

文章编号: 2095-4980(2014)05-0667-05

医用棉纱布的太赫兹波段透射特性

刘 乔^{1a,1b}, 陈志强^{1a,2}, 雷江波^{1a,1b}, 孟 坤^{1a,1b}, 朱礼国^{1a,1b}, 李泽仁^{1a,1b}, 吴 军^{1a,2}

(1.中国工程物理研究院 a.流体物理研究所 物理与生物医学交叉实验室;

b.太赫兹科学与技术研究中心, 四川 绵阳 621999;

2.第三军医大学 西南医院 烧伤研究所, 重庆 400038)

摘 要: 生物医学诊断是太赫兹成像的重要应用领域。利用透射式太赫兹时域光谱(THz-TDS)在实验室温湿度条件下研究了用于伤口覆盖的医用棉纱布在 0.1 THz~1.34 THz 波段的透射特性。结果表明, 在该波段, 纱布对太赫兹辐射具有良好的透过性, 且随频率增加, 透射率迅速下降。利用最小二乘拟合得到太赫兹波透射率和纱布层数关系曲线, 相关系数达 0.996, 并由此获得 0.37 THz 处 0.34 mm 厚单层纱布对太赫兹波的透射衰减系数约为 0.159 7。本研究表明太赫兹光谱成像是包扎情况下烧伤评估、伤口恢复期监测的有效临床工具。

关键词: 太赫兹时域光谱; 透射特性; 医用棉纱; 医学诊断

中图分类号: TN29; O433

文献标识码: A

doi: 10.11805/TKYDA201405.0667

Transmission characteristics of medical cotton gauzes in terahertz region

LIU Qiao^{1a,1b}, CHEN Zhi-Qiang^{1a,2}, LEI Jiang-bo^{1a,1b}, MENG Kun^{1a,1b}, ZHU Li-Guo^{1a,1b},
LI Ze-ren^{1a,1b}, WU Jun^{1a,2}

(1a.Interdisciplinary Laboratory of Physics and Biomedicine, Institute of Fluid Physics;

1b.Terahertz Research Center, China Academy of Engineering Physics, Mianyang Sichuan 621999, China;

2.Research Institute of Burns, Southwest Hospital, Third Military Medical University, Chongqing 400038, China)

Abstract: Biomedical diagnosis is an important application of terahertz imaging. The transmission properties of medical cotton gauzes as wound cover under 0.1 THz–1.34 THz are characterized by a transmission Terahertz Time-Domain Spectroscopy(THz-TDS). Results indicate that gauzes exhibit good transmission performance in researched waveband; and the power transmittance rapidly decreases with the increase of frequency. The fitting curve of THz power transmittance vs. layer numbers of gauzes is obtained with a correlation coefficient of 0.996 by using the least square fitting; from which, a transmission attenuation coefficient of 0.159 7 is obtained for a single layer of gauze with 0.34 mm thickness at 0.37 THz. This research shows that terahertz spectral imaging can be used as a powerful clinical tool for burn evaluation and wound healing progress monitoring.

Key words: Terahertz Time-Domain Spectroscopy; transmittance properties; medical cotton gauze; biomedical diagnosis

在烧伤初期评估中, 常需要对伤口深度进行判断; 另外, 在烧伤恢复期, 也常需要对伤口恢复情况、感染情况等监测, 以适时调整治疗方案。目前医疗诊断技术大多采用可见光和红外光成像, 因而限制了其在伤口深度判断和在纱布遮盖下伤口恢复情况监测方面的应用能力^[1]。

太赫兹辐射是位于红外和微波之间的新开发电磁波段(对应频率0.1 THz~10 THz, 波长3 mm~30 μm), 因其具有的良好透视性, 在生物医学成像的多个领域显示出了巨大应用前景, 受到人们的广泛关注^[2-6]。由于太赫兹辐射对绵纱、合成纤维以及干燥组织等非介电材料具有良好的穿透性, 因此有望成为包扎情况下伤口诊断特别是烧伤诊断领域的理想手段^[7]。

为更好地解读包扎情况下伤口的太赫兹光谱和图像信息, 必须了解用于覆盖伤口的棉纱布与太赫兹波的相互

收稿日期: 2014-06-20; 修回日期: 2014-08-29

基金项目: 国家自然科学基金与中国工程物理研究院联合基金资助项目(U1230128)

