационный элемент выполнен в виде призмы Волластона, а фотоприемники выполнены в виде кремниевых (Si) фотодиодов при длине волны источника импульсного излучения 775 нм и при длине волны источника импульсного излучения 1550 нм фотоприемники выполнены в виде германиевых (Ge) фотодиодов. Так же магнитная система в блоке генерации выполнена в виде двух плоских постоянных магнитов в форме параллелепипеда, лежащих гранями большей площади на пластине из материала с высокой магнитной проницаемостью, с зазором между гранями малой площади не более 100 микрон, при этом векторы намагниченности каждого из магнитов перпендикулярны плоскости генерирующего элемента и противоположно направлены.

Технический эффект заявляемого технического решения заключается в увеличении мощности и эффективности генерируемого терагерцового излучения, а также в возможности обеспечения малых габаритов.

На фиг.1 представлена блок-схема, поясняющая работу заявляемого малогабаритного терагерцового спектрометра, где 1 - импульсный волоконный лазер, 2 - лазерное излучение, 3 - светоделительный элемент, 4 - модулятор, 5 - блок генерации, 6 - фильтр лазерного излучения, 7 - терагерцовое излучение, 8 - система фокусировки терагерцового излучения, 9, 10, 11, 12 - внеосевые параболические зеркала, 13 - образец, 14 - блок оптической линии задержки, 15 - блок регистрации, 16 - электрооптический кристалл, 17 - четвертьволновая пластинка, 18 - поляризационный элемент, 19, 20 - фотоприемники, 21 - дифференциальный усилитель, 22 - синхронный детектор, 23 - блок сканирования, 24 - блок обработки, 25 - блок хранения информации, 26 - блок управления линией задержки.

На фиг.2 представлена блок-схема, поясняющая работу блока генерации заявляемого малогабаритного терагерцового спектрометра, где 2 - лазерное излучение, 7 - терагерцовое излучение, 27 - магнитная система, 28, 29 - постоянные магниты, 30 - вектор намагниченности магнита 28, 31 - вектор намагниченности магнита 29, 32 - зазор между магнитами, 33 - генерирующий элемент, 34 - пластина из материала с высокой магнитной проницаемостью.

Заявляемый малогабаритный терагерцовый спектрометр работает следующим образом.

Импульсный волоконный лазер 1 генерирует излучение 2 либо на длинах волн 775 нм либо на длинах волн 1550 нм. Излучение разделяется на два пучка лазерного излучения светоделительным элементом 3 для генерации и регистрации импульсного терагерцового излучения. Первый пучок лазерного излучения проходит через модулятор 4, который может быть выполнен акустооптическим или механическим, и поступает в блок генерации 5. Второй пучок лазерного излучения 2 проходит через блок оптической линии задержки 14 и поступает в блок регистрации 15.

В блоке генерации 5 при частичном поглощении лазерных импульсов первого пучка лазерного излучения 2 в приповерхностном слое генерирующего элемента 33 происходит излучение терагерцовых импульсов 7. Магнитная система 27, формирующая магнитное поле в плоскости генерирующего элемента 33, выполнена таким образом, чтобы увеличить эффективность генерации терагерцового излучения 7. Магнитная система 27 может быть выполнена в виде двух плоских постоянных магнитов 28, 29, в форме параллелепипеда лежащих гранями большей

площади на пластине из материала с высокой магнитной проницаемостью 34, где векторы 30, 31 намагнитности плоских постоянных магнитов 28, 29 перпендикулярны плоскости поверхности генерирующего элемента 33 и противоположно направлены, чтобы таким образом формировался вектор напряженности магнитного поля в плоскости поверхности генерирующего элемента 33 перпендикулярно линии зазора 32. Причем зазор 32 между двух плоских постоянных магнитов 28, 29 сохраняется не более 100 микрон, а сама магнитная система 27 выполнена в малых размерах.

