

等离子体辅助平板波导的传输特性及应用研究

孙杰 杨剑锋 闫肃 杨晶晶 黄铭

Transmission characteristics and potential applications of plasmon-assisted parallel-plated waveguide

Sun Jie Yang Jian-Feng Yan Su Yang Jing-Jing Huang Ming

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 64, 078402 (2015) DOI: 10.7498/aps.64.078402

在线阅读 View online: <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.078402>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn/CN/Y2015/V64/I7>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

光子晶体高功率微波模式转换器设计

Design of a metallic photonic crystal high power microwave mode converter

物理学报.2014, 63(1): 018401 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.63.018401>

矩形槽同轴布拉格结构的模式匹配分析方法及实验验证

Mode-matching analytic method of a coaxial Bragg structure corrugated with rectangular ripples and its experimental verification

物理学报.2013, 62(20): 208402 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.62.208402>

X波段过模弯曲圆波导 TM_{01} - HE_{11} 模式变换器研究

Investigation of an X-band over-moded bent circular waveguide TM_{01} - HE_{11} mode converter

物理学报.2013, 62(7): 078401 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.62.078401>

各向异性特异材料波导中表面等离子体的共振性质

Resonance properties of surface plasmon in the anisotropic metamaterial waveguide

物理学报.2012, 61(6): 068401 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.61.068401>

利用金属贴片电磁带隙结构在金属波导中创建准横电磁波

A quasi transverse electromagnetic mode waveguide developed by using metal-patch electromagnetic bandgap structure

物理学报.2011, 60(8): 088401 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.60.088401>

等离子体辅助平板波导的传输特性及应用研究*

孙杰¹⁾ 杨剑锋¹⁾ 闫肃²⁾ 杨晶晶^{1)†} 黄铭^{1)3)‡}

1)(云南大学无线创新实验室, 信息学院, 昆明 650091)

2)(北京理工大学信息与电子学院, 北京 100081)

3)(云南省高校谱传感与边疆无线电安全重点实验室, 昆明 650091)

(2014年9月6日收到; 2014年10月25日收到修改稿)

如何灵活地控制和操纵太赫波是目前研究的热点. 根据电磁波传输理论, 导出了等离子体辅助平板波导的场分布和色散关系表达式, 计算了其传输特性, 并通过全波仿真进行了证实. 结果表明, 等离子体辅助平板波导具有带阻特性, 上边带截止频率等于等离子体频率, 等离子体层越薄, 下边带截止频率越高, 带宽越窄; 阻带内存在两种不同的物理机理, 一种与等离子体和中间媒质的谐振耦合有关, 另一种与表面波的形成有关. 此外, 本文还研究了等离子体频率及碰撞频率对传输特性的影响, 提出了通过改变等离子体频率调谐平板波导滤波器特性的方法. 同时, 采用褶皱金属结构实现了等离子体层, 设计了平板波导传感模型, 通过改变凹槽内的材料的介电常数仿真了其传感特性, 结果表明当材料的介电常数变化0.1%时, 平均截止频率变化1.8 GHz; 通过检测截止频率的变化, 传感器能明显分辨氮、汽油、液态石蜡、甘油和水, 证实了其优良的太赫传感特性. 这项工作对研究太赫波的传输及太赫器件的设计和制备具有指导意义.

关键词: 平板波导, 太赫兹, 表面等离子体, 传感器

PACS: 84.40.Az, 41.20.-q, 73.20.Mf, 07.07.Df

DOI: 10.7498/aps.64.078402

1 引言

电磁波的传播和导行是信息通信技术发展的基础, 平行线和同轴电缆的发明促进了电报和电话技术的发展; 无线电波传播技术推动了广播电视、卫星通信和移动通信的普及, 并将人类带入了移动互联网时代; 基于硅波导的光传输技术导致光传输网络的宽带化; 基于微带传输线的射频和微波技术促进了无线电通信设备的小型化. 目前, 无线电频段和光频段的传输技术已基本成熟, 而太赫 (Terahertz, THz) 频段的传输还有许多问题尚待解决^[1], 尤其是基于何种波导研发新型器件操纵太赫波是目前研究的热点^[2].

