



**ФЕДЕРАЛЬНАЯ СЛУЖБА
ПО ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СОБСТВЕННОСТИ**

(12) ОПИСАНИЕ ИЗОБРЕТЕНИЯ К ПАТЕНТУ

(21)(22) Заявка: **2009146681/28**, **16.12.2009**

(24) Дата начала отсчета срока действия патента:
16.12.2009

Приоритет(ы):

(22) Дата подачи заявки: **16.12.2009**

(43) Дата публикации заявки: **27.06.2011** Бюл. № 18

(45) Опубликовано: **20.04.2012** Бюл. № 11

(56) Список документов, цитированных в отчете о поиске: **КИТАЕВА Г.Х., ТУЧАК А.Н., ПЕНИН А.Н. Генерация и детектирование терагерцового излучения с помощью периодически и аperiodически поляризованных кристаллов. Оптика и спектроскопия, т.107, №4, июль 2009, с. 552-556. WO 2007121598 A1, 01.11.2007. EP 2086074 A2, 05.08.2009. WO 0177646 A1, 18.10.2001.**

Документ находится в Патентном отделе

ОКБ АСТРОН

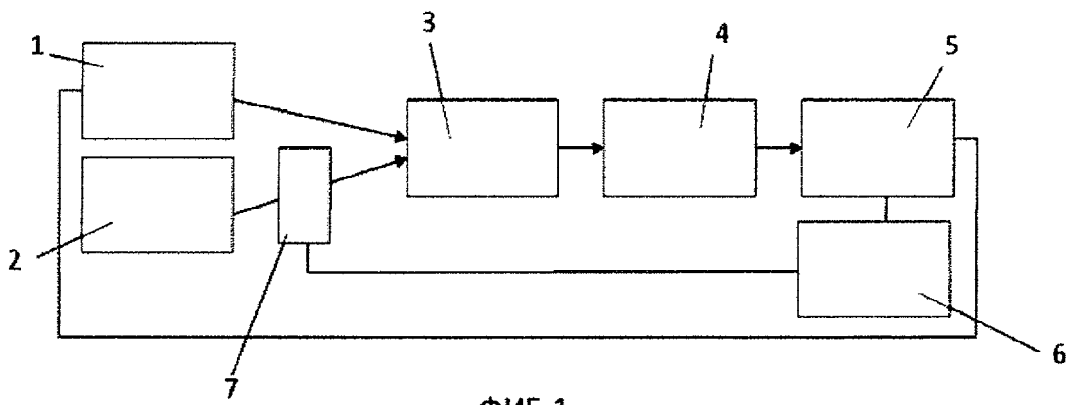
140081, Московская область, г.Лыткарино,
ул.Парковая, д.1

(54) СПОСОБ ДЕТЕКТИРОВАНИЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ВОЛН В ТЕРАГЕРЦОВОМ ДИАПАЗОНЕ И УСТРОЙСТВО ДЛЯ ЕГО ОСУЩЕСТВЛЕНИЯ

(57) Реферат:

Способ заключается в направлении потока измеряемого терагерцового излучения из источника терагерцового излучения одновременно с потоком оптического излучения накачки из источника оптической накачки на заданной длине волны на нелинейно-оптический кристалл для параметрического смещения частот падающих волн указанных излучений. На выходе указанного кристалла формируется сигнальное оптическое излучение на новых частотах, смещенных относительно частоты накачки, которое выделяют путем фильтрации на поляризационной призме шумового оптического излучения других частот, направлений и поляризаций, отличных от частоты, направления и поляризации

сигнального излучения, сопряженного пространственно, спектрально и по поляризации с измеряемым терагерцовым излучением. Выделенное таким образом сигнальное оптическое излучение или отдельные моды этого излучения подают на фотодетектор для измерения в относительных единицах мощности выделенного сигнального излучения при открытом затворе, при котором осуществляют излучение измеряемого терагерцового излучения, и при закрытом затворе, при котором полностью перекрывают измеряемое терагерцовое излучение. Технический результат заключается в обеспечении возможности упрощения процесса детектирования электромагнитных волн терагерцового диапазона. 2 н. и 6 з.п. ф-лы, 2 ил.



ФИГ. 1

RU 2448399 C2

RU 2448399 C2



FEDERAL SERVICE
FOR INTELLECTUAL PROPERTY

(51) Int. Cl.
H01S 3/00 (2006.01)
G01N 21/17 (2006.01)

(12) **ABSTRACT OF INVENTION**

(21)(22) Application: **2009146681/28, 16.12.2009**

(24) Effective date for property rights:
16.12.2009

Priority:

(22) Date of filing: **16.12.2009**

(43) Application published: **27.06.2011 Bull. 18**

(45) Date of publication: **20.04.2012 Bull. 11**

Документ находится в Патентном отделе

ОКБ АСТРОН

140081, Московская область, г.Лыткарино,
ул.Парковая, д.1

(54) **METHOD OF DETECTING ELECTROMAGNETIC WAVES IN TERAHERTZ RANGE AND APPARATUS FOR REALISING SAID METHOD**

(57) Abstract:

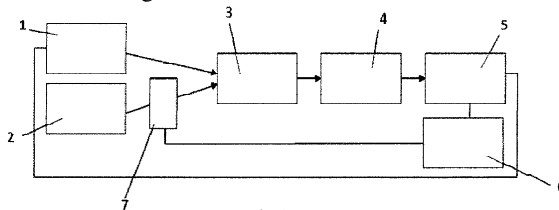
FIELD: physics.

