

# 激光与光电子学进展

## 边界耦合斜对称双矩形环金属-绝缘体-金属结构滤波器与电光开关的设计

翟明洋, 张冠茂\*, 闫云菲

兰州大学信息科学与工程学院光电子与电磁信息研究所, 甘肃 兰州 730000

**摘要** 基于表面等离子激元构造了一种边界耦合模式的金属-绝缘体-金属结构滤波器,该滤波器由两个斜对称矩形环谐振腔及波导管所组成,采用有限元法对该滤波器进行仿真计算和分析,得到它的磁场分布图和透射谱线图。结果表明,该滤波器在通带部分的透射率最高可达 0.969,阻带部分的透射率最低接近为 0,同时还具有通带与阻带较宽、透射谱线平滑的特点。调节结构参数可使得透射谱线图发生红移或蓝移的现象,设置特定的结构参数可以实现在保持第一通信窗口通过的状态下,对第二、三通信窗口的通断进行选择控制的功能,因此,该滤波器可作为一种带通/带阻滤波器,在高密度集成电路和光纤通信中有着非常重要的应用。另外通过结构的改进并加入电光材料 DAST 实现了一种电光开关的功能。

**关键词** 集成光学; 表面等离子激元; 金属-绝缘体-金属结构滤波器; 斜对称双矩形环; 透射谱线图; 带通/带阻滤波器; 电光开关; 有限元法

中图分类号 0436

文献标志码 A

DOI: 10.3788/LOP202259.1913001

### Design of Boundary Coupled Oblique Symmetric Double Rectangular Ring Metal-Insulator-Metal Structural Filter and Electro-Optic Switch

Zhai Mingyang, Zhang Guanmao\*, Yan Yunfei

*Institute of Optoelectronics & Electromagnetic Information, School of Information Science and Engineering, Lanzhou University, Lanzhou 730000, Gansu, China*

**Abstract** A metal-insulator-metal structural filter, which comprises two oblique symmetric rectangular ring resonant cavities and a waveguide, was built using a boundary coupling approach based on surface plasmon polaritons. A finite element method was employed to simulate and examine the filter, and the magnetic field distribution map and transmission curve were generated. The findings demonstrate that the filter's maximum transmittance in the pass-band is 0.969, and its minimum transmittance in the stop-band is close to 0. This filter also has a wide pass-band and stop-band features, and a smooth transmission curve. The filter's transmission curve can be red-shifted or blue-shifted by adjusting the structural parameters, and by setting certain structural parameters, the function of the on-off of the second and third communication windows of the filter can be controlled selectively while keeping the first communication window passing through. Thus, the filter can be employed as a band-pass/band-stop filter, which has crucial applications in high-density integrated circuits and optical fiber communication. Furthermore, an electro-optic switch function can be accomplished by enhancing the structure and adding the electro-optic material DAST.

**Key words** integrated optics; surface plasmon polaritons; metal-insulator-metal structure filter; oblique symmetric rectangular ring; transmission spectrum; band-pass/band-stop filter; electro-optic switch; finite element method

## 1 引言

表面等离子激元(SPPs)是金属与介质材料界面

间的自由电子集体振荡,与其中的电磁场耦合形成的沿金属表面传播的电磁波,在垂直分界面方向上以指数的形式迅速衰减。因其具有特殊的局域场强增强特

收稿日期: 2021-08-30; 修回日期: 2021-09-21; 录用日期: 2021-10-19

基金项目: 国家自然科学基金(61631007)、中央高校基本科研业务费资助项目(兰州大学)(lzujbky-2019-ct06)

通信作者: \*zhanggm@lzu.edu.cn

性,所以它可以把电磁场约束在亚波长范围内,从而能够突破光学衍射极限<sup>[1]</sup>并且能够实现对亚波长光学器件的集成化。SPPs 波导有金属-绝缘体-金属(MIM)和绝缘体-金属-绝缘体(IMI)两种结构,其中 MIM 结构已经广泛应用在集成器件中,如滤波器<sup>[2-3]</sup>、光开关、布拉格反射器<sup>[4]</sup>、传感器<sup>[5-6]</sup>等,甚至在纳米激光、表面增强拉曼散射中都有广泛的应用。

在众多应用中,滤波器最为常用,它可以对波长进行筛选,按照人们的意愿允许或阻止特定波长的波通过。常见的滤波器有矩形腔滤波器<sup>[7]</sup>、梯形腔滤波器<sup>[8]</sup>和圆环滤波器<sup>[9]</sup>。SPPs 波导滤波器按照耦合方式可以分为直接耦合滤波器<sup>[10-11]</sup>、边界耦合滤波器<sup>[12-13]</sup>和口径耦合滤波器<sup>[14-15]</sup>3 种类型,按照通带类型可分为带通滤波器<sup>[16-17]</sup>和带阻滤波器<sup>[18-19]</sup>。十多年前,就有若干研究小组对 SPPs 矩形波导和侧耦合谐振腔滤波器做出了开拓性的研究工作<sup>[20-23]</sup>,其中文献<sup>[20]</sup>设计了多齿结构滤波器,该滤波器具有带通/带阻的功能。文献<sup>[21]</sup>和<sup>[22]</sup>设计了单齿结构滤波器与亚波长耦合器结构滤波器,该系列滤波器实现了一种带通滤波器的功能。文献<sup>[23]</sup>对单齿结构滤波器与多齿结构滤波器进行了更深入的研究与总结。近年来研究者们不断地对滤波器的性能进行改进,例如文献<sup>[24]</sup>、<sup>[25]</sup>所设计的半圆腔滤波器和 L 形腔滤波器,这两种滤波器具有较高的透射率和较宽的带宽。

