

基于频率选择表面的太赫兹 FP 干涉滤光片设计

廖文焘^{1,2*}, 金尚忠¹, 李宏光², 郭宇烽¹, 解琪²¹中国计量大学光学与电子科技学院, 浙江 杭州 310018;²西安应用光学研究所, 陕西 西安 710065

摘要 在太赫兹频段,为解决 FP 干涉滤光片反射率低、适用频率范围小及角度稳定性差的问题,设计了一种新的太赫兹频率选择表面结构。首先进行了仿真分析,确定了结构的硅片厚度和金属网栅层数,并对参数进行了优化。然后对该结构的传输特性和角度稳定性进行了仿真,该结构在入射倾斜角 $0^\circ \sim 45^\circ$ 范围内具有较好的稳定性,最后加工出滤光片实物,对仿真结果的准确性进行验证。在太赫兹波垂直入射的情况下,实物测量结果与仿真结果基本吻合,在 1.34~2.34 THz 频率范围内,反射率和透射率分别为 91.0%~98.4% 和 0.7%~8.0%,满足 FP 干涉滤光片高反射率、低透射率要求。

关键词 材料; 太赫兹超材料; 频率选择表面; FP 干涉; 金属网栅; 高反射率

中图分类号 O43 文献标志码 A

DOI: 10.3788/CJL230820

1 引言

太赫兹波是介于红外和微波波段之间的电磁波,频率为 0.1~10.0 THz,处于电子学和光子学的过渡区域^[1-3]。太赫兹波在各种非导电材料中具有高穿透性,物质在太赫兹频段具有丰富的频谱,这些优越特性使得太赫兹波在医学、通信、安全性检测和成像等领域中得到了广泛的研究与应用^[4-6]。

超材料是基于金属、有机物和无机物等材料,由亚波长结构单元(结构单元尺寸约为波长的 1/10)周期性排列而成的人造复合结构,其结构可以是简单的周期性金属阵列,也可以是使用纳米制造技术制造的多层复杂结构^[7-8]。这种具有周期性阵列结构的超材料又称为频率选择表面(FSS),能够有选择性地对特定波长或频率的太赫兹波进行传输,与天然材料相比,具有更强的电磁响应,并具有超分辨率、超高折射率、复折射率、完美吸收和隐身等特点^[9-11]。目前 FSS 已经在太赫兹滤波器件上得到了广泛的应用,研究人员已经对方形、圆形和十字形等常规几何形状的周期性金属阵列结构展开了研究,十字形结构带宽窄,角度稳定性差,方形和圆形结构较十字形具有更大的带宽和更好的角度稳定性。

法布里-珀罗干涉仪(FPI)可用于太赫兹波长的测量,其中的 FP 干涉滤光片满足高反射率和低透射率的要求^[12]。2014 年, Lai 等^[13]基于二氧化钒薄膜设计了太赫兹 FP 干涉滤光片,其在 0.1~2.5 THz 频率范围内

的反射率可达 85%。2015 年,日本 PHLUXi 公司在柔性薄膜衬底上镀制了周期性金属阵列,滤光片在 1.39~2.32 THz 处的反射率在 90% 以上。2016 年,胡成园^[14]对 100 μm 厚的本征硅片进行腐蚀,得到的 13.965 μm 和 23.5 μm 厚的超薄硅片可分别在 1.0~2.1 THz 和 0.6~1.2 THz 频率范围内作为 FP 干涉滤光片,但反射率仅为 60%~70%,且加工过程过于复杂。2018 年, Zhao 等^[15]设计了一种光激发可切换宽带的 FSS,该结构可作为太赫兹 FP 干涉滤光片,在 0.7~1.0 THz 频率范围内的反射率达到 95% 以上。2020 年,王建扬等^[16]基于聚酰亚胺薄膜设计了双层栅格太赫兹 FP 滤光片,其在 0.95~1.82 THz 频率范围内的反射率达 93%,但入射角仅在 $0^\circ \sim 15^\circ$ 范围内能够保持较好的稳定性。上述研究对太赫兹波入射角度有极高的要求,存在结构设计和加工过程相对复杂,且反射带宽与反射率无法同时达到最优的问题。

现有研究表明, FSS 结构单元尺寸对太赫兹传输特性有决定性影响,在一定频段范围内, FSS 结构单元的周期越小,金属网栅阵列越厚,太赫兹波的反射率就越高。不同 FSS 结构单元对太赫兹波具有不同的影响效果,需要根据实际需要设计相应的结构。

为探究 FSS 结构与 FP 干涉滤光片性能之间的关系,并解决上述研究中存在的问题,本文基于高阻硅片和金属铜,仿真设计了一种新的 FSS 结构,并加工出相应滤光片实物,对仿真结果进行了验证。

收稿日期: 2023-05-10; 修回日期: 2023-05-27; 录用日期: 2023-06-19; 网络首发日期: 2023-07-04

基金项目: 装备发展部预先研制项目(31517050104)

通信作者: *lwt9926@163.com

2 太赫兹频率选择表面设计与理论分析

2.1 结构设计

在材料选择方面,高阻硅片(Si)相较于锗(Ge)、蓝宝石(Al_2O_3)和石英(SiO_2)等无机材料而言,对太赫兹的吸收率最小,铜(Cu)、金(Au)、铝(Al)和银(Ag)四种金属对太赫兹的反射特性没有太大的差异^[14]。

