DOI：10.19789/j.1004-9398.2024.02.005
文献引用：张振伟，张存林．太赫兹波段介质电磁参数测量与提取对比研究[J]．首都师范大学学报（自然科学版），2024，45（2）：43-54. ZHANG Z W，ZHANG C L. Comparative research on measurement and extraction of dielectric parameters in terahertz band[J]. Journal of Capital Normal University（Natural Science Edition），2024，45（2）：43-54.

太赫兹波段介质电磁参数测量与提取对比研究*

张振伟**，张存林
（首都师范大学物理系，北京　100048）

摘要：本文完善了基于太赫兹时域光谱系统和基于矢量网络分析系统材料参数测量的一般理论，在2类系统的交叉频段，建立了相同准光学参数的测量条件，对比分析了2类系统信号参数测量和理论提取的过程。实验验证了在光子学和电子学的重叠区域，不同测量系统在相同测量条件下，能够获取趋于一致的测量结果，证实了结果的准确性只取决于物理模型、理论方法和测量条件是否匹配。提炼出采用单次时域法同时适用于时域系统和频域系统参数测量和提取的适配条件，并形成匹配条件经验理论公式，用于判断材料太赫兹参数测量结果的可靠性。

关键词：太赫兹；瞬态脉冲信号；连续波信号；复折射率
中图分类号：O39　　**文献标志码**：A

Comparative research on measurement and extraction of dielectric parameters in terahertz band*

ZHANG Zhenwei**，ZHANG Cunlin
（Department of Physics，Capital Normal University，Beijing　100048）

Abstract：This work perfects the general theory of material parameter measurement based on terahertz time-domain spectroscopy system and vector network analysis system. In the cross frequency band of the two systems，measurement conditions for the same quasi-optical parameters are established，and the process of signal parameter measurement and theoretical extraction for the two systems is compared and analyzed. The experimental results verified that in the overlapping area of photonics and electronics，different measurement systems can obtain consistent measurement results under the same measurement conditions. The accuracy of the results only depends on compatibility of physical model，theoretical method，and measurement conditions. The single time domain method has been extended to both time-domain and frequency-domain systems，and formed an empirical theoretical formula for the matching conditions，which can be used to determine the reliability of material terahertz parameter measurement results.

Keywords：terahertz；transient pulse signal；continuous wave signal；complex refractive index
CLC：O39　　**DC**：A

收稿日期：2023-10-31
* 中关村概念验证项目（20210421079）；装备预研航天科技联合基金项目（6141B06100601）；国家自然科学基金委航天制造联合基金项目（U1837202）
** 通信作者：zhangzw@cnu.edu.cn

0 引 言

太赫兹波在航空航天[1]、检测评估[2-3]、能源电力[4]和生物医药等[5]领域具有巨大的应用潜力。随着电子学与光子学共同向太赫兹频段快速拓展,准确测量和提取材料的基本光学参数是合理开发和有效利用太赫兹电磁波的必要条件之一。目前,基于自由空间测量进行材料电磁参数测试和提取的方法主要包括2类,一类是基于光子学的太赫兹瞬态脉冲信号时域光谱测量技术,另一类是基于电子学的频域连续波信号矢量网络分析技术。

在电子学领域的较低频段,通常采用平行板电容器[6-7]、传输线[8-9]和谐振腔等[10-11]测量模块,能够获得很好的效果。平行板电容器法主要用于100 MHz以下频率范围的参数测量;传输线法在微波波段的测量精度较高,在毫米波及更高的太赫兹波段,不论是利用同轴电缆或是矩形波导作为传输载体,器件及样品尺寸与半波长相比拟,样品制备的加工精度和载体的匹配精度都极大地提高了测试难度和复杂度,无法满足测试需求;谐振腔法测量的准确度高,但是工作带宽有限,而且样品制备复杂、测试条件严格,要求同样复杂,样品测量时的尺寸匹配限制了测量精度。近几年,电子学器件的工作频段快速扩展到太赫兹波段,上述传统方法在较高频率的测量难度增加,测量结果的精确度降低。在光子学领域,基于自由空间的太赫兹时域光谱系统通常被用来测量>0.2 THz材料的基本参数[12-16],<0.2 THz的测量结果存在较大的不确定度,该方法频谱宽度可以到几十THz,但是相对电子学方法,太赫兹时域光谱系统的频率分辨率较低。

早期,Nicolson和Ross[17]与Weir[18]提出一种基于透射/反射系数的传输线测量法,被称为NRW方法,通过矢量网络分析仪测量样品的散射参数,求解材料的电磁参数,理论上得到的是解析解,只要测量参数足够准确,计算得到的就是材料参数的真实值。近些年,光子学和电子学技术快速发展,不同的测量技术在太赫兹波段重合,因此,从理论和实验同时对比验证检测结果的可靠性和一致性对于理解测量结果具有重要意义。

2015年,Skocik和Neumann[19]在220~325 GHz频段测量了聚四氟乙烯,信号直接通过喇叭天线发射和接收,给出了接近理论值的电磁常数,但是没有给出损耗特性参数。2015年,Tosaka等[20]对比了太赫兹时域光谱系统和矢量网络分析系统在220~325 GHz频段对6种介质材料的测量结果。矢量网络分析系统的数据变换到时域,并将通过样品的时延与太赫兹时域光谱系统通过样品的时延进行了直观对比,然后按照常规处理过程得出了总体趋于一致的数据结果曲线。曲线显示大部分结果存在10%以上的不确定性,导致无法进一步评价2类系统测试过程和数据处理过程的适用性。2017年,Horák等[21]测量了Y频段的Fb6H等材料的电磁参数。测量信号的快速傅里叶逆变换获得的时域信号,在时域信号中通过时间选通能够滤除样品内部、装置组件和样品之间多次回波的干扰效应。另外也可以通过时域信号精确地标定样品反射面和校准面的重复定位,不过傅里叶变换时没有考虑卷边效应的影响,数据处理导致有效测量频率宽度减小了约30 GHz。参数提取过程使用了较复杂的克拉莫-克兰尼克(Kramers-Kroniy,K-K)关系,获得了不错的结果,但是提取结果与样品本身真值的对照性很难通过物理传输模型准确分析[22]。2017年,Chang等[23]详细分析了Y波段的开口喇叭天线测量系统的校准过程,突出了频域矢量网络分析系统校准的重要性,采用频域迭代法获得了预期的处理结果,但是计算结果需要考虑初值选择造成的影响,很难说明结果与材料真值之间的关系。2020年,Wang等[24]测量了140~220和500~750 GHz范围的聚四氟乙烯、硅和印刷电路板(printed circuit board,PCB)的电磁常数,并与太赫兹时域光谱系统测量结果对比。文中数据曲线的直观偏差较大,测试系统参数的不一致导致了电磁信号与样品相互作用时的传输损失条件不一致,无法很好地评价物理模型与数据处理方法之间关系的可靠性。2021年,Zhu和Wu[25]在140~220 GHz使用四抛物面镜准光学系统测量了PCB基板和硅片的电磁参数,提出了新的迭代近似方法,提高了计算效率,不过仍然需要初始值估计。以上结果表明,测试条件、处理方法和物理传输模型的适配性直接决定获得的结果是否趋于所测材料的真实值。测量条件是否一致,测量方法是否能够获取解析解,样品内部信号实际的物理传输过程是否与理论过程一致等因素都会导致最终结果偏离真实值。因此,验证易于实现、准确可靠地适合自由空间获取材料参数的方法,明确方法的适用条件,是高质量评估和溯源检测结果的关键条件。

