

# Sinc 形表面等离子滤波器在可见光波段的滤波特性

张高峰 杨荣草 薛文瑞

(山西大学物理电子工程学院, 山西 太原 030006)

**摘要** 借助于二维时域有限差分(2D-FDTD)法,对 Sinc 形表面等离子滤波器在可见光波段的滤波特性进行了研究。结果表明:每条透射曲线均存在一个较宽的禁带。Sinc 函数的高度、最大槽深和槽宽对禁带的位置影响较大,而主花瓣半宽、槽的周期数以及水平通道的宽度对禁带的位置影响较小。与  $1.55 \mu\text{m}$  波段相比,禁带的宽度要窄一些,而禁带两侧的通带也要低一些。研究结果可以为表面等离子滤波器的设计、制作和应用提供理论参考。

**关键词** 表面光学;表面等离子滤波器;时域有限差分法

**中图分类号** O431 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201441.s105004

## Filter Characteristics of a Sinc-Shaped Surface Plasmonic Filter in the Visible Light Band

Zhang Gaofeng Yang Rongcao Xue Wenrui

(College of Physics and Electronic Engineering, Shanxi University, Taiyuan, Shanxi 030006, China)

**Abstract** With two dimensional finite-difference time-domain (2D-FDTD) method, filter characteristics of a Sinc-shaped surface plasmonic filter are studied in the visible light band. The results show that, each transmission curve exists in a wide forbidden band, the position of the forbidden band is affected significantly by the height of the Sinc function, the maximum groove depth and the groove width, and weakly by the half-width of the main petal, the period of the slots and the horizontal groove width of the channel. Compared with  $1.55 \mu\text{m}$  band, the width of the forbidden band is more narrow, and both sides of the passband band also are lower. This work would provide a theoretical reference for the design, production and application of surface plasma filters.

**Key words** optics at surfaces; surface plasmonic filter; finite-difference time-domain method

**OCIS codes** 240.6680; 120.2440; 130.7408

## 1 引言

表面等离子激元(SPP)是一种表面电子疏密波<sup>[1]</sup>,它能够在导体和电介质的界面上传播,而在垂直于界面的方向,其强度呈指数衰减。借助于 SPP,人们设计并制作出了各种各样的表面等离子元器件,如波导<sup>[2-3]</sup>、分束器<sup>[4-5]</sup>、耦合器<sup>[6-7]</sup>、Mach-Zehnder 相干器<sup>[8-9]</sup>、波导环形共振器<sup>[10-11]</sup>、加减复用器<sup>[12-13]</sup>、吸收器<sup>[14-15]</sup>和滤波器<sup>[16-21]</sup>等。它们是实现具有超高集成度和全光处理能力的光子芯片的

基本器件。

表面等离子滤波器是表面等离子元器件研究中的一个热点。对单齿滤波器<sup>[16]</sup>、双齿滤波器<sup>[17]</sup>和多齿滤波器<sup>[18]</sup>的研究发现,通过改变结构中齿的宽度、深度、周期长度和周期数,可以调节滤波器的透射谱线,并形成了一定宽度的禁带,表现出了一定的滤波效果。对基于圆盘共振结构的滤波器<sup>[19]</sup>的研究发现,通过调节圆盘半径、输入和输出波导的宽度以及它们和圆盘之间的间隙,这种滤波器只允许几

**收稿日期**: 2013-09-23; **收到修改稿日期**: 2013-11-04

**基金项目**: 国家自然科学基金(61178013)、国家基础科学人才培养基金(J0730317)、山西省自然科学基金(2010011003-1)、山西省回国留学人员科研项目(2011-002)、量子光学与光量子器件国家实验室开放课题(KF201006)

**作者简介**: 张高峰(1986—),男,硕士研究生,主要从事表面等离子体光波导器件方面的研究。

E-mail: nanjingzgf@163.com

**导师简介**: 薛文瑞(1967—),男,博士,教授,主要从事导波光学、纳米光子学和表面等离子体学等方面的研究。

E-mail: wrxue@sxu.edu.cn(通信联系人)

个特定频率点附近的光波分量通过,而抑制其他频率的光波分量通过。对基于 Fabry-Perot 共振结构<sup>[20]</sup>和横向串联波导共振结构的滤波器<sup>[21]</sup>的研究发现,通过调节耦合腔的几何结构参数,可以得到品质因数较高的多个共振峰。上述研究工作表明,表面等离子滤波器的滤波性能可以通过调整其几何结构及尺寸得到优化。

