

(12) 按照专利合作条约所公布的国际申请

(19) 世界知识产权组织
国际局

(43) 国际公布日
2020 年 6 月 25 日 (25.06.2020)



(10) 国际公布号
WO 2020/125437 A1

- (51) 国际专利分类号:
G01N 21/552 (2014.01)
- (21) 国际申请号: PCT/CN2019/123441
- (22) 国际申请日: 2019 年 12 月 5 日 (05.12.2019)
- (25) 申请语言: 中文
- (26) 公布语言: 中文
- (30) 优先权:
201811550459.3 2018 年 12 月 18 日 (18.12.2018) CN
201822129740.1 2018 年 12 月 18 日 (18.12.2018) CN
- (71) 申请人: 深圳先进技术研究院 (SHENZHEN INSTITUTE OF ADVANCED TECHNOLOGY) [CN/CN]; 中国广东省深圳市南山区西丽大学城学苑大道 1068 号, Guangdong 518055 (CN)。
- (72) 发明人: 鲁远甫 (LU, Yuanfu); 中国广东省深圳市南山区西丽大学城学苑大道 1068 号, Guangdong

518055 (CN)。余荣斌 (SHE, Rongbin); 中国广东省深圳市南山区西丽大学城学苑大道 1068 号, Guangdong 518055 (CN)。刘文权 (LIU, Wenquan); 中国广东省深圳市南山区西丽大学城学苑大道 1068 号, Guangdong 518055 (CN)。李光元 (LI, Guangyuan); 中国广东省深圳市南山区西丽大学城学苑大道 1068 号, Guangdong 518055 (CN)。焦国华 (JIAO, Guohua); 中国广东省深圳市南山区西丽大学城学苑大道 1068 号, Guangdong 518055 (CN)。吕建成 (LV, Jiancheng); 中国广东省深圳市南山区西丽大学城学苑大道 1068 号, Guangdong 518055 (CN)。

(74) 代理人: 广州三环专利商标代理有限公司 (SCIHEAD IP LAW FIRM); 中国广东省广州市越秀区先烈中路 80 号汇华商贸大厦 1508 室, Guangdong 510070 (CN)。

(54) Title: NEAR-FIELD TERAHERTZ WAVE SPECTRAL IMAGING SYSTEM AND METHOD

(54) 发明名称: 一种近场太赫兹波光谱成像系统和方法

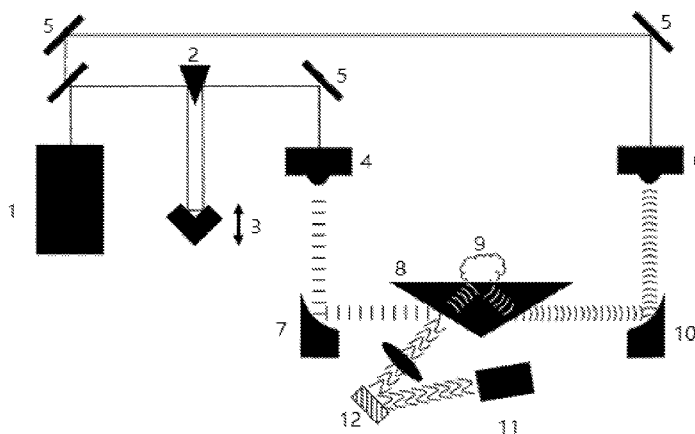


图 1

(57) Abstract: A near-field terahertz wave spectral imaging system and method. A total reflection principle of an attenuated total reflection module (8) is utilized, and a terahertz wave evanescent field is formed on the surface of the attenuated total reflection module (8), so that a sample under test (9) is tightly attached to the surface, and therefore, the purpose of near-field detection is achieved; the attenuated total reflection module (8) used can also directly carry the sample under test (9) without designing a separate clamp, so that the use is more convenient in the detection process of the sample and even in the in-vivo detection process; in addition, single-pixel imaging of a terahertz wave band is realized by using a light control method, and due to the fact that a modulation mask is projected on the attenuated total reflection module (8) of an in-vivo material, the requirement for the accuracy of the position of the projection surface does not need to be high; and in further combination with a terahertz time domain spectral measurement principle, terahertz light field signals at different moments are reconstructed, and therefore, the purpose of high-resolution terahertz multi-spectral imaging can be achieved by using a shorter time.

(81) 指定国 (除另有指明, 要求每一种可提供的国家保护): AE, AG, AL, AM, AO, AT, AU, AZ, BA, BB, BG, BH, BN, BR, BW, BY, BZ, CA, CH, CL, CN, CO, CR, CU, CZ, DE, DJ, DK, DM, DO, DZ, EC, EE, EG, ES, FI, GB, GD, GE, GH, GM, GT, HN, HR, HU, ID, IL, IN, IR, IS, JO, JP, KE, KG, KH, KN, KP, KR, KW, KZ, LA, LC, LK, LR, LS, LU, LY, MA, MD, ME, MG, MK, MN, MW, MX, MY, MZ, NA, NG, NI, NO, NZ, OM, PA, PE, PG, PH, PL, PT, QA, RO, RS, RU, RW, SA, SC, SD, SE, SG, SK, SL, SM, ST, SV, SY, TH, TJ, TM, TN, TR, TT, TZ, UA, UG, US, UZ, VC, VN, ZA, ZM, ZW。

(84) 指定国 (除另有指明, 要求每一种可提供的地区保护): ARIPO (BW, GH, GM, KE, LR, LS, MW, MZ, NA, RW, SD, SL, ST, SZ, TZ, UG, ZM, ZW), 欧亚 (AM, AZ, BY, KG, KZ, RU, TJ, TM), 欧洲 (AL, AT, BE, BG, CH, CY, CZ, DE, DK, EE, ES, FI, FR, GB, GR, HR, HU, IE, IS, IT, LT, LU, LV, MC, MK, MT, NL, NO, PL, PT, RO, RS, SE, SI, SK, SM, TR), OAPI (BF, BJ, CF, CG, CI, CM, GA, GN, GQ, GW, KM, ML, MR, NE, SN, TD, TG)。

本国际公布:

— 包括国际检索报告 (条约第21条(3))。

(57) 摘要: 一种近场太赫兹波光谱成像系统和方法, 利用衰减全反射模块(8)的全反射原理, 在衰减全反射模块(8)的表面形成太赫兹波倏逝场, 如此待测样品(9)紧贴上述表面就能达到近场探测的目的; 衰减全反射模块(8)的使用还能够直接承载待测样品(9)而不需要设计单独的夹具, 因而在检测样品, 甚至是在体检测时使用都更加方便; 此外, 采用光控法实现太赫兹波段的单像素成像, 由于调制掩膜是投影在体材料衰减全反射模块(8)上, 因而对投影面位置的精确度要求也不需要很高; 进一步结合太赫兹时域光谱测量原理, 通过重构不同时刻的太赫兹光场信号, 从而使用更短的时间达到了高分辨率太赫兹多光谱成像的目的。