电磁参数测量技术的发展受到测量仪器精度、数学模型的建立和特殊方程求解等的限制,研究材料基本参数测量是一个具有持续创新活力的领域,根据待测材料的物理形状和尺寸、测量频段的不同,所使用的测试方法也各式各样,不同的方法有其应用范围和优缺点。本文主要介绍太赫兹波段基于时域脉冲信号和频域连续波信号的材料自由空间测量方法和应用条件,完善发展检测分析的理论基础,并验证基于光子学和电子学方法测量的统一性。

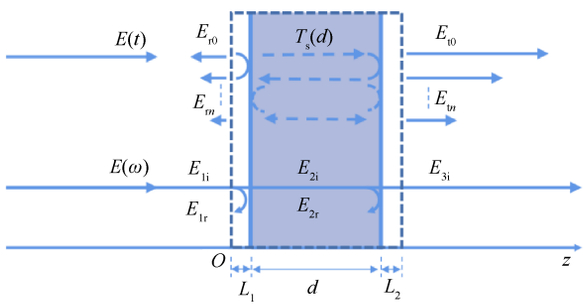
1　自由空间太赫兹波与物质相互作用的传输模型

1.1　空气-介质-空气模型

单平板模型是空气-介质-空气结构,也是最简单的电磁波与物质相互作用模型,是分析其他结构的基础。介质样品质地均匀,两界面光滑且平行,当太赫兹信号透过单平板样品,信号的传输都遵守图 1 所示的物理模型。图 1 中 d 为介质的厚度,虚线代表进行校准时金属校准件 2 个表面的位置或为空气线的长度端点位置,这取决于用矢量网络分析系统测量时采取的校准方法,时域光谱系统通常不需要校准。入射信号沿传播方向 z 垂直入射到样品表面,信号在样品各个界面都发生反射和透射。

时域信号 $E(t)$ 照射到空气和样品界面后的反射信号为 E_{r0},透入样品的部分信号,在样品中传输距离 d,信号传输因子为 $T_s(d)$,一部分透出样品的信号表示为 E_{t0},E_{t0} 为单次直通的信号,另一部分被反射回的样品,当再次传播通过样品的厚度 d 后,一部分被返回,另一部分透出的信号表示为 E_{r1}。理论上,信号内部传输过程可以传播无数次,透出信号和返回信号表示为 E_{tn} 和 E_{rn},而实际情况中受到样品吸收和散射的影响,在若干次回波传播后,回波不再能够探测到。信号在样品中的传输在时域上表现为到达探测器的时间延迟不同。

而对于频域信号,$E(\omega)$ 信号入射后在样品中的物理传输过程是相同的。E_{1r} 是 z=0 平面处空气中 z 反方向电场分量,E_{2i} 和 E_{2r} 分别是 $z=L_1+d$ 平面处样品中 z 方向和反方向电场分量,E_{3i} 是 $z=L_1+d+L_2$ 平面处空气中 z 方向电场分量。仪器系统记录的样品散射参数与校准面的选择有关,材料电磁参数可以由复折射率 $\tilde{n}=n-\mathrm{j}k$ 表示,其中 n 为折射率,k 为消光系数,吸收系数 $\alpha=\dfrac{2\omega}{c}k$,$c$ 是光速。材料电磁参数还常由复介电常数 $\varepsilon=\varepsilon'-\mathrm{j}\varepsilon''=\varepsilon'(1-\mathrm{j}\tan(\delta))$ 表示,ε' 为实部,ε'' 为虚部,$\tan(\delta)=\dfrac{\varepsilon''}{\varepsilon'}$ 为损耗角正切。绝大多数非磁性材料的磁导率近似为 1,复介电常数为复折射率参数平方,即 $\varepsilon=\tilde{n}^2$。



注:z 为信号传播方向;$E(t)$ 是入射时域信号;d 为样品厚度;E_{r0} 为直接照射到空气和样品界面后的反射信号;$T_s(d)$ 为信号传输因子;E_{t0} 为首次透出样品的信号,即单次直通的信号;E_{tn} 为信号在样品内部传输 $2n-1$ 次后的透出信号,n 为自然数;E_{rn} 为信号在样品内部传输 $2n$ 次后的返回信号;$E(\omega)$ 是频域信号;E_{1i} 和 E_{1r} 分别是 z=0 平面处空气中 z 方向和反方向电场分量;E_{2i} 和 E_{2r} 分别是 $z=L_1+d$ 平面处样品中的 z 方向和反方向电场分量;E_{3i} 是 $z=L_1+d+L_2$ 平面处空气中的 z 方向电场分量。

图 1　空气-介质-空气结构太赫兹波传输模型示意

1.2　时域信号传输函数

在时域光谱系统中,入射的太赫兹信号用 $E_{in}(t)$ 表示,傅里叶变换后表示为 $E_{in}(\omega)$。没有放置样品和放置样品的时域信号分别表示为 $E_{air}(t)$ 和 $E_{sam}(t)$,傅里叶变换后表示为 $E_{air}(\omega)$ 和 $E_{sam}(\omega)$。如图 1 所示模型,根据菲涅尔公式,忽略衍射效应的影响(满足波束尺寸远小于样品尺寸),只考虑垂直入射情况下,且设定空气的折射率 $n=1$,则:

$$E_{air}(\omega)=E_{in}(\omega)T_a(L), \tag{1}$$

$$E_{sam}(\omega)=E_{t0}+E_{t1}+E_{t2}+\cdots+E_{tn}, \tag{2}$$

$$E_{t0}(\omega)=E_{in}(\omega)t_{as}t_{sa}T_a(L-d)T_s(d), \tag{3}$$

$$E_{t1}(\omega)=E_{in}(\omega)t_{as}r_{sa}^2t_{sa}T_a(L-d)T_s^3(d), \tag{4}$$

$$E_{t2}(\omega)=E_{in}(\omega)t_{as}r_{sa}^4t_{sa}T_a(L-d)T_s^5(d), \tag{5}$$

$$E_{tn}(\omega)=E_{in}(\omega)t_{as}r_{sa}^{2n}t_{sa}T_a(L-d)T_s^{2n+1}(d), \tag{6}$$

式中:$T_a(\omega)$ 为空气中的传输因子;$T_s(d)$ 为样品介质中的传输因子。太赫兹波在样品内反复传输称为法布里-珀罗特(Fabry-Perot,FP)效应,样品的透射信号是所有透射回波的总和,用 $E_t(\omega)$ 表示,因此有:

$$E_t(\omega)=E_{in}(\omega)t_{as}t_{sa}T_a(L-d)T_s(d)\cdot\left\{\sum_{i=0}^{n}[r_{sa}^2T_s^2(d)]^i\right\},\tag{7}$$

$$\mathrm{FP}(\omega)=\sum_{i=0}^{n}[r_{sa}^2T_s^2(d)]^i=\frac{1-[r_{sa}^2T_s^2(d)]^{n+1}}{1-r_{sa}^2T_s^2(d)}。\tag{8}$$