SUBSTANCE: method involves directing flux of the measured terahertz radiation from a source of terahertz radiation simultaneously with flux of optical pumping radiation from an optical pumping source at the given wavelength onto a nonlinear-optical crystal for parametric mixing of incident waves of said radiations. Signal optical radiation is generated at the output of said crystal at new frequencies which are shifted relative the pumping frequency, which is picked up by using a polarising prism to filter noise optical radiation at other frequencies, directions and polarisations which are different from the frequency, direction and polarisation of the signal radiation which matches the measured terahertz radiation spatially, spectrally and on polarisation. The signal optical

radiation or separate modes thereof thus picked is transmitted to a photodetector for measurement in arbitrary units of the power of the picked up signal radiation at an open gate, where the measured terahertz radiation is emitted, and at a closed gate, where the measured terahertz radiation is completely shut off.

EFFECT: simplification of the process of detecting electromagnetic waves in the terahertz range.

8 cl, 2 dwg



Фиг. 1

RU 2 448 399 C2

RU 2 448 399 C2

Настоящее изобретение относится к измерительной технике и касается нового способа детектирования электромагнитных волн терагерцового диапазона частот (0,3-10 ТГц): измерения абсолютной величины спектральной плотности энергетической яркости (далее - «спектральной яркости»), а также измерения калиброванных величин интенсивности и других сопутствующих энергетических характеристик.

Диапазон терагерцового излучения находится между ИК- и СВЧ-диапазонами и занимает полосу 0,1-10 ТГц. В терагерцовом диапазоне лежит большое число частот резонансных возбуждений различных внутренних колебаний и переходов в конденсированных средах (фононов, колебательных, вращательных переходов и т.д.). В то же время терагерцовое излучение легко фокусируется и обладает большой проникающей способностью, что создает возможность использовать его для неразрушающей диагностики оптически непрозрачных предметов. Кроме того, в отличие от рентгеновского излучения терагерцовые волны безвредны для живых организмов и могут быть использованы в медицине, системах обеспечения безопасности и в области связи (Creeden D., McCarthy J.C., Ketteridge P.A., Schunemann P.G., Southward T., Komiak J.J., Chicklis E.P. // Optics Express 2007. V.15. P.6478).

Использование излучения терагерцового диапазона ограничивается сложностью изготовления генераторов и детекторов излучения на терагерцовых частотах.

Проблемы генерации и детектирования электромагнитного излучения терагерцового диапазона в последнее время привлекают растущий интерес. С одной стороны, это объясняется уникальными перспективами применения терагерцового излучения в спектроскопии, неразрушающей диагностике биологических и медицинских объектов, системах связи и навигации (Chan W.L., Deibel J., and Mittleman D.M. // Rep. Prog. Phys. 2007. V.70. P.1325; Hattori T. and Sakamoto M. // Appl. Phys. Lett. 2007. V.90, P.261106). С другой стороны, освоение данного диапазона проходит достаточно медленно, энергетическая эффективность действующих устройств по генерации и детектированию терагерцового излучения до сих пор не выше десятых долей процента (Kitaeva G.Kh. // Laser Physics Lett. 2008. V.5, No.8. P.559). Поиск новых схем, а также самих физических принципов функционирования приборов в этой области чрезвычайно актуален.

В последнее десятилетие активно развиваются методы, основанные на перекачке энергии из оптического в терагерцовый диапазон (при генерации) и обратно (при детектировании). Подобная перекачка реализуется в нелинейно-оптических параметрических процессах смешения частот, а также в оптически-индуцированных процессах генерации носителей заряда, сопровождающихся последующим излучением терагерцовых волн ускоренными зарядами. В устройствах первой группы генерация терагерцового излучения происходит за счет оптического выпрямления сверхкоротких лазерных импульсов фемтосекундной длительности (Shan J., Nahata A. and Heinz T.F. // Journal of Nonlinear Optical Physics and Materials 2002. V.11. P.31), генерации разностной частоты под действием бигармонической накачки (Taniuchi T. and Nakanishi H. // Electron. Lett. 2004. V.40. P.327) или параметрической генерации в терагерцовом диапазоне (Shikata J., Sato M., Taniuchi T., Ito H. and Kawase K. // Opt. Lett. 1999. V.24. P.202). К соответствующим схемам детектирования относятся схемы электрооптического стробирования терагерцовых импульсов в нелинейно-оптических кристаллах, допускающих фазовый синхронизм при преобразовании в широком диапазоне терагерцовых частот (Shan J., Nahata A. and Heinz T.F. // Journal of Nonlinear Optical Physics and Materials 2002. V.11. P.31) (чаще всего, в кристаллах ZnTe). Наиболее

известные устройства второй группы - полупроводниковые фотопроводящие антенны (Budiarto E., Margolies J., Jeong S., and Son J.// IEEE J.Quan.Elec. 1996. V.32. P.1839) и поверхностные излучатели (Mu X., Ding Y.J. and Zotova Yu.B. // Opt Lett. 2007. V.32. P.3321), облучаемые фемтосекундными импульсами материалы с
 5 внутримолекулярным переносом заряда (Wynne K., Carey J.J. // Opt. Commun. 2005. V.256. P.400), фотоионизованные газы (Karpowicz N., Dai J., Lu X., Chen Y., Yamaguchi M., Zhao H., Zhang X.-C., Zhang L., Zhang C., Price-Gallagher M., Fletcher C., Mamer O., Lesimple A. and Johnson K.// Appl. Phys. Lett. 2008. V.92. P.011131). Достигнутые на
 10 сегодня лучшие эффективности преобразования энергии в обеих группах устройств примерно одинаковы, причем устройства первой группы, основанные на нерезонансном взаимодействии лазерного излучения с нелинейной средой, позволяют получать максимально мощные и направленные лучи когерентного терагерцового
 15 диапазона. Рекордные значения энергетических коэффициентов перекачки оптической энергии в терагерцовый диапазон, равные 0.03-0.05%, достигнуты при оптическом выпрямлении лазерных импульсов с наклонными фронтами в объемных кристаллах ниобата лития (Herbling J., Stepanov A.G., Almasi G., Bartal B., Kuhl J. // Appl. Phys. B 2006. V.78. P.593), в периодически поляризованных структурах на основе арсенида
 20 галлия (Schaar J.E., Vodopyanov K.L. and Fejer M.M. // Opt. Lett. 2007. V.32. P.1284), при генерации разностной частоты в кристалле фосфида германата свинца (Creeden D., McCarthy J.C., Ketteridge P.A., Schunemann P.G., Southward T., Komiak J.J., Chicklis E.P.// Optics Express 2007. V.15. P.6478).

