

随机优化算法应用于太赫兹测厚方法的研究

张洪桢^{1,2}, 何明霞^{1,2*}, 石粒力³, 王鹏骜^{1,2}

1. 天津大学精密测试技术及仪器国家重点实验室, 天津 300072
2. 天津大学精密仪器与光电子工程学院, 天津 300072
3. 南京大学电子科学与工程学院超导电子学研究所, 江苏 南京 210023

摘要 镀膜是汽车、船舶、航空制造等行业必不可少的工艺步骤,合理的漆膜厚度不仅有利于涂装质量的稳定,还有利于节约涂料、降低涂装成本。随着工业 4.0 的时代的到来,在生产线上实现在线、非接触的无损高精度检测是必然趋势。相比于传统的测量手段,基于飞行时间原理的太赫兹测厚方法能够实现非接触式的在线测量,但是当样品的光学厚度较小时,太赫兹脉冲将在时域发生混叠,无法直接通过脉冲峰值位置获取准确的飞行时间。针对这一问题,建立了太赫兹反射信号的多元回归模型,借助差分进化算法自动计算模型参数、求解样品厚度,实现了在样品折射率未知情况下对涂层厚度的自动测量;提出了一种基于反射式太赫兹时域光谱系统与随机优化算法的厚度测量方法,针对同一时域信号进行多次计算,验证了差分进化算法的稳定性;分析了样品基底所处平面的法线方向与太赫兹波出射方向之间的角度误差对测量结果的影响;研究了飞行时间法应用于多层样品中测量各层厚度的可行性。结果表明,差分进化算法的计算结果较为稳定,浸锌漆、黑色漆和底漆三种样品厚度计算结果的不确定度分别为 $0.22 \mu\text{m}$ ($223.87 \mu\text{m}$), $0.05 \mu\text{m}$ ($54.18 \mu\text{m}$)及 $0.08 \mu\text{m}$ ($284.95 \mu\text{m}$), 折射率计算结果的不确定度分别为 0.004 (3.967), 0.002 (2.091)和 0.001 (1.769);对于浸锌漆样品, 1° 的角度误差带来 $0.073 \mu\text{m}$ 的测量误差,测量结果对角度误差具有较强的稳健性。由于多重反射效应的存在,该方法虽然可以求得多层样品太赫兹测量信号中各个反射脉冲的飞行时间,但不能区分反射脉冲来自哪一个反射界面,从而无法求解各层涂层的厚度。分析证明,基于飞行时间原理的测厚方法简单易行,可以较为准确地测量单层样品的厚度,对角度误差不敏感;在拓展到对多层样品进行测量时,该方法具有较大的局限性,不能在时域上区分多重反射脉冲,无法准确计算各层介质的厚度与折射率。

关键词 太赫兹脉冲光谱;飞行时间模型;差分进化算法

中图分类号: O433.4 **文献标识码:** A **DOI:** 10.3964/j.issn.1000-0593(2020)10-3066-05

引言

太赫兹检测技术是重要的前沿交叉领域,太赫兹波对于大多数非极性物质透明,能够分析物质在太赫兹频段的频谱特征或对其进行成像^[1],在材料性质和结构的无损检测领域具有广阔的应用前景,如检测不同种类纸张的厚度与介电常数^[2]、分析文物、油画等艺术品的结构和内部缺陷^[3-4]、测量药片的覆膜厚度^[5]与孔隙率^[6]等。随着工业 4.0 的时代的到来,对先进制造提出了更高的要求,在生产线上实现在线、非接触的无损高精度检测是必然趋势。

截至目前,已经进行了许多关于太赫兹波应用于涂层厚度测量的研究^[7]。Su^[8]等测量了金属和非金属(碳纤维)基底上油漆涂层的厚度,其测量值与超声波测厚结果保持了良好的一致性。Izutani^[9]等测量了多层样品的太赫兹波形,并计算了波形中各脉冲回波的飞行时间。Yasui^[10]、林玉华^[11]等利用最小二乘法对油漆样品的光学厚度与几何厚度之间的关系进行建模,得到不同油漆的折射率,测量了最多三层油漆样品的厚度,并绘制了厚度的三维分布图。Nguyen^[12]等通过采取不同入射角度,控制太赫兹波在样品中的光程,实现了对较薄涂层样品的测量工作,但是该方法要求样品具有较为平坦的表面,不能对具有明显曲率的涂层样品进行测量。

