

引用本文:孙书超,孟阔.表面修饰的亚波长金属 Cu 狭缝结构透射特性研究[J].光通信技术,2023,47(5):45–49.

表面修饰的亚波长金属 Cu 狭缝结构透射特性研究

孙书超,孟阔*

(北京信息科技大学 仪器科学与光电工程学院,北京 100192)

摘要:为了深入研究表面修饰余弦凹槽的亚波长结构对太赫兹波透射特性的调控规律,提出一种表面修饰余弦凹槽的太赫兹亚波长金属 Cu 狭缝结构,基于时域有限差分法,对亚波长金属 Cu 狭缝结构的太赫兹波透射光谱特性进行模拟。仿真结果表明,通过改变金属 Cu 狭缝结构上下表面余弦凹槽的结构排布、数量、周期、深度及狭缝深度、宽度等参量,实现了对太赫兹波透射强度的调控。

关键词:太赫兹;表面等离子;余弦凹槽;亚波长结构

中图分类号:TN929;O44 文献标志码:A 文章编号:1002-5561(2023)05-0045-05

DOI: 10.13921/j.cnki.issn1002-5561.2023.05.009

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Study of the transmission characteristics of surface modified sub-wavelength metal Cu slit structure

SUN Shuchao, MENG Kuo*

(School of Instrument Science and Opto-Electronics Engineering,
Beijing Information Science and Technology University, Beijing 100192, China)

Abstract: In order to study the regulation of terahertz wave transmission characteristics by subwavelength structure of surface modified cosine grooves, a terahertz sub-wavelength metal Cu slit structure is proposed and the transmission spectrum characteristics of terahertz wave are simulated based on finite-difference time-domain method. The simulation results show that the transmission intensity and phase characteristics of terahertz waves can be controlled by changing the structure configuration, number, period and depth of the cosine grooving on the upper and lower surfaces of metal Cu slit structure.

Key words: terahertz, surface plasmonics, cosine groove, sub-wavelength metal structure

0 引言

近年来,研究人员通过改变孔径结构类型^[1]、对亚波长凹槽表面进行修饰^[2],采用狭缝结构的纵向调制^[3]、使用不同形状的狭缝^[4]等方式,对不同亚波长金属结构模型的光透射特性进行了理论推导和实验研究。研究发现,在太赫兹波段,金属普遍具有与微波波段类似的理想金属光学特性,亚波长金属器件在调控和传输太赫兹波^[5]方面具有极低的吸收损耗优势。

收稿日期:2023-03-14。

基金项目:北京市自然科学基金项目(批准号:4184087)资助。

作者简介:孙书超(1996—),女,山东青岛人,硕士研究生,现就读于北京信息科技大学仪器科学与光电工程学院电子信息专业,主要研究方向为太赫兹波段下金属微纳结构的设计优化、FDTD 算法研究及其仿真验证。

*通信作者:孟阔(1982—),男,博士,副研究员,主要研究方向为太赫兹技术、光纤激光器。



随着太赫兹技术^[6]的发展和使用推广,人们发现太赫兹波功能器件在光场调控方面(滤波、传输损耗)存在诸多问题,需要使用新型太赫兹波调控器件^[7]来替代。基于表面等离子体激元(SPPs)的亚波长金属结构有利于太赫兹光场调控^[8]和降低光传输损耗,为太赫兹波功能器件^[9]的改良提供了契机。但是,在设计和制造表面微修饰以及凹槽修饰的金属亚波长结构时缺乏系统性和准确性。因此,深入研究表面修饰的亚波长结构对太赫兹波滤波特性的影响,对提高亚波长元器件对太赫兹波的传输效率和调控性能具有重要意义。本文基于 SPPs 调控对太赫兹波原理,设计了亚波长金属 Cu 狭缝结构。

1 亚波长金属 Cu 狭缝结构设计

SPPs 只存在于相对介电常数符号相反的两种材料的交界面上。在太赫兹波段,金属表面并未形成光

孙书超,孟阔:表面修饰的亚波长金属 Cu 狭缝结构透射特性研究

波段的 SPPs,而是产生了类似于 SPPs 的人工表面等离子体(SSP)效应^[10]。基于 SSP 理论^[11],SSP 表面波会被束缚在金属结构表面,它增强了电磁波的渗透,减小了 SPPs 在结构之间的串扰,从而降低了电磁波的衰减损耗。

