

(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
2021 年 9 月 23 日 (23.09.2021)



(10) 国际公布号
WO 2021/184760 A1

- (51) 国际专利分类号:
G01N 21/41 (2006.01)
- (21) 国际申请号: PCT/CN2020/123740
- (22) 国际申请日: 2020 年 10 月 26 日 (26.10.2020)
- (25) 申请语言: 中文
- (26) 公布语言: 中文
- (30) 优先权:
202010199607.2 2020年3月20日 (20.03.2020) CN
- (71) 申请人: 南京大学(NANJING UNIVERSITY) [CN/CN]; 中国江苏省南京市栖霞区仙林大道163号, Jiangsu 210023 (CN)。
- (72) 发明人: 涂学凑(TU, Xuecou); 中国江苏省南京市栖霞区仙林大道163号, Jiangsu 210023 (CN)。吴雅倩(WU, Yaqian); 中国江苏省南京市栖霞

区仙林大道163号, Jiangsu 210023 (CN)。陈健(CHEN, Jian); 中国江苏省南京市栖霞区仙林大道163号, Jiangsu 210023 (CN)。邵智豪(SHAO, Zhihao); 中国江苏省南京市栖霞区仙林大道163号, Jiangsu 210023 (CN)。贾小氢(JIA, Xiaoqing); 中国江苏省南京市栖霞区仙林大道163号, Jiangsu 210023 (CN)。赵清源(ZHAO, Qingyuan); 中国江苏省南京市栖霞区仙林大道163号, Jiangsu 210023 (CN)。张蜡宝(ZHANG, Labao); 中国江苏省南京市栖霞区仙林大道163号, Jiangsu 210023 (CN)。康琳(KANG, Lin); 中国江苏省南京市栖霞区仙林大道163号, Jiangsu 210023 (CN)。吴培亨(WU, Peiheng); 中国江苏省南京市栖霞区仙林大道163号, Jiangsu 210023 (CN)。

(74) 代理人: 南京苏创专利代理事务所(普通合伙)(NANJING SUCHUANG INTELLECTUAL

(54) Title: SYSTEM AND METHOD FOR MEASURING REFRACTIVE INDEXES OF MATERIALS IN TERAHERTZ WAVE-BAND

(54) 发明名称: 一种在太赫兹波段测量材料折射率的系统及方法

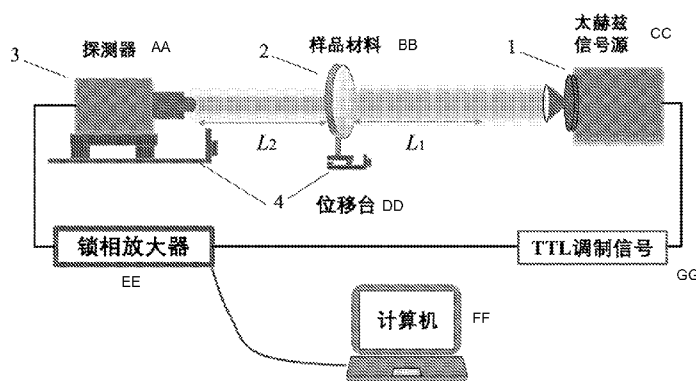


图 1

AA Detector
BB Sample material
CC Terahertz signal source
DD Displacement stage
EE Lock-in amplifier
FF Computer
GG TTL modulated signal

(57) Abstract: A system and method for measuring the refractive indexes of materials in a terahertz waveband. The system comprises a terahertz source (1), a detector (3), and an electro-optical system; the terahertz source (1) generates continuous terahertz radiation waves; the detector (3) receives terahertz signals; an electric displacement control module in the electro-optical system controls the detector to maintain collimation and move in a direction away from the terahertz source; a signal reading module converts received terahertz signals into electric signals; a signal processing module performs digital processing and filtering on the electric signals to obtain periodically changing terahertz signals to analyze and determine the refractive index. The method comprises: first, separately filtering two signals scanned by the detector (3) before and after a sample material (2) is inserted to filter out direct-current components in the signals, then analyzing the signals by means of a mathematical transform such as Hilbert transform to obtain instantaneous phases

PROPERTY LAW FIRM); 中国江苏省南京市江宁区麒麟科技创新园智汇路300号E座3楼301常晓慧, Jiangsu 210035 (CN)。

- (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, IT, 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, ST, SV, SY, TH, TJ, TM, TN, TR, TT, TZ, UA, UG, US, UZ, VC, VN, WS, 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))。

of the signals, and calculating the refractive index according to a phase jump value before and after the sample material (2) is inserted. The system and method implement high-precision material refractive index measurement based on terahertz continuous waves.

(57) 摘要: 一种在太赫兹波段测量材料折射率的系统及方法, 系统包括太赫兹源(1)、探测器(3)和电子光学系统, 其中太赫兹源(1)产生连续的太赫兹辐射波; 探测器(3)接收太赫兹信号; 电子光学系统中电动位移控制模块控制探测器保持准直并向远离太赫兹源的方向移动; 信号读出模块将接收到的太赫兹信号转化为电信号; 信号处理模块对电信号进行数字化处理和滤波, 得到周期性变化的太赫兹信号分析确定折射率。方法为先对插入样品材料(2)前后探测器(3)扫描到的两段信号进行分段滤波, 滤除其中的直流分量, 然后通过希尔伯特等数学变换进行信号分析处理, 得到信号的瞬时相位, 再根据插入样品材料(2)前后的相位跳变值计算出折射率。该系统和方法实现了基于太赫兹连续波的高精度材料折射率测量。

一种在太赫兹波段测量材料折射率的系统及方法

技术领域

本发明涉及常温太赫兹探测技术，具体涉及一种在太赫兹波段测量不同材料折射率的系统及方法。

背景技术

太赫兹（Terahertz，简称 THz）波一般是指频率在 0.3 T 到 10 THz（波长为 30 μm 到 1 mm）范围内的电磁波，该电磁波段介于亚毫米波和远红外之间。由于太赫兹波对于很多非极性物质，如部分电介质材料、塑料薄膜、纸张、布料等有较强的穿透力，因此太赫兹检测技术也被应用于质检、安全检查以及工业无损检测等场景当中。

