

·光电器件与材料·

基于T型腔结构的表面等离子体波导滤波器

郭健平^{1,2}, 朱家胡¹, 黄旭光¹

(1. 华南师范大学广东省微纳光子功能材料与器件重点实验室, 广东 广州 510006;

2. 华南师范大学物理与电信工程学院, 广东 广州 510006)

摘要: 表面等离子体激元(surface plasmon polaritons, SPPs)能将光场束缚在亚波长量级,可以突破衍射极限,被认为是有希望实现纳米集成光学器件的载体之一。设计了一种T型腔结构的表面等离子体波导滤波器,并且利用时域有限差分(FDTD)法对其滤波特性进行了分析。结果表明,改变T型腔的长度和宽度可以改变透射谱的中心波长,而改变腔与耦合波导之间的间距,则可以调节腔的Q值。

关键词: 表面等离子体; 滤波器; 时域有限差分法

中图分类号: TN713⁺.5; TN011⁺.4

文献标识码: A

文章编号: 1673-1255(2013)-04-0026-04

Surface Plasma Waveguide Filter Based on T-shape Cavity Structure

GUO Jian-ping^{1,2}, ZHU Jia-hu¹, HUANG Xu-guang¹

(1. Key Laboratory of Nanophotonic Functional Materials and Devices, South China Normal University, Guangzhou 510006, China; 2. School of Physics and Telecommunication Engineering, South China Normal University, Guangzhou 510006, China)

Abstract: Optical fields can be bound at sub-wavelength level by surface plasma polaritons (SPPs) and diffraction limit can be broken through. SPP is regarded as one of the most hopeful carrier to implement integrated optical devices in nanometer level. A surface plasma waveguide filter with T-shape cavity structure is designed. And its filtering characteristics are analyzed by finite difference time domain (FDTD) method. The results show that the center wavelength of transmission spectrum can be changed by the changing of length and width of T-shape cavity. Q values of cavities can be adjusted by changing the distances between cavities and coupling waveguide.

Key words: surface plasma; filter; finite difference time domain (FDTD) method

近年来电子集成线路(IC)的尺寸按照摩尔定律所预期的速度迅速减少,其单元器件已在实验室实现了数十纳米量级尺度的突破。由于受到电子固有的荷电性、带宽、热耗和热电串扰等物理限制,电子IC的尺寸与集成度几乎到达了其理论极限值因而难以进一步突破。与此相反,光子集成线路在理论上完全不受这些因素的制约,具有极高的带宽和响应速度、高抗扰性等电子IC无法比拟的优异性能。但

作为基本组成元素的光波导,光子集成线路单元器件的大小一般在数十至数千波长的尺度范围而不能发挥其潜力。表面等离子体激元(surface plasmon polaritons, SPPs)能将光场束缚在亚波长量级,可以突破衍射极限,被认为是有希望实现纳米集成光学器件的载体之一^[1-2]。在已提出的各种等离子体波导结构中,金属-介质-金属(MIM)波导也因为其具有强的局域性,简单且易于高度集成优点,在纳米集成光

收稿日期: 2013-05-23

基金项目: 国家自然科学基金(61275059); 华南师范大学优秀青年教师基金(2012KJ002)

作者简介: 郭健平(1978-),男,湖北丹江口人,博士,华南师范大学广东省微纳光子功能材料与器件重点实验室助理研究员,研究方向为表面等离子器件及其应用。

学与器件方面有着极大的应用潜力。多个研究小组利用SPPs原理进行了一系列的基础波导器件的研究,基于MIM波导结构的Y型分束器、MZ干涉仪、光开关型耦合器、Y型波长复用器和分束器也先后被理论模拟或实验验证^[3-4]。

滤波器可以实现波分复用、带通或带阻的波长选择功能,是通信过程中的重要器件。文中设计了一种T型腔结构的表面等离子体波导滤波器,并且利用时域有限差分法对其滤波特性进行了分析。

1 结构设计与理论分析

提出的T型腔结构表面等离子体波导滤波器的俯视图如图1所示。当入射光束从波导左边入射时,部分的光束会进入腔的区域。而在腔的区域里,前向和后向的光波在腔的空气-银界面处几乎完全被反射。