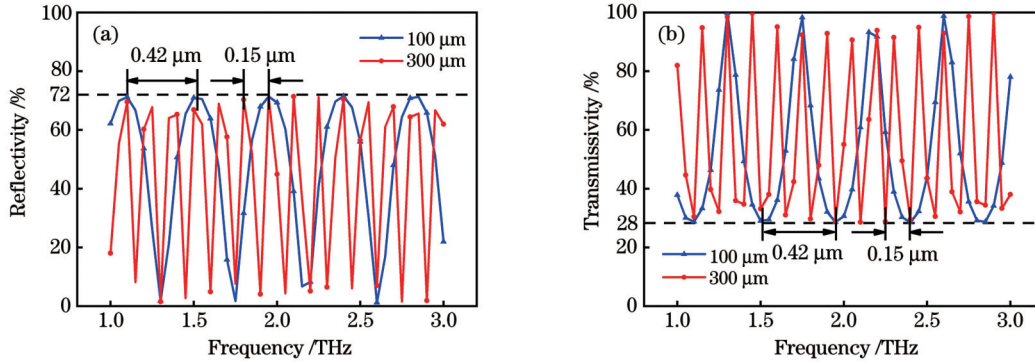


图 1 硅片厚度对传输特性的影响。(a)反射率;(b)透射率

Fig. 1 Effect of silicon wafer thickness on transfer characteristic. (a) Reflectivity; (b) transmissivity

图 2(a)为本文所提出的金属网栅的最小单元结构,其中矩形和圆形部分为高阻硅衬底,其余部分为金属铜网栅,参数 g 、 w 、 t 、 r 、 a 、 b 分别为金属网栅的周期、

图 1 为 100 μm 和 300 μm 厚的硅片在 1~3 THz 频段的传输特性,可以看出,硅片厚度对谐振周期有显著影响,对应的谐振周期分别为 0.42 THz 和 0.15 THz,而两者的反射率都在 72% 以下,透射率都在 28% 以上,数值并没有产生太大变化。100 μm 厚的硅片的谐振周期更大,数值变化更平稳,且硅片和铜的价格较低,因此,本设计选用厚度为 100 μm 的硅片作为衬底,选用金属铜作为网栅材料。

线宽、网栅厚度、圆孔半径及矩形长和宽。图 2(b)为单层金属网栅对应的 FSS 结构的整体示意图,该金属网栅结构包含了十字形、圆形和方形多种几何结构。

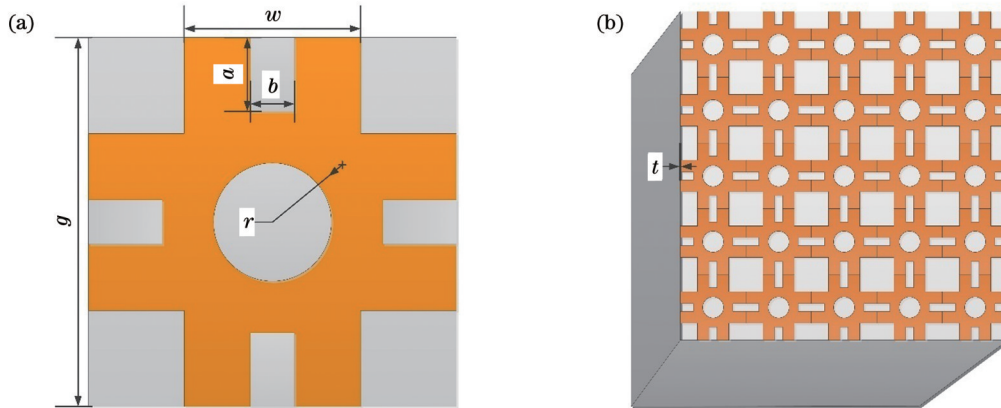


图 2 FSS 结构图。(a)金属网栅最小单元结构;(b)单层金属网栅对应的 FSS 结构的整体示意图

Fig. 2 Structural diagrams of FSS. (a) Minimum cell structure of metal grid; (b) overall diagram of FSS structure corresponding to single layer metal grid

2.2 理论分析

等效电路模型是用于分析周期性金属网栅结构电磁响应的一种常用方法^[17-18]。根据传输线理论^[19-20],感应电荷会在金属网栅边缘发生聚集,金属网栅及其空隙分别等效为电感(L)和电容(C)^[21]。因此,本文介绍的 FSS 结构所等效的电路模型为一对电容和电感并联,如图 3 所示。

当太赫兹波垂直入射到金属网栅表面且不考虑衬底时,金属网栅归一化导纳(Y)为

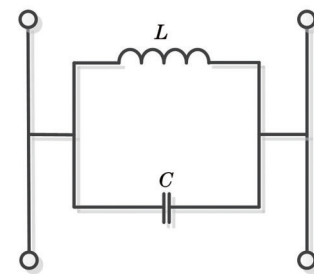


图 3 FSS 结构等效电路模型

Fig. 3 Equivalent circuit model of FSS structure

$$Y = f_0 \left[\ln \left(\sin \frac{\pi w}{2g} \right) \right] \left(\frac{f}{f_0} - \frac{f_0}{f} \right)^{-1}, \quad (1)$$

$$f = \frac{g}{\lambda}, \quad (2)$$

$$f_0 = 1 - 0.41 \frac{w}{g}, \quad (3)$$

式中: f 和 f_0 分别为归一化频率和归一化共振频率; λ 为太赫兹入射波的波长。

若网栅周期 g 远小于太赫兹波长 λ , 金属网栅的归一化导纳为

$$Y = -\frac{g}{\lambda} \left[\ln \left(\sin \frac{\pi w}{2g} \right) \right]. \quad (4)$$

