光电器件

DOI：10.16818/j.issn1001－5868.2020.06.010

MIM 波导结构中的等离激元诱导透明和慢光效应

张利伟[1,2]，黄　星[1]，孟威威[3]，乔文涛[2*]

（1. 安庆师范大学 数理学院，安徽 安庆 246133；2. 河南理工大学 物理与电子信息学院，河南 焦作 454003；
3. 电子科技大学 电子薄膜与集成器件国家重点实验室，成都 610054）

摘　要： 基于金属/介质/金属(MIM)波导，提出了一种两侧含有双环、四环谐振腔的等离激元波导滤波结构，采用电磁仿真计算了其电磁传输特性，通过场分布分析了透射谱中通带和谷值产生的物理机理。仿真结果表明该结构可实现等离激元诱导透明(PIT)，通过改变谐振腔的有效半径，可调节 PIT 窗口的位置、带宽和慢光效应。计算结果显示在双环和四环谐振结构的 PIT 窗口，可以实现 0.148 和 0.358 ps 的信号延迟。这一特性在可调滤波器件、光存储器件和集成光子器件设计上具有潜在应用价值。

关键词： 金属/电介质/金属波导；等离激元诱导透明；谐振腔

中图分类号： O436　**文章编号：** 1001－5868(2020)06－0808－07

Plasmon Induced Transparency and Slow Light Effect in MIM Waveguide

ZHANG Liwei[1,2], HUANG Xing[1], MENG Weiwei[3], QIAO Wentao[2]

(1. School of Mathematics and Physics, Anqing Normal University, Anqing 246133, CHN; 2. School of Physics and Electronic Information Engineering, Henan Polytechnic University, Jiaozuo 454003, CHN; 3. State Key Laboratory of Electronic Thin Film and Integrated Devices, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu 610054, CHN)

Abstract: Based on the waveguide structure of metal-dielectric-metal (MIM), a kind of plasma waveguide filter with double-ring and four-ring resonators on both sides was proposed, and its transmission characteristics were calculated by electromagnetic simulations. The physical mechanism of the peak and valley generation in transmission spectrum was analyzed by electromagnetic field distributions. The results show that the structure can realize the plasmon induced transparency (PIT). By adjusting the effective radius of the resonator, the position, bandwidth and slow light effect of the PIT transparent window can be adjusted. The results show that the signal delay of 0.148 and 0.358 ps can be realized in the PIT window of double ring and four ring resonant structures, respectively. This property will have potential applications in the design of tunable filter devices, optical memory devices and integrated photon devices.

Key words: MIM waveguides; plasmon induced transparency; resonator

0　引言

表面等离激元(Surface Plasmon Polaritons，SPP)是一种特殊的电磁模式，多存在于金属介质表面，来源于光子和金属表面电子的相互作用。SPP 可沿金属和介质分界面传播，其传播距离可达几微米[1-2]，其振幅在表面波垂直方向上呈指数衰减。由于具有场局域和增强特性，SPP 能在亚波长尺度控制光信号的输运，这些特性使其在高度集成电路和器件中引起广泛关注[3-4]。在众多 SPP 结构中，介质/金属/介质(IMI)和金属/介质/金属(MIM)波导是最重要的两种。MIM 结构能够在很宽的频率范围内支持深亚波长和低群速度的模式，实现很高的光限制和可接受的传输长度[5]，在光学滤波器[6-8]、

收稿日期：2020－07－14.
基金项目：国家自然科学基金项目(U1804165).
* 通信作者：乔文涛　E-mail：qwt@hpu.edu.cn

光开关[9]、传感器[10-12]等领域得到广泛应用。电磁诱导透明（Electromagnetically Induced Transparency，EIT）效应是在原子系统中观察到的一种量子干涉现象，原子能级之间发生的相消干涉作用导致在材料原本的吸收带上形成一个窄带的透明窗口[13]。EIT 效应在其透明窗口上有强烈的色散，预示了慢光实现的可能与信息储存的应用。基于量子 EIT 效应的实现通常需要极低温、强激光等苛刻的实验条件，使得原子系统中 EIT 的研究和实际应用非常受限[14]。最近的研究表明，基于类似的干涉效应可以在经典的光学系统中实现类电磁诱导透明现象，如在超材料[14]、光栅、表面等离激元波导等结构中[15-20]。等离激元诱导透明（Plasmon-Induced-Transparency，PIT）是一种类电磁诱导透明，可在多种谐振器耦合 MIM 波导系统中，如含有矩形腔[15-16]、梯形腔[17-18]、环形腔[19-20]及方环形腔[21]的 MIM 等离子体波导结构中实现，并在透明窗口具有慢波特性。