垂直入射时,$t_{as}=\frac{2n_a}{n_s+n_a}$、$t_{sa}=\frac{2n_s}{n_a+n_s}$和$r_{sa}=\frac{n_s-n_a}{n_s+n_a}$,则透射传输函数可以表示为:

$$H(\omega)=\frac{4\tilde{n}(\omega)}{[1+\tilde{n}(\omega)]^2}\exp\left\{\frac{-\mathrm{j}[d\tilde{n}(\omega)-d]\omega}{c}\right\}\cdot\mathrm{FP}(\omega),\tag{9}$$

$$\mathrm{FP}(\omega)=\frac{1-\left[\frac{1-\tilde{n}(\omega)}{1+\tilde{n}(\omega)}\right]^{2m+2}\exp\left[(-\mathrm{j}(2m+2)\tilde{n}(\omega)\omega d\right]}{1-\left[\frac{1-\tilde{n}(\omega)}{1+\tilde{n}(\omega)}\right]^{2}\exp\left[-\mathrm{j}2\tilde{n}(\omega)\omega d\right]}。\tag{10}$$

在实际应用中,时域信号可以通过时域加窗限定回波参数FP的取值。当只包含一个太赫兹脉冲波形,忽略所有其他回波时,取m=0,FP因子为1,复透射传输函数可简化为

$$H(\omega)=\frac{4\tilde{n}(\omega)}{[1+\tilde{n}(\omega)]^2}\exp\left\{-\mathrm{j}\omega\left[\frac{d\tilde{n}(\omega)-d}{c}\right]\right\}。\tag{11}$$

将样品的复折射率$\tilde{n}(\omega)=n(\omega)-\mathrm{j}k(\omega)$代入式(11),复透传递函数表示为$H(\omega)=\rho(\omega)\exp[-\mathrm{j}\phi(\omega)]$,其中$\rho(\omega)$为样品信号与参考信号的振幅之比,$\phi(\omega)$为样品信号和参考信号的相位差,在弱吸收情况下,满足$k(\omega)/n(\omega)\ll 1$,再将式(11)近似,可得到:

$$n(\omega)=\frac{\phi(\omega)c}{\omega d}+1,\tag{12}$$

$$k(\omega)=\frac{-\ln\left\{\rho(\omega)\frac{[n(\omega)+1]^2}{4n(\omega)}\right\}}{\omega d}。\tag{13}$$

1.3　频域信号传输参数

在矢量网络系统中信号的传输表示为S参数,采用NRW法需要同时记录被测样品的$S21(\omega)$和$S11(\omega)$,前者表示的是从端口2到端口1的透射信号,后者表示的是从端口1再回到端口1的反射信号,包括幅度和相位。对于厚度为d的平板材料,透过的S参数是直达波和内部多次回返后透过波的总和,$S_{sam}21(\omega)$表示为

$$S_{sam}21(\omega)=\frac{1-R^2}{1-R^2T^2}T,\tag{14}$$

式中:R表示反射系数;T表示透射系数。反射的S参数是直接反射波和内部多次回返后透出的反射波的总和,$S_{sam}11(\omega)$表示为

$$S_{sam}11(\omega)=\frac{1-T^2}{1-R^2T^2}R。\tag{15}$$

根据式(14)和(15),整理

$$R=\frac{S_{sam}^2{11}(\omega)-S_{sam}^2{21}(\omega)+1}{2S_{sam}11(\omega)}\pm\sqrt{\left(\frac{S_{sam}^2{11}(\omega)-S_{sam}^2{21}(\omega)+1}{2S_{sam}11(\omega)}\right)^2-1},\tag{16}$$

$$T=\frac{S_{sam}11(\omega)+S_{sam}21(\omega)-R}{1-(S_{sam}11(\omega)+S_{sam}21(\omega))R}=\exp\left(-\mathrm{j}\frac{\omega d}{c}\tilde{n}\right),\tag{17}$$

式(16)中正负号的选择取决于$|R|<1$,由式(17)可以求得复折射率

$$\tilde{n}=-\frac{\ln(T)c}{\omega d}。\tag{18}$$

2　透射式自由空间法测试与分析

测试系统参数、理论方法和物理传输模型的适配性决定结果是否趋近于所测材料的真实值。测量系统参数是否一致、参数提取方法是否能够获取解析解、样品内部信号实际的物理传输过程是否与理论过程一致等因素都会导致最终结果偏离真实值。材料的基本参数是固有的属性,不应随着测量仪器、测量过程和参数提取方法的改变而改变。

2.1　准光学测量系统

2.1.1　系统参数

搭建基于太赫兹时域光谱的脉冲信号测试系统和基于矢量网络分析的连续波测试系统。如图2所示,脉冲系统(pulse system,PS)采用一对光导天线发射和接收太赫兹信号,连续波系统(continuous wave system,CWS)采用矢量网络分析仪和扩频模块发射并接收太赫兹信号,2套系统采用相同参数的准光学模块,模块主要由4个离轴抛物面镜组成,并按照8f系统搭建。4个离轴抛物面镜直径为50.8 mm,焦距为101.6 mm。光导天线发射和接收太赫兹波通过硅半球镜与自由空间耦合,发散角约为25°。扩频模块收发太赫兹波通过波导传输,由喇叭天线与自由空间耦合,发散角约为15°。通过硅球镜和

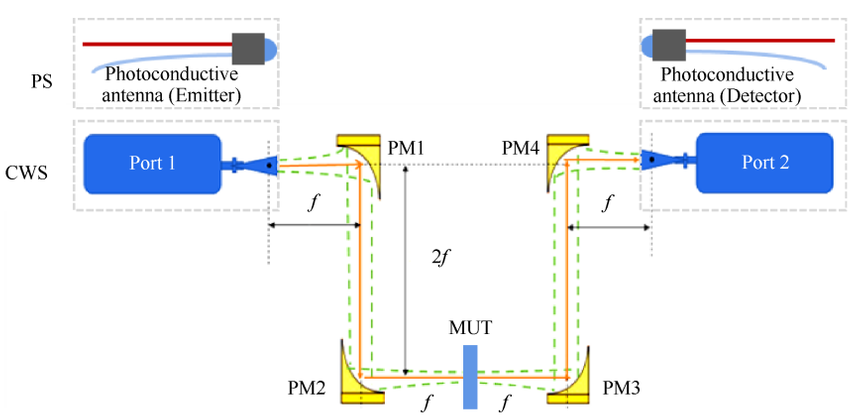
喇叭天线发射出的太赫兹波束反向延长线的虚焦点与抛物面镜 PM1 的等效焦平面重合,波束经过 PM1 准直后经过抛物面镜 PM2 会聚,再经过 PM3 准直和 PM4 会聚。被接收的太赫兹波束的焦点与抛物面镜 PM4 的等效焦平面重合。为了确保信号质量,系统要求对称分布,并且可以互逆使用。对于 8f 系统,会聚后的束斑尺寸较小,能量密度显著提高。被测材料(material under test,MUT)处于焦斑位置,这不仅有助于提高系统的信噪比和对样品的穿透性,对于绝大多数被测试件,较小的尺寸更容易制备平行度和表面光洁度高的试件,样品尺寸导致的衍射效应也显著降低。

