

**基于表面等离子体诱导透明的半封闭T形波导侧耦合圆盘腔的波导滤波器**

陈颖 谢进朝 周鑫德 张灿 杨惠 李少华

**Semi-closed T-shaped-disk waveguide filter based on surface-plasmon-induced transparency**

Chen Ying Xie Jin-Chao Zhou Xin-De Zhang Can Yang Hui Li Shao-Hua

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 68, 237301 (2019) DOI: 10.7498/aps.68.20191068

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.7498/aps.68.20191068>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn>

---

**您可能感兴趣的其他文章**

**Articles you may be interested in**

基于全相位滤波技术的光纤表面等离子体共振传感解调算法

Optical fiber SPR sensing demodulation algorithm based on all-phase filters

物理学报. 2017, 66(7): 074202 <https://doi.org/10.7498/aps.66.074202>

改进型混合表面等离子体微腔激光器的研究

Improved hybrid plasmonic microcavity laser

物理学报. 2018, 67(19): 195204 <https://doi.org/10.7498/aps.67.20180242>

长程表面等离子体的增强效应

Long-range surface plasmon polariton enhancement in double-electrode structure

物理学报. 2017, 66(22): 227302 <https://doi.org/10.7498/aps.66.227302>

# 基于表面等离子体诱导透明的半封闭 T 形波导侧耦合圆盘腔的波导滤波器\*

陈颖<sup>1)†</sup> 谢进朝<sup>1)</sup> 周鑫德<sup>1)</sup> 张灿<sup>1)</sup> 杨惠<sup>1)</sup> 李少华<sup>2)</sup>

1) (燕山大学电气工程学院, 测试计量技术与仪器河北省重点实验室, 秦皇岛 066004)

2) (河北先河环保科技股份有限公司, 石家庄 050000)

(2019 年 7 月 13 日收到; 2019 年 9 月 16 日收到修改稿)

基于表面等离子体激元的传输及耦合特性, 提出了一种半封闭 T 形波导侧耦合圆盘腔的金属-介质-金属波导滤波器结构. 应用有限元法研究了其传输特性. 结果表明, 在透射光谱中出现了基于等离子体诱导透明 (PIT) 效应的窄带透射峰. 通过理论分析与模场分布有效阐释了 PIT 透明峰与两侧谷值的物理产生机理, 同时数值研究表明通过改变支节长度与圆盘谐振腔半径可调节滤波器共振波长, 通过外调制来改变结构介质折射率可实现滤波波长的近似线性调节. 进一步, 在圆盘腔中内嵌增益介质, 增强了对光的局域能力, 加强了模式共振作用, 实现了压缩滤波通带带宽的同时有效地提高了结构透射率, 相比同类滤波器获得了更好的滤波性能. 研究结果为高分辨率窄带滤波器的设计提供了有效的理论参考.

**关键词:** 表面等离子体激元, 等离子体诱导透明, 增益介质, 滤波器

**PACS:** 73.20.Mf, 42.50.Gy, 42.79.Gn

**DOI:** 10.7498/aps.68.20191068

## 1 引言

表面等离子体激元 (SPPs) 是由金属表面自由电子与入射光子相互作用产生, 局域在金属-电介质界面传播的一种非辐射电磁模式, 其振幅在垂直于金属界面向两侧呈指数衰减<sup>[1]</sup>. SPPs 能将电磁场能量集中在亚波长尺度, 打破了传统光学器件的衍射极限<sup>[2]</sup>. 因此, SPPs 广泛应用于亚波长级别对光的传输和控制, 逐渐成为光子芯片中的信号载体, 实现亚波长光学器件的集成<sup>[3-6]</sup>. 其中, 相比其他基于 SPPs 的亚波长波导器件, 金属-介质-金属 (MIM) 波导能产生超高强度的电磁模式, 使光信号在传输中有较低的弯曲辐射损耗<sup>[7]</sup>, 且具有场空

间局域增强、结构简单易于集成等优点, 在各类光子器件的研制中广泛应用, 如滤波器、生化传感器、光开关等.

滤波器是光学集成芯片中的核心通信器件<sup>[8]</sup>. 研究者设计了多种基于 MIM 型波导的等离子体滤波器, 包括齿形滤波器<sup>[9]</sup>、矩形腔滤波器<sup>[10]</sup>、环形腔滤波器<sup>[11]</sup>及波分复用滤波器结构<sup>[12]</sup>等. 但目前报道的此类滤波器半峰全宽多为 20 nm 量级以上, 分辨率仍需进一步提高. 近几年来, 基于 SPPs 亚波长波导光子器件中的等离子体诱导透明、等离子体诱导吸收及法诺共振等现象成为微纳光学领域的研究热点<sup>[13]</sup>. 其中 PIT 是由 SPPs 不同谐振模式相互作用导致原吸收区产生尖锐透明窗口的现象. 因此, 利用该特点设计基于等离子体诱导透明

\* 国家自然科学基金 (批准号: 61201112, 61475133)、河北省重点研发计划项目 (批准号: 19273901D)、河北省自然科学基金 (批准号: F2016203188)、中国博士后基金项目 (批准号: 2018M630279)、河北省博士后择优资助项目 (批准号: D2018003028)、河北省高等学校科学技术研究项目 (批准号: ZD2018243) 和中国国家留学基金 (批准号: 201808130004) 资助的课题.

