

微波频段表面等离子激元波导滤波器的实验研究*

王五松¹⁾ 张利伟²⁾ 冉佳¹⁾ 张治文^{1)3)†}

1) (同济大学物理系先进微结构材料教育部重点实验室, 上海 200092)

2) (河南理工大学物理化学学院, 焦作 454000)

3) (同济大学电气工程系, 上海 200092)

(2013年4月14日收到; 2013年5月9日收到修改稿)

基于理论分析, 实验研究了二维磁单负材料/双正材料/磁单负材料表面等离子波导的滤波效应. 研究表明, 该波导结构具有低通滤波性质, 引入分支缺陷之后, 由于谐振效应该波导具有带阻滤波效应. 分支缺陷相当于亚波长谐振腔, 谐振腔的长度决定带阻滤波器的中心频率, 而中心频率几乎不受缺陷位置的影响; 滤波器透射率下降的幅度由耦合距离决定. 通过引入谐振腔及改变谐振腔的长度、数量以及耦合间距等参数, 可以实现可调节的表面等离子波导滤波器. 实验结果与理论分析符合得很好, 该性质将在可调的单通道或多通道带阻滤波器中具有潜在的应用价值.

关键词: 表面等离子激元, 特异材料波导, 谐振腔, 滤波器

PACS: 42.25.Bs, 42.82.Et

DOI: 10.7498/aps.62.184203

1 引言

表面等离子激元 (surface plasmon polaritons, SPPs) 是一种沿界面传播的表面电磁波, 在偏离分界面方向, 其振幅随距离增加按指数衰减^[1]. 它只存在于介电常数 (对 TM 波) 或磁导率 (对 TE 波) 符号相反的两介质的界面上, 其激发一般需要动量匹配. 当同时存在两个表面等离子体界面且其距离足够近时, 由于两个界面上的 SPPs 波的耦合作用而形成 SPPs 波导^[2,3]. 对于对称结构的 SPPs 波导来说, 其中表面等离子体可在动量不匹配的条件下, 通过垂直入射平面波的方法来激发^[4]. 在未来的高密度集成平台上, 这种 SPPs 波导对于光信号的传播与处理具有广阔的发展前景. 由于它具有传统的介质波导不具备的特殊性质, 如突破衍射极限实现器件的小型化 (如纳米尺寸) 等, 所以 SPPs 波导组件已成为等离子领域的研究热点之一. 目前已出现不同类型的 SPPs 波导结构, 例如弯

曲和分离器^[5], Mach-Zehnder 干涉仪^[6], Y 形组合器^[7] 等. 由于波导式滤波器具有损耗小、带外抑制好等特性^[8], 且 SPPs 波导滤波器是 SPPs 集成平台中的重要环节, 所以出现了许多类型的 SPPs 波导滤波器, 例如布拉格光栅滤波器^[9]、谐振环滤波器^[10]、齿形滤波器^[11] 和基于 Fabry-Perot 谐振腔的 metal/insulator/metal 亚波长波导滤波器^[12]. 关于 SPPs 波导滤波器的理论和实验研究多出现在光频段, 然而由于特异材料的出现, 使得 SPPs 的研究不断在红外、微波等其他波段展开^[13,14].

特异材料包含双负材料和单负材料. 介电常数和磁导率同时为负的材料称为双负材料 (DNG); 单负材料包含电单负材料和磁单负材料^[15], 其中介电常数为负而磁导率为正的材料称为电单负材料 (ENG), 介电常数为正而磁导率为负的材料称为磁单负材料 (MNG). 普通介质材料的介电常数和磁导率都为正, 因此又称为双正材料 (DPS, $\epsilon > 0$, $\mu > 0$). 在 ENG 材料和 MNG 材料中, 波矢为虚数, 电磁场为消逝场. 在微波频段可以通过微带传输

* 国家重点基础研究发展计划 (批准号: 2011CB922001)、国家自然科学基金 (批准号: 10904032)、河南省高等学校青年骨干教师资助计划项目 (批准号: 2012GGJS-060) 和河南理工大学杰出青年基金项目 (批准号: J2013-09) 资助的课题.

