

植物油和动物脂肪在 THz 波段的吸收和色散^{*}

胡 颖^{1)†} 王晓红¹⁾ 郭澜涛¹⁾ 张存林¹⁾ 刘海波²⁾ 张希成²⁾

¹⁾ (首都师范大学物理系 北京 100037)

²⁾ (美国伦斯勒理工学院应用物理与天文系 纽约州特洛伊市 12180-3590 美国)

(2005 年 1 月 14 日收到, 2005 年 3 月 21 日收到修改稿)

由超短激光脉冲产生的 THz 脉冲是具有较宽频带的电磁辐射,属于远红外波段,该波段电磁波与物质的相互作用是个崭新的研究领域.文章应用 THz 光谱技术研究了 5 种植物油和两种动物脂肪的 THz 光谱,得到了这些材料在 0.2—1.6THz 频率范围的折射率和吸收系数.结果表明,不同种类的油脂具有不同的折射率,其中植物油的折射率随频率的增加而略有降低,其值在 1.46—1.66 之间.吸收系数在 0.2—1.2THz 随频率的增加而增大.动物脂肪的折射率随频率变化基本不变,并且随温度升高而增大,其值在 1.4—1.52 之间.吸收系数在 0.2—1.2THz 随频率的增加而增大.该研究结果对于 THz 时域光谱技术应用于生物成像及生物医学有重要的意义.

关键词: THz 光谱技术, 折射率, 吸收系数, 植物油, 动物脂肪

PACC: 4225B, 0765, 3220F

1. 引 言

脉冲 THz 辐射是一种新型的相干辐射,其波数约为 $1\text{--}33\text{cm}^{-1}$,在电磁波谱中位于微波和红外光谱之间.相干的 THz 脉冲具有很宽的频谱.当 THz 波通过物质时就会携带样品的信息,研究材料的 THz 光谱可以得到许多物理化学信息,例如材料的吸收系数、折射率、介电常数、频移等性质^[1-3].

光谱技术是研究生物材料的一个重要技术手段,如可见光波段的吸收谱、荧光谱、红外光谱、紫外光谱、x 射线分析等几乎涉及了整个电磁波谱.由于 THz 脉冲的波长相对较长,它在生物组织中的散射比可见光和近红外要小得多,并且不会像 x 射线一样引起生物组织的光致电离,可以对生物组织进行非侵入性检测,从而对于研究生物组织在 THz 波段的一些光学性质是有意义的.

生物分子的 THz 光谱技术,即利用 THz 波作为辐射电场与生物分子相互作用,得到生物分子的低频振动光谱,进而得到生物材料的吸收和色散的性质来获取生物分子的信息.另外,不同生物分子的 THz 光谱显示出不同的特性,它为分子的构象提供了唯一的标识谱(指纹谱)^[4].

有关生物材料 THz 光谱方面的研究报道,如关于 DNA 和蛋白质等的生物大分子的 THz 光谱方面的研究报道^[5-13],以及关于水杨酸等生物小分子材料的研究^[14]等.但是,THz 脉冲与生物脂肪组织和油脂分子相互作用的研究还未见报道.本文利用 THz 时域谱技术研究了植物油和动物脂肪的 THz 光谱特性.通过测量经过不同厚度下样品的 THz 时域谱,计算它们的折射率和吸收系数,并对这些材料的参数进行分析和比较,给出了有益的结果.该结果对建立脂类分子的标识谱及生物医学和生物成像技术有重要意义.

2. THz 时域光谱技术

2.1. 实验装置及原理

图 1 是实验用 THz 光谱技术的实验装置图.本实验用自锁模钛宝石激光器作为超短脉冲激光光源,输出脉宽为 100fs,中心波长为 780nm,重复频率为 82MHz 的脉冲激光,激光功率为 4.2W.实验光路采用抽运-探测的方法,飞秒脉冲经分束镜分为两束.两束光的能量分配通过 1/2 波片进行调节.其中强的一束作为抽运光经频率为 1000Hz 的斩波器斩

^{*} 北京市教育委员会科技发展计划(批准号:KM200310028115)、国家自然科学基金(批准号:10390160)和北京市自然科学基金(批准号:6032006)资助的课题.