本文提出了一种边界耦合的斜对称双矩形环 MIM 滤波器,填充 SiO<sub>2</sub> 介质材料来使滤波器的性能更加优良,运用有限元法分析了该滤波器的传输特性,通过改变结构参数和填充的介质材料来观察其透射谱线图的变化规律,对结构进行优化使其能够应用在三个光通信窗口附近,并给出优化后的参数及其透射谱线图。在此基础上,将电光材料 DAST 引入滤波器,并对结构进行优化分析,通过调节外加电压实现了对第二、三光通信窗口的通断选择性控制的功能。

## 2 结构设计与分析方法

图 1 是本文所设计的斜对称双矩形环 MIM 滤波器结构示意图及其相关参数,首先在波导管的上下斜对称两侧放置两个稍大一点的矩形腔,然后在两个大矩形腔内居中放置两个小矩形,形成矩形环谐振腔。 $L$ 、 $H$  和  $l$ 、 $h$  分别是大小矩形的宽度和高度, $w$  为波导管的宽度, $d$  为两个矩形腔之间的距离, $a$  为小矩形到波导管之间的垂直距离。图中灰色部分为 Ag,中间深色部分填充折射率为 1.5 的 SiO<sub>2</sub> 介质材料,其中 Ag 的相对介电常数由标准 Drude<sup>[14,26]</sup>模型计算得到,表达式为

$$\epsilon_m = \epsilon_\infty - \frac{\omega_p^2}{\omega^2 + i\omega\gamma}, \quad (1)$$

式中: $\omega$  为真空中入射波的角频率; $\omega_p = 1.38 \times 10^{16}$  rad/s 为等离子体角频率; $\gamma = 2.73 \times 10^{13}$  rad/s;

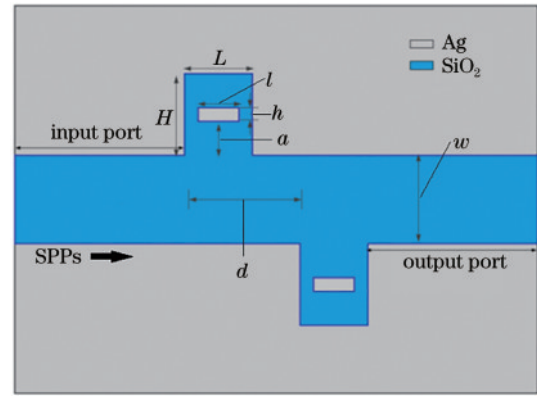


图 1 斜对称双矩形环滤波器结构示意图

Fig. 1 Schematic diagram of oblique symmetric double rectangular ring filter structure

$\epsilon_\infty = 3.7$  为无穷介电常数。SPPs 波从结构左端口入射并沿着波导管向右传播,最后从右端口出射,对于一般金属-介质-金属(MDM)波导中 TM 模的色散关系<sup>[21,27-28]</sup>由下式可得

$$\epsilon_d k_m + \epsilon_m k_d \coth\left(-\frac{ik_d}{2}w\right) = 0, \quad (2)$$

其中  $k_d$  和  $k_m$  为

$$k_d^2 = \epsilon_d k_0^2 - \beta^2, \quad k_m^2 = \epsilon_m k_0^2 - \beta^2, \quad (3)$$

式中: $\beta$  为 SPPs 在该波导结构中的相位常数; $k_0 = 2\pi/\lambda$  为真空中的波矢量; $\epsilon_d$  和  $\epsilon_m$  分别为空气和 Ag 的相对介电常数。

在 SPPs 传播过程中,一部分波会耦合至矩形环谐振腔中,其余的波会沿着波导管继续向右传播,用  $\Delta\varphi = 4\pi n_{\text{eff}} L_{\text{eff}}/\lambda + \varphi$  来表示一个周期内 SPPs 的相位变化,当  $\Delta\varphi = 2n\pi$  ( $n = 1, 2, 3, \dots$ ) 时,在腔内会形成稳定的驻波。从而可以得到共振波长<sup>[29-30]</sup>:

$$\lambda = \frac{2n_{\text{eff}} L_{\text{eff}}}{n - \varphi/\pi}, \quad (4)$$

式中: $L_{\text{eff}}$  是有效波导长度,该结构中有效波导长度  $L_{\text{eff}} = L + l + H + h$ ;  $n_{\text{eff}}$  是有效折射率,满足  $n_{\text{eff}} = \beta/k_0$ ;  $\varphi$  是 SPPs 在金属-绝缘体界面处反射引起的相位变化;正整数  $n$  是 SPPs 的波腹数。

运用基于有限元分析方法<sup>[31]</sup>的 COMSOL Multiphysics 软件来仿真 SPPs 在该结构滤波器中的传输过程。在仿真过程中波导结构的上下两侧加入完美匹配层(PML)用来吸收电磁波,网格划分采用较细化的三角网格。结构参数初始值设置为  $L = 100$  nm,  $H = 120$  nm,  $l = 60$  nm,  $h = 20$  nm,  $d = 170$  nm, 固定  $w = 130$  nm,  $a = 50$  nm 不变,取透射系数为  $T$ ,定义其表达式为

$$T = \left| \frac{H_o}{H_i} \right|^2, \quad (5)$$

式中: $H_i$  为入射端的磁场幅度值; $H_o$  为出射端的磁场幅度值。

### 3 仿真结果与分析

图 2 是单矩形环与斜对称双矩形环结构滤波器透射谱线的对比图,标注圆形的曲线是斜对称双矩形环滤波器的透射谱线图,其中通带透射率最高可达 0.969,在波长 715 nm 到 1068 nm 范围内,透射率大于 0.9,第一通信窗口(850 nm)处的透射率为 0.968;阻带透射率最低接近 0,在波长 1252 nm 到 1586 nm 范围内透射率小于 0.1;第二通信窗口(1310 nm)和第三通