在过去的二十年中，太赫兹技术的许多应用已经被讨论过，从生物分子的光谱学、国土安全、太赫兹通信等领域到工业检测都有广泛应用。在工业检测当中，材料参数的表征对于近年来的半导体工业和纳米光子技术非常重要。在光学波段，测量材料介电常数的方法和设备有很多，比如说椭偏仪、光谱仪等常用设备，通过测试能迅速获得材料的介电常数，但是这些设备通过材料对入射光的反射或透射来反演材料的光学参数。然而，目前的太赫兹源和探测器的性能还远达不到光学波段的光源和探测器的性能，因此通过反射或透射的测量目前只适合测量材料光学波段的介电常数，在太赫兹波段的实现还存在困难。尽管基于昂贵的飞秒激光器的太赫兹时域光谱仪已经问世，这种太赫兹测量系统中太赫兹源是脉冲式的，而非连续太赫兹光源。但是这种脉冲太赫兹系统光路复杂，使用了很多光学元件，系统调试耗时长，效率较低，成本很高，因此开发基于连续太赫兹源的测量系统具有显著优势。此外，微波波段测量材料的介电常数的方法也有很多，比如说矩形波导法、准光耦合方法，这些矩形波导系统和准光部件在微波波段尺寸大机械加工容易，但到了太赫兹波段，入射波长变小，对应的测量系统部件尺寸也相应减少，加工精度要求 10 微米以上，这给机械加工带来了极大的困难。因此，在太赫兹测量领域，高效率且高精度地表征材料参数仍然是目前研究的难题之一。

发明内容

本发明的目的在于提供一种在太赫兹波段测量材料折射率的系统及方法。

实现本发明目的的技术解决方案为：一种在太赫兹波段测量材料折射率的系统，包括固定于光学平台上的太赫兹源，固定于电动位移台上的探测器，以及电子光学系统，其中：

所述太赫兹源使用连续波太赫兹源，用于产生连续的太赫兹辐射波；

所述探测器固定在电动位移台上，用于准直的扫描光路中的太赫兹信号，包括未通过介质材料的太赫兹信号和通过介质材料后的太赫兹信号；

所述电子光学系统包括电动位移控制模块、信号读出模块和信号处理模块，其中电动位移控制模块用于控制探测器在光路中保持准直并向远离太赫兹源的方向移动，准直地在路径中扫描太赫兹信号；信号读出模块用于将探测器接收到的太赫兹信号转化为电信号，并利用锁相放大器读出；信号处理模块用于对探测器的响应信号进行数字化处理和滤波，得到最终的周期性变化的太赫兹信号，分析确定材料折射率。

进一步的，所述连续波太赫兹源包括 VDI 太赫兹频段信号源、倍频器与函数信号发生器。

进一步的，所述探测器采用肖特基探测器。

一种在太赫兹波段测量不同材料折射率的方法，包括以下步骤：

步骤一：太赫兹源产生连续波太赫兹信号，通过自由空间的光学路径准直地被探测器接收到；

步骤二：在扫描太赫兹源和探测器之间的自由空间光路时，探测器先扫描靠近太赫兹源的一半距离，然后在扫描路径的中间位置插入介质材料，继续再向远离太赫兹源的另一半距离，扫描过程中太赫兹信号透过介质材料准直地被固定在电动位移台上并向后移动的探测器接收到；

步骤三：探测器将接收到的太赫兹信号转换为电信号，并通过锁相放大器读出响应信号信息；

步骤四：对插入材料前后探测器扫描到的两段信号先进行分段滤波，滤除其中的直流分量，然后通过希尔伯特等数学变换进行信号分析处理，得到信号的瞬时相位，再根据插入材料前后的相位跳变值计算出折射率。

进一步的，步骤 4 中，经过两段扫描后，需要保证完整扫描光路后得到 8 个以上的完整周期的信号。

进一步的, 步骤4中, 对信号进行分段滤波时, 先对两段光路对应的检测信号分别进行傅立叶变换滤除其中的直流分量, 滤除原始信号的零频分量后再通过傅立叶反变换将信号恢复。

进一步的, 步骤4中, 希尔伯特变换表达式为:

$$S(x) = s(x) + j\tilde{s}(x)$$

经过变换得到的虚部为:

$$\tilde{s}(t) = \frac{1}{\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{s(\tau)}{t - \tau} d\tau = \frac{1}{\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{s(t - \tau)}{\tau} d\tau = s(t) * \frac{1}{\pi t}$$

变换后信号的瞬时相位表达式为:

$$\varphi(x) = \arctan\left(\frac{\tilde{s}(x)}{s(x)}\right)$$

其中, $S(x)$ 为进行希尔伯特变换的信号, $s(x)$ 、 $\tilde{s}(x)$ 分别为信号的实部和虚部, $\varphi(x)$ 为信号的相位。

进一步的, 步骤4中, 根据相位变化计算出材料折射率的方法为:

$$\frac{\Delta\varphi}{2\pi\nu_{THz}} = \frac{(n_{mat} - 1)}{c} L_{mat} \quad n_{mat} = \frac{\Delta\varphi}{L_{mat}} \frac{c}{2\pi\nu_{THz}} + 1$$

其中, n_{mat} 为材料的折射率, $\Delta\varphi$ 为插入介质材料带来的相位变化, C 为光速, L_{mat} 为材料厚度, ν_{THz} 为太赫兹信号频率。

进一步的, 步骤4中, 增加材料的厚度, 通过对材料的厚度进行累计, 测出在太赫兹路径中插入不同厚度材料引起的相位跳变值即相位变化 $\Delta\varphi$, 从而求出材料厚度和相位拟合直线的斜率 $\frac{\Delta\varphi}{L_{mat}}$, 即可计算材料的折射率, 具体公式为:

$$n_{mat} = \frac{\Delta\varphi}{L_{mat}} \frac{c}{2\pi\nu_{THz}} + 1$$

其中, n_{mat} 为材料的折射率, $\Delta\varphi$ 为插入介质材料带来的相位变化, c 为光速, L_{mat} 为材料厚度, ν_{THz} 为太赫兹信号频率。