† 通讯作者. E-mail: yewen.zhang@tongji.edu.cn

线加载单元电容、单元电感的方法来实现特异材料^[16]. 特异材料具有类金属性质(如负介电常数/负磁导率), 因此特异材料结构支持不同频段的 TM 极化/TE 极化的表面等离子激元. 本论文基于传输线方法, 研究了微波频段 MNG-DPS-MNG 表面等离子激元波导的滤波特性. 研究发现, 该等离子激元波导具有低通滤波的特性, 通过引入缺陷及改变缺陷的长度、数量及耦合间距等参数即可实现可调节的带阻滤波效应, 这些性质将在可调的单通道或多通道滤波器件中具有潜在的应用价值.

2 理论模型与分析

考虑如图 1(a) 所示的二维 MNG-DPS-MNG 波导结构, 该波导结构由宽度为 d 的 DPS 介质夹在两个半无限大的 MNG 材料包层之间构成, 其中介电常数和磁导率分别为 $\epsilon_1, \mu_1, \epsilon_2, \mu_2$. 依据文献 [17], 图 1(a) 所示的特异材料结构支持 TE 极化的表面等离子激元, 且存在对称和反对称两种色散关系^[18]:

$$\frac{\mu_2}{\mu_1} = -\frac{k_2}{k_1} \tanh\left(\frac{k_2 \times d}{2}\right), \quad (1)$$

$$\frac{\mu_2}{\mu_1} = -\frac{k_2}{k_1} \coth\left(\frac{k_2 \times d}{2}\right), \quad (2)$$

这里衰减波数 $k_1 = \sqrt{k^2 - \frac{\omega^2}{c^2} \mu_1 \epsilon_1}$, $k_2 = \sqrt{k^2 - \frac{\omega^2}{c^2} \mu_2 \epsilon_2}$, c 为真空中的光速, k 为表面等离子激元的波数. 该波导中, 两界面上 SPPs 波之间的耦合导致原来单一的 SPPs 模式分裂为两个模式——对称模式和非对称模式. 并且随着介质层厚度 d 的减小, 这种分裂表现得更强烈. 这里波导的具体材料参数取为

$$\begin{aligned} \mu_1 &\approx 1 - \frac{9.88 \times 10^{18}}{f^2}, \\ \epsilon_1 &\approx 6.6, \quad \mu_2 \approx 1, \quad \epsilon_2 \approx 6.6, \end{aligned} \quad (3)$$

这些参数可以由低损耗的 (L-C 加载的) 传输线网络结构来实现^[16]. 图 1(a) 为波导中表面等离子体的两条色散曲线, 上面一支蓝色曲线为 SPPs 非对称模式, 下面一支红色曲线为 SPPs 对称模式; 然而在本文微带传输线结构的 MNG-DPS-MNG 波导中, 由于电场的对称分布, SPPs 的非对称模式没有得到激发. 由图 1(a) 可以看出, 这种微带线结构的 MNG-DPS-MNG 表面等离子激元波导支持 0—