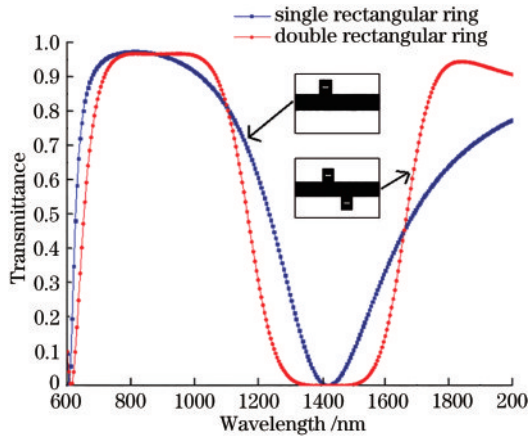


图 2 单矩形环与斜对称双矩形环结构滤波器的透射谱线图  
Fig. 2 Transmission spectra of single rectangular ring and oblique symmetric double rectangular ring structure filters

信窗口(1550 nm)处的透射率分别为 0.01 和 0.03。标注正方形的曲线为单矩形环结构,从对比图中可以看到,单矩形环结构滤波器的通带与阻带的带宽均没有双矩形环结构滤波器的带宽宽并且曲线不够平滑,上升沿和下降沿的陡峭度也没有双矩形环结构滤波器大,整体性能效果远不及双矩形环结构滤波器。

对这两种结构滤波器的磁场分布图进行仿真分析,以便更好地研究这两种结构的传输特性。首先观察单个矩形环谐振腔的磁场分布图,SPPs 从左向右沿着波导管传输,经过矩形环谐振腔时一部分传输至腔体内,图 3(a)是当大部分 SPPs 传输到腔体时的磁场图,其中还有一小部分会继续沿着波导管向右传输,之后 SPPs 会从腔体里传出来与之前波导管里的 SPPs 叠加,如图 3(b)所示;当从腔体传出的 SPPs 与主波导管的 SPPs 相位相同时,会发生相长干涉,透射谱线图出现波峰现象,如图 3(c)所示;当从腔体传出的 SPPs 与主波导管的 SPPs 相位相反时,会发生相消干涉,透射谱线图出现波谷现象,如图 3(d)所示。对于斜对称双矩形环谐振腔,与单矩形环类似,不同之处在于 SPPs 从第一个腔体出射会进入到第二个腔体,两个腔体共同吸收并储存电磁波,并且两个谐振腔之间的距离使得 SPPs 传输到输出端的有效路径增大,延缓了 SPPs 传输到输出端的时间,这样起到了展宽带宽的作用。

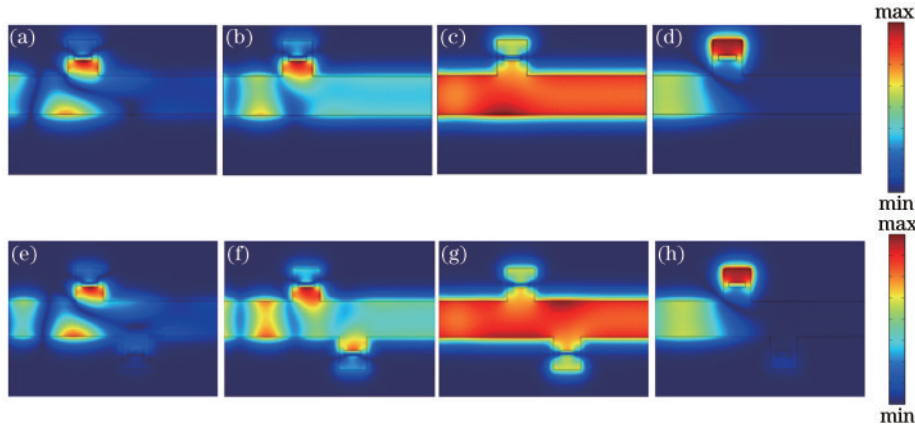


图 3 单矩形环结构( $\lambda_1$ )和斜对称双矩形环结构( $\lambda_2$ )滤波器的磁场分布图。(a)  $\lambda_1=600$  nm;(b)  $\lambda_1=650$  nm;(c)  $\lambda_1=850$  nm;(d)  $\lambda_1=1400$  nm;(e)  $\lambda_2=600$  nm;(f)  $\lambda_2=680$  nm;(g)  $\lambda_2=850$  nm;(h)  $\lambda_2=1400$  nm  
Fig. 3 Magnetic field distribution diagram of single rectangular ring ( $\lambda_1$ ) and oblique symmetric double rectangular ring ( $\lambda_2$ ) structural filters. (a)  $\lambda_1=600$  nm; (b)  $\lambda_1=650$  nm; (c)  $\lambda_1=850$  nm; (d)  $\lambda_1=1400$  nm; (e)  $\lambda_2=600$  nm; (f)  $\lambda_2=680$  nm; (g)  $\lambda_2=850$  nm; (h)  $\lambda_2=1400$  nm