文献[19]提出一种双侧环形谐振腔与主波导耦合的 MIM 滤波器结构，通过模拟计算研究了非对称双环结构参数对滤波性能的影响。文献[20]采用耦合模理论，从理论和数值两方面研究了双环谐振器耦合 MIM 波导系统中的 PIT 和慢波效应。本文提出了一种主波导两侧含有四环谐振腔的 MIM 结构，实现了多通道的基于 PIT 效应的透明窗口和慢光特性，采用理论分析结合电磁仿真研究了结构参数变化对透射性能和慢光效应的影响。在双环和四环谐振结构的 PIT 窗口，可以实现 0.148 和 0.358 ps 的信号延迟。本文提出的模型结构简单，对可调滤波器件、光存储器件的设计有重要参考价值。

1　理论模型与分析

首先考虑图 1 所示的二维单环型 MIM 等离激元波导滤波器结构，它包含 MIM 主波导和一个环形谐振腔。其中谐振腔有效半径为 r_1，波导宽度和谐振腔宽度均为 w，g 为谐振腔与主波导之间的耦合距离，MIM 波导和谐振腔的中间芯层是相对介电常数为 ε_d 的电介质，介质两边为金属银。对于金属银的相对介电常数，采用 Drude 模型[22]进行计算，即

$$\varepsilon_{Ag}(\omega)=\varepsilon_\infty-\omega_p^2/[\omega(\omega+i\gamma)] \tag{1}$$

可见金属银的相对介电常数 ε_{Ag} 是色散的，它是入射电磁波角频率 ω 的函数，这里取 $\varepsilon_\infty=3.7$，等离子谐振频率 $\omega_p=1.29\times10^{16}$ Hz，阻尼系数 $\gamma=2.73\times10^{13}$ Hz。根据电磁场边界连续条件，可以推出 MIM 波导中对称的 TM 极化表面等离激元的色散关系[23]：

$$\tanh\left(\frac{wk_0\sqrt{n_{eff}^2-\varepsilon_d}}{2}\right)=-\frac{\varepsilon_d\sqrt{n_{eff}^2-\varepsilon_{Ag}}}{\varepsilon_{Ag}\sqrt{n_{eff}^2-\varepsilon_d}} \tag{2}$$

式中，$k_0=2\pi/\lambda$ 为真空中的波数，n_{eff} 为 MIM 波导结构的有效折射率。在本文中，只考虑中间介质层宽度 w 比较小的情况，这就意味着波导中只有表面等离子体导模的传输。

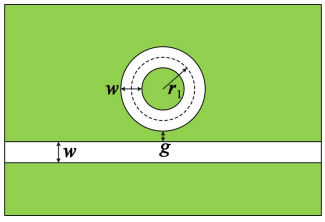


图 1　单环型 MIM 波导滤波器结构

根据式(2)可以计算 MIM 波导结构的有效折射率与波长之间的关系，如图 2 所示。图 2(a)是填充介质为空气 $\varepsilon_d=1$ 时，波导宽度分别为 30，50，70 nm 时的波导有效折射率。从图中可以看出，波导结构的有效折射率 n_{eff} 实部随着波导宽度 w 的增大而减小，随着入射波长的增加而逐渐减小并趋于稳定。图 2(b)是波导宽度 $w=50$ nm 不变，填充不同介质时的有效折射率，其中介质的相对介电常数分别为 $\varepsilon_d=1,2,3$，计算结果显示波导结构的有效折射率 n_{eff} 随着填充介质相对介电常数 ε_d 的增大而增加。在不同波导宽度和填充介质的情况下，MIM 波导结构的有效折射率总大于 1，说明这种波导结构可以用来实现亚波长表面等离子体的传播。

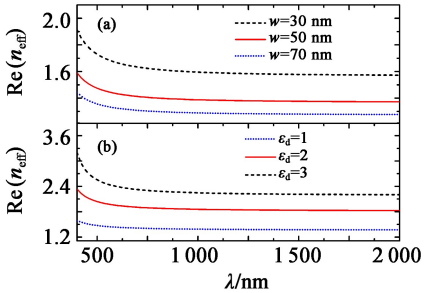


图 2　波导宽度 w、填充介质不同时，MIM 波导有效折射率实部与波长关系

当电磁波在含环形谐振腔的 MIM 主波导中传

播时，在满足一定条件下电磁波会耦合进入环形谐振腔，在环形谐振腔内形成驻波而产生谐振，使某些特定波长的电磁波不能在主波导中传播，其谐振波长可由[24-25]

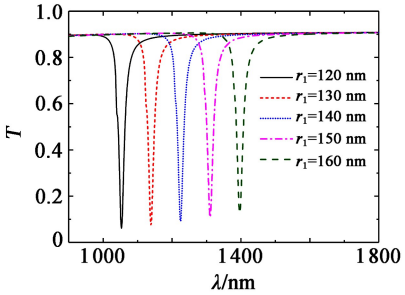
$$2\pi r_1 n_{\text{eff}} = m\lambda \tag{3}$$

