

文章编号: 1000-7032(2019)03-0382-07

厚度误差对 THz-TDS 的测量不确定度分析

董海龙, 汪家春*, 刘瑞煌, 马冬晓, 赵大鹏

(国防科技大学电子对抗学院 脉冲功率激光技术国家重点实验室, 安徽 合肥 230000)

摘要: 阐述了基于菲涅尔公式的透射式太赫兹时域光谱系统提取样品光学常数的方法和原理, 分析了样品厚度误差对 THz-TDS 测量不确定度的影响, 并建立了相应的不确定度模型。进行太赫兹时域光谱测量实验, 提取硅片在太赫兹波段的折射率, 并计算了误差对提取样品折射率的影响。结果表明, 随着厚度误差的增大, 系统测量偏差也随之增大。对于较厚样品, 相同厚度误差对其测量结果影响较小。样品厚度为 994 μm 时, 在厚度存在 1 μm 的测量误差情况下, 系统测量折射率的偏差为 0.001 2, 接近模型的仿真值。实验结果验证了厚度误差对测量不确定度模型的有效性, 了解了厚度误差对系统测量结果的影响情况, 对测量过程及结果分析具有一定的指导意义。

关键词: 太赫兹时域光谱系统; 光学常数; 厚度误差; 不确定度; 单晶硅

中图分类号: O433.1

文献标识码: A

DOI: 10.3788/fjxb20194003.0382

Analysis of Measurement Uncertainty in THz-TDS Carried by Thickness Error

DONG Hai-long, WANG Jia-chun*, LIU Rui-huang, MA Dong-xiao, ZHAO Da-peng

(State Key Laboratory of Pulsed Power Laser Technology, College of Electronic Engineering,
National University of Defence Technology, Hefei 230000, China)

* Corresponding Author, E-mail: w_jiachun@163.com

Abstract: The method and theory of extracting the sample optical constants with terahertz time domain system (THz-TDS) based on Fresnel formulas were demonstrated, the effect on the uncertainty of THz-TDS due to the thickness error was analyzed, and the uncertainty model was established. The measurement experiment of THz-TDS was designed, the refractive index of silicon wafer in terahertz band was extracted and the effect of error on extracting refractive index of sample was computed. Experimental results indicate that the measurement deviation increases with the thickness error increasing. For thicker samples, it has less effect on the measurement result carried by the same thickness error. The deviation of the refractive index measured by the system under 1 μm thickness error is 0.001 2 when the thickness of the sample is 994 μm , which is close to the simulation value of the model. Experimental results verify the availability of thickness error uncertainty model in measurement process, show the influence of thickness error on the measurement result, and have certain guiding significance on measure process and result analysis.

Key words: terahertz time domain system (THz-TDS); optical constants; thickness error; uncertainty; monocrystalline silicon

收稿日期: 2018-05-01; 修订日期: 2018-07-09

基金项目: 脉冲功率激光技术国家重点实验室主任基金 (SKL2016ZR05); 十三五计划预研项目 (HJJ2017-0671) 资助

Supported by State Key Laboratory of Pulsed Power Laser Technology (SKL2016ZR05); Planned Preresearch Project in 13th Five-year (HJJ2017-0671)

1 引 言

太赫兹(Terahertz, THz)波通常指电磁辐射频率在 0.1 ~ 10 THz (波长在 30 μm ~ 3 mm) 范围内的电磁波, 具有瞬态性、低能性、相干性、宽带性及强穿透性(对非金属物质、非极性物质)等特性^[1-4]。太赫兹时域光谱系统(Terahertz time domain system, THz-TDS)是太赫兹技术的一项重要应用, 可通过测量得到材料的光学常数, 如折射率、介电常数、吸收系数等, 广泛应用于物质鉴定和成分分析领域^[5-6]。目前, 受设备控制精度、系统噪音以及实验操作、数据处理过程的影响, 研究人员在利用 THz-TDS 进行参数测量过程中会出现或大或小的误差, 得到不同的测量结果。如 Nakanishi 和 Reid 等在文献中报道, 测得水在 0.5 THz 的折射率分别为 2.3 和 2.05 左右, 存在较大差异^[7-8]。本文以厚度误差对透射式 THz-TDS 测量固体光学常数的影响进行分析, 并通过实验验证了分析模型的有效性, 对测量过程及结果分析具有一定的指导意义。

