

太赫兹波段金属矩形孔高通滤波器

张新群^{1,2,3,4}, 赵国忠^{1,2,3,4}, 王佳^{1,2,3,4}

¹首都师范大学物理系, 北京 100048;

²北京市太赫兹波谱与成像重点实验室, 北京 100048;

³北京市成像技术高精尖创新中心, 北京 100048;

⁴太赫兹光电子学教育部重点实验室, 北京 100048

摘要 针对太赫兹波段高通滤波器,介绍了利用光刻工艺在镀有铝层的聚对苯二甲酸乙二醇酯薄膜上进行亚波长结构样品的实验室制备过程,主要研究了亚波长矩形金属孔阵列结构对太赫兹波透射特性的影响,并利用仿真软件对这种结构的高通滤波特性进行了理论分析。对矩形孔结构中孔的大小和金属线宽对高通滤波效果的影响做了数值分析,并建立了相应的数学模型。

关键词 光学器件; 太赫兹; 高通滤波器; 矩形孔; 金属结构

中图分类号 O433 **文献标识码** A

doi: 10.3788/LOP54.082302

High Pass Filter Based on Metallic Rectangular Holes in Terahertz Frequency Range

Zhang Xinqun^{1,2,3,4}, Zhao Guozhong^{1,2,3,4}, Wang Jia^{1,2,3,4}

¹Department of Physics, Capital Normal University, Beijing 100048, China;

²Beijing Key Laboratory of Terahertz Spectroscopy and Imaging, Beijing 100048, China;

³Beijing Advanced Innovation Center of Imaging Technology, Beijing 100048, China;

⁴Key Laboratory of Terahertz Optoelectronics, Ministry of Education, Beijing 100048, China

Abstract For high pass filter in terahertz frequency range, a laboratory preparation process of subwavelength structure sample on polyethylene terephthalate film coated with aluminum layer using photolithography process is described. The influence of subwavelength rectangular metal hole array structure on the transmission properties of terahertz wave is mainly studied, and the high-pass filter characteristics of this structure are analyzed theoretically by using simulation software. The influence of hole size and metal line width of the rectangular hole structure on the high-pass filtering effect is numerically analyzed, and the corresponding mathematical model is established.

Key words optical devices; terahertz; high pass filter; rectangular hole; metallic structure

OCIS codes 230.3990; 230.7408

1 引言

太赫兹(THz)是介于红外和微波之间一个新的波段,频率范围在 0.1~10.0 THz(30~3000 μm)内。其处在电子学向光子学的过渡区域,具有很多特性^[1-6]。太赫兹波具有很多优良的性质,如强穿透能力、低能量和宽频谱等,这些性质使其在成像、无损检测、指纹谱识别和通信等方面有着广泛的应用。太赫兹波的广泛

收稿日期: 2017-03-28; **收到修改稿日期:** 2017-04-12

基金项目: 国家自然科学基金(61575130,61575131,50971094)、北京市自然科学基金-北京市教育委员会科技计划重点项目(KZ201310028032)

作者简介: 张新群(1990—),男,硕士研究生,主要从事太赫兹亚波长结构方面的研究。E-mail: 912119500@qq.com

导师简介: 赵国忠(1964—),男,博士,教授,主要从事太赫兹光谱与成像、光电功能材料和光电子学等方面的研究。

E-mail: guozhong-zhao@126.com(通信联系人)

应用极大地扩展了对太赫兹波调制性能的需求。

太赫兹功能材料与器件是当前电磁波超材料领域研究的热点^[7-11],而超材料这种人工微结构材料也为太赫兹波段新型功能器件的研制提供了极好的基础。超材料对太赫兹波的调制已经被证明具有重要的研究意义和实际的应用价值,如太赫兹滤波器、太赫兹偏振器、太赫兹镜头和太赫兹波导等^[12-15]。作为一种人工材料,超材料的主要性质来自其本身的亚波长结构,该结构使其具有自然界材料所没有的新颖的电磁特性,如负折射率和隐身性。随着超材料的发展,其亚波长结构设计变化越来越多。Pendry J B 等^[16]最开始设计的结构是周期金属导线结构。Li Z Y 等^[17]设计的 U 型及组合结构能实现不同的滤波效果。丁元等^[18]和孙雅茹等^[19]分别设计了双开口谐振环结构。另外,邢维等^[20]为提高品质因数设计了镜像的双开口谐振环。这些设计都可以实现不同的滤波效果,所设计结构的复杂程度也不相同。简单结构是不同结构设计发展的基础,因此研究矩形孔等简单结构的滤波效果是研究复杂结构的基础。