平板波导 (Parallel-Plate Waveguide, PPW)

是一种由两块平行板导体构成的波导, 传输主模为横电磁波 TEM, 具有传输频带宽、结构和场分布简单等特点^[3]. 2001年, Mendis 等^[4]首次采用 PPW 在 0.1—4 THz 频段进行了太赫波传输实验, 证实了其宽带、低损耗和无色散特性, 随后, 人们基于平板波导研究了其传感、成像和信号处理等特性^[5,6]. 2006年, Schurig 等^[7]采用平板波导首次在微波频段实验证实了电磁斗篷现象, 引起了人们对超材料和 PPW 实验技术的关注; Silveirinha 等^[8]通过理论证明, 电磁波能够压缩通过平板波导中的填充了零材料的区域, 其传输特性与该区域波导的几何形状无关; Luo 等^[9]通过将非均匀的具有近零分量的各项异性媒质填入平板波导中, 实现了电磁流的任意控制功能; Ourir 等^[10]通过将近

* 国家自然科学基金 (批准号: 61161007, 61261002, 61461052)、教育部博士点基金 (批准号: 20135301110003, 20125301120009)、中国博士后基金 (批准号: 2013M531989, 2014T70890) 和云南省自然科学基金重点项目 (批准号: 2013FA006) 资助的课题.

† 通信作者. E-mail: huangming@ynu.edu.cn

‡ 通信作者. E-mail: yangjingjing@ynu.edu.cn

零介电常数材料填充在与不同平板波导连接的波导连接器中, 实现了连接器的完美功率分配功能; 吴中元等^[11]分析了二维平行板波导与近零材料的电磁相互作用, 证实了近零材料的电磁压缩和超耦合效应, 并设计了光传感器和光功分器. 在光频段, 实现平板波导一般采用MIM (Metal-Insulator-Metal) 结构^[12], 它利用了存在于金属介质分界面上的表面等离子体激元现象, 例如, Bahadori 等^[13]建立了互补开环谐振器 (Split-Ring Resonators) 的等效电路模型, 导出了其耦合品质因数的表达式; Bozhevolnyi 等^[14]利用通道等离子体激元, 实验研究了等离子体波导环形谐振器的电磁特性; Han 等^[15]研究了等离子体慢光波导和谐振器的特性, 给出了低失真、低损耗和高品质因数谐振器的设计方法; Li 等^[16]评论了等离子体波前的操纵方法和金属纳米结构中光与物质相互作用的研究进展. 2014年, Chen 等^[2]提出了基于PPW的太赫石墨烯等离子体波导 (Graphene Plasmonic Waveguide, GPPW) 传输模型, 以及对太赫波进行操纵处理和研发新型太赫器件的方法; Xu 等^[17]将等离子体层附着在平板波导的内表面, 研究了双层等离子体辅助平板波导的传输特性. 双层等离子体辅助平板波导结构复杂, 对PPW应用存在许多制约因素. 为解决此问题, 本文导出了单层等离子体辅助平板波导的场分布和色散关系表达式, 并通过全波仿真证实了其带阻特性, 以此来验证理论和仿真结果; 揭示了阻带内的两种不同传输机理; 研究了等离子体损耗对PPW传输特性的影响. 由于太赫波段滤波器的重要性^[18-20], 因此本文探讨了基于平板波导的滤波和传感设计, 这对相关太赫器件研发具有指导意义.

2 波导模型及传输特性

2.1 波导模型

图1为等离子体辅助平板波导模型. 图中, $x = -a/2$ 和 $x = a/2 + d$ 的边界为完美导体 (Perfect Conductor, PEC) 边界, 两条平行的黑色线代表波导结构的PEC面; 深红色区域1是一层宽度为 d 的等离子体媒质 (Plasmonic Materials, PM), 等效介电函数为 $\varepsilon(\omega) = \varepsilon_\infty - \omega_p^2/(\omega^2 + i\omega\Gamma)$, 其中 ω_p 是等离子体角频率, Γ 是等离子体碰撞频率, ω 是角频率, ε_∞ 是背景材料的介电常数; 灰白色区域

0 是一个宽度为 a 的空气层, 平板波导在 y 方向和 z 方向上无限延伸.