2 基于菲涅尔公式的 THz-TDS 光学常数提取方法

材料的光学常数是用来表征其宏观光学性质的物理量, 一般包括复折射率、介质损耗、电导率、吸收系数等^[9-10]。这些参数之间是相互关联的, 一般可利用已知的一个或者一组参数计算出其他参数。材料的光学常数不是常数, 而是频率的函数。通常, 我们用材料的复折射率描述其宏观光学性质, 可表示为:

$$\tilde{n}(w) = n(w) - jk(w), \quad (1)$$

式中, $n(w)$ 为材料的折射率, 描述材料的色散情况; $k(w)$ 为材料的消光系数, 描述材料的损耗; w 为角频率。材料的吸收系数 $\alpha(w)$ 也可以通过消光系数 $k(w)$ 求得:

$$\alpha(w) = \frac{2w}{c}k(w). \quad (2)$$

太赫兹时域光谱系统的关键特征是可以有效地测量材料在太赫兹波段下透过系数的振幅和相位, 得到材料在太赫兹波段下的物理和化学信息, 可用于提取材料在太赫兹波段的光学常数, 如介电常数、复折射率等, 在半导体材料、电介质材料、生物大分子(如 DNA、蛋白质)以及超材料等研究

中具有重要作用^[11]。

法国的 Duvillaret 等提出一种基于菲涅尔公式的解析法, 利用透射式 THz-TDS 测量材料的折射率和吸收系数等^[12-13]。该方法适用于提取对太赫兹吸收较弱的材料, 如非金属、非极性材料等, 对强吸收材料并不适用。该方法在进行材料光学常数提取过程中必须满足以下条件: (1) 测量表面是平行且光滑的片状样品; (2) 待测样品上下表面的介质满足磁各向同性, 介质的电磁场响应是线性的, 如正常条件下的空气、真空或惰性气体等; (3) 测量样品较厚, 可忽略多次反射的回波造成的法布里-珀罗震荡。

如图 1, 入射太赫兹脉冲由介质 a 进入介质 b, 并在其间发生透射和反射, 由介质 b 射出介质 a。

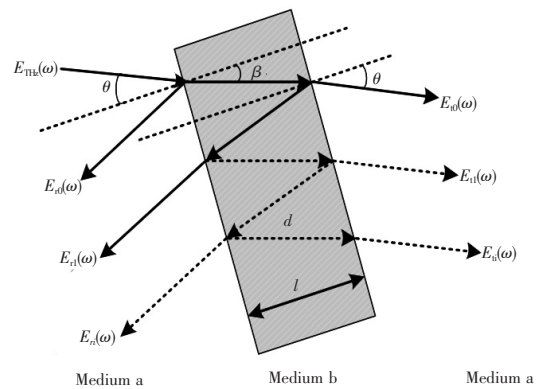


图 1 太赫兹波在样品中的透射与反射

Fig. 1 Transmission and reflection of THz wave in the sample

根据文献分析, 可以得到样品的复透过率

$\tilde{H}(w)$:

$$\tilde{H}(w) = \frac{E_{\text{THz}}(w)}{E_{\text{ref}}(w)} = \frac{4 \tilde{n}_{\text{air}}(w) \tilde{n}_{\text{sam}}(w) \cos\theta \cos\beta}{[\tilde{n}_{\text{air}}(w) \cos\beta + \tilde{n}_{\text{sam}}(w) \cos\theta]^2} \times \left(\exp\left\{ -j \frac{[l \tilde{n}_{\text{sam}}(w) - \Delta L \tilde{n}_{\text{air}}(w)] w}{c} \right\} \right) \times FP(w), \quad (3)$$

式中, θ 和 β 分别为太赫兹脉冲的入射角和折射角, $\tilde{n}_{\text{air}}(w)$ 和 $\tilde{n}_{\text{sam}}(w)$ 分别为介质 a 和介质 b 的复折射率, l 为样品厚度, d 为太赫兹脉冲在样品中的传输距离, ΔL 为光程差, $FP(w)$ 是太赫兹脉冲在样品内部多次反射产生 Fabry-Perot 标准具效应所引起的结果。在实际操作中, 通常让太赫兹脉冲垂直入射到被测样品表面。此时, $\theta = \beta = 0^\circ$,

$\Delta L = l = d$, 并认为空气折射率 $\tilde{n}_{\text{air}}(w) = 1$, $\sigma_{n_{\text{air}}}^2(w) = 0$ 。在样品较厚的情况下, 反射波的光程较大, 此时大部分回波信号较弱, 可忽略多次反射, 即此时 $m = 0$, $FP(w) = 1$, 则复透过率 $\tilde{H}(w)$ 简化为:

$$\tilde{H}(w) = \frac{4\tilde{n}_{\text{sam}}(w)}{[1 + \tilde{n}_{\text{sam}}(w)]^2} \times \exp\left\{-j \frac{wl[\tilde{n}_{\text{sam}}(w) - 1]}{c}\right\}, \quad (4)$$

