

用于 THz 波段脉冲空间整形的滤波透镜的 电磁场分析*

朱言午[†] 石顺祥 刘继芳 孙艳玲

(西安电子科技大学技术物理学院, 西安 710071)

(2008 年 1 月 27 日收到, 2008 年 2 月 21 日收到修改稿)

提出了一种结构新颖的用于 THz 波段的滤波透镜, 其特点是将滤波和聚焦的性能结合在一起, 从而能有效地在某个特定波段内聚焦 THz 脉冲的输出能量. 设计了带通和带阻两种性能的滤波透镜, 并用电磁场时域差分方法进行了数值研究, 证明了设计的正确性.

关键词: THz, 滤波, 透镜

PACC: 4280W, 0660J, 5235H

1. 引 言

THz 技术的发展引起了人们的广泛关注, 在 THz 波段的通信、信号处理、高分辨率光谱、遥感、成像成为了国内外研究热点. 文献 [1] 研究了利用 LT-GaAs 传输线产生 THz 脉冲的方法, 文献 [2, 3] 利用 Monte-Carlo 方法研究了利用飞秒激光照射 LT-GaAs 产生 THz 脉冲的特点以及 THz 脉冲和随机介质相互作用的过程.

电磁场时域差分方法作为研究电磁波的一种方法, 可以用来研究 THz 波的产生、传播以及 THz 波与具有非线性或色散性质的物质的相互作用, 故而正在被越来越广泛地使用在 THz 领域. 文献 [4, 5] 利用电磁场时域差分方法 (FDTD) 分别研究了利用 LT-GaAs 产生 THz 波的过程以及 THz 脉冲和随机介质相互作用的过程.

随着对 THz 脉冲产生及应用的研究不断深入, 针对 THz 脉冲的传输控制受到愈来愈多的重视. 由于在一些应用中需要把 THz 脉冲整形以便改善对物质特性的控制, 同时脉冲波需要一定的能量, 所以针对 THz 脉冲的空间整形和聚焦研究尤为深入, 文献 [6, 7] 利用金属光阑的衍射效应加上波导的截止频率来获得高频部分, 并利用 FDTD 进行了数值研

究. 文献 [8] 则给出了一种 THz 波段窄带滤波的布里-珀罗光子晶体滤波器. 文献 [9] 提出并实验研究了宽带滤波片在 THz 波段的频率特性. 文献 [10] 给出了利用传输线加载不同厚度和介电常数的介质进行 THz 波段带通、带阻、谐振的数值分析. 文献 [11] 分别利用理论和实验研究了透镜在 THz 波段的近远场特性. 本文提出一种在 THz 波段具备滤波功能的透镜结构, 可以对 THz 脉冲同时进行空间整形和聚焦, 进而利用 FDTD 对其进行了分析.

2. 滤波透镜设计

当飞秒激光照射低温生长的光电半导体时, 产生电子空穴对, 这些电子空穴载流子在预置电压的作用下形成电流, 由于载流子寿命小于 600 fs, 从而形成瞬态电流, 进而辐射出 THz 脉冲. 将透镜直接放在半导体衬底上, 由于透镜的会聚效应, 可以加强信号强度. 通常利用光线循迹法设计透镜的尺寸, 考虑到辐射源放置在透镜的焦点位置, 焦距 $d = R \left(\frac{n}{n-1} \right)$, 其中 n 是透镜的折射系数, 透镜半径 R 通常取为 4 mm.

光学薄膜是指在一块透明的介电材料, 利用物理或化学的方法涂敷透明机制薄膜, 从而满足光学

* 国家部委预研基金(批准号 9140A2011807DZ01)和陕西省自然科学基金(批准号 2006F31)资助的课题.

[†] E-mail: zhuyanwu@sohu.com

系统对反射率或透射率的不同要求,通常为了得到较大的阻带,需采用相差比较大的折射材料构成多层膜系.文献[9]给出了用于 THz 波段滤波的一种多层膜系,其高折射率膜材料采用普通胶片,折射率为 1.73,膜层厚度为 200 μm ,低折射率材料为空气,膜层厚度为 105 μm .