Создавать терагерцовые детекторы можно, опираясь как на принципы
 25 детектирования оптического излучения, так и на принципы радиотехнического детектирования. На основе принципов радиотехники в настоящее время разрабатываются полевые транзисторы, способные детектировать терагерцовое излучение, на основе оптических процессов - методы электрооптического
 30 детектирования (A.Nahata, A.S.Weling and T.F.Heinz, Appl. Phys. Lett. 69, 2321 (1996), детектирования в фотопроводящих антеннах (R.Yano, H.Gotoh, Y.Hirayama, S.Miyashita, Y.Kadoya, T.Hattori, J.Appl. Phys. 97, 103103 (2005)) и фотоионизованных
 35 газах (N.Karpowicz, J.Dai, X.Lu, Y.Chen, M.Yamaguchi, H.Zhao, X.-C. Zhang, L.Zhang, C.Zhang, M.Price-Gallagher, C.Fletcher, O.Mamer, A.Lesimple and K.Johnson, Appl. Phys. Lett. 92, 011131(2008)).

Почти у каждого из развитых на данный момент методов детектирования терагерцового излучения есть ряд своих существенных недостатков. Для работы детекторов на основе полевых транзисторов необходимы низкие температуры.
 40 Фотопроводящие антенны, фотоионизованные газы, как и электрооптический метод, требуют для детектирования фемтосекундные лазеры, которые достаточно дороги и громоздки. Кроме того, эти методы являются методами последовательного измерения профиля импульсов, в то время как для различных приложений востребовано
 непосредственное измерение терагерцовых спектров.

45 Из работы Г.Х.Китаева, А.Н.Тучак, А.Н.Пенин, «Генерация и детектирование терагерцового излучения с помощью периодически и аperiodически поляризованных кристаллов». Оптика и спектроскопия т.107, №4 июль, 552-556, 2009, известен способ
 50 детектирования терагерцового излучения с помощью периодически и аperiodически поляризованных кристаллов. Данное решение принято в качестве прототипа для заявленных объектов.

В данной работе используются лазерные импульсы наносекундного диапазона для накачки нелинейно-оптического кристалла, служащего источником терагерцовых

волн, и второго нелинейно-оптического кристалла, служащего детектором терагерцовых волн. Оба кристалла осуществляют нелинейно-оптические преобразования в квазисинхронном режиме. Показано, что используя узкополосную «пробную» накачку от отдельного лазерного источника, неоднородно-поляризованный кристалл и схему регистрации оптического сигнала суммарной (as, антистоксовой) или разностной (s, стоксовой) частоты, можно детектировать интенсивность терагерцовых волн I_{THz} , на частоте ω производя измерения интенсивности каждого из сигналов, I_s или I_{as} , в видимом диапазоне. Интенсивности сигналов будут пропорциональны интенсивности терагерцового излучения:

$$I_{as,s} = \left(\frac{2\pi}{c} \right)^3 \frac{\omega_{as,s}^2}{n_{as,s}^2} L^2 I_{\text{probe}} |T_{as,s}(\Omega)|^2 I_{\text{THz}}(\Omega).$$

Чувствительность метода детектирования определяется величиной интенсивности накачки детектора I_{probe} , его длиной L , дисперсией показателей преломления n_s, n_{as} на частотах сигнальных волн ω_s, ω_{as} , а также величиной нелинейной функции передачи поляризованного кристалла T_s или T_{as} . Однако в данной работе нет никакого упоминания о возможности проведения калиброванных измерений.

Настоящее изобретение направлено на достижение технического результата, заключающегося в упрощении процесса детектирования электромагнитных волн терагерцового диапазона частот (0,3-10 ТГц) за счет обеспечения возможности проведения процесса при комнатных температурах при исключении криогенной техники и лазерных источников фемтосекундного излучения и повышении достоверности без привлечения дополнительных калиброванных источников или приемников терагерцового излучения для определения абсолютных значений измеряемой спектральной яркости.

Указанный технический результат для способа достигается тем, что способ детектирования электромагнитных волн в терагерцовом диапазоне заключается в направлении потока измеряемого терагерцового излучения из источника терагерцового излучения одновременно с потоком оптического излучения накачки из источника оптической накачки на заданной длине волны на нелинейно-оптический кристалл для параметрического смешения частот падающих волн указанных излучений и формирования на выходе указанного кристалла сигнального оптического излучения на новых частотах, смещенных относительно частоты накачки, которое выделяют путем фильтрации на поляризационной призме шумового оптического излучения других частот, направлений и поляризаций, отличных от частоты, направления и поляризации сигнального излучения, сопряженного пространственно, спектрально и по поляризации с измеряемым терагерцовым излучением, а затем подают выделенное сигнальное оптическое излучение или отдельные моды этого излучения на фотодетектор для измерения в относительных единицах мощности выделенного сигнального излучения при открытом затворе, при котором осуществляют излучение измеряемого терагерцового излучения, и при закрытом затворе, при котором полностью перекрывают измеряемое терагерцовое излучение.