复透过率 $\tilde{H}(w)$ 又可写成模和幅角的形式, 即 $\tilde{H}(w) = |H(w)| \exp[-j\varphi_c(w)]$, 可以得到样品的折射率 $n(w) = \frac{c}{wd}\varphi_c(w) + 1$ 和消光系数 $k(w) = \frac{c}{wd} \ln\left\{\frac{4n(w)}{|H(w)|[n(w) + 1]}\right\}$ 。利用方差计算, 获得样品折射率和消光系数的方差为:

$$\sigma_n^2(w) = \left[\frac{c}{wd^2}\varphi_c(w)\right]^2 \sigma_d^2 + \left[\frac{c}{wd}\right]^2 \sigma_{\varphi_c}^2(w), \quad (5)$$

$$\sigma_k^2(w) = \left[\frac{k(w)}{d}\right]^2 \sigma_d^2 + \left[\frac{c}{wd|H(w)|}\right]^2 \sigma_{|H|}^2(w) + \left[\frac{c}{wd}\left(\frac{n(w) - 1}{n(w) + 1}\right)\right]^2 \frac{\sigma_n^2(w)}{n(w)^2}, \quad (6)$$

根据公式(5), 样品折射率测量的不确定度是由样品厚度误差 σ_d^2 、系统引起的相位误差 $\sigma_{\varphi_c}^2(w)$ 产生的。

3 厚度误差对透射式 THz-TDS 测量过程的分析与仿真计算

由上节分析可知, 利用透射式 THz-TDS 可直接测量获得材料在太赫兹波段的光学常数。然而, THz-TDS 通常由机械装置、光学部件和电子元件等部分组成, 各个部分的控制精度、响应误差、系统噪声以及实验操作、数据处理等方面均会影响材料光学常数的准确性。因此, 分析 THz-TDS 测试的不确定度对于准确提取材料光学常数具有重要的意义^[14-15]。本文从厚度误差方面研究其对提取材料光学常数准确度的影响, 旨在提高后续材料光学常数研究的准确性。

3.1 厚度误差对透射式 THz-TDS 测量的不确定度分析

图 2 是透射式 THz-TDS 的结构图, 其光谱分析属于相干分析。来自相同激光光源的一束激光经半

透镜后, 一束进入发射天线产生太赫兹波, 透过样品; 另一束激光经过延迟装置进入探测天线, 对经过样品的太赫兹波进行数值采样, 得到时域光谱。对时域信号进行离散 Fourier 变换, 得到频域光谱。

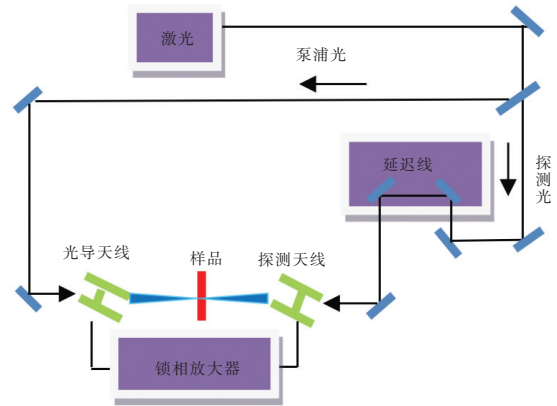


图 2 透射式 THz-TDS 结构图

Fig. 2 Assumption diagram of transmitted THz-TDS

根据图 1, 太赫兹脉冲在样品中的传输距离 d 是样品厚度 l 和折射角 β 的函数, 其表达式为

$$d = \frac{l}{\cos\beta}, \quad (7)$$

从公式(7)可得传输距离 d 的方差, 表达式如下:

$$\sigma_d^2 = \left(\frac{1}{\cos\beta}\right)^2 \sigma_l^2 + \left(\frac{l\sin\beta}{\cos^2\beta}\right)^2 \sigma_\beta^2, \quad (8)$$

式中, 厚度的方差 σ_l^2 由测量的不确定性导致, 角度的方差 σ_β^2 由对准的不确定性导致。

根据 Snell's 方程, 折射角 β 与入射角 θ 、空气折射率 n_0 和样品折射率 n 有关, 表达式为

$$\beta = \arcsin\left(\frac{n_0 \sin\theta}{n}\right), \quad (9)$$

假设样品的折射率 n 和空气折射率 n_0 是测量准确的, 则入射角的方差表达式为

$$\sigma_\beta^2 = \frac{n_0^2 \cos^2\theta}{n^2 - n_0^2 \sin^2\theta} \sigma_\theta^2, \quad (10)$$