确定。式中，n_{eff} 为谐振腔的有效折射率，m 是谐振阶数，如 $m=1,2$ 分别对应一阶和二阶谐振。由于波导结构中横向电磁场是指数衰减的，谐振时电磁场将局域在谐振腔内。因为表面等离子体在金属中的渗透深度只有几十纳米，所以波导在 z 方向的厚度对传输特性的影响不大[26]，对有限尺度波导的传输性质，我们使用 Comsol Multiphysics 电磁仿真软件进行了二维建模。模拟计算时，设定图 1 左侧为入射端口 port1，右边为输出端口 port2。计算区域以最大单元为 30 nm，最小单元为 0.06 nm 的尺寸划分三角网络，其他区域最大单元为 110 nm，最小单元为 0.375 nm。由于 MIM 波导宽度远小于入射波长，本文只考虑 TM 基模表面等离子体的传输特性。定义透射率 $T=P_{\text{out}}/P_{\text{in}}$，其中 P_{in} 为入射电磁波功率，P_{out} 为出射电磁波功率。

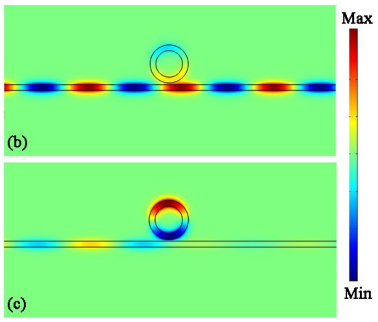
2 仿真结果与分析

2.1 单环型 MIM 波导

首先讨论单环型结构的滤波性能，结构参数分别取 $w=50$ nm，$\varepsilon_d=1$，$g=15$ nm。图 3(a)为谐振腔有效半径 r_1 分别为 120，130，140，150 和 160 nm 时，单环型 MIM 等离子波导滤波结构在 900～1 800 nm 波长范围内的透射谱。从图中可以看出，当 r_1 从 120 nm 增加到 160 nm 时，该滤波结构的谐振波长由 1 053 nm 增加到 1 397 nm，其中 $r_1=140$ nm 的 MIM 波导结构中，约在 1 225 nm 处出现了透射谷。图 3(b)和(c)分别给出了透射率最大值(1 107 nm)和最小值(1 225 nm)处的磁场分布。从图中可以看出，波长为 1 107 nm 的电磁波远离谐振



(a) 不同有效半径下的透射谱



(b-c) 磁场分布图

图 3 单环型 MIM 波导滤波器的透射谱与磁场分布

腔的谐振波长，无法在腔内形成驻波，电磁波几乎可以在波导中无损传输；而波长为 1 225 nm 的电磁波耦合进入谐振腔后激发谐振腔一阶谐振形成驻波，电磁波无法通过主波导传输。模拟的透射谱和磁场分布结果与理论分析吻合得非常好。

透射率最小值的位置可以通过改变谐振腔的有效半径进行调控，这一结果可用法布里-珀罗谐振腔原理进行解释。图 4 给出了谐振腔有效半径 r_1 与谐振波长 λ 及透射率最小值 T_{min} 的关系，由图可知结构谐振波长随着谐振腔有效半径的增大而线性增大，并且透射率最小值也略有增加。图 5 给出了耦合距离 g 对单环型结构滤波性能的影响，这里取波导和谐振腔宽度 $w=50$ nm，谐振腔有效半径 $r_1=140$ nm。图 5(a)为耦合距离 $g=15,20,25$ 和 30 nm 时，单环型 MIM 等离子波导的透射谱。由图可知当耦合距离 g 从 15 nm 变化到 30 nm 时，透射率最小值对应的波长有一定的移动，由 1 225 nm 减小到 1 211 nm。由图 5(b)可知随着耦合距离增大，由于环形腔与主波导之间的耦合作用减弱，整个耦合结构的透射谱的半峰宽逐渐减小，透射率最小值逐渐增大。由以上理论分析和电磁仿真可知，单环型 MIM 波导在满足谐振条件下具有滤波功能，可以通过改变谐振腔有效半径以及耦合距离调控耦合结构的滤波性质。

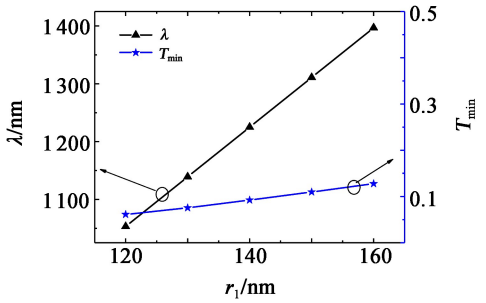
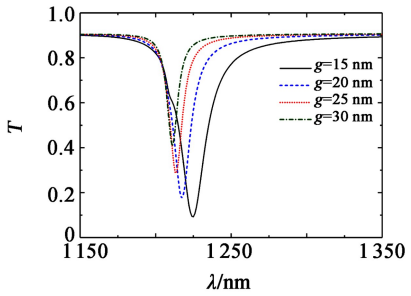
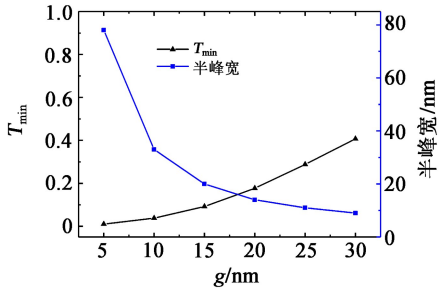


