

文章编号: 1001-5078 (2006) 08-0678-05

# 与安全检查有关的包装材料的太赫兹谱实验研究

王新柯, 任荣东, 赵国忠, 耿玉珍, 李福利

(首都师范大学物理系, 北京 100037)

**摘要:**报道了利用太赫兹技术对七种包装材料的实验研究,通过分析其吸收系数曲线和折射率曲线,讨论了太赫兹辐射对这七种包装材料的透射特性。实验结果表明太赫兹辐射对大多数包装材料有很高的透射特性,可以作为在安全检查领域中的一项有效手段。

**关键词:**太赫兹时域光谱技术;包装材料;安全检查;透射特性;吸收系数;折射率

**中图分类号:** O436.2; TN015

**文献标识码:** A

## Experimental Studies on Terahertz Spectrum of Wrappers Related to Security Inspection

WANG Xin-ke, REN Rong-dong, ZHAO Guo-zhong, GENG Yu-zhen, LI Fu-li

(The Department of Physics, The Capital Normal University, Beijing 100037, China)

**Abstract:** The experimental studies on seven kinds of wrappers by using terahertz technology are reported, and the transmission characteristic of terahertz radiation to wrappers by analyzing absorption coefficient and refractive index of the materials are discussed. The results show that terahertz radiation has strong penetrability to most of wrappers, and the technology can become an effective means in the field of security inspection.

**Key words:** Terahertz Time Domain Spectroscopy Technology; wrapper; security inspection; transmission characteristic; absorption coefficient; refractive index

### 1 引言

太赫兹辐射是中心波长在  $300\mu\text{m}$  附近的电磁波。太赫兹时域光谱技术是在 20 世纪 90 年代随着飞秒激光器的出现,而逐渐发展起来的一种新颖的光谱测量技术。它通过相干电磁波脉冲探测的方法,可以直接获得太赫兹辐射的振幅和位相,而不用求助于 Kramers-Kronig 色散关系。由于太赫兹辐射自身所具有的独特性质,它可以在军事、医药、航空、化工、卫生检测等诸多领域显示出它的优势。

“9·11”以后,反恐已经成为世界的主题。当前主要的安检设备多是采用 X 射线作为检测光源,但由于 X 射线的辐射能量很高 ( $30\text{keV}$ ),可能会对被测人员和物品产生伤害。另一方面,用 X 射线成

像,只能用于目标对比度很高的情况。

太赫兹辐射的光子能量低 ( $1\text{THz}$  对应光子能量  $4.1\text{meV}$ ),不会对被测物产生辐射伤害,并且太赫兹对多种包装材料都有很好的穿透特性,适用于对比度不高的目标成像,对物质的太赫兹光谱进行分析还可以辨别物质所含的化学成分,这些都使得太赫兹技术有可能在安全检查中成为一种安全、有效的手段。

为了对包装的炸药、毒品、生化样品等进行安全

基金项目:国家自然科学基金重大项目 (No. 10390160)。

作者简介:王新柯 (1982 - ),男,首都师范大学在读硕士研究生,研究方向为太赫兹辐射技术与应用。E-mail: wxk82721@163.com

收稿日期: 2006-04-05

检查,必须首先了解包装材料的透射光谱与折射率。本文报道了太赫兹辐射对七种包装材料(木片、皮革、包装纸、信封纸、复印纸、橡胶、轮胎)的折射率曲线和吸收系数曲线,发现太赫兹辐射对包装材料有很强的透射特性。这将为太赫兹辐射用于隐蔽物的安全检查提供了重要依据。