本发明与现有技术相比, 其显著优点在于: 1) 采用简洁的光路系统, 在室温下即可测量多种非极性物质的折射率等参数, 测量的分辨率达到了微米级别; 2) 利用插入材料时带来的信号瞬时相位突变统计计算材料折射率, 并累计材料厚度多次重复测量, 提高了测量的精度、稳定性和效率; 3) 具有很好的技术

可移植性，不仅适用于部分材料的折射率检测，也适用于工业检测尤其是无损检测。

附图说明

图 1 为本发明材料折射率测量系统的光路示意图。

图 2 为检测的太赫兹信号电压响应示例图。

图 3 为滤波后的太赫兹信号示例图。

图 4 为希尔伯特变换后的相位跳变示例图。

图 5 为叠加材料厚度与相位跳变值的对应关系示例图。

具体实施方式

下面结合附图和具体实施例，进一步说明本发明方案。

如图 1 所示，在太赫兹波段测量不同材料折射率的系统，包括：固定于光学平台上的太赫兹源，固定于电动位移台上的探测器，以及电子光学系统，其中：

所述太赫兹源使用连续波太赫兹源，其能高效、稳定地产生连续的太赫兹辐射波。所述连续波太赫兹源在常温下，使用 VDI 太赫兹频段信号源扩展系统，配合倍频器与函数信号发生器将信号稳定放大至太赫兹波段。所述函数信号发生器能产生不同频率的特定的周期性时间函数波形。一些实施例中，函数信号发生器使用 TTL 脉冲波进行信号调制，TTL 脉冲调制的频率取决于探测器的响应速度(10-100 k)，选取的工作频率为 0.18 T-0.6 THz。

所述探测器固定在电动位移台上保持光路的准直，使得太赫兹信号（包括未通过介质材料的太赫兹信号和通过介质材料后的太赫兹信号）准直地被探测器接收到。由于肖特基探测器具有非线性强、速度快、能够常温工作的优点。一些实施例中，利用截止频率达太赫兹波段的肖特基探测器实现太赫兹信号的倍频或混频，这是由于肖特基探测器具有选频特性，在某些频率上能较小损耗地探测到太赫兹信号，实现信号的倍频。

所述电子光学系统包括电动位移控制模块、信号读出模块和信号处理模块，其中电动位移控制模块控制探测器在光路中保持准直并向前（远离太赫兹源的方向）移动，准直地在路径中扫描太赫兹信号；信号读出模块利用锁相放大器将探测器接收到的太赫兹信号转化为电信号（周期性变化的电压信号）并读出；信号处理模块对探测器的响应信号进行数字化处理，将信号统一进行数字滤波，滤除其中直流分量，得到最终的周期性变化的太赫兹信号，分析确定材料折射率。作

为一种具体实施方式,所述电子光学系统通过使用 Labview 控制程序将太赫兹源、函数信号发生器、探测器以及锁相放大器互联,从而读出信号。

由于光路中插入材料时,探测器检测到的信号也将发生变化,因此,可以通过检测插入材料带来的相位跳变可以快速提取样品材料的折射率。此外,由于太赫兹波的高度相干性,太赫兹波在光路中多次往返传播,检测到的信号为太赫兹相干波。因此,对检测的相干波进行频谱分析,从而获得信号的幅度和相位等信息,进一步可以计算出材料的折射率。基于上述分析,在太赫兹波段测量不同材料折射率的方法,包括以下步骤:

步骤一:太赫兹源产生连续波太赫兹信号,通过自由空间的光学路径准直地被探测器接收到;

步骤二:在扫描太赫兹源和探测器之间的自由空间光路时,探测器先扫描前半光路(靠近太赫兹源的一半路径)距离,然后在扫描路径的中间位置插入介质材料,继续再向后扫描光路的后一半(远离太赫兹源的另一半距离)距离,扫描过程中太赫兹信号透过介质材料准直地被固定在电动位移台上并向后移动的探测器接收到;

步骤三:探测器将接收到的太赫兹信号转换为电信号,并通过锁相放大器读出响应信号信息;

由于太赫兹源和探测器之间的距离的改变,太赫兹(THz)信号将不断变化。太赫兹信号的正弦表达式可以写为:

$$S(x) = S_1 \cos(K_{THz} L_{THz} + \varphi_0) \quad (1)$$

其中, K_{THz} 为波数, $K_{THz} = \frac{2\pi}{\lambda_{THz}}$, λ_{THz} 为太赫兹波长; S_1 为太赫兹源产生的原始信号; L_{THz} 为太赫兹源到探测器之间的自由路径的距离; φ_0 为信号的初相, φ_0 与自由路径的光路距离有关。

通过移动探测器, L_{THz} 将不断改变。由于天线之间的反射会经过奇数倍次的光路距离,即会导致奇数倍的 THz 检测信号。因此公式(1)实际需要写成:

$$S(x) = \sum_{nodd} S_n \cos(K_{THz} n L_{THz} + \varphi_0) \quad (2)$$

公式(2)即为对奇数倍的 THz 信号 S_n 进行累加求和的表达式,其中 n 为折射率, $nodd$ 为 S_n 的个数;

步骤四：对上述获取的两段信号（插入材料前后探测器扫描到的两段信号）先进行分段滤波，滤除其中的直流分量，然后通过希尔伯特等数学变换进行信号分析处理，得到信号的瞬时相位，再根据插入材料时的相位跳变值计算出折射率。

经过两段扫描后，需要保证完整扫描光路后可以得到 8 个以上的完整周期的信号。扫描后得出的信号为周期性的电压信号，对信号进行分段滤波时，先对两段光路对应的检测信号分别进行傅立叶变换（FFT）滤除其中的直流分量，滤除原始信号的零频分量后再通过傅立叶反变换（IFFT）将信号恢复。信号的傅立叶变换可以表示为： $F(\omega) = F(s(at)) = \int_{-\infty}^{+\infty} s(at) e^{-i\omega(at)} d(at)$ ，其中 a 为电动位移台移动速度， x 为移动的距离， $x = at$ ， x 与 a 成正比。