2.1 GHz 频率范围内的电磁波传播, 抑制该频率范围之外的电磁波传播, 因此具有低通滤波性质.

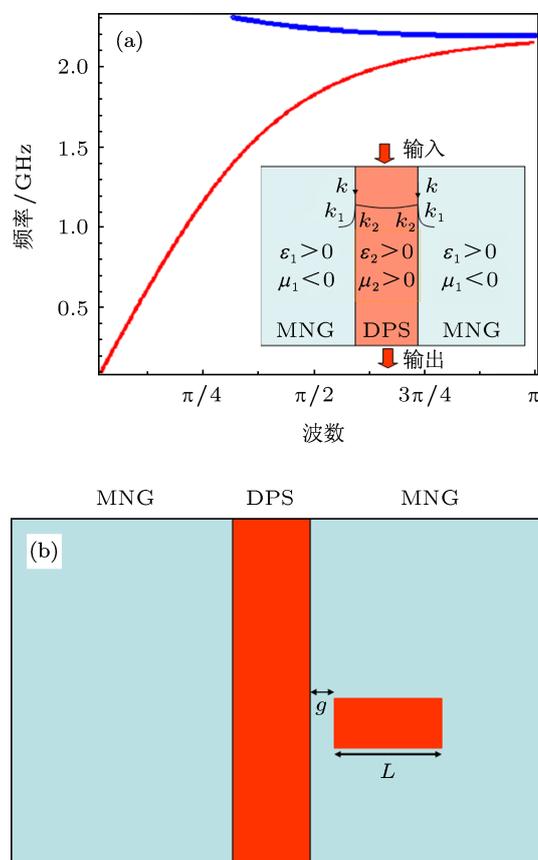


图 1 (a) MNG-DPS-MNG 波导理论模型及其色散曲线; (b) 含谐振腔的表面等离子激元波导模型

如此时在 MNG 区域引入一长度为 L 的分支缺陷(如图 1(b) 所示, 该缺陷相当于谐振腔), 由于谐振效应将会在 MNG-DPS-MNG 波导通带范围之内 (0—2.1 GHz) 的某些频率出现带阻现象, 谐振频率即为阻带中心频率. 这里 g 为耦合间距. 其中 SPPs 波数 k 与谐振腔的尺寸 L 之间满足的关系为

$$kL \approx n\pi, \quad (4)$$

$n = 1, 2, 3, \dots$ 为共振阶数, 例如, $n = 1, 2, 3$ 分别对应于第一阶、第二阶和第三阶谐振模. 根据方程 (1)—(4) 可知, 谐振频率由谐振腔的长度 L 、波导的材料参数 $\epsilon_1, \mu_1, \epsilon_2, \mu_2$ 和结构参数 d 共同决定, 谐振腔在 MNG 区域的位置不影响该波导的滤波性能. 另外, 根据参考文献 [11], 耦合间距 g 影响该波导的滤波性能, 因为 g 的大小决定着电磁波在 MNG 材料中的衰减程度, 进而影响进入谐振腔中的电磁能量. 如 g 增大, 耦合进入谐振腔的电磁能量减少, 则该波导的带阻滤波性能减弱; 如 g 减小, 耦合进入谐振腔的电磁能量增加, 则该波导的带阻

滤波性能增强. 本文基于微带传输线结构实现了微波频段的 MNG-DPS-MNG 表面等离子激元波导低通滤波器, 并通过引入缺陷及改变缺陷的长度、数量和耦合间距 g 来研究该波导的可调带阻滤波特性.

3 结果与讨论

图 2(a) 给出了含谐振腔 (图中黑色椭圆所示) 的 MNG-DPS-MNG 表面等离子激元波导的实际电路结构, 这里谐振腔参数为 $L = 30 \text{ mm}$, $g = 0 \text{ mm}$. 在微波频段该波导可以由微带传输线来实现 [16], 其中基材为相对介电常数为 4.75, 厚度为 1.6 mm 的 FR-4 环氧树脂复合玻璃纤维布覆铜板, 传输线单元线宽 $w = 1 \text{ mm}$, 周期长度 $d = 10 \text{ mm}$. DPS 材料为正常二维微带线网格, MNG 材料由在正常二维微带线上周期性加载串联电容构成. 为抑制电磁波的反射, 微带线和地之间跨接 85Ω 的匹配电阻. 另外, 根据文献 [16], 当单元电容为 0.5 pF 时, 可以实现图 1(a) 的色散关系. 基于我们前期的工作 [19], 通过电磁仿真和实验研究了不含谐振腔时该微带 MNG-DPS-MNG 波导的表面等离子激元特性, 其透射谱的仿真及测量结果如图 2(b) 所示. 可以看出, 该波导支持 $[0 \text{ GHz}, 2.1 \text{ GHz}]$ 频率范围内电磁波的传播, 因此在这一频段内, 它具有低通滤波性能. 图 2(c) 给出了含谐振腔时该波导的透射谱, 这一波导结构分别在 0.6 GHz 和 1.5 GHz 出现了一阶谐振和二阶谐振 (其中在一阶谐振模式下, 谐振腔的长度约为真空中波长的 $1/16$, 因此这种谐振结构可以用来实现亚波长谐振腔), 其中测量得到透射率下降幅度分别为 -30 dB 和 -20 dB . 即在频率点 0.6 GHz 和 1.5 GHz , 该波导具有带阻滤波性能.