## 2 装置与样品

本实验使用了首都师范大学太赫兹实验室的太赫兹光谱系统(图1)。实验中使用的激光器是Spectra-Physics公司的锁模钛宝石激光器。激光器平均功率为0.66W,脉冲的中心波长为810nm,脉冲宽度为100fs,激光器重复率为80MHz。本套光路是以InAs作为发射极,通过耗尽层电压加速载流子而辐射太赫兹波。激光束经分束器(CBS)分为泵浦光与探测光两路。泵浦光通过斩波器(chopper)控制太赫兹脉冲输出频率,利用电动平移台(stage)上的两面反射镜M3和M4来改变光程差,并经透镜L1聚焦到InAs晶体上,进而辐射出太赫兹波。实验中使用两组镀金抛物面反射镜来使太赫兹波通过样品,第一组金镜PM1和PM2将太赫兹波聚焦到被测样品上,第二组金镜PM3和PM4将携带有样品信息的太赫兹波聚焦到探测器上。由于硅片对太赫兹波几乎是透明的,所以利用一个硅片将探测光反射到探测晶体上。本系统所用的探测晶体是厚度为1mm的ZnTe晶体,通过太赫兹波对ZnTe晶体折射率椭圆进行调制,将太赫兹信号编码到探测光上。如图1所示,经过ZnTe晶体,探测光带有了太赫兹波的信息,通过渥拉斯顿棱镜分为两束不同偏振光。经反射镜M13和M14照射到双眼探测器上,通过探测两路光强度的不同来确定太赫兹信号的波形。

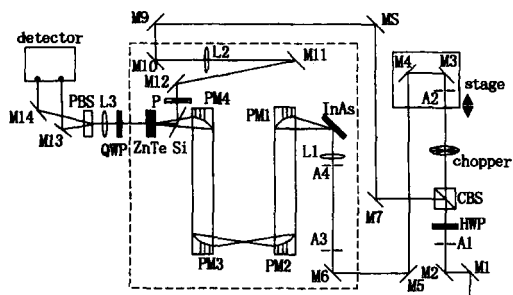


Fig 1 the terahertz spectrum system of THz laboratory

为了避免水对太赫兹波的强烈吸收,样品测量前经电热恒温干燥箱干燥。测量时,图1中虚线所框部分要充入纯度为99.9%的氮气,当湿度器所示

湿度降到5%以下后进行测量,利用Labview编写的控制软件获取时域数据。在实验中,先测量参考信号,再放置样品,测得带有样品信息的信号。由于激光器的输出功率会有微小浮动,为保证实验准确,实验中每测一种样品就测一个参考信号。所测样品放置在PM2、PM3的焦距上,并与入射光方向垂直,以保证太赫兹波可以在单位能量最大的情况下照射到样品上,并且保证在样品内部由于Fabry-Perot效应所造成的能量损失为最小。样品两个表面经过打磨,以减少入射光在样品表面产生的散射。表1给出了实验条件参数。

表1 包装材料样品的实验参数

序号	样品	厚度/mm	湿度/%	温度/
1	木片	3.90	4.8	21.4
2	皮革	2.04	4.5	21.6
3	包装纸	5.02	4.4	21.6
4	信封纸(16张)	2.64	3.7	21.6
5	复印纸(50张)	5.00	4.2	21.6
6	橡胶	1.74	4.5	21.1
7	轮胎	1.16	3.9	21.1

实验条件: 1. 信噪比: 875; 2. 样品干燥温度: 60, 干燥时间: 1h

## 3 数据处理

将参考光与样品光两者复振幅进行比较,经过一定的数学推算,可求出所测样品的光学常数。样品的折射率为:

$$n(\omega) = \frac{c(\omega)}{d} + 1 \quad (1)$$

式中,  $c$  是真空中光速;  $(\omega)$  是样品光与参考光的位相之差;  $\omega$  是信号的频率;  $d$  是样品的厚度。样品的吸收系数为:

$$= \frac{2}{d} \ln \left\{ \frac{4n(\omega)}{(\omega) [n(\omega) + 1]^2} \right\} \quad (2)$$

式中,  $n(\omega)$  是样品折射率,  $(\omega)$  是样品的透射系数。

在处理数据时,由于样品表面或光学器件的反射,在时域信号主脉冲后面会出现回波脉冲。利用Origin7.0软件以补零的方法可以消除回波的干扰,这样会对信号信息有轻微影响,但不会引入新的信息。在计算参考信号与样品信号两者位相差时,由