2 亚波长金属矩形孔阵列结构的设计与制备

超材料结构的设计从最初简单的环状结构,发展到后来的开口谐振环,以至更复杂的 H 型结构^[21-24]。在单元排列上,超材料结构从简单的重复排列到后来的不对称排列、镜像排列甚至还出现了分形结构,展示了超材料电磁响应的丰富特性。其具有结构简单、制备方便等优点,是超材料设计的基础结构。基于以上考虑,利用 CST Microwave Studio 仿真软件,设计了不同参数的正方形金属孔结构,以期达到高通滤波的特性,其结构如图 1 所示,6 个不同样品的结构参数如表 1 所示,其中 p 为周期, w 为金属线宽, l 为孔边长。接下来研究这些亚波长金属孔对太赫兹波的调制特性。

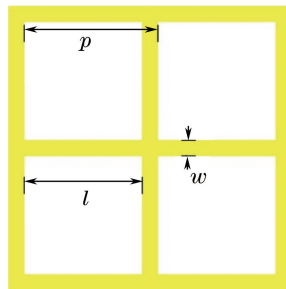


图 1 矩形孔结构示意图

Fig. 1 Schematic diagram of rectangular hole structure

表 1 样品结构参数

Table 1 Structure parameters of the samples

Sample number	1	2	3	4	5	6
p	90	95	130	20	60	165
l	83	83	83	10	50	155
w	7	12	47	10	10	10

超材料结构被制备在聚对苯二甲酸乙二醇酯(PET)薄膜上,薄膜上镀有 100 nm 厚的铝膜。由于其在太赫兹波段具有高透射率和低折射率色散等优良性质,PET 已经成为研制太赫兹器件重要的基底材料之一。样品的具体加工步骤为:1) 清洗,把镀有铝膜的 PET 薄膜放在无水乙醇中清洗,并用去离子水冲洗。2) 烘干,在温度为 90 °C 的热板上加热烘干薄膜上的水分,使其在旋涂光刻胶时和 PET 上铝膜贴合更牢固,从而在进行后续的加工程序时光刻胶不会剥落。3) 涂胶,由于 PET 薄膜只有 35 μm 厚,非常柔软,无法直接进行旋涂,所以先把 PET 薄膜平铺固定在洗净的硅片或者其他支撑物上,然后再进行旋涂。转速设置 2000 $\text{r}\cdot\text{m}^{-1}$,选用 S1805 型号光刻胶,用温度为 90 °C 的热板加热烘干其中的水分后,光刻胶厚度为几百纳米。4) 曝光,使用移动掩膜曝光系统,用光强度为 3 $\text{mW}\cdot\text{cm}^{-2}$ 的紫光进行曝光,曝光时间为 25 s,被曝光部分光刻胶性质发生改变。5) 显影,在 AZ300MIF 型号显影液中浸泡 20 s 的时间以去掉被曝光部分达到显影效果,此时掩模板图案在光刻胶层中显现。这样掩模板上的结构图案就被复制到光刻胶上了。6) 刻蚀,

采用湿法刻蚀方法,铝刻蚀液是由磷酸、水、醋酸和硝酸按 16:2:1:1 的比例混合配制而成,在刻蚀液中刻蚀 50 s,暴露的铝膜便会被刻蚀掉。这时掩模板上的图案便被转移到铝膜上了。7) 去胶,用酒精或者丙酮去除掉先前起保护作用的光刻胶,并用水冲洗清洁,然后在硅片上取下 PET 薄膜烘干,样品便制作完成了。

