

文章编号: 1672-2892(2011)03-0277-03

太赫兹波在介质中传播的 FDTD 分析

孟 坤, 李泽仁, 刘 乔

(中国工程物理研究院 流体力学研究所, 四川 绵阳 621900)

摘 要: 时域有限差分法是电磁场领域中应用最为频繁的数值方法之一, 它可以有效地处理复杂媒质中颗粒对电磁脉冲信号的散射问题, 以及超宽带电磁脉冲信号在色散媒质中的传播问题。几乎所有介质, 无论其在太赫兹(THz)波段是否有吸收峰, 对太赫兹波的传播都有影响。研究太赫兹波在介质中的传播情况, 对优化太赫兹系统, 分析与设计太赫兹应用技术有重要意义。本文模拟了太赫兹波在散射介质中的传播, 说明了太赫兹波在内弹道干涉测速应用中的可能性; 模拟了太赫兹脉冲在色散介质中的传播情况, 为太赫兹时域光谱系统中晶体选择提供依据。

关键词: 时域有限差分; 散射; 色散

中图分类号: TN012; O433

文献标识码: A

FDTD analysis of terahertz pulse traveling in media

MENG Kun, LI Ze-ren, LIU Qiao

(Institute of Fluid Physics, China Academy of Engineering Physics, Mianyang Sichuan 621900, China)

Abstract: Finite Difference Time Domain(FDTD) method is one of the most active numerical methods applied in the electromagnetic field, which can effectively deal with the scattering of electromagnetic pulses by particles in complex media, as well as the propagation of ultra-wideband electromagnetic pulse in dispersive media. Almost all media, regardless of whether there is absorption spectrum in terahertz(THz) band, may influence the terahertz wave transmission in it. Research of terahertz wave propagation in the media is important for the optimization of terahertz systems, as well as the analysis and design of applied terahertz technologies. This study simulated the terahertz wave transmission in the scattering media, indicating the possibility of adopting terahertz wave in the interferometer for ballistic velocity measurement; and simulated terahertz pulse propagation in dispersive media, providing the basis for crystal selection in terahertz time domain spectroscopy system.

Key words: Finite Difference Time Domain; scattering; dispersive

几乎所有介质, 无论其在太赫兹波段是否有吸收峰, 对太赫兹波的传播都有影响。研究太赫兹波在介质中的传播情况, 对优化太赫兹系统, 分析与设计太赫兹应用技术有重要意义。时域有限差分法(Finite-Difference Time-Domain Method, FDTD Method)是求解电磁问题的一种数值技术, 它是在 1966 年由 K.S.Yee 首次提出的。FDTD 法直接将有限差分式代替麦克斯韦时域旋度方程中的微分式, 得到关于场分量的有限差分式, 用具有相同电参量的空间网格去模拟被研究体, 选取合适的场初始值和计算空间的边界条件, 可以得到包括时间变量的麦克斯韦方程的四维数值解。通过傅里叶变换可求得三维空间的频域解^[1]。时域有限差分法经过几十年时间, 特别是最初 20 多年的蓬勃发展, 已成为电磁场领域中应用最为频繁的数值方法之一。它可以有效地处理超宽带电磁脉冲信号在色散媒质中的传播问题以及电磁波在复杂媒质中的传播问题。

本文工作主要分为 2 个部分: 第 1 部分, 应用 FDTD 方法模拟了连续太赫兹波在不同的烟尘环境中的传播情况, 为太赫兹波干涉测速的波长选择提供依据; 第 2 部分, 应用 FDTD 方法模拟了不同宽带的太赫兹脉冲在晶体中的传播情况, 以及太赫兹脉冲经过界面射入晶体和从晶体射出时的传播情况, 为太赫兹时域光谱系统中晶体选择提供了依据。

1 连续太赫兹波在不同的烟尘环境中传播情况的二维 FDTD 模拟

干涉测速技术已成为常规武器、冲击波与爆轰物理、内弹道等实验研究的标准技术^[2]。然而现有的干涉测速技术存在一定的局限性。首先激光干涉测速技术(包括 VISAR、F-P 干涉仪和激光多普勒差拍测速等几类)在冲击波波剖面测量中,可见或近红外激光很难穿透烟雾、粉尘或微喷粒子场,当测量条件存在这种状态时激光干涉测速很难获得良好的信号。另外,内弹道速度测量过程中,应用微波干涉仪测量,由于微波受电磁干扰的影响较大,实验的稳定性和可靠性都难以满足需要。此外,由于微波波长较长,其速度分辨本领无法令人满意,往往会损失弹丸启动阶段速度突变的信息。用激光干涉测速技术进行内弹道测量,当烟雾影响不严重时(如滑膛炮和轻气炮的测量),可以获得很好的实验结果,但当烟雾影响严重时(如测量刻有来福线的火炮),烟雾将光通道封闭,激光将难以到达样品表面,因此也很难获得理想的测量结果。