Hilbert 变换能把信号的所有频率分量的相位推迟 90 度，主要用于求解信号的包络、瞬时相位以及瞬时频率。信号希尔伯特变换表达式为：

$$S(x) = s(x) + j\tilde{s}(x) \quad (3)$$

经过变换得到的虚部为：

$$\tilde{s}(t) = \frac{1}{\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{s(\tau)}{t - \tau} d\tau = \frac{1}{\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{s(t - \tau)}{\tau} d\tau = s(t) * \frac{1}{\pi t} \quad (4)$$

变换后信号的瞬时相位表达式为：

$$\varphi(x) = \arctan\left(\frac{\tilde{s}(x)}{s(x)}\right) \quad (5)$$

由公式（5），即可获得信号的瞬时相位。因此，信号的相位变化就可以直接获得。

当光路中没有材料时的光程为 $n_{air}L$ ， $n_{air} \approx 1$ ， L 为光程， n_{air} 为空气介质的折射率；当光路中插入材料后的光程为 $n_{air}(L - L_{mat}) + n_{mat}L_{mat}$ ， n_{mat} 为材料折射率， L_{mat} 为材料厚度；光程差则为 $\Delta L = (n_{mat} - 1)L_{mat}$ ，相位差为 $\Delta\varphi = K_{THz}(n_{mat} - 1)L_{mat}$ ，进一步相位差 $\Delta\varphi$ 可以改写为：

$$\frac{\Delta\varphi}{2\pi\nu_{THz}} = \frac{(n_{mat} - 1)}{c} L_{mat} \quad (6)$$

其中， ν_{THz} 为信号频率。通过公式（6）可以看出，检测插入介质材料带来的相位变化 $\Delta\varphi$ ，可以计算出材料的折射率 n_{mat} 。

进一步,为了提高实验结果精度,减小系统实验的偶然性误差,通过不断累积样品材料的厚度,从一片样品累计到多片样品,扫描光路插入不同样品厚度的时的太赫兹信号,并重复上述的实验步骤来以此方法可以减小系统实验的偶然性误差,提高测量精度。

对公式 6 进行变形,可以得到:

$$n_{mat} = \frac{\Delta\varphi}{L_{mat}} \frac{c}{2\pi\nu_{THz}} + 1 \quad (7)$$

从公式 (7) 可以看出,增加材料的厚度,通过对材料的厚度 L_{mat} 进行累计,测出在太赫兹路径中插入不同厚度材料引起的相位跳变值即相位变化值 $\Delta\varphi$, 求出拟合直线的斜率 $\frac{\Delta\varphi}{L_{mat}}$, 即可计算出折射率。

本发明提出基于连续波相干测量的太赫兹检测系统,该系统仅使用连续太赫兹源和探测器而不需要其他额外的光学部件,通过探测器空间路径扫描,获得与相位有关的电压信号,通过对该相位信号进行分析就可以获得样品的介电常数。这种利用太赫兹的相位相干效应测量材料折射率的系统和方法具有光路系统简单、测量效率高、精度高、可复用性强等优点,可用于太赫兹波段材料的介电常数的测试和表征,尤其可以用于工业产品,如纸张,塑料,油漆,玻璃,油污气体等的无损在线检测,商业价值很大。

实施例

为了验证本发明方案的有效性,选取不同厚度的标准 A4 纸片、塑料薄膜、玻璃片进行仿真实验。在扫描太赫兹路径时,控制电动位移台移动探测器,先扫描光学路径的前一半距离,如图 1 所示的材料右侧的 L1 表示的这段距离,再将介质材料固定在扫描光路的中间放置,控制电动位移台向继续向后(远离太赫兹源的方向)移动探测器,移动距离为 L2,如图 1 所示。本实施例中,设置移动步数为 200 步,步长为 25 μm 。在第 100 步的位置(L1 与 L2 的中间位置)插入材料,图 2 展示了随着探测器的移动检测到的响应电压。

然后对 L1, L2 这两段光路对应的检测信号进行分段滤波。对两段信号分别进行傅立叶变换滤除直流分量,通过 FFT(傅立叶变换)滤除原始信号的零频分量后再通过 IFFT(傅立叶反变换)将信号恢复。图 3 展示了滤波之后的太赫兹信号,可以从图中看出在插入材料的位置有明显的相位跳变。

为了求出信号的相位变化，接着对信号进行希尔伯特变换（Hilbert），变换后即可获得信号的瞬时相位。本实施例使用 matlab 软件进行希尔伯特变换，求出信号的瞬时相位。由于表达瞬时相位的反正切函数是一个周期函数，这里使用 unwrap 函数对求出的瞬时相位进行解包裹。计算机中反正切函数规定，在一、二象限中的角度为 $0 \sim \pi$ ，三四象限的角度为 $0 \sim -\pi$ ，若一个角度从 0 变到 2π ，但实际得到的结果是 $0 \sim \pi$ ，再由 $-\pi \sim 0$ ，信号的相位就产生了包裹。unwrap 函数使相位在 π 处不发生跳变，从而反应出真实的相位变化，并能够检查出数据相位跳变，并纠正跳变，unwrap 函数在检查到数据前后两点的差距在超过 π 的时候，就认为有跳变，并会 $+2\pi$ 或者 -2π 来纠正跳变，使得数据连续。如图 4 所示，图 4 是相位解包裹后得到信号的瞬时相位。通过图 4 可以读出信号相位的跳变值。进一步将读出的相位跳变值通过公式（4），求出样品材料的折射率。

为了进一步提高精度，减小误差。本实施例增加材料的厚度，通过对材料的厚度 L_{mat} 进行累计，测出在太赫兹路径中插入不同厚度材料引起的相位跳变值，求出拟合直线的斜率，进一步计算出折射率，如图 5 所示。图 5 展示了累计纸片厚度的相位跳变值，通过计算拟合直线的斜率求出材料的折射率。最终测得纸片在 0.216 THz 下的折射率为 1.632，以及玻璃片、塑料薄膜在 0.216 THz 下的折射率如表 1 所示。