3 实验结果与分析

为了研究上述样品的滤波特性,将其放在太赫兹时域光谱系统(THz-TDS)中进行测试。把测试的 6 个数据分成两组,一组是样品 1、2 和 3,测试结果如图 2(a)所示,另一组是样品 4、5 和 6,测试结果如图 2(b)所示。图 2 中实线是实验测得的透射率,虚线是仿真结果。图 2 中透射率曲线清晰地表现出了高通滤波特性,其中样品 4 由于金属占比较大,导致整体透射率比较低。由图 2 可知,矩形孔的透射率都有一个上升沿,且透射率到达最大值之后没有明显的下降,而是保持高频部分透射率比较高,实现高通滤波功能。图 2(b)中, A、B 和 C 是选取了样品 5 的透射率中有代表性的 3 个频率。A 频率处透射率很低,太赫兹入射波大量被反射回去。B 频率处透射率开始上升,处于上升阶段,一部分太赫兹波被反射回去,一部分透射。C 频率处是在上升沿的最高端,透射率高于 A 和 B 频率处。

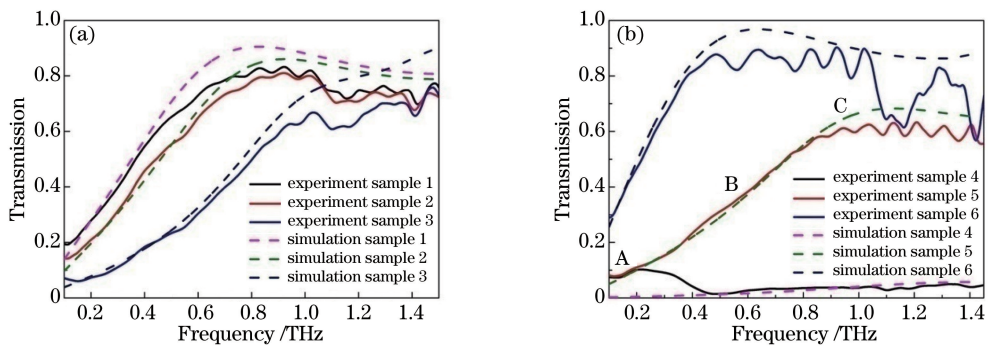


图 2 矩形金属孔阵列结构的太赫兹透射光谱。(a)样品 1、2、3;(b)样品 4、5、6

Fig. 2 THz transmission spectra of rectangular metal hole array structure. (a) Sample 1, 2, 3; (b) sample 4, 5, 6

图 2 中实验数据和仿真数据的上升沿部分符合得比较好,而后面透射率到达比较高的值时实验数据和仿真数据有一些差别,两组样品实验得到的透射率都比仿真得到的透射率要低,这一现象的原因是:实际样品中薄膜衬底在高频处的吸收损耗比在低频处更大,而且实际制备的样品也没有仿真模型那么理想。实验结果和仿真结果都表现出高通滤波特性,滤波效果相同,而且随着参数的变化实验的滤波特性和仿真的滤波特性都呈现出一致的变化规律;因此仿真的滤波特性和实验的滤波特性所遵循的物理原理是一致的,可借助仿真软件来分析形成高通滤波的原因。在仿真软件中,电流分布图显示电流主要集中在沿电场偏振方向的金属上,电流的振动方向顺着金属线,沿着电场偏振的方向,且 A、B 和 C 3 个频率处的电流大小没有明显差别,处在同一数量级上,对入射的太赫兹波起反射作用。这种情况下,沿着电场偏振方向的金属线组成了金属线栅,而金属线栅的性质使沿金属线栅方向偏振的电磁波不能透射。因为沿金属线栅方向偏振的电磁波会在金属线上激发电流振荡,该振荡的电流使这个方向的电磁波被反射回去。然而 A、B 和 C 3 个频率处的