[†] E-mail: hy-phy@mail.cnu.edu.cn

波后,入射到 LT-GaAs 光导天线上,产生 THz 电磁辐射脉冲^[15],此脉冲被聚焦到要测量的样品上.弱的一束为探测光束,它和从样品透射后载有样品信息的 THz 电磁脉冲共线经过探测晶体 ZnTe,THz 电磁脉冲的电场部分经过线性光电效应调制 ZnTe 晶体

的折射率椭球,改变探测飞秒脉冲的偏振态.测量探测光的偏振态的变化即可得到载有样品信息的 THz 电磁脉冲的电场信息.探测光信号是由平衡二极管进行平衡探测的,然后经过锁相放大器放大后输入计算机进行处理,见图 1.

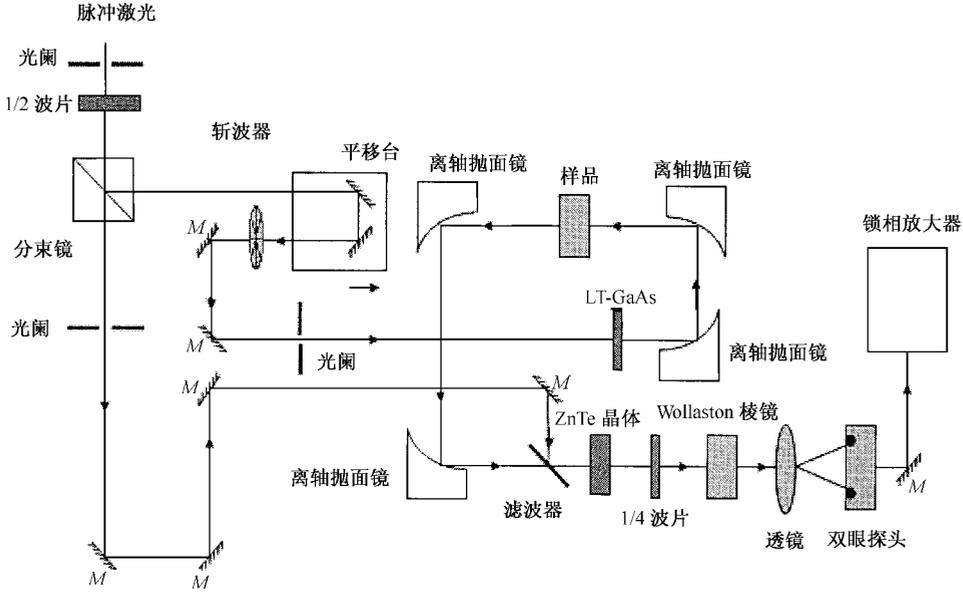


图 1 THz 时域光谱技术的实验装置图

2.2. THz 时域光谱技术提取材料的光学常数原理

入射的 THz 信号,在样品的端面处,将发生反射和折射,其振幅的变化由反射系数和透射系数决定,具体的数值关系由 Fresnel 关系给出(图 2),公式如下:

$$r_{ab}^s = \frac{\tilde{n}_a \cos\theta_i - \tilde{n}_b \cos\theta_t}{\tilde{n}_a \cos\theta_i + \tilde{n}_b \cos\theta_t}, \quad (1)$$

$$t_{ab}^s = \frac{2\tilde{n}_a \cos\theta_i}{\tilde{n}_a \cos\theta_i + \tilde{n}_b \cos\theta_t}, \quad (2)$$

$$r_{ab}^p = \frac{\tilde{n}_b \cos\theta_i - \tilde{n}_a \cos\theta_t}{\tilde{n}_b \cos\theta_i + \tilde{n}_a \cos\theta_t}, \quad (3)$$

$$t_{ab}^p = \frac{2\tilde{n}_a \cos\theta_i}{\tilde{n}_b \cos\theta_i + \tilde{n}_a \cos\theta_t}, \quad (4)$$

其中 θ_i 为入射角, θ_t 为出射角, \tilde{n}_a 为入射介质的折射率, \tilde{n}_b 为出射介质的折射率, r_{ab}^s 表示反射光中平行电矢量与入射光中平行电矢量的比值, t_{ab}^s 表示折射光中平行电矢量与入射光中平行电矢量的比值, r_{ab}^p 表示反射光中垂直电矢量与入射光中垂直电矢量的比值, t_{ab}^p 表示折射光中垂直电矢量与入射光中