于信号在低频处会有较大误差,这会使得位相差在低频处有较大偏差,甚至会使整个位相差曲线出现整体上移或下降的情况。通过对误差较小的中频段位相差曲线进行线性拟合,得到拟合公式,并对曲线数据减去 2 的整数倍,直至拟合公式中的截距最小来保证位相计算准确。以上处理数据的方法包含在自编 Matlab 程序中。

#### 4 测试结果

图 2(a)展示了实验所用参考信号的时域光谱,时域信号的宽度大约在一个皮秒。图 2(b)展示了参考信号的频域光谱,频域信号的宽度大约是 0 ~ 2.5 THz。

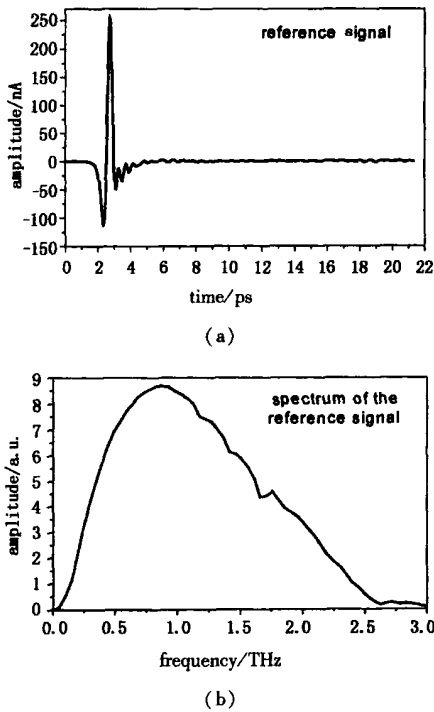
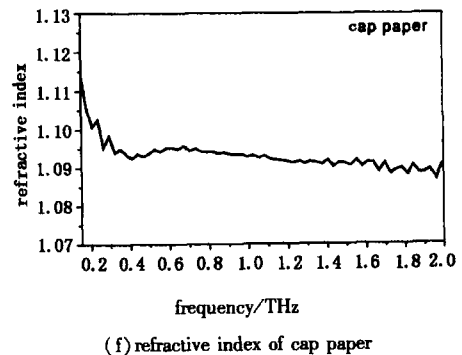
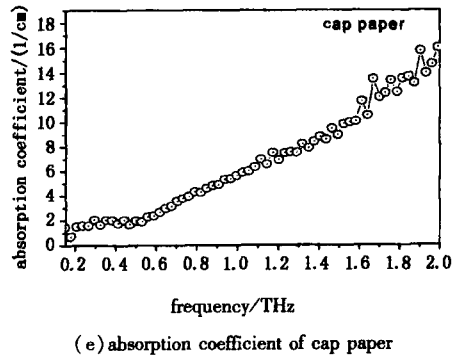
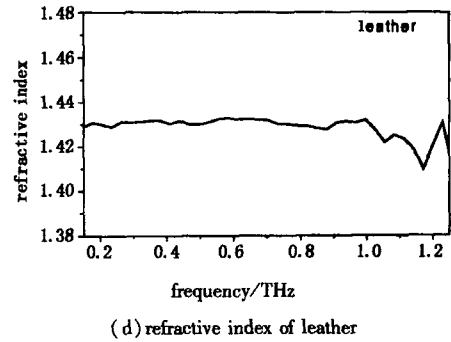
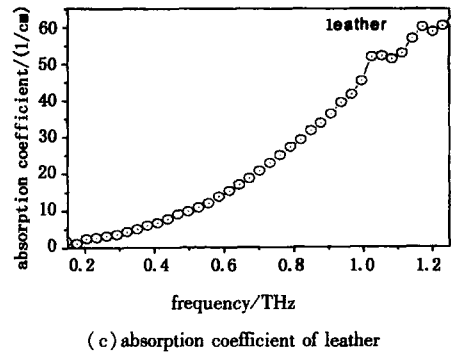
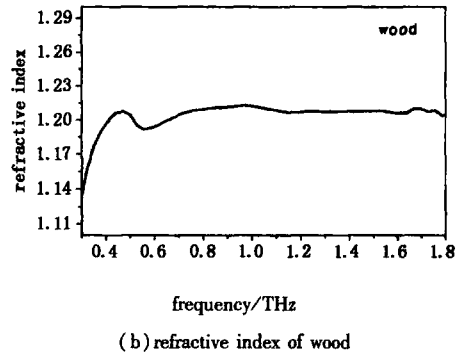
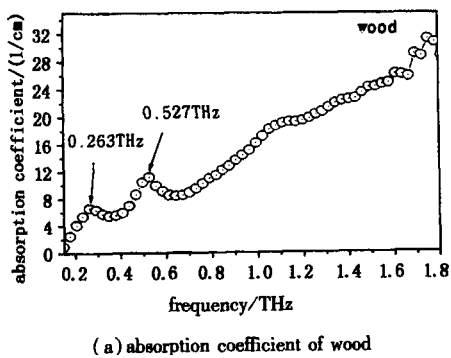
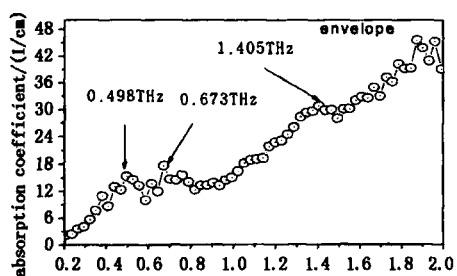