При смещении в сторону уменьшения частоты частоту сигнального излучения ω_c определяют условием $\omega_c = \omega_n - \Omega_{\text{ТГц}}$, а при смещении в сторону увеличения частоты частоту сигнального излучения ω_{ac} определяют условием $\omega_{ac} = \omega_n + \Omega_{\text{ТГц}}$, где $\Omega_{\text{ТГц}}$ - частоты спектральных компонент терагерцового излучения, ω_n - частоты излучения накачки.

Указанный технический результат для устройства достигается тем, что устройство

детектирования электромагнитных волн в терагерцовом диапазоне включает в себя источник оптической накачки для формирования на выходе когерентного квазимонохроматического направленного поляризованного излучения оптической частоты, источник терагерцового излучения, нелинейный кристалл-преобразователь, 5 предназначенный для приема совмещенных потоков когерентного квазимонохроматического направленного поляризованного излучения оптической частоты и измеряемого терагерцового излучения и формирования на выходе указанного кристалла сигнального оптического излучения на новых частотах, 10 смещенных относительно частоты накачки, затвор, расположенный на пути прохождения потока терагерцового излучения для пропуска этого потока и полного перекрытия потока измеряемого терагерцового излучения, блок оптической селекции сигнального излучения для частотной, пространственной и поляризационной селекции сигнального излучения, сопряженного по частоте и направлению с измеряемым 15 терагерцовым излучением, подаваемого в блок фотоэлектронной регистрации сигнального излучения, электрически сопряженный с модулятором излучения накачки, а так же компьютеризированное средство для синхронизации работы компонентом устройства и расчета спектральной яркости по показаниям блока фотоэлектронной 20 регистрации сигнального излучения при открытом и закрытом положениях затвора.

При этом источник оптической накачки включает в себя импульсный лазер, кристалл-удвоитель частоты, обеспечивающий излучение накачки на заданной длине волны видимого диапазона спектра зеркала, фокусирующую линзу, модулятор, 25 пластинку поворота плоскости поляризации и поляризационную призму.

При этом источник терагерцового излучения включает в себя два внецентровых параболических зеркала и генератор терагерцового излучения, состоящий из импульсного лазерного источника, служившего накачкой для нелинейного кристалла-генератора, фокусирующей линзы и нелинейного кристалла-генератора, в котором 30 терагерцовое излучение генерируют за счет эффекта параметрического смещения частотных компонент импульсного лазерного источника.

При этом нелинейно-оптический кристалл представляет собой периодически поляризованный ориентированный нелинейно-оптический элемент, выполненный из нелинейно-оптического кристалла, поддерживаемый при фиксированной температуре 35 в диапазоне комнатных температур.

При этом блок оптической селекции сигнального излучения включает в себя поляризационную призму, фокусирующую линзу и спектрально-селектирующий прибор.

При этом блок фотоэлектронной регистрации сигнального излучения состоит из фотодетектора и электронной части для обработки зарегистрированных сигналов 40 сигнального излучения, включающей фотоэлектронный умножитель и блок синхронного детектирования, электрически сопряженный с модулятором блока излучения накачки.

Указанные признаки являются существенными и взаимосвязаны с образованием устойчивой совокупности существенных признаков, достаточной для получения 45 требуемого технического результата.

Настоящее изобретение поясняется конкретным примером исполнения, который, 50 однако, не является единственно возможным, но наглядно демонстрирует возможность достижения требуемого технического результата.

На фиг.1 представлена общая схема устройства для реализации предлагаемого способа;

фиг.2 - пример одного из возможных конкретных вариантов общей схемы.

Согласно настоящему изобретению рассматривается новый способ детектирования электромагнитных волн терагерцового диапазона частот (0,3-10 ТГц): измерения абсолютной величины спектральной плотности энергетической яркости, а также измерения калиброванных величин интенсивности и других сопутствующих энергетических характеристик.

Изобретение решает две важнейшие задачи:

1. Предлагается новый способ детектирования электромагнитных волн в терагерцовом диапазоне существенно менее сложный и дорогостоящий, чем имеющиеся в наличии детекторы данного диапазона. Данный способ работает при комнатных температурах, не требует использования ни криогенной техники, ни лазерных источников фемтосекундного излучения.

2. В отношении спектральной яркости метод является абсолютным, т.е. не требует привлечения каких-либо дополнительных калиброванных источников или приемников терагерцового излучения для определения абсолютных значений измеряемой спектральной яркости. Поскольку спектральная яркость является базовой энергетической характеристикой, любая другая энергетическая характеристика (полная яркость, спектральная мощность, поток и т.д.) может быть восстановлена по результатам абсолютного измерения спектрального и/или пространственного распределения спектральной яркости.

Области применения:

1. Освоение терагерцового диапазона частот электромагнитного излучения - создание эффективных генераторов, высокочувствительных калиброванных детекторов, устройств для управления и контроля за терагерцовым излучением.

2. Использование терагерцового излучения в спектроскопии, технике построения скрытых изображений, неразрушающей диагностике биологических и медицинских объектов, терагерцовых каналах связи и зондирования.