收稿日期: 2019-09-10, 修订日期: 2020-02-14

基金项目: 国家自然科学基金项目(61675151)资助

作者简介: 张洪桢, 1994 年生, 天津大学精密测试技术及仪器国家重点实验室硕士研究生 e-mail: zhanghongzhen2018@163.com

* 通讯联系人 e-mail: hhmxx@tju.edu.cn

本研究根据菲涅尔定律与飞行时间原理,提出了一种基于随机优化算法的太赫兹测厚方法,实现了在折射率未知的情况下,对多种油漆样品厚度的自动测量。讨论了样品基底所在平面法线方向与太赫兹波出射方向之间的角度误差对测量结果的影响。将测量模型拓展到多层样品中,分析了基于飞行时间原理的太赫兹测厚方法的局限性。

1 原理

1.1 基于太赫兹频谱的厚度测量模型

太赫兹波 (Terahertz wave) 对大多数非极性材料呈现接近透明特征,当太赫兹脉冲入射到不同材料介质中时,由于各介质群折射率的不连续性,脉冲在介质界面处发生反射,形成了具有不同飞行时间的反射脉冲,如图 1 所示。

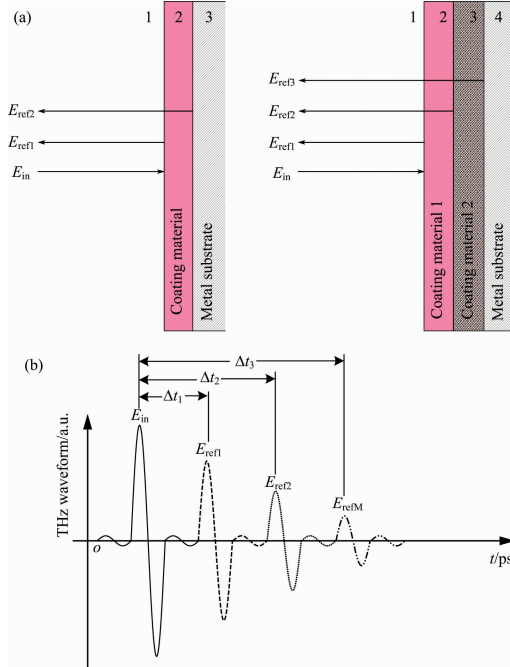


图 1 太赫兹时域光谱测量油漆厚度原理图

(a): 油漆涂层模型; (b): 太赫兹脉冲回波的飞行时间

Fig. 1 Principle of thickness determination by THz-TDS

(a): Model of coatings; (b): Times of flight of THz echoes

根据太赫兹在多层介质中的传播理论,可得单层样品的太赫兹回波信号

$$E_{\text{total}}(t) = \sum_{i=1,2} E_{\text{ref}i}(t) = \sum_{i=1,2} k_i E_{\text{in}}(t + \Delta t_i) \quad (1)$$

与双层样品的太赫兹回波信号

$$E_{\text{total}}(t) = \sum_{i=1,2,3} E_{\text{ref}i}(t) = \sum_{i=1,2,3} k_i E_{\text{in}}(t + \Delta t_i) \quad (2)$$

$E_{\text{ref}i}$ 为第 i 个反射信号, Δt_i 为第 i 个回波信号与入射信号 E_{in} 之间的飞行时间差。定义拟合误差为

$$\text{fittederror} = \sum_j (E_{\text{total}}(j) - E_{\text{mea}}(j))^2 \quad (3)$$

E_{mea} 为实测太赫兹脉冲回波信号。根据菲涅尔定律,在正入射条件下 ($i=2, 3$)

$$r_{i-1,i} = \frac{n_i - n_{i-1}}{n_i + n_{i-1}} \quad (4)$$

$$t_{i-1,i} = \frac{2n_{i-1}}{n_i + n_{i-1}} \quad (5)$$

$$t_{i,i-1} = \frac{2n_i}{n_i + n_{i-1}} \quad (6)$$

可得 E_{total} 中系数 k_1 和 k_2

$$k_1 = r_{12} \quad (7)$$

$$k_2 = t_{12} r_{23} t_{21} \quad (8)$$

对于单层样品,依据式(4)和式(7)即可反解出深层折射率 n_2 ;对于双层样品,需依据式(4)~式(8)对第一层深层的折射率 n_2 和第二层深层的折射率 n_3 进行求解。