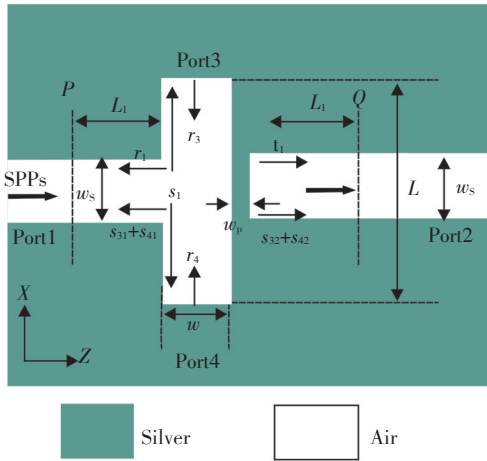


图1 T型腔结构表面等离子体波导滤波器的示意图

基于单齿形滤波器的扩展的散射矩阵理论和多光束干涉^[5-7],可以建立一个描述此腔共振条件的解析模型,从端口1(Port1)到端口2(Port2)的透射率为

$$\begin{pmatrix} E_{out}^1 \\ E_{out}^2 \\ E_{out}^3 \\ E_{out}^4 \end{pmatrix} = S \begin{pmatrix} E_{in}^1 \\ E_{in}^2 \\ E_{in}^3 \\ E_{in}^4 \end{pmatrix}, \quad S = \begin{pmatrix} r_1 & t_2 & s_{31} & s_{41} \\ t_1 & r_2 & s_{32} & s_{42} \\ s_1 & s_2 & r_3 & r_4 \\ s_2 & s_2 & r_3 & r_4 \end{pmatrix} \quad (1)$$

这里, r_i 和 t_i ($i=1,2,3$) 分别是入射的光束因为结构的原因引起的反射和透射系数,而 s_{ij} 是从端口 i ($i=1,2,3$) 分束到端口 j ($j=1,2,3$) 的分束系数。 E_i^{in} 和 E_i^{out} 分别代表了在端口 i 的输入和输出光束的场。对于 $E_2^{in} = 0$ 的情况,有

$$E_2^{out} = t_1 E_1^{in} + s_{32} E_3^{in} + s_{42} E_4^{in} \quad (2)$$

同样地, E_3^{in} 和 E_4^{in} 可以使用多光束干涉方法^[8]计算如下

$$E_3^{in} = E_4^{in} = s_1 E_1^{in} \exp(i\phi(\lambda))(1 + r_3 \exp(i\phi(\lambda)) + r_3^2 \exp(2i\phi(\lambda)) + \dots) = \frac{s_1 E_1^{in} \exp(i\phi(\lambda))}{1 - r_3 \exp(i\phi(\lambda))} \quad (3)$$

其中,相位延迟为 $\phi(\lambda) = (4\pi/\lambda)n_{eff} \cdot (L/2) + \Delta\varphi(\lambda)$, 而 $\Delta\varphi(\lambda)$ 是在空气-银界面因反射引起的附加相移。组合式(1)和式(2),可以得到端口2(Port2)的输出场如下

$$E_2^{out} = t_1 E_1^{in} + \frac{2s_1 s_{32} E_1^{in} \exp(i\phi(\lambda))}{1 - r_3 \exp(i\phi(\lambda))} \quad (4)$$

因此,光从端口1(Port1)到端口2(Port2)的透射率 T 为

$$T = \left| \frac{E_2^{out}}{E_1^{in}} \right|^2 = \left| t_1 + \frac{2s_1 s_{32} \exp(i\phi(\lambda))}{1 - r_3 \exp(i\phi(\lambda))} \right|^2 \quad (5)$$