† 通信作者. E-mail: [chenying@ysu.edu.cn](mailto:chenying@ysu.edu.cn)

(PIT) 效应的 MIM 波导结构滤波器可以得到更高的分辨率和品质因数. 例如, Chen 等<sup>[14]</sup>设计的单侧多齿腔 MIM 波导结构, 通过调节各齿腔的深度及间距产生了 PIT 效应; Yang 等<sup>[15]</sup>利用双侧非对称齿型腔实现了 PIT 效应的滤波结构, 都明显降低了结构的通带带宽. 然而, 由于金属部件引起的欧姆损耗, 其透射率亦会随着齿数的增加而下降. 因此, 如何在 MIM 波导滤波器中压缩滤波带宽的同时有效提升透射效率, 获得更好的选频和滤波效果, 还需开展进一步的研究工作.

基于此, 本文提出了一种半封闭 T 形波导侧耦合圆盘腔实现 PIT 效应的滤波结构, 在透射光谱图上出现一个很窄的透明峰, 通过理论分析和仿真模拟研究了其滤波特性和电磁场分布, 解释了该结构产生 PIT 透明峰的物理机理. 通过改变波导结构的几何参数及电介质材料的折射率可以有效选取滤波波长. 进一步, 通过向圆盘腔添加光学增益介质, 加强了其场空间局域能力, 提高了波导耦合效率, 使 PIT 峰透射率显著提高, 获得了低至 4 nm 的通带带宽, 实现了良好的窄带滤波性能.

## 2 结构设计与理论分析

### 2.1 结构模型的建立

本文构建的基于表面等离子诱导透明的 MIM 波导滤波器结构如图 1 所示, 为半封闭 T 形波导侧耦合圆盘腔滤波器的二维结构图. 金属材料为银, 电介质材料为 SiO<sub>2</sub>. 基于有限元法 (FEM) 建立了结构的几何分析模型, 设置了金属和电介质的相关计算参量, 运用 FEM 仿真软件 COMSOL Multiphysics 模拟电磁波与金属的相互作用, 边界使用完美匹配层 (PML) 包裹, 详细探究其光学传输特性. SiO<sub>2</sub> 的折射率为 1.45, 由于贵金属在近红外光波段为典型的色散材料, 加之其内在的欧姆热损耗, Drude 模型可较为准确地描述金属银的介电常量:  $\epsilon_m = \epsilon_\infty - \omega_p^2 / [\omega(\omega + j\gamma)]$ , 其中  $\epsilon_\infty = 3.7$  为无限大角频率处银的介电常数,  $\omega_p = 1.38 \times 10^{16}$  Hz 为等离子体谐振频率,  $\gamma = 2.73 \times 10^{13}$  Hz 为与损耗有关的电子碰撞频率,  $\omega$  为入射电磁波角频率. 当波导宽度远小于入射波长时, 波导中仅支持横磁 (TM) 基模传输, 由麦克斯韦方程和边界条件可得, 波导中传播的 TM 表面等离子激元 (SPPs) 满足色散关系<sup>[16]</sup>:

$$\tanh \left( w \sqrt{\beta_{\text{spp}}^2 - \epsilon_d k_0^2} / 2 \right) = -\epsilon_d \sqrt{\beta_{\text{spp}}^2 - \epsilon_m k_0^2} / \left( \epsilon_m \sqrt{\beta_{\text{spp}}^2 - \epsilon_d k_0^2} \right), \quad (1)$$

其中,  $\epsilon_d$  和  $\epsilon_m$  分别是介质与金属的介电常数,  $k_0 = 2\pi/\lambda$  为波导中传播的电磁波波矢,  $\lambda$  和  $w$  分别为真空中入射光波长和波导宽度,  $\beta_{\text{spp}} = n_{\text{eff}} \cdot k_0$  表示传播常量,  $n_{\text{eff}}$  为波导有效折射率. 波导宽度  $w$  设定为 50 nm, 从而确保波导中仅有横磁基模 (TM<sub>0</sub>) 被激发和传输.

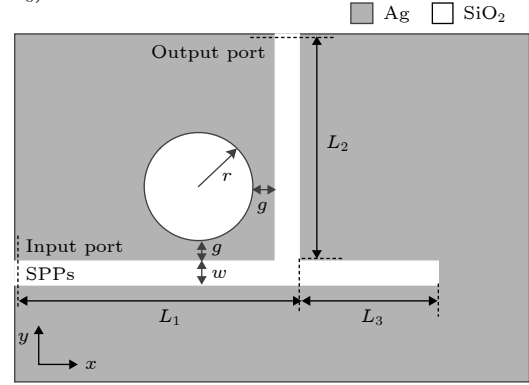


图 1 MIM 波导滤波器结构示意图

Fig. 1. Structure schematics of the MIM waveguide filter.