### 4 结构参数和介质材料折射率对传输谱线的影响分析

为进一步研究该结构的传输特性,下面采用控制变量法调节结构参数来仿真并观察计算结果。首先保持初始参数值( $H=120$  nm,  $l=60$  nm,  $h=20$  nm,  $d=170$  nm)不变,改变外部大矩形腔的宽度  $L$ ,变化范围为 80 nm 到 120 nm,步长设定为 10 nm,透射谱线图如

图 4(a)所示,可以清楚地看到,随着  $L$  的增加,传输谱线发生明显的蓝移现象,并且通带带宽减小,阻带带宽增大,下降沿的陡峭度略微增大,上升沿略微减小;接着来改变外部矩形腔的高度  $H$ ,变化范围为 100 nm 到 140 nm,步长设定为 10 nm,保持其他初始参数值( $L=100$  nm,  $l=60$  nm,  $h=20$  nm,  $d=170$  nm)不变,透射谱线图如图 4(b)所示,可以清楚地看到,随着  $H$  的增加,传输谱线发生明显的红移现象,通带变得更平



滑,带宽变大,阻带带宽也增大,下降沿的陡峭度减小;然后改变里面的小矩形宽度  $l$ ,变化范围为 50 nm 到 70 nm,步长设定为 5 nm,保持其他初始参数值( $L=100$  nm,  $H=120$  nm,  $h=20$  nm,  $d=170$  nm)不变,透射谱线图如图 5(a)所示,可以看到,随着  $l$  的增加,透射谱线发生红移现象,阻带带宽减小;最后考察一下两

个矩形环谐振腔之间的距离  $d$  对传输谱线的影响,  $d$  从 150 nm 变化到 190 nm,步长设定为 10 nm,保持其他初始参数值( $L=100$  nm,  $H=120$  nm,  $l=60$  nm,  $h=20$  nm)不变,透射谱线图如图 5(b)所示,可以看到随着  $d$  的增大,透射谱线图发生轻微的红移,通带带宽略微增大,阻带的下降沿陡峭度增大,上升沿陡峭度减小。

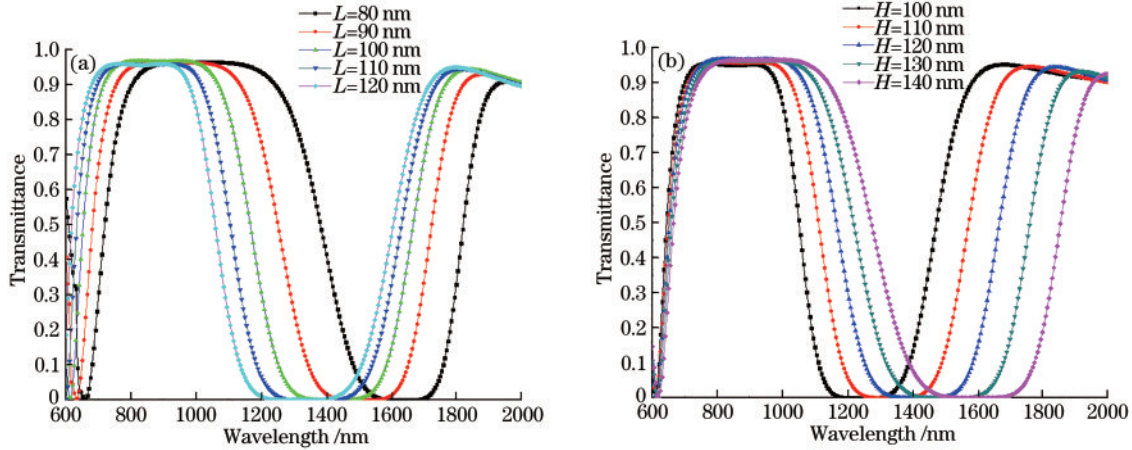


图 4 参数  $L$  和  $H$  的变化对滤波器透射谱的影响。(a) 不同参数  $L$  的透射谱线图;(b) 不同参数  $H$  的透射谱线图

Fig. 4 Effect of changing parameters  $L$  and  $H$  on transmission spectra of filter. (a) Transmission spectra with different  $L$ ; (b) transmission spectra with different  $H$

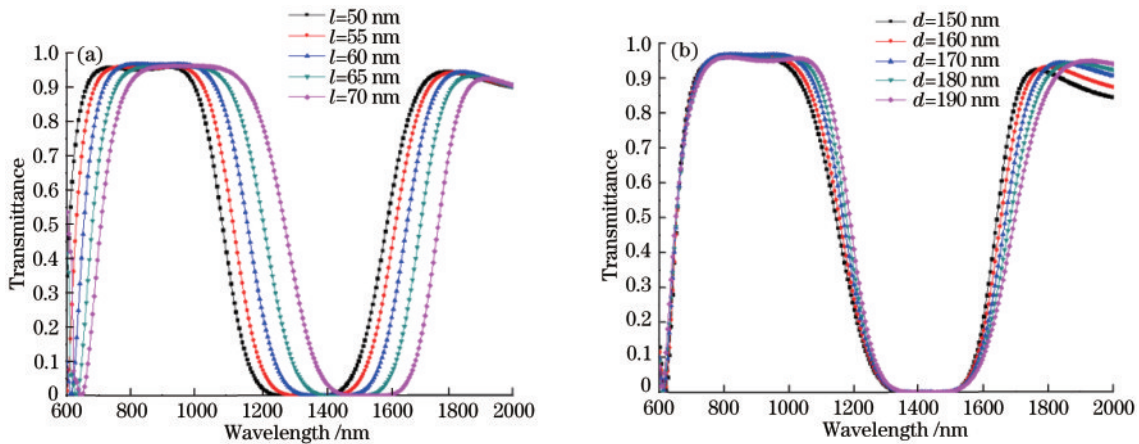


图 5 参数  $l$  和  $d$  的变化对滤波器透射谱的影响。(a) 不同参数  $l$  的透射谱线图;(b) 不同参数  $d$  的透射谱线图

Fig. 5 Effect of changing parameters  $l$  and  $d$  on transmission spectra of filter. (a) Transmission spectra with different  $l$ ; (b) transmission spectra with different  $d$