为了改善表面等离子滤波器中普遍存在的禁带较窄的局面,曾设计了一种 Sinc 形表面等离子滤波器<sup>[22]</sup>,并研究了其在  $0.75 \sim 2.25 \mu\text{m}$  波段范围内的滤波特性,结果表明:与未经 Sinc 函数调制的情形相比较,经 Sinc 函数调制的滤波器的滤波性能更好。

本文拟在此基础上,在可见光波段范围内 ( $0.4 \sim 0.8 \mu\text{m}$ ) 对这种滤波特性与其几何结构的形状和尺度的依赖关系进行详细研究。需要声明的是:为了节约篇幅,下文中所述的结构参数和电磁参数的符号与前文<sup>[22]</sup>中所采用的结构参数和电磁参数的符号完全一致。计算方法仍然为二维时域有限差分(2D-FDTD)法<sup>[23]</sup>,空间步长、各向异性良匹配层(APML)、总场(TF)/散射场(SF)、并行技术和时间步数的设置方法也与前文<sup>[22]</sup>中所采用的方法完全一致。滤波器的透射率的定义也与前文<sup>[22]</sup>中所采用的方法完全一致。

## 2 仿真结果与讨论

对于 Sinc 形表面等离子滤波器<sup>[22]</sup>,主要的几何结构参数有  $h$ 、 $x_0$ 、 $N$ 、 $d$ 、 $a$  和  $w$ , 分别对应于 Sinc 函数的高度、主花瓣半宽、槽的周期数、最大槽深、槽宽和水平通道的宽度。为了研究这种表面等离子滤波器的滤波特性在可见光波段范围内 ( $0.4 \sim 0.8 \mu\text{m}$ ) 与这 6 个几何结构参数的依赖关系,进行了大量的数值计算,下面依次进行分析。

### 2.1 滤波特性与 Sinc 函数的高度和主花瓣半宽的依赖关系

图 1 给出了在不同的 Sinc 函数高度条件下,透射率与波长的依赖关系图。计算中,  $N = 15$ ,  $\Lambda = 200 \text{ nm}$ ,  $a = 100 \text{ nm}$ ,  $d = 300 \text{ nm}$ ,  $w = 100 \text{ nm}$ ,  $x_0 = 471.23 \text{ nm}$ , Sinc 函数的高度  $h$  从 0 逐渐增大了 75 nm。从图 1 中可以看出:在所计算的波长范围内,每条透射曲线均存在一个较宽的禁带。随着  $h$  的逐渐增加,这个较宽的禁带中心位置有向短波长方向移动的趋势,禁带的宽度也有较明显的变化,禁带中心的透射率也略有波动,每条透射曲线的禁带右侧的边缘变得更加陡峭,禁带右侧的通带的透射率有所提

高,而禁带左侧的通带透射率会降低。

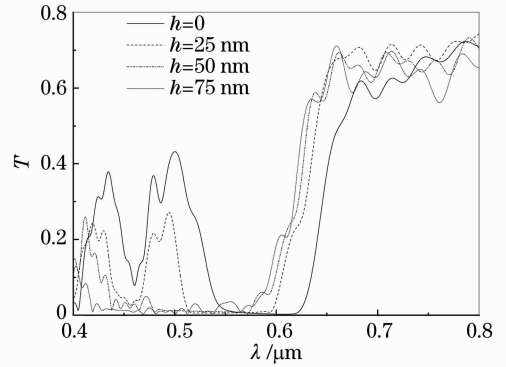


图 1 在不同的 Sinc 函数高度条件下,透射率与波长的依赖关系图

Fig. 1 Dependency of the transmittance on the wavelength under different heights of the Sinc functions

图 2 给出了在不同的 Sinc 函数的主花瓣半宽条件下,透射率与波长的依赖关系图。计算中,  $N = 15$ ,  $\Lambda = 200 \text{ nm}$ ,  $a = 100 \text{ nm}$ ,  $d = 300 \text{ nm}$ ,  $w = 100 \text{ nm}$ ,  $h = 25 \text{ nm}$ , 主花瓣半宽  $x_0$  从  $314.160 \text{ nm}$  逐渐增大到  $628.32 \text{ nm}$ 。从图 2 中可以看出:在所计算的波长范围内,每条透射曲线均存在一个较宽的禁带和一个较窄的禁带。透射曲线的形状受  $x_0$  的影响较小。当  $x_0$  逐渐增大时,每条透射曲线的禁带的宽度以及禁带的中心位置基本保持不动,但通带的透射率有所波动。