由式(4)可知,仅当 $\phi(\lambda) = 2m\pi$ ($m=1,2,3,\dots$) 时,可以得到最大透射率的波长,其表达式如下

$$\lambda_m = \frac{n_{eff} L}{m - \Delta\varphi(\lambda)/(2\pi)} \quad (6)$$

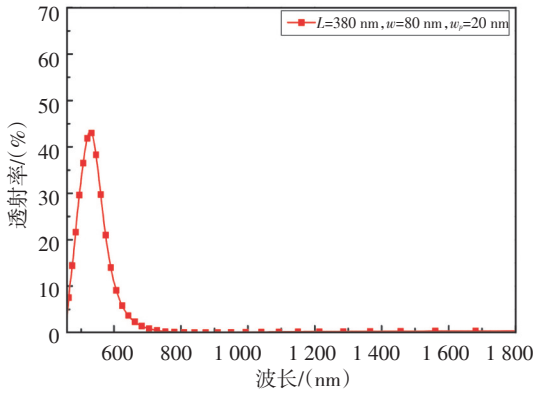
可见,峰值波长 λ_m 与腔的长度 L 和腔的有效折射率 n_{eff} 成线性关系。MIM波导的 TM_0 模的色散关系^[9] 可以被用来研究腔的有效折射率 n_{eff} 和腔的宽度 w 的关系。Lin已证明MIM结构波导的有效折射率 n_{eff} 与波导的宽度 w 成类反比的关系^[5]。因此,峰值波长 λ_m 与宽度 w 也应该有类反比的倾向。

对于一个宽度为80 nm沟槽波导,基于上面提到的色散关系,它的有效折射率计算约为1.32。所以,根据式(5),当长度为 $L=380$ nm和相移为 $\Delta\varphi(\lambda)=0$ 时,T型波导结构的第一个最大透射率的波长约为 $\lambda_1 \approx 502$ nm。

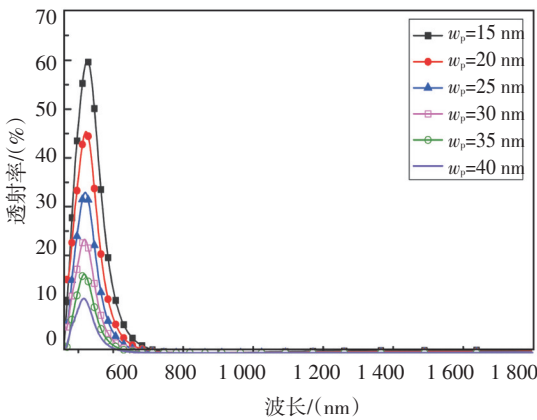
2 模拟结果

为了证明上述单腔T型滤波器结构的理论分析,使用有限时域差分(FDTD)方法结合完全匹配层(PML)吸引边界条件去研究这个新型的亚波长等离子体波导结构的特性。为保证结果的稳定性,在 x 方向和 z 方向的网格大小设置为 $5 \text{ nm} \times 2 \text{ nm}$ 。两功率监测器分别安置在点 P 和点 Q 处,用于计算入射功率 P_{in} 和透射功率 P_{out} 。定义透射率为 $T=P_{out}/P_{in}$ 。为了方便比较,波导的宽度 w_s 和距离 L_1 都固定设置为 50 nm 。 L 和 w 分别是腔的长度和宽度,而 w_p 代表了腔和右边直波导之间的间距,各参数均显示于图1。

图2a显示了在结构参数为 $w=80\text{ nm}$, $L=380\text{ nm}$ 和 $w_p=20\text{ nm}$ 时,单腔T型波导滤波器的透射谱图。峰值透射率出现在波长 520 nm 处,透射率约为45%。这个模拟结果与上面的当理论分析值 $\lambda_1 \approx 502\text{ nm}$ (假设 $\Delta\varphi(\lambda)=0$)相接近。模拟结果显示了在长波长很宽一个波段里,透射率接近零。为了充分理解间距 w_p 对等离子体激元(SPPs)传输的影响,在图2b中模拟了峰值波长依赖于间距 w_p 的谱图,此时的结构参数分别为 $L=380\text{ nm}$ 和 $w=90\text{ nm}$ 。由图可见,当间距 w_p 增加时,峰值的带宽会变得更窄一些,即 Q 值会变大。然而与此同时,峰值波长的透射率将会减少,因为间距 w_p 增大时,损耗同时也会跟着增加。