波长为 λ 的太赫兹波在金属网栅中的透过率(T)为

$$T = \frac{4Y^2}{1 + 4Y^2}. \quad (5)$$

当存在衬底时, 波长为 λ 的太赫兹波在金属网栅中的透过率为

$$T(n_0, n_1) = \frac{n_0 n_1 T}{1 + T \left[\frac{(n_0 + n_1)^2}{4} - 1 \right]}, \quad (6)$$

式中: n_0 和 n_1 分别为入射和出射介质的折射率。

当整个 FSS 结构的吸收率极低时, 可忽略不计, 则反射率 $R(n_0, n_1)$ 和透射率 $T(n_0, n_1)$ 满足

$$R(n_0, n_1) + T(n_0, n_1) = 1. \quad (7)$$

综合考虑亚波长的概念、金属镀膜工艺、金属网栅单元形状以及现有研究结论等多方面因素, 最终确定了太赫兹波垂直入射 FSS 表面时金属网栅各参数的初始值, 如表 1 所示。

表 1 金属网栅最小单元结构的初始参数

Parameter	g	w	r	t	a	b
Value / μm	30	15	6.0	0.4	5.0	3.0

3 太赫兹干涉滤光片的仿真分析与结构优化

3.1 金属网栅层数对传输特性的影响

本文选用 HFSS 软件进行仿真分析, 首先根据图 2(a) 所示的金属网栅结构单元和表 1 所示的初始参数建立对应的 FSS 模型。为确定 FSS 结构的金属网栅层数, 分别仿真了单层、双层和三层网栅结构在 1.2~2.5 THz 频率范围内的传输特性, 结果如图 4 所示。可以看出, 反射率和谐振周期总体上随着 FSS 层数的增加而增大, 但在部分谐振点处变化更陡, 具有更小的极小值。双层网栅结构在 1.26、1.70、2.12 THz 频点附近的反射率分别为 94%、87% 和 74%, 三层网栅结构在 1.62、1.70、2.36 THz 频点附近的反射率分别为 84%、70% 和 66%。但是, 由于金属网栅层数的增加, 太赫兹波在硅衬底内部发生多次反射, 故结构对太赫兹波的吸收率过大, 双层网栅结构在 1.30~1.65 THz、1.75~2.05 THz 和 2.20~2.40 THz 频率范围内的透射率趋于 0, 三层网栅结构在 1.20~1.60 THz 和 1.70~2.30 THz 频率范围内的透射率趋于 0。多层金属网栅导致透过滤光片的太赫兹能量过低, 不利于探测器对太赫兹信号的探测, 而单层网栅结构在该频段范围内的反射率和透射率分别为 70%~98.8% 和 0.4%~19%, 且具有稳定的变化, 因此本文选用单层网栅结构。

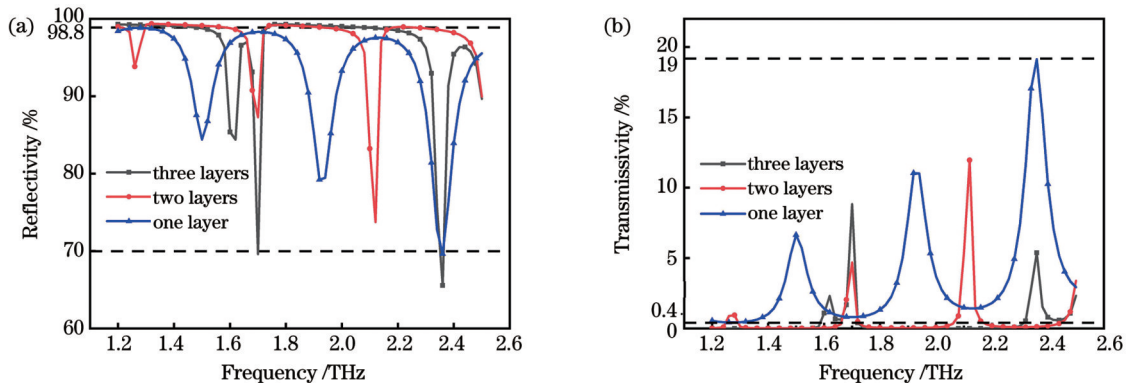


图 4 金属网栅层数对传输特性的影响。(a) 反射率; (b) 透射率

Fig. 4 Effect of number of metal grid layers on transfer characteristic. (a) Reflectivity; (b) transmissivity

3.2 网栅结构对传输特性的影响及参数优化

在其余参数不变的前提下, 依次改变表 1 中的各个参数, 以探究网栅结构对传输特性的影响。仿真结果如图 5(a)~(f) 所示, 反射率随着周期 g 、圆孔半径 r 和矩形边长 a 、 b 的减小而增大, 随着线宽 w 和网栅厚

度 t 的增大而增大, 并且 1.5、1.9、2.3 THz 频点附近的变化更加明显。另外, 周期 g 、线宽 w 和圆孔半径 r 对传输特性的影响较大。当 $g=35 \mu\text{m}$ 和 $w=11 \mu\text{m}$ 时, 反射率在 2.3 THz 附近已经低于 50%, 当 $r=9 \mu\text{m}$ 时, 反射率已经低于 60%。而网栅厚度 t 和矩形边长 a 、 b