Согласно настоящему изобретению предлагается новый способ детектирования электромагнитных волн в терагерцовом диапазоне, существенно менее сложный и дорогостоящий, чем имеющиеся в наличии детекторы данного диапазона. В отличие от «радиотехнических» детекторов, работающих на основе полупроводниковых элементов и сплавов, а также в отличие от наиболее широко распространенных детекторов - болометров данный способ осуществляется при комнатных температурах, т.е. не требует использования низких температур и сопутствующей криогенной техники. В отличие от «оптических» методов, основанных на электрооптическом стробировании, использовании фотопроводящей антенны или фотоионизированной плазмы, этот метод не требует лазерных источников фемтосекундного излучения.

В отношении спектральной яркости предлагаемый способ является абсолютным методом измерения, т.е. не требует привлечения каких-либо дополнительных калиброванных источников или приемников терагерцового излучения для определения абсолютных значений измеряемой спектральной яркости. Поскольку спектральная яркость является базовой энергетической характеристикой, любая другая энергетическая характеристика (полная яркость, спектральная мощность, поток и т.д.) может быть рассчитана по результатам абсолютного измерения спектрального и/или пространственного распределения спектральной яркости.

Общая схема устройства, реализующего способ детектирования электромагнитных волн в терагерцовом диапазоне, представлена на фиг.1, на которой следующими

позициями обозначены:

1 - источник оптической накачки, 2 - источник терагерцового излучения, 3 - нелинейно-оптический кристалл, 4 - оптическая схема селекции сигнального излучения, 5 - фотоэлектронная система регистрации сигнального излучения, 6 - электронная схема управления и обработки информации, 7 - затвор.

Пример одного из возможных конкретных вариантов исполнения общей схемы представлен на фиг.2.

Устройство для реализации предлагаемого способа должно состоять из 6-ти основных блоков:

1. Источник оптической накачки 1. На его выходе формируется когерентное квазимонохроматическое направленное поляризованное излучение оптической частоты. На схеме фиг.2 этот блок включает импульсный лазер YAG:Nd, кристалл-удвоитель 2ω , обеспечивающий излучение накачки на длине волны 532 нм, зеркала З1-З2, фокусирующую линзу Л2, модулятор М, пластинку поворота плоскости поляризации $\lambda/2$ и поляризационную призму Глана П1.

2. Источник терагерцового излучения 2 предназначен для подачи измеряемого терагерцового излучения на вход нелинейного кристалла-преобразователя.

На схеме фиг.2 в блок входят два внецентровых параболических зеркала ПЗ1 и ПЗ2 и сам генератор терагерцового излучения, состоящий, например, из импульсного лазера YAG:Nd, служившего накачкой для широкополосного лазера LiF:F⁻², фокусирующей линзы Л1 и нелинейного кристалла-генератора К1, в котором терагерцовое излучение генерировалось за счет эффекта оптического выпрямления широкополосных импульсов лазера LiF:F⁻².

3. Нелинейно-оптический кристалл 3 в термостате (на фиг.2) - это периодически поляризованный ориентированный нелинейно-оптический элемент, выполненный из кристалла легированного ниобата лития с регулярной ростовой доменной структурой, поддерживаемый при фиксированной температуре в диапазоне 0-80°C

4. Оптическая схема селекции сигнального излучения 4 (блок оптической селекции сигнального излучения) предназначена для частотной, пространственной и поляризационной селекции сигнального излучения, сопряженного по частоте и направлению с измеряемым терагерцовым излучением. На схеме фиг.2 в состав схемы входят поляризационная призма Глана П2, фокусирующая линза Л3, спектрограф ИСП-51.

5. Фотоэлектронная система регистрации сигнального излучения 5 (блок фотоэлектронной регистрации сигнального излучения) состоит из фотодетектора и электронной системы обработки фотоэлектронной системы регистрации сигнального излучения сигнала. На схеме фиг.2 в состав схемы входит фотоэлектронный умножитель, а также электронная схема синхронного детекторования (не изображен на фиг.2), электрически сопряженная с модулятором излучения накачки М.

6. Электронная схема управления и обработки информации 6 обеспечивает синхронизацию работы всех электронных узлов и производит расчет спектральной яркости исходя из показаний фотоэлектронной системы регистрации сигнального излучения при различных положениях затвора 7. В случае схемы на фиг.2 - это компьютер (компьютеризированное средство).

7. Затвор 7 в зависимости от сигналов с блока 6 открывает или полностью перекрывает измеряемое терагерцовое излучение.

Способ реализуется следующим образом. Измеряемое терагерцовое излучение из источника 2 вместе с оптическим излучением накачки из источника 1 направляется на

нелинейно-оптический кристалл 3, в котором происходит эффект параметрического смещения частот падающих волн. В результате этого на выходе кристалла появляется сигнальное оптическое излучение на новых частотах, смещенных относительно частоты накачки ω_n . Смещение может быть в сторону уменьшения частоты, тогда частоты сигнальных волн ω_c определяются условием $\omega_c = \omega_n - \Omega_{TГЦ}$, и в сторону увеличения частоты, тогда частоты сигнальных волн ω_{ac} определяются условием $\omega_{ac} = \omega_n + \Omega_{TГЦ}$, где $\Omega_{TГЦ}$ - частоты спектральных компонент терагерцового излучения. Направления распространения сигнальных волн, их поляризации и параметры нелинейного кристалла, необходимые для эффективного смещения частот, определяются из условий фазового синхронизма в пространственно-однородных кристаллах и квазисинхронизма в периодически поляризованных кристаллах (Г.Х. Китаева, А.Н. Тучак, А.Н. Пенин. Генерация и детектирование терагерцового излучения с помощью периодически и аperiodически поляризованных кристаллов. Оптика и спектроскопия 107, 552, 2009). Сигнальное излучение, сопряженное (пространственно, спектрально и по поляризации) с измеряемым терагерцовым излучением, выделяется с помощью оптической схемы селекции сигнального излучения 4. Схема 4 не пропускает шумовое оптическое излучение других частот, направлений и поляризаций на вход фотоэлектронной системы регистрации сигнального излучения 5. Кроме того, в схеме 4 может производиться дополнительное выделение лишь малого числа мод сигнального излучения, сопряженного с узким спектром мод входного излучения, с возможностью сканирования этих мод. Фотоэлектронная система регистрации 5 измеряет (в относительных единицах) мощность выделенного сигнального излучения в двух случаях: при открытом затворе 7 и при закрытом затворе 7. С целью повышения чувствительности и уменьшения шумов детектирования, схема 5 синхронизована с источником оптической накачки 1.