一种近场太赫兹波光谱成像系统和方法

技术领域

本申请涉及太赫兹技术领域,特别是涉及太赫兹近场成像系统和太赫兹近

5 场成像方法。

背景技术

太赫兹波是指(频率 0.1THz-10THz 或波长 30 μ m-3000 μ m)位于微波波段与光学波段之间的相干电磁辐射。它处于电磁波谱中电子学向光子学过渡的特
10 殊位置而具有独特的性质。例如,许多重要生物分子(如蛋白质、DNA)和生物细胞的低频振动(如分子的骨架集体振动、转动以及分子之间的弱作用力)特征模式均处于太赫兹频谱范围内(光谱指纹性)。基于太赫兹光谱分析,可以解析生物分子的空间构象、反应动力学、水化作用及生物功能等相关信息。此外,太赫兹能够穿透多种非极性材料(纸张,塑料,陶瓷等),实现隐藏目
15 标成像。特别地,相比于应用广泛的 X 射线,太赫兹波的光子能量较低(0.41-41meV),使得太赫兹波对生物分子无损伤,对生物细胞无电离,可作为一种理想的生物医学无损检测手段。近年来,太赫兹技术在基础物理、工业应用、生物医学和国防安全等领域展现了重大的科学价值和应用前景,被美国、欧盟、日本和我国列为改变未来世界的前瞻技术。

20 太赫兹光谱及成像被视为最为重要的应用技术之一,其通过分析太赫兹波与待测样品相互作用而获得待测样品丰富的物理和化学信息。太赫兹波长处于毫米/亚毫米量级,对于一般的大目标检测,太赫兹成像可以获得较为满意的结果。然而,随着太赫兹技术及其在物质表征和生物医学等众多领域的深入研究与发展,人们对太赫兹图像分辨率和精细度的要求也日益提高。由于衍射极
25 限的限制,太赫兹远场的光谱成像系统及方法难以满足这些需求。因此突破衍射极限是太赫兹成像亟待解决的问题。于是,太赫兹近场技术应运而生。近场

技术能够采集并利用被测信号中的倏逝波（亚波长量级），从而实现亚波长尺度的图像分辨率，因而由此得到的近场图像能够显示更为精细的结构。

目前，突破太赫兹波段衍射极限的近场成像主要是近场探针扫描成像法（参见“刘宏翔等，太赫兹波近场成像综述，红外与毫米波学报，2016”）。由于探针探测的是距离样品表面一个波长以内的倏逝波信号，所以探测扫描时探针必须置于非常靠近样品表面的位置。这就要求探针及其相关光路必须满足这种空间需求，无疑增加了成像系统的复杂度和难度。一般成像时采用对样品的光栅扫描，通常获取图像的耗时较长，且对样品扫描的精确控制要求也较高。最近，为了克服近场探针的不足，国外 RAYKO I. STANTCHEV 等人（参见“Compressed sensing with near-field THz radiation, Vol.4, No.8, Optica, 2017”）利用光控超薄硅片的近场照明方案，实现了 $9\mu\text{m}$ 成像分辨率的近场太赫兹成像。但是薄硅片的使用使得对投影焦面控制要求较高，而且薄硅片不利于承载样品。其成像方式为透射式，无法实现在体的近场生物医学成像。

15 申请内容

有鉴于此，针对上述现有技术存在的技术问题，本申请提出一种近场太赫兹光谱成像系统和方法，利用太赫兹近场条件，结合光控法和太赫兹时域光谱系统，无需任何的机械扫描就能实现单像素近场太赫兹光谱检测，进而实现高分辨的亚波长太赫兹多光谱成像。

具体地，一种近场太赫兹波光谱成像系统，其基础光路为：飞秒激光器输出的激光被分成两路；一路经过延迟线后汇聚于太赫兹发射天线；另一路聚焦于太赫兹探测天线；所述太赫兹发射天线产生的太赫兹波信号与待测样品发生相互作用后被聚焦到接收端的太赫兹探测天线；进一步，所述系统还包括衰减全反射模块，所述太赫兹发射天线产生的太赫兹波在所述衰减全反射模块中发生全反射，进而在所述衰减全反射模块的全反射面形成太赫兹倏逝场，所述待测样品直接承载在所述衰减全反射模块的所述全反射面上进行成像。

优选地，所述衰减全反射模块整体为三角棱柱，截面为等腰三角形；所述太赫兹发射天线产生的太赫兹波从三角棱柱的入射面射入，经过所述全反射面发生全反射，然后从出射面射出，全反射过程中在所述全反射面形成倏逝场。进一步，所述衰减全反射模块截面等腰三角形的底角在 20° - 60° 的范围内，优选上述底角的大小为 30° 。

进一步，所述系统还包括光源以产生准直的泵浦光，所述泵浦光照射在数字微镜阵列上从而利用所述数字微镜阵列形成掩膜；或者，系统通过液晶空间光调制器或者投影仪形成掩膜。随后将所述掩膜投影到所述衰减全反射模块的所述入射面上，从而所述衰减全反射模块在所述泵浦光掩膜的照射下形成光生载流子，在所述入射面上对入射的太赫兹波产生调控。

基于上述光控法调制太赫兹波，所述衰减全反射模块的材料优选为本征硅，砷化镓或者本征锗。所述泵浦光的波长，可以在紫外光、可见光或是近红外光，例如小于 1100nm ，优选为 808nm 。

系统还包括单像素探测器，使用单像素探测器结合压缩感知算法重建太赫兹光场。

为了使系统更加紧凑，使用更加方便，所述飞秒激光器、所述延迟线可以集成在一个固定端；所述太赫兹发射天线、所述衰减全反射模块、所述太赫兹探测天线可以集成在一个移动端。所述固定端和所述移动端之间的光路通过第一光纤和第二光纤耦合；所述飞秒激光器发出的光被分为两路，其中所述第一光纤中的光经过延迟线被耦合到所述太赫兹发射天线，所述第二光纤中的光被耦合到所述太赫兹探测天线。

优选所述移动端还包括数字微镜阵列或者液晶空间光调制器或者投影仪，以向所述衰减全反射模块投影掩膜。

此外，为了方便放置样品，在所述衰减全反射模块上还直接设有样品池，所述样品池包括样品池底部，所述样品池底部的材质与所述衰减全反射模块的材质相同。

同时，本申请还提出一种近场太赫兹波光谱成像方法，其特征在于使用衰

减全反射模块来满足近场成像条件；具体包括如下两个操作：

A、使太赫兹发射天线产生的太赫兹波在所述衰减全反射模块中发生全反射，进而在所述衰减全反射模块的全反射面形成太赫兹倏逝场；

B、将待测样品直接承载在所述衰减全反射模块的所述全反射面上。

5 其中，将所述衰减全反射模块放置在太赫兹时域光谱成像系统中，通过延迟线扫描得到太赫兹时域光谱。

进一步，所述方法还包括如下操作：

C、使用准直的泵浦光照射在数字微镜阵列上从而形成掩膜；或者，使用液晶空间光调制器或使用投影仪形成掩膜；

10 D、将所述掩膜投影到所述衰减全反射模块的入射面上，从而所述衰减全反射模块在所述泵浦光掩膜的照射下形成光生载流子，在所述入射面上对入射的太赫兹波产生调控；

E、使用单像素探测器结合重建算法重建太赫兹光场。

此外，基于上述光控法调制太赫兹波，所述衰减全反射模块的材料优选为本征硅，砷化镓或者本征锗。所述泵浦光的波长，可以在紫外光、可见光或是
15 近红外光，例如小于 1100nm，优选为 808nm。