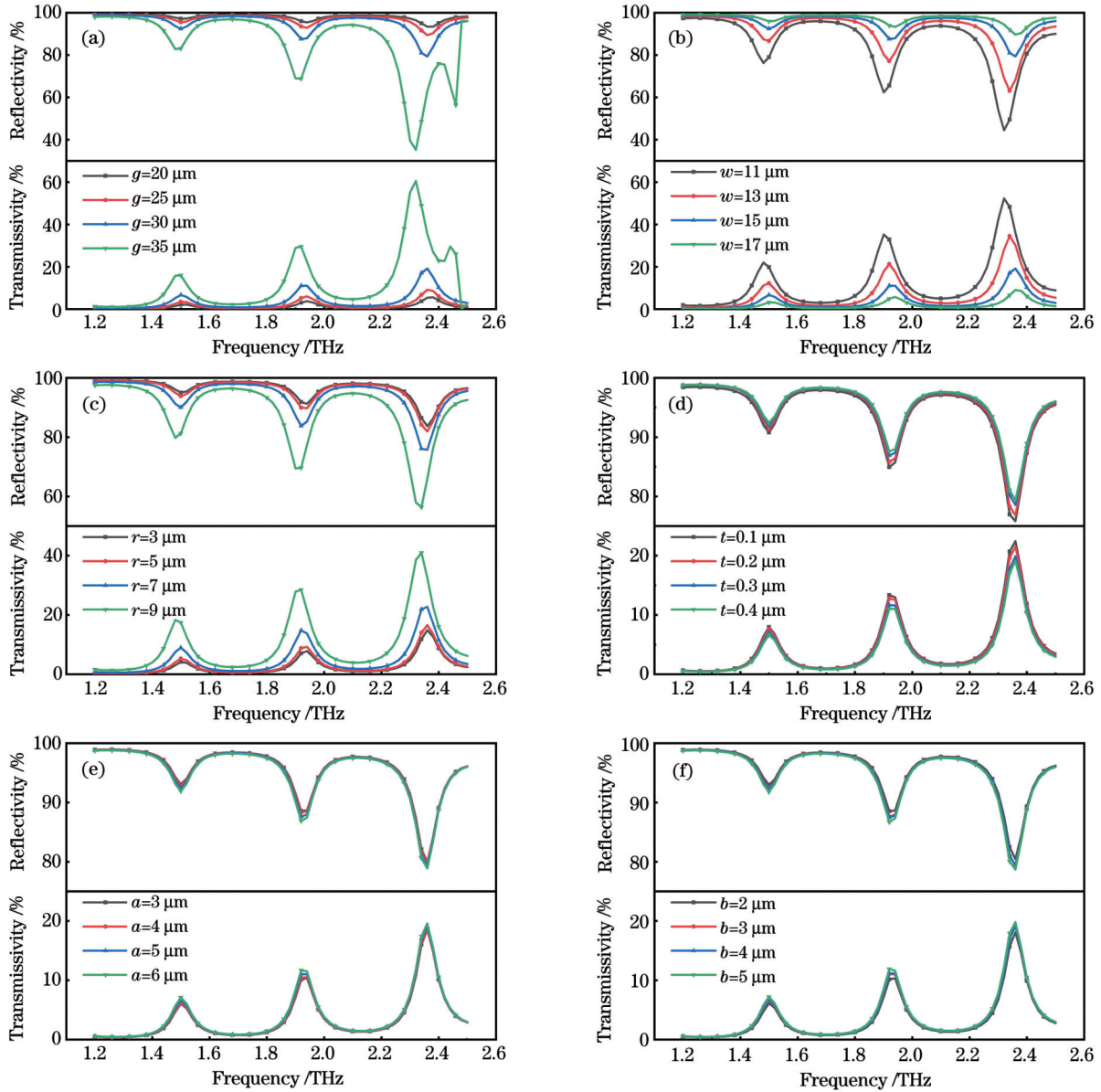


图5 金属网栅结构参数对传输特性的影响。(a)周期;(b)线宽;(c)圆孔半径;(d)网栅厚度;(e)矩形长度;(f)矩形宽度
Fig. 5 Effect of metal grid structure parameters on transfer characteristic. (a) Period; (b) grid thickness; (c) hole radius; (d) grid thickness; (e) rectangular length; (f) rectangular width

对传输特性并没有明显的影响,反射率在 2.3 THz 附近仍然保持在 80% 左右。因此,该网栅结构的周期 g 、线宽 w 和圆孔半径 r 是影响传输特性的主要因素。

为保证探测器能够在低透射率频段内实现对太赫兹波的有效探测并提高滤光片的反射率,在反射率 $> 91\%$ 、透射率 $> 0.7\%$ 两个指标的约束下,根据上述结构参数对传输特性的影响规律,对初始参数进行优化,以获得更宽的频率范围。最优参数如表 2 所示。

表 2 金属网栅最小单元结构的最优参数
Table 2 Optimal parameters of metal grid minimum cell structure

Parameter	g	w	r	t	a	b
Value / μm	24.2	14.4	3.8	0.3	5.2	3.4

该参数下对应的传输特性如图 6 所示,在 1.38 THz 频点处的透射率为 0.7%,在 2.32 THz 频点处的反射率为 91%。

另外,该 FSS 结构对应的表面电流密度如图 7(a) 所示,金属网栅表面的电流密度明显高于高阻硅表面,这是因为当太赫兹波垂直入射到该 FSS 结构中时,金属铜发生等离子体共振,激发出大量具有特定振荡频率的自由电子,这些自由电子会吸收其他频率的太赫兹入射波能量,产生了比高阻硅表面电流更大的感应电流。太赫兹入射波的一部分会穿透金属网栅和衬底,另一部分则会在金属网栅表面和衬底内部发生反射,即表现出透射和反射特性。如图 7(b) 所示,电场主要聚集在 FSS 结构表面,在高阻硅内部和另一端的空气介质中只有少量的电场存在。由此可见,太赫兹