太赫兹技术近年来的迅速发展,为解决波剖面测量中面临的信号频率过高导致条纹丢失,微喷导致反射率下降等问题以及内弹道测量中面临的火药燃烧烟雾隔断信号光路的问题提供了全新的解决思路。

基于此,作者模拟了太赫兹波对不同尺寸的颗粒的绕射情况,如图 1 所示。

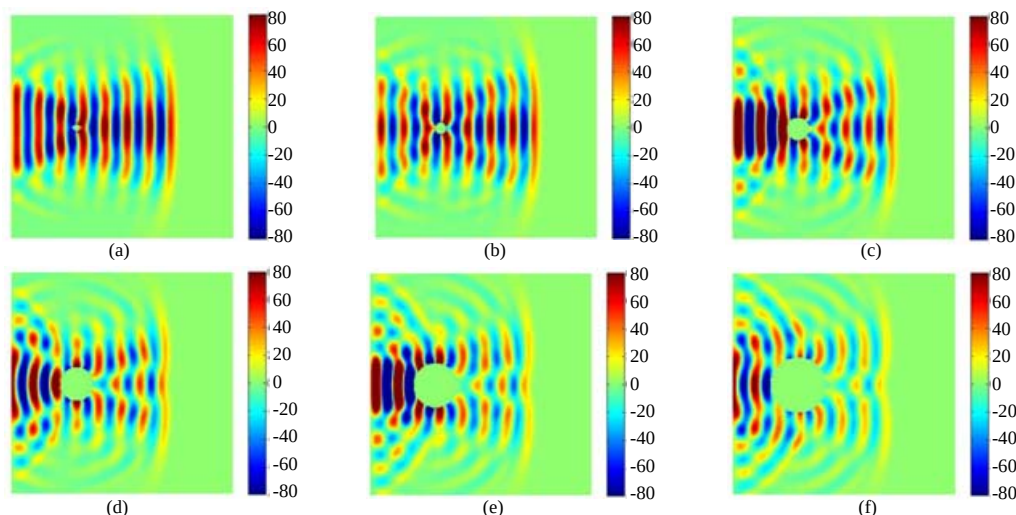


Fig.1 Electric field distribution after terahertz wave traveling through scattering particulates of different sizes

图 1 太赫兹波经过不同尺寸散射体后的电场分布

图中中心圆形即为烟尘颗粒,以色彩代表太赫兹波电场相对强度,如图中标识所示。模拟中采用光斑直径为 1 mm 的高斯光束,颗粒尺寸相对于波长 λ ,分别为 $0.3\lambda, 0.5\lambda, \lambda, 1.5\lambda, 2\lambda$ 和 2.5λ 。模拟中假设太赫兹波不穿过颗粒。在实际过程中,只要选取适当的工作太赫兹波长,这就是一个合理的假设。从模拟结果可以看到,随着颗粒尺寸的增加,太赫兹波的衍射和反射开始变得明显,而原传播方向的光束质量逐渐变差。在颗粒尺寸小于太赫兹波长时,波束质量保持很好。而实际情况中,烟尘颗粒大小一般在几微米到几十微米的量级,处于亚波长或更短的尺寸范围,而太赫兹波对其具有很好的绕射性。

为进一步说明太赫兹波穿透烟尘的可行性,模拟了随机分布的烟尘中太赫兹波的传播情况,如图 2 所示。

从图中可以看出,在较高颗粒浓度的条件下,太赫兹波仍能保持较好的光束质量沿原方向传播。太赫兹波对烟尘的良好穿透性,为太赫兹干涉测速技术用于冲击波波剖面测量和内弹道速度测量提供了前提条件。

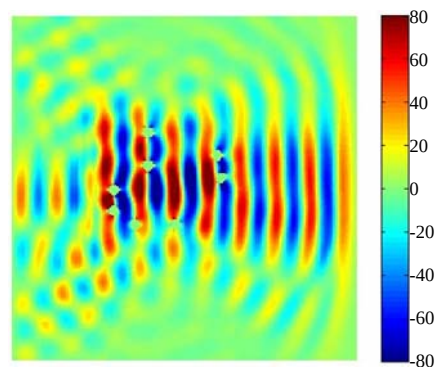


Fig.2 Electric field distribution when THz wave propagating in random scattering medium

图 2 太赫兹波在随机分布散射介质中传播的电场分布

2 宽带太赫兹脉冲在晶体中传播的一维 FDTD 模拟

ZnTe 作为太赫兹探测器广泛应用于太赫兹时域光谱系统^[3]。当一个典型的太赫兹脉冲(如图 3 所示)在 ZnTe 晶体中传播时,频率相依的折射率和吸收系数会使太赫兹脉冲逐渐展宽,而强度逐渐减弱。

计算所用的太赫兹脉冲频谱宽度约为 1.4 THz, 频谱的半高全宽 0.55 THz。ZnTe 晶体的介电常数由文献[4]给出:

$$(n+i\kappa)^2 = \varepsilon_{\text{el}} + \frac{S_0 f_0^2}{f_0^2 - f^2 + i\Gamma_0 f}$$