图 2(c) 中的插图分别为一阶谐振模式和二阶谐振模式的电场分布图 (CST 仿真), 其中红色 (或者黄色) 和蓝色 (或者绿色) 分别表示电场强度幅度的正值 (对应波峰) 和负值 (对应波谷), 颜色的深与浅表示电场的强与弱. 很明显由于谐振腔中的 Fabry-Perot 共振效应, 腔内出现驻波场, 一阶谐振模式下谐振腔的长度约为半个波长, 二阶谐振模式下谐振腔的长度约为一个波长.

理论分析表明, 带阻滤波器的中心频率由谐振腔的长短决定, 因此为研究 MNG-DPS-MNG 表面等离子激元波导滤波器的频率特性, 保持耦合间

距 $g = 0 \text{ mm}$, 改变谐振腔的长度, 并通过 CST 仿真和实验测量观察谐振频率 (即阻带中心频率) 的变化. 结果显示, 当谐振腔的长度分别为 $L = 20, 30, 40 \text{ mm}$ 时, 测量得到的一阶谐振模式的谐振频率分

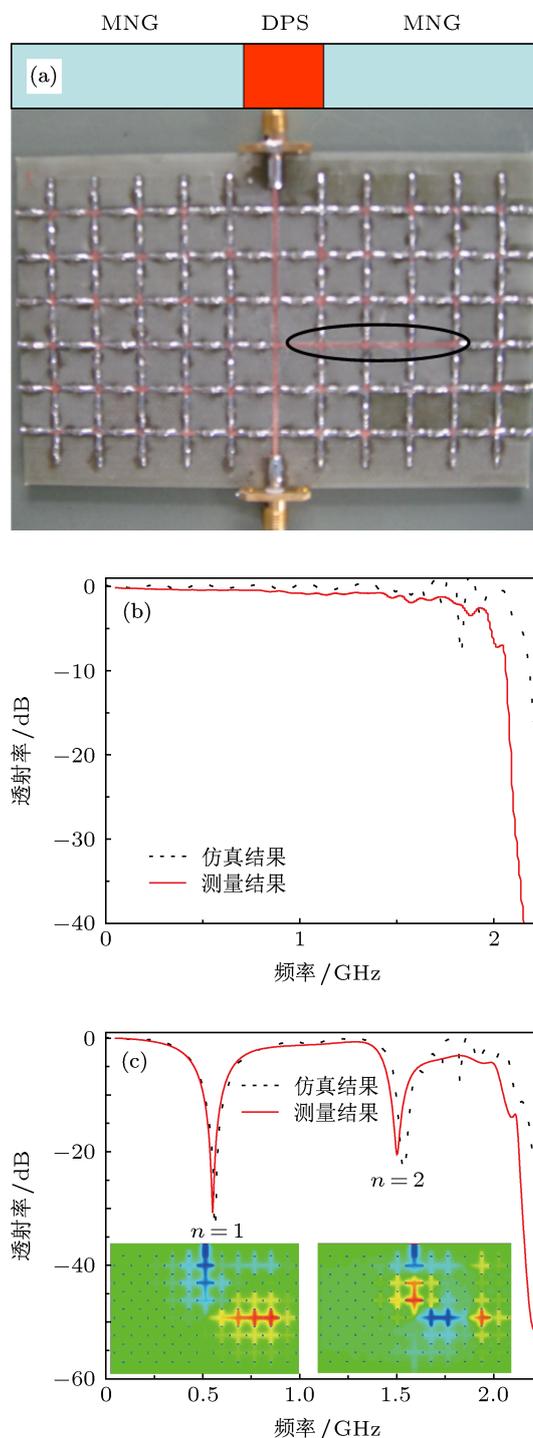


图 2 (a) 含谐振腔的二维 MNG-DPS-MNG 表面等离子激元波导, 谐振腔长 $L = 30 \text{ mm}$, 耦合间距 $g = 0 \text{ mm}$; (b) 不含谐振腔的波导透射谱; (c) 含谐振腔的波导透射谱, 插图分别为一阶谐振模式的电场分布和二阶谐振模式的电场分布