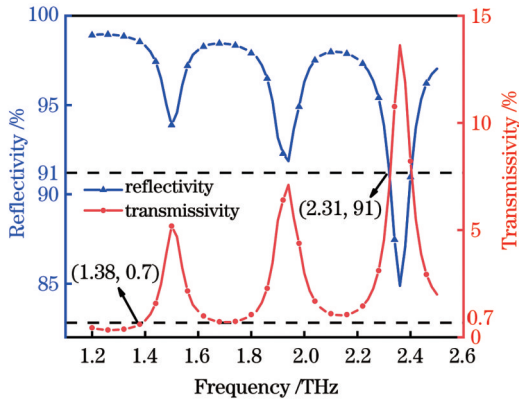


图 6 最优参数下 FSS 结构的传输特性

Fig. 6 Transfer characteristic of FSS structure under optimal parameters

入射波的大部分都被该 FSS 结构反射,仅有少部分穿透

了 FSS 结构表面,进入高阻硅内部并出射到空气介质中,从而实现了该 FSS 结构的高反射率、低透射率特性。

3.3 入射倾斜角对传输特性的影响

为了验证该 FSS 结构的角稳定性,分别仿真了太赫兹波入射倾斜角 (θ) 为 15° 、 30° 、 45° 和 60° 时的传输特性,结果如图 8 所示。可以看出,反射率随着入射倾斜角的增大而增大,透射率随之减小,并向右发生偏移。在 1.7 THz 和 2.2 THz 频点附近,太赫兹波入射倾斜角 θ 为 45° 时的反射率与垂直入射时的反射率差值分别为 0.5% 和 0.8%,透射率差值分别为 0.39% 和 0.5%,数值在合理的变化范围之内。当入射倾斜角 θ 为 60° 时,两者反射率的差值分别为 0.94% 和 1.22%,透射率的差值分别为 0.54% 和 0.75%,数值偏差较大,所以可以认为该 FSS 结构在 $\theta \in [0^\circ, 45^\circ]$ 范围内具有较好的角稳定性。

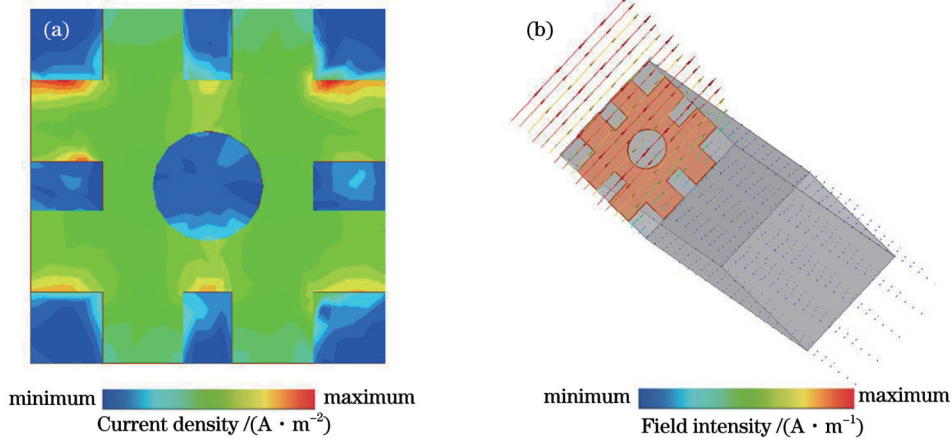


图 7 电流密度和电场强度矢量图。(a) 电流密度; (b) 电场强度

Fig. 7 Vector diagrams of current density and electric field intensity. (a) Current density; (b) electric field intensity

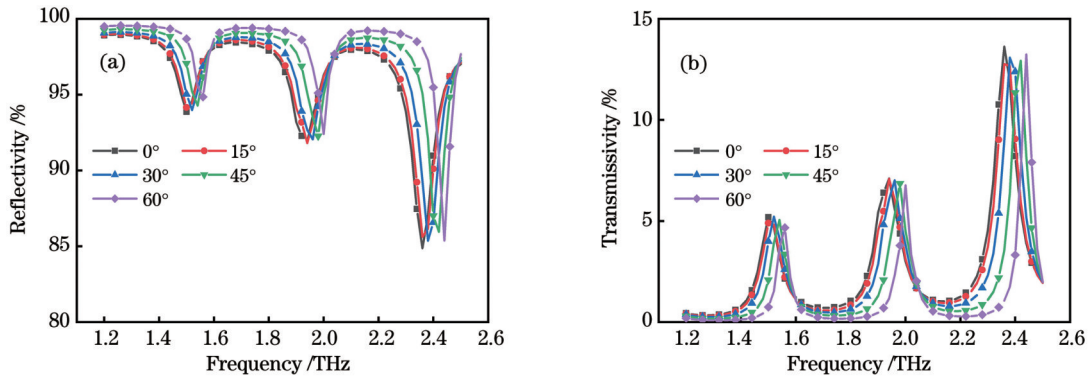


图 8 入射倾斜角 θ 对传输特性的影响。(a) 反射率; (b) 透射率

Fig. 8 Effect of incident offset angle θ on transfer characteristic. (a) Reflectivity; (b) transmissivity