根据本申请提出的近场太赫兹波光谱成像系统和方法，利用衰减全反射模块的全反射原理，在衰减全反射模块的表面形成太赫兹波倏逝场，待测样品紧贴上述表面就能达到近场探测的目的，如此的衰减全反射模块能够直接承载待
20 测样品而不需要设计单独的夹具，因此使用更加简便。利用光控法实现太赫兹波段的单像素成像，调制掩膜投影在衰减全反射模块的侧面，由于衰减全反射模块为体材料，因而不需要将调制掩膜精确地投影在调制器上，即便投影焦平面向衰减全反射模块内部偏移，也能够实现对太赫兹波的调制。最后利用太赫兹时域光谱测量原理，通过重构不同时刻的太赫兹光场信号，继而相对光栅扫描
25 成像法可以使用更短的时间达到太赫兹多光谱成像目的，结合近场探测原理，实现了太赫兹波成像分辨率的提高。

上述说明仅是本申请技术方案的概述，为了能够更清楚了解本申请的技术

手段，并可依照说明书的内容予以实施，以下以本申请的较佳实施例并配合附图详细说明如后。

附图说明

5 构成本申请的一部分的附图用来提供对本申请的进一步理解，本申请的示意性实施例及其说明用于解释本申请，并不构成对本申请的不当限定。在附图中：

图 1 示出了本申请的近场太赫兹波光谱成像系统结构图；

图 2 示出了本申请的衰减全反射模块结构图；

10 图 3 示出了全反射不同设计角度之间的关系；

图 4 示出了本申请的太赫兹波时域光谱成像示意图；

图 5 示出了本申请的 THz-TDS 近场高光谱成像结果示意图；

图 6 示出了本申请的光纤耦合式近场太赫兹波光谱成像系统结构图；

图 7 示出了本申请的近场太赫兹波光谱成像系统的样品池结构图。

具体实施方式

为使本申请的目的、技术方案和优点更加清楚，下面将结合本申请具体实施例及相应的附图对本申请技术方案进行清楚、完整地描述。显然，所描述的实施例仅是本申请一部分实施例，而不是全部的实施例。基于本申请中的实施
20 例，本领域普通技术人员在没有做出创造性劳动前提下所获得的所有其他实施例，都属于本申请保护的范围。

突破太赫兹波衍射极限的主要方法是利用近场成像技术，为达到近场成像条件，需要一个亚波长辐射源且辐射源与成像目标的距离控制在一个波长范围以内。基于此，本申请提出基于衰减全反射模块的倏逝场满足近场条件的优势，
25 利用光控法实现近场亚波长辐射源，结合单像素成像算法，实现无需扫描机制

的太赫兹近场成像。

太赫兹波光谱成像系统结构图示例性参见说明书附图 1。飞秒激光器 1 输出的激光被分光片分成两路，一路经过直角反射镜 2 和延迟线 3 后汇聚于太赫兹发射天线 4，另一路经过反射镜 5 聚焦于太赫兹探测天线 6。太赫兹发射天线 4 产生的太赫兹波信号经过离轴抛物面镜 7 准直后，与承载在衰减全反射模块 8 上的待测样品 9 发生相互作用，随后由离轴抛物面镜 10 将上述相互作用后的太赫兹波信号聚焦到接收端的太赫兹探测天线 6。系统的基本结构为太赫兹时域光谱系统 THz-TDS，通过延迟线 3 的扫描，可以得到太赫兹时域谱。

为了提高太赫兹光谱成像的分辨率，本申请利用近场成像技术。使太赫兹发射天线 4 产生的太赫兹波经过衰减全反射模块 8 发生全反射，进而在衰减全反射模块 8 的表面形成太赫兹倏逝场，由该倏逝场和将待测样品直接放置在衰减全反射模块 8 的表面上两者来满足亚波长辐射源以及辐射源与成像目标的距离控制在一个波长范围以内的近场成像条件。

倏逝场产生模块即衰减全反射模块 8 的设计参见说明书附图 2，衰减全反射模块 8 利用对太赫兹波低吸收的本征硅制作，模块整体以三角棱柱为模型，截面为等腰三角形。太赫兹发射天线 4 产生的太赫兹波从三角棱柱的入射面 81 射入，经过反射面 82 发生全反射，然后从出射面 83 射出，全反射过程中在反射面 82 形成倏逝场 84。待测样品 9 可以直接放置在产生倏逝场 84 的反射面 82 上从而满足近场成像条件。相对于现有技术中的薄片型硅材料来说，本申请不必在制作额外精细的基底结构或者夹具就可以方便地放置待测样品。

说明书附图 2 中示出了截面等腰三角形的底角 α 、待测样品环境折射率 n_1 、衰减全反射模块 8 的折射率 n_2 以及其它角度 β 、 θ 和 γ ，由于太赫兹波在界面之间折反射满足 Snell 理论，因而具有如下关系：

$$n_2 \sin \beta = n_1 \quad (1)$$

$$n_1 \sin \theta = n_2 \sin \gamma \quad (2)$$

$$\theta = 90^\circ - \beta + \gamma \quad (3)$$

$$\alpha + \theta = 90^\circ \quad (4)$$

一般情况下，待测样品就放置在空气中即可，此时空气 $n_1=1$ 。衰减全反射模块 8 例如可以使用高阻硅等材料，其在太赫兹波段 $n_2=3.418$ 。因此在上述空气和高阻硅材料的折射率已知的情况下，根据公式 (1) 可以计算临界角 $\beta=17.1^\circ$ 。因而，对于入射的太赫兹波来说，只要 $\beta>17.1^\circ$ 都能在反射面 82 形成太赫兹波倏逝场。对于等腰三角形模块来说角度 $\alpha \in (0^\circ, 90^\circ)$ ，结合公式 (2) - (4)，可以得到不同 α 对应的 β 和 θ ，如说明书附图 3 所示。因而本领域技术人员容易根据检测环境选择适合的角度设计，例如底角 α 的范围在 20° - 60° 的范围内都是适合的，底角过小也不利于整体样品承载结构的设计。在本实施例中，优选 α 为 30° ，因而对应地 θ 为 60° 、 β 为 44.68° 。在以上角度都已知的情况下，如果反射面 82 的长度设为 50mm，那么也可以计算出入射面 81 和出射面 83 的尺寸为 28.87mm。