Согласно теории параметрических процессов преобразования частоты (Д.Н. Клышко. Фотоны и нелинейная оптика. М.: Наука, 1980, гл. 6) мощность сигнального излучения при закрытом затворе 7, когда терагерцовое излучение не подается на вход кристалла 3, определяется тепловыми и квантовыми шумами поля на частоте терагерцовой волны. Эффективная величина этого «шумового» терагерцового поля определяется фундаментальными константами и соотношениями. Она используется в дальнейшем для абсолютной калибровки показаний прибора. Если же затвор открыт, то к данному фоновому сигналу (I_0) добавляется сигнал, пропорциональный спектральной яркости падающего извне терагерцового излучения. В общем случае, для сигналов на разностной (индекс «с») или суммарной (индекс «ас») частоте, измеренных в единицах фотонов на моду излучения N , справедливы следующие соотношения:

$$N_c = \left(|u_{11}^c|^2 - 1 \right) (N_T + 1) + |u_{12}^c|^2 N_{TГЦ} \quad (1)$$

$$N_c = \left(|u_{11}^{ac}|^2 - 1 \right) (N_T) + |u_{12}^{ac}|^2 N_{TГЦ}$$

где $N_T = \frac{1}{\exp(h \Omega / k_B T) - 1}$ - число фотонов в моде равновесного теплового

излучения частоты Ω при температуре T , k_B - постоянная Больцмана, u_{11} и u_{12} - элементы матрицы рассеяния кристалла 3, $N_{TГЦ}$ - число фотонов в моде падающего на кристалл терагерцового излучения, однозначно связанное с величиной спектральной

яркости в энергетических единицах измерения (Г.Х.Китаева, А.Н.Пенин. Параметрическое преобразование света в слоистых нелинейных средах. ЖЭТФ, т.125, вып.2, с.307-323 (2004)).

Соотношения записаны в терминах квантовой оптики и квантовых единицах фотонов на моду излучения (О.А.Аброскина, Г.Х.Китаева, А.Н.Пенин. Эффективная яркость нулевых флуктуации электромагнитного вакуума при параметрическом рассеянии света. ДАН СССР, сер. Физика, т.280, вып.3, с.584-586, 1985). Переведем эти величины на язык энергетических характеристик излучения. Мощности сигнального излучения, измеренные при закрытом затворе 7, будут пропорциональны $N_{0,c}$ или $N_{0,ac}$ (в зависимости от того, сигнал разностной или суммарной частоты пропускает схема селекции 4, рассчитываемыми согласно (1) при $N_{TГЦ}=0$:

$$I_{0,c} = C_{1,ac}(N_T + 1) \quad (2)$$

$$I_{0,c} = C_{1,ac}N_T$$

Если затвор 7 открыт и измеряемое терагерцовое излучение подается на вход кристалла 3, схема регистрации 5 измеряет сигналы

$$I_c = C_{1,c}(N_T + 1) + C_{2,c}N_{TГЦ} \quad (3)$$

или

$$I_{ac} = C_{1,ac}N_T + C_{2,ac}N_{TГЦ} \quad (4)$$

Эти сигналы поступают последовательно на схему управления и обработки информации (6). Здесь вычисляется отношение $\frac{I_c}{I_{0,c}}$ или $\frac{I_c}{I_{0,ac}}$. Согласно (1) среднее

число фотонов в модах терагерцового излучения рассчитывается далее по формулам

$$N_{TГЦ} = \kappa_c(N_T + 1) \left[\frac{I_c}{I_{0,c}} - 1 \right] \quad (5)$$

и

$$N_{TГЦ} = \kappa_{ac}N_T \left[\frac{I_{ac}}{I_{0,ac}} - 1 \right], \quad (6)$$

где $\kappa_{c,ac} = \left(|u_{c,ac}^{11}|^2 - 1 \right) / |u_{c,ac}^{12}|^2$ - расчетные множители, учитывающие поглощение

на терагерцовой частоте, коэффициенты отражения кристаллом всех волн, участвующих в параметрическом процессе. Коэффициенты отражения должны быть достаточно малыми, так что $\kappa_c \approx \kappa_{ac} = \kappa$. Если поглощение терагерцовых волн на длине кристалла также мало, $\kappa \approx 1$ (Г.Х.Китаева, А.Н.Пенин. Влияние оптических параметров кристалла на точность измерения яркости квантовым фотометром. Квантовая электроника, т.19, с.816-818, 1992). Усреднение производится по всем модам терагерцового излучения, параметрически связанным с регистрируемыми модами сигнального канала (Г.Х.Китаева, А.Н.Пенин. Разрешающая способность квантового фотометра. Квантовая электроника, т.21, с.793-797, 1994). Таким образом, схема 4 определяет спектральную и пространственную разрешающую способность метода, если он используется для измерения неоднородного распределения спектральной яркости в падающем на кристалл терагерцовом поле.