图 4 有效半径与谐振波长及透射率最小值之间的关系



（a）　不同耦合距离下的透射谱

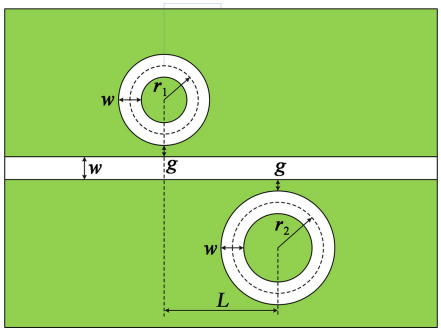


（b）　耦合距离与透射率最小值及半峰宽的关系

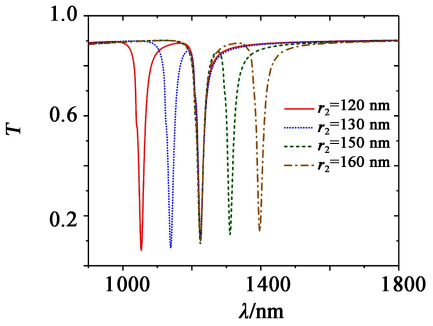
图 5　耦合距离对单环型 MIM 波导滤波器滤波性能的影响

2.2　双环型 MIM 波导

在图 1 所示的模型中主波导另一侧增加一个有效半径为 r_2 的环型谐振腔，两腔水平间距为 L，构成一个双环型 MIM 波导结构，其模型如图 6(a)所示。取 $L=0$ nm，$g=15$ nm，$r_1=140$ nm，在 r_2 分别取 120，130，150 和 160 nm 时，该结构透射谱曲线如图 6(b)所示。从图中可以看到，当双侧谐振腔有效半径 r_1 和 r_2 不同时，透射谱中出现了两个透射谷值点，这两个透射谷值分别与两个耦合环所形成的谐振有关。在两个透射谷值之间还出现了一个透射峰。并且发现，在波长域两透射极小值间距和透射峰带宽随着上下环有效半径差值的增大而增大。这是一个典型的等离激元诱导透明效应[27]，这一结果显示，含有双侧谐振环的波导结构可以用来实现一定带宽的滤波功能。另一方面，保持一侧谐振环有效半径 r_1 不变，在改变主波导另一侧谐振环的



（a）　双环型 MIM 波导滤波器结构



（b）　不同有效半径 r_2 对应的透射谱

图 6　双环型 MIM 波导结构及其透射谱

有效半径 r_2 时，透射谱中 1 225 nm 处出现的透射极小值保持不变。根据前面的仿真结果，我们知道这个透射极小值对应的波长正好是 $r_1=140$ nm 的谐振环耦合主波导对应的谐振波长。

为了理解这一 PIT 效应的内在机制，我们研究了不同透射波长处的场分布。以参数 $L=0$ nm，$g=15$ nm，$r_1=140$ nm，$r_2=150$ nm 的结构为例，由图(3)可知上、下环的谐振波长分别为 1 225 和 1 311 nm。当波长为 1 225 和 1 311 nm 的电磁波耦合进入谐振腔后激发谐振腔一阶谐振形成驻波，电磁波无法继续传输，图 7(a)和(b)为其磁场分量赫兹的分布情况。当入射波长位于两谐振波长之间取 1 275 nm 时，SPP 在上、下两个环型谐振腔组成的系统中由于电磁干涉产生了等离激元诱导透明响应，从而在 1 275 nm 波长处产生了一个透射峰。图 7(c)给出了在透射峰处磁场的分布，从场分布可见波长为 1 275 nm 的电磁波经上、下环耦合后，在主波导处具有 π 相位差，由于上、下谐振环之间的耦合作用，电磁场在主波导中的传播影响很小，从而形成了一个传输通带。当入射波长取 1 118 nm 时，电磁波远离上、下谐振腔的谐振波长，所以两谐振腔与主波导的耦合作用很小，在此波长的电磁波传输基本也不受主波导上、下谐振环的影响，而具有高的电磁传输特性。图 7(d)为 1 118 nm 处磁场分量的分布情况，其与理论分析结果相一致。

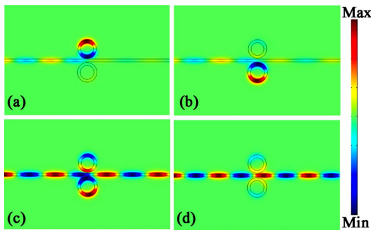
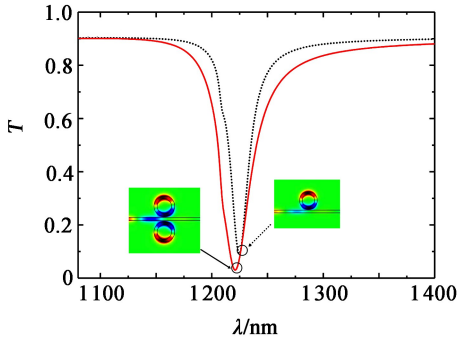
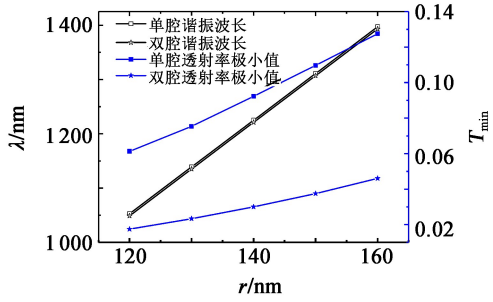