设定入射波导和出射波导的长度  $L_1$  和  $L_2$  相等, 半封闭 T 形波导的支节长度为  $L_3$ , 圆盘腔半径及其与半封闭 T 形波导的耦合间距分别用  $r$  与  $g$  表示. TM<sub>0</sub> 模式波在波导的入射端激发, 在距离输入和输出端口边缘 30 nm 处分别设置功率能流探测器, 检测通过这些界面的电磁场能流. 为更好地描述结构的传输特性, 定义透射率  $T$  为输出功率  $P_{\text{out}}$  与输入功率  $P_{\text{in}}$  之比, 即  $T = P_{\text{out}}/P_{\text{in}}$ .

### 2.2 理论分析

该结构的工作原理是 TM 模式波入射波导时, 激发的 SPPs 沿波导传播进入支节后, 在符合法布里-珀罗 (F-P) 共振条件时, 支节中会形成驻波而产生谐振<sup>[17]</sup>:

$$\lambda_m = 4\text{Re}(n_{\text{eff}})d_{\text{eff}} / [(2m + 1) - (\Delta\varphi(\lambda)/\pi)], \quad (2)$$

其中  $m$  是整数, 为共振阶数,  $\lambda_m$  是谐振波长,  $d_{\text{eff}}$  是 SPPs 经过的有效长度,  $\Delta\varphi(\lambda)$  是 SPPs 在金属介质界面发生反射所引起的相移. 当 SPPs 沿波导传输遇到圆盘腔时, 部分能量将耦合到腔中, 若入射波长符合圆盘腔谐振条件, 在其中会形成稳定的驻波模式. 纳米圆盘腔的共振条件可表示为<sup>[18]</sup>:

$$k_d \frac{H_n^{(1)'}(k_m r)}{H_n^{(1)}(k_m r)} = k_m \frac{J_n'(k_d r)}{J_n(k_d r)}, \quad (3)$$

其中,  $k_m = k_0 n_m$ ,  $k_d = k_0 n_d$ , 其中  $k_m$  和  $k_d$  分别是在周围金属和圆形介质中的波矢,  $n_m$  和  $n_d$  是金属和介质的折射率;  $J_n$  与  $J_n'$  分别是第一类  $n$  阶 Bessel 函数及其微商;  $H_n^{(1)}$  和  $H_n^{(1)'}$  分别是第一类  $n$  阶 Hankel 函数及其微商. 据方程 (3) 可得圆盘腔的半径和折射率决定谐振波长. 在本结构中, 当两个共振模式在一个系统中耦合且共振波长相近或相等时, 两模式间的相互作用使得支节谐振腔产生的吸收谱分裂, 且在分裂的吸收谱之间出现一低损耗的高透射窗口, 实现由吸收变为透过的 PIT 现象, 支节谐振腔和圆盘腔可类比于电磁诱导透明效应中的亮态和暗态.

图 2 为  $L_{1,2} = 780 \text{ nm}$ ,  $L_3 = 345 \text{ nm}$ ,  $r = 180 \text{ nm}$ ,  $g = 15 \text{ nm}$  时该结构的透射光谱 (黑线), 同时给出了同等结构参数下 Structure 1 (对应图 2 中的红色谱线) 和 Structure 2 (对应图 2 中的绿色谱线) 的透射谱线. 图 1 中所提出的结构 (即图 2 中的 Structure 3) 可分解为半封闭 T 形波导结构 (Structure 1) 和圆盘腔耦合弯曲波导结构 (Structure 2). 从图中可以看出, Structure 1 的透射谱型是一个成洛伦兹线型的透射谷, 而对于 Structure 2, 其透射谱是一个极窄的阻带. 对 Structure 1 来说, 支节相当于一个谐振腔, 波导中传输的 SPPs 在支节顶端反射后, 由于相消干涉而形成驻波, 抑制了传输, 因而在传输谱  $\lambda = 1048 \text{ nm}$  处出现一个较宽的阻带; 对 Structure 2 来说, 当耦合到圆盘腔中的电磁波满足共振条件时, 形成了稳定的驻波模式, 使能量束缚在腔内, 不能透射出去, 在传输谱  $\lambda = 1050 \text{ nm}$  处形成一个极窄的阻带. 而对于同时具有半封闭 T 形波导

与圆盘腔的 Structure 3 来说, 出射波导同时受到支节共振模式和圆盘腔共振模式的激发, 两个模态之间由于相位差异而干涉相消, 使得系统对原本吸收的脉冲吸收消失, 从而产生了 PIT 现象, 在透射谱中原本是谷 ( $\lambda = 1050 \text{ nm}$ ) 的地方出现 1 个透明峰, 显示了该结构有利于实现窄带滤波功能.

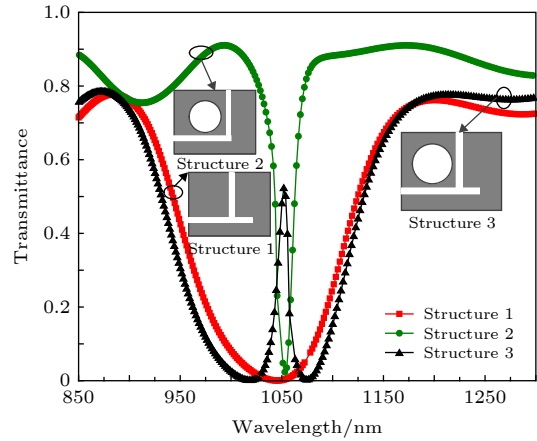


图 2 三种波导结构的透射光谱

Fig. 2. The transmission spectrum with three kinds of structures.