(a) 单腔T型滤波器在 $L=380\text{ nm}$, $w=80\text{ nm}$ 和 $w_p=20\text{ nm}$ 时的透射谱

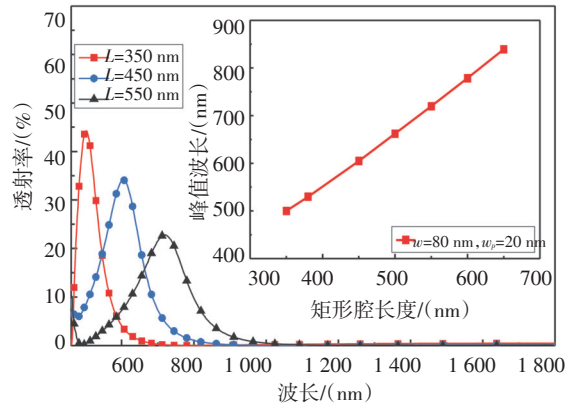


(b) 结构参数保持为 $L=380\text{ nm}$ 和 $w=90\text{ nm}$,不同间距 w_p 下滤波器的透射谱

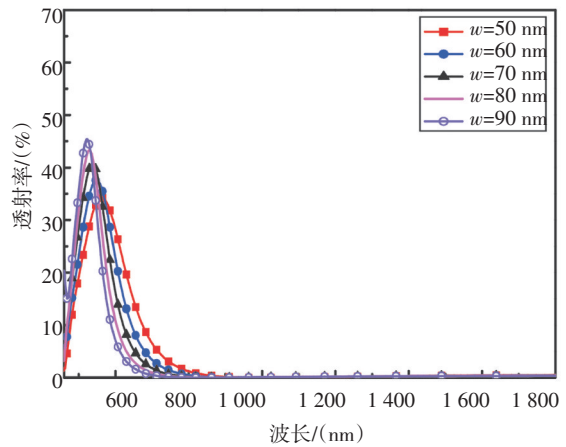
图2 T型腔滤波器在 $L=380\text{ nm}$, $w=80\text{ nm}$ 和 $w_p=20\text{ nm}$ 时的透射谱和不同间距 w_p 下的透射谱

下面分别研究滤波器的透射谱对腔的长度和宽度的依赖关系见图3所示。图3a显示了在相同的 $w=$

80 nm 和 $w_p=20\text{ nm}$ 时,不同腔的长度 L 下的滤波器透射谱图。从中可发现,随着 L 的增加,峰值波长会向长波长移动(红移)。图3a的插图显示了峰值波长和腔的长度 L 成线性的关系。在相同的 $L=380\text{ nm}$ 和 $w_p=20\text{ nm}$ 下,不同腔的宽度 w 所对应的滤波器透射谱图显示于图3b。FDTD模拟结果显示了峰值波长随着腔的宽度 w 增加而向短波长移动(蓝移)。因此,可以通过改变腔的长度 L 和(或)宽度 w 去实现不同波长的滤波功能。



(a) 在结构参数为 $w=80\text{ nm}$ 和 $w_p=20\text{ nm}$ 时,不同长度 L 下滤波器的透射谱图。插图:峰值波长与腔的长度的关系,其他参数为 $w=80\text{ nm}$ 和 $w_p=20\text{ nm}$



(b) 在结构参数为 $L=380\text{ nm}$ 和 $w_p=20\text{ nm}$ 时,不同长度 w 下滤波器的透射谱图

图3 滤波器的透射谱对腔的长度和宽度的依赖关系

3 结论

设计了一种基于T型腔结构的表面等离子体波导滤波器,用散射矩阵和多光束干涉理论对器件的透射特性进行了分析,并用FDTD方法进行了模拟。

结果表明,T型腔的长度和宽度对透射谱的峰值波长有显著影响,随着腔长的增加,峰值波长会向长波长移动,随着腔的宽度增加而向短波长移动。另外,改变腔与耦合波导之间的间距,则可以调节腔的 Q 值。间距增加,透射谱的 Q 值会变大,但与此同时,峰值波长的透射率将会减少。

参考文献

- [1] S I Bozhevolnyi, Plasmonic Nanoguides and Circuits[M]. Pan Stanford Publishing Pte. Ltd., Singapore, 2009.
- [2] 孙梅.表面等离子体亚波长光学[M].北京:中央民族大学出版社,2010.
- [3] 王振林.表面等离子体研究新进展[J].物理学进展, 2009, 29(3):287-324.