在太赫兹波段,金属 Cu 电导率很大,其介电常数的实部和虚部都远远大于空气的介电常数。此时,波矢传播常数 $k_{sp} \approx k_0 \sqrt{\epsilon_d}$ (k_0 为入射光的波矢, ϵ_d 为介质材料的介电常数),这使得垂直于界面的波矢很小,即表面等离子波(SPW)无法被束缚在金属表面传播。因此,太赫兹电磁场激发的 SPW 很难在金属与介质交界面实现有效传输。然而,当太赫兹波入射到亚波长金属 Cu 狭缝时,这会激发产生 SPPs,而表面顺滑的余弦型凹槽结构则更有利于 SPPs 沿金属表面传播,降低衰减损耗,并因此增强狭缝出射端口透射光的透射率。

本文基于 SPPs 原理设计了一种余弦凹槽表面修饰的亚波长金属 Cu 狭缝结构,如图 1 所示。狭缝的宽度为 w ,狭缝深度为 L ,余弦周期为 T ,余弦凹槽深度为 h 。

本文在金属表面刻蚀周期性凹槽、圆孔等亚波长结构,这相当于改变了金属-介质表面的场匹配条件,有效地促进了 SPPs^[12]被约束在亚波长结构的金属表面,从而增强了 SSP 表面波在金属-介质表面的传输性能,提高了亚波长金属结构对入射太赫兹波的调控能力。

2 数值模拟与仿真分析

本文基于有限时域差分(FDTD)法^[13]对太赫兹亚波长金属 Cu 狭缝结构的透射特性进行仿真模拟。首先,对电磁场变量在直角坐标系中各个分量时空微分,即按照一定的时间步长和空间单元-Yee 元胞^[14]进行离散网格化;其次,确定时空网格单元尺寸以保证

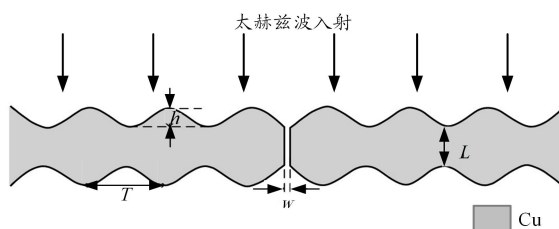


图 1 亚波长金属 Cu 狭缝结构示意图

仿真模拟精度(失真误差可忽略不计)。为建立高精度近似解的差分方程,需要满足数值色散和稳定性等条件。根据仿真电磁波频段的上限频率 f_{max} (对应波长 λ_{min}),空间网格单元尺寸满足: $\Delta x = \Delta y \leq \lambda_{min}/N$ ($N \geq 10$)其中, Δx 和 Δy 分别为 x 和 y 方向的空间步长, N 为共振模式数。在太赫兹波段,合理的二维元胞尺寸设定在 $\Delta x = \Delta y = 10^{-6}$ s 附近,对应时间步长 $\Delta t = \Delta y/(2c)$, c 为真空光速。

本文利用自编的 FDTD 法仿真程序,对具有余弦凹槽修饰的亚波长金属 Cu 狭缝结构进行了透射特性研究。具体的仿真参数如下:狭缝宽 $40 \mu m$,长 $120 \mu m$,余弦凹槽周期为 $120 \mu m$,深度为 $90 \mu m$ 。仿真过程中所用的太赫兹高斯脉冲如图 2 所示。该脉冲以横磁波(TM)模式垂直入射到亚波长余弦凹槽金属表面,其中心频率为 $6.5 THz$,频宽约为 $10 THz$ 。

2.1 不同表面刻蚀余弦凹槽

不同表面刻蚀余弦凹槽结构示意图如图 3 所示。本文模拟在狭缝单面和两面加入亚波长周期的余弦凹槽结构,仿真研究其对太赫兹波的透射特性,得到亚波长金属 Cu 狭缝结构透射特性图如图 4 所示。可以看出,在未加入余弦凹槽情况下,狭缝透射率在整个太赫兹波段无明显透射峰且透射强度很低;在狭缝的一侧加入余弦凹槽后,太赫兹光的透射强度明显增强;当狭缝两面都加入余弦凹槽,产生明显的透射峰位,且相位变化增强。因此,表面修饰的亚波长结构对太赫兹波有过滤作用。根据 SSP 表面波的激发原理,亚