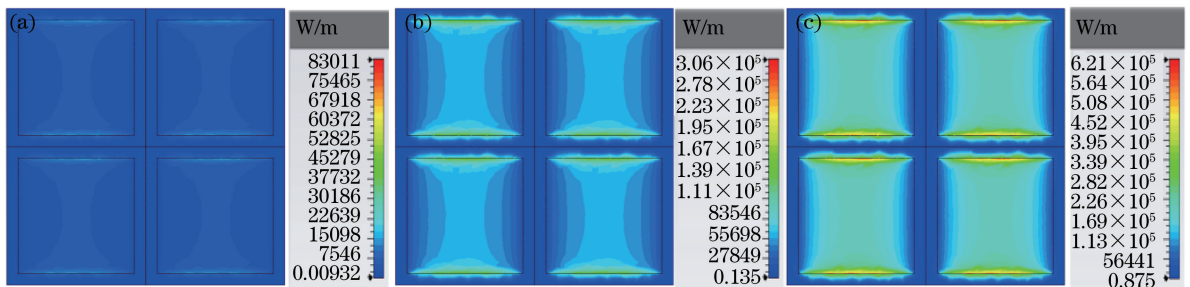


图 3 样品 5(a)位置 A、(b)位置 B 和(c)位置 C 的电场强度分布

Fig. 3 Electric field intensity distributions of (a) position A, (b) position B and (c) position C of sample 5

电场分布却有着明显差异,如图3所示。图3(a)、(b)和(c)分别对应着样品5的A、B和C3个频率处的电场分布,入射的太赫兹波电场偏振沿竖直方向。从电场分布情况来看,C频率处的平均电场是最大的,B频率处次之,A频率处最小,且电场在结构中有一定的分布规律,以竖直方向金属为对称轴呈对称分布,远离金属的位置电场开始变大。A、B和C3个频率处的电场分布差异正是导致透射率差异的原因。电场在金属线间形成了一个微小的谐振腔,但是不同频率处在同一个结构中不能都很好地满足形成谐振腔的条件。当某一频率很好地满足形成谐振腔的条件时,如图3(c)所示,金属线间的电场强度较大,金属表面等离子体增强,通过结构后透射率高。当为如图3(b)所示的情况时,金属线间的电场强度较图3(c)所示的电场强度小,能耦合通过矩形孔结构的入射波强度变小,透射率低,图3(a)的情况也是如此。

电场的分布跟金属结构相关,即跟金属的线宽和孔的大小有关,下面分别研究这两个因素的影响。选取上升沿最高点处频率 f 作为表征高通滤波器性能的参数,并通过结构参数对频率 f 的影响来反映对高通性能的影响。首先,确定孔的大小为 $l=83\ \mu\text{m}$,改变金属线宽的大小。利用仿真软件计算出不同结构参数的结果,提取出上升沿最高点处频率 f ,频率 f 与金属线宽的对应关系如图4(a)所示。确定金属线宽为 $w=10\ \mu\text{m}$,则孔的大小与频率 f 的关系如图4(b)所示。

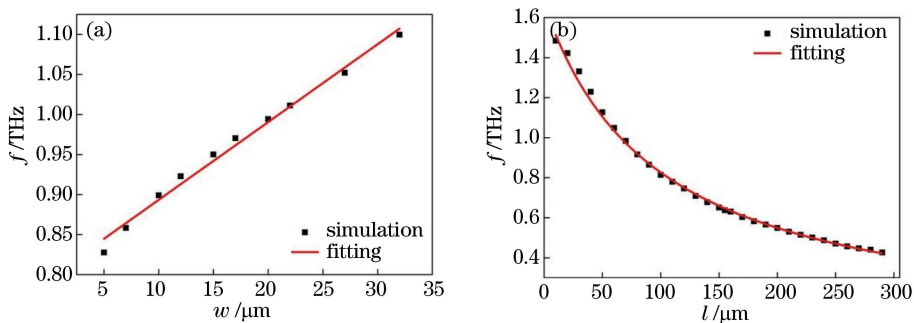


图4 (a)金属线宽与频率的关系;(b)孔的大小与频率的关系

Fig. 4 (a) Relationship between metal line width and frequency; (b) relationship between the size of hole and frequency