式中, σ_θ^2 是入射角度的方差。

实际应用中, 当太赫兹辐射的入射角 θ 为非零时, 样品的传输函数将变得更加复杂。进一步说, 过度的样品倾斜将导致一个复杂的传输几何关系、一个偏移的光束方向, 聚焦在探测器上的太赫兹辐射能量也将更小。为了避免这些影响, 假设太赫兹波是垂直入射到样品表面的, 即 $\theta = \beta = 0^\circ$, 此时入射角的方差 $\sigma_\theta^2 = 0$, 公式(8)可以简述为

$$\sigma_d^2 = \sigma_l^2, \quad (11)$$

根据公式(5)和(6),此时只考虑样品厚度误差对折射率误差的影响。由公式(8)和(11),样品折射率和消光系数的方差可以简化为:

$$\sigma_{n,l}^2(w) = \left[\frac{c}{wl} \varphi_e(w) \right]^2 \sigma_l^2, \quad (12)$$

$$\sigma_{k,l}^2(w) = \left[\frac{k(w)}{l} \right]^2 \sigma_l^2 +$$

$$\left[\frac{c}{wdn(w)} \left(\frac{n(w) - 1}{n(w) + 1} \right) \right]^2 \sigma_{n,l}^2(w). \quad (13)$$

3.2 厚度误差对透射式 THz-TDS 测量的不确定度模型仿真

上节分析了样品厚度误差对透射式 THz-TDS 测量固体光学常数的误差分析。如图 3 所示,根据 Duvillaret 等建立的光电导天线分析模型,选取复折射率 $\tilde{n}(w) = 1.5 - 0.1j$ 、样品厚度 $l = 1 \text{ mm}$ 的样品,以空气折射率 $n_0 = 1$ 、入射角 $\theta = 0^\circ$ 建立了太赫兹脉冲经过空气和样品产生的太赫兹参考信号和样品信号^[16],经过 Fourier 变换得到频域的参考信号和样品信号。

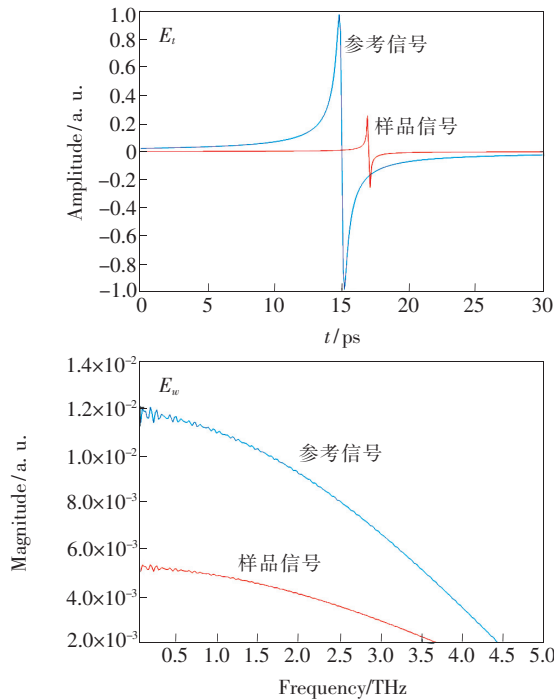


图 3 太赫兹时域及频域信号

Fig. 3 Terahertz time domain and frequency domain signal

根据厚度误差对透射式 THz-TDS 测量的不确定度分析,取样品厚度的标准差 $\sigma_l = 5 \text{ }\mu\text{m}$,研究不同频率下由 σ_l 对提取样品折射率和消光系数造成的影响。根据公式(12)、(13),利用 MATLAB 进行数值仿真,结果如图 4 所示。

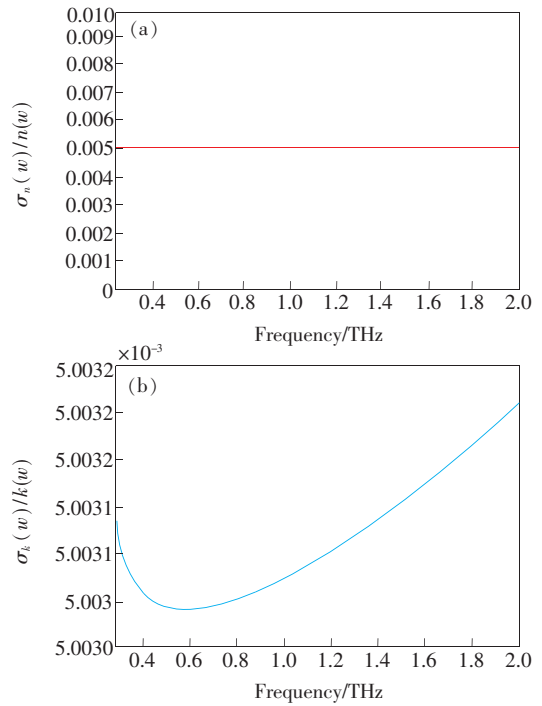


图 4 样品厚度误差 $\sigma_l = 5 \text{ }\mu\text{m}$ 对提取光学常数的影响。(a) 折射率标准差;(b) 样品消光系数标准差。