太赫兹准光学矢量网络系统的示意和照片如图 3 所示,包括矢量网络分析仪主机和 325~500 GHz 扩频模块。

2.1.2　波束表征

参数提取理论设定入射的波束为平面波,太赫兹波束的质量直接决定了与样品相互作用时的传输效果和测量结果的质量,实际波束偏离理论方法的设定,将使得结果无法评价。为了进一步确认波束的质量,测量了焦斑位置的电场强度分布。通过分步移动金属铝板,铝板逐渐由完全遮挡到完全不遮挡焦斑,记录对应不同位置的透过参数 $S21$,频率范围内的透过能量积分曲线如图 4(a)所示。10、20 和 30 dB 强度值对应光斑直径大约分别为 2.1、3.0 和 3.5 mm,如图 4(b)所示。对透过能量分布曲线求导,所得曲线反映波束强度分布,呈现为高斯线形。高斯拟合曲线红色实线与测量数据所得菱形蓝色散点高度重合,相似度为 0.997 6,如图 4(c)所示,说明焦斑接近理想的高斯分布。对应 30 dB 的光斑直径 ≤5.0 mm。因此,为了获得较高的自由空间测量精度,样品的直径建议>2 倍的光斑直径。

测量不同 z 坐标位置的能量分布,分析波束在 z 方向传播质量。选择 z = 35、40、45、50、55、60 和 65 mm 位置,分别测得能量分布曲线如图 5(a)所示,对应各个位置的波束半高宽为 3.0、2.5、2.2、2.1、2.2、2.6 和 3.2 mm,如图 5(c)所示,相应的 z 方向能量分布如图 5(b)所示。计算波束的瑞利距离($Rz = \pi\omega_0^2/\lambda_0$)大约为 38.0 mm,$\omega_0$ 是束腰,λ_0 是中心波长,约为 0.73 mm。图 5(c)中的粉色方框位置对应放置石英样品的位置,处于波束瑞利距离的范围,该处的太赫兹波的截面满足参数提取方法中太赫兹平面波入射样品的假设。



注:PS 为脉冲时域系统;CWS 为连续波系统;PM 为离轴抛物面镜;MUT 为被测材料;f 为焦距。

图 2　太赫兹准光学测试系统原理示意

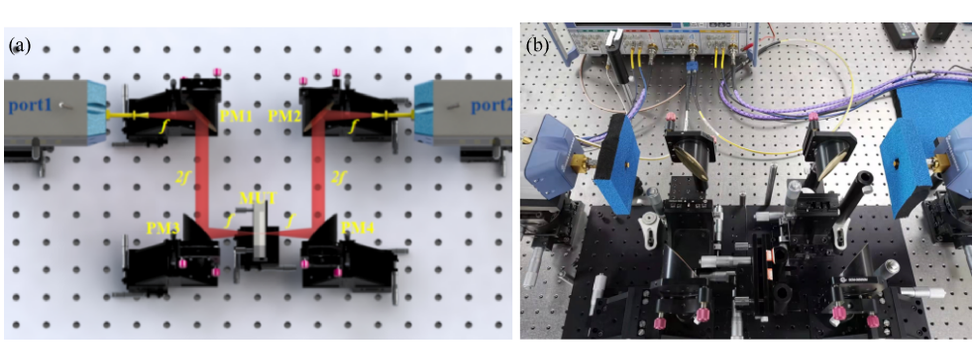


图 3　太赫兹准光学测试系统

(a)光路示意;(b)系统照片

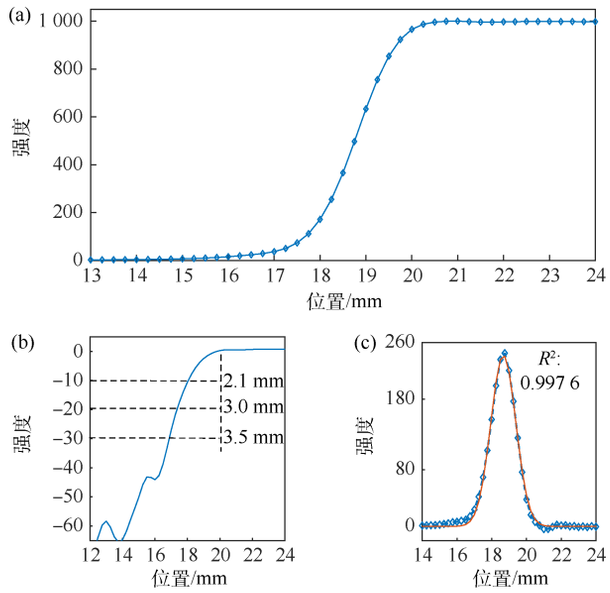


图4　测量焦斑能量分布

(a)不同遮挡位置的透过参数曲线;(b)图(a)在对数坐标下的结果;(c)波束能量分布曲线

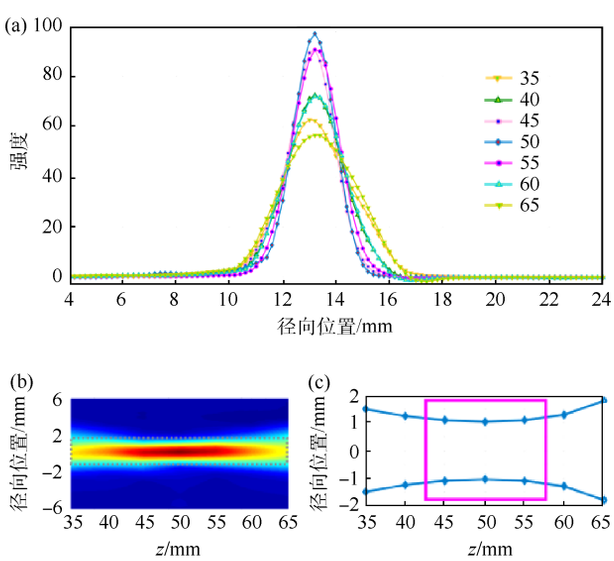


图5　太赫兹波束能量分布

(a)选定位置的能量分布曲线;(b)z向分布;(c)z向半高宽

2.2　测量实验与参数提取

2.2.1　测量数据

选取厚度为15.124 mm、边长为50 mm的熔石英样品,验证测量系统、方法和结果的正确性。准光学矢量网络系统采用矢量网络分析仪中自带的归一化校准,设置空气线长度和金属平板校准件厚度为20.005 mm,大于样品厚度。为了抑制噪声的影响,将系统的中频带宽设为100 Hz,采样点数设为1 001,记录散射S参数。时域光谱系统的时域窗口设置为100 ps,扫描步长设置为5 μm,逐点积分时间设置为300 ms。测试石英时准光学矢量网络系统和时域光谱系统照片如图6所示。

时域光谱系统测量的空气参考和石英样品的透射信号如图7所示。时域原始数据只包含了1次直通的信号部分,不包含多次回波反射的信息,蓝色线为没有样品时的信号,红色线为透过样品的信号(图7(a))。在图7(b、c)中,用相同的颜色线表示其相应的傅里叶变换幅度谱和相位谱。

准光学矢量网络系统测量的325~500 GHz的原始数据如图8所示。图8(a、b)为没有样品时的透过信号Air_S21(ω)的幅度和相位数据曲线。图8(c、d)为有样品时透过信号Sam_S21(ω)的幅度和相位数据曲线。图8(e、f)为有样品时的反射信号Sam_S11(ω)的幅度和相位数据曲线。为了可以适用于NRW方法,系统采用了金属平板作为校准面进行了校准,焦平面在金属校准平板的厚度中心。测量时样品的一个边界与金属校准面的一个平面位置重合。

2.2.2　参数提取

对比不同处理过程的参数提取结果,先采用常规的方法,也就是时域法处理时域光谱系统数据,NRW法处理准光学矢量网络系统数据,然后再采用时域法处理准光学矢量网络系统数据。