作用性质,目前针对实际医用棉纱的太赫兹光谱特性研究报道较少。本文利用透射式太赫兹时域光谱(THz-TDS)技术对一种常见医用棉纱布的太赫兹透射特性进行了较为详细的实验研究,结果进一步证实了太赫兹光谱和成像技术用于烧伤诊断领域的前景和可行性。

1 实验布局

实验在自行研制的透射式THz-TDS系统上进行,如图1所示。中心波长780 nm,脉宽100 fs,输出功率180 MW,重复频率100 MHz的飞秒激光首先经过由1/2波片(HWP)和偏振分束棱镜(Polarization Beam Splitter, PBS)组成的能量分束器,其中反射的一路为探针光,透射的一路为泵浦光,探针光由2片45°反射镜反射后通过一个175 mm焦距凸透镜汇聚,再由一块45°反射镜反射并穿过离轴抛物面镜汇聚到50 μm小口径低温生长砷化镓(LT-GaAs)光导天线上产生太赫兹辐射,该辐射由附着在光导天线背面的超球面硅透镜准直并经4块离轴抛物面镜收集和传输,经过样品后照射到ZnTe晶体上,飞秒探针光与太赫兹波在晶体内相互作用后,经过1/4波片(QWP)和沃拉斯顿棱镜(Wollaston prism)后分成2束,照射到平衡光电探测器上进行探测,为避免光束发散,在1/4波片和沃拉斯顿棱镜之间插入了一个75 mm焦距凸透镜,平衡光电探测器的输出由锁相放大器进行锁相探测,最后由计算机进行数据采集和显示。

实验所用纱布来源于西南医院烧伤科,为普通医用棉纱,棉纤维直径约为0.34 mm,纤维间隔为1 mm×1 mm,纱布与空气的占空比约为1.28:1。测量时用夹具将纱布固定并使之保持平整,然后放置在2个离轴抛物面镜的焦点上(见图1中“sample”位置),焦点处太赫兹光斑直径约为3 mm。所有实验均在实验室温湿度环境下进行(相对湿度范围:32%~33.53%;温度范围:23.71 °C~23.98 °C)。

首先在不放置纱布的情况下进行测量,将获得的太赫兹信号作为参考光。再按纱布层数从少到多依次测量,将透过纱布的太赫兹信号作为样品光。利用获得的太赫兹参考光和样品光信号,即可进行纱布太赫兹波透射特性分析。

2 数据处理

采用平面波近似(当样品放置在太赫兹波焦平面附近,且完全处于高斯光束准直距离之内,该近似与实际值间的误差可忽略),根据图2可写出穿透与样品厚度相同的“参考介质层”后太赫兹参考光电场频域的表达式为:

$$E_{\text{ref}}(\omega) = E_0(\omega) \exp\left(-i\frac{\omega}{c}d\right) \quad (1)$$

式中: c 为真空中光速; ω 为太赫兹波角频率; d 为参考介质层厚度(由样品厚度决定)。式中假设空气对太赫兹波的吸收为0,折射率为1。

穿透单层纱布后的太赫兹样品光电场 $E_{\text{saml}}(\omega)$ 频域表达式为:

$$E_{\text{saml}}(\omega) = E_0(\omega)t(\omega)\exp\left(-i\frac{\omega}{c}\tilde{n}(\omega)l\right) = E_0(\omega)t(\omega)\exp\left(-\frac{1}{2}\alpha(\omega)l\right)\exp\left(-i\frac{\omega}{c}n(\omega)l\right) \quad (2)$$

式中: l 为单层纱布厚度; $t(\omega)$ 为单层纱布透射系数,代表空气与纱布2个界面的菲涅耳损耗及散射损耗,由于纱布对太赫兹波吸收较小,可近似认为 $t(\omega)$ 为实数; $\tilde{n}(\omega)$ 为单层纱布复数折射率, $\tilde{n}(\omega) = n(\omega) - i\kappa(\omega)$, 其中 $n(\omega)$ 为