Fig. 4 Standard deviation of optical constants effected by $\sigma_l = 5 \text{ }\mu\text{m}$. (a) Standard deviation of refractive index. (b) Standard deviation of coefficient of light extinction.

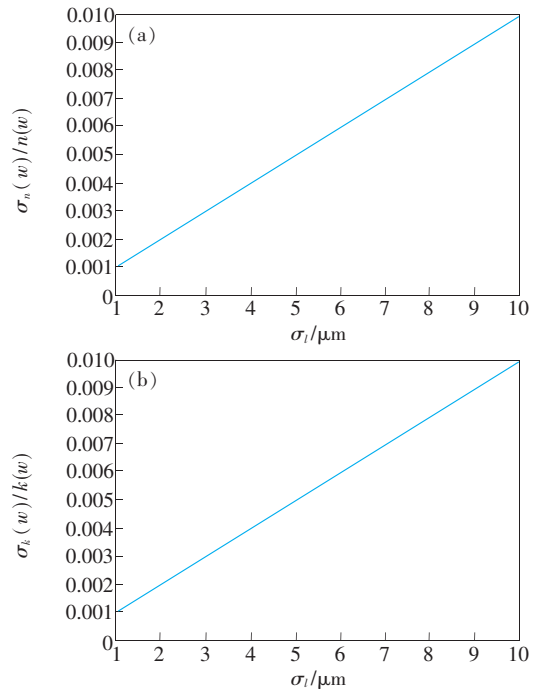


图 5 不同样品厚度误差对提取光学常数的影响。(a) 折射率标准差;(b) 样品消光系数标准差。

Fig. 5 Standard deviation of optical constants effected by different σ_l from 1 to 10 μm . (a) Standard deviation of refractive index. (b) Standard deviation of coefficient of light extinction.

由图 4 可知,样品光学常数的测量不确定度受样品厚度误差的影响。由图 4(a)可发现,在 σ_l 一定的情况下,折射率不受频率的影响;在图 4(b)中,折射率虽然随频率的变化而变化,但是变化幅度很小,仅为 10^{-7} 数量级,可认为不受相应误差条件下频率的影响。由两图可知,折射率和消光系数的测量受样品厚度误差的影响几乎相同。

取样品厚度的标准差 σ_l 从 $1 \sim 10 \mu\text{m}$ 递增,研究 σ_l 对提取样品折射率和消光系数的影响,结果如图 5 所示。

由图 5 可知,在样品厚度为 1 mm 时,样品折射率和消光系数的测量误差随厚度误差的增大而增大。在厚度误差为 $1 \mu\text{m}$ 时,变化幅度为 10^{-3} 数量级。当厚度存在 $10 \mu\text{m}$ 的测量误差时,系统的测量结果将出现 10^{-2} 数量级的变化幅度。

4 厚度误差对 THz-TDS 测量实验

上节分析了样品厚度误差对透射式 THz-TDS 测量固体光学常数的影响情况,并建立了误差对测量结果的影响模型。为了验证模型的有效性,选择硅片为测试样品,进行太赫兹时域光谱测量实验,提取硅片在太赫兹波段的折射率,验证厚度误差对提取样品光学常数不确定度模型的有效性。

4.1 实验准备

硅是常用的半导体材料,主要包括单晶硅、多晶硅以及非晶硅。其中,单晶硅具有完整的点阵结构,在不同的方向上具有不同的性质,是一种性能优良的半导体材料,其纯度高达 99.9999% 以上。实验选取单晶硅作为样品,有以下几个主要原因:(1)单晶硅具有表面平整光滑、内外表层相互平行的特点,适合用于 THz-TDS 的实验测量。(2)硅属于非金属物质,反射率较低,适用于透射式 THz-TDS 的参数提取测量实验;(3)大量实验表明,在远红外波段最透明的半导体材料就是高阻的单晶硅;(4)国内外进行了大量单晶硅材料在太赫兹频段的特性研究,已获得相关的光学特性和参数,可为实验测试结果提供数据支撑^[17]。实验样品选取 4 种不同厚度的 P 型单抛单晶硅,其表面光滑抛光,用电子数显千分尺对样品厚度进行多次测量,获得平均厚度分别为 $303, 502, 710, 994 \mu\text{m}$ 。