根据飞行时间原理,可得材料厚度计算模型

$$d_i = \frac{\Delta s_i}{2n_i} = \frac{c\Delta T_i}{2n_i} \quad (9)$$

$$\Delta T_i = \Delta t_i - \Delta t_{i-1} \quad (10)$$

其中 c 为真空中的光速, n_i 为第 i 层材料的折射率。

1.2 随机最优优化法

与确定性寻优算法相比,随机优化方法提供了诸多便利。该类算法基于随机性、统计性和概率性,增大了得到全局最优值的概率,可应用于不可微、非连续、非线性、含噪声和具有多维变量的目标函数。相比于以梯度为核心的优化算法,随机优化算法具有较强的收敛性,能够有效收敛至最优解。本文采用差分进化算法(DE)求解回波信号 E_{total} 中 k_i 和 Δt_i 等参数,通过一定次数的迭代寻优,获得使 fittederror 达到最小的最优解 $k_{i,\text{best}}$ 和 $\Delta t_{i,\text{best}}$,进而求解被测样品各层厚度 d_i 。

2 实验部分

实验采用 Menlo System Tera K15 全光纤式太赫兹时域光谱系统,由飞秒激光器、发射天线、接收天线、光纤延迟线以及锁相装置组成,中心波长为 1 560 nm,太赫兹频谱宽度达到 3.5 THz,激光重复频率为 100 MHz,脉冲宽度 < 90 fs,平均功率 > 100 mW。本实验以铝合金板材作为基底,使用保赐利品牌的自动喷漆制作了单层、双层油漆涂层等多种样品,基底尺寸 $7 \text{ cm} \times 7 \text{ cm}$ 。在同一块基底上规划样品和参考区域,在测量时,通过步进电机改变样品架位置实现对样品信号与参考信号的测量。利用涡流测厚仪 SIN-EC770 在样品区域连续测量十组数据,计算测量结果的均值并将其作为太赫兹测厚方法的参考。

3 结果与讨论

3.1 单层油漆厚度及折射率测量结果

使用涡流涂层测厚仪 SIN-EC770 对浸锌漆、黑色漆以及底漆等三种单层样品的厚度进行十次测量,测量结果的均值如表 1。

利用第 1 部分中提出的方法拟合脉冲回波的总信号 E_{total} 。由于浸锌漆厚度较厚 $> 200 \mu\text{m}$,反射信号 $E_{\text{ref}1}$ 与 $E_{\text{ref}2}$ 在时域能够明显区分,飞行时间差 $\Delta T = \Delta t_2 - \Delta t_1 = 5.92 \text{ ps}$,

反射系数 $k_1 = r_{12} = 0.5975$ 。根据式(4), 式(7)和式(9)可求得样品厚度 $d = 223.71 \mu\text{m}$ 。为了验证差分进化算法运算结果的稳定性, 针对每一种样品, 任意选择该样品的一个太赫兹测量信号重复进行 200 次求解, 得到 200 组结果并计算这些结果的不确定度。如表 2 所示, 三种样品厚度结果的不确定度均小于 $0.5 \mu\text{m}$, 折射率结果的不确定度均小于 0.1, 且不确定度的大小与测量样品的厚度没有直接关系, 说明差分进化算法的收敛性较强, 运算的结果较为稳定。

表 1 SIN-EC770 单层油漆测量结果

Table 1 Results of single coating samples by SIN-EC770

	浸锌漆	黑色漆	底漆
厚度值/ μm	227	54.8	282

表 2 DE 算法计算结果

Table 2 Results of single coating samples by DE algorithm

样品	厚度/ μm	折射率
浸锌漆	223.87 ± 0.22	3.967 ± 0.004
黑色漆	54.18 ± 0.05	2.091 ± 0.002
底漆	284.95 ± 0.08	1.869 ± 0.001

本文的方法可以准确求解厚度不小于 $60 \mu\text{m}$ 涂层样品太赫兹信号中混叠的各个反射脉冲, 如图 2(a)所示, 黑色漆样品的飞行时间差 $\Delta T = 0.7552 \text{ ps}$ 。图 2(b)为底漆样品的太赫兹信号, 各个反射信号在时域能够明显区分, $\Delta T = 3.360 \text{ ps}$ 。