(1) 时域法处理时域光谱系统数据。在不考虑回波时,时域光谱系统测量数据通过式(12)和(13)可获得复折射率,为了方便对比,绘图时只显示了325~500 GHz范围的结果,如图9所示。

(2) NRW法处理准光学矢量网络系统数据。理论上NRW法获取的是解析解,因此当测量数据的精度足够高时,结果接近于真值。S11信号的测量对系统准直精度要求高。采用归一化校准的准光学矢量网络系统,利用式(18)获取的结果,如图10所示。

(3) 时域法处理准光学矢量网络系统数据。采用时域法处理准光学矢量网络系统数据时,需要先将准光学矢量网络系统获取的幅度和相位数据通过傅里叶逆变换到时域,再通过时域门截取多次回波,然后将经过门控滤波的时域数据通过傅里叶变换到频域,通过式(12)和(13)求出相应结果。在此过程中,时间门的截取需要根据已知的样品厚度参数设定,只保留单次直通信号。处理步骤如下:

第1步:拓展频域范围。在Y波段,先将频域范

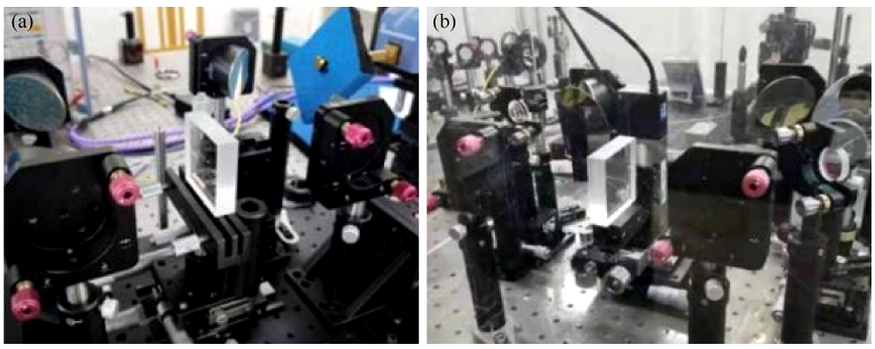


图 6　石英的测试系统照片

(a)准光学矢量网络分析系统;(b)太赫兹时域光谱系统

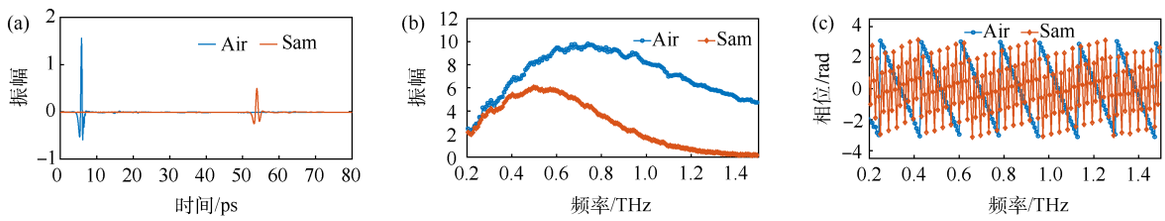


图 7　时域光谱系统测量的空气参考和石英样品的透射信号

(a)时域信号;(b)频域幅度信号;(c)频域相位信号

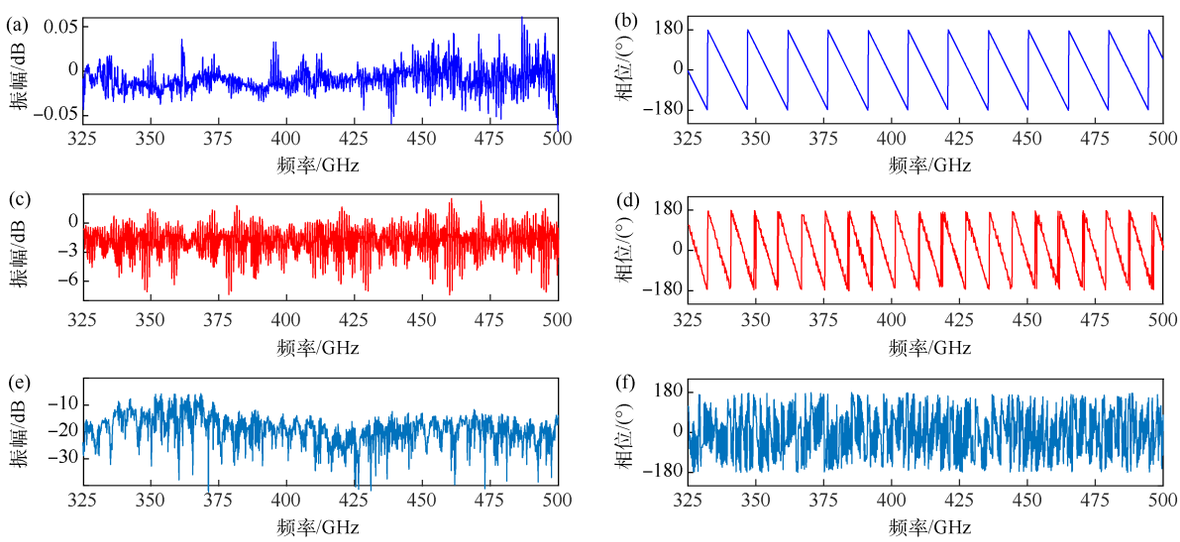


图 8　准光学矢量网络系统测量的信号

(a)空气 *S*21 的幅度;(b)空气 *S*21 的相位;(c)石英样品 *S*21 的幅度;(d)石英样品 *S*21 的相位;

(e)石英样品 *S*11 的幅度;(f)石英样品 *S*11 的相位

围从 325~500 GHz 拓展到 0~825 GHz,频率间隔不变。再通过共轭反转拓展到负频范围。拓展后的频域范围是−825~825 GHz,在零频位置对称分布。

第 2 步:时域门滤波。信号 Air_$S21(\omega)$ 和 Sam_$S21(\omega)$ 通过逆傅里叶转换到时域,相应的时域信号 $E_{air}(t)$ 和 $E_{sam}(t)$ 如图 11(a)所示,其中包含了样本的回波和其他设备之间的回波。根据样品厚度、样品与系统中各个器件、以及各个器件之间的相对空间位置,可以通过时延来识别信号中的每个回波的来源。保留单通信号,其他时间范围设置为 0。门控前后的时域信号如图 11(b、c)所示。

第 3 步:频域传递函数。通过快速傅里叶变换(fast fourier transform,FFT),将只保留单次直通信号的时域信号,变换回频域。计算复透射传输函数