4.2 实验过程

实验采用 TDS-1010 飞秒激光 THz-TDS 进行

测量,脉冲光斑尺寸为 22 mm (聚焦光束为 2.0 mm),宽度 $< 100 \text{ fs}$,中心波长 1060 nm ,系统光谱范围为 $0.1 \sim 5 \text{ THz}$ 。实验过程中,利用样品夹将单晶硅片垂直立于样品架,使入射太赫兹脉冲垂直入射到样品表面。在测量过程中,采用加充氮气对样品仓中的空气湿度进行控制,利用中央空调对室内温度进行调节。

对每片单晶硅的太赫兹时域光谱信号交替测量 5 次,获得 5 次测量的太赫兹时域及频域信号平均值,为提取和分析单晶硅的光学常数提供数据来源。如图 6 所示,是厚度为 $303 \mu\text{m}$ 单晶硅样品 5 次实验测量的时域及频域平均值。图 6(a)记录的是在干燥空气中(加充氮气、环境温度为 $25 \text{ }^\circ\text{C}$),参考信号(即空气)和厚度为 $303 \mu\text{m}$ 的单晶硅片样品的太赫兹时域光谱信号,表示经过样品的太赫兹脉冲电场随时间的变化情况。图 6(b)是时域信号经过 Fourier 变换得到的脉冲频域分布。

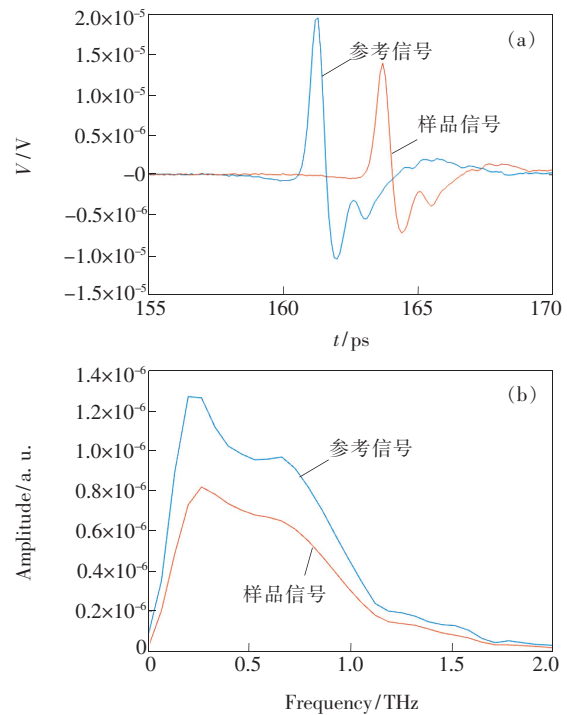


图 6 样品的太赫兹光谱图。(a) 太赫兹时域光谱信号;(b) 太赫兹频域信号。

Fig. 6 Terahertz spectroscopy of sample. (a) Terahertz time-domain spectral signal. (b) Terahertz frequency domain signal.

从图 6(a)可以看出,在太赫兹时域光谱中,具有单晶硅片时,时域信号峰值相对于参考信号峰值存在一定的延迟,且信号的峰值强度也存在一定的衰减。峰值出现延迟的原因是样品在太赫

兹波段的折射率大于空气的折射率。在探测距离,即发射天线与探测天线位置固定的情况下,样品折射率的增大相当于增大了太赫兹脉冲的光程,而该系统中脉冲的探测属于相干探测,增加的光程需要系统延迟线进行补偿,因此峰值出现了延迟现象。由于样品对太赫兹脉冲存在一定的衰减,故样品信号峰值强度出现一定的衰减。从图 6(b)可以看出,样品信号在不同的频率处太赫兹脉冲的衰减过程不同,脉冲信号在样品中的透过率也不一样。利用相关软件,分别代入测量的 4 块样品的光谱数据和平均厚度,计算获得每块样品在太赫兹波段的折射率,如图 7 所示。