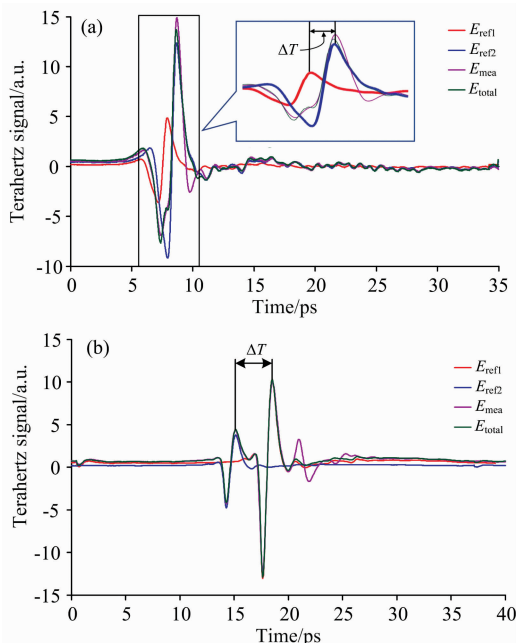


图 2 单层样品的测量信号与拟合结果

(a): 黑色漆样品; (b): 底漆样品

Fig. 2 The measurement and simulation results of single coating samples

(a): Black coating sample; (b): Base coating sample

3.2 测量误差分析

由 1.1 节提出的测量模型可知, 当样品基底所在平面的法线方向相对于太赫兹波出射方向存在的偏移角度 θ 时, 将会给测量的厚度带来误差。

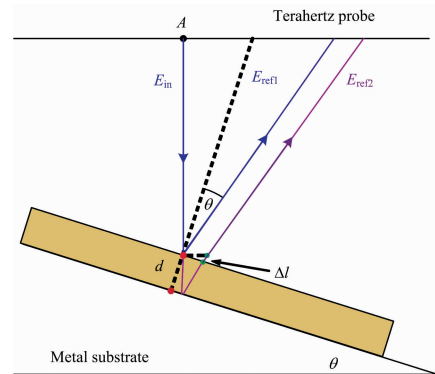


图 3 反射信号的光程误差

Fig. 3 Optical path error of the reflection pulse

根据图 3, 当样品相对平面存在小偏移角度 θ 时, E_{ref2} 的光程误差 Δd 为

$$\Delta d = 2d \left(\frac{\sin^2 \theta}{(\cos^2 \theta - \sin^2 \theta) \sqrt{n^2 - \sin^2 \theta}} + \frac{n}{\sqrt{n^2 - \sin^2 \theta}} - 1 \right) \quad (11)$$

参考信号的光程误差对测量结果没有影响, 所以 E_{ref2} 的光程误差 Δd 为测量误差的主要来源, 由于 $\sin^2 \theta$ 趋近于 0, 进而 Δd 近于 0, 由小偏移角度带来的光程误差可以忽略不计, 表 3 示出了三种样品在多个偏移角度下的测量误差。

表 3 测量误差 (偏移角 $\theta = 1^\circ$)

Table 3 Measurement errors (angle offset $\theta = 1^\circ$)

误差/ μm	$\theta = 1^\circ$	$\theta = 2^\circ$	$\theta = 3^\circ$	$\theta = 4^\circ$	$\theta = 5^\circ$
浸锌漆	0.04	0.16	0.35	0.63	0.99
黑色漆	0.02	0.08	0.18	0.32	0.50
底漆	0.12	0.47	1.05	1.88	2.94

当偏移角度过大时, 太赫兹探头无法全部接收由分束器反射回来的太赫兹波, 导致接收的信号能量发生损失, 根据式(6)和式(7)将无法准确计算样品的折射率, 此时, 需要借助其他手段对样品的折射率进行标定。

3.3 双层油漆测量结果分析

在测量银漆+底漆双层油漆样品厚度时, 先喷涂底漆, 之后再喷涂银漆, 待样品干燥之后测量总厚度, SIN-EC770 的测量结果为 $121.6 \mu\text{m}$ 。在喷涂银漆时, 底漆未完全干燥, 二者在交界面处发生混合, 形成了一层折射率介于二者之间的介质, 太赫兹波将在该层“衍生介质”的两个分界面发生反射, 反射回来的总信号将包含来自四个反射界面的反射脉冲, 使用式(2)提出的双层模型将无法准确计算各涂层的折射率以及太赫兹波在其中的飞行时间; 如表 4 所示, 借助式(2)模型测得的总厚度为 $106.5 \mu\text{m}$, 与 SIN-EC770 的测量结果相差较大, 底漆折射率为 3.56, 与表 2 结果相矛盾。

表 4 底漆+银漆太赫兹方法测量结果
Table 4 Results of the double coating sample by terahertz method