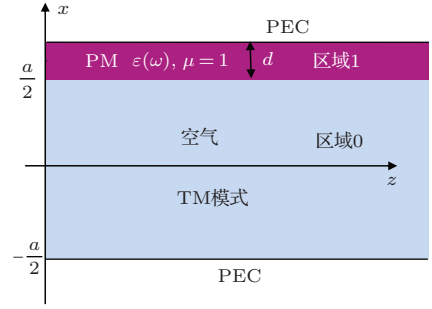


图1 等离子体辅助平板波导模型

平板波导内区域0中TM模的电磁场分布可表示为

$$\mathbf{H}_{0y}(x, z) = e_y [A_1 e^{ik_x x} + A_2 e^{-ik_x x}] e^{i\beta z}, \quad (1a)$$

$$\mathbf{E}_{0z}(x, z) = -k_x e_z [A_1 e^{ik_x x} - A_2 e^{-ik_x x}] \times e^{i\beta z} / (\omega \varepsilon_0). \quad (1b)$$

同理, 区域1中相应模式的电磁场分布可表示为

$$\mathbf{H}_{1y}(x, z) = e_y [B_1 e^{ik_{1x} x} + B_2 e^{-ik_{1x} x}] e^{i\beta z}, \quad (2a)$$

$$\mathbf{E}_{1z}(x, z) = -k_{1x} e_z [B_1 e^{ik_{1x} x} - B_2 e^{-ik_{1x} x}] \times e^{i\beta z} / (\omega \varepsilon_0 \varepsilon_1). \quad (2b)$$

上式中, β 是电磁波沿 Z 方向传播的相位常数; k_{1x} 和 k_x 分别是PM和中心空气层区域中沿着 X 方向的波矢; ε_0 和 ε_1 分别是真空介电常数和等离子体相对介电常数 ($\varepsilon_1 = \varepsilon(\omega)$); A_1 , A_2 , B_1 和 B_2 是待定系数; 色散条件为: $\beta^2 + k_x^2 = k_0^2$ 和 $\beta^2 + k_{1x}^2 = \varepsilon(\omega)k_0^2$; 在 $x = 0.5a + d$ 和 $x = -0.5a$ 上的边界条件为 $\mathbf{E}_{1z}(0.5a + d, z) = 0$, $\mathbf{E}_{0z}(-0.5a, z) = 0$, 即PEC边界切向电场为零; 在 $x = 0.5a$ 边界上的场连续, 即边界条件为 $\mathbf{E}_{0z}(0.5a, z) = \mathbf{E}_{1z}(0.5a, z)$, $\mathbf{H}_{0y}(0.5a, z) = \mathbf{H}_{1y}(0.5a, z)$.

在上述条件下求解方程组可得如下色散关系:

$$(1 + e^{2i(k_x a + k_{1x} d)})(k_{1x}/k_x \varepsilon(\omega) + 1) = (k_{1x}/k_x \varepsilon(\omega) - 1)(e^{ik_x 2a} + e^{ik_{1x} 2d}). \quad (3)$$

进一步分析上述方程, 可得出下列波导色散特性表达式:

$$\frac{\cot(\sqrt{k_0^2 - \beta^2} \cdot a)}{\tanh(\sqrt{\beta^2 - \varepsilon(\omega)k_0^2} \cdot d)} = -\frac{\sqrt{\beta^2 - \varepsilon(\omega)k_0^2}}{\sqrt{k_0^2 - \beta^2} \cdot \varepsilon(\omega)}, \quad \beta < k_0, \quad (4)$$

$$\frac{\coth(\sqrt{\beta^2 - k_0^2} \cdot a)}{\tanh(\sqrt{\beta^2 - \varepsilon(\omega)k_0^2} \cdot d)}$$

$$= -\frac{\sqrt{\beta^2 - \varepsilon(\omega)k_0^2}}{\sqrt{\beta^2 - k_0^2} \cdot \varepsilon(\omega)}, \quad \beta > k_0. \quad (5)$$

由此可见, 色散关系存在两个分支, $\beta < k_0$ 的分支为漫波, 记为 ω^- ; $\beta > k_0$ 的分支为快波, 记为 ω^+ .

2.2 波导传输特性

通过求解方程 (4) 和 (5), 可以得到图 2 所示的等离子体辅助平板波导的传输特性. 图中, 横轴表示相对相位常数, 纵轴表示相对角频率; 蓝色带状区域为带阻区; 绿色实线为 $\beta > k_0$ 的分支, 与快波有关; 深蓝色实线为 $\beta < k_0$ 的分支, 与漫波传输有关; 红色虚线表示波在真空中的传输特性. 由图可以看出, 等离子体辅助平板波导的传输特性