结合之前的磁场分布图,下面来分析一下结构参数对传输谱线的影响。随着参数  $L$  的增大,谐振腔与波导管的耦合直径随之增大,这种情况下,结构有效折射率减小<sup>[24]</sup>,相同入射波在波导中传播时共振波长随之减小,从而使透射谱线发生蓝移的现象,  $L$  的增大也表明矩形环谐振腔的宽度增大, SPPs 也更加容易传输到矩形环谐振腔里面,也使得输出端在 SPPs 未充满矩形环谐振腔前接收到 SPPs 减少,所以通带的带宽减小。随着参数  $H$  的增大,根据有效波导长度公式  $L_{\text{eff}}=L+l+H+h$  可知, SPPs 在矩形环谐振腔中有效传播距离增大,再根据共振波长公式(4)可知,共振波长随之增大,从而透射谱线发生红移的现象,  $H$

的增大也表明矩形环谐振腔高度的增大,也意味着更多的波可以传播到腔体里面,腔体也能够储存更多的磁场能量,从而导致阻带带宽增大,同时也使得输出端在 SPPs 未充满第一个矩形环谐振腔前可以接受到更多的 SPPs,从而通带的带宽增大。当参数  $l$  增大时,也即谐振腔里面的小矩形宽度增大,由于里面填充的是金属,所以会使得 SPPs 传输到谐振腔里更加困难,根据有效波导长度公式  $L_{\text{eff}}=L+l+H+h$  与公式(4)可知,共振波长会随之增大,从而透射谱线图会发生红移,由于对带宽影响更大的是矩形环谐振腔的宽度与高度,所以,虽然随着  $l$  的增大,阻带带宽有所减小,但是变化非常小。当参数  $d$  增大时,两谐振腔

距离变大,相应 SPPs 在波导管传播的光程增大,从而透射谱线发生红移现象,参数  $d$  的增大也会导致两个谐振腔的相互影响有所减弱,从而阻带上升沿的陡峭度也会减小。

综上所述,结构参数对透射谱线的移动,通带和阻带的带宽,上升沿和下降沿的陡峭度均有不同程度的影响,基于以上影响,可调节结构参数来对透射谱线进行优化分析,使得滤波器能够应用在光通信波段并且兼顾光通信的三个窗口(850、1310、1550 nm),尤其是第二、三通信窗口。图 6 是优化后的三种不同参数组合下的透射谱线图,其中,标注圆形的曲线是参数设置为  $L=100\text{ nm}, H=120\text{ nm}, d=170\text{ nm}$  的透射谱线图,可以看到,第一通信窗口位于透射谱线的通带,第二、三通信窗口位于透射谱线的阻带;标注正方形的曲线是参数设置为  $L=110\text{ nm}, H=105\text{ nm}, d=130\text{ nm}$  的透射谱线图,可以看到,第一、三通信窗口位于透射谱线的通带,第二通信窗口位于透射谱线的阻带;标注三角形的曲线是参数设置为  $L=88\text{ nm}, H=140\text{ nm}, d=210\text{ nm}$  的透射谱线图,可以看到,第一、二通信窗口位于透射谱线的通带,第三通信窗口位于透射谱线的阻带。这三种曲线通带和阻带都比较平滑,通带透射率最高值可达 0.969,阻带透射率最低接近 0,可以实现对三个光通信窗口通断的选择性控制。

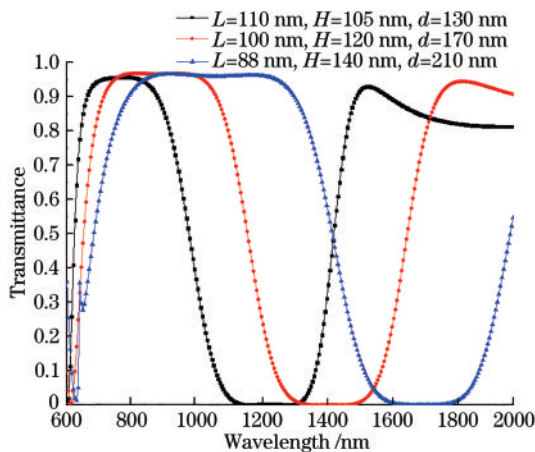


图 6 优化后的三种不同参数组合下的透射谱线图

Fig. 6 Transmission spectra of optimized structures with three different parameter combinations

接下来看一看介质材料折射率对透射谱线图的影响,如图 7 所示,选用折射率为  $n=1, n=1.25, n=1.5$  三种介质材料来进行对比,可以看到,随着折射率  $n$  的增大,透射谱线图发生红移现象,并且通带和阻带的带宽均有所增大,但是透射谱线图的整体形状无太大的变化,因为空气介质的折射率为 1,其所对应的透射谱线图通带和阻带部分并不能覆盖在光通信的三个通信窗口上,所以该结构中选用折射率为 1.5 的  $\text{SiO}_2$  介质材料而不选用空气介质材料。