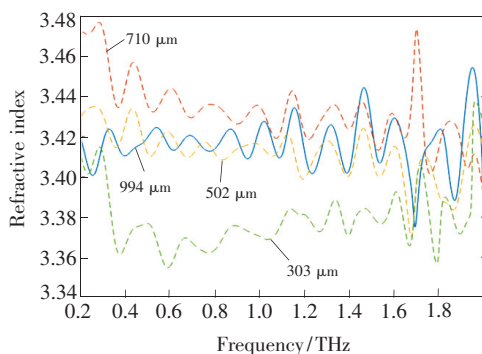


图 7 实验获取样品的折射率

Fig. 7 Sample refractive index carried by experiment

从图 7 可以看出,4 块不同厚度样品的折射率随频率上下波动,且在频率较高处,样品的折射率振荡更大一些,这可能是受测量过程中系统误差影响,如系统噪音、延迟线位置偏差、Fabry-Perot 效应引起的反射误差。在频率较高处,如 1.5 THz 以上(波长 200 μm),脉冲信号弱,信噪比低,对测量结果产生更大的振荡。

利用相关软件,可获得样品在太赫兹波段下的平均折射率。根据公式(12),只考虑厚度误差对提取样品折射率误差的影响,计算样品折射率的标准差。利用测量获得平均折射率,考虑实验测量厚度误差为微米量级, σ_l 为 1 ~ 10 μm ,测量不同的厚度误差下样品折射率的变化值,将数据拟合获得对应的影响曲线,如图 8 所示。

由图 8 可知,对于每块样品,随着厚度误差的

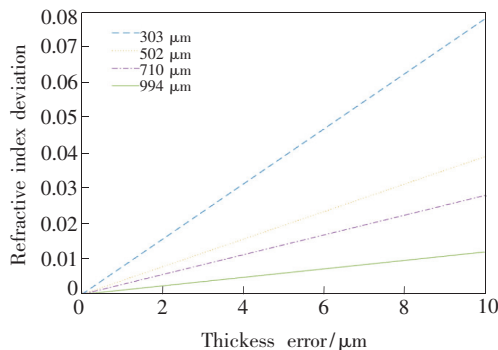


图 8 厚度误差对系统提取样品折射率的影响

Fig. 8 Effect of sample refractive index carried by thickness error

增大,系统测量样品的折射率偏差也随之增大。对于较厚样品,相同厚度误差对其测量结果影响较小,原因在于当样品较厚时,太赫兹脉冲反射波的光程较大,多次脉冲对主脉冲影响较小。对于厚度为 994 μm 的样品,当厚度误差为 1 μm 时,系统测量样品的折射率偏差为 10^{-3} 左右;当厚度误差为 10 μm 时,偏差为 0.012,符合厚度误差对系统测量不确定度模型。

5 结 论

本文基于菲涅尔公式的透射式 THz-TDS 光学常数提取方法,分析了厚度误差在测量过程中的不确定度模型,并利用 MATLAB 编程软件对模型进行了仿真分析。由模型可知,当样品厚度为 1 mm 时,厚度存在 1 μm 的误差便会对样品折射率和消光系数的提取产生 10^{-3} 数量级的误差。以单晶硅片为测试样品进行光谱测量实验,研究厚度误差对系统测量不同厚度的样品折射率的影响情况。实验表明,样品厚度为 994 μm (接近 1 mm) 时,在厚度存在 1 μm 的测量误差情况下,系统测量的样品折射率偏差为 0.001 2,接近模型的仿真值,验证了该分析模型的有效性,对测量过程及结果分析具有一定的指导意义。由于系统各部分在控制精度、响应误差、系统噪音以及实验操作等方面均会对系统测量过程产生影响,故实验结果与模型仿真结果存在一定的差异,有待下一步开展分析验证。

参 考 文 献:

- [1] DORNEY T D, BARANIUK R G, MITTLEMAN D M. Material parameter estimation with terahertz time-domain spectroscopy [J]. *J. Opt. Soc. Am. A*, 2001, 18(7): 1562-1571.