为深入分析上述现象的产生机理, 图 3(a)–(c) 分别是 Structure 3 左侧下降谷、透射峰和右侧下降谷波长处的电场强度分布. 从图 3(a) 和图 3(c) 可看出, 半封闭 T 形结构的谐振反射是导致左侧下降谷的主要原因, 右侧下降谷主要是由于波导和圆盘腔发生耦合作用, 形成稳定的驻波模式使得光波被局域在入射波导和圆盘腔中, 不能透射出去. 从图 3(b) 中可明显看出, 在支节与圆盘腔谐振波长处, 该结构实现的双边耦合效应使 SPPs 在腔与波导之间强烈反射, 圆盘腔中的能量转移到共振波导里, 类似一个能量存储器, 使得原来透射谷的位置形成狭窄的透射峰.

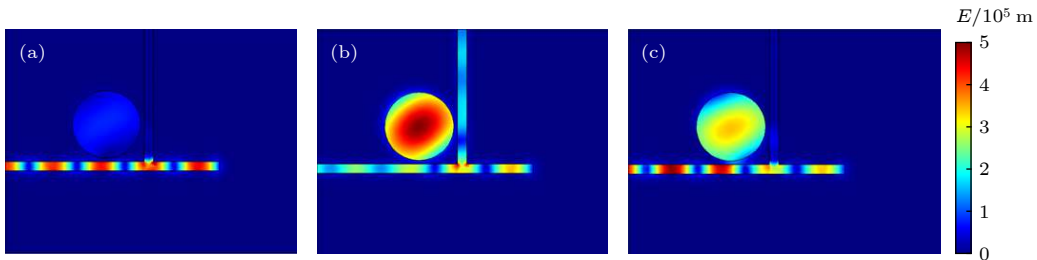


图 3 Structure 3 电场强度  $E$  分布 (a) 共振波长左侧谷; (b) 共振波长处; (c) 共振波长右侧谷

Fig. 3. Electric field intensity ( $E$ ) distribution of Structure 3: (a) At the left dip of the resonance wavelength; (b) at the resonance wavelength; (c) at the right dip of the resonance wavelength.

### 3 结果与讨论

#### 3.1 结构参数对滤波特性的影响

MIM 波导结构中结构参数的变化都会影响其传输特性. Structure 3 中 PIT 峰的出现是由支节和圆盘腔中两个共振模式相互作用形成, 结合 (2) 和 (3) 式可知, PIT 峰的位置将受支节长度与圆盘半径的共同影响. 为研究  $L_3$  和  $r$  对滤波特性的影响, 其余结构参量保持初始值, 计算了不同  $L_3$  和  $r$  时 Structure 3 的透射光谱, 如图 4(a) 所示. 图 4(c) 为透射峰共振波长与支节  $L_3$  和半径  $r$  的关系. 可以看出, 随着支节长度  $L_3$  和半径  $r$  等步长的增加, 透射光谱产生红移现象, PIT 峰波长近似呈线性增长. 且由图 4(d) 可以看出共振波长处  $L_3$  和  $r$  呈线性关系. 这是因为波导宽度恒定时, 电磁波在结构中传播时对应的有效折射率实部

$\text{Re}(n_{\text{eff}})$  恒定不变, 结合 (3) 式可知支节的长度越长透射谱中低谷位置对应的波长越长; 而对于以稳定驻波形式束缚于圆盘谐振腔中的电磁波, 相位差满足  $\Delta\varphi = 2\pi m$  条件, 结合相位差  $\Delta\varphi$  与有效折射率  $n_{\text{eff}}$  的近似关系:  $\Delta\varphi = (2\pi/\lambda) \cdot \int_0^L n_{\text{eff}} dL_{\text{eff}}$ , 可得其共振波长为:  $\lambda_r = \int_0^L n_{\text{eff}} dL_{\text{eff}}/m$ , 其中  $\Delta\varphi$  是圆盘腔内入射波与反射波之间的相位差,  $L_{\text{eff}}$  为腔内 SPPs 传播的有效长度 [19]. 因此, 圆盘腔中 SPPs 的途径长度随  $r$  增大而增长, 共振波长也随之变大. 这很好地说明了 PIT 峰随支节长度和圆盘腔半径增大而红移的现象.