别为 0.8, 0.6, 0.5 GHz, 二阶谐振模式的谐振频率分别为 1.9, 1.50, 1.2 GHz. 改变谐振腔的长度引起谐振频率的改变, 所以在该波导的通带 0—2.1 GHz 内, 若耦合间距不变, 通过改变谐振腔的长度, 可以调节该 SPPs 带阻滤波器的中心频率, 进而实现该滤波器可调节的选频作用.

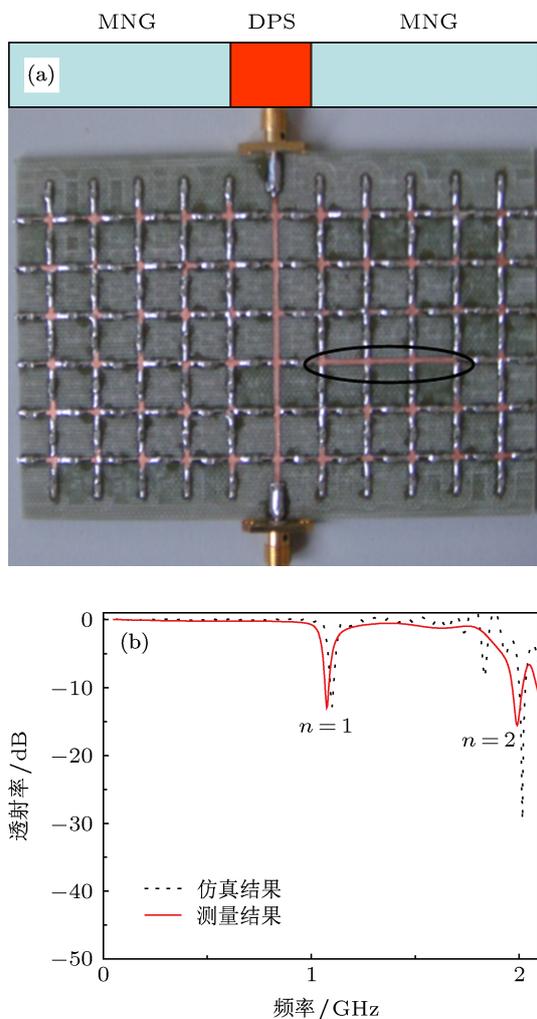


图3 (a) 二维 MNG-DPS-MNG 表面等离子激元波导, 谐振腔长 $L = 20$ mm, 耦合间距 $g = 5$ mm; (b) 波导透射谱

以上讨论了耦合间距 $g = 0$ mm 时 MNG-DPS-MNG 表面等离子激元波导带阻滤波器的中心频率与腔长之间的关系, 接下来讨论耦合间距对该波导滤波器透射率下降幅度的影响. 如图 3(a) 所示, 谐振腔参数为 $L = 20$ mm, $g = 5$ mm, 图 3(b) 给出了该波导的透射谱. 一阶谐振模式 (谐振频率 1.1 GHz) 的透射率下降幅度测量值为 -14 dB, 二阶谐振模式 (谐振频率 2.02 GHz) 的透射率下降幅度测量值为 -16 dB. 另外, 仿真及实验结果表明, 若谐振腔的参数不变, 将其向上或向下移动 10 mm, 该带阻滤波器的中心频率和透射率下降幅度基本不变. 因

为中心频率由谐振腔长短决定, 与谐振腔的位置无关; 透射率下降幅度由耦合进入谐振腔的电磁能量决定, 也与谐振腔的位置基本无关.