- [2] WANG Q C, WANG J C, ZHAO D P, *et al.*. Extinction characteristic of graphite smoke for terahertz wave [C]. *Proceedings Volume 10155, Optical Measurement Technology and Instrumentation, Beijing, China*, 2016;1015531-1-6.
- [3] 张亮亮, 张存林, 赵跃进, 等. 爆炸性物质太赫兹时间分辨光谱测量 [J]. *光谱学与光谱分析*, 2007, 27(8):1457-1460. ZHANG L L, ZHANG C L, ZHAO Y J, *et al.*. Time-resolved terahertz spectroscopy of explosives [J]. *Spectrosc. Spectr. Anal.*, 2007, 27(8):1457-1460. (in Chinese)
- [4] 王启超, 汪家春, 王科伟, 等. 布料的太赫兹波透射特性研究 [J]. *发光学报*, 2016, 37(6):737-743. WANG Q C, WANG J C, WANG K W, *et al.*. Transmission characteristic of fabric in terahertz band [J]. *Chin. J. Lumin.*, 2016, 37(6):737-743. (in Chinese)
- [5] 涂冈, 张文涛, 熊显名, 等. 基于太赫兹时域光谱系统的转基因棉花种子主成分特性分析 [J]. *光子学报*, 2015, 44(4):0430001-1-6. TU S, ZHANG W T, XIONG X M, *et al.*. Principal component analysis for transgenic cotton seeds based on terahertz time domain spectroscopy system [J]. *Acta Photon. Sinica*, 2015, 44(4):0430001-1-6. (in Chinese)
- [6] 杨晨, 田璐, 赵昆. 食用香料的太赫兹时域光谱 [J]. *光子学报*, 2012, 41(5):627-630. YANG C, TIAN L, ZHAO K. Spectroscopic studies on the edible flavoring in terahertz range [J]. *Acta Photon. Sinica*, 2012, 41(5):627-630. (in Chinese)
- [7] NAKANISHI A, KAWADA Y, YASUDA T, *et al.*. Terahertz time domain attenuated total reflection spectroscopy with an integrated prism system [J]. *Rev. Sci. Instrum.*, 2012, 83(3):033103-1-5.
- [8] REID C B, REESE G, GIBSON A P, *et al.*. Terahertz time-domain spectroscopy of human blood [J]. *IEEE Trans. Terahertz Sci. Technol.*, 2013, 3(4):363-367.
- [9] LOEWENSTEIN E V, SMITH D R, MORGAN R L. Optical constants of far infrared materials. 2: crystalline solids [J]. *Appl. Opt.*, 1973, 12(2):398-406.
- [10] 韩晓惠, 张瑾, 杨晔, 等. 基于太赫兹时域光谱技术的光学参数提取方法的研究进展 [J]. *光谱学与光谱分析*, 2016, 36(11):3449-3454. HAN X H, ZHANG J, YANG Y, *et al.*. Review on the methodology for optical parameter extraction with terahertz time-domain spectroscopy [J]. *Spectrosc. Spectr. Anal.*, 2016, 36(11):3449-3454. (in Chinese)
- [11] 方贺男, 陶志阔. 基于光学传输矩阵的太赫兹时域光谱分析 [J]. *发光学报*, 2014, 35(11):1401-1404. FANG H N, TAO Z K. Analysis of terahertz time-domain spectroscopy by optical transfer matrix method [J]. *Chin. J. Lumin.*, 2014, 35(11):1401-1404. (in Chinese)
- [12] DUVILLARET L, GARET F, COUTAZ J L. A reliable method for extraction of material parameters in terahertz time-domain spectroscopy [J]. *IEEE Sel. Top. Quant. Electron.*, 1996, 2(3):739-746.
- [13] DUVILLARET L, GARET F, COUTAZ J L. Highly precise determination of optical constants and sample thickness in terahertz time-domain spectroscopy [J]. *Appl. Opt.*, 1999, 38(2):409-415.
- [14] WITHAYACHUMNANKUL W, LIN H, MICKAN S P, *et al.*. Analysis of measurement uncertainty in THz-TDS [C]. *Proceedings Volume 6593, Photonic Materials, Devices, and Applications II, Maspalomas, Gran Canaria, Spain*, 2007:659326.
- [15] WITHAYACHUMNANKUL W, FISCHER B M, LIN H Y, *et al.*. Uncertainty in terahertz time-domain spectroscopy measurement [J]. *J. Opt. Soc. Am. B*, 2008, 25(6):1059-1072.
- [16] DUVILLARET L, GARET F, ROUX J F, *et al.*. Analytical modeling and optimization of terahertz time-domain spectroscopy experiments, using photoswitches as antennas [J]. *IEEE J. Sel. Top. Quant. Electron.*, 2001, 7(4):615-623.
- [17] 许长虹, 宝日玛, 赵昆, 等. 低阻单晶硅的太赫兹时域光谱分析 [J]. *现代科学仪器*, 2013(4):219-221. XU C H, BAO R M, ZHAO K, *et al.*. Analysis of monocrystal silicon with low resistivity using terahertz time domain spectroscopy [J]. *Mod. Sci. Instrum.*, 2013(4):219-221. (in Chinese)



董海龙(1993 -), 男, 广东兴宁人, 硕士研究生, 2016 年于华南师范大学获得学士学位, 主要从事太赫兹波与伪装材料相互作用的研究。

E-mail: 183858891@qq.com



汪家春(1975 -), 男, 四川富顺人, 博士, 副研究员, 硕士生导师, 2007 年于解放军电子工程学院获得博士学位, 主要从事光电系统方面的研究。

E-mail: w_jiachun@163.com