与等离子体层厚度有关, 具有带阻特性, 阻带宽度 B 等于上边带截止频率减去下边带截止频率, 上边带截止频率等于 ω_p . 下边带截止频率与表面等离子体角频率 ω_{sp} 和临界耦合距离 d_c 有关, 当等离子体层厚度 $d > d_c$ 时, 下边带截止频率等于表面等离子体角频率 ω_{sp} , 且 $\omega_{sp} = \omega_p/\sqrt{2}$; 当等离子体层厚度 $d < d_c$ 时, 下边带截止频率位于表面等离子体角频率 ω_{sp} 和 ω_p 之间, 并且其值等于与色散曲线斜率 $d\omega/d\beta = 0$ 相对应的频率, 在图 2 (c) 和 (d) 中, 下边带截止频率分别等于 $0.372\omega_p$ 和 $0.411\omega_p$. 比较图 2 (a) 和 (b) 与 (c) 和 (d) 可见, 随着等离子体厚度的减小, $\beta < k_0$ 分支的斜率经历了由大到小, 由正到负的变化, 当斜率为 0 时, 相对应的等离子体厚度为临界耦合距离 d_c , 在图 2 所示的条件下, $d_c = 0.245a$.

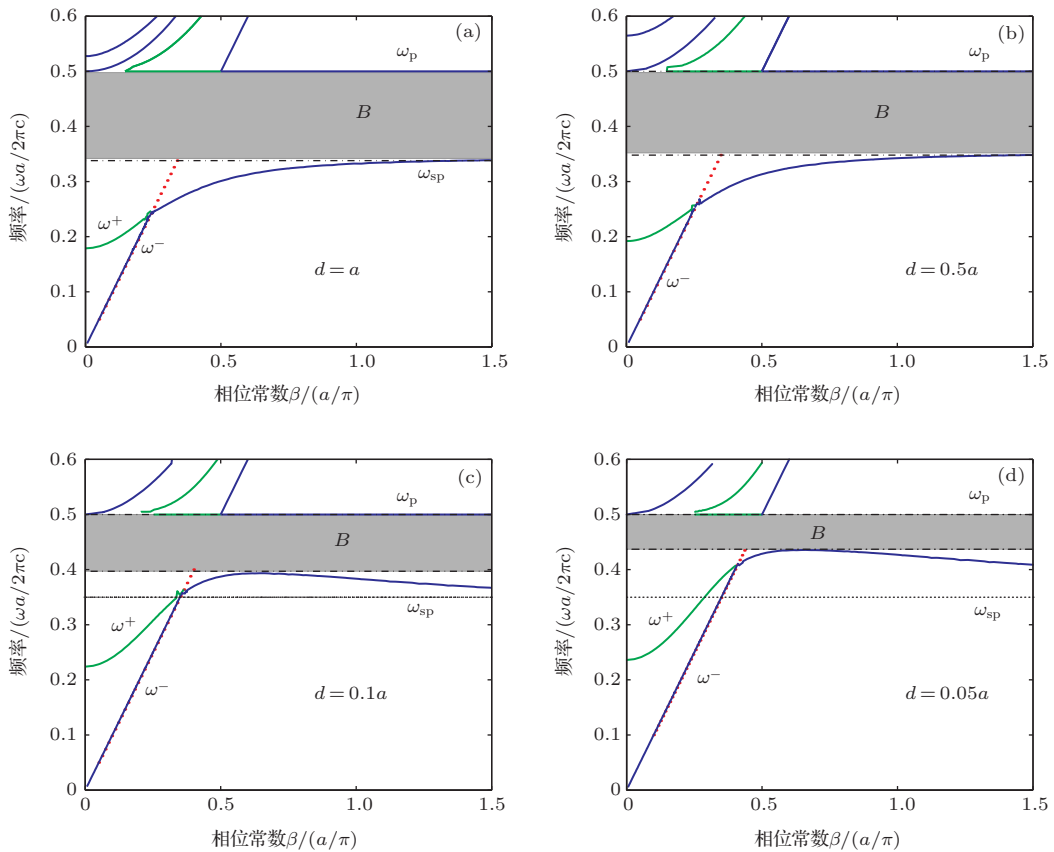


图 2 (网刊彩色) 等离子体辅助平板波导的传输特性

3 传输特性仿真结果

为了证实上述理论结果的有效性, 下面通过电磁仿真软件 CST 对图 1 所示的结构进行建模,

并仿真了其传输特性. 图 3 给出了等离子体频率 $f_p = 5$ THz ($f_p = \omega_p/2\pi$) 时, 不同等离子体厚度条件下传输特性 (S_{21}) 的仿真结果. 由图可以看出, 等离子体层越厚, 阻带宽度越宽; 在上边带截止频率 $f_p = 5$ THz 处, 传输特性曲线发生突变, 与等离

子体厚度无关, 其机理与等离子体和中间媒质的谐振耦合有关, 当波导中间媒质为空气时, 该谐振频率下等离子体层的相对介电常数为 -1 ; 下边带截止频率与表面等离子体角频率 ω_{sp} 和临界耦合距离 d_c 有关, 当 $d > d_c$ 时下边带截止频率等于 f_{sp} . 这与图2所示的理论结果符合, 证实了仿真结果的有效性.