表 1 各材料测得的折射率

材料	密度 (g/cm ³)	折射率
标准 A4 纸片	0.75	1.632
玻璃片	2.53	1.549
塑料薄膜	0.96	2.04

对于纸张来说，本实验在 0.216 THz 下测得的折射率为 1.632，跟其他方法测量的公开值相比，测量值处于合理的范围内。聚脂薄膜在 194.4 GHz 处的折射率公开值为 2.19，在 140 GHz 时为 1.83，在 225–250 GHz 的范围内为 2.0 至 2.2，本实验中测得的塑料薄膜折射率为 2.04，测量值处于公开范围内。综上所述，本发明填补了太赫兹连续波测量材料折射率的空白，相比其他测量方法，保证了折射率的测量精度。

权利要求书

1、一种在太赫兹波段测量材料折射率的系统，其特征在于，包括固定于光学平台上的太赫兹源，固定于电动位移台上的探测器，以及电子光学系统，其中：

所述太赫兹源使用连续波太赫兹源，用于产生连续的太赫兹辐射波；

所述探测器固定在电动位移台上，用于准直的扫描光路中的太赫兹信号，包括未通过介质材料的太赫兹信号和通过介质材料后的太赫兹信号；

所述电子光学系统包括电动位移控制模块、信号读出模块和信号处理模块，其中电动位移控制模块用于控制探测器在光路中保持准直并向远离太赫兹源的方向移动，准直地在路径中扫描太赫兹信号；信号读出模块用于将探测器接收到的太赫兹信号转化为电信号，并利用锁相放大器读出；信号处理模块用于对探测器的响应信号进行数字化处理和滤波，得到最终的周期性变化的太赫兹信号，分析确定材料折射率。

2、根据权利要求1所述的在太赫兹波段测量材料折射率的系统，其特征在于，所述连续波太赫兹源包括 VDI 太赫兹频段信号源、倍频器与函数信号发生器。

3、根据权利要求1所述的在太赫兹波段测量材料折射率的系统，其特征在于，所述探测器采用肖特基探测器。

4、一种在太赫兹波段测量不同材料折射率的方法，其特征在于，包括以下步骤：

步骤一：太赫兹源产生连续波太赫兹信号，通过自由空间的光学路径准直地被探测器接收到；

步骤二：在扫描太赫兹源和探测器之间的自由空间光路时，探测器先扫描靠近太赫兹源的一半距离，然后在扫描路径的中间位置插入介质材料，继续再向远离太赫兹源的另一半距离，扫描过程中太赫兹信号透过介质材料准直地被固定在电动位移台上并向后移动的探测器接收到；

步骤三：探测器将接收到的太赫兹信号转换为电信号，并通过锁相放大器读出响应信号信息；

步骤四：对插入材料前后探测器扫描到的两段信号先进行分段滤波，滤除其中的直流分量，然后通过希尔伯特等数学变换进行信号分析处理，得到信号的瞬时相位，再根据插入材料前后的相位跳变值计算出折射率。

5、根据权利要求4所述的在太赫兹波段测量不同材料折射率的方法，其特征在于，步骤2中，两段扫描的距离相等。

6、根据权利要求4所述的在太赫兹波段测量不同材料折射率的方法，其特征在于，步骤4中，经过两段扫描后，需要保证完整扫描光路后得到8个以上的完整周期的信号。

7、根据权利要求4所述的在太赫兹波段测量不同材料折射率的方法，其特征在于，步骤4中，对信号进行分段滤波时，先对两段光路对应的检测信号分别进行傅立叶变换滤除其中的直流分量，滤除原始信号的零频分量后再通过傅立叶反变换将信号恢复。

8、根据权利要求4所述的在太赫兹波段测量不同材料折射率的方法，其特征在于，步骤4中，希尔伯特变换表达式为：

$$S(x) = s(x) + j\tilde{s}(x)$$

经过变换得到的虚部为：

$$\tilde{s}(t) = \frac{1}{\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{s(\tau)}{t - \tau} d\tau = \frac{1}{\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{s(t - \tau)}{\tau} d\tau = s(t) * \frac{1}{\pi t}$$

变换后信号的瞬时相位表达式为：

$$\varphi(x) = \arctan \left(\frac{\tilde{s}(x)}{s(x)} \right)$$

其中， $S(x)$ 为进行希尔伯特变换的信号， $s(x)$ 、 $\tilde{s}(x)$ 分别为信号的实部和虚部， $\varphi(x)$ 为信号的相位。

9、根据权利要求4所述的在太赫兹波段测量不同材料折射率的方法，其特征在于，步骤4中，根据相位变化计算出材料折射率的方法为：

$$\frac{\Delta\varphi}{2\pi\nu_{THz}} = \frac{(n_{mat} - 1)}{c} L_{mat}$$

其中， n_{mat} 为材料的折射率， $\Delta\varphi$ 为插入介质材料带来的相位变化， C 为光速， L_{mat} 为材料厚度， ν_{THz} 为太赫兹信号频率。

10、根据权利要求4所述的在太赫兹波段测量不同材料折射率的方法，其特征在于，步骤4中，增加材料的厚度，通过对材料的厚度进行累计，测出在太赫兹路径中插入不同厚度材料引起的相位跳变值，即相位变化 $\Delta\varphi$ ，从而求出材料厚度和相位拟合直线的斜率 $\frac{\Delta\varphi}{L_{mat}}$ ，即可计算材料的折射率，具体公式为：

$$n_{mat} = \frac{\Delta\varphi}{L_{mat}} \frac{c}{2\pi\nu_{THz}} + 1$$

其中, n_{mat} 为材料的折射率, $\Delta\varphi$ 为插入介质材料带来的相位变化, c 为光速, L_{mat} 为材料厚度, ν_{THz} 为太赫兹信号频率。