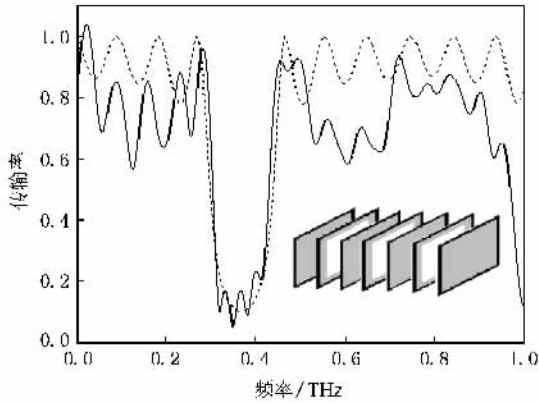


图 1 滤波片的频率传输系数

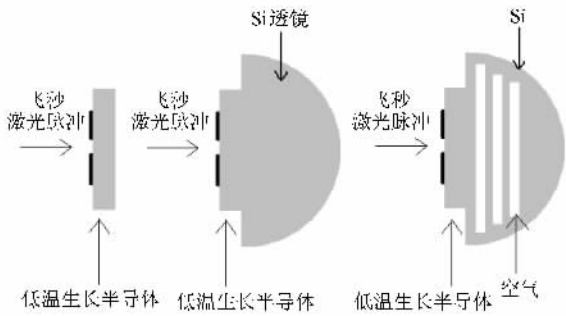


图 2 透镜示意图 从左到右依次为无透镜、有透镜、滤波透镜

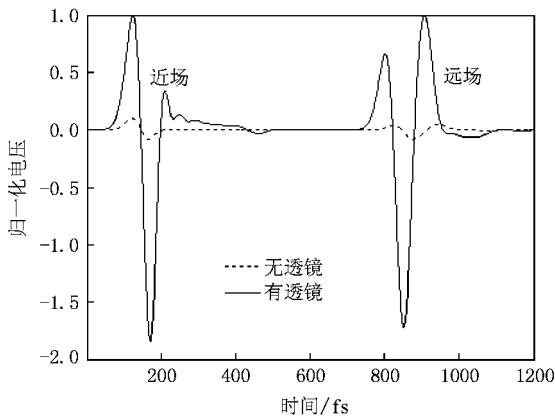


图 3 有无透镜近场时域波形

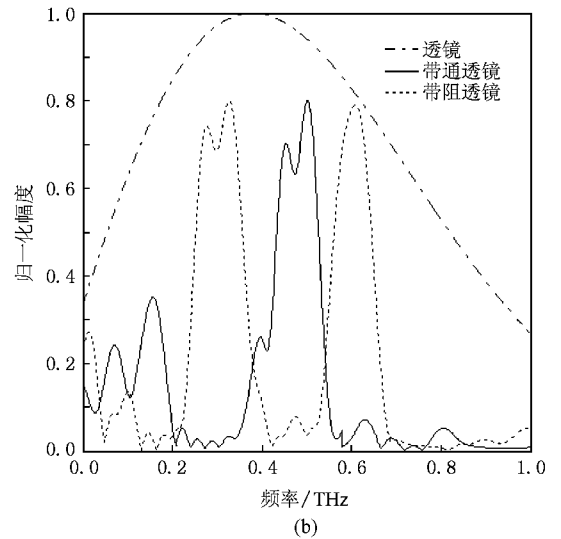
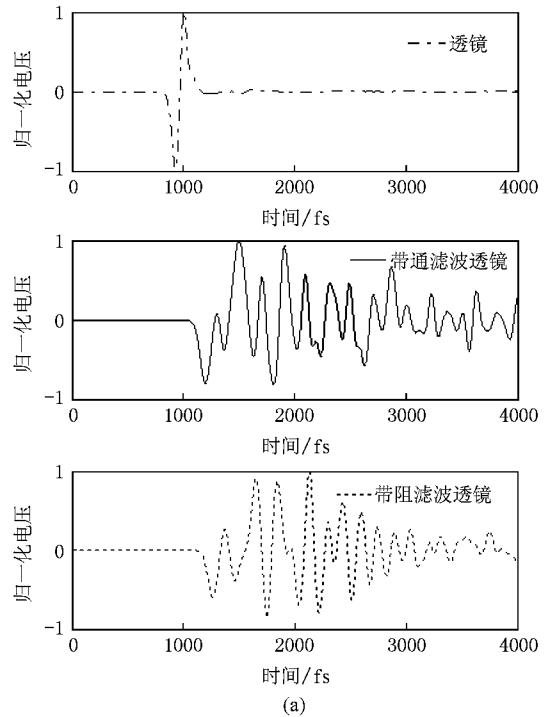


图 4 透镜及滤波透镜近场时域图(a)和透镜及滤波透镜近场波形频谱图(b)

系数,如图 1 所示.图中的插图表示滤波片的周期结构,深色表示高折射率层,浅色表示低折射率层,组合为 HLHLHLH.虚线是传输矩阵的计算结果,实线是 FDTD 的计算结果.可以看出,其透过率和利用传输矩阵法得到的结果一致.在分析透镜和滤波片的基础上,我们提出了具有滤波功能的透镜.即在透镜上构造滤波片结构,从而达到同时具有滤波和聚焦功能的透镜,如图 2 所示.滤波材料参数选取透镜材料 Si(折射率 3.3)和空气(折射率 1),这两