为深入研究该 MNG-DPS-MNG 波导式带阻滤波器中耦合间距对波导透射率下降幅度的影响, 设定谐振腔的长度为 $L = 20$ mm, 改变耦合间距来观察波导谐振频率点的透射率下降幅度. 仿真和实验结果表明, 耦合间距分别为 $g = 0, 5, 10$ mm 时, 一阶谐振模式的透射率下降幅度测量值分别为 $-30, -14, -0.5$ dB, 二阶谐振模式的透射率下降幅度测量值分别为 $-20, -16, -0.3$ dB. 随着耦合间距 g 的增加, 进入谐振腔内的电磁能量减少, 谐振腔的谐振作用减弱, 因此该波导一阶谐振模式和二阶谐振模式的透射率下降幅度均减小. 若继续增大参数 g 至 20 mm, 该波导的一阶谐振模式和二阶谐振模式将消失, 因为此时已基本没有电磁波耦合进入谐振腔, 介质缺陷不再具有谐振腔作用. 可见, 耦合间距的变化影响滤波器的透射率下降幅度. 因此, 在谐振腔的长度不变时, 可以通过改变耦合间距来调节该带阻滤波器的透射率下降幅度, 实现该滤波器可调节的阻带抑制功能.

可见对于含谐振腔的 MNG-DPS-MNG 表面等离子激元波导带阻滤波器, 其阻带中心频率由谐振腔的长度 L 决定, 与谐振腔在 MNG 区域的位置无关 (耦合间距 g 一定). 同时, 透射率下降幅度由耦合进入谐振腔的电磁能量决定^[12], 耦合进入谐振腔的电磁能量越多, 介质缺陷的谐振效应越强, 则滤波器的透射率下降幅度越低. 结合本文的微带 MNG-DPS-MNG 波导结构, 通过增加谐振腔的个数可以达到在谐振频率不变 (或基本不变) 时增加耦合进入谐振腔的电磁能量, 进而增强该波导带阻滤波性能的目的. 如图 4(a) 所示, 分别在该波导中分别放置两个谐振腔 ($L = 30$ mm, $g = 0$ mm; 谐振腔位于 D1—D5 和 D6—D10)、三个谐振腔 (分别位于 A1—A5, A6—A10, F6—F10)、四个谐振腔 (分别位于 A1—A5, A6—A10, F1—F5, F6—F10). 为清楚展示谐振腔的位置, 分别在结构的左侧和下方网格的中点分别标注了 “A, B, C, D, E, F” 和 “1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10”. 图 4(b) 给出了含两个谐振腔时该波导的透射谱. 结果显示, 一阶谐振模式 (谐振频率 0.6 GHz) 的透射率下降幅度测量值为 -40 dB, 二阶谐振模式 (谐振频率 1.5 GHz) 的透射率下降幅度测量值为 -30 dB. 另外, 对于放置三个、四个谐振腔的情形, 一阶谐振模式的透射率下降幅度测量值分

别为 -51 , -62 dB, 二阶谐振模式的透射下降率幅度测量值分别为 -40 , -48 dB.