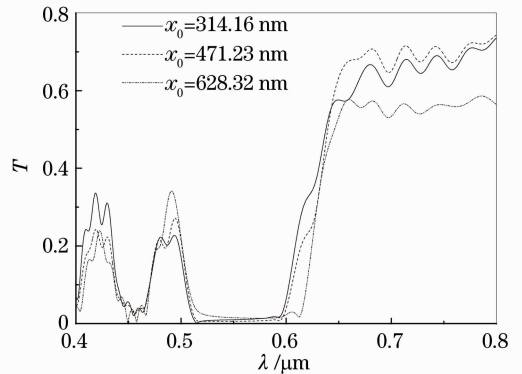


图 2 在不同的 Sinc 函数的主花瓣半宽条件下,透射率与波长的依赖关系图

Fig. 2 Dependency of the transmittance on the wavelength under different half-widths of the main petal of the Sinc functions

### 2.2 滤波特性与槽的周期数的依赖关系

图 3 给出了在不同槽的周期数条件下,透射率与波长的依赖关系图。计算中,  $\Lambda = 200 \text{ nm}$ ,  $a = 100 \text{ nm}$ ,  $d = 300 \text{ nm}$ ,  $w = 100 \text{ nm}$ ,  $h = 25 \text{ nm}$ ,  $x_0 = 471.23 \text{ nm}$ , 槽的周期数  $N$  从 11 逐渐增大了 19。

从图 3 中可以看出:在所计算的波长范围内,每条透射曲线均存在一个较宽的禁带和一个较窄的禁带。随着周期数  $N$  的增加,禁带的中心位置基本保持不变,而禁带的宽度和以及禁带左右两侧的通带的高度会逐渐降低。

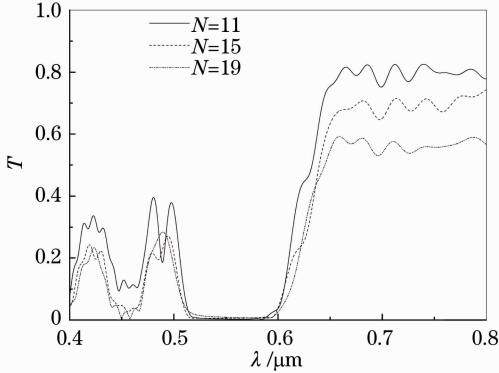


图 3 在不同的槽的周期数条件下,透射率与波长的依赖关系图

Fig. 3 Dependency of the transmittance on the wavelength under different periods of the slots

### 2.3 滤波特性与最大槽深和槽宽的依赖关系

图 4 给出了在不同的最大槽深条件下,透射率与波长的依赖关系图。计算中,  $N = 15$ ,  $\Lambda = 200$  nm,  $a = 100$  nm,  $w = 100$  nm,  $h = 25$  nm,  $x_0 = 471.23$  nm, 最大槽深  $d$  由 250 nm 逐渐增大到了 350 nm。从图 4 中可以看出:在所计算的波长范围内,透射曲线中禁带的位置受  $d$  的影响较大。当  $d$  增大时,禁带中心向长波方向移动,禁带的宽度基本保持不变,禁带左侧的通带小幅上升,禁带右侧的通带有小幅波动。

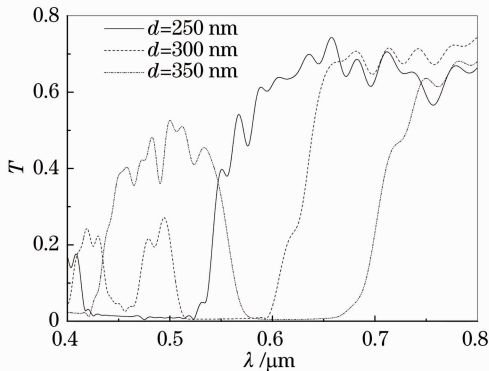


图 4 在不同的最大槽深条件下,透射率与波长的依赖关系图

Fig. 4 Dependency of the transmittance on the wavelength under different maximum depths of the slots

图 5 给出了在不同槽宽  $a$  的条件,透射率与波长的依赖关系图。计算中,  $N = 15$ ,  $d = 300$  nm,  $w =$

100 nm,  $h = 25$  nm,  $x_0 = 471.23$  nm, 槽宽  $a$  由 50 nm 逐渐增大到了 100 nm。从图 5 中可以看出:在所计算的波长范围内,随着  $a$  的增大,透射曲线中禁带的中心位置向短波长方向移动,禁带的宽度基本保持不变,禁带左侧的通带有所降低,禁带的通带有小幅提升。