DE	厚度/ μm	厚度标准差/ μm	折射率	折射率标准差
银漆	54.04	0.85	6.76	0.01
底漆	52.42	0.95	3.56	0.01

该样品实际包含三层涂层,如图 4 所示,除了基本的反射脉冲 $E_{\text{ref}1}$, $E_{\text{ref}2}$ 与 $E_{\text{ref}3}$ 外,实测太赫兹信号还包含由基底反射回来的信号 $E_{\text{ref}4}$ 与各层介质中的多重反射信号 E_M ,由于银漆的折射率大于中间介质层,由银漆-中间介质界面反射回来的 $E_{\text{ref}2}$ 的符号为负。

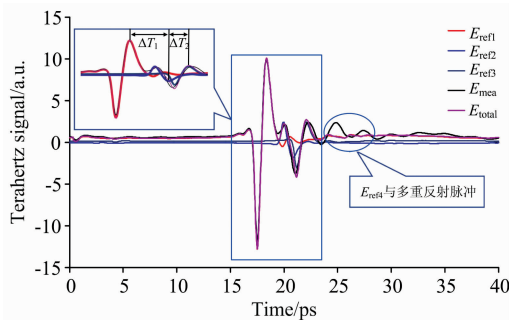


图 4 底漆+银漆样品反射信号与拟合信号
Fig. 4 Reflection and simulation signals of the base and silver coating sample

图 5 为该样品的太赫兹波光路图,各个反射脉冲的光程与其在时域上的位置具有对应关系,当样品状态发生改变时,多重反射脉冲 E_M 和目标反射脉冲信号 $E_{\text{ref}1} - E_{\text{ref}4}$ 在时域上的相对位置将会发生改变, E_M 可能会出现在 $E_{\text{ref}1}$ 与 $E_{\text{ref}4}$ 之间,在对样品中太赫兹波的光程没有先验认知的情况下,虽然可以计算各个反射信号之间的飞行时间差,但算法无法从时域信号上判断各个反射脉冲具体来自哪一个反射界面,从而无法实现对各层涂层厚度的求解。

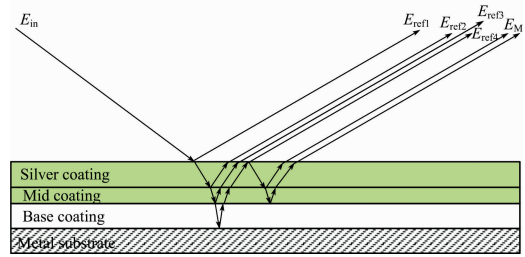


图 5 太赫兹波在多层样品中的光路图
Fig. 5 Paths of terahertz waves of a multi-layer sample

4 结 论

基于太赫兹时域光谱系统,根据菲涅尔定律与太赫兹脉冲的飞行时间原理建立数学模型,借助差分进化算法对模型参数进行求解,实现了对油漆厚度的自动非接触式无损测量。为了验证差分进化算法运算结果的稳定性,针对每一种样品,任意选择该样品的一个太赫兹测量信号重复进行 200 次求解,得到 200 组结果并计算这些结果的不确定度。三种样品厚度及折射率计算结果的不确定度均较小,说明差分进化算法具有较强的收敛性。对于单层样品,太赫兹测量方法表现良好,对样品基底所在平面法线方向与太赫兹波出射方向之间的角度误差具有较强的稳健性,较小的角度误差对测量结果影响可以忽略不记,测量结果与涡流测厚仪的结果相一致。在将基于飞行时间原理的测量模型拓展到多层样品的测量中时,发现太赫兹波在各层介质中的光程将影响各个反射脉冲在时域光谱上的相对位置,由于多重反射效应的存在,算法无法区分各个反射峰来自哪一个反射界面,给各层厚度的求解带来困难。

相比于涡流测厚、磁性测厚等厚度测量手段,太赫兹技术具有非接触式、无损检测等明显优势;在满足测量精度要求的情况下,本文提出的模型实现了对厚度小于 $60 \mu\text{m}$ 的油漆涂层的测量工作,降低了基于飞行时间原理的太赫兹测厚方法的测量极限,有效扩大了该方法的测量范围。