为了进一步克服现有技术的长时间扫描问题，本申请同时提出使用单像素成像技术，配合光控法或者孔径编码技术以快速获得高分辨的光谱成像。由于孔径编码技术还需要诸多硬件配合实现，本申请优选使用光控法结合单像素成像算法以实现无需扫描机制的太赫兹近场成像。具体参见说明书附图 1，一个 808nm 光源 11 产生准直的 808nm 泵浦光，泵浦光照射在可控的数字微镜阵列 12 上，利用数字微镜阵列 12 形成掩膜，进一步利用透镜将掩膜投影到衰减全反射模块 8 的侧表面即入射面 81 上。本申请中衰减全反射模块 8 的材料优选使用高阻硅制备而成，因而衰减全反射模块 8 在泵浦光掩膜的照射下形成光生载流子，在入射面 81 上对入射的太赫兹波的传导率产生调控。衰减全反射模块 8 的材质选择针对太赫兹波段可透的半导体，例如本征硅，砷化镓或者本征锗等，不同的材质适用于不同的照明环境以达到更高的太赫兹波调制效率。

关于对太赫兹波的调制，具体而言光生载流子的浓度取决于光照条件和半导体基本性质，其满足如下公式：

$$n = \frac{I_0(1-R)\tau}{2Adh\omega}$$

其中 I_0 表示光源平均功率, R 表示反射率, $h\omega$ 表示半导体能带宽度, A 表示表示面积, τ 表示载流子寿命, d 表示穿透深度。

载流子浓度 n 的变化将导致半导体复折射率发生变化, 以致于半导体对太赫兹波的透射率也发生改变。半导体复折射率由 drude 公式给出:

$$\varepsilon(\omega) = \varepsilon_{\infty} - \frac{\omega_p^2}{\omega(\omega + i\Gamma)}$$

其中 $\varepsilon_{\infty} = 11.7$, Γ 为电子碰撞时间, ω_p 为等离子频率 $\omega_p^2 = ne^2 / \varepsilon_0 m^*$, ε_0 为真空介电常数, m^* 为有效质量, e 为电荷电量, $\omega = 2\pi f$ 为角频率, 其中 f 在 0.1-10THz 的太赫兹范围内, n 为载流子浓度。光照引起的透射率变化定义为调制深度 $M = (T_{I_0=0} - T_{I_0=\max}) / T_{I_0=0}$, 其表示为泵浦激光输出功率分别为 0 和最大时相应所述透射率的差值再比上泵浦激光输出功率为 0 时的所述透射率。在本申请中, 泵浦光的波长小于 1100nm, 优选使用 808nm 激光, 功率密度 $2\text{W}/\text{cm}^2$, 实现调制深度在 0.3THz 时约 30%。由此可见, 对于不同的半导体材质, 其将产生不同浓度的光生载流子, 进而光生载流子浓度的变化导致等离子体频率变化继而产生对太赫兹波透射率的影响, 实现了调制作用。

基于上述通过投影掩膜实现对太赫兹波的调控, 在已知单像素探测器信号和投影掩膜的情况下, 可以计算出特定时刻下的太赫兹光场分布。由于本申请的衰减全反射模块 8 具有一定的体厚度, 因此即便上述掩膜投影的焦平面位置没有那么准确, 例如焦平面位于衰减全反射模块 8 的内部, 也不影响对入射太赫兹波的调控, 相对于现有技术中只能在薄硅片表面上投影掩膜来说, 本申请的技术方案容错率更高。可替换地, 上述掩膜的生成也可以不使用数字微镜阵列 12, 例如通过液晶空间光调制器或者直接使用商用投影仪都可以生成所述掩膜。而所述掩膜被投影到衰减全反射块 8 上则使用常规的投影手段即可。

具体地, 关于上述数字投影以及图像重建, 优选按照如下流程进行操作:

1) 构建掩膜矩阵 $\Phi_{M \times N^2}$, 该矩阵例如为随机矩阵、哈达玛矩阵或者伯努利

矩阵等中的一种；

2) 将矩阵 $\Phi_{M \times N^2}$ 中的每一行取出，构建 $N \times N$ 的掩膜 $\phi_{N \times N}$ ；

3) 用数字投影技术将 $\phi_{N \times N}$ 掩膜投影在衰减全反射模块 8 的入射面 81 上，从而在衰减全反射模块 8 产生光生载流子以实现入射太赫兹波进行调制；

5 4) 单像素探测器采集经过样品后的调制太赫兹波信号；

5) 利用压缩感知算法，重建太赫兹光场。

按照上述流程获得特定时刻的太赫兹光场分布，例如参见说明书附图 4 中的 (b)，每一个时刻的二维光场分布都是依据上述流程操作获得。进一步，结合说明书附图 4 中的 (a)，利用太赫兹波时域光谱成像原理通过延迟线计算出不同时刻太赫兹光场分布，然后便可以计算出样品的太赫兹多光谱图像。说明书附图 5 示例性地进一步展示了一个时刻的 THz-TDS 近场高光谱成像结果，其中图 5 中的 (a) 是时域谱，图 5 中的 (b) 是频域谱，其光谱分辨能力可以进一步表征物质特性。物质在太赫兹波段的共振吸收表现物质分子相关属性，可以从时域和频域分别表征。通过扫描延迟线得到时域谱，不放置样品采集的时域谱为参考信号 R，放置待测样品采集的时域谱为样品信号 S，图中参考信号峰值以 P1 表示，样品信号峰值以 P2 表示，峰峰值的差异即 $\Delta P = P1 - P2$ ，该值在一定程度上能够表征物质的吸收状况，特别是溶液物质，该差值与水含量正相关，因此能够在线监测生物组织的水活动。此外，特征频率差值 $\Delta \alpha_f$ 在一定程度上表征了物质的构型的变化，特别是生物大分子如蛋白质转录，浓度变化都会影响某些频率成分的增加或减少，利用本申请的方法可以在线监测生物大分子含量变化。进一步，结合光控单像素成像，可以在线观测峰峰值差异的图像变化，特征频率差异的图像变化，达到更加直观的观测效果。

与说明书附图 1 的自由空间光路所不同，说明书附图 6 示出了使用光纤耦合搭建光路的实施例。图中附图标记的使用与说明书附图 1 中相同，即相同的附图标记指代相同的器件。飞秒激光器 1 发出的激光被分为两路，分别耦合至第一光纤 13 和第二光纤 14 中。第一光纤 13 中的光经过延迟线 3 被耦合到太赫兹发射天线 4，随后太赫兹发射天线 4 产生的太赫兹波信号照射到衰减全反

射模块 8 上,在与直接承载在衰减全反射模块 8 上的待测样品 9 发生相互作用后被聚焦到接收端的太赫兹探测天线 6。

使用光纤耦合光路将使得整套系统更加紧凑,其中太赫兹发射天线 4、衰减全反射模块 8、太赫兹探测天线 6、泵浦激光 11、数字微镜阵列 12 等可以被集成在一起形成系统的移动端 M。飞秒激光器 1 以及延迟线 3 可以被集成在系统的固定端 F 内。而移动端 M 和固定端 F 之间通过第一光纤 13 和第二光纤 14 进行耦合连接。如此,在使用系统时,可以根据需要方便的调整移动端 M 的位置,从而将例如生物组织、器官、溶液等待测样品方便且直接地放置在衰减全反射模块 8 的全反射面上以进行检测。同时,该设计还能满足在体检的需求,由于移动端 M 可以制作成方便移动的大小,因而能够以移动移动端 M 而不移动待测对象的方式,将移动端 M 内的衰减全反射模块 8 的全反射面贴向待测对象来实现检测。