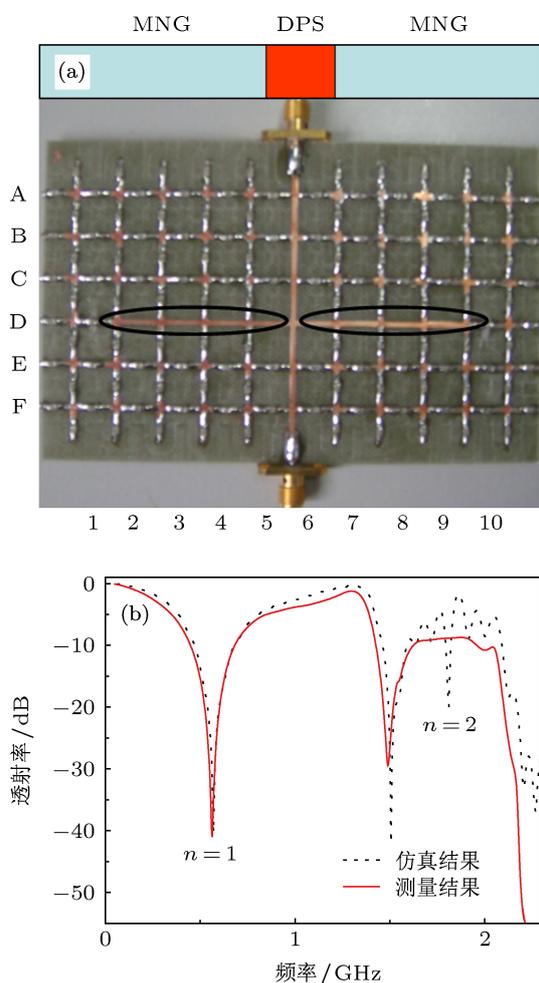


图4 (a) 含两个谐振腔的 MNG-DPS-MNG 表面等离子激元波导, 谐振腔长 $L = 30$ mm, 耦合间距 $g = 0$ mm; (b) 波导的透射谱

上述情况下, 谐振腔均相对放置于 DPS 材料

的两侧, 且位于相同 MNG 区域内的谐振腔之间的距离应尽可能地远, 以保证谐振腔之间的耦合作用最小; 谐振腔的长度均为 $L = 30$ mm, 以保证谐振频率不会变化太多; 谐振腔的耦合间距均为 $g = 0$ mm, 以保证在增加谐振腔数目的时候, 进入谐振腔内的电磁能量最多. 由实验测量结果可见, 随着谐振腔数目的增加, 该波导的带阻滤波性能不断增强. 因此, 在谐振腔的长度和耦合间距不变时, 可以通过增减亚波长谐振腔的个数来调节该 MNG-DPS-MNG 波导滤波器的透射率下降幅度. 同时, 值得指出的是, 当位于相同 MNG 区域的谐振腔距离较近且数目增加时, 由于谐振腔之间的相互耦合作用, 会导致 MNG-DPS-MNG 波导的阻带变宽, 该性质可用来实现宽带的带阻滤波特性 [20].

4 结论

本文基于微带线结构, 在微波频段通过仿真和实验研究了二维 MNG-DPS-MNG 表面等离子激元波导的滤波性能. 研究表明, 该表面等离子激元波导具有低通滤波特性, 若在 MNG 区域引入谐振腔则具有可调节的带阻滤波特性. 当耦合间距一定时, 谐振频率由谐振腔的长度决定, 与谐振腔在 MNG 区域的位置无关; 当谐振腔的长度一定时, 波导透射谱中透射率下降的幅度由耦合距离决定; 当谐振腔的长度及耦合间距均一定时, 可以通过增加谐振腔的数量来实现更好的阻带抑制性能. 因此可以通过谐振腔的添加与否来实现低通滤波以及窄带带阻滤波性能, 通过改变谐振腔的参数及增加谐振腔的数量来实现该波导可调的带阻滤波性能.