图 7　谐振腔有效半径为 $r_1=140$ nm，$r_2=150$ nm 的双环型 MIM 波导滤波器四种波长处的磁场分布

图 8 给出了固定 $L=0$ nm，$g=15$ nm，单环结构 $r_1=140$ nm 和双环结构 $r_1=r_2=140$ nm 时，MIM 波导滤波器的电磁传输谱。由图 8(a)可知，单环、双环结构的谐振波长分别位于 1 225 和 1 221 nm 处，透射率极小值分别为 0.092 和 0.030，透射率极小值变化较明显。这是因为入射电磁波与谐振波长相等时，耦合进入谐振腔的电磁场形成驻波使得电磁波不能在主波导中传播，两环结构与单环结构相比耦合作用更强(如图 8(a)插图两极小值点磁场分布所示)，使得从主波导传播的电磁波更少，故双环结构可以降低 MIM 波导滤波器透射率的极小值，增加带宽。图 8(b)给出有效半径取值为 120，130，140，150 和 160 nm 时谐振波长和透射率极小值。从图中可知，在不同有效半径下，双腔耦合都能降低谷值透射率、增加带宽，但结构的谐振波长基本不变。



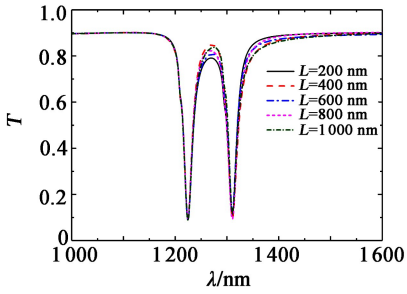
(a) 谐振腔有效半径为 140 nm 时，单环和双环透射谱



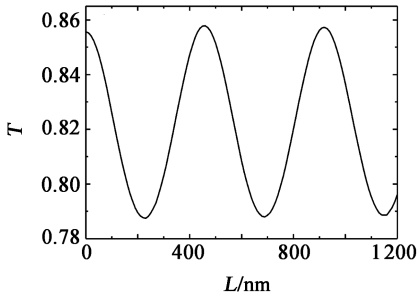
(b) 不同有效半径下，单环和双环波导结构的谐振波长和透射率

图 8 上、下环有效半径相同时 MIM 波导滤波器的透射规律

为进一步研究结构参数对双环型 MIM 波导滤波器透射谱的影响，计算了固定参数 $g=15$ nm，$r_1=140$ nm，$r_2=150$ nm 不变，改变 L 取值时的透射谱，如图 9 所示。图 9(a)给出了 $L=200$，400，600，800 和 1 000 nm 时的透射谱，由图可知 L 取值不同时，透射率极小值位置无明显变化，两极小值间透射峰极大值略有变化。图 9(b)计算了透射谱两极小值间波长为 1 272 nm 处、L 取值 0～1 200 nm 时，双环型 MIM 波导结构电磁传输性质的变化，由图可知，此处透射率先降低再增大，呈周期性变化规律。这是因为波长为 1 272 nm 的电磁波在谐振腔 r_1 和 r_2 中均无法产生谐振，但经过谐振腔 r_1 传播的电磁波与经过谐振腔 r_2 传播的电磁波存在固定相位差，传播 L 距离后发生相位叠加，从而使得透射率呈周期变化规律。