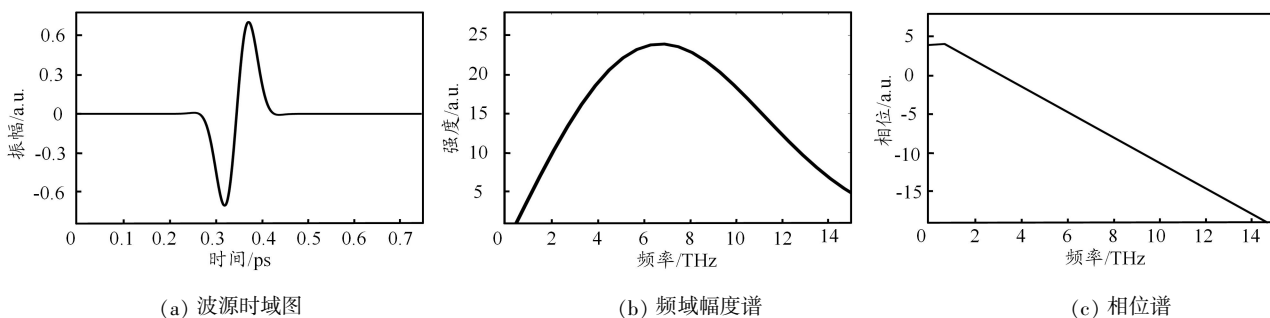


图 2 太赫兹高斯脉冲

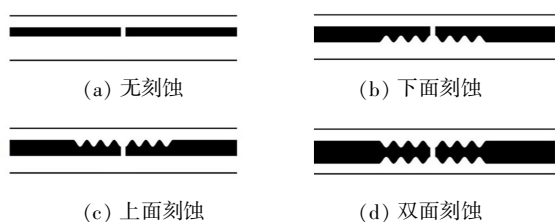
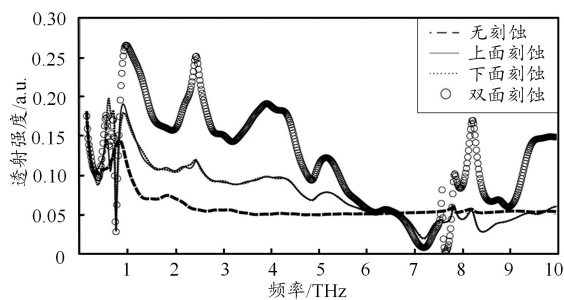
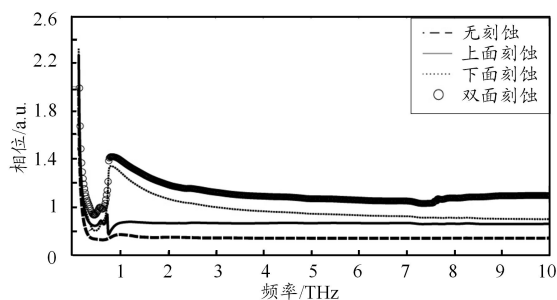


图3 不同表面刻蚀余弦凹槽结构示意图



(a) 强度谱



(b) 相位谱

图4 表面刻蚀不同余弦凹槽的亚波长金属 Cu 狭缝结构透射特性图

波长金属 Cu 狭缝结构可看作由前后 2 个端口构成的低阈值共振腔, 狭缝和表面余弦凹槽周期结构是 2 个激发单元, 当入射太赫兹波通过此亚波长结构时, 激发产生的表面波在狭缝和余弦凹槽周期结构间产生类法布里 - 珀罗(F-P) 腔效应, 导致腔模共振, 发生相长相消干涉现象。例如, 在 1 THz 和 2.5 THz 处电磁波的透射强度增加, 产生了明显的透射峰。

2.2 双面刻蚀不同数目余弦凹槽

本文对双面刻蚀不同数目余弦型周期凹槽的亚波长金属 Cu 狭缝结构(如图 5 所示)的透射特性进行仿真分析。随着双面余弦凹槽周期结构数 n 从 1 个增加到 5, 得到亚波长狭缝双面刻蚀不同数目余弦凹槽对太赫兹波的透射强度和相位特性, 结果如图 6 所示。