- [4] G V Georgios Veronis, Z Y Zongfu Yu, S E K Sükri Ekin Kocabas, et al. Metal-dielectric-metal plasmonic waveguide devices for manipulating light at the nanoscale[J]. Chinese Optics Letters, 2009, 7(4):302-308.
- [5] X-S Lin, X-G Huang. Tooth-shaped plasmonic waveguide filters with nanometric sizes[J]. Optics Letters 2008, 33 (23): 2874-2876.
- [6] 叶卫民.光子晶体导论[M].北京:科学出版社,2010.
- [7] 马科斯·玻恩,埃米尔·沃耳夫.光学原理[M].7版.杨葭荪.北京:电子工业出版社,2011.
- [8] L Liu, Z Han, S He. Novel surface plasmon waveguide for high integration[J]. Optics Express, 2005, 13:6645-6650.
- [9] J Dionne, L Sweatlock, H Atwater, et al. Plasmon slot waveguides: towards chip-scale propagation with subwavelength-scale localization[J]. Physical Review B, 2006, 73 (3).

(上接第20页)

路产生的VD(场同步)、HD(行同步)信号分别经由同步信号驱动与分发电路后,同时输入到从机中,如图4。在整个系统中,OPA692视频放大器的功能与作用如图5所示。主机中的同步信号发生器CXD1217Q第10(或6)引脚产生的VD(或HD)信号输入到OPA692视频放大器中放大均分成三路信号,其中一路作为主机自身的内同步信号,另外两路作为从机的CXD1217Q第29(或21)引脚的输入。

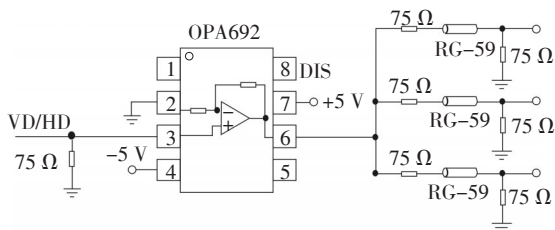


图5 同步信号驱动与分发电路

3 结论

同步移相干涉术作为一种干涉测量的抗振技术的研究越来越受到人们的重视。文中在现有技术的基础上,利用三部CCD同步协同分别提取空间同步移相产生的移相干涉图。设计了一种以视频同步信号发生器CXD1217Q为主体的同步信号的产生和外协同电路,来实现多CCD数据采集的同步控制,并设计了基于OPA692视频放大器的同步信号驱动和分发电路。解决了单一CCD拍摄多幅干涉图所导致的

干涉图的空间分辨率降低的问题。

参考文献

- [1] 左芬.同步移相干涉测量的抗振技术研究[D].南京:南京理工大学,2008.
- [2] 沙定国.光学测试技术[M]2版.北京:北京理工大学出版社,2010.
- [3] Peter J, Leslie L. Numerical simulations of vibration in phase-shifting interferometry[J]. Appl.Opt. 1996,35 (13): 2172-2178.
- [4] Geon-Soo Han,Seung-Woo Kim. Numerical correction of reference phases in phase-shifting interferometry by iterative least-squares fitting[J]. Appl.Opt.1994, 33 (31): 7321-7325.
- [5] Chris L, Koliopoulos. Simultaneous phase shift interferometer[J]. SPIE, 1991,1531: 119-127.
- [6] P D Ruiz, J M Huntley, Y Shen,et al. Vibration-induced phase errors in high-speed phase-shifting speckle-pattern interferometry[J]. Appl.Opt. 2001, 40(13): 2117-2125.
- [7] 孙若渔.速滑运动分析中多台摄像机视频同步问题的研究[J].冰雪运动,2008,30(1): 63-65.
- [8] 田慧,王义,杜宏亮.多CCD图像传感器在辐射成像系统中的应用[J].传感器技术, 2001,20(5): 37-41.
- [9] 武利翻. CCD制造的关键工艺[J].光电技术应用, 2005, 20(1): 38-42.
- [10] 江宝坦,邱跃洪,文延,等. CCD噪声建模与仿真分析[J].光电技术应用,2010, 25(2): 64-67.