(a) 不同 L 取值对应的透射谱

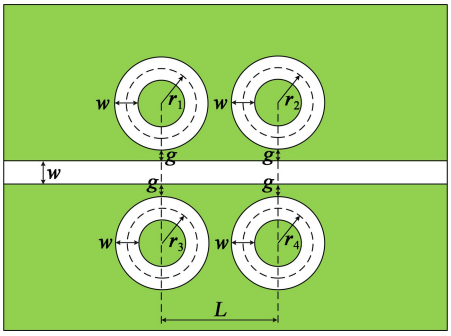


(b) 波长为 1 272 nm 时不同 L 的透射率

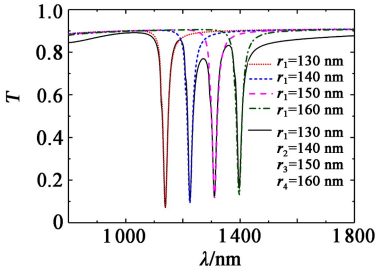
图 9 不同 L 取值时双环型 MIM 波导滤波器透射谱

2.3 四环型 MIM 波导

为了增加结构的可调性，我们研究了四谐振环耦合主波导的四环结构，如图 10(a)所示。在双环右侧 $L=600$ nm 处再加一对环型谐振腔而构成四环型 MIM 波导滤波器结构，保持耦合距离 $g=15$ nm 不变，四环有效半径从 130 nm 开始以 10 nm 为步长增加。为直观地比较四环型和单环型 MIM 波导滤波器滤波效果，图 10(b)同时列出 $r_1=130$ nm，$r_2=140$ nm，$r_3=150$ nm，$r_4=160$ nm 的四环结构和 r_1 分别取 130，140，150 和 160 nm 的单环型 MIM 波导结构的透射谱。从图 10(b)可以看出，在透射谱中分别在波长为 1 187，1 270 和 1 360 nm 处出现了三个透射峰，出现四个透射谷值，从而展示了三个 PIT 响应窗口。从图 10(b)可知，四环结构的四个透射谷值分别是由半径不同的四个谐振环引起的，对应的谐振波长分别是 1 138，1 225，1 311 和 1 398 nm。



(a)　四环型 MIM 波导结构示意图



(b)　四环型和单环型 MIM 波导透射谱

图 10　四环型 MIM 波导结构及其透射谱曲线

固定参数耦合距离 $g=15$ nm，水平间距 $L=600$ nm 不变，定义谐振腔有效半径取 $r_1=140$ nm，$r_2=150$ nm，$r_3=150$ nm，$r_4=140$ nm 时为结构 1；取 $r_1=140$ nm，$r_2=140$ nm，$r_3=150$ nm，$r_4=150$ nm 时为结构 2。图 11 给出了 $r_1=140$ nm，$r_2=150$ nm 的双环结构、结构 1 和结构 2 的透射谱曲线。由图 11 可知，四环型 MIM 波导的结构 1 和结构 2 的透射率极小值比双环结构的更小，但透明窗口的电磁输运效率却有所下降。四环结构的透射率谷值在 0.02 附近，而双环结构的透射率谷值在 0.1 附近；与双环结构相比，结构 2 透明窗口的透射率峰值从 0.857 降到 0.656，而结构 1 透明窗口的透射率峰值仅降到 0.814。总的来说，结构 1 能获得更好的透明窗口。

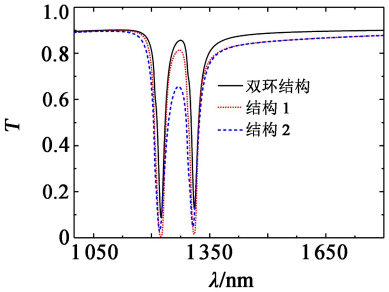


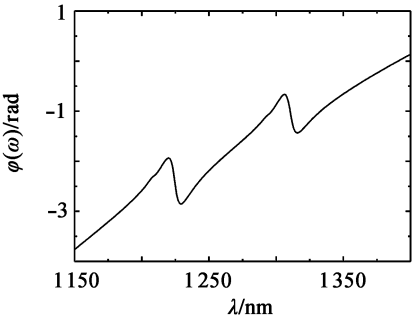
图 11　四环型和双环型 MIM 波导透射谱曲线比较

2.4　慢光讨论

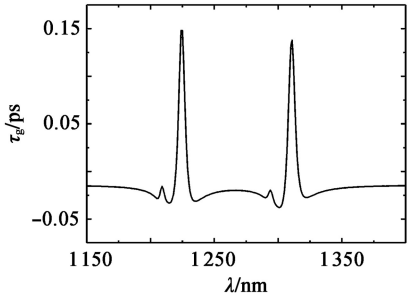
类似于原子 EIT 效应，带谐振腔的 MIM 波导的 PIT 效应具有慢光特性[28]。慢光效应可用等离子波导的群折射率 n_g 来描述[29]：

$$n_g=\frac{c}{v_g}=\frac{c}{D}\tau_g=\frac{c}{D}\frac{\mathrm{d}\varphi(\omega)}{\mathrm{d}\omega} \tag{4}$$

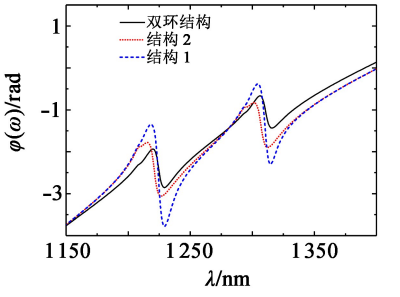
式中，v_g 为等离子波导中的电磁波的群速度，D 为波导的长度，τ_g 为电磁波的时延，$\varphi(\omega)$为电磁波的传输相移。先对双环结构进行模拟，结构参数 $g=15$ nm，$L=0$ nm，$r_1=140$ nm，$r_2=150$ nm 固定不变，图 12(a)为该结构的相位图，在类 PIT 峰两侧透射率极小值处相位有突变，这种结构在其传输窗口上能实现较大的光延迟。其时延分布如图 12(b)所示，在透射率极小值对应波长 1 225 和 1 311 nm 处光时延达到了极大值 0.148 和 0.138 ps。再对四环结构 1 和结构 2(参数同图 11)进行计算，与双环结构比较，如图 12(c)～(d)所示。由图 12(c)可知，结构 1 和结构 2 在 PIT 峰附近相位斜率均比双环结构大，相位突变更显著，故其光延时也应增大；由图 12(d)可知结构1和结构2的光延时峰值分别达到