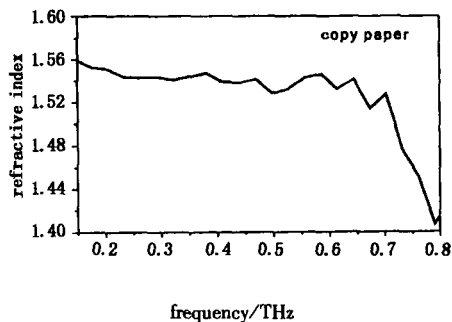
Fig 2 (a) pulse of the terahertz reference signal and (b) spectrum of the terahertz reference signal

图 3 为木片、皮革、包装纸、信封纸、复印纸、橡胶、轮胎七种样品的吸收系数曲线和折射率曲线。

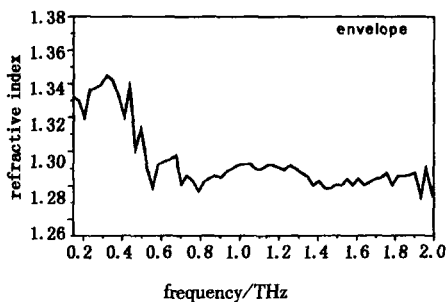




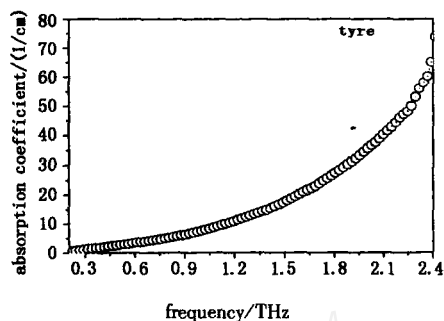
(g) absorption coefficient of envelope



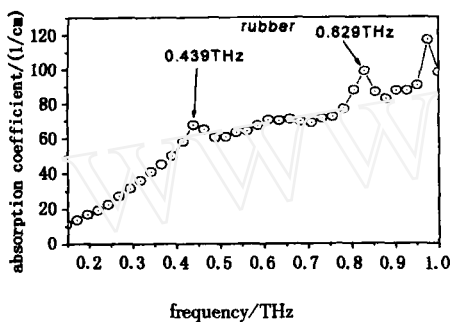
(l) refractive index of copy paper



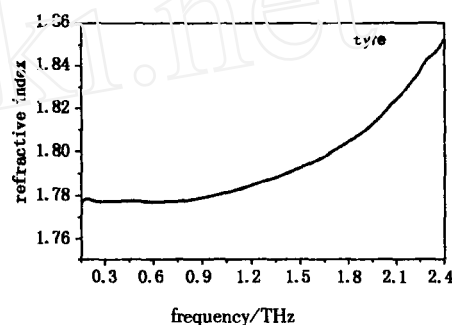
(h) refractive index of envelope



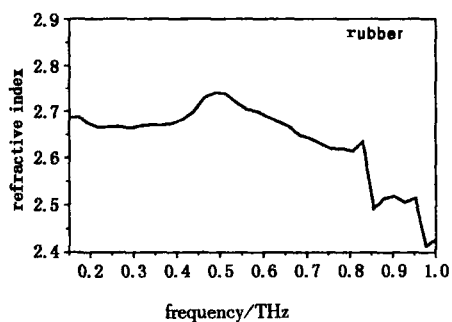
(m) absorption coefficient of tyre



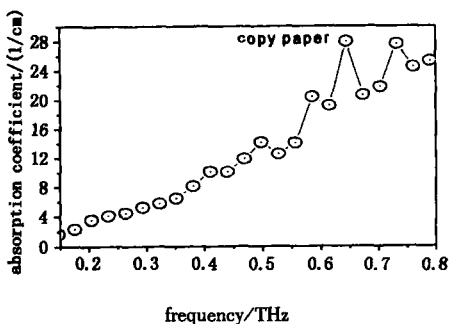
(i) absorption coefficient of rubber



(n) refractive index of tyre



(j) refractive index of rubber



(k) absorption coefficient of copy paper

Fig 3 the absorption coefficients and refractive indexes of wood, leather, cap paper, envelope, copy paper, rubber and tyre

表 2 包装材料在 0.25 ~ 0.65THz 内的吸收系数和折射率

样品	吸收系数 /cm <sup>-1</sup>	折射率