Structure 3 中两个共振模式之间的耦合强度很大程度上依赖于耦合间距  $g$ , 因此改变耦合距离可调控 PIT 共振光谱. 图 4(b) 为在初始结构参量下计算的不同耦合距离  $g$  其对应的透射谱线. 随着  $g$  的增加即耦合由强变弱, PIT 透明窗口的半峰

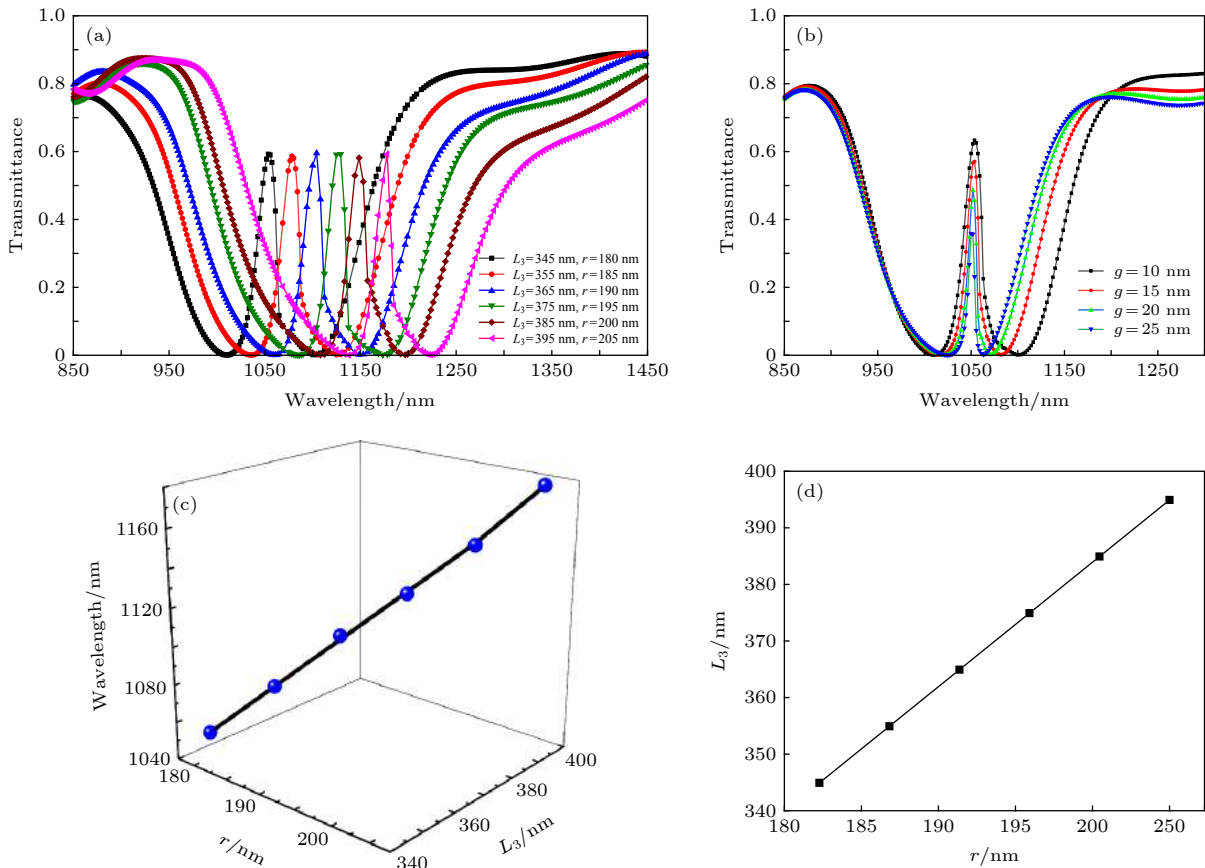


图 4 结构参数对滤波特性的影响 (a) 不同  $L_3$  和  $r$  时滤波器的透射谱; (b) 不同  $g$  时的透射谱; (c) 透射峰共振波长与  $L_3$  和  $r$  的关系; (d) 不同共振波长处  $L_3$  和  $r$  的关系

Fig. 4. Influence of parameters on filter characteristics: (a) Transmission spectra of the filter for different parameters of  $L_3$  and  $r$ ; (b) for different parameters of  $g$ ; (c) relationship between resonance wavelength and  $L_3$  and  $r$ ; (d) relation curves of  $L_3$  and  $r$  for different resonance peaks.

全宽越来越窄, 透明峰值也随之降低, 且 PIT 共振峰右侧下降谷发生蓝移, 与上述右侧下降谷主要受圆盘谐振腔影响的结论一致. 可以看出, 耦合强度随着耦合间距的增大逐渐减弱, 从而削弱了支节中亮模式与圆盘腔中暗模式的相互作用, 减小了超模谐振的波长间隔, 致使右侧下降谷发生轻微蓝移. 当耦合强度接近零时, 可以推断暗模式将不能通过近场耦合的形式被激发, 此时 PIT 效应难以形成, 可视为 Structure 1 支节谐振腔中的类 F-P 谐振. 综上所述, 合理选择结构参数可控制 PIT 透明峰位置和宽度, 实现选频波长和带宽的有效调控.

### 3.2 圆盘腔内折射率对滤波特性的影响

由方程 (2) 和 (3) 可知支节与圆盘腔的谐振波长与介质折射率有关, 所以为实现更多调节 PIT 现象的方法, 研究了改变结构介质折射率对 PIT 效应的影响. 图 5(a) 所示为初始结构参量不变时改变半封闭 T 形波导与圆盘腔介质折射率的透射光谱, 图 5(b) 为对应波长与介质折射率的线性关系. 系统内 SPPs 的传输光程随介质折射率的增加而增大, 导致 PIT 共振峰位置发生红移, 向长波长方向移动. 可利用此特点, 在系统中加入 Kerr 非线性或热光材料, 改变外加光强或温度调节材料折射率, 实现对入射波长的调谐滤波 [20].