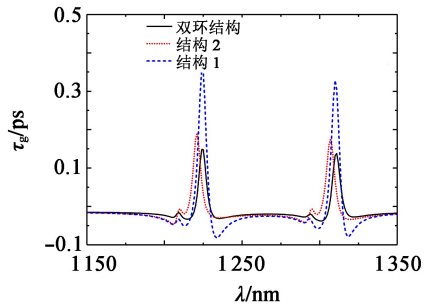
(a)　双环型 MIM 波导结构相位分布图



(b)　双环型 MIM 波导结构延时分布图



(c)　双环型及四环型 MIM 波导结构相位分布比较图



(d) 双环型及四环型 MIM 波导结构延时分布比较

图 12 不同波导结构的相位分布及延时分布图

0.358 和 0.328 ps,与双环结构相比有较大提高。可见四环结构与双环结构相比,有更大的光延时。

3 结论

本文采用理论分析结合电磁仿真研究了两侧双环、四环型 MIM 波导结构的电磁传输特性,由于多谐振腔之间的耦合作用,该结构可实现可调滤波、PIT 和慢光效应。结果表明,可通过改变谐振腔的有效半径和耦合距离来调控谐振波长、PIT 窗口以及光信号延迟等。另外发现双环和四环谐振结构的 PIT 窗口,可以实现 0.148 和 0.358 ps 的信号延迟。这些性质可用于可调滤波器、光存储器件和集成光子器件的设计。

参考文献:

[1] Barnes W L, Dereux A, Ebbesen T W. Surface plasmon subwavelength optics[J]. Nature, 2003, 424(6950): 824-830.

[2] Genet C, Ebbesen T W. Light in tiny holes[J]. Nature, 2007, 445(7123): 39-46.

[3] Neutens P, Dorpe P V, Vlaminck I D, et al. Electrical detection of confined gap plasmons in metal-insulator-metal waveguides[J]. Nat. Photon., 2009, 3(5): 283-286.

[4] Gramotnev D K, Bozhevolnyi S I. Plasmonics beyond the diffraction limit[J]. Nat. Photon., 2010, 4(2): 83-91.

[5] Liu D D, Sun Y, Fan Q B, et al. Tunable plasmonically induced transparency with asymmetric multi-rectangle resonators[J]. Plasmonics, 2016, 11(6): 1621-1628.

[6] Rahman M Z U, Krishna K M, Reddy K K, et al. Ultra-wide-band band-pass filters using plasmonic MIM waveguide-based ring resonators[J]. IEEE Photon. Technol. Lett., 2018, 30(19): 1715-1718.

[7] Ebadi S M, Rams B. A dual band-pass plasmonic filter based on stub structure in a MIM waveguide at optical channels [C]//Proc. of 2015 Photonics North IEEE, 2015: 1-1.

[8] 庞绍芳, 屈世显, 张永元, 等. 基于 L 形谐振腔 MIM 波导结构滤波特性的研究[J]. 光学学报, 2015, 36(6): 272-277.
Pang Shaofang, Qu Shixian, Zhang Yongyuan, et al. Filter characterristic research of MIM waveguide based on L-shaped resonator[J]. Acta Optica Sinica, 2015, 36(6): 272-277.

[9] Liu H Q, Ren G B, Gao Y X, et al. Ultrafast and low-power all-optical switch based on asymmetry electromagnetically induced transparency in MIM waveguide containing Kerr material[J]. Opt. Commun., 2015, 353: 189-194.

[10] Palizvan P, Olyaee S, Seifouri M. An optical MIM pressure sensor based on a double square ring resonator[J]. Photonic Sensors, 2018, 8(3): 242-247.

[11] AL-Mahmod M J, Hyder R, Islam M Z. Numerical studies on a plasmonic temperature nanosensor based on a metal-insulator-metal ring resonator structure for optical integrated circuit applications[J]. Photonic Nanostruct., 2017, 25: 52-57.

[12] Rakhshani M R, Mansouri-birjandi M A. High-sensitivity plasmonic sensor based on metal-insulator-metal waveguide and hexagonal-ring cavity[J]. IEEE Sensors J., 2016, 16(9): 3041-3046.

[13] Fleischhauer M, Imamoglu A, Marangos J P. Electromagnetically induced transparency: Optics in coherent media[J]. Rev. Mod. Phys., 2005, 77(2): 633.

[14] Papasimakis N, Fu Y H, Fedoto V V A, et al. Metamaterial with polarization and direction insensitive resonant transmission response mimicking electromagnetically induced transparency[J]. Appl. Phys. Lett., 2009, 94(21): 211902.