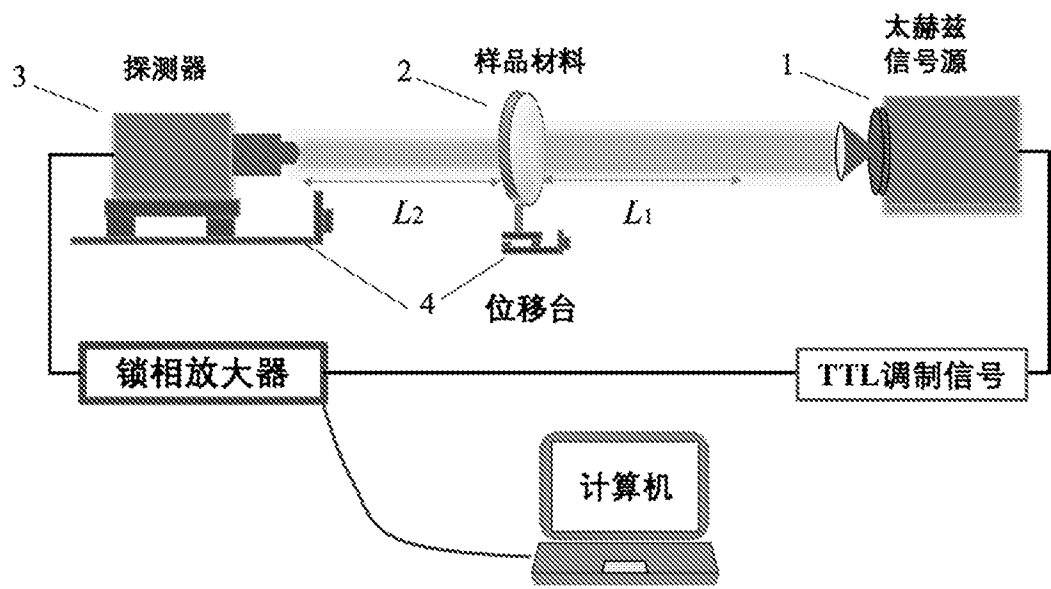


图 1

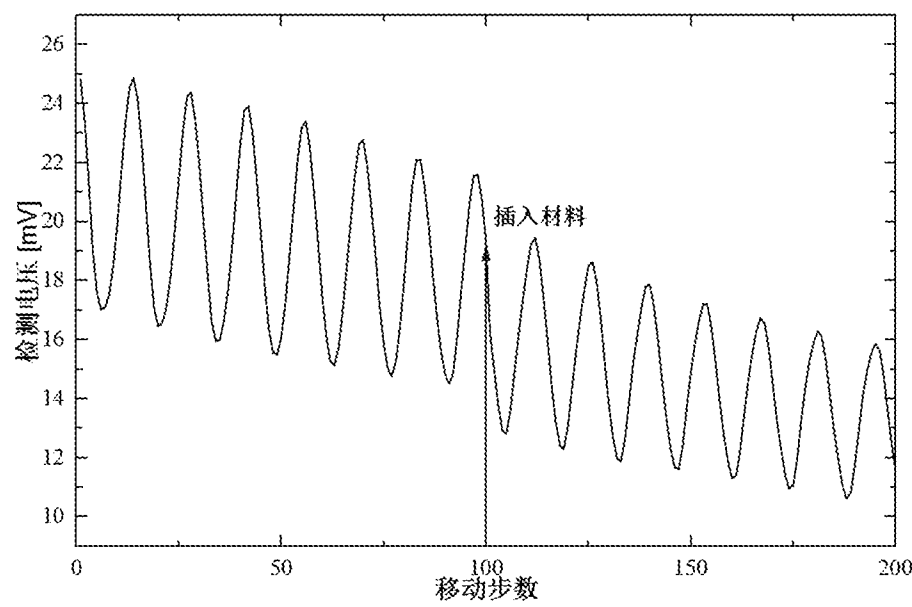


图 2

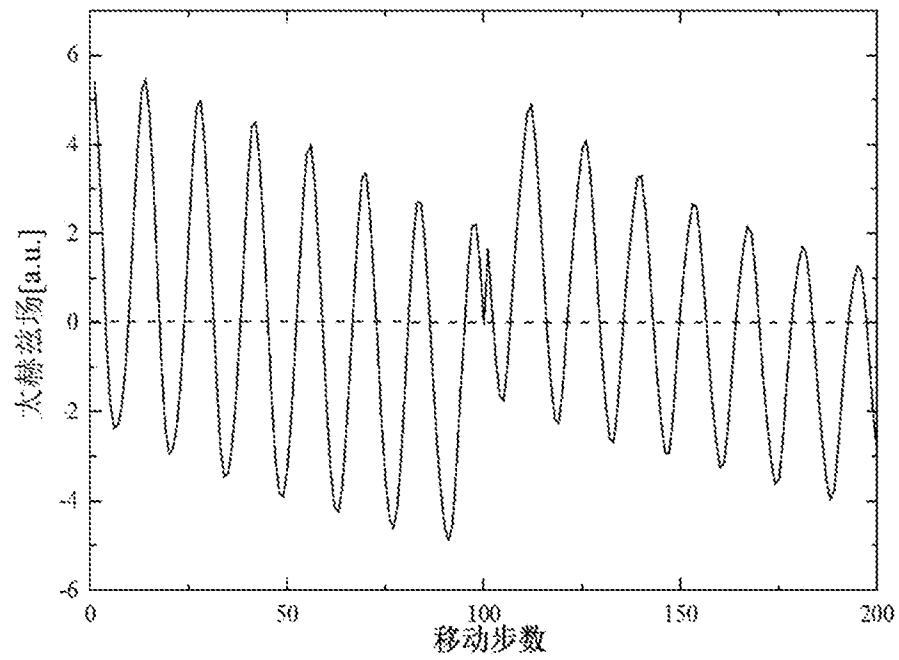


图 3

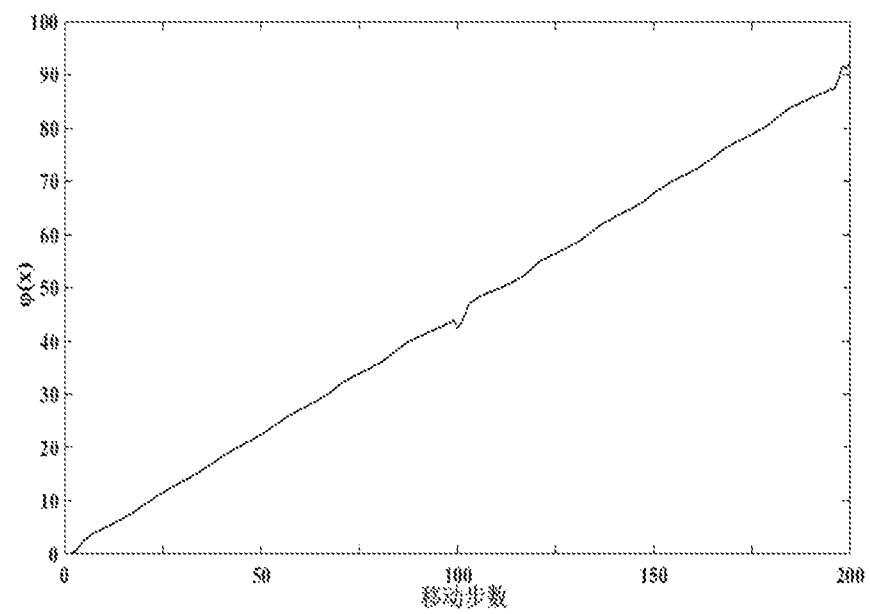


图 4

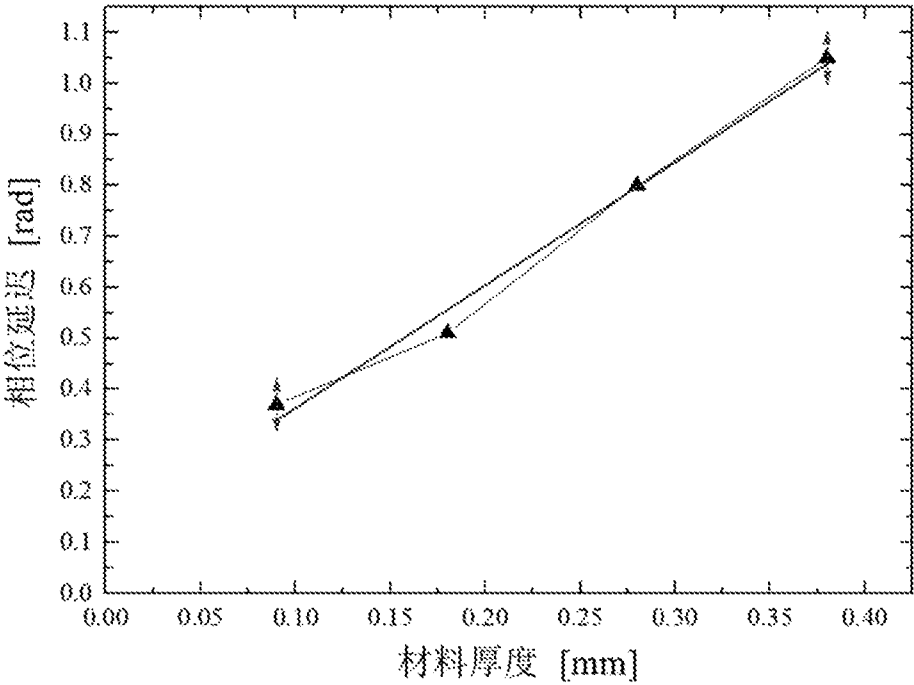


图 5

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.

PCT/CN2020/123740

A. CLASSIFICATION OF SUBJECT MATTER

G01N 21/41(2006.01)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)

G01N 21/-;G01R 27/26

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)

CNABS, CNTXT, DWPI, CNKI: 太赫兹, 毫米波, 折射率, 连续波, 步长, Thz, terahertz, millimeter wave, refractive index, continuous wave, step+

C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
PX	CN 111272704 A (NANJING UNIVERSITY) 12 June 2020 (2020-06-12) claims 1-10, description paragraphs 0038-0073, figures 1-5	1-10
X	刘子烨 (LIU, Ziyue). "基于光子混频的连续太赫兹波成像系统设计及应用 (Design and Application of Continuous-wave Terahertz Imaging System Based on Photomixing)" 中国优秀硕士学位论文全文数据库信息科技辑 (Information Science & Technology, China Master's Theses Full-text Database), 15 April 2017 (2017-04-15), pages 24-25, 29, 46, figure 3.2	1-10
X	刘子烨 等 (LIU, Ziyue et al.). "基于光子混频连续太赫兹波的厚度检测 (Thickness Measurement by Means of Continuous Wave Terahertz Based on Photomixing)" 《激光技术》 (Laser Technology), Vol. 40, No. 4, 31 July 2016 (2016-07-31), sections 1-2, and figure 1	1-10