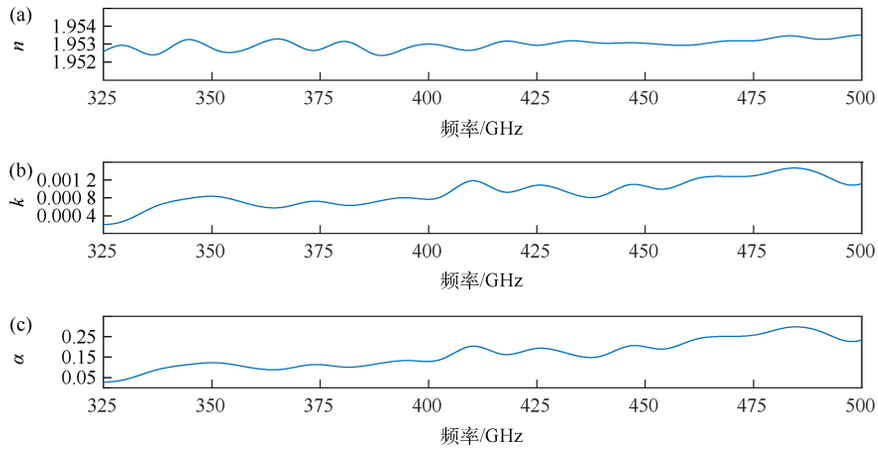


图9　时域法处理时域系统数据的结果

(a)折射率(n);(b)消光系数(k);(c)吸收系数(a)

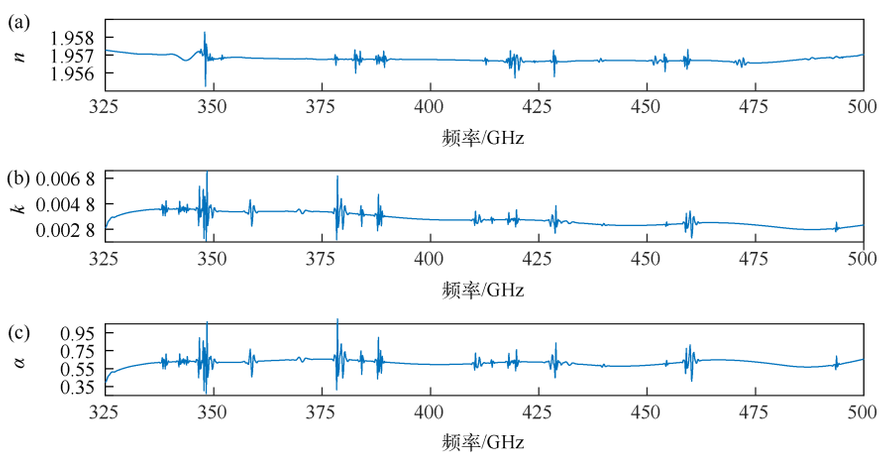


图10　NRW法处理准光学矢量网络系统数据结果

(a)n;(b)k;(c)a

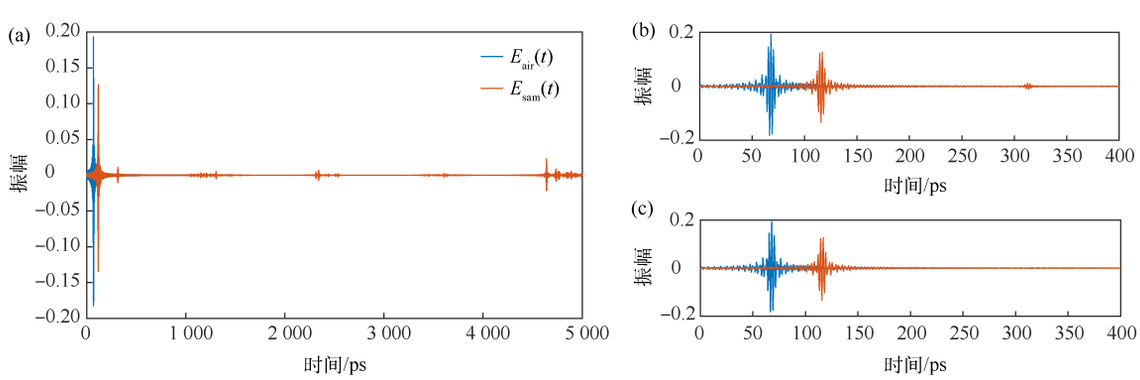


图11　逆傅里叶变换后的时域波形$E_{air}(t)$和$E_{sam}(t)$

(a)较大时窗;(b)较小时窗;(c)去除回波后较小时窗

$H(\omega)$,利用式(12)和(13)求解。如图12所示,分别用原始数据、门控后的数据、频率扩展和门控后的数据计算得到结果基本一致。原始数据中的所有干扰都导致结果产生较大的波动。对于门控后的数据,随着回波的消除,曲线变得平滑,但是这些曲线的边缘是向上卷起的,会损失掉一部分有效频率范围。当增加频率拓展后,曲线的边缘卷曲消失,曲线更加平滑。通过步骤1~3计算得到的结果,折射率数据波动很小,显示了较高的精确度,如图12中黄色曲线所示,结果与样品的物理特性吻合。采用所提方法计算得到的n、k和a参数,如图13所示。