式中: i 为虚数单位; n, κ 分别为复折射率的实部和虚部; $\varepsilon_{\text{el}} = 7.4, f_0 = 5.3 \text{ THz}, S_0 = 2.7, \Gamma_0 = 0.09 \text{ THz}$ 。计算结果如图 4 所示。

此图给出了太赫兹脉冲在晶体中传播不同距离的波形的数值计算结果。从图中可以清楚地看到, 随着深度的增加, 太赫兹脉冲的幅值呈指数性的衰减, 而脉宽逐渐变宽。数值计算表明, 此波形在传播 0.4 mm 时, 太赫兹波幅值减小一半。

晶体的横光学格波振动对太赫兹脉冲影响很大, 对此进行了计算。ZnTe 晶体的横光学格波振动频率为 5.3 THz, 计算所用的太赫兹脉冲频谱宽度约为 6.4 THz, 频谱的半高全宽 2.2 THz。其它参数与上面模拟相同, 结果如图 5 所示。

可以看到当太赫兹波频宽大于 5.3 THz 时, 由于横光学格波振动的强烈吸收作用, 太赫兹辐射强度下降很快, 在 0.2 mm 厚度时脉冲强度已经衰减一半以上。而且太赫兹脉冲尾部出现振荡, 波形畸变严重。

因此在太赫兹时域光谱系统晶体选择时, 为了得到宽谱的太赫兹脉冲, 必须选择横光学格波振动频率高的非线性晶体或半导体材料。

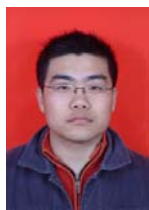
3 结论

应用时域有限差分的方法, 对太赫兹波在散射介质和色散介质中的传播做了模拟计算。说明了太赫兹波绕过炸药烟尘进行内弹道速度测量的可能性, 研究了太赫兹脉冲在色散介质中的衰减、展宽, 以及晶体的横光学格波振动对太赫兹传播的影响。此工作可以为用于内弹道速度测量的太赫兹干涉测速系统设计和太赫兹时域光谱系统的优化提供依据。

参考文献:

- [1] 高本庆. 时域有限差分法[M]. 北京:国防工业出版社, 1995.
- [2] 胡绍楼. 激光干涉测速技术[M]. 北京:国防工业出版社, 2001.
- [3] Masayoshi Tonouchi. Cutting-edge terahertz technology[J]. Nature Photonics, 2007,1(2):97-105.
- [4] Sara Casalbuoni, Holger Schlarb, Bernhard Schmidt, et al. Numerical Studies on the Electro-Optic Sampling of Relativistic Electron Bunches[R/OL]. [2011-02-15]. http://tesla.desy.de/new_pages/TESLA_Reports/2005/pdf_files/tesla2005-01.pdf.

作者简介:



孟 坤(1984-), 男, 山东青岛人, 在读硕士研究生, 主要研究方向为太赫兹时域光谱技术及应用. email: mengkunsdu@yahoo.com.cn.

李泽仁(1961-), 男, 四川三台人, 博士, 研究员, 主要研究方向为光电测试技术与物理光学.

刘 乔(1973-), 男, 四川泸州人, 在读博士研究生, 助理研究员, 主要研究方向为用于冲击波物理的光电测试技术, 太赫兹光谱和成像技术.

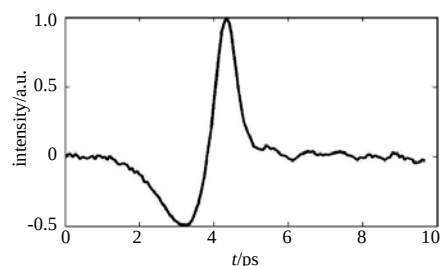


Fig.3 A real time-domain waveform of THz pulse
图 3 一个真实的太赫兹脉冲时域波形

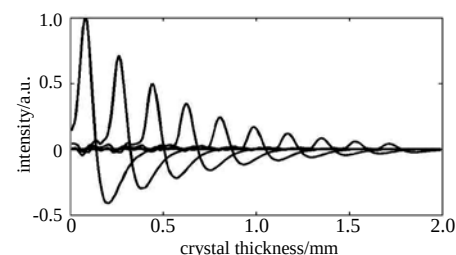


Fig.4 Propagation of 1.4 THz bandwidth pulse in ZnTe
图 4 谱宽 1.4 THz 的脉冲在 ZnTe 晶体中的传播情况

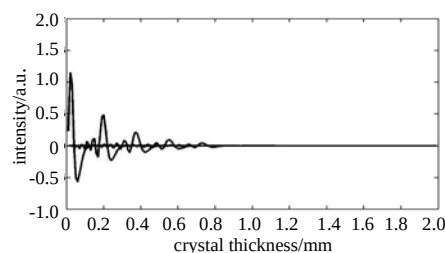


Fig.5 Propagation of 6.4 THz bandwidth pulse in ZnTe
图 5 谱宽 6.4 THz 的脉冲在 ZnTe 晶体中的传播情况