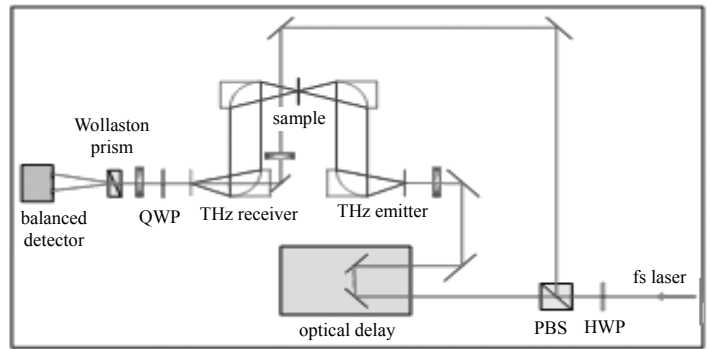


Fig.1 Layout of transmission THz-TDS
图1 透射式 THz-TDS 系统布局

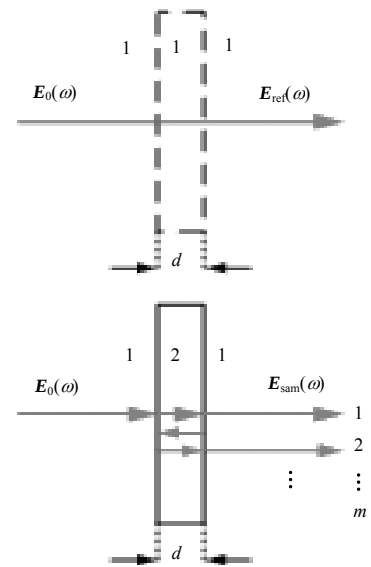


Fig.2 Schematic diagram of THz beam path as reference signal and sample signal
图2 THz 参考光和样品光传输光路示意

实数折射率, $\kappa(\omega)$ 为消光系数, 且有 $\alpha(\omega) = \frac{2\omega}{c}\kappa(\omega)$ (其中 $\alpha(\omega)$ 为吸收系数)。

同理, 可写出穿透 m 层相同纱布后的太赫兹样品光电场 $E_{\text{samm}}(\omega)$ 频域表达式为:

$$E_{\text{samm}}(\omega) = E_0(\omega)t(\omega)^m \exp\left(-\frac{1}{2}\alpha(\omega)lm\right) \exp\left(-i\frac{\omega}{c}n(\omega)lm\right) \quad (3)$$

由式(1)、式(3)可得穿透 m 层纱布后太赫兹波功率透过率 $T_m(\omega)$ 为:

$$T_m(\omega) = \frac{I_{\text{samm}}(\omega)}{I_{\text{ref}}(\omega)} = \frac{E_{\text{samm}}(\omega)E_{\text{samm}}^*(\omega)}{E_{\text{ref}}(\omega)E_{\text{ref}}^*(\omega)} = t(\omega)^{2m} \exp(-\alpha(\omega)lm) \quad (4)$$

令 $a_1(\omega) = t(\omega)^2$, $a_2(\omega) = \alpha(\omega)l$, 式(4)可改写为:

$$T_m(\omega) = a_1(\omega)^m \exp(-a_2(\omega)m) \quad (5)$$

对式(5)两边取自然对数, 有

$$\ln(T_m(\omega)) = [\ln(a_1(\omega)) - a_2(\omega)]m = -a(\omega)m \quad (6)$$

比较式(5)、式(6)可看出, 式(5)中2个系数 $a_1(\omega)$ 和 $a_2(\omega)$ 可用式(6)中1个系数 $a(\omega)$ 来代表, 这意味着对应式(5)中1条拟合曲线将有无数对 $a_1(\omega)$ 和 $a_2(\omega)$ 满足要求, 因此再对式(6)两边求e指数, 得到:

$$T_m(\omega) = \exp(-a(\omega)m) \quad (7)$$

此时再用最小二乘法对式(7)拟合, 将得到唯一的系数 $a(\omega)$, 此系数就代表了因纱布吸收和表面反射、散射等带来的透射损耗。

3 结果与分析

图3为空气参考光与透过不同层数纱布后太赫兹时域电场波形。从图中可明显看到由于纱布以及纱布层数增加带来的太赫兹波衰减和相位延迟。另外, 从实验结果还可以看到, 即使在透过80层纱布后太赫兹时域波形依然清晰可辨, 考虑到通常情况下用于包扎烧伤创面的纱布层数一般小于40层, 包扎普通伤口的纱布层数更少, 这一结果也从太赫兹波对纱布穿透性的角度间接验证THz-TDS成像用于包扎伤口诊断的可行性。