如图4(a)所示,频率 f 与金属线宽很好地满足线性关系,所拟合出的直线满足公式:

$$f = 0.00972w + 0.79624. \quad (1)$$

当金属线宽增加,频率 f 向高频移动,意味着低频部分更多的太赫兹入射波被反射回去,因为金属线宽增加,更高频率的太赫兹入射波满足在金属片中激发出电子振荡的条件,形成的电子振荡使入射波被反射。同时金属线宽增加使金属周围的部分电场更加集中在金属片上,从而会影响电场的分布,进一步影响入射的太赫兹波透射情况。(1)式中金属线宽项的系数和加号右边的常数项都跟孔的大小有关。类似的情况,孔的大小也会影响频率 f ,如图4(b)所示,频率 f 跟孔的大小很好地满足反比关系,所拟合出来的曲线满足公式:

$$f = \frac{c}{1.80024 \times 10^8 + 1.83 \times 10^6 \times l}, \quad (2)$$

式中 c 为真空中光速。如果把(2)式转换成孔大小与频率 f 对应的波长 λ 的关系,其满足线性关系,对应的公式如下:

$$\frac{\lambda}{1.8301} = l + 98.3677. \quad (3)$$

当孔变大时,频率 f 向低频移动,更多的太赫兹入射波透射过去。入射太赫兹波电场偏振方向的金属片距离变大,金属片上形成的电子振荡对入射太赫兹波影响减弱,被反射的太赫兹波减少,高频部分太赫兹波不再满足在金属片中激发电子振荡的条件,从而使太赫兹波更多地透射过去。(3)式的形式跟腔内形成驻波的条件类似,可认为是入射太赫兹波耦合透射孔的耦合条件,公式右边的常数项和 λ 项的系数跟金属线宽有关。

金属线宽和孔的大小都会影响高通滤波的特性,为了使得到的公式对以后设计矩形孔时有实际的指导意义,可以通过同时改变金属线宽和矩形孔大小来调节矩形孔滤波特性,在本研究中把两个可变量放入同一个公式中:

$$f = \frac{3.2262w + 264.283}{1.83l + 180.024} \quad (4)$$

当确定孔的大小 l 的值, 金属线宽 w 为变量, (4) 式变为(1)式的形式, 频率 f 与金属线宽 w 成正比关系; 当确定金属线宽 w 的值, 孔的大小 l 为变量, (4) 式变为(2)式的形式, 频率 f 与孔的大小成反比关系; (4) 式很好地同时满足了(1)和(2)式的特点, 是一个可行的公式。

4 结 论

研究了在太赫兹波段的矩形孔高通滤波特性, 分别研究矩形孔中两个参量(金属线宽和孔的大小)对高通滤波的影响, 分别给出了拟合的公式, 并结合两个因素对高通滤波的影响给出一个统一的公式, 该公式包含金属线宽和孔的大小两个变量。通过本研究给出的公式, 设计者如要用矩形孔实现高通滤波, 可以根据滤波的要求, 再通过公式的计算改变金属线宽或者孔的大小来找到一个合适的参数。这一结果对以后类似结构的设计有很好的指导作用。