进一步,所述移动端 M 可以具有外壳,并在衰减全反射模块 8 的全反射面位置留有检测窗,从而方便待测样品直接放到该模块上。特别的,对于溶液或者其它不宜直接放在衰减全反射模块 8 上的待测样品来说,参见说明书附图 7,可以制作方便盛放溶液的样品池,所述样品池 15 直接坐落在所述衰减全反射模块 8 的全反射面上,其中样品池 15 还具有一个与衰减全反射模块 8 材质相同的样品池底部 16,从而使得太赫兹波能够在样品池底部 16 的上表面发生全反射,以满足近场条件。

以上对本申请的一种近场太赫兹波光谱成像系统和方法进行了描述。该技术方案结合基于衰减全反射模块的太赫兹时域光谱系统,利用半导体的光致载流子时空特性,并结合光投影技术,实现单像素的太赫兹波近场成像。一般而言,传统太赫兹时域光谱系统为远场探测。而本申请引入衰减全反射模块,太赫兹光经该模块产生较强的倏逝波(该倏逝波是近场的),并与置于该模块表面的样品相互作用。因而,近场探测时,样品只需紧贴衰减全反射模块的表面即可。相比于现有技术,本申请能够在衰减全反射模块上直接承载样品,而不需要设计单独的夹具。进一步结合先进的数字投影系统,通过投影掩膜,利用衰减全反射模块高阻硅的光生载流子特性,对太赫兹波进行调制继而采集,实

现单像素成像的功能，由于调制掩膜投影在衰减全反射模块的侧面即可，因而相对于现有技术将掩膜投影到薄硅片上来说本申请对调制掩膜的投影要求更低，操作更加直接方便。最后再利用太赫兹时域光谱的光谱分辨能力，通过重构不同时刻太赫兹光场信号，整体实现快速的高分辨率的近场多光谱成像功能。

需要说明的是，在不冲突的情况下，本申请中的实施例及实施例中的特征可以相互组合。

以上所述，仅是本申请的较佳实施例而已，并非对本申请作任何形式上的限制，依据本申请的技术实质对以上实施例所作的任何简单修改、等同变化与修饰，均仍属于本申请技术方案的范围内。

权 利 要 求

1、 一种近场太赫兹波光谱成像系统，所述系统的基础光路为：飞秒激光器（1）输出的激光被分成两路；一路经过延迟线（3）后汇聚于太赫兹发射天线（4）；另一路聚焦于太赫兹探测天线（6）；所述太赫兹发射天线（4）产生的太赫兹波信号与待测样品（9）发生相互作用后被聚焦到接收端的太赫兹探测天线（6）；其特征在于：

所述系统还包括衰减全反射模块（8），所述太赫兹发射天线（4）产生的太赫兹波在所述衰减全反射模块（8）中发生全反射，进而在所述衰减全反射模块（8）的全反射面（82）形成太赫兹倏逝场，所述待测样品（9）直接承载在所述衰减全反射模块（8）的所述全反射面（82）上。

2、 如权利要求1所述的系统，其特征在于：所述衰减全反射模块（8）整体为三角棱柱，截面为等腰三角形；

所述太赫兹发射天线（4）产生的太赫兹波从三角棱柱的入射面（81）射入，经过所述全反射面（82）发生全反射，然后从出射面（83）射出，全反射过程中在所述全反射面（82）形成倏逝场。

3、 如权利要求2所述的系统，其特征在于：所述衰减全反射模块（8）截面等腰三角形的底角为 20° - 60° 。

4、 如权利要求2所述的系统，其特征在于：还包括光源（11）以产生准直的泵浦光，所述泵浦光照射在数字微镜阵列（12）上从而利用所述数字微镜阵列（12）形成掩膜；或者，通过液晶空间光调制器或者投影仪形成掩膜；

所述掩膜被投影到所述衰减全反射模块（8）的所述入射面（81）上，从而所述衰减全反射模块（8）在所述掩膜的投影照射下形成光生载流子，在所述入射面（81）上对入射的太赫兹波产生调控。

5、 如权利要求4所述的系统，其特征在于：所述衰减全反射模块（8）的材料为本征硅，砷化镓或者本征锗。

6、 如权利要求4所述的系统，其特征在于：所述泵浦光为紫外光、可见光或者近红外光。

7、如权利要求 6 所述的系统，其特征在于：所述泵浦光的波长为 808nm。

8、如权利要求 1 或 4 所述的系统，其特征在于：还包括单像素探测器，使用单像素探测器结合压缩感知算法重建太赫兹光场。

5 9、如权利要求 1 所述的系统，其特征在于：

所述飞秒激光器 (1)、所述延迟线 (3) 集成在所述系统的固定端 (F)；所述太赫兹发射天线 (4)、所述衰减全反射模块 (8)、所述太赫兹探测天线 (6) 集成在所述系统的移动端 (M)；

10 所述固定端 (F) 和所述移动端 (M) 之间的光路通过第一光纤 (13) 和第二光纤 (14) 耦合；所述飞秒激光器 (1) 发出的光被分为两路，其中所述第一光纤 (13) 中的光经过延迟线 (3) 被耦合到所述太赫兹发射天线 (4)，所述第二光纤 (14) 中的光被耦合到所述太赫兹探测天线 (6)。

10、如权利要求 9 所述的系统，其特征在于：

15 所述移动端 (M) 还包括数字微镜阵列 (12)、液晶空间光调制器或者投影仪，以向所述衰减全反射模块 (8) 投影掩膜。

11、如权利要求 1 或 9 所述的系统，其特征在于：在所述衰减全反射模块 (8) 上直接设有样品池 (15)，所述样品池 (15) 包括样品池底部 (16)，所述样品池底部 (16) 的材质与所述衰减全反射模块 (8) 的材质相同。

12、一种近场太赫兹波光谱成像方法，其特征在于：

20 使用衰减全反射模块 (8) 来满足近场成像条件；具体包括如下两个操作：

A、使太赫兹发射天线 (4) 产生的太赫兹波在所述衰减全反射模块 (8) 中发生全反射，进而在所述衰减全反射模块 (8) 的全反射面 (82) 形成太赫兹倏逝场；

25 B、将待测样品 (9) 直接承载在所述衰减全反射模块 (8) 的所述全反射面 (82) 上。

13、如权利要求 12 所述的方法，其特征在于：将所述衰减全反射模块 (8) 放置在太赫兹时域光谱成像系统中，通过延迟线 (3) 扫描得到太赫兹时域光谱。

14、如权利要求 12 或 13 所述的方法，其特征在于：还包括如下操作：

C、使用准直的泵浦光照射在数字微镜阵列(12)上从而形成掩膜；或者，使用液晶空间光调制器或使用投影仪形成掩膜；

D、将所述掩膜投影到所述衰减全反射模块(8)的入射面(81)上，从而所述衰减全反射模块(8)在所述泵浦光掩膜的照射下形成光生载流子，在
5 所述入射面(81)上对入射的太赫兹波产生调控；