平行电矢量的比值。

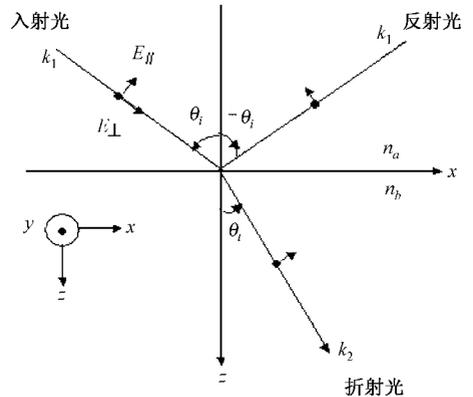


图 2 Fresnel 关系

THz 电磁波由真空垂直入射到较厚的样品中时,选用合适的取样窗口,可以忽略多次反射效应.当样品对 THz 电磁波的吸收很小时,样品的折射率、消光系数和吸收系数的计算公式如下:

$$n_b(\omega) = \phi(\omega) \frac{c}{\omega d} + 1, \quad (5)$$

$$\kappa_b(\omega) = \ln \left[\frac{4n_b(\omega)}{(\chi(\omega) \int n_b(\omega) + 1)^2} \right] \frac{c}{\omega d}, \quad (6)$$

$$\alpha_b(\omega) = \frac{2\kappa_b(\omega)\omega}{c} = \frac{2}{d} \ln \left[\frac{4n_b(\omega)}{\rho(\omega) [n_b(\omega) + 1]^2} \right], \quad (7)$$

其中 d 为样品的厚度, c 为光速, ω 为圆频率, $\rho(\omega)$ 为样品信号与参考信号比值的辐角, $\rho(\omega)$ 为样品信号与参考信号比值的模, $\tilde{n}_b(\omega)$, $\kappa_b(\omega)$, $\alpha_b(\omega)$ 分别为样品的复折射率、消光系数和吸收系数。

根据样品的这些光学常数进而可以获得样品的其他光学参数, 例如介电常数、表面电导等。

3. 实验结果和分析

为更好地降低噪声, 提高数据的精度, 实验中采用了不同厚度的样品, 取透过较薄样品 THz 波作为参考信号, 透过较厚样品的 THz 波作为样品信号进行处理。本实验分别测量了不同厚度的 5 种植物油以及在不同温度下的猪脂肪和牛脂肪的 THz 时域谱。玉米油的 THz 时域光谱及通过快速傅里叶变换得到的频域谱分别如图 3、图 4 所示。

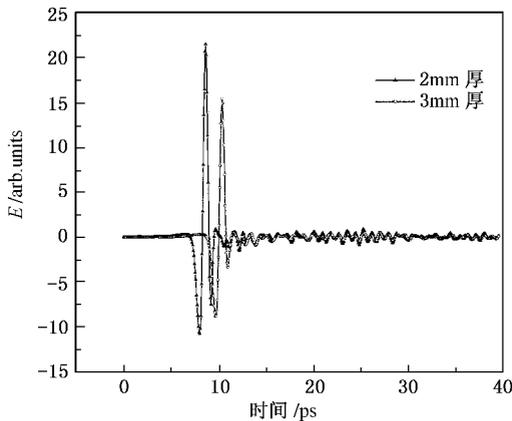


图 3 穿过 2mm 和 3mm 厚玉米油的 THz 时域谱

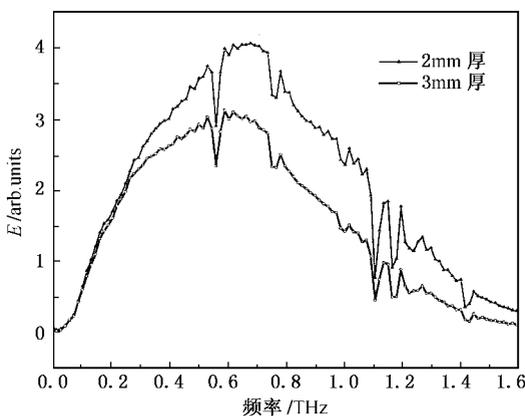


图 4 快速傅里叶变换后的频域谱

图 3 A 中纵坐标 E 表示电场强度。从该时域光谱可以看出, 与通过较薄样品相比较 THz 波通过较厚样品有一个时间延迟。时域光谱通过快速傅里叶变换得到频域光谱, 见图 4, 不同厚度的样品其谱线有一些相同的吸收峰, 其强度随样品厚度增加而增强。