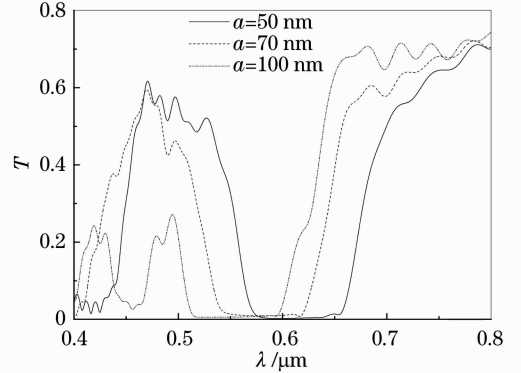


图 5 在不同槽宽的条件下,透射率与波长的依赖关系图

Fig. 5 Dependency of the transmittance on the wavelength under different widths of the slots

### 2.4 滤波特性与水平通道的宽度的依赖关系

图 6 为在不同波导宽度  $w$  的条件下,透射率与波长的依赖关系图。计算中,  $N = 15$ ,  $\Lambda = 200$  nm,  $a = 100$  nm,  $d = 300$  nm,  $h = 25$  nm,  $x_0 = 471.23$  nm, 水平通道的宽度  $w$  从 50 nm 逐渐增加到了 100 nm。从图 6 中可以看出:在所计算的波长范围内,随着  $w$  的增大,透射曲线中禁带的中心位置基本保持不变,禁带的宽度在逐渐缩小,禁带两侧的通带的透射率有所提高。

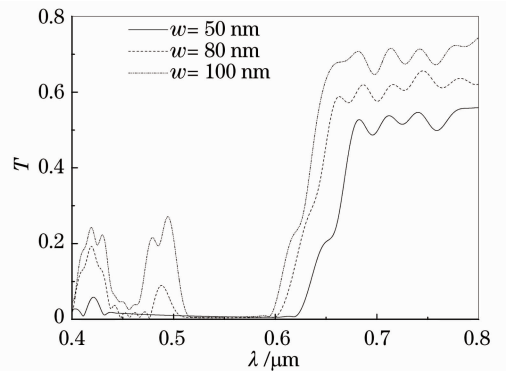


图 6 在不同波导宽度的条件下,透射率与波长的依赖关系图

Fig. 6 Dependency of the transmittance on the wavelength under different widths of the waveguides

从上述结果可以看出,Sinc 函数的高度、最大槽深和槽宽对禁带的中心位置影响较大。这种现象可以由特定频段内的表面等离子与槽壁的相互作用

的强弱来定性解释。Sinc 函数的高度越高或者最大槽深越深,各个槽内形成的长波长频段的表面等离子与槽壁的接触面积越大,它们与金属槽壁的相互作用就越强,长波长频段的透射率变小,导致禁带向长波方向整体移动。槽越宽,槽内两个槽壁上形成的短波长频段的表面等离子之间的耦合作用越小,它们与金属槽壁的相互作用就变强,短波长频段的透射率变小,导致禁带向短波方向整体移动。通过与过去的工作<sup>[22]</sup>比较可以发现,在相同结构几何参数下,Sinc 形表面等离子滤波器在可见光波段的禁带宽度要比在  $1.55\ \mu\text{m}$  波段的窄一些,而禁带两侧的通带在可见光波段的高度要比在  $1.55\ \mu\text{m}$  波段的低一些。

### 3 结 论

在过去工作的基础上,在可见光波段,采用二维时域有限差分法,对 Sinc 形表面等离子滤波器的滤波特性与其几何结构参数之间的依赖关系进行了详细研究。数值结果表明:每条透射曲线均存在一个较宽的禁带。主花瓣半宽、槽的周期数以及水平通道的宽度对禁带的位置影响较小,而 Sinc 函数的高度、最大槽深和槽宽对禁带的位置影响较大。在相同结构几何参数下,Sinc 形表面等离子滤波器在可见光波段的禁带的宽度要比在  $1.55\ \mu\text{m}$  波段的窄一些,而禁带两侧的通带在可见光波段的高度要比在  $1.55\ \mu\text{m}$  波段的低一些。这可以为表面等离子滤波器的设计、制作和应用提供理论参考。