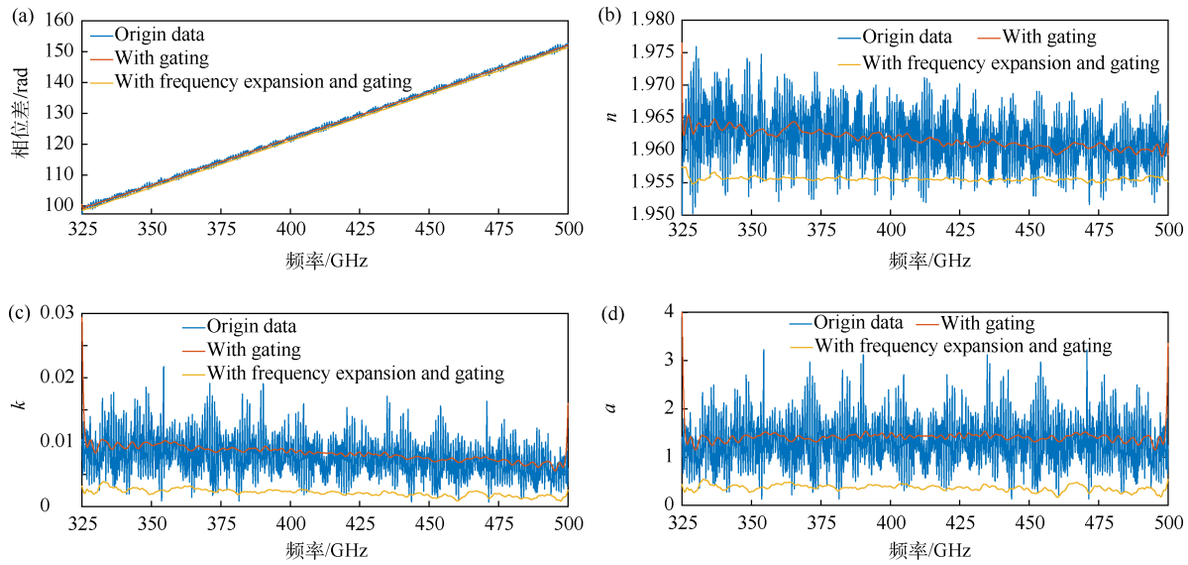


图 12　原始数据、门控后数据、扩频和门控后数据的计算结果

(a)相位差;(b)n;(c)k;(d)a

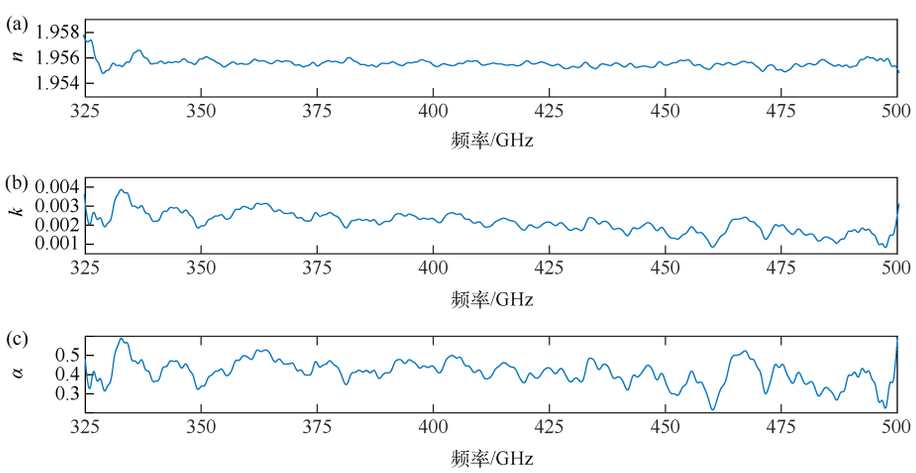


图 13　单次时域方法处理矢量网络分析系统数据的结果

(a)n;(b)k;(c)a

3　结果对比与分析

3.1　结果对比

复折射率的实部反映了材料的色散特性。对于太赫兹时域光谱系统的时域信号,时域窗口的宽度有限,当记录数据只包含单次直通的信息,根据式(12)提取折射率获得的是材料的理论真值(一阶近似)。另外,时域信号可以根据时域脉冲的整体时延,简单计算出材料的近似平均折射率约为1.954,可以根据这个数据判断频率依赖折射率的偏差。当系统测量精度较高,只要测量时确保正入射样品,就能够获得较高的准确性。当使用矢量网络分析系统测量样品时,记录下校准件确定的校准面的反射信号,然后系统再记录样品的透过信号$S21$,同时记录样品的反射信号$S11$,然后可以按照式(18)获取材料的光学常数值。在精确校准并且正入射的情况下,NRW方法在理论上同样应该获取被测样品的真值。对于理想的矢量网络分析系统测试,如果滤除掉频域数据中的高次回波,只保留单次透过的信号,此时的信号对应的物理模型与时域光谱时域信号的模型一致,按照此模型,获取的折射率在理论上是趋于真值的。分别记录经过校准的空气和透过样品的$S21$,利用所提方法进行处理,结果与采用时域光谱系统测量的结果和采用矢量网络分

析系统测量的NRW方法获得的结果高度一致,并介于二者之间。3种方法测量熔石英的折射率结果的最大动态范围为0.004,偏离值不确定性<0.2%,验证了测量的有效性,不同方法处理的折射率如图14所示。高度一致的结果也说明测量结果都是趋于材料真实值的,微小的偏离是来源于测量误差,例如样品测量时的入射角偏差、不同位置的厚度和密度均匀度偏差等。

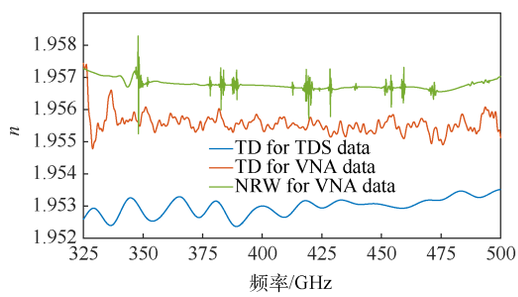


图14　不同方法处理的折射率

复折射率的虚部为消光系数,反映了材料的吸收或损耗特性。损耗特性不仅与材料有关,在电磁波与材料相互作用过程中所有非预期的能量损失,都体现为材料的损耗特性增大,因此对样品制备和测量条件越精确,越能反映材料本身的损耗。当采用时域光谱系统数据,单次透射模型下,时间窗限定为单次穿透,因此在相同条件下,由于测试时入射角度偏差、材料平行度偏差和材料界面粗糙度影响的无规则散射等因素带来的非预期损失较小,结果准确性更高。由图15可知,时域光谱测试数据,得到了最小的损耗参数,消光系数约为10^{-3}。而矢量网络分析系统测试数据,由于记录数据中理论上包含无限多次回波的信息,多次传输造成入射角度、样品粗糙度和平行度等因素导致的损耗因素累积。对于NRW的处理方法,还需要依赖*S*11反射数据的准确性,同时累积了*S*21和*S*11的损耗因素,因此使得提取的损耗参数相比最大。所提方法计算的损耗参数值介于上述2种情况之间,相对于时域光谱系统数据偏大,小于NRW方法计算结果。这主要还是由于矢量网络分析系统从频域记录原始信号,时域截取时很难做到完美地分离回波干扰和单次直通信号,因此模型匹配并不能做到理想的适配。尽管如此,采用本文所述方法得到的熔石英样品吸收系数获得了非常高的精度。

3.2　测量模型匹配条件

单次时域直通模型的关键是能够有效地单独分离出不同级次的回波。在基于矢量网络分析系统实际测量时,都考虑了样本中多次反射的影响。但是通常无法准确定量表述信号中实际存在的回波成分,不能确定样品中的回波次数,通常也不可能是整数次回波。在不知道准确的回波次数时,式(9)和(10)不能直接应用。但是当可以有效地通过时间窗口截断样品中多次回波的影响时,特别是只保留单次透射信号时,无需迭代,而且在实验上引入的非预期损耗最小,容易实现较高的测量精度,利用式(12)和(13)处理,与物理传输模型匹配,复折射率的实部和虚部理论上计算得到的为真值。时域光谱系统中记录的是时域信号,时域分辨率较高,但是由于时间窗口有限,频域分辨率较低,通常只能达到GHz量级。

NRW方法同样获得的是真值的解析解,只需要记录透射信号和反射信号的和,不需要考虑实际信号在样品中的回波次数。只是该方法需要同时获取透射和反射信号,需要精确的校准过程,对测量过程要求极高。NRW方法在基于矢量网络分析仪的系统中得到了验证。基于矢量网络分析仪的系统扫描频率分辨率可以达到Hz量级,但是由于频率带宽有限,变换到时域时时间分辨率较低,时

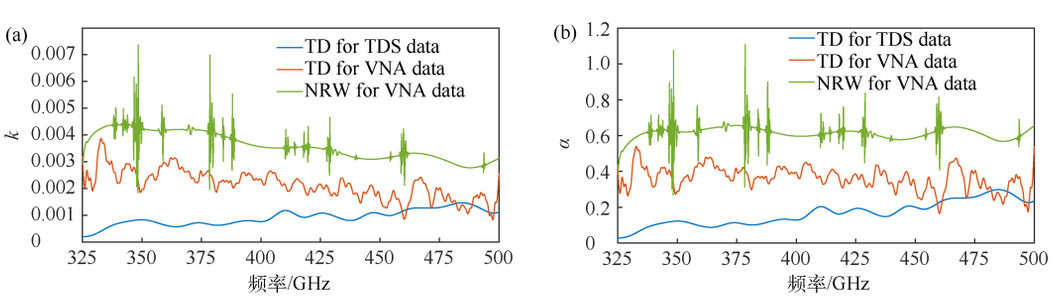


图15　不同方法处理获得参数

(a)*k*;(b)*α*

间窗截断时很难得到完整的样品内回波。因此,在较低频率范围时,时间门控通常只用于消除测量系统中器件之间的匹配回波损耗,而不能用于样品中回波的消除。当频率范围逐渐跨到太赫兹频段后,通过时域门限滤波处理可以较好地消除回波干扰。