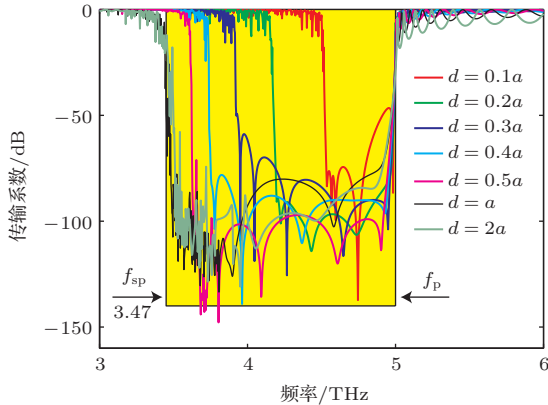


图3 (网刊彩色) 不同等离子体层厚度下传输特性与频率的关系

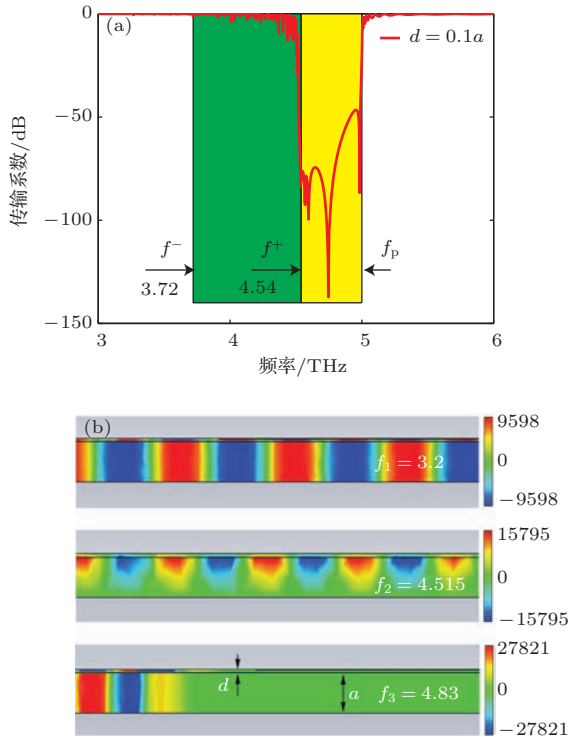


图4 (网刊彩色) (a) 等离子体层厚度为 $d = 0.1a$ 时, 波导传输特性与频率的关系; (b) 电场分布

为了进一步揭示 $d < d_c$ 时波导的传输机理, 我们仿真了等离子体层厚度为 $d = 0.1a$ 时波导传输特性与频率的关系, 结果见图4所示. 由图4(a)可见, 下边带截止频率附近传输特性波动较大, 在

阻带外电磁波能够无衰减的传输, 图4(b)上图所示给出了频率 $f_1 = 3.2$ THz时的电场分布. 阻带内电磁波传输衰减非常大, 这是由于在频率范围3.72—4.54 THz之间, 波导内存在正向波和返波, 它们相互叠加形成行驻波; 当正向波和返波幅度相等时将出现表面等离子体模, 其场分布见图4(b)中图所示($f_2 = 4.515$ THz), 由图可见, 场分布局域在波导内等离子体层的上表面附近, 这与文献[17]报道的双层等离子体辅助平板波导场分布局域在波导内等离子体层上下表面附近完全不同; 在频率范围4.54—5 THz之间, 波导同样具有截止特性, 但此时的传输机理与等离子体和中间媒质的谐振耦合有关, 耦合特性由色散方程决定, 场分布见图4(b)下图所示($f_3 = 4.83$ THz).

为了研究等离子体碰撞频率对传输特性的影响, 在 $d = 0.001a$ 和 $f_p = 1.5$ THz时, 仿真了不同碰撞频率下传输系数与频率的关系, 见图5所示. 由图可见, 碰撞频率越小, 阻带宽度越窄, 传输特性越尖锐, 这是由于碰撞频率表征了材料的损耗, 进而决定了波导的传输损耗特性.