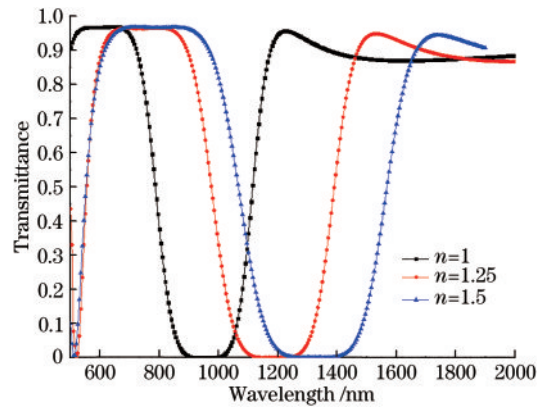


图 7 三种不同介质折射率的透射谱线图

Fig. 7 Spectra distribution of three different refractive index media

## 5 电光开关的设计

在上一节的基础上,在波导管和双矩形环谐振腔之间加 10 nm 厚度的挡板对结构进行改进,其结构示意图如图 8 所示,其他结构参数均保持初始值不变,考虑到材料的廉价性,白色部分的波导管填充的材料由  $\text{SiO}_2$  改变为折射率为 1 的空气,灰色部分仍然为 Ag,在图中深色部分的斜对称双矩形环谐振腔中加入电光材料 DAST (4-dimethyl-aminon-methyl-4-stilbazoliumtosylate),这是一种有机非线性材料,由于通过施加外加电压可以改变它的折射率,所以它是一种电光材料,与其他的电光材料相比, DAST 具有更高的电光系数 ( $\kappa=3.41\text{ nm/V}$ ), DAST 的折射率与外加电压的关系表达式<sup>[29,32]</sup>为

$$n_{eo}(U) = n_{eo}(0) + \kappa U/L, \quad (6)$$

式中:  $n_{eo}(0) = 2.2$ , 表明外加电压为 0 时,电光材料 DAST 的折射率为 2.2;  $L$  是谐振腔的宽度;  $U$  是外加电压,电极位置如图 9 所示放置在谐振腔上。

当外加电压  $U=0$  时,改进结构后的透射谱线图如图 10(a) 所示,可以看到,曲线在 1370 nm 附近有一个很狭窄的共振谷,这个波谷点相应的阻带带宽非常窄,并且阻带的上升沿和下降沿的陡峭度非常大,加入电光材料 DAST,可以用作一种电光开关,实现对某个特定波长或者这个波长附近很小范围内的波长的通断进行选择控制。可以定义:当某个特定波长透射率大于 0.9 时,该波长处于光开关中的“打开”状态;当某个特定波长透射率小于 0.05 时,该波长处于光开关中的“关闭”状态。

根据结构参数和折射率对透射谱线的影响规律来调节该结构的参数对透射谱线图进行优化,将优化后的结构参数设置为  $L=100\text{ nm}, H=120\text{ nm}, l=48\text{ nm}, h=20\text{ nm}, d=170\text{ nm}$ , 图 10(b) 是三种不同外加电压下的优化结构的透射谱线图。标注正方形的曲线是当不施加外加电压时的透射谱线图,此时光通信中第

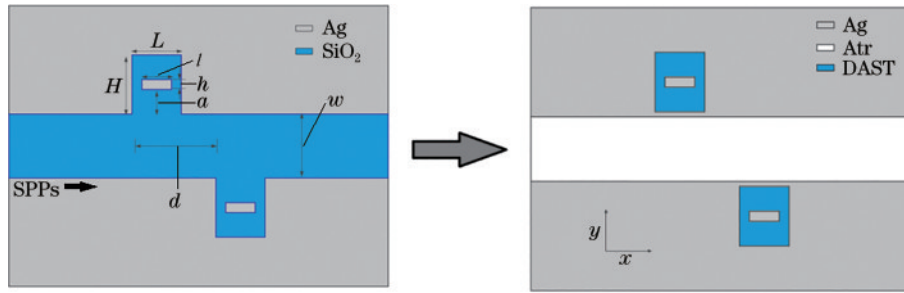


图 8 斜对称双矩形环结构滤波器加挡板改进后的结构示意图

Fig. 8 Schematic diagram of improved structure of oblique symmetric double rectangular ring structure filter with baffle

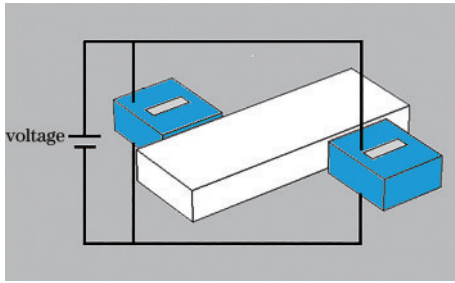


图 9 电极位置示意图

Fig. 9 Schematic diagram of electrode position

二通信窗口 (1310 nm) 的透射率为 0.92, 第三通信窗口 (1550 nm) 的透射率为 0.98, 第二、三通信窗口均

处于“打开”状态; 标注圆形的曲线是当外加电压  $U=4.84\text{ V}$  时的透射谱线图, 此时光通信中第二通信窗口的透射率为 0.01, 处于“关闭”状态, 第三通信窗口的透射率为 0.97, 处于“打开”状态; 标注三角形的曲线是当外加电压  $U=17.9\text{ V}$  时的透射谱线图, 此时光通信中第二通信窗口的透射率为 0.98, 处于“打开”状态, 第三通信窗口的透射率为 0.03, 处于“关闭”状态。表 1 能够更加直观地描述不同外加电压对第二、三通信窗口开关的控制关系。该电光开关可以实现在不改变结构参数的情况下, 仅通过调节外加电压便可对第二、三通信窗口的通断实现选择性控制。