4 实物测试与结果分析

按照表 2 所示的最优参数对实物进行加工。受加工工艺的影响,可以看出,图 9(a) 所示的滤光片实物表面 1、2 区域及边缘处存在未镀上金属网栅的情况,图 9(b) 所示的金属网栅表面 1、2、3 区域存在部分杂质。

由于太赫兹波会被空气中的水分吸收,能量衰减

很大,故在使用太赫兹时域光谱仪 (THz-TDS) 对滤光片实物进行测量前,先通入氮气使得测量环境的湿度保持在 2% 左右。太赫兹波垂直入射情况下的测量结果如图 10 所示,可以看出,滤光片实物的传输特性与仿真的传输特性基本一致,但存在 0.06 THz 的偏移,在 1.34~2.34 THz 频段范围内,反射率和透射率分别为 91%~98.4% 和 0.7%~8%。

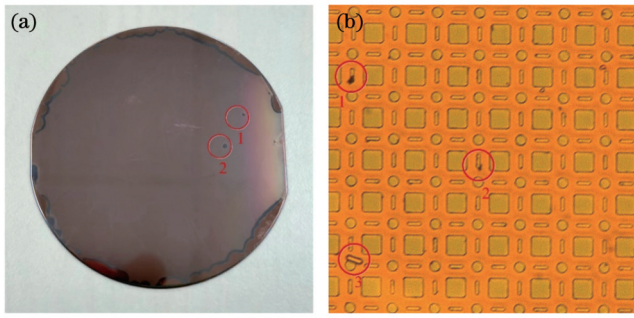


图9 滤光片加工结果。(a)滤光片表面;(b)金属网栅显微图
Fig. 9 Filter processing results. (a) Surface of filter;
(b) micrograph of metal grid

实物测量结果与仿真结果之间存在偏差主要由以

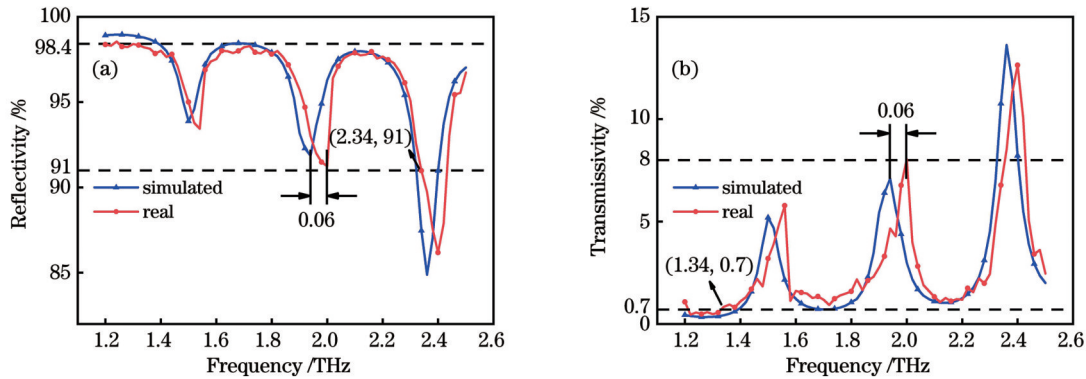


图10 实物传输特性与仿真传输特性的对比。(a)反射率;(b)透射率

Fig. 10 Comparison of real transfer characteristic with simulated transfer characteristic. (a) Reflectivity; (b) transmissivity

表3 太赫兹FP干涉滤光片的研究成果

Table 3 Terahertz FP interference filter research results

Year of publication	Filter type	Working frequency band /THz	Minimum reflectivity /%	Incident angle /($^{\circ}$)
2014	Terahertz filter based on vanadium dioxide thin films	0.1-2.5	85	0
2015	Flexible filter from PHLUXi	1.39-2.32	90	0
2016	Intrinsic silicon wafer with thickness of 13.965 μm	1.0-2.1	60	≤ 30
	Intrinsic silicon wafer with thickness of 23.5 μm	0.6-1.2		
2018	Photo-excited switchable broadband terahertz filter	0.7-1.0	95	0
2020	Double layer grid broadband terahertz filter	0.95-1.82	93	≤ 15
Proposed	Single layer grid terahertz filter	1.34-2.34	91	≤ 45

5 结 论

通过在 100 μm 厚的高阻硅片上镀制 0.3 μm 厚的金属铜网栅,设计了一种新的 FSS 结构。该结构的太赫兹 FP 干涉滤光片实物满足高反射率和低透射率的要求,在太赫兹波垂直入射的情况下,测量结果与仿真结果基本吻合,在 1.34~2.34 THz 范围内,反射率为 91%~98.4%,透射率为 0.7%~8%,且入射倾斜角在 0 $^{\circ}$ ~45 $^{\circ}$ 范围内具有较好的稳定性。该结构提高了滤光片的反射率和角度稳定性,拓宽了其适用频率范围。

下几方面引起:1)仿真过程中选用的计算模型与实际测量存在差异,在仿真过程中,太赫兹波的传输介质为真空,而在实物测量过程中,太赫兹波的传播介质为湿度为 2% 的氮气,太赫兹波能量仍然存在一定的损耗。2)受加工工艺的影响,金属网栅的实际尺寸与仿真模型之间存在一定的误差,且硅片表面的部分区域存在未镀上金属网栅或网栅出现断裂的情况,在测量过程中,由于硅片面积较大,每次测量的区域并不完全相同,故数据在测量过程中出现偏差。3)THz-TDS 仪器本身存在的测量误差及测量过程中存在的信号噪声对测量结果造成影响。