回波分离时,在理论分析过程中当能够有效分离出不同级次的回波时,时域和频域方法都能够显著地简化,同时也更容易在实际测量过程中实现理论要求的测量条件,这样确保测量结果更加精确。所提的单次时域直通模型是最容易实现匹配的方法,适用于时域测量系统,同样适用于频域测量系统。而要实现条件匹配,必须考虑时域回波重叠的影响,时域门不能任意设置,分离出需要的信号也不容易。为了保证单通模型的信号完整性,有必要根据系统带宽和准光学有效测量范围来确定样品的厚度。基于傅里叶光学理论,本文给出测量系统有效带宽与样品厚度关系经验公式为

$$2nd > 20\frac{c}{B}, \tag{19}$$

式中:d为样品厚度;n为平板材料折射率;c为光速;B为测量系统的有效带宽。公式指出,当相邻回波光程间距>20倍相应傅里叶逆变换获得的时域信号主瓣宽度,能够较容易地分离相邻回波,保持较好的信号完整性,此时采用单次直通模型处理数据获得的材料参数有较高的精度。

对于本文中的矢量网络分析系统,带宽B为175 GHz,对应的时域信号主瓣宽度约为5.7 ps,简单计算得到满足单次直通模型时样品厚度应>8.8 mm。样品越厚,越有利于分离出单次直通信号,但是同时也会逐步偏离最佳测量范围,导致数据模型、理论模型和测量条件逐渐偏离。采用样品厚度为15.124 mm,约为最小可分离厚度的2倍,测量系统的有效测量区间(瑞利距离)的1/2,匹配条件非常理想,因此获得的测量结果和测量系统的设计思路有较好的参考价值。

4 结 论

自由空间法材料测量和参数提取是太赫兹波非接触检测评估技术的理论前提。本文全面地总结了基于太赫兹时域脉冲和频域连续波信号不同模型条件下材料参数提取方法。采用单次时域传输模型,在准光学系统精确波束优化和准直调节的条件下,不同测量信号都能够得到趋于真值的材料参数,在高精度范围内得到了相同的结果,证实了太赫兹时域脉冲信号和频域连续波信号与样品相互作用物理过程的一致性。验证了测量结果不依赖于系统类型和信号类型,而是与参数提取方法、测量条件和物理传输模型是否匹配有关。提炼出满足匹配条件的理论表达经验公式,能够通过单次时域传输模型得到材料参数的合理值,也为评价太赫兹波段材料电磁参数测量和缺陷检测的可靠性提供了参照条件和实践依据。

参 考 文 献

[1] FUKUCHI T, FUSE N, OKADA M, et al. Surface roughness measurement of thermal barrier coating using terahertz waves[J]. IEEJ Transactions on Fundamentals and Materials, 2017, 137(3): 147-152.

[2] REDO-SANCHEZ A, HESHMAT B, AGHASI A, et al. Terahertz time-gated spectral imaging for content extraction through layered structures [J]. Nature Communications, 2016, 7: 12665.

[3] ZHANG Z W, WANG K J, LEI Y, et al. Non-destructive detection of pigments in oil painting by using terahertz tomography [J]. Science China-Physics Mechanics & Astronomy, 2015, 58(12): 124202.

[4] PARK J W, IM K H, YANGI Y, et al. Terahertz radiation NDE of composite materials for wind turbine applications [J]. International Journal of Precision Engineering and Manufacturing, 2014, 15(6): 1247-1254.

[5] SHEN Y C. Terahertz pulsed spectroscopy and imaging for pharmaceutical applications a review[J]. International Journal of Pharmaceutics, 2011, 42(45): 48-60.

[6] SHEHAB F, MYERS M T, OTT H, et al. Uniaxial complex relative permittivity tensor measurement of rocks from 40 Hz to 4.5 GHz[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2017, 55(2): 1125-1139.

[7] BAKRI-KASSEM M, MANSOUR R R. Two movable-plate nitrideloaded MEMS variable capacitor[J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 2004, 52(3): 831-837.

[8] ABBAS Z, POLLARD R D, KELSALL R W. Complex permittivity measurements at Ka-band using rectangular dielectric waveguide [J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2001, 50(5): 1334-1342.

[9] IGLESIAS T P, PEREIRA S M. Distributed parameters for low frequency dielectric characterization of liquids

with open-ended coaxial cell[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2006, 55(1): 176-179.
[10] HAKKI B W, COLEMAN P D. A dielectric resonator method of measuring inductive capacities in the millimeter range[J]. IRE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 1960, 8(4): 402-410.
[11] BERNARD P A, GAUTRAY J M. Measurement of dielectric constant using a microstrip ring resonator[J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 1991, 39(3): 592-595.
[12] DUVILLARET L, GARET F, COUTAZ J L. A reliable method for extraction of material parameters in terahertz time-domain spectroscopy[J]. IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, 1996, 2(3): 739-746.
[13] DORNEY T D, BARANIUK R G, MITTLEMAN D M. Material parameter estimation with terahertz time-domain spectroscopy[J]. Journal of the Optical Society of America A(Optics Image Science and Vision), 2001, 18(7): 1562-1571.
[14] THRANE L, JACOBSEN R H, UHD JEPSEN P, et al. THz reflection spectroscopy of liquid water [J]. Chemical Physics Letters, 1995, 240(4): 330-333.
[15] JEPSEN P U, JENSEN J K, MØLLER U. Characterization of aqueous alcohol solutions in bottles with THz reflection spectroscopy[J]. Optics Express, 2008, 16(13): 9318.
[16] DAI J, XIE X, ZHANG X. Detection of broadband terahertz waves with a laser-induced plasma in gases[J]. Physical Review Letters, 2006, 97(10): 103903.
[17] NICOLSON A M, ROSS G F. Measurement of the intrinsic properties of materials by time-domain techniques [J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 1970, 19(4): 377-382.
[18] WEIR W B. Automatic measurement of complex dielectric constant and permeability at microwave frequencies[C]. Proceedings of the IEEE, 1974, 62(1): 33-36.
[19] SKOCIK P, NEUMANN P. Measurement of complex permittivity in free space [C]. DAAAM International Symposium on Intelligent Manufacturing and Automation, 2015, 100: 100-104.
[20] TOSAKA T, FUJII K, FUKUNAGA K, et al. Development of complex relative permittivity measurement system based on free-space in 220-330 GHz range[J]. IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology, 2015, 5(1): 102-109.
[21] HORÁK T, GUILLAUME D, MARTIN M, et al. Free-space characterization of magneto-optical hexaferrites in the submillimeter-wave range[J]. IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology, 2017, 7(5): 563-571.
[22] JOHS B, HALE J S. Dielectric function representation by B-splines[J]. Physica Status Solidi A, 2008, 205(4): 715-719.
[23] CHANG T, ZHANG X, YANG C, et al. Measurement of complex terahertz dielectric properties of polymers using an improved free-space technique [J]. Measurement Science and Technology, 2017, 28(4): 045002.
[24] WANG Y, RIDLER N M, NAFTALY M, et al. Material measurements using VNA-based material characterization kits subject to thru-reflect-line calibration[J]. IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology, 2020, 10(5): 466-473.
[25] ZHU H, WU K. Complex permittivity measurement of dielectric substrate in sub-THz range [J]. IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology, 2021, 11(1): 2-15.

(责任编辑:兰丽丽)