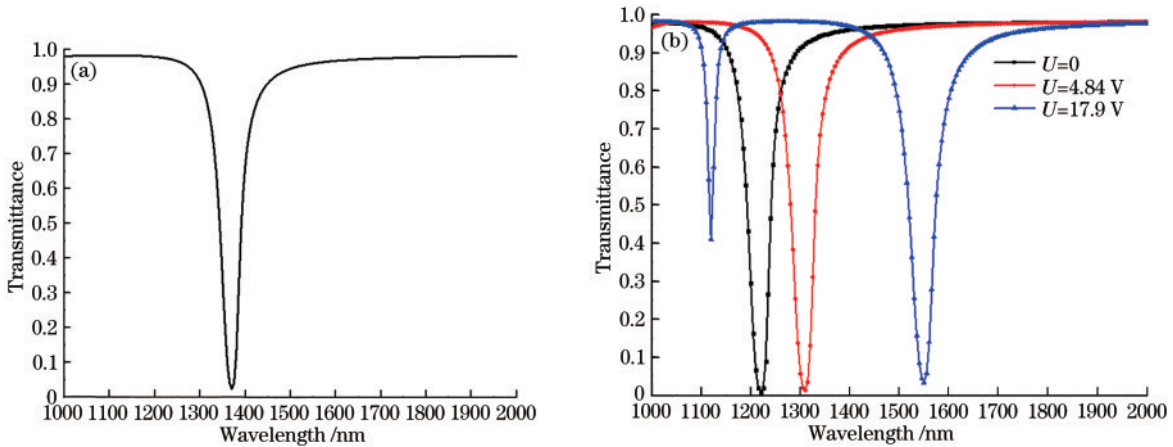


图 10 斜对称双矩形环结构滤波器结构加挡板改进后的透射谱线图。(a)  $U=0$  时优化结构的透射谱线图; (b) 三种不同外加电压下优化结构后的透射谱线图

Fig. 10 Spectra of optimized structure of oblique symmetric double rectangular ring structure filter with baffle. (a) Transmission spectrum of optimized structure when  $U=0$ ; (b) transmission spectra of optimized structures under three different applied voltages

表 1 不同外加电压对第二、三通信窗口开关的控制关系

Table 1 Control relationship of different applied voltages on second and third communication window switches

Control voltage /V	Second communication window (1310 nm)	Third communication window (1550 nm)
$U=0$	On	On
$U=4.84$	Off	On
$U=17.9$	On	Off



## 6 结 论

提出了一种边界耦合斜对称双矩形环 MIM 滤波器,运用有限元法对该结构进行仿真计算,结果表明,所设计的滤波器具有通带和阻带的带宽比较宽、透射谱线图平滑且覆盖光通信的三个通信窗口、通带透射率高、阻带透射率低等优点,通过改变结构参数来观察透射谱线图的变化,用磁场图来对透射谱线图的变化做出相应解释,并且改变结构参数对透射谱线进行优化使其能够对光通信的三个通信窗口的通断进行选择控制,此外该滤波器还具有结构简单易于制造、结构尺寸小且易于集成等优点,应用在高密度集成电路和光纤通信中有着非常重要的意义。另外通过改进结构并加入电光材料 DAST,调节外加电压实现了对第二、三通信窗口的通断进行选择控制的功能。