E、使用单像素探测器结合重建算法重建太赫兹光场。

15、如权利要求 12-14 任一项所述的方法，其特征在于：所述衰减全反射模块(8)的材料使用本征硅，砷化镓或者本征锗。

16、如权利要求 14 所述的方法，其特征在于：所述泵浦光为紫外光、可
10 见光或者近红外光。

17、如权利要求 16 所述的方法，其特征在于：所述泵浦光的波长为 808nm。

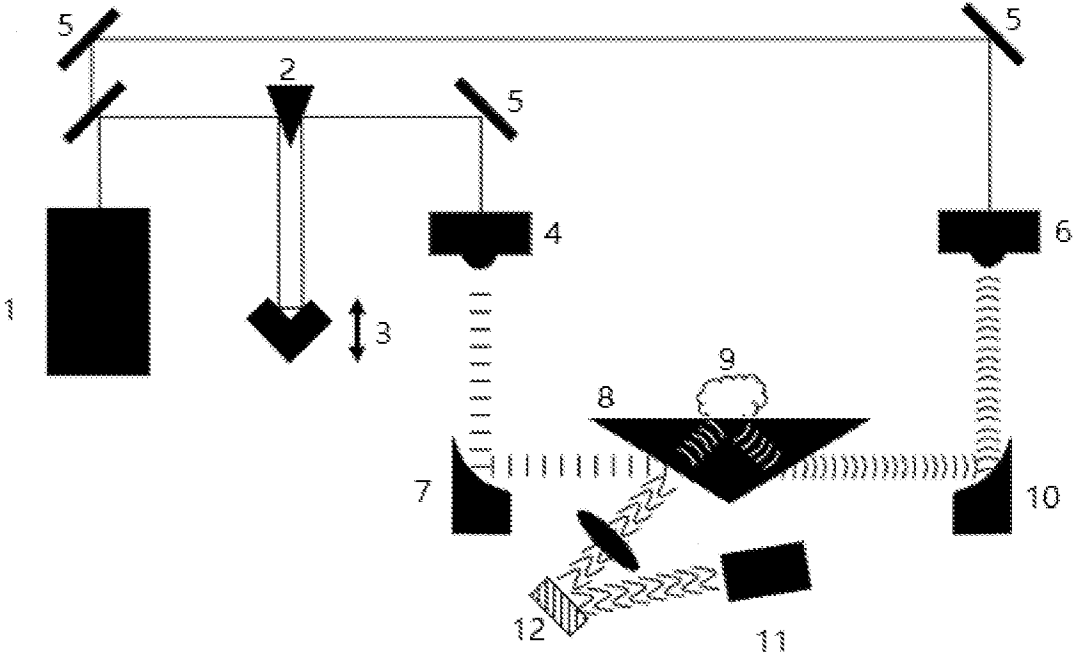


图 1

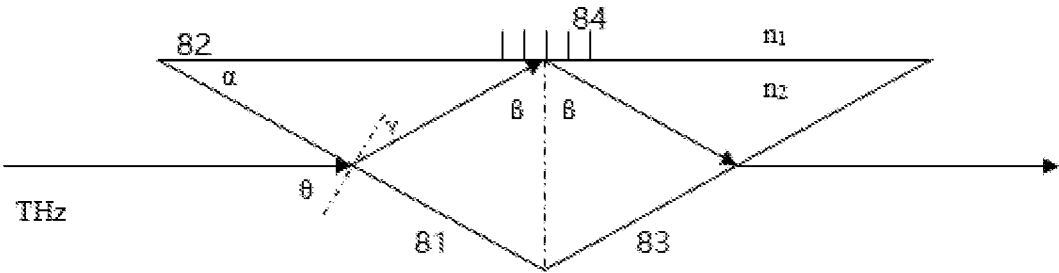


图 2

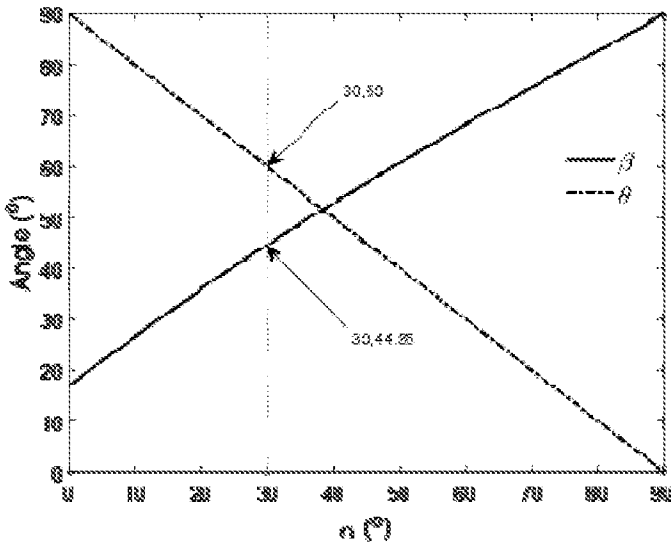


图 3

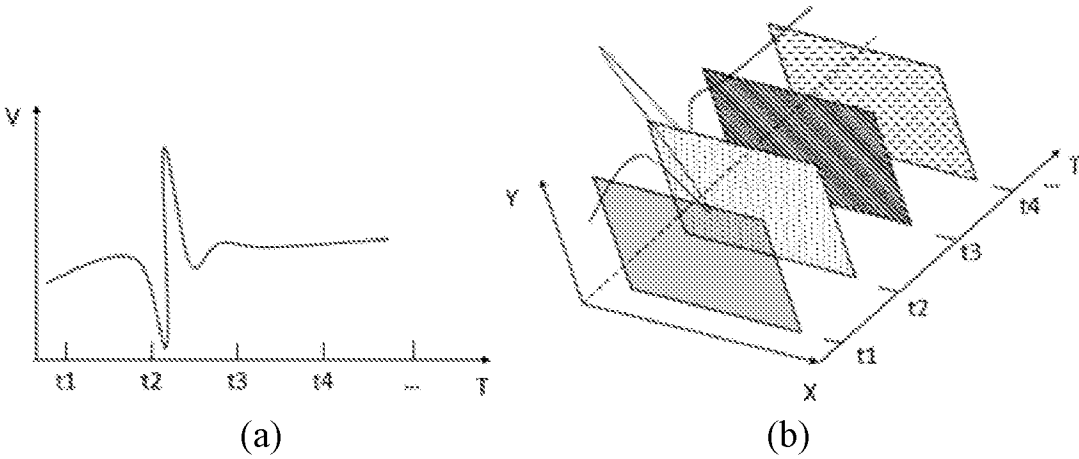


图 4

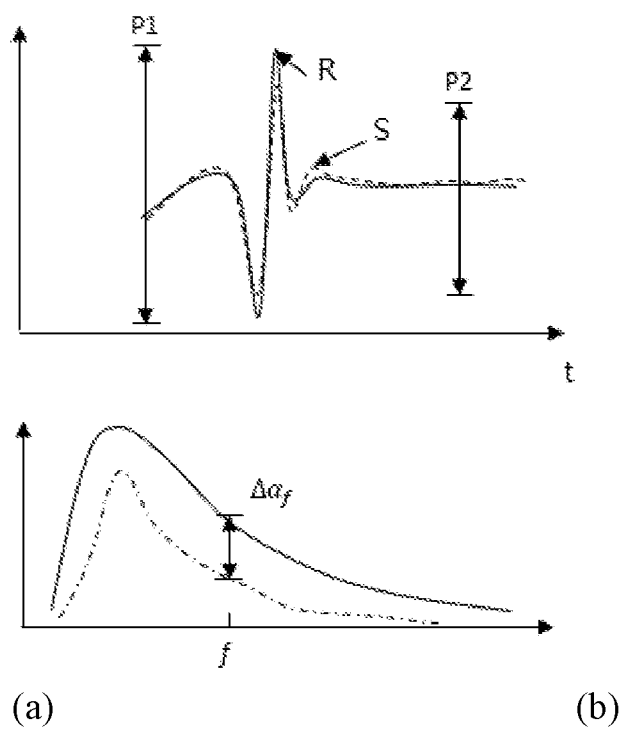


图 5

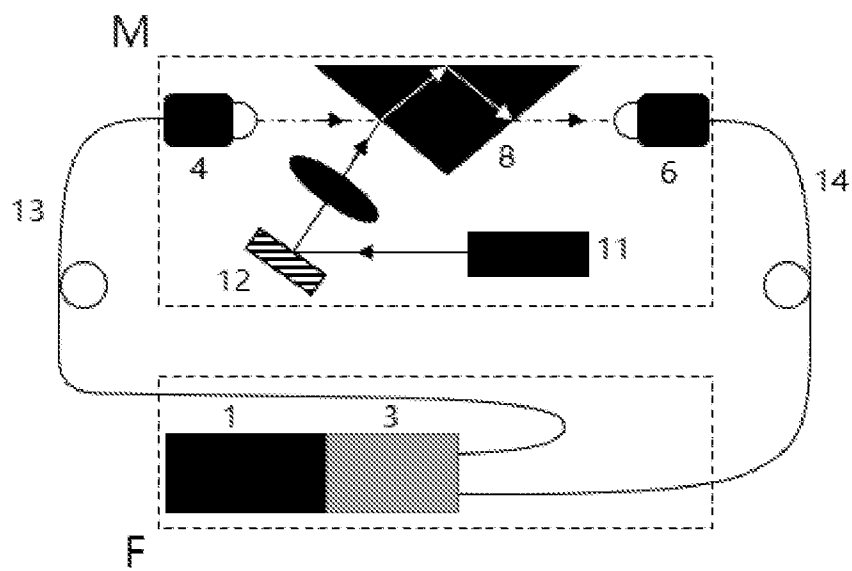


图 6

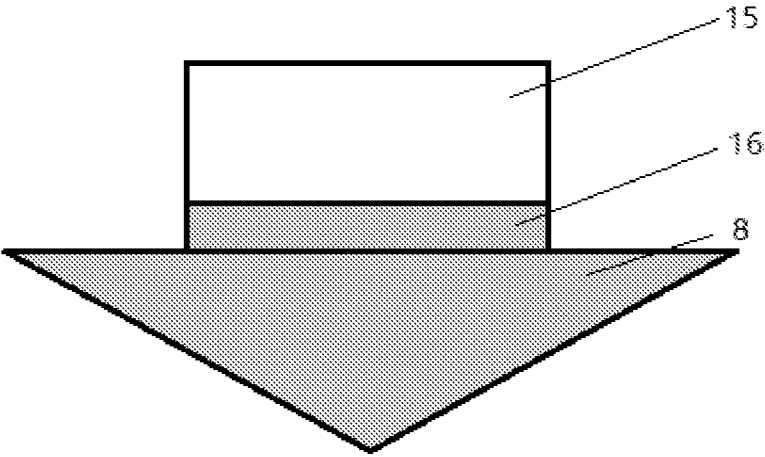


图 7

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.

PCT/CN2019/123441

A. CLASSIFICATION OF SUBJECT MATTER

G01N 21/552(2014.01)i

According to International Patent Classification (IPC) or to both national classification and IPC

B. FIELDS SEARCHED

Minimum documentation searched (classification system followed by classification symbols)

G01N21/-,G01B9/-,G01B11/-

Documentation searched other than minimum documentation to the extent that such documents are included in the fields searched

Electronic data base consulted during the international search (name of data base and, where practicable, search terms used)

CNKI, CNPAT, WPI, EPODOC: 太赫兹波, 衰减全反射, 延迟, 反射, 掩膜, 载流子, 调制, 调控, 单像素, 压缩感知, terahertz, delay+, attenuated total reflection, ATR, reflect+, modulat+, mask?, carrier

C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
PX	CN 109444085 A (SHENZHEN INSTITUTES OF ADVANCED TECHNOLOGY) 08 March 2019 (2019-03-08) description, paragraphs [0034]-[0061], and figures 1-2, 6-7	1-17
PX	CN 209356405 U (SHENZHEN INSTITUTES OF ADVANCED TECHNOLOGY) 06 September 2019 (2019-09-06) description, paragraphs [0034]-[0061], and figures 1-2, 6-7	1-17
X	CN 105928898 A (THE FIRST AFFILIATED HOSPITAL OF THIRD MILITARY MEDICAL UNIVERSITY OF PLA) 07 September 2016 (2016-09-07) description, paragraphs [0029]-[0036], and figures 1-2	1-3, 8-9, 11-13, 15