本文利用 FDTD 计算了同一个多层膜系的传输

个参数不但和透镜材料匹配,同时也与半导体集成电路符合. 设计了带阻及带通两种滤波透镜,其排列都是 HLHLHLH,带阻滤波设计高折射率和低折射率膜厚度分别为 $60\ \mu\text{m}$ 和 $110\ \mu\text{m}$. 其阻带中心为 $0.5\ \text{THz}$,带宽为 $0.3\ \text{THz}$. 带通滤波高折射率和低折射率膜厚度分别为 $80\ \mu\text{m}$ 和 $150\ \mu\text{m}$. 其带通中心为 $0.55\ \text{THz}$,带宽为 $0.2\ \text{THz}$.

3. 数值分析

FDTD 作为时域电磁场的计算工具,可以用来准确求出这种光学系统的各种指标. 在计算中低温半导体的衬底面积为 $4\ \text{mm} \times 4\ \text{mm}$,光生电流的辐射特性用电偶极子来模拟. 首先分析了图 2 中有无透镜时 THz 脉冲的辐射特性. 图 3 给出了无透镜和有

透镜时近场和远场的波形,可以看出,透镜有效增强了 THz 脉冲的强度. 图 4 给出了透镜和带通及带阻滤波透镜的时域波形和频谱分析,可以看出滤波透镜可以有效地实现增强和滤波功能.

4. 结 论

本文提出了一种 THz 波段的滤波透镜,利用几何光学概念进行了设计,并且利用电磁场时域方法计算了 THz 脉冲在该透镜中的传输. 结果表明,该透镜可以实现 THz 波段的滤波和聚焦功能,同时, FDTD 方法可以得到 THz 脉冲的时域分布特性,这将有利于进一步在时域和频域研究 THz 波的传播控制.

-
- [1] Deng L, Liu Y X, Shou Q, Wu T H, Lai T S, Wen J H, Lin W Z 2004 *Acta Phys. Sin.* **53** 3010 (in Chinese) [邓 莉、刘叶新、寿 倩、吴添洪、赖天树、文锦辉、林位株 2004 物理学报 **53** 3010]
- [2] Jia W L, Ji W L, Shi W 2007 *Acta Phys. Sin.* **56** 2042 (in Chinese) [贾婉丽、纪卫莉、施 卫 2007 物理学报 **56** 2042]
- [3] Chen M, Xiao T Q, Xu H J 2003 *Acta Phys. Sin.* **52** 2807 (in Chinese) [陈 敏、肖体乔、徐洪杰 2003 物理学报 **52** 2807]
- [4] Shen Y C, Upadhyaya P C 2003 *Appl. Phys. Lett.* **83** 3118
- [5] Matthew C, Beard M D, Schmuttermear C A 2001 *J. Chem. Phys.* **114** 2903
- [6] Meng K, Wang Y H, Chen L W, Zhang Y 2008 *Acta Phys. Sin.* **57** 3198 (in Chinese) [孟 阔、王艳花、陈龙旺、张 岩 2008 物理学报 **57** 3198]
- [7] Nekkanti S, Sullivan D, Citrin D S 2001 *IEEE J. Quantum Elect.* **37** 1226
- [8] Zhou M, Chen X S, Wang S W 2006 *Acta Phys. Sin.* **55** 3725 (in Chinese) [周 梅、陈效双、王少伟 2006 物理学报 **55** 3725]
- [9] Turchinovich D, Kammoun A 2006 *Appl. Phys. A* **74** 291
- [10] Tiang C K, COUNINGHAM J 2006 *J. Appl. Phys.* **100** 066105
- [11] Cote D, Sipe J E, van Driel H M 2003 *J. Opt. Soc. Am. B* **20** 1371

A full electromagnetic analysis of a filter substrate lens for spatiotemporal terahertz pulse shaping^{*}

Zhu Yan-Wu[†] Shi Shun-Xiang Liu Ji-Fang Sun Yan-Ling

(*School of Technical Physics , Xidian University , Xi 'an 710071 , China*)

(Received 27 January 2008 ; revised manuscript received 21 February 2008)

Abstract

A novel filter substrate lens for THz pulse is presented , which could efficiently couple the THz radiation in a desired frequency range into free space . The band-pass and band-stop filter lens is designed and studied by difference time method . The results show that the design is well supported by the theoretical analyses .

Keywords : THz , filter , lens

PACC : 4280W , 0660J , 5235H

^{*} Project supported by the National Defense Preresearch Foundation of China (Grant No. 9140A2011807DZ01) and the Natural Science Foundation of Shaanxi Province , China (Grant No. 2006F31) .

[†] E-mail : zhuyanwu@sohu.com