### 3.3 增益介质对滤波特性的影响

由于金属材料存在固有的欧姆损耗, 导致 MIM 波导滤波器结构 PIT 透射峰值较低. 若能降低或补偿其固有损耗, 将获得更明显的 PIT 效应和更高的品质因数. 而金属引起的损耗主要因其介电常数的虚部  $\text{Im}(\epsilon_m)$  产生. Nezhad 等 [21] 理论推导

了具有负虚部的介质可作为增益补偿金属的吸收损耗. Chen 等 [22] 和 Babicheva [23] 分别提出利用 InGaAs 和 InGaAsP 作为增益介质补偿等离子传输的损耗, 并在一定条件下实现了净光学增益. 在此选择介质 InGaAsP ( $\epsilon = 11.38 + j\epsilon_i$ ) 添加到圆盘腔中, 其介电常数的虚部与光强有着密切关系, 随着光或电抽运强度的增加, 虚部  $\epsilon_i$  会逐渐由负值变为正值 [24]. 利用其电磁参数的负虚部补偿因金属电磁参数的正虚部引起的吸收损耗, 从而加强圆盘腔对能量的束缚能力, 增强明模和暗模的相互作用, 使更多能量耦合到共振波导里, 进而实现对 PIT 峰透射率的增益. 如图 6(a) 所示, 在与圆盘腔同心的方形区域内填充增益介质, 其边长为  $h$ , 制备时可利用电子束刻蚀的方式将其嵌入圆盘腔中. 图 6(b) 为  $\epsilon_i$  取不同值是相应的透射谱, 系统的结构参数为  $L_{1,2} = 780 \text{ nm}$ ,  $L_3 = 345 \text{ nm}$ ,  $r = 200 \text{ nm}$ ,  $g = 15 \text{ nm}$ ,  $h = 90 \text{ nm}$ . 可以发现,  $\epsilon_i$  的值越大, PIT 峰值透射率越大, 波导增益愈大. 图 7 是  $\epsilon_i = 0.9$  时 PIT 峰共振波长  $\lambda = 1038 \text{ nm}$  处的稳态磁场和电场强度分布图, 可以看到电磁能量主要分布在增益介质两侧, 其能量补偿了圆盘腔内的本征损耗, 增强了腔内的共振, 使得明模与暗模的相互作用更强烈, 透明窗口的透射率也随着增加. 该结果更深层次地说明了带有负虚部的折射率的重要性.

为检验所提出的基于表面等离子诱导透明结构滤波器的性能, 滤波器品质因数  $Q$  定义为  $\lambda_w/\Delta\omega_{1/2}$ . 其中  $\lambda_w$  是谐振腔共振时的共振波长,  $\Delta\omega_{1/2}$  是传输频谱的半峰全宽. 以图 2 Structure 3 初始参数与图 6(a) 结构  $\epsilon_i$  取 0.95 时为例, 计算其品质因数. 与之对应的共振波长和半峰全宽分别

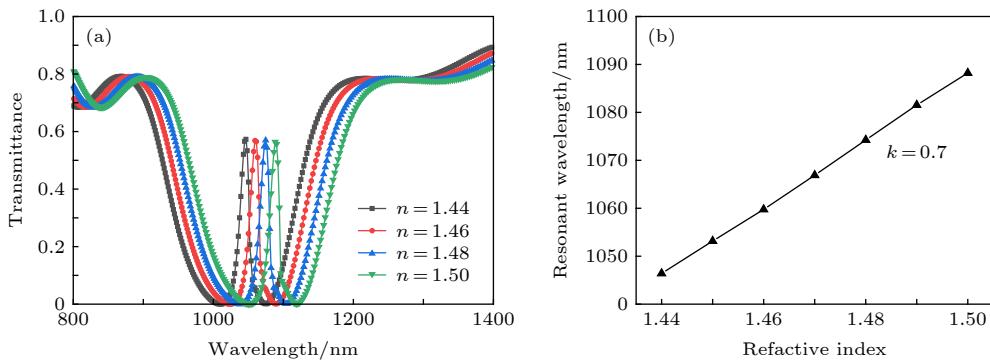


图 5 结构内填充不同折射率的介质 (a) 透射光谱; (b) 共振波长与介质折射率的关系

Fig. 5. Structures filled by different materials with different indexes: (a) Transmission spectra; (b) relationship curves between resonant wavelength and refractive index.