木片	5.4 ~ 8.9	1.082 ~ 1.199
皮革	3.1 ~ 17.0	1.431 ~ 1.432
包装纸	1.6 ~ 3.0	1.095 ~ 1.094
信封纸	3.5 ~ 12.0	1.338 ~ 1.295
复印纸	4.5 ~ 28.0	1.542 ~ 1.541
橡胶	27.1 ~ 70.9	2.666 ~ 2.677
轮胎	1.0 ~ 3.7	1.777 ~ 1.776

从吸收系数曲线中可以看出,这七种样品的吸收系数随频率降低都呈现明显的下降趋势,并且从数值上也可以反映出在低频处太赫兹辐射对包装材料的穿透率是很高的。表 2 所示的是这几种材料在

0.25~0.65THz范围内,吸收系数和折射率的大致范围。

从表 2 中可以看出,在 0.25~0.65THz 的范围内包装纸和轮胎两者吸收系数是最小的,在 0.25 THz 处的数值仅在  $1.3\text{cm}^{-1}$  附近。木片的吸收系数次之,橡胶的吸收系数是最大的。可见用太赫兹辐射对包装纸和轮胎进行探测是非常有效的手段。木片、皮革、信封纸和复印纸在 0.25THz 处的吸收系数也只是在  $4.1\text{cm}^{-1}$  左右,由此可以看出在用太赫兹技术对这三种材料包装的物品进行安全检查时,应使用低频波段的太赫兹辐射。但对于橡胶包装的物品,若用太赫兹辐射对其进行探测,则需要较高的光强,这对今后更高功率太赫兹光源的研制和更有效的探测方法的发展提出了要求。需要注意的是,在木片吸收系数曲线的 0.263THz 和 0.527THz 处,在信封纸吸收系数曲线的 0.498THz, 0.673THz 和 1.405THz 处,以及在橡胶吸收系数曲线的 0.439THz 和 0.829THz 处都存在明显的吸收峰。这有可能是木片、信封纸和胶皮中自身化学物质的低频振动所引起的,也可能是三种物质所含的某些杂质所引起的,存在这些吸收峰确实原因现在还不清楚,但通过多次实验验证,发现这三种物质在这几个特定频段的吸收峰确实存在。这说明若用太赫兹辐射对这三种材料进行探测,应尽量使探测波段避开这些吸收峰,提高太赫兹波对这些包装材料的透射率,以便更清晰地呈现包裹内的物品。