参 考 文 献

- [1] Xie L J, Yao Y, Ying Y B. The application of terahertz spectroscopy to protein detection: a review[J]. *Applied Spectroscopy Reviews*, 2014, 49(6): 448-461.
- [2] Hangyo M, Tani M, Nagashima T. Terahertz time-domain spectroscopy of solids: a review[J]. *International Journal of Infrared & Millimeter Waves*, 2005, 26(12):1661-1690.
- [3] Kleine-Ostmann T, Nagatsuma T. A review on terahertz communications research[J]. *Journal of Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves*, 2011, 32(2): 143-171.
- [4] Mickan S P, Menikh A, Liu H, *et al.* Label-free bioaffinity detection using terahertz technology[J]. *Physics in Medicine & Biology*, 2002, 47(21): 3789-3795.
- [5] Mittleman D M, Gupta M, Neelamani R, *et al.* Recent advances in terahertz imaging[J]. *Applied Physics B*, 1999, 68(6): 1085-1094.
- [6] Huang S, Ashworth P C, Kan K W, *et al.* Improved sample characterization in terahertz reflection imaging and spectroscopy[J]. *Optics Express*, 2009, 17(5): 3848-3854.
- [7] Veselago V G. The electrodynamics of substances with simultaneously negative values of ϵ and μ [J]. *Soviet Physics Uspekhi*, 1968, 10(4): 509.
- [8] Soukoulis C M, Wegener M. Past achievements and future challenges in the development of three-dimensional photonic metamaterials[J]. *Nature Photonics*, 2011, 5(9): 523-530.
- [9] Melo A M, Kornberg M A, Kaufmann P, *et al.* Metal mesh resonant filters for terahertz frequencies[J]. *Applied Optics*, 2008, 47(32): 6064-6069.
- [10] Liu Z W, Lee H, Xiong Y, *et al.* Far-field optical hyperlens magnifying sub-diffraction-limited objects[J]. *Science*, 2007, 315(5819): 1686.
- [11] Chen H T, Padilla W J, Zide J M, *et al.* Active terahertz metamaterial devices[J]. *Nature*, 2006, 444(7119): 597-600.
- [12] Li J S. High absorption terahertz-wave absorber consisting of dual-C metamaterial structure[J]. *Microwave & Optical Technology Letters*, 2013, 55(5): 1185-1189.
- [13] Grant J, Ma Y, Saha S, *et al.* Polarization insensitive, broadband terahertz metamaterial absorber[J]. *Optics Letters*, 2011, 36(17): 3476-3478.
- [14] Huang L, Chowdhury D R, Ramani S, *et al.* Experimental demonstration of terahertz metamaterial absorbers with a broad and flat high absorption band[J]. *Optics Letters*, 2012, 37(2): 154-156.
- [15] Paul O, Beigang R, Rahm M. Highly selective terahertz bandpass filters based on trapped mode excitation[J]. *Optics Express*, 2009, 17(21): 18590-18595.
- [16] Pendry J B, Valanju A P, Valanju P M. Extremely low frequency plasmons in metallic mesostructures[J]. *Physical Review Letters*, 1996, 76(25): 4473-4476.
- [17] Li Z Y, Ma Y F, Huang R, *et al.* Manipulating the plasmon-induced transparency in terahertz metamaterials[J].

Optics Express, 2011, 19(9): 8912-8919.

- [18] Ding Yuan, Zhu Junwei, Guo Yuhan, *et al.* Experimental study of resonance characteristics of split ring resonators in terahertz band[J]. Acta Optica Sinica, 2015, 35(2): 0216002.
丁元, 朱俊伟, 郭宇晗, 等. 开口谐振环阵列在太赫兹波段的谐振特性实验研究[J]. 光学学报, 2015, 35(2): 0216002.
- [19] Sun Yaru, Shi Tonglu, Liu Jianjun, *et al.* Terahertz label-free bio-sensing with EIT-like metamaterials[J]. Acta Optica Sinica, 2016, 36(3): 0328001.
孙雅茹, 史同璐, 刘建军, 等. 太赫兹超材料类 EIT 谐振无标记生物传感[J]. 光学学报, 2016, 36(3): 0328001.
- [20] Xing Wei, Yan Fengping, Tan Siyu, *et al.* Simulation analysis on the designing of high-Q terahertz metamaterials[J]. Chinese J Lasers, 2016, 43(1): 0106005.
邢维, 延凤平, 谭思宇, 等. 高品质因数太赫兹超材料设计的仿真分析[J]. 中国激光, 2016, 43(1): 0106005.
- [21] Gu J, Singh R, Azad A K, *et al.* An active hybrid plasmonic metamaterial[J]. Optical Materials Express, 2012, 2(1): 31-37.
- [22] Khalid A, Cumming D R S, Drysdale T D, *et al.* Direct fabrication of terahertz optical devices on low-absorption polymer substrates[J]. Optics Letters, 2009, 34(10): 1555-1557.
- [23] Sun L, Lü Z H, Wu W, *et al.* Double-grating polarizer for terahertz radiation with high extinction ratio[J]. Applied Optics, 2010, 49(11): 2066-2071.
- [24] Shchegolkov D Y, Azad A K, O'Hara J F, *et al.* Perfect subwavelength fishnetlike metamaterial-based film terahertz absorbers[J]. Physical Review B, 2010, 82(20): 205117.