由 THz 光谱技术计算式 (5) (7), 我们得到 5 种植物油的折射率和吸收系数, 如图 5、图 6 所示。

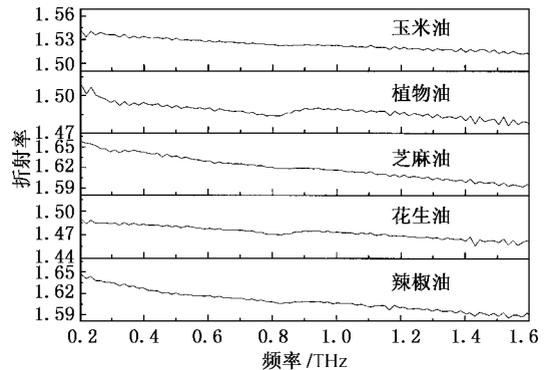


图 5 5 种植物油的折射率

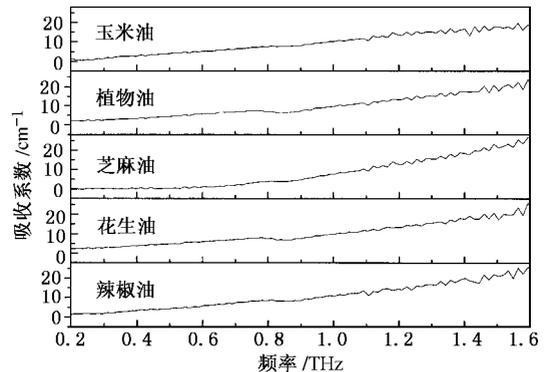


图 6 5 种植物油的吸收系数

从图 5、图 6 可以看出, 不同的植物油在 THz 波段有不同的折射率和吸收系数。它们的折射率值在 1.466—1.66 之间, 其折射率随频率变化不大, 其中花生油的折射率最小, 在 1THz 处折射率为 1.474, 芝麻油的折射率最大, 在 1THz 处为 1.618。吸收系数随着频率的增加而增加, 在 1THz 处最小的为芝麻油, 其值为 7.6126cm^{-1} , 最大的为辣椒油, 其值为 11.083cm^{-1} 。由此可以得到这些材料在 THz 波段的吸收和色散性质, 同时也可以进行不同种类油的鉴别。

图 7、图 8 是由 THz 光谱技术得到的不同温度下猪脂肪和牛脂肪的折射率和吸收系数。

从图 7、图 8 可以看出, 不同温度下的牛脂肪和猪脂肪对 THz 波段吸收和色散性质有差异, 折射率

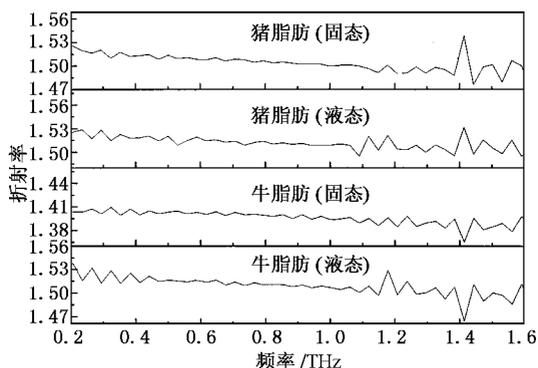


图 7 牛和猪脂肪在不同状态下的折射率对比

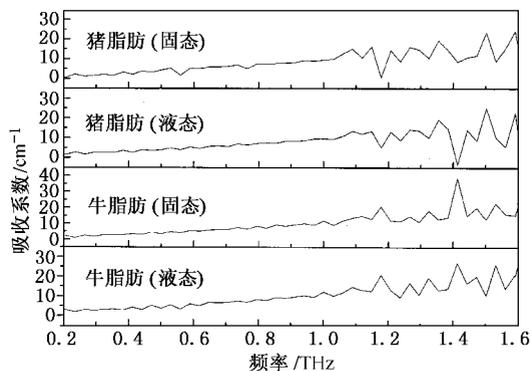


图 8 牛和猪脂肪在不同状态下的吸收系数对比

的值随着温度的升高而增大,其中牛脂肪的温差大,

对应折射率的变化也大(室温下为 1.4 左右,加热至液态时为 1.52 左右).猪脂肪的温度变化较小,其折射率变化也较小(室温下为 1.52 左右,冷却至固态时为 1.51 左右)其精细分辨见图 7.可见,在 THz 波段,当温度变化较大时,动物脂肪的折射率变化也较大.不同脂肪的吸收系数在不同温度下的值变化不大.随着温度的降低吸收略有加强,吸收峰随着频率的增加而增强,1.2THz 以后吸收系数曲线随频率的变化比较明显.