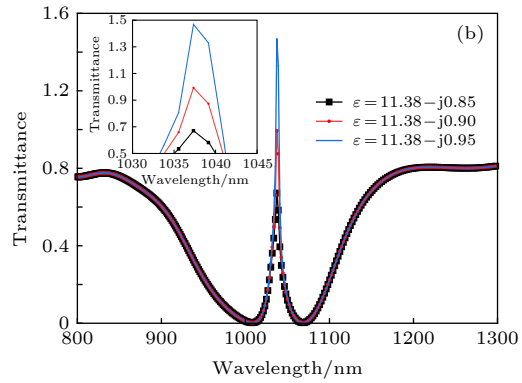
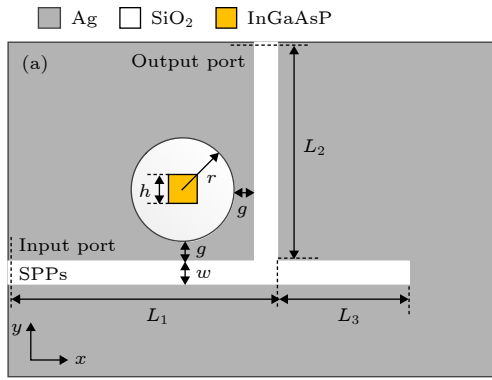


图 6 圆盘腔内嵌增益介质滤波器结构 (a) 二维结构图; (b) 不同  $\epsilon_i$  时透射光谱

Fig. 6. Nano disk-cavity embedded gain medium filter structure: (a) Two-dimensional structure diagram; (b) transmission spectra for different  $\epsilon_i$ .

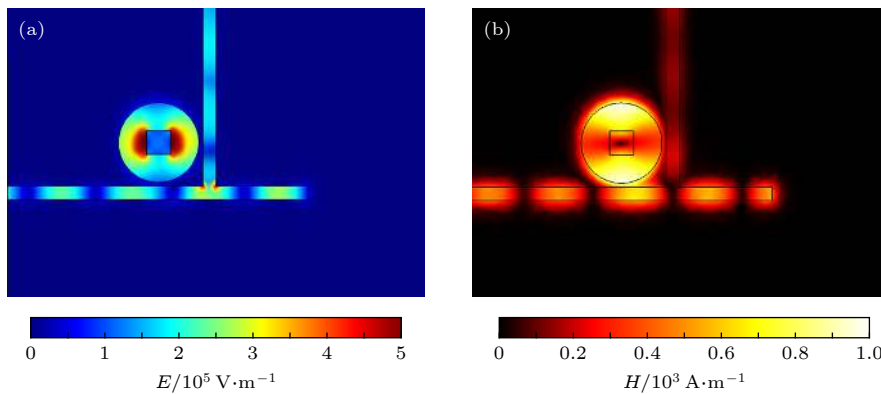


图 7 PIT 共振波长处电场强度与稳态磁场分布 (a) 电场强度场; (b) 稳态磁场

Fig. 7. Electric field intensity and steady state magnetic field distribution at resonant wavelengths of PIT: (a) Electric field intensity; (b) steady state magnetic field.

为 1050 nm, 10 nm 和 1038 nm, 4 nm, 可求得相应的  $Q$  值分别为 105 与 259.5. 这与已报道的同类滤波器相比优势明显, 在常用通信波段可实现很好的窄带滤波功能.

## 4 结 论

用 FEM 分析了半封闭 T 形波导侧耦合圆盘腔的 MIM 型波导滤波器的透射光谱, 并通过模场分布揭示了 PIT 透射峰产生的物理机理及实现条件. 研究发现, 透射峰对应的共振波长随支节长度和圆盘谐振腔半径的增加而红移, 由共振波长与圆盘腔介质折射率的线性关系, 可实现滤波器工作波长的调谐. 在此基础上研究了圆盘腔内添加增益介质时滤波器结构的透射特性, 利用带有负虚部折射率的增益介质补偿了圆盘腔内的本征损耗, 增强了共振作用, 实现了压缩滤波带宽的同时有效提升了结构的透射效率, 其半峰全宽明显低于已报道的同

类滤波器, 具有良好的窄带滤波功能. 研究结果对实现微纳光子集成器件提供了有价值的参考, 对窄带带通滤波器的设计有一定指导的意义.

## 参考文献

- [1] Barnes W L, Dereux A, Ebbesen T W 2003 *Nature* **424** 824
- [2] Ozbay E 2006 *Science* **311** 189
- [3] Jun Z, Xu W J, Xu Z J, Fu D L, Song S X, Wei D Q 2017 *Optik* **134** 187
- [4] Chen Y, Luo P, Zhao Z Y, He L, Cui X N 2017 *Phys. Lett. A* **381** 3472
- [5] Liu Y, Zhou F, Yao B, Cao J, Mao Q H 2013 *Plasmonics* **8** 1035
- [6] Qi Y P, Zhang X W, Zhou P Y, Hu B B, Wang X Y 2018 *Acta Phys. Sin.* **67** 197301 (in Chinese) [祁云平, 张雪伟, 周培阳, 胡兵兵, 王向贤 2018 *物理学报* **67** 197301]
- [7] Zhang X Y, Hu A, Wen J Z, Zhang T, Xue X J, Zhou Y, Duley W W 2010 *Opt. Express* **18** 18945
- [8] Zhang Z D, Zhao Y N, Lu D, Xiong Z H, Zhang Z Y 2012 *Acta Phys. Sin.* **61** 187301 (in Chinese) [张志东, 赵亚男, 卢东, 熊祖洪, 张中月 2012 *物理学报* **61** 187301]
- [9] Tao J, Huang X G, Lin X S, Chen J H, Zhang Q, Jin X P 2010 *J. Opt. Soc. Am.* **27** 323