### 参 考 文 献

- 1 A V Zayats, I I Smolyaninov, A A Maradudin. Nano-optics of surface plasmon polaritons[J]. Phys Rep, 2005, 408(3): 131–314.
- 2 R F Oulton, V J Sorger, D A Genov, *et al.*. A hybrid plasmonic waveguide for subwavelength confinement and long-range propagation[J]. Nat Photonics, 2008, 2(8): 496–500.
- 3 L Liu, Z Han, S He. Novel surface plasmon waveguide for high integration[J]. Opt Express, 2005, 13(17): 6645–6650.
- 4 Li Juan, Wang Bingyan, Xue Wenrui. Propagation properties of Y-splitters based on MIM surface plasmonic waveguides[J]. Acta Optic Sinica, 2012, 32(1): 0124002.  
李娟,王冰艳,薛文瑞.基于MIM型表面等离子体光波导的Y形分束器的传输特性研究[J].光学学报,2012,32(1): 0124002.
- 5 Z Han, S He. Multimode interference effect in plasmonic subwavelength waveguides and an ultra-compact power splitter[J]. Opt Commun, 2007, 278(1): 199–203.
- 6 Y Song, J Wang, Q Li, *et al.*. Broadband coupler between

- silicon waveguide and hybrid plasmonic waveguide[J]. Opt Express, 2010, 18(12): 13173–13179.
- 7 V A Zenin, V S Volkov, Z Han, *et al.*. Directional coupling in channel plasmon-polariton waveguides[J]. Opt Express, 2012, 20(6): 6124–6134.
- 8 Z Han, L Liu, E Forsberg. Ultra-compact directional couplers and Mach-Zehnder interferometers employing surface plasmon polaritons[J]. Opt Commun, 2006, 259(2): 690–695.
- 9 M Pu, N Yao, C Hu, *et al.*. Directional coupler and nonlinear Mach-Zehnder interferometer based on metal-insulator-metal plasmonic waveguide[J]. Opt Express, 2010, 18(20): 21030–21037.
- 10 T B Wang, X W Wen, C P Yin, *et al.*. The transmission characteristics of surface plasmon polaritons in ring resonator[J]. Opt Express, 2009, 17(26): 24096–24101.
- 11 D X Dai, Y C Shi, S L He, *et al.*. Silicon hybrid plasmonic submicron-donut resonator with pure dielectric access waveguides[J]. Opt Express, 2011, 19(24): 23671–23682.
- 12 J Tao, X G Huang, J H Zhu. A wavelength demultiplexing structure based on metal-dielectric-metal plasmonic nano-capillary resonators[J]. Opt Express, 2010, 18(11): 11111–11116.
- 13 G X Wang, H Lu, X M Liu, *et al.*. Tunable multi-channel wavelength demultiplexer based on MIM plasmonic nanodisk resonators at telecommunication regime[J]. Opt Express, 2011, 19(4): 3513–3518.
- 14 N Bonod, G Tayeb, D Maestre, *et al.*. Total absorption of light by lamellar metallic gratings[J]. Opt Express, 2008, 16(20): 15431–15438.
- 15 K V Nerkararyan, S K Nerkararyan, S I Bozhevolnyi. Plasmonic black-hole: broadband omnidirectional absorber of gap surface plasmons[J]. Opt Lett, 2011, 36(22): 4311–4313.
- 16 X S Lin, X G Huang. Tooth-shaped plasmonic waveguide filters with nanometric sizes[J]. Opt Lett, 2008, 33(23): 2874–2876.
- 17 Y Matsuzaki, T Okamoto, M Haraguchi, *et al.*. Characteristics of gap plasmon waveguide with stub structures[J]. Opt Express, 2008, 16(21): 16314–16325.
- 18 X S Lin, X G Huang. Numerical modeling of a teeth-shaped nanoplasmonic waveguide filter[J]. J Opt Soc Am B, 2009, 26(5): 1263–1268.
- 19 H Lu, X M Liu, D Mao, *et al.*. Tunable band-pass plasmonic waveguide filters with nanodisk resonators[J]. Opt Express, 2010, 18(17): 17922–17927.
- 20 B F Yun, G H Hu, Y P Cui. A nanometric plasmonic waveguide filter based on Fabry-Perot resonator[J]. Op Commun, 2011, 284(1): 485–489.
- 21 L O Diniz, F D Nunes, E Marega, *et al.*. Metal-insulator-metal surface plasmon polariton waveguide filters with cascaded transverse cavities[J]. J Lightwave Technol, 2011, 29(5): 714–720.
- 22 Zhang Gaofeng, Cheng Xueying, Xue Wenrui. Propagation properties of surface plasmonic filter with slot depth modulated by a Sinc function[J]. Acta Sinica Quantum Optica, 2012, 18(4): 363–369.  
张高峰,程雪莹,薛文瑞.槽深受Sinc函数调制的表面等离子滤波器的传输特性[J].量子光学学报,2012,18(4): 363–369.
- 23 Taflove A, Hagness S C. Computational Electrodynamics: the Finite-Difference Time-Domain Method (2nd Edition) [M]. Boston • London: Artech House, 2000.

栏目编辑:王晓琰