[15] Noual A, Abouti O E, Boudouti E H E, et al. Plasmonic-induced transparency in a MIM waveguide with two side-coupled cavities[J]. Appl. Phys. A, 2017, 123(1): 49.

[16] Liu L, Xia S X, Luo X, et al. Multiple detuned-resonator induced transparencies in MIM plasmonic waveguide[J]. Opt. Commun., 2018, 418: 27-31.

[17] Wang J C, Niu Y Y, Liu D D, et al. Tunable plasmon-induced transparency effect in MIM side-coupled isosceles trapezoid cavities system[J]. Plasmonics, 2018, 13(2): 609-616.

[18] Liu D D, Fan Q B, Mei M F, et al. Tunable multiple plasmon-induced transparency with side-coupled rectangle cavities[J]. Chin. Opt. Lett., 2016, 14(5): 052302.

[19] Liu D D, Wang J C, Zhang F, et al. Tunable plasmonic band-pass filter with dual side-coupled circular ring resonators [J]. Sensors, 2017, 17(3): 585.

[20] Zhan S P, Li H J, Cao J T, et al. Slow light based on plasmon-induced transparency in dual-ring resonator-coupled MDM waveguide system[J]. J. Phys. D: Appl. Phys., 2014, 47(20): 205101.

(下转第 821 页)

[11] Ibrahim S K, McCue R, O'Dowd J A, et al. Demonstration of strain independent temperature measurements using optical PM-FBG sensors for ground testing of satellite panels[C]// Proc. of Inter. Conf. on Space Optics—ICSO 2018. Inter. Society for Optics and Photonics, 2019, 11180: 111807B.

[12] Gao X, Ning T, Zhang C, et al. A dual-parameter fiber sensor based on few-mode fiber and fiber Bragg grating for strain and temperature sensing[J]. Opt. Commun., 2019, 454: 124441.

[13] 闫　光, 卢建中, 张开宇, 等. 温度解耦大量程光纤光栅应变传感器[J]. 吉林大学学报(工学版), 2019, 49(5): 1682-1688.
Yan Guang, Lu Jianzhong, Zhang Kaiyu, et al. Temperature decoupled large range FBG strain sensor[J]. J. of Jilin University (Engin. Edition), 2019, 49(5): 1682-1688.

[14] Nandini Basumallick, Palas Biswas, Kamal Dasgupta, et al. Design optimization of fiber Bragg grating accelerometer for maximum sensitivity[J]. Sensors & Actuators A: Physical, 2013: 194.

作者简介：

王天奇(1994—)，女，硕士生，主要研究方向为光纤传感与光电器件；

闫　光(1979—)，男，博士，讲师，硕士生导师，主要从事光纤激光器与传感器的研究。

(上接第 814 页)

[21] Akhavan A, Ghafoorifard H, Abdolhosseini S, et al. Metal-insulator-metal waveguide-coupled asymmetric resonators for sensing and slow light applications[J]. IET Optoelectron., 2018, 12(5): 220-227.

[22] Han Z, Forsberg E, He S. Surface plasmon Bragg gratings formed in metal-insulator-metal waveguides [J]. IEEE Photon. Technol. Lett., 2007, 19(2): 91-93.

[23] Dionne J A, Sweatlock L A, Atwater H A, et al. Plasmon slot waveguides: Towards chip-scale propagation with subwavelength-scale localization[J]. Phys. Rev. B, 2006, 73(3): 035407.

[24] Wang T B, Wen X W, Yin C P, et al. The transmission characteristics of surface plasmon polaritons in ring resonator [J]. Opt. Express, 2009, 17(26): 24096-24101.

[25] Setayesh A, Mirnaziry S R, Abrishamian M S. Numerical investigation of a tunable band-pass plasmonic filter with a hollow-core ring resonator[J]. J. Opt., 2011, 13(3): 035004.

[26] Kurokawa Y, Miyazaki H T. Metal-insulator-metal plasmon nanocavities: Analysis of optical properties[J]. Phys. Rev. B, 2007, 75(3): 035411.

[27] Kekatpure R D, Barnard E S, Cai W S, et al. Phase-coupled plasmon-induced transparency[J]. Phys. Rev. Lett., 2010, 104(24): 243902.

[28] Lu Q, Wang Z Z, Huang Q Z, et al. Plasmon-induced transparency and high-performance slow light in a plasmonic single-mode and two-mode resonators coupled system[J]. J. Lightwave Technol., 2017, 35(9): 1710-1717.

[29] Mario L Y, Chin M K. Optical buffer with higher delay-bandwidth product in a two-ring system[J]. Opt. Express, 2008, 16(3): 1796-1807.

作者简介：

张利伟(1979—)，男，博士，副教授，主要从事表面等离激元、超材料等方面的研究；

乔文涛(1982—)，男，硕士，副教授，主要从事表面等离子激元波导及其应用技术方面的研究。