- [10] Yun B F, Hu G H, Cui Y P 2013 *Plasmonics* **8** 267
- [11] Wang T B, Wen X W, Yin C P, Wang H Z 2009 *Opt. Express* **17** 24096
- [12] Mei X, Huang X, Tao J, Zhu J H, Zhu Y J, Jin X P 2010 *J. Opt. Soc. Am. B* **27** 2707
- [13] Wang L, Li W, Jiang X 2015 *Opt. Lett.* **40** 2325
- [14] Chen J, Wang C, Zhang R, Xiao J 2012 *Opt. Lett.* **37** 5133
- [15] Yang Y R, Guan J F 2016 *Acta Phys. Sin.* **65** 057301 (in Chinese) [杨韵茹, 关建飞 2016 物理学报 **65** 057301]
- [16] Kim K Y, Cho Y K, Tae H S, Lee J H 2006 *Opt. Express* **14** 320
- [17] Haus H A 1984 *Waves and Fields in Optoelectronics* (Englewood Cliffs, NJ: Prentice-Hall) pp56–59
- [18] Chremmos I 2009 *J. Opt. Soc. Am.* **26** 2623
- [19] Zhang Q, Huang X G, Lin X S, Tao J, Jin X P 2009 *Opt. Express* **17** 7549
- [20] Vlasov Y A, O'Boyle M, Hamann H F, McNab S J 2005 *Nature* **438** 65
- [21] Nezhad M, Tetz K, Fainman Y 2004 *Opt. Express* **12** 4072
- [22] Chen X, Bhola B, Huang Y, Ho S T 2010 *Opt. Express* **18** 17220
- [23] Babicheva V E, Kulkova I V, Malureanu R, Yvind K, Lavrinenko A V 2010 *Phys. Opt.* **10** 389
- [24] Yu Z, Veronis G, Fan S 2008 *Appl. Phys. Lett.* **92** 041117

# Semi-closed T-shaped-disk waveguide filter based on surface-plasmon-induced transparency\*

Chen Ying<sup>1)†</sup> Xie Jin-Chao<sup>1)</sup> Zhou Xin-De<sup>1)</sup>  
Zhang Can<sup>1)</sup> Yang Hui<sup>1)</sup> Li Shao-Hua<sup>2)</sup>

1) (*Hebei Province Key Laboratory of Test/Measurement Technology and Instrument, School of Electrical Engineering, Yanshan University, Qinhuangdao 066004, China*)

2) (*Hebei Sailhero Environmental Protection Hi-tech Co., Ltd, Shijiazhuang 050000, China*)

(Received 13 July 2019; revised manuscript received 16 September 2019)

## Abstract

Filter is the core communication device in optical integrated chip. In recent years, plasma-induced transparency in surface plasmon (SPP) subwavelength waveguide photonic devices has become a research hotspot in the field of nano optics. The plasmon-induced transparency (PIT) is a phenomenon that the original absorption region produces a sharp transparent window due to the interaction among different resonant modes of SPPs, therefore, a higher resolution and quality factor surface plasmons can be obtained by using this feature to design a metal-medium-metal (MIM) waveguide structure filter. However, due to the Ohmic loss caused by metal parts, further research is needed on how to effectively improve transmission efficiency and achieve better frequency selection and filtering effect while reducing filter bandwidth in MIM waveguide filter. Based on the transmission and coupling characteristics of SPPs, an MIM waveguide filter with semi-closed T-waveguide side coupled disc cavity is proposed. Its transmission characteristics are studied by using the finite element method. The results show that a narrow-band transmission peak based on plasma-induced transparency appears in the transmission spectrum. Through theoretical analysis and mode field distribution, the physical mechanism of generating the PIT transparent peak and valley values on both sides is effectively explained. Compared with the traditional straight waveguide structure, the curved waveguide structure can generate the bilateral coupling effect, which can make resonant interaction stronger. Meanwhile, the numerical study shows that the approximately linear adjustment of filter wavelength can be achieved by changing the length of branches, the radius of the disk cavity and the refractive index of the medium in the cavity through external modulation. Further, the gain medium is embedded in the disk cavity, which enhances its local ability to emit light, strengthens the mode resonance effect, and realizes the compression filter pass-band bandwidth while effectively improving the structural transmittance, compared with similar filters. The research results provide an effective theoretical reference for designing the high resolution narrowband filter.

**Keywords:** surface plasmon polaritons, plasmonic-induced transparency, gain medium, filter

**PACS:** 73.20.Mf, 42.50.Gy, 42.79.Gn

**DOI:** [10.7498/aps.68.20191068](https://doi.org/10.7498/aps.68.20191068)

\* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 61201112, 61475133), the Key Research and Development Project of Hebei Province, China (Grant No. 19273901D), the Natural Science Foundation of Hebei Province, China (Grant No. F2016203188), the China Postdoctoral Science Foundation (Grant No. 2018M630279), the Post-Doctoral Research Projects in Hebei Province, China (Grant No. D2018003028), the Scientific Research Foundation of the Higher Education Institutions of Hebei Province, China (Grant No. ZD2018243), and the China National Scholarship Fund Project (Grant No. 201808130004).

† Corresponding author. E-mail: [chenying@ysu.edu.cn](mailto:chenying@ysu.edu.cn)