Y	CN 105928898 A (THE FIRST AFFILIATED HOSPITAL OF THIRD MILITARY MEDICAL UNIVERSITY OF PLA) 07 September 2016 (2016-09-07) description, paragraphs [0029]-[0036], and figures 1-2	4-7, 10, 14, 16-17
Y	CN 107462544 A (UNIVERSITY OF SHANGHAI FOR SCIENCE AND TECHNOLOGY) 12 December 2017 (2017-12-12) description, paragraphs [0066]-[0070], and figure 5	4-7, 10, 14, 16-17

☒ Further documents are listed in the continuation of Box C.☒ See patent family annex.

* Special categories of cited documents:

“A” document defining the general state of the art which is not considered to be of particular relevance

“E” earlier application or patent but published on or after the international filing date

“L” document which may throw doubts on priority claim(s) or which is cited to establish the publication date of another citation or other special reason (as specified)

“O” document referring to an oral disclosure, use, exhibition or other means

“P” document published prior to the international filing date but later than the priority date claimed

“T” later document published after the international filing date or priority date and not in conflict with the application but cited to understand the principle or theory underlying the invention

“X” document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered novel or cannot be considered to involve an inventive step when the document is taken alone

“Y” document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered to involve an inventive step when the document is combined with one or more other such documents, such combination being obvious to a person skilled in the art

“&” document member of the same patent family

Date of the actual completion of the international search

02 March 2020

Date of mailing of the international search report

09 March 2020

Name and mailing address of the ISA/CN

China National Intellectual Property Administration (ISA/CN)
No. 6, Xitucheng Road, Jimenqiao Haidian District, Beijing 100088
China

Facsimile No. (86-10)62019451

Authorized officer

Telephone No.