Окончательно абсолютные значения спектральной яркости терагерцового излучения в энергетических единицах измерения $V_{TГЦ}$ (т.е. мощности, приходящейся на единичный интервал длин волн, единичный телесный угол и единичную площадку, ориентированную нормально направлению распространения) рассчитываются в

схеме (6) с учетом того, что $B_{\text{ТГц}} = \frac{hc^2}{\lambda_{\text{ТГц}}^5} N_{\text{ТГц}}$, где $\lambda_{\text{ТГц}} = 2\pi c / \Omega_{\text{ТГц}}$ - длина волны

терагерцового излучения, $h=2\pi\hbar$ - постоянная Планка, c -скорость света. При измерении по сигнальному излучению разностной частоты,

$$B_{\text{ТГц}} = \frac{h\Omega_{\text{ТГц}}^5}{c^3(2\pi)^4} \cdot \frac{\kappa}{1 - \exp(-h\Omega_{\text{ТГц}}/k_{\text{B}}T)} \cdot \left[\frac{I_{\text{c}}}{I_{0,\text{c}}} - 1 \right], \quad (7)$$

при измерении по сигнальному излучению суммарной частоты,

$$B_{\text{ТГц}} = \frac{h\Omega_{\text{ТГц}}^5}{c^3(2\pi)^4} \cdot \frac{\kappa}{\exp(h\Omega_{\text{ТГц}}/k_{\text{B}}T) - 1} \cdot \left[\frac{I_{\text{ac}}}{I_{0,\text{ac}}} - 1 \right]. \quad (8)$$

В случае, когда температура кристалла известна из независимых измерений, можно ограничиться измерением сигналов только на одной частоте. Определение

спектральной яркости проводится в этом случае по одной паре сигналов, измеренных либо на суммарной $\left(\frac{I_{\text{ac}}}{I_{0,\text{ac}}} \right)$, либо на разностной частоте $\left(\frac{I_{\text{c}}}{I_{0,\text{c}}} \right)$.

Измерение температуры, в принципе, может быть проведено на основании обоих соотношений, (7) и (8), по результатам измерения как $\frac{I_{\text{ac}}}{I_{0,\text{ac}}}$, так и $\frac{I_{\text{c}}}{I_{0,\text{c}}}$:

$$T = \frac{h \Omega_{\text{ТГц}}}{k_{\text{B}} \ln \left[\frac{\left(\frac{I_{\text{ac}}}{I_{0,\text{ac}}} - 1 \right)}{\left(\frac{I_{\text{c}}}{I_{0,\text{c}}} - 1 \right)} \right]} \quad (9)$$

Точность такого измерения температуры будет существенным образом зависеть от того, насколько хорошо совпадают модовые составы терагерцового излучения, сопряженные с сигнальными модами разностной и суммарной частоты.

Таким образом, предлагаемый способ позволяет измерять абсолютные значения спектральной яркости на различных частотах терагерцового диапазона. При последовательной перестройке частоты регистрируется спектральное распределение яркости в пределах всего спектра излучения источника. Интегрирование данной зависимости дает полную яркость источника. Последовательный разворот источника относительно кристалла и луча оптической накачки позволяет измерять распределение яркости по различным направлениям, параллельное смещение терагерцового луча относительно кристалла - распределение яркости по сечению терагерцового пучка.

Основное отличие настоящего способа - измерение калибровочных сигналов $I_{0,\text{c}}$, $I_{0,\text{ac}}$, которые играют роль «встроенного репера». Сигнал $I_{0,\text{c}}$ определяется как квантовыми, так и тепловыми флуктуациями поля в кристалле на терагерцовой частоте. Сигнал $I_{0,\text{ac}}$ определяется только тепловыми флуктуациями поля в кристалле на терагерцовой частоте. Идея калибровки спектральной яркости с помощью квантовых флуктуации по сигналу разностной частоты использовалась ранее, но не в терагерцовом, а инфракрасном диапазоне (см., например, Г.Х.Китаева, Д.Н.Клышко, А.Н.Пенин. Parametric photometer - a device for standardless non-destructing measurement of radiation spectral brightness. Proceedings of SPIE, v.1869, p.250-257, 1993). Использование тепловых флуктуации предлагается впервые и принципиально именно в терагерцовом диапазоне.

Настоящее изобретение промышленно применимо, проведены контрольные

испытания и получены результаты, полностью подтверждающие возможность упрощения процесса детектирования электромагнитных волн терагерцового диапазона частот (0,3-10 ТГц) за счет обеспечения возможности проведения процесса при комнатных температурах при исключении криогенной техники и лазерных источников фемтосекундного излучения и повышении достоверности без привлечения дополнительных калиброванных источников или приемников терагерцового излучения для определения абсолютных значений измеряемой спектральной яркости.

Формула изобретения

1. Способ детектирования электромагнитных волн в терагерцовом диапазоне, заключающийся в направлении потока измеряемого терагерцового излучения из источника терагерцового излучения одновременно с потоком оптического излучения накачки из источника оптической накачки на заданной длине волны на нелинейно-оптический кристалл для параметрического смешения частот падающих волн указанных излучений и формирования на выходе указанного кристалла сигнального оптического излучения на новых частотах, смещенных относительно частоты накачки, которое выделяют путем фильтрации на поляризационной призме шумового оптического излучения других частот, направлений и поляризаций, отличных от частоты, направления и поляризации сигнального излучения, сопряженного пространственно, спектрально и по поляризации с измеряемым терагерцовым излучением, а затем подают выделенное сигнальное оптическое излучение или отдельные моды этого излучения на фотодетектор для измерения в относительных единицах мощности выделенного сигнального излучения при открытом затворе, при котором осуществляют излучение измеряемого терагерцового излучения, и при закрытом затворе, при котором полностью перекрывают измеряемое терагерцовое излучение.