图4、图5分别为透过不同层数纱布后太赫兹频谱和不同层纱布的太赫兹功率透射率谱。

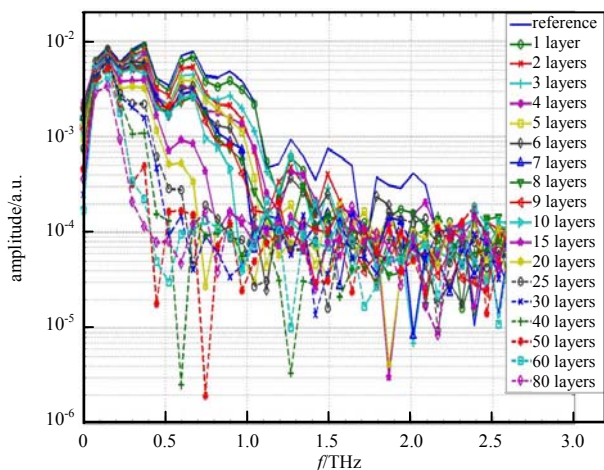


Fig.4 THz spectra through different layers of gauze
图4 透过不同层纱布后 THz 频谱

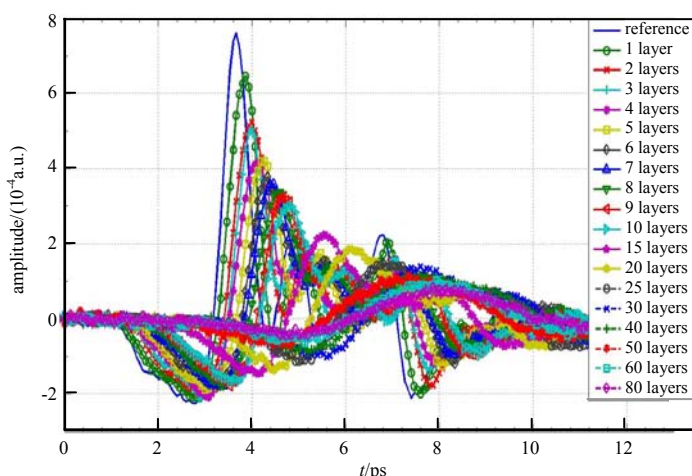


Fig.3 THz time domain waveforms through different layers of gauze
图3 透过不同层纱布后 THz 时域波形

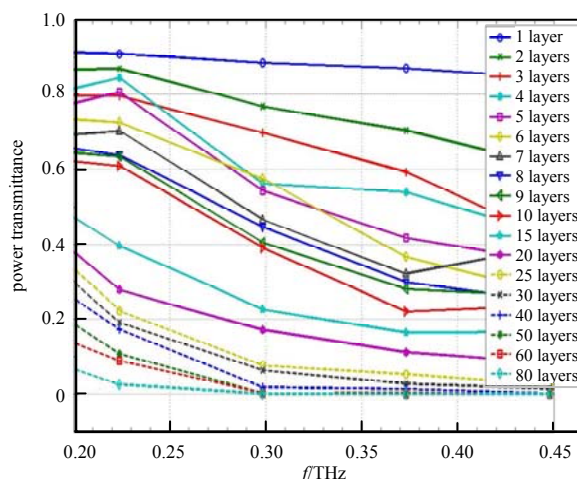


Fig.5 THz power transmittance spectra of different layers of gauze
图5 不同层纱布的太赫兹功率透射率谱

从图中可看到,空气参考光的频域峰值在0.37 THz处,频域峰值动态范围~100,有效频谱范围上限约为2 THz。随着纱布层数的增加,太赫兹透射率逐渐下降,且高频部分衰减比低频部分衰减更为迅速,例如单层纱布的有效光谱范围上限可达1.34 THz,而80层纱布的还不到0.3 THz。

选用信噪比较好的0.37 THz处实验数据,利用最小二乘法^[8-9]拟合得到了太赫兹波功率透过率和纱布层数之间的回归曲线(只考虑1~10层纱布)。从图中可见拟合曲线与指数函数线型吻合较好,拟合相关系数达0.996,均方根误差为2.22%。

由图6拟合结果得到0.37 THz处单层棉纱布的透射衰减系数约为0.159 7。需要指出,此处的透射衰减系数是一个包含吸收损耗和表面反射、散射损耗在内的综合系数。若要获得单独的吸收损耗和反射损耗,需要采用不同厚度的纱布重新进行实验。