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.

PCT/CN2019/123441

C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
A	CN 103822577 A (CHINA ELECTRONIC TECHNOLOGY GROUP CORPORATION NO. 38 RESEARCH INSTITUTE) 28 May 2014 (2014-05-28) entire document	1-17
A	CN 101187733 A (CHINA JILIANG UNIVERSITY) 28 May 2008 (2008-05-28) entire document	1-17
A	EP 1630542 A1 (AISIN SEIKI K. K. et al.) 01 March 2006 (2006-03-01) entire document	1-17
A	JP 2016053528 A (NARISU KESHOHIN K.K. et al.) 14 April 2016 (2016-04-14) entire document	1-17

INTERNATIONAL SEARCH REPORT
Information on patent family members

International application No.

PCT/CN2019/123441

Patent document cited in search report			Publication date (day/month/year)	Patent family member(s)			Publication date (day/month/year)
CN	109444085	A	08 March 2019	None			
CN	209356405	U	06 September 2019	None			
CN	105928898	A	07 September 2016	None			
CN	107462544	A	12 December 2017	CN	105044018	B	12 September 2017
				CN	105044018	A	11 November 2015
				CN	107462544	B	01 November 2019
CN	103822577	A	28 May 2014	CN	103822577	B	05 April 2017
CN	101187733	A	28 May 2008	None			
EP	1630542	A1	01 March 2006	US	2006231762	A1	19 October 2006
				EP	2015054	A2	14 January 2009
				JP	3950818	B2	01 August 2007
				JP	2004354246	A	16 December 2004
				WO	2004106900	A1	09 December 2004
				EP	2015054	B1	14 November 2018
				US	7488940	B2	10 February 2009
JP	2016053528	A	14 April 2016	JP	6454498	B2	16 January 2019

国际检索报告

国际申请号

PCT/CN2019/123441

A. 主题的分类

G01N 21/552(2014.01) i

按照国际专利分类(IPC)或者同时按照国家分类和IPC两种分类

B. 检索领域

检索的最低限度文献(标明分类系统和分类号)

G01N21/-, G01B9/-, G01B11/-

包含在检索领域中的除最低限度文献以外的检索文献

在国际检索时查阅的电子数据库(数据库的名称, 和使用的检索词(如使用))

CNKI, CNPAT, WPI, EPDOC: 太赫兹波, 衰减全反射, 延迟, 反射, 掩膜, 载流子, 调制, 调控, 单像素, 压缩感知, terahertz, delay+, attenuated total reflection, ATR, reflect+, modulat+, mask?, carrier

C. 相关文件

类 型*	引用文件, 必要时, 指明相关段落	相关的权利要求
PX	CN 109444085 A (深圳先进技术研究院) 2019年 3月 8日 (2019 - 03 - 08) 说明书第[0034]-[0061]段和图1-2、6-7	1-17
PX	CN 209356405 U (深圳先进技术研究院) 2019年 9月 6日 (2019 - 09 - 06) 说明书第[0034]-[0061]段和图1-2、6-7	1-17
X	CN 105928898 A (中国人民解放军第三军医大学第一附属医院) 2016年 9月 7日 (2016 - 09 - 07) 说明书第[0029]-[0036]段和图1-2	1-3、8-9、11-13、15
Y	CN 105928898 A (中国人民解放军第三军医大学第一附属医院) 2016年 9月 7日 (2016 - 09 - 07) 说明书第[0029]-[0036]段和图1-2	4-7、10、14、16-17
Y	CN 107462544 A (上海理工大学) 2017年 12月 12日 (2017 - 12 - 12) 说明书第[0066]-[0070]段和图5	4-7、10、14、16-17
A	CN 103822577 A (中国电子科技集团公司第三十八研究所) 2014年 5月 28日 (2014 - 05 - 28) 全文	1-17
A	CN 101187733 A (中国计量学院) 2008年 5月 28日 (2008 - 05 - 28) 全文	1-17

☒ 其余文件在C栏的续页中列出。☒ 见同族专利附件。

* 引用文件的具体类型:

“A” 认为不特别相关的表示了现有技术一般状态的文件

“E” 在国际申请日的当天或之后公布的在先申请或专利

“L” 可能对优先权要求构成怀疑的文件, 或为确定另一篇引用文件的公布日而引用的或者因其他特殊理由而引用的文件(如具体说明的)

“O” 涉及口头公开、使用、展览或其他方式公开的文件

“P” 公布日先于国际申请日但迟于所要求的优先权日的文件

“T” 在申请日或优先权日之后公布, 与申请不相抵触, 但为了理解发明之理论或原理的在后文件

“X” 特别相关的文件, 单独考虑该文件, 认定要求保护的发明不是新颖的或不具有创造性

“Y” 特别相关的文件, 当该文件与另一篇或者多篇该类文件结合并且这种结合对于本领域技术人员为显而易见时, 要求保护的发明不具有创造性

“&” 同族专利的文件

国际检索实际完成的日期

2020年 3月 2日

国际检索报告邮寄日期

2020年 3月 9日

ISA/CN的名称和邮寄地址

中国国家知识产权局(ISA/CN)

中国北京市海淀区蓟门桥西土城路6号 100088

传真号 (86-10)62019451

授权官员

孙博思

电话号码 86-(10)-53962463

C. 相关文件		
类 型*	引用文件，必要时，指明相关段落	相关的权利要求
A	EP 1630542 A1 (AISIN SEIKI K.K. 等) 2006年 3月 1日 (2006 - 03 - 01) 全文	1-17
A	JP 2016053528 A (NARISU KESHOHIN K.K. 等) 2016年 4月 14日 (2016 - 04 - 14) 全文	1-17

国际检索报告
关于同族专利的信息

国际申请号

PCT/CN2019/123441

检索报告引用的专利文件			公布日 (年/月/日)	同族专利	公布日 (年/月/日)
CN	109444085	A	2019年 3月 8日	无	
CN	209356405	U	2019年 9月 6日	无	
CN	105928898	A	2016年 9月 7日	无	
CN	107462544	A	2017年 12月 12日	CN 105044018 B	2017年 9月 12日
				CN 105044018 A	2015年 11月 11日
				CN 107462544 B	2019年 11月 1日
CN	103822577	A	2014年 5月 28日	CN 103822577 B	2017年 4月 5日
CN	101187733	A	2008年 5月 28日	无	
EP	1630542	A1	2006年 3月 1日	US 2006231762 A1	2006年 10月 19日
				EP 2015054 A2	2009年 1月 14日
				JP 3950818 B2	2007年 8月 1日
				JP 2004354246 A	2004年 12月 16日
				WO 2004106900 A1	2004年 12月 9日
				EP 2015054 B1	2018年 11月 14日
				US 7488940 B2	2009年 2月 10日
JP	2016053528	A	2016年 4月 14日	JP 6454498 B2	2019年 1月 16日