- [1] Barnes W L, Dereux A, Ebbesen T W 2003 *Nature* **424** 824
- [2] Bozhevolnyi S I, Volkov V S, Devaux E, Laluet J Y, Ebbesen T W 2006 *Nature* **440** 508
- [3] Wang Y, Wang X, He X J, Mei J S, Chen M H, Yin J H, Lei Q Q 2012 *Acta Phys. Sin.* **61** 137301 (in Chinese) [王玥, 王暄, 贺训军, 梅金硕, 陈明华, 殷景华, 雷清泉 2012 物理学报 **61** 137301]
- [4] Stegeman G I, Wallis R F, Maradudin A A 1983 *Opt. Lett.* **8** 386
- [5] Veronis G, Fan S H 2005 *Appl. Phys. Lett.* **87** 131102
- [6] Han Z, Liu L, Erik F 2006 *Opt. Commun.* **259** 690
- [7] Gao H, Shi H, Wang C, Du C, Luo X, Deng Q, Lü Y, Lin X, Yao H 2005 *Opt. Express* **13** 10795
- [8] Zhai G H, Hong W, Wu K, Wei J 2010 *Acta Electron. Sin.* **38** 825 (in Chinese) [翟国华, 洪伟, 吴柯, 韦婧 2010 电子学报 **38** 825]
- [9] Gong Y K, Wang L R, Hu X H, Li X H, Liu X M 2009 *Opt. Express* **17** 13727
- [10] Wang T B, Wen X W, Yin C P, Wang H Z 2009 *Opt. Express* **17** 24096
- [11] Lin X S, Huang X G 2008 *Opt. Lett.* **33** 2874
- [12] Liu L, Hao X, Ye Y T, Liu J X, Chen Z L, Song Y C, Luo Y, Zhang J, Tan L 2012 *Opt. Commun.* **285** 2558
- [13] Gan Q, Fu Z, Ding Y J, Bartoli F J 2008 *Phys. Rev. Lett.* **100** 256803
- [14] Lu W T, Savo S, Casse B D F, Sridhar S 2009 *Microw. Opt. Techn. Lett.* **51** 2705
- [15] Zhang L W, Xu J P, He L, Qiao W T 2010 *Acta Phys. Sin.* **59** 7863 (in Chinese) [张利伟, 许静平, 赫丽, 乔文涛 2010 物理学报 **59** 7863]
- [16] Iyer A K, Kremer P C, Eleftheriade G V 2003 *Opt. Express* **11** 696
- [17] Zhang H F, Cao D, Tao F, Yang X H, Wang Y, Yan X N, Bai L H 2010 *Chin. Phys. B* **19** 027301
- [18] Ruppin R 2001 *J. Phys.: Condens. Matter* **13** 1811
- [19] Wang W S, Zhang L W, Zhang Y W, Fang K 2013 *Acta Phys. Sin.* **62** 024203 (in Chinese) [王五松, 张利伟, 张冶文, 方恺 2013 物理学报 **62** 024203]
- [20] Lee P H, Lan Y C 2010 *Plasmonics* **5** 417

Experimental studies of the surface plasmon polaritons waveguide filter in microwave band*

Wang Wu-Song¹⁾ Zhang Li-Wei²⁾ Ran Jia¹⁾ Zhang Ye-Wen^{1)3)†}

1) (MOE Key Laboratory of Advanced Micro-structure Materials, Department of Physics, Tongji University, Shanghai 200092, China)

2) (School of Physics and Chemistry, Henan Polytechnic University, Jiaozuo 454000, China)

3) (Department of Electrical Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China)

(Received 14 April 2013; revised manuscript received 9 May 2013)

Abstract

Based on theoretical analysis, in this paper studied are the low pass and band stop filter effects of the μ -negative materials/double positive materials/ μ -negative materials (MNG-DPS-MNG) surface plasmon polaritons waveguide with branch defect. The research results show that the defect is equivalent to a sub wavelength resonator. The central frequency of the band stop filter is determined by the resonator length and it is independent of the position where the resonator is located in the MNG region. The transmission dips of the waveguide are closely related to the coupling distance. So the filter characteristics of the surface plasmon polariton waveguide can be adjusted by changing the resonator length and number and the coupling distance. The experimental results are in good agreement with simulation results. These properties will have potential application value in the tunable single channel or multi-channel band stop filters.

Keywords: surface plasmon polaritons, metamaterials waveguide, resonator, filter

PACS: 42.25.Bs, 42.82.Et

DOI: 10.7498/aps.62.184203

* Project supported by the National Basic Research Program of China (Grant No. 2011CB922001), the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 10904032), the Excellent Youth Teachers Program of Universities in Henan Province, China (Grant No. 2012GGJS-060), and Henan Polytechnic University Program for Distinguished Young Scholars, China (Grant No. J2013-09).

† Corresponding author. E-mail: yewen.zhang@tongji.edu.cn