为进一步考察实验数据与所建立物理模型的吻合性,利用最小二乘法对太赫兹透射率自然对数和纱布层数进行了线性回归(考虑了1~60层纱布)。如图7所示,拟合结果仍然显示了良好的吻合性,相关系数达0.995。由于信噪比原因,拟合时舍弃了80层纱布的数据。

本实验中测量结果误差主要来源于几个方面:a)每层纱布之间的个体差异;b)增加纱布时人为导致的纱布状态变化;c)太赫兹电场强度变化的影响;d)物理模型近似带来的误差。另外,在对纱布覆盖下人体组织进行太赫兹光谱检测或成像时,随着研究波段频率的增加,由纱布厚度非均匀性带来的太赫兹波空间相干畸变很可能会影响测量结果,甚至带来虚假信息,这需要在后继工作中开展专门研究。

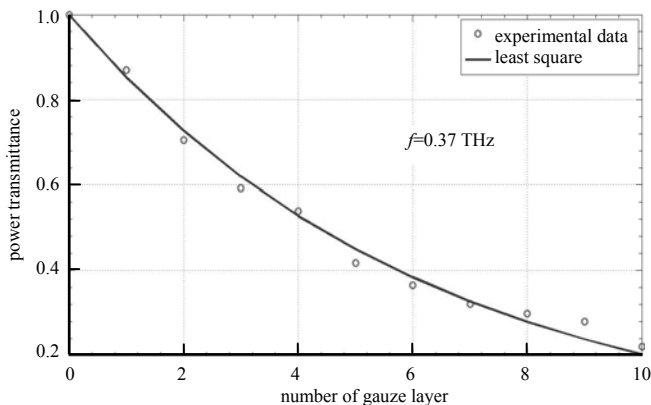


Fig.6 Fitting curve of THz power transmittance vs. layer number of gauze at 0.37 THz

图 6 0.37 THz 处功率透射率与纱布层数拟合曲线

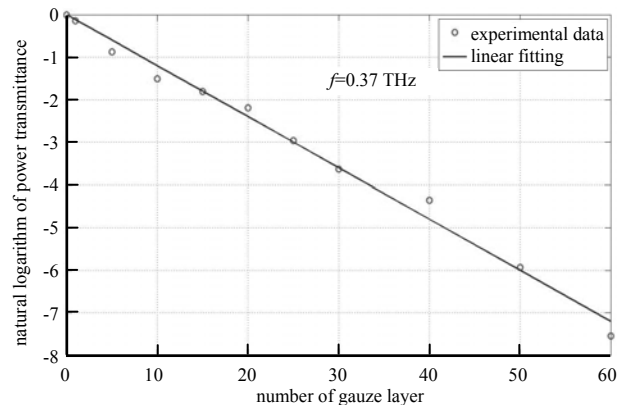


Fig.7 Linear fitting of natural logarithm of power transmittance vs. layer number of gauze at 0.37 THz

图 7 0.37 THz 处功率透射率自然对数与纱布层数线性拟合结果

4 结论

利用THz-TDS技术研究了医用棉纱布在0.1 THz~1.34 THz波段的透射特性。结果显示纱布在所研究波段具有良好的透射性,且高频部分衰减比低频部分衰减更为迅速。利用最小二乘法拟合得到了太赫兹波功率透过率和纱布层数之间的回归关系曲线,拟合相关系数达0.996。获得了0.37 THz处0.34 mm厚的单层棉纱布的透射衰减系数约为0.159 7。研究结果证实了太赫兹光谱与成像技术作为一种新型有效的医学检测手段在烧伤评估、伤口恢复期治疗等方面应用的可行性。

参考文献:

- [1] TAYLOR Z D, SINGH R S, CULJAT M O, et al. Reflective terahertz imaging of porcine skin burns[J]. Optics Letters, 2008, 33(11):1258-1260.
- [2] WOODWARD R M, COLE B E, WALLACE V P, et al. Terahertz pulse imaging in reflection geometry of human skin cancer and skin tissue[J]. Physics in Medicine and Biology, 2002, 47:3853-3863.
- [3] NAZAROV M M, SHKURINOV A P, KULESHOV E A, et al. Terahertz time-domain spectroscopy of biological tissues[J]. Quantum Electronics, 2008, 38(7):647-654.
- [4] ASHWORTH P C, PICKWELL M P E, PROVENZANO E, et al. Terahertz pulsed spectroscopy of freshly excised human breast cancer[J]. Optics Express, 2009, 17(15):12444-12454.

(下转第677页)