При длине волны излучения импульсного волоконного лазера равной 775 нм, генерирующий элемент 33 выполнен в виде полупроводника M1M2, где M1, являясь элементом группы III таблицы Менделеева, может быть индием (In), а M2, являясь элементом группы V таблицы Менделеева, может быть мышьяком (As). При длине волны излучения импульсного волоконного лазера равной 1550 нм, генерирующий элемент 33, выполнен в виде полупроводника M1M2, где M1, являясь элементом группы III таблицы Менделеева, может быть индием (In), а M2, являясь элементом группы V таблицы Менделеева, может быть сурьмой (Sb).

Внеосевые параболические зеркала 9, 10, 11, 12 системы фокусировки 8 терагерцового излучения оптически связаны таким образом, что отражают падающее излучение под углом 90°, при этом зеркала 9 и 11 коллимируют, а зеркала 10 и 12 фокусируют терагерцовое излучение. Фокус внеосевого параболического зеркала 9 находится на поверхности генерирующего элемента 33 в точке генерации расходящегося терагерцового излучения 7. Зеркало 9 отражает терагерцовое излучение 7 и остаточное лазерное излучение 2 из блока генерации 5 в виде коллимированного пучка под углом 90° на внеосевое параболическое зеркало 10. При этом фильтр лазерного излучения 6, находящийся между внеосевыми параболическими зеркалами 9 и 10, поглощает остаточное излучение первого пучка лазерного излучения 2 и пропускает терагерцовое излучение 7. Внеосевое параболическое зеркало 10 фокусирует терагерцовое излучение 7 на образец 13, помещенный для исследования. Внеосевое параболическое зеркало 11 собирает прошедшее через образец 13 терагерцовое излучение 7 и отражает его в виде коллимированного пучка на внеосевое параболическое зеркало 12. При этом образец 13 находится в фокусе зеркал 10 и 11. Внеосевое параболическое зеркало 12 фокусирует терагерцовое излучение 7 на электрооптический кристалл 16 блока регистрации 15.

Второй пучок лазерного излучения 2, прошедший через блок оптической линии задержки 14, приходит в ту же точку электрооптического кристалла 16, что и терагерцовое излучение 7. При этом блок оптической линии задержки 14 формирует временную задержку между вторым пучком лазерного излучения 2 и импульсами терагерцового излучения 7 посредством изменения длины оптического пути второго пучка лазерного излучения 2.

Блок регистрации 15 регистрирует напряженность поля терагерцового излучения 7 с помощью второго пучка лазерного излучения 2, который в электрооптическом кристалле 16 приобретает пропорциональное напряженности поля терагерцового излучения 7 эллиптическое изменение поляризации, которое преобразуется в поворот плоскости поляризации в четвертьволновой пластинке 17 таким образом, что угол поворота плоскости поляризации пропорционален этому изменению. Далее, поляризационный элемент 18, который может быть выполнен в виде призмы Волластона, разделяет второй пучок лазерного излучения 2 на два пучка с ортогональными поляризациями, каждый из которых преобразуется в электрический сигнал фотоприемниками 19 и 20, таким образом, что разность интенсивностей пучков с ортогональными поляризациями пропорциональна повороту плоскости поляризации. Фотоприемники 19 и 20 осуществляют преобразование таким образом, что уровень электрического сигнала пропорционален интенсивности падающего на них излучения. Разностный сигнал с фотоприемников 19 и 20 усиливается дифференциальным усилителем 21 и детектируется на рабочей частоте модулятора 4 синхронным детектором 22 таким образом, что сигнал на выходе синхронного детектора 22 оказывается пропорционален напряженности поля терагерцового излучения 7.

Причем, при длине волны излучения импульсного волоконного лазера равной 775 нм в блоке регистрации 15 электрооптический кристалл 16 может быть выполнен в виде кристалла теллурида цинка (ZnTe), а фотоприемники 19, 20 могут быть выполнены в виде кремниевых фотодиодов. При длине волны излучения импульсного волоконного лазера равной 1550 нм в блоке регистрации 15 электрооптический кристалл 16 может быть выполнен в виде кристалла арсенида галлия (GaAs), а фотоприемники 19, 20 могут быть выполнены в виде германиевых фотодиодов.