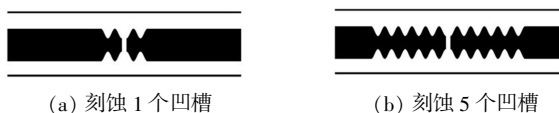
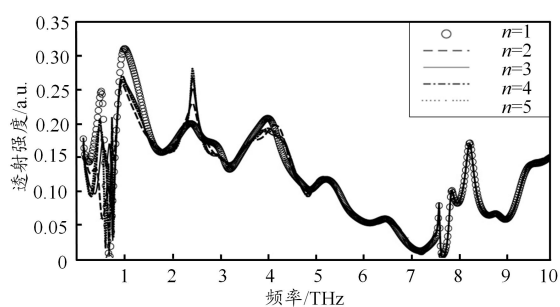
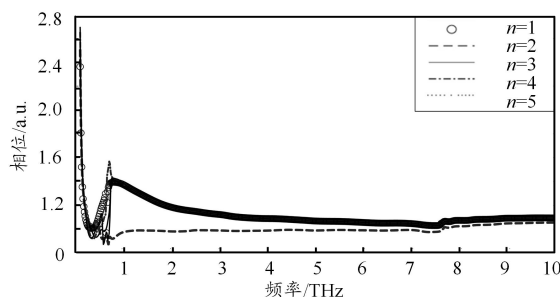


图5 双面刻蚀不同数目余弦凹槽的亚波长金属 Cu 狭缝结构示意图



(a) 强度谱



(b) 相位谱

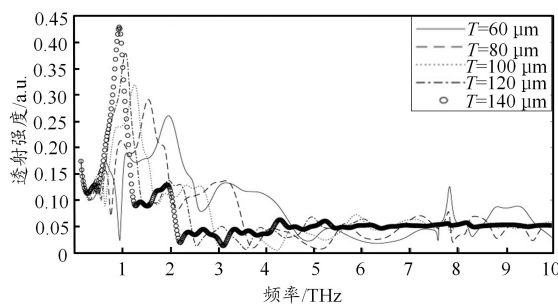
图6 不同余弦凹槽数目的亚波长金属 Cu 狭缝结构透射特性图

可以看出, 在 0.5 THz 和 1 THz 附近的透射峰强度随余弦凹槽数目增加而减弱。相反, 在 2.5 THz 附近的透射峰强度随余弦凹槽数目增加有明显增强。从图 6(b) 可以看出, 随着凹槽数目的减小, 低频区域的相位变化逐渐平缓。在更高频段, 太赫兹光透射情况对余弦凹槽数目的变化并不敏感。

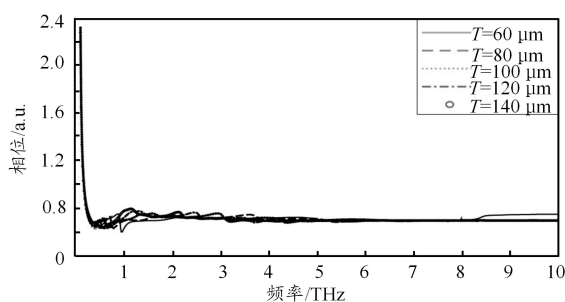
2.3 双面刻蚀不同余弦凹槽周期

为了研究双面狭缝上 Cu 金属的透射特性, 通过改变余弦凹槽的周期 T , 从 $120 \mu\text{m}$ 逐渐变化到 $280 \mu\text{m}$, 得到的实验结果如图 7 所示。可以看出, 随余弦凹槽周期的增大, 2 THz 处的透射增强峰位向低频偏移且强度明显增强, 这表明当余弦凹槽的周期增加到一定程度时会产生透射峰, 但对相位变化的影响并不显著。