References

- [1] LIANG Pei-long, DAI Jing-min(梁培龙,戴景民). Techniques of Automation and Application(自动化技术与应用), 2015, 34(6): 1.
- [2] Mechelen J L M V, Kuzmenko A B, Merbold H. Optics Letters, 2014, 39(13): 3853.
- [3] Fukunaga K, Hosako I. Comptes Rendus Physique, 2010, 11(7): 519.
- [4] Dong J, Jackson J B, Melis M, et al. Optics Express, 2016, 24(23): 26972.
- [5] May R K, Evans M, Zhong S, et al. Journal of Pharmaceutical Sciences, 2011, 100(4): 1535.
- [6] LAI Hui-bin, HE Ming-xia, TIAN Tian, et al(赖慧彬,何明霞,田甜,等). Acta Optica Sinica(光学学报), 2018, 38(6): 0630001.
- [7] Iwata T, Uemura H, Mizutani Y, et al. Optics Express, 2014, 22(17): 20595.
- [8] Su K, Shen YC, Zeitler J A. IEEE Transactions on Terahertz Science & Technology, 2014, 4(4): 432.
- [9] Izutani Y, Akagi M, Kitagishi K. Measurements of Paint Thickness of Automobiles by Using THz Time-Domain Spectroscopy. International Conference on Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves, IEEE, 2012.
- [10] Yasui T, Yasuda T, Sawanaka K, et al. Applied Optics, 2005, 44(32): 6849.
- [11] LIN Yu-hua, HE Ming-xia, LAI Hui-bin, et al(林玉华,何明霞,赖慧彬,等). Spectroscopy and Spectral Analysis(光谱学与光谱分析), 2017, 37(11): 3332.
- [12] Nguyen D T, Weber K, Volker W, et al. Non-Destructive Measurement of Thickness and Refractive Index of Multilayer Coating on Metal Substrate. International Conference on Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves, IEEE, 2016.

Terahertz Thickness Measurement Based on Stochastic Optimization Algorithm

ZHANG Hong-zhen^{1, 2}, HE Ming-xia^{1, 2*}, SHI Li-li³, WANG Peng-fei^{1, 2}

1. State Key Laboratory of Precision Measuring Technology and Instruments, Tianjin University, Tianjin 300072, China
2. School of Precision Instrument and Optoelectronics Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China
3. Research Institute of Superconductor Electronics (RISE), School of Electronic Science and Engineering, Nanjing University, Nanjing 210023, China

Abstract The coating is an indispensable process in automobile, marine, aerospace manufacturing and other industries. Reasonable film thickness is not only conducive to the stability of painting quality but also conducive to saving paint and reducing painting cost. With the advent of industrial 4.0 era, it is an inevitable trend to realize online, non-contact, non-destructive and high-precision detection. Compared with traditional measurement methods, THz thickness measurement method could perform the non-contact online measurement. However, when the optical thickness of the sample is small, terahertz reflection pulses will overlap in the time domain, and it is impossible to obtain the exact flight time directly from the peak position of the pulses. In order to solve this problem, a thickness measurement method based on reflective terahertz time domain spectroscopy system and the stochastic optimization algorithm are proposed. A multivariate regression model of the terahertz reflection pulses is established. With the application of the Differential Evolution algorithm, the thickness of the sample is calculated automatically. The convergence of the differential evolution algorithm was verified by calculating the results from the same time-domain signal several times. The measurement error introduced by the angle error between the normal direction of the substrate and the direction of terahertz probe is also evaluated. In addition, the feasibility of time-of-flight (TOF) method for measuring the thickness of each layer in multi-layer structure samples is studied. The measurement results show that the calculated results of Differential Evolution algorithm are stable. The uncertainty of thicknesses of zinc dipping paint, black paint and base paint are $0.22 \mu\text{m}$ ($223.87 \mu\text{m}$), $0.05 \mu\text{m}$ ($54.18 \mu\text{m}$) and $0.08 \mu\text{m}$ ($284.95 \mu\text{m}$), respectively. The uncertainty of refractive indexes is 0.004 (3.967), 0.002 (2.091) and 0.001 (1.769), respectively. For zinc dipping paint, angle error of 1° leads to a measurement error of 0.073 . Due to the existence of multiple reflection effects, although the method can find the flight time of each reflection pulse in the terahertz measurement signal of many layers of samples, it is impossible to distinguish which reflection interface the reflection pulse comes from, so that the thickness of each layer coating cannot be solved. The analysis shows that the thickness measurement method based on the time-of-flight principle is simple and easy, and the thickness of the single-layer sample can be measured more accurately, which is not sensitive to the angle error. When expanding to the measurement of multi-layer samples, the method has greater limitations. It is impossible to distinguish multiple reflection pulses in the time domain, and is not feasible to calculate the thickness of each layer.

Keywords Terahertz spectroscopy; Time of flight; Differential evolution algorithm

(Received Sep. 10, 2019; accepted Feb. 14, 2020)

* Corresponding author