4. 结 论

本文应用 THz 时域光谱技术测量了 5 种植物油在 THz 波段的光学参数和两种动物脂肪在不同温度下的光学参数.通过比较可以看出,植物油和动物脂肪的折射率的值在 THz 波段随频率变化不大,吸收系数的值随着频率的增加而增大.猪脂肪和牛脂肪在温度发生变化时,随着温度的升高折射率的值增大,而吸收系数的值比较相近.随着温度的降低吸收有所加强.这些结果对获得植物油和动物脂肪在 THz 波段的标识谱奠定了基础,同时对于 THz 时域光谱技术应用于生物医学和生物成像技术有重要的意义.目前 THz 光谱数据库还是相当的匮乏,对于不同的物质测量其 THz 谱还有大量的工作要做.

- [1] Hu Y, Zhang C L, Sheng J L *et al* 2004 *Acta Phys. Sin.* **53** 1772 (in Chinese) [胡 颖、张存林、沈京玲等 2004 物理学报 **53** 1772]
- [2] Liu R, Gu C M, He L R *et al* 2004 *Acta Phys. Sin.* **53** 1217 (in Chinese) [刘 锐、顾春明、贺莉蓉等 2004 物理学报 **53** 1217]
- [3] Fischer B M, Walther M and Uhd Jepsen P 2002 *Phys. Med. Biol.* **47** 21 3807
- [4] Walther M, Plochocka P, Fisher B *et al* 2002 *Biopolymers.* **67** 310
- [5] Walther M, Fischer B, Schall M *et al* 2000 *Chem. Phys. Lett.* **332** 389
- [6] Petruck C R, Jimenez R, Guo T *et al* 1999 *Nature* **389** 310
- [7] Zhuang W, Feng Y and Prohofska E W 1990 *Phys. Rev. A* **41** 7033
- [8] Brucherseifer M, Nagel M, Haring Bolivar P *et al* 2000 *Appl.*

Phys. Lett. **77** 4049

- [9] Markelz A G, Roitberg A and Heilweil E J 2000 *Chem. Phys. Lett.* **42** 320
- [10] Markelz A, Whitmire S, Hillebrecht J *et al* 2002 *Phys. Med. Biol.* **47** 3797
- [11] Globus T R, Woolard D L, Samuels A C *et al* 2002 *Jour. Appl. Phys.* **91** 9 6105
- [12] Markelz A G and Roitberg A 2000 *Chem. Phys. Lett.* **320** 42
- [13] Nagel Michael and Peter H B 2002 *Appl. Opt.* **41** 2074
- [14] Woolard D L, Globus T R, Gelmont B L *et al* 2002 *Phys. Rev. E* **65** 5 6105
- [15] Lei X L and Liu S Y 2001 *Chin. Phys.* **10** 840



Absorption and dispersion of vegetable oil and animal fat in THz range *

Hu Ying^{1)†} Wang Xiao-Hong¹⁾ Guo Lan-Tao¹⁾ Zhang Cun-Lin¹⁾ Liu Hai-Bo²⁾ Zhang Xi-Cheng²⁾

¹⁾Department of Physics, Capital Normal University, Beijing 100037, China)

²⁾Center for Terahertz Research, Rensselaer Polytechnic Institute, Troy, NY 12180-3590, USA)

(Received 14 January 2005; revised manuscript received 21 March 2005)

Abstract

Terahertz radiation generated by ultra short laser pulses has a broad band width in the far-infrared band. It is a new research field on terahertz wave interacting with materials, especially bio-materials. In this paper we studied five kinds of vegetable oil and two kinds of animal fats under different states using THz-TDS (THz time-domain spectroscopy). The refractive index and absorption coefficient of these materials are presented in the range from 0.2 to 1.6 THz. The result shows that different oils have different refractive indices. The refractive indices of vegetable oils have a gentle decline and the refractive indices of animal fats increase with temperature. The coefficients of absorption also increase with frequency. It's a meaningful result for the applications of biomedical sensing and imaging.

Keywords: terahertz time-domain spectroscopy, refractive index, absorption coefficient, vegetable oil, animal fat

PACC: 4225B, 0765, 3220F

* Project supported by the Science Foundation of Education Commission of Beijing, China (Grant No. KM200310028115), the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 10390160), and the Natural Science Foundation of Beijing, China (Grant No. 6032006).

† author. E-mail: hy-phy@mail.cnu.edu.cn