将本文结果与已有研究成果进行对比,结果如表 3 所示。

研究结果为 FSS 结构及相关太赫兹器件的研究提供了新的参考。另外,受加工工艺的影响,滤光片实物存在一定的瑕疵,在实际使用过程中可能会对太赫兹波干涉效果造成一定的影响,在之后的工作中,将从镀膜工艺入手,进一步完善加工工艺。

参 考 文 献

- [1] Lamberti P, La Mura M, Tucci V, et al. The performance of graphene-enhanced THz grating: impact of the gold layer imperfectness[J]. Materials, 2022, 15(3): 786.
- [2] Yang J, Gong C, Sun L, et al. Tunable reflecting terahertz filter

- based on chirped metamaterial structure[J]. *Scientific Reports*, 2016, 6: 38732.
- [3] Mavrona E, Rajabali S, Appugliese F, et al. THz ultrastrong coupling in an engineered Fabry-Perot cavity[J]. *ACS Photonics*, 2021, 8(9): 2692-2698.
- [4] 周维, 陈骏, 李豪, 等. 太赫兹电磁超材料完美吸收器的研究进展[J]. *激光与光电子学进展*, 2022, 59(11): 1100006.
Zhou W, Chen J, Li H, et al. Progress of electromagnetic metamaterial perfect absorber based on terahertz band[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2022, 59(11): 1100006.
- [5] Jaworski N, Andrushchak N, Lobur M, et al. A finite element model of terahertz substrate-based wire-grid polarizer[J]. *Mathematics and Computers in Simulation*, 2021, 188: 404-414.
- [6] 朱海亮, 王开, 邱昱玮, 等. 太赫兹超材料及其应用综述[J]. *遥测遥控*, 2021, 42(4): 18-35.
Zhu H L, Wang K, Qiu Y W, et al. A review of terahertz metamaterials and applications[J]. *Journal of Telemetry, Tracking and Command*, 2021, 42(4): 18-35.
- [7] Kuznetsov S A, Gelfand A V, Fedorinin V N, et al. High-performance frequency selective surface filters for terahertz applications[C]//2019 44th International Conference on Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves (IRMMW-THz), September 1-6, 2019, Paris, France. New York: IEEE Press, 2019.
- [8] Wang Q H, Gao B T, Raglione M, et al. Design, fabrication, and modulation of THz bandpass metamaterials[J]. *Laser & Photonics Reviews*, 2019, 13(11): 1900071.
- [9] Nguyenthi D, Okabe K, Toyoshima F, et al. Observation of normal mode splitting in THz Fabry-Pérot microcavity made of wire grid structures containing cut wire metamaterials[J]. *Journal of Applied Physics*, 2020, 128(7): 073102.
- [10] 张博文, 张怡蕾, 陆振刚. 具有子圆环的圆环金属网栅电磁屏蔽特性[J]. *现代应用物理*, 2022, 13(4): 168-174, 188.
Zhang B W, Zhang Y L, Lu Z G. Electromagnetic shielding characteristics of circular metal grid with sub-circular ring[J]. *Modern Applied Physics*, 2022, 13(4): 168-174, 188.
- [11] Manikandan E, Princy S S, Sreeja B S, et al. Structure metallic surface for terahertz plasmonics[J]. *Plasmonics*, 2019, 14(6): 1311-1319.
- [12] Fan K B, Koulakis J, Holczer K, et al. Ultrathin metasurface wavelength-selective mirror for millimeter/terahertz wave Fabry-Perot cavities[J]. *Journal of Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves*, 2020, 41(4): 365-374.
- [13] Lai W W, Zhang H W, Wen Q Y, et al. A tunable reflector based on VO₂ thin films in terahertz optical systems[J]. *Proceedings of SPIE*, 2014, 9300: 93000B.
- [14] 胡成园. 基于级联双FP腔结构的THz窄带滤波器研究[D]. 南京: 东南大学, 2016.
Hu C Y. Research on THz narrow band filter based on cascaded double FP cavity structure[D]. Nanjing: Southeast University, 2016.
- [15] Zhao J C, Cheng Y Z, Cheng Z Z. Design of a photo-excited switchable broadband reflective linear polarization conversion metasurface for terahertz waves[J]. *IEEE Photonics Journal*, 2018, 10(1): 4600210.
- [16] 王建扬, 吴倩楠. 基于双层格栅的超材料太赫兹宽频反射器[J]. *中国激光*, 2020, 47(6): 0614002.
Wang J Y, Wu Q N. Metamaterial terahertz broadband reflector with double-layer grid[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2020, 47(6): 0614002.
- [17] 吴文, 宗志园, 方大纲. 频率选择表面的等效电路设计方法综述[J]. *微波学报*, 2022, 38(5): 73-79.
Wu W, Zong Z Y, Fang D G. A review on equivalent circuit design methods for frequency selective surfaces[J]. *Journal of Microwaves*, 2022, 38(5): 73-79.
- [18] 王义富. 频率选择表面等效电路的计算与分析[J]. *太赫兹科学与电子信息学报*, 2019, 17(2): 258-262.
Wang Y F. Calculation and analysis of equivalent circuit for Frequency Selective Surface[J]. *Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology*, 2019, 17(2): 258-262.
- [19] Lu Z G, Liu Y S, Wang H Y, et al. Verification and improvement of equivalent refractive index models for evaluating the shielding effectiveness of high-transmittance double-layer metallic meshes[J]. *Applied Optics*, 2016, 55(20): 5372-5378.
- [20] Min M, Wu C Q, Li C, et al. Developing the science product algorithm testbed for Chinese next-generation geostationary meteorological satellites: Fengyun-4 series[J]. *Journal of Meteorological Research*, 2017, 31(4): 708-719.
- [21] 李天诚, 陈鹤鸣. 基于频率选择表面的太赫兹双通带滤波器研究[J]. *红外*, 2021, 42(7): 17-25, 42.
Li T C, Chen H M. Research on terahertz dual-passband filter based on frequency selective surface[J]. *Infrared*, 2021, 42(7): 17-25, 42.