Блок сканирования 23 управляет блоком оптической линии задержки 14 посредством блока управления линией задержки 26 и записывает зависимость выходного сигнала синхронного детектора 22 от временной задержки второго пучка лазерного излучения 2. Полученная зависимость представляет собой временную форму импульса терагерцового излучения 7. Она передается в блок обработки 24, который вычисляет ее спектр посредством дискретного преобразования Фурье. Временная форма и спектр импульса терагерцового излучения 7 записываются в блок хранения 25. Свойства образца 13 в терагерцовой области частот электромагнитного спектра определяются путем совместной обработки двух спектров импульсов терагерцового излучения 7: с установленным образцом и без

него.

Преимуществом заявляемого малогабаритного терагерцового спектрометра является использование блока регистрации, который позволяет значительно уменьшить влияние лазерных шумов путем их вычитания и таким образом увеличить отношение сигнал/шум. Кроме того простота и более низкая стоимость производства блока генерации позволяет снизить стоимость конечного устройства и его обслуживания.

#### Формула полезной модели

1. Малогабаритный терагерцовый спектрометр, содержащий импульсный волоконный лазер, светоделительный элемент, блок генерации, блок регистрации, систему фокусировки терагерцового излучения, блок оптической линии задержки, модулятор, блок управления линией задержки, блок сканирования, блок обработки, блок хранения информации, отличающийся тем, что он дополнительно содержит фильтр лазерного излучения, а блок генерации выполнен содержащим генерирующий элемент в виде полупроводника M1M2 и магнитной системы, выполненной хотя бы из одного постоянного магнита, формирующей магнитное поле в плоскости генерирующего элемента, а блок регистрации выполнен регистрирующим напряженность терагерцового электромагнитного поля и содержащим электрооптический кристалл, четвертьволновую пластинку, поляризационный элемент, фотоприемники, дифференциальный усилитель и синхронный детектор.

2. Спектрометр по п.1, отличающийся тем, что модулятор выполнен акустооптическим.

3. Спектрометр по п.1, отличающийся тем, что модулятор выполнен механическим.

4. Спектрометр по п.1, отличающийся тем, что элемент M1 полупроводника M1M2 выполнен в виде элемента группы III таблицы Менделеева, а элемент M2 выполнен в виде элемента группы V таблицы Менделеева.

5. Спектрометр по п.4, отличающийся тем, что при длине волны источника импульсного излучения 775 нм элемент группы III таблицы Менделеева выполнен в виде In, а элемент группы V таблицы Менделеева выполнен в виде As.

6. Спектрометр по п.4, отличающийся тем, что при длине волны источника импульсного излучения 1550 нм элемент группы III таблицы Менделеева выполнен в виде In, а элемент группы V таблицы Менделеева выполнен в виде Sb.

7. Спектрометр по п.1, отличающийся тем, что электрооптический кристалл выполнен в виде кристалла теллурида цинка (ZnTe) при длине волны источника импульсного излучения 775 нм.

8. Спектрометр по п.1, отличающийся тем, что электрооптический кристалл выполнен в виде кристалла арсенида галлия (GaAs) при длине волны источника импульсного излучения 1550 нм.

9. Спектрометр по п.1, отличающийся тем, что в блоке регистрации поляризационный элемент выполнен в виде призмы Волластона.

10. Спектрометр по п.1, отличающийся тем, что в блоке регистрации фотоприемники выполнены в виде кремниевых (Si) фотодиодов при длине волны источника импульсного излучения 775 нм.

11. Спектрометр по п.1, отличающийся тем, что в блоке регистрации фотоприемники выполнены в виде германиевых (Ge) фотодиодов при длине волны источника импульсного излучения 1550 нм.

12. Спектрометр по п.1, отличающийся тем, что магнитная система в блоке генерации выполнена в виде двух плоских постоянных магнитов в форме параллелепипеда, лежащих гранями большей площади на пластине из материала с высокой магнитной проницаемостью, с зазором между гранями малой площади не более 100 мкм, при этом векторы намагниченности каждого из магнитов перпендикулярны плоскости генерирующего элемента

и противоположно направлены.