2. Способ по п.1, отличающийся тем, что при смещении в сторону уменьшения частоты частоту сигнального излучения ω_c определяют условием $\omega_c = \omega_n - \Omega_{ТГц}$, а при смещении в сторону увеличения частоты частоту сигнального излучения ω_{ac} определяют условием $\omega_c = \omega_n + \Omega_{ТГц}$, где $\Omega_{ТГц}$ - частоты спектральных компонент терагерцового излучения, ω_n - частоты излучения накачки.

3. Устройство детектирования электромагнитных волн в терагерцовом диапазоне, характеризующееся тем, что включает в себя источник оптической накачки для формирования на выходе когерентного квазимонохроматического направленного поляризованного излучения оптической частоты, источник терагерцового излучения, нелинейный кристалл-преобразователь, предназначенный для приема совмещенных потоков когерентного квазимонохроматического направленного поляризованного излучения оптической частоты и измеряемого терагерцового излучения и формирования на выходе указанного кристалла сигнального оптического излучения на новых частотах, смещенных относительно частоты накачки, затвор, расположенный на пути прохождения потока терагерцового излучения для пропуска этого потока и полного перекрытия потока измеряемого терагерцового излучения, блок оптической селекции сигнального излучения для частотной, пространственной и поляризационной селекции сигнального излучения, сопряженного по частоте и направлению с измеряемым терагерцовым излучением, подаваемого в блок фотоэлектронной регистрации сигнального излучения, электрически сопряженный с модулятором излучения накачки, а также компьютеризированное средство для синхронизации работы компонентов устройства и расчета спектральной яркости по

показаниям блока фотоэлектронной регистрации сигнального излучения при открытом и закрытом положениях затвора.

5 4. Устройство по п.3, отличающееся тем, что источник оптической накачки включает в себя импульсный лазер, кристалл-удвоитель частоты, обеспечивающий излучение накачки на заданной длине волны видимого диапазона спектра, зеркала, фокусирующую линзу, модулятор, пластинку поворота плоскости поляризации и поляризационную призму.

10 5. Устройство по п.3, отличающееся тем, что источник терагерцового излучения включает в себя два внецентровых параболических зеркала и генератор терагерцового излучения, состоящий из импульсного лазерного источника, служащего накачкой для нелинейного кристалла-генератора, фокусирующей линзы и нелинейного кристалла-генератора, в котором терагерцовое излучение генерируют за счет эффекта

15 6. Устройство по п.3, отличающееся тем, что нелинейно-оптический кристалл представляет собой периодически поляризованный ориентированный нелинейно-оптический элемент, выполненный из нелинейно-оптического кристалла, поддерживаемый при фиксированной температуре в диапазоне комнатных температур.

20 7. Устройство по п.3, отличающееся тем, что блок оптической селекции сигнального излучения включает в себя поляризационную призму, фокусирующую линзу и спектрально-селектирующий прибор.

25 8. Устройство по п.3, отличающееся тем, что блок фотоэлектронной регистрации сигнального излучения состоит из фотодетектора и электронной части для обработки зарегистрированных сигналов сигнального излучения, включающей фотоэлектронный умножитель и блок синхронного детектирования, электрически сопряженный с модулятором блока излучения накачки.

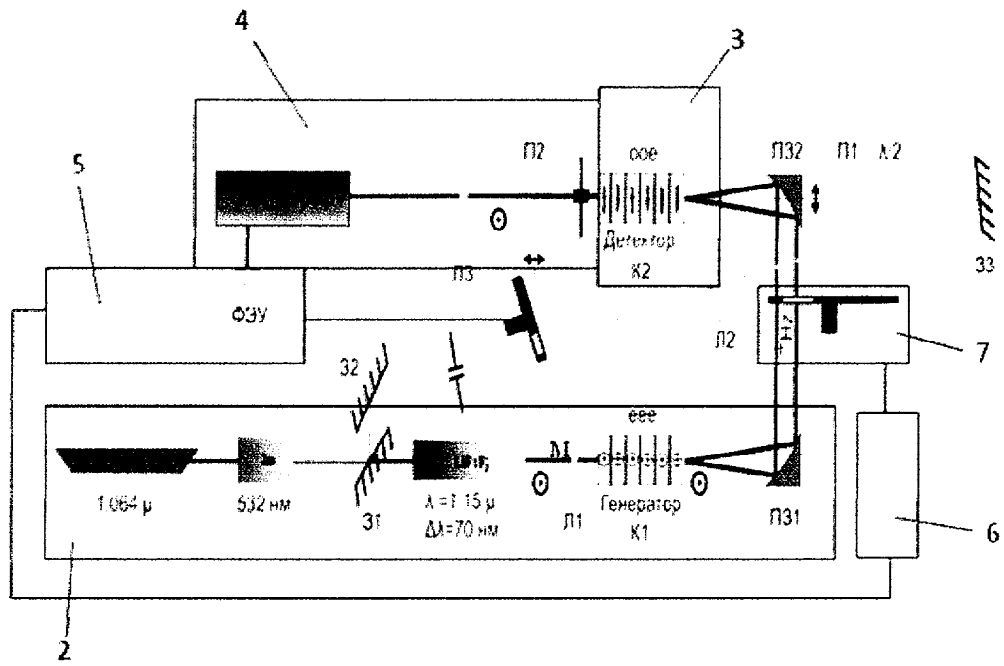
30

35

40

45

50



ФИГ. 2