2.4 双面刻蚀不同余弦凹槽深度



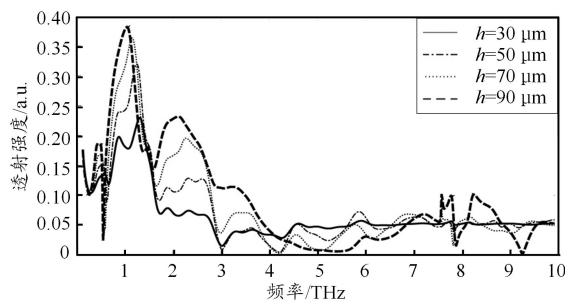
(a) 强度谱



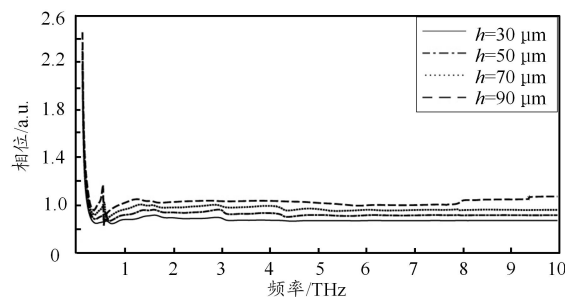
(b) 相位谱

图7 余弦凹槽周期不同的亚波长金属 Cu 狭缝透射特性图

狭缝宽度和长度保持不变, 将余弦凹槽周期设置为 $240 \mu\text{m}$, 改变余弦凹槽深度 (h 从 $30 \mu\text{m}$ 逐渐变化至 $90 \mu\text{m}$) 时, 研究不同余弦凹槽深度对亚波长金属 Cu 狭缝的透射特性影响, 结果如图 8 所示。可以看出, 随着余弦凹槽深度的增加, 低频区域的透射峰强度明显增强, 相位变化也明显增强。当余弦凹槽深度为 $90 \mu\text{m}$ 时, 在 5 THz 处出现了明显的透射阻断现象, 即消



(a) 强度谱



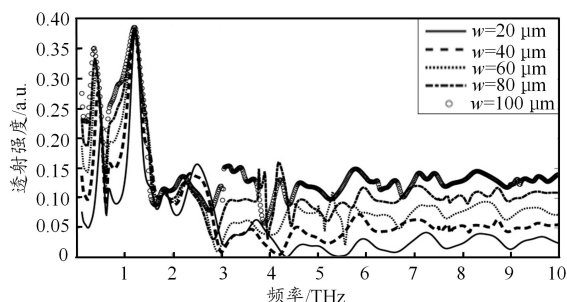
(b) 相位谱

图8 不同余弦凹槽深度的亚波长金属 Cu 狭缝结构透射特性图

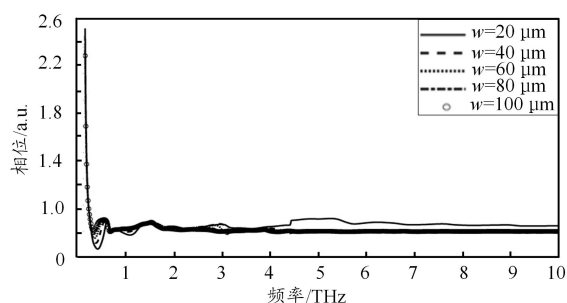
光吸收区域, 并且这个现象对大于 6 THz 的更高频域的透射效果产生了显著的影响。

2.5 双面刻蚀不同狭缝宽度

设余弦凹槽的周期为 $200 \mu\text{m}$, 深度为 $50 \mu\text{m}$, 研究不同狭缝宽度 (w 从 $20 \mu\text{m}$ 逐渐变化至 $100 \mu\text{m}$) 对亚波长金属 Cu 狭缝结构的透射特性的影响, 结果如图 9 所示。可以看出, 降低狭缝宽度导致低频区域 2



(a) 强度谱



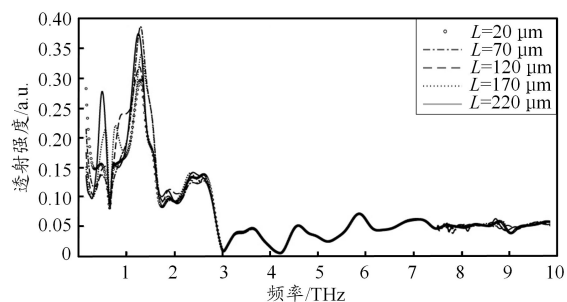
(b) 相位谱

图9 不同狭缝宽度的亚波长金属 Cu 狭缝结构透射特性图

个透射峰位 (0.5 THz 和 1.2 THz) 的谱宽降低, 但是强度没有明显减弱, 且高频区域的透射峰强度明显变弱。狭缝宽度的变化对相位的影响不大。

2.6 双面刻蚀不同狭缝深度

设狭缝宽度为 $40 \mu\text{m}$, 余弦凹槽周期为 $200 \mu\text{m}$, 深度为 $50 \mu\text{m}$, 研究不同狭缝深度 (从 $20 \mu\text{m}$ 逐渐增加至 $220 \mu\text{m}$) 对亚波长金属 Cu 狭缝结构的透射特性的影响, 结果如图 10 所示。可以看出, 随着狭缝深度增加, 在 0.5 THz 和 1.2 THz 处因周期余弦凹槽产生的 2 个透射峰明显增强, 振幅和相位变化一致, 但高频区域的透射强度没有明显变化。这是由于入射太赫兹波在余弦凹槽微腔结构和狭缝中产生共振效应需要匹配条件, 即透射共振增强的电磁波长与金属狭缝的长