### 参 考 文 献

- [1] Luo X G, Yan L S. Surface plasmon polaritons and its applications[J]. *IEEE Photonics Journal*, 2012, 4(2): 590-595.
- [2] Li B X, Li H J, Zeng L L, et al. Tunable filter and optical buffer based on dual plasmonic ring resonators[J]. *Journal of Modern Optics*, 2015, 62(3): 186-194.
- [3] Neutens P, Lagae L, Borghs G, et al. Plasmon filters and resonators in metal-insulator-metal waveguides[J]. *Optics Express*, 2012, 20(4): 3408-3423.
- [4] Chang C M, Solgaard O. Fano resonances in integrated silicon Bragg reflectors for sensing applications[J]. *Optics Express*, 2013, 21(22): 27209-27218.
- [5] Lu H, Liu X M, Mao D, et al. Plasmonic nanosensor based on Fano resonance in waveguide-coupled resonators [J]. *Optics Letters*, 2012, 37(18): 3780-3782.
- [6] Wu C, Khanikaev A B, Adato R, et al. Fano-resonant asymmetric metamaterials for ultrasensitive spectroscopy and identification of molecular monolayers[J]. *Nature Materials*, 2012, 11(1): 69-75.
- [7] Han Z. Ultracompact plasmonic racetrack resonators in metal-insulator-metal waveguides[J]. *Photonics and Nanostructures-Fundamentals and Applications*, 2010, 8 (3): 172-176.
- [8] Song C, Qu S N, Wang J C, et al. Plasmonic tunable filter based on trapezoid resonator waveguide[J]. *Journal of Modern Optics*, 2015, 62(17): 1400-1404.
- [9] Setayesh A, Mirzayari S R, Abrishamian M S. Numerical investigation of tunable band-pass\band-stop plasmonic filters with hollow-core circular ring resonator[J]. *Journal of the Optical Society of Korea*, 2011, 15(1): 82-89.
- [10] Yun B F, Hu G H, Cui Y P. A nanometric plasmonic waveguide filter based on Fabry-Perot resonator[J]. *Optics Communications*, 2011, 284(1): 485-489.
- [11] Wang T B, Wen X W, Yin C P, et al. The transmission characteristics of surface plasmon polaritons in ring resonator[J]. *Optics Express*, 2009, 17(26): 24096-24101.
- [12] Song C, Qu S N, Wang J C, et al. Plasmonic tunable filter based on trapezoid resonator waveguide[J]. *Journal of Modern Optics*, 2015, 62(17): 1400-1404.
- [13] Wang S W, Li Y, Xu Q J, et al. A MIM filter based on a side-coupled crossbeam square-ring resonator[J]. *Plasmonics*, 2016, 11(5): 1291-1296.
- [14] Zheng G G, Xu L H, Liu Y Z, et al. Optical filter and sensor based on plasmonic-gap-waveguide coupled with T-shaped resonators[J]. *Optik*, 2015, 126(23): 4056-4060.
- [15] Peng X, Li H J, Wu C N, et al. Research on transmission characteristics of aperture-coupled square-ring resonator based filter[J]. *Optics Communications*, 2013, 294: 368-371.
- [16] Wang G X, Lu H, Liu X M, et al. Tunable multi-channel wavelength demultiplexer based on MIM plasmonic nanodisk resonators at telecommunication regime[J]. *Optics Express*, 2011, 19(4): 3513-3518.
- [17] Chen Z, Yu L, Wang L L, et al. High-resolution compact plasmonic wavelength demultiplexers based on cascading square resonators[J]. *Chinese Physics Letters*, 2013, 30(5): 054212.
- [18] Yun B F, Hu G H, Cui Y P. Resonant mode analysis of the nanoscale surface plasmon polariton waveguide filter with rectangle cavity[J]. *Plasmonics*, 2013, 8(2): 267-275.
- [19] Han Z, Van V, Herman W N, et al. Aperture-coupled MIM plasmonic ring resonators with sub-diffraction modal volumes[J]. *Optics Express*, 2009, 17 (15): 12678-12684.
- [20] Tao J, Huang X G, Lin X S, et al. A narrow-band subwavelength plasmonic waveguide filter with asymmetrical multiple-teeth-shaped structure[J]. *Optics Express*, 2009, 17(16): 13989-13994.
- [21] Lin X S, Huang X G. Tooth-shaped plasmonic waveguide filters with nanometric sizes[J]. *Optics Letters*, 2008, 33(23): 2874-2876.
- [22] Zhang Q, Huang X G, Lin X S, et al. A subwavelength coupler-type MIM optical filter[J]. *Optics Express*, 2009, 17(9): 7533-7539.
- [23] Lin X S, Huang X G. Numerical modeling of a teeth-shaped nanoplasmonic waveguide filter[J]. *Journal of the Optical Society of America B*, 2009, 26(7): 1263-1268.
- [24] 王志爽, 张冠茂, 刘海瑞, 等. 基于表面等离子激元的口径耦合多功能非对称半圆腔滤波器设计[J]. *光子学报*, 2018, 47(4): 0423003.  
Wang Z S, Zhang G M, Liu H R, et al. Design of the aperture coupled multi-functional asymmetric semi-circular cavity filter based on surface plasmon polaritons [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2018, 47(4): 0423003.
- [25] 闫云菲. 基于表面等离子激元的新型 MIM 滤波器结构设计及传输特性分析研究[D]. 兰州: 兰州大学, 2019.  
Yan Y F. Study on the structural design and transmission characteristics analysis of the novel MIM filter based on surface plasmon polaritons[D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2019.
- [26] 李建国. 基于物理吸收和薄膜厚度的贵金属介电参数 Lorentz-Drude 模型优化分析研究[D]. 兰州: 兰州大学, 2014.

- Li J M. Based on the physical absorption and film thickness of the precious metal dielectric parameters Lorentz-Drude model optimization analysis[D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2014.
- [27] Tao J, Huang X G, Zhu J H. A wavelength demultiplexing structure based on metal-dielectric-metal plasmonic nano-capillary resonators[J]. Optics Express, 2010, 18(11): 11111-11116.
- [28] Liu Z, Yang C H, Wan P, et al. Dielectric-loaded black phosphorus surface plasmon polariton waveguides[J]. Optics Express, 2019, 27(13): 18005-18015.
- [29] Guo Z H, Zhang G M, Qiao L T, et al. Design of the voltage tunable side-coupled asymmetric Y-type resonance cavity MIM filter based on surface plasmon polaritons[J]. OSA Continuum, 2020, 3(3): 609-619.
- [30] 马娇, 李锦屏, 吴小所, 等. 基于光子晶体狭缝纳米梁腔法诺共振的传感特性[J]. 光学学报, 2021, 41(24): 2413002.
- Ma J, Li J P, Wu X S, et al. Sensing characteristics based on Fano resonance of photonic crystal slot nanobeam cavity [J]. Acta Optica Sinica, 2021, 41(24): 2413002.
- [31] 杨宏艳, 陈昱澎, 肖功利, 等. 内嵌对称扇形金属谐振腔的 MIM 可调谐等离子体滤波器[J]. 光学学报, 2020, 40(11): 1124001.
- Yang H Y, Chen Y P, Xiao G L, et al. MIM tunable plasmonic filter embedded with symmetrical sector metal resonator[J]. Acta Optica Sinica, 2020, 40(11): 1124001.
- [32] 吴梦, 梁西银, 孙对兄, 等. 基于表面等离子激元的非对称矩形环腔电可调滤波器设计[J]. 光学学报, 2020, 40(14): 1423001.
- Wu M, Liang X Y, Sun D X, et al. Design of asymmetric rectangular ring resonance cavity electrically adjustable filter based on surface plasmon polaritons[J]. Acta Optica Sinica, 2020, 40(14): 1423001.