X	KR 20160070686 A (ELECTRONICS AND TELECOMMUNICATIONS RESEARCH INSTITUTE) 20 June 2016 (2016-06-20) description paragraphs 0018-0021, 0057, 0060, figure 1, figure 6	1-10
A	CN 103364363 A (XI'AN INSTITUTE OF OPTICS AND PRECISION MECHANICS, CAS) 23 October 2013 (2013-10-23) entire document	1-10



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

13 January 2021

Date of mailing of the international search report

29 January 2021

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/CN2020/123740

C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
A	CN 110057786 A (HUAZHONG UNIVERSITY OF SCIENCE AND TECHNOLOGY) 26 July 2019 (2019-07-26) entire document	1-10
A	CN 203365318 U (XI'AN INSTITUTE OF OPTICS AND PRECISION MECHANICS, CAS) 25 December 2013 (2013-12-25) entire document	1-10
A	CN 106773100 A (CHENGDU SHUGUANG OPTICAL FIBER NETWORK CORP. LTD.) 31 May 2017 (2017-05-31) entire document	1-10
A	CN 102621083 A (CHINA UNIVERSITY OF PETROLEUM-BEIJING) 01 August 2012 (2012-08-01) entire document	1-10

INTERNATIONAL SEARCH REPORT
Information on patent family members

International application No.