(a) 强度谱

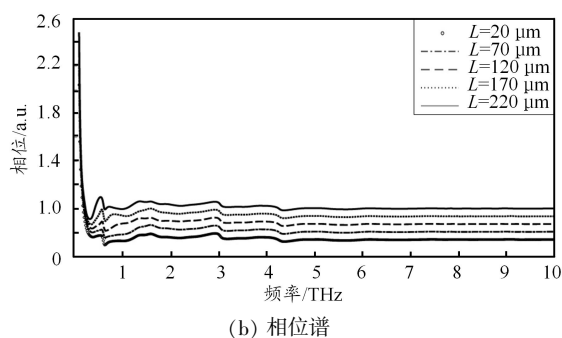


图 10 不同狭缝深度的亚波长金属 Cu 狭缝结构透射特性图

度之间需满足: $\lambda = \frac{2n_{\text{eff}}L}{N}$, 其中, n_{eff} 为狭缝的有效折射率, 受狭缝宽度和其介质的内部折射率影响。

3 结束语

本文研究了太赫兹波 TM 模式垂直入射金属 Cu 表面时, 余弦凹槽对亚波长金属 Cu 狭缝结构透射特性的影响。并且, 金属狭缝和余弦凹槽作为 2 种不同的 SPPs 激发模块, 其几何参数和位置的变化对太赫兹电磁场在亚波长金属结构表面的传输和损耗有明显的影响, 在透射谱中表现为透射共振峰的偏移和消长。该研究有助于改善太赫兹亚波长金属狭缝结构的滤波和增透特性, 有助于进一步探索亚波长结构的透射增强机理和 SPPs 的物理机制, 为太赫兹 SSP 集成器件在微型片上的应用提供了可靠的理论数据。这样的研究具有一定的参考价值。

参考文献:

[1] GARCIA-VIDAL J F, MARTIN-MORENO L, EBBESEN T W. Light

passing through subwavelength apertures [J]. Reviews of Modern Physics, 2010, 82(1): 729–787.

[2] 陈秀武. 内嵌凹槽对金属亚波长狭缝透射特性的影响 [J]. 西北师范大学学报(自然科学版), 2018, 54(1): 43–47.

[3] RANCE H J, HAMILTON O K, SAMBLES J R, et al. Phase resonances on metal gratings of identical, equally spaced alternately tapered slits [J]. Applied Physics Letters, 2009, 95(4): 041905-1–041905-3.

[4] 周静, 王鸣. 环形狭缝腔阵列光学特性的研究 [J]. 物理学报, 2015, 64(22): 361–369.

[5] 张佳荣, 刘佳和, 常超, 等. 三色激光脉冲诱导液体介质产生太赫兹波的仿真研究 [J]. 光通信技术, 2023, 47(2): 53–58.

[6] 刘小明, 俞俊生, 陈晓东. 毫米波及太赫兹准光学技术: 理论、应用与发展 [J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2022, 20(7): 631–652.

[7] 王晨阳, 贺训军, 姜久兴. 太赫兹超材料仿真设计与制备研究 [J]. 哈尔滨理工大学学报, 2022, 27(1): 115–120.

[8] RAN J, CHEN T, HAO H G, et al. Electrically controlled terahertz modulator with deep modulation and slow wave effect via a HEMT integrated metasurface [J]. Optics Express, 2022, 30(10): 16134–16144.

[9] 沈仕远, 王元圣, 池瑶佳, 等. 基于编码超表面的双向太赫兹多波束调控器件 [J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2021, 19(1): 1–6.

[10] WANG Z X, ZHANG H C, LU J, et al. Compact filters with adjustable multi-band rejections based on spoof surface plasmon polaritons [J]. Journal of Physics D: Applied Physics, 2019, 52(2): 025107-1–025107-4.

[11] DEGIROU A, EBBESEN T W. Analysis of the transmission process through single apertures surrounded by periodic corrugations [J]. Optics Express, 2004, 12(16): 3694–3700.

[12] 张平, 孙海舟. 亚波长结构太赫兹仿表面等离子体波的研究进展 [J]. 真空电子技术, 2022, 358(3): 1–8.

[13] GERRIT M. Absorbing boundary conditions for finite-difference approximation of the time-domain electromagnetic-field equations [J]. IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, 1981, 12(4): 377–382.

[14] YEE K. Numerical solution of initial boundary value problems involving Maxwell's equations in isotropic media [J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 1966, 14(3): 302–307.