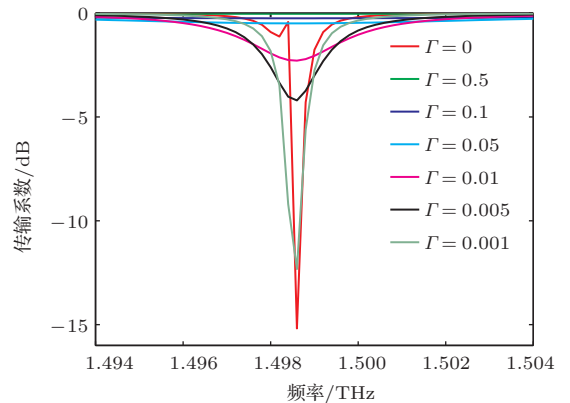


图5 (网刊彩色) 等离子体碰撞频率对传输损耗的影响

4 滤波和传感器应用

以上仿真结果与理论结果符合, 进一步证明了本文建立理论模型的有效性. 由于太赫频段应用广泛, 并且有许多理论和技术问题有待解决[21,22], 因此以下将探讨等离子体辅助平板波导的滤波和传感应用. 图6给出了等离子体频率 f_p 对传输特性的影响. 由图可见, 通过改变等离子体频率, 可以调整阻带上下边带截止频率的位置和阻带带宽 B , 即通过改变等离子体频率可以改变平板波导的滤波特性; 上边带截止频率等于等离子体频率 f_p , 这表

明如果能通过某种机理改变 f_p , 则很容易动态调谐平板波导滤波器的特性.

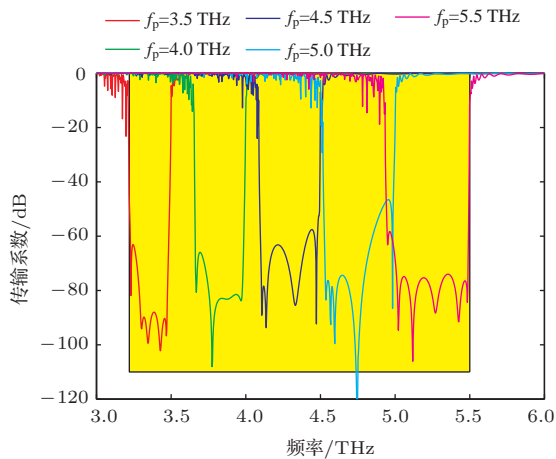


图6 (网刊彩色) 等离子体辅助平板波导的滤波特性

为了研究等离子体辅助平板波导的传感特性, 我们用一维矩形褶皱金属结构^[23]代替图1所示的等离子体层, 并将其倒置即可得到图7(a)所示的传感模型. 图中, 褶皱金属结构凹槽深度为 d , 宽度为 m , 间距为 n , 相互比例关系为 $m/(m+n) = 0.2$ 和 $d = m + n$, 且 $d = 15 \mu\text{m}$. 图7(b)给出了凹槽内填充材料介电常数与传输特性的关系, 可以看

出, 材料介电常数增大时, 上下边带的截止频率发生了红移, 这表明通过测量截止频率可以反演材料介电常数. 为了研究传感器的分辨率, 仿真了材料介电常数发生微小变化时, 截止频率的变化趋势, 见图7(c)所示. 由图可见, 当材料介电常数变化0.1%时, 平均截止频率变化1.8 GHz. 我们在凹槽内分别填充氮、汽油、液态石蜡、甘油和水, 相应的折射率为1, 1.41, 1.49, 1.82和2.1, 介电常数分别为 $\epsilon_r = 1, 1.988, 2.22, 3.31$ 和 4.41 . 得到的传输特性见图7(d)所示, 可以看出, 设计的传感器能明显分辨不同的液体. 同时, 我们将该传感器对上述几种物质的截止频率与文献报道^[24]的结果进行了比较, 见表1所示. 表中, 相对频偏表示各种物质所对应的传感器谐振频率(截止频率)与氮比较的偏移量, 可以看出, 本文提出的传感器模型灵敏度较高, 例如, 对于水和甘油相对频偏增大了367.31%和400%.

表1 传感特性比较

	水	甘油	液态石蜡	汽油	氮
谐振频率 ^[24] / THz	1.19	1.3	1.48	1.53	1.71
相对频偏/THz	0.52	0.41	0.23	0.18	0
截止频率(本文)/THz	2.61	2.99	3.59	3.76	5.04
相对频偏/THz	2.43	2.05	1.45	1.28	0