Design of Terahertz FP Interference Filter Based on Frequency Selective Surfaces

Liao Wentao^{1,2*}, Jin Shangzhong¹, Li Hongguang², Guo Yufeng¹, Xie Qi²

¹College of Optical and Electronic Technology, China Jiliang University, Hangzhou 310018, Zhejiang, China;

²Xi'an Institute of Applied Optics, Xi'an 710065, Shaanxi, China

Abstract

Objective The Fabry-Perot (FP) interferometer is an effective tool for measuring the wavelengths of terahertz waves. It exhibits the advantages of easy adjustment, simple structure, quick measurement, and high accuracy, making it a highly effective tool in the field of wavelength measurements. The FP interferential filter should satisfy the requirements of high reflectivity and low transmissivity. Interference fringes generated by low-reflectivity filters exhibit low precision and resolution, leading to increased errors in wavelength measurements. Natural nonmetallic materials exhibit low reflectivity for Terahertz waves. However, by depositing a periodic metal array on their surface, a frequency-selective surface (FSS) can significantly enhance their reflectivity for Terahertz waves. Currently, this is the preferred method for designing FP interferential filters. Extant studies indicate that the dimensions of FSS structural units decisively impact Terahertz transmission characteristics. Many researchers examined metal array structures, but the compatibility among performance parameters, such as reflectivity, applicable frequency range, and angle stability, has not been satisfactorily realized. To further explore the relationship between the FSS structure and FP interferential filter performance and address the issues presented in extant research, in this study, a new FSS structure is proposed.

Methods The FSS structure proposed in this study utilize high-resistance silicon and copper. Firstly, in the frequency range of 1.0–3.0 THz, the relationship between thickness of high-resistance silicon and resonance period is simulated using the HFSS software. A high-resistance silicon with a thickness of 100 μm is determined as the substrate material. In the frequency range of 1.2–2.5 THz, the relationship between number of metal grid layers and Terahertz wave transmission characteristic is simulated, confirming the use of a single-layer grid for the FSS structure. The influence of various structural parameters on Terahertz wave transmission characteristics is analyzed, and parameter optimization is performed to determine the optimal size parameters. The current density and electric field intensity of the FSS structure under optimal parameters are simulated to analyze the reasons for its high reflectivity. Furthermore, the angular stability of the optimized structure is investigated. Finally, based on the size parameters, physical fabrication is conducted, and the transmission characteristics of the physical samples are measured using a Terahertz time-domain spectrometer (THz-TDS) in the nitrogen environment with 2% humidity. The measurement results are compared with the simulation results to validate their accuracy.

Results and Discussions With respect to the FSS structure designed in this study, period, line width, and circular hole radius correspond to the main factors affecting the transmission characteristics. The reflectivity increases as the period and circular hole radius decrease, and the reflectivity increases with an increase in the line width (Fig. 6). When the Terahertz wave impinges vertically on the FSS structure, the copper metal undergoes plasmonic resonance, resulting in a significantly higher current density when compared with the surface of high-resistance silicon. Simultaneously, the electric field is mainly concentrated on the surface of the FSS structure, with only a minor portion of the electric field present in the high-resistance silicon and air media (Fig. 7). Hence, the FSS exhibits high reflectivity. The reflectivity escalates as the incident angle increases. Around the frequencies of 1.7 THz and 2.2 THz, the differences between the reflectivity at an incident angle of 45° and the reflectivity at normal incidence are 0.5% and 0.8%, respectively. The differences in transmissivity are 0.39% and 0.5%, respectively, which are within a reasonable range of variation (Fig. 8). Owing to the influence of the manufacturing process, some defects are observed in the physical filter and metal grid structure (Fig. 9). Through measurements, the physical filter exhibits reflectivity ranging from 91% to 98.4% and transmissivity ranging from 0.7% to 8% within the frequency range of 1.34–2.34 THz, which are in good agreement with the simulation results (Fig. 10). Thus, the design requirements are satisfied.

Conclusions This study presents a new FSS structure fabricated by depositing a single-layered metal copper grid on a high-resistance silicon wafer. A physical Terahertz FP interferential filter corresponding to this structure satisfies the requirements of high reflectivity and low transmissivity. Under vertical THz-wave incidence, the measured results are in good agreement with the simulation results. In the frequency range of 1.34–2.34 THz, reflectivity ranges from 91% to 98.4% and transmissivity ranges from 0.7% to 8%. The structure also exhibits good stability within an incident angle range of 0° – 45° . This research improves the reflectivity of the filter, widens its applicable frequency range, and enhances the angle stability. Additionally, it provides new references for the study of FSS structures and related terahertz devices. Finally, given the influence of the manufacturing process, some defects exist in the physical filter, which may affect the interference of Terahertz waves during practical usage. In future studies, further improvements in terms of the coating processes can enhance the research findings.

Key words materials; terahertz metamaterial; frequency selective surface; FP interference; metal grid; high reflectivity