从折射率曲线中可以看出,这几种材料的折射率有明显的差别,并且在整个有效的频率范围内这几种材料的折射率几乎没有变动。包装纸的折射率最小,在整个频率范围内数值保持在 1.095 附近,橡胶的折射率最大,数值在 2.666 到 2.667 之间变动。这些结果表明,每一种材料都有其能体现自身物质特性的折射率,并且这些包装材料并没有很高的色散特性,其折射率随频率并没有明显的变动。

## 5 讨论

本实验表明,太赫兹辐射对大多数包装材料有相当高的穿透特性,且对人体无害,有可能用作海关、机场等场所的安全检查手段,例如探测书包内放置的炸药、枪支、或木箱内放置的毒品等违法物品。

最近,我们已经得到了用航空信封、牛皮纸信封、普通信封、军服和棉布包装的炸药的太赫兹光谱。当然,研制太赫兹安检设备仍需解决许多问题,例如增大太赫兹辐射的功率,提高探测太赫兹辐射的灵敏度,以及将太赫兹装置的小型化、集成化等。但由于太赫兹辐射所具有的独特优势,将会在安全检查中发挥重要作用。

## 参考文献:

- [1] S Wang, B Ferguson, D. Abbott, et al. T-ray Imaging and Tomography[J]. Journal of Biological Physics, 2003, 29(2): 247 - 256
- [2] Zhiping Jiang, X-C Zhang. Electro-optic measurement of terahertz field pulses with a chirped optical beam[J]. Applied Physics Letters, 1998, 72(16): 1945 - 1947.
- [3] N C J van der Valk, P C M Planken. Electro-optic detection of subwavelength terahertz spot sizes in the near field of a metal tip[J]. Applied Physics Letters, 2002, 81(9): 1558 - 1560
- [4] Zhiping Jiang, Xi-Cheng Zhang. Measurement of Spatio-Temporal Terahertz Field Distribution by Using Chirped Pulse Technology[J]. IEEE Journal of Quantum Electronics, 2000, 36(10): 1214 - 1222
- [5] Q Wu, T D Hewitt, X-C Zhang. Two-dimensional electro-optic imaging of THz beams[J]. Appl Phys Lett, 1996, 69(8): 1026 - 1028
- [6] John F Federici, Brian Schulkin, Feng Huang, et al. THz imaging and sensing for security applications-explosives, weapons and drugs[J]. Semicond Sci Technol, 2005, 20: S266 - S280
- [7] 徐新龙,王秀敏,李福利,等. ZnSe 体单晶 THz 波段时域光谱测量及分析[J]. 光谱学与光谱分析, 2004, 24(10): 1153 - 1156
- [8] 张蕾,徐新龙,李福利. 太赫兹 (THz) 成像的进展概况[J]. 量子电子学报, 2005, 22: 129 - 134
- [9] 李福利,沙琳,等. 太赫兹辐射穿地雷达与穿地遥感的概念设计[A]. 第十一届全国光电技术与系统年会[C],北京,2005,895 - 899.
- [10] 任荣东,王新柯,赵国忠,等. 太赫兹辐射对建筑材料的穿透特性研究[A]. 第十一届全国光电技术与系统年会[C],北京,2005,890 - 894.