PCT/CN2020/123740

Patent document cited in search report			Publication date (day/month/year)	Patent family member(s)	Publication date (day/month/year)
CN	111272704	A	12 June 2020	CN 111272704 B	09 October 2020
KR	20160070686	A	20 June 2016	None	
CN	103364363	A	23 October 2013	None	
CN	110057786	A	26 July 2019	None	
CN	203365318	U	25 December 2013	None	
CN	106773100	A	31 May 2017	None	
CN	102621083	A	01 August 2012	None	

国际检索报告

国际申请号

PCT/CN2020/123740

A. 主题的分类 G01N 21/41 (2006.01) 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) G01N 21/-; G01R 27/26 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)) CNABS, CNTXT, DWPI, CNKI: 太赫兹, 毫米波, 折射率, 连续波, 步长, Thz, terahertz, millimeter wave, refractive index, continuous wave, step+																							
C. 相关文件 <table border="1"> <thead> <tr> <th>类 型*</th> <th>引用文件, 必要时, 指明相关段落</th> <th>相关的权利要求</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>PX</td> <td>CN 111272704 A (南京大学) 2020年 6月 12日 (2020 - 06 - 12) 权利要求1-10, 说明书第0038-0073段, 图1-5</td> <td>1-10</td> </tr> <tr> <td>X</td> <td>刘子烨. “基于光子混频的连续太赫兹波成像系统设计及应用” 《中国优秀硕士学位论文全文数据库信息科技辑》, 2017年 4月 15日 (2017 - 04 - 15), 24-25页, 29页, 46页, 图3.2</td> <td>1-10</td> </tr> <tr> <td>X</td> <td>刘子烨 等. “基于光子混频连续太赫兹波的厚度检测” 《激光技术》, 第40卷, 第4期, 2016年 7月 31日 (2016 - 07 - 31), 第1-2节, 图1</td> <td>1-10</td> </tr> <tr> <td>X</td> <td>KR 20160070686 A (KOREA ELECTRONICS TELECOMM) 2016年 6月 20日 (2016 - 06 - 20) 说明书第0018-0021, 0057, 0060段, 图1, 图6</td> <td>1-10</td> </tr> <tr> <td>A</td> <td>CN 103364363 A (中国科学院西安光学精密机械研究所) 2013年 10月 23日 (2013 - 10 - 23) 全文</td> <td>1-10</td> </tr> <tr> <td>A</td> <td>CN 110057786 A (华中科技大学) 2019年 7月 26日 (2019 - 07 - 26) 全文</td> <td>1-10</td> </tr> </tbody> </table>			类 型*	引用文件, 必要时, 指明相关段落	相关的权利要求	PX	CN 111272704 A (南京大学) 2020年 6月 12日 (2020 - 06 - 12) 权利要求1-10, 说明书第0038-0073段, 图1-5	1-10	X	刘子烨. “基于光子混频的连续太赫兹波成像系统设计及应用” 《中国优秀硕士学位论文全文数据库信息科技辑》, 2017年 4月 15日 (2017 - 04 - 15), 24-25页, 29页, 46页, 图3.2	1-10	X	刘子烨 等. “基于光子混频连续太赫兹波的厚度检测” 《激光技术》, 第40卷, 第4期, 2016年 7月 31日 (2016 - 07 - 31), 第1-2节, 图1	1-10	X	KR 20160070686 A (KOREA ELECTRONICS TELECOMM) 2016年 6月 20日 (2016 - 06 - 20) 说明书第0018-0021, 0057, 0060段, 图1, 图6	1-10	A	CN 103364363 A (中国科学院西安光学精密机械研究所) 2013年 10月 23日 (2013 - 10 - 23) 全文	1-10	A	CN 110057786 A (华中科技大学) 2019年 7月 26日 (2019 - 07 - 26) 全文	1-10
类 型*	引用文件, 必要时, 指明相关段落	相关的权利要求																					
PX	CN 111272704 A (南京大学) 2020年 6月 12日 (2020 - 06 - 12) 权利要求1-10, 说明书第0038-0073段, 图1-5	1-10																					
X	刘子烨. “基于光子混频的连续太赫兹波成像系统设计及应用” 《中国优秀硕士学位论文全文数据库信息科技辑》, 2017年 4月 15日 (2017 - 04 - 15), 24-25页, 29页, 46页, 图3.2	1-10																					
X	刘子烨 等. “基于光子混频连续太赫兹波的厚度检测” 《激光技术》, 第40卷, 第4期, 2016年 7月 31日 (2016 - 07 - 31), 第1-2节, 图1	1-10																					
X	KR 20160070686 A (KOREA ELECTRONICS TELECOMM) 2016年 6月 20日 (2016 - 06 - 20) 说明书第0018-0021, 0057, 0060段, 图1, 图6	1-10																					
A	CN 103364363 A (中国科学院西安光学精密机械研究所) 2013年 10月 23日 (2013 - 10 - 23) 全文	1-10																					
A	CN 110057786 A (华中科技大学) 2019年 7月 26日 (2019 - 07 - 26) 全文	1-10																					
☒ 其余文件在C栏的续页中列出。 ☒ 见同族专利附件。																							
<table border="0"> <tr> <td style="vertical-align: top;"> * 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 </td> <td style="vertical-align: top;"> “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 </td> </tr> </table>			* 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																			
* 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 2021年 1月 13日		国际检索报告邮寄日期 2021年 1月 29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		受权官员 王伟宁 电话号码 (86-10)62085688																					

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	CN 203365318 U (中国科学院西安光学精密机械研究所) 2013年 12月 25日 (2013 - 12 - 25) 全文	1-10
A	CN 106773100 A (成都曙光光纤网络有限责任公司) 2017年 5月 31日 (2017 - 05 - 31) 全文	1-10
A	CN 102621083 A (中国石油大学北京) 2012年 8月 1日 (2012 - 08 - 01) 全文	1-10

国际检索报告
关于同族专利的信息

国际申请号

PCT/CN2020/123740

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	111272704	A	2020年 6月 12日	CN 111272704 B	2020年 10月 9日
KR	20160070686	A	2016年 6月 20日	无	
CN	103364363	A	2013年 10月 23日	无	
CN	110057786	A	2019年 7月 26日	无	
CN	203365318	U	2013年 12月 25日	无	
CN	106773100	A	2017年 5月 31日	无	
CN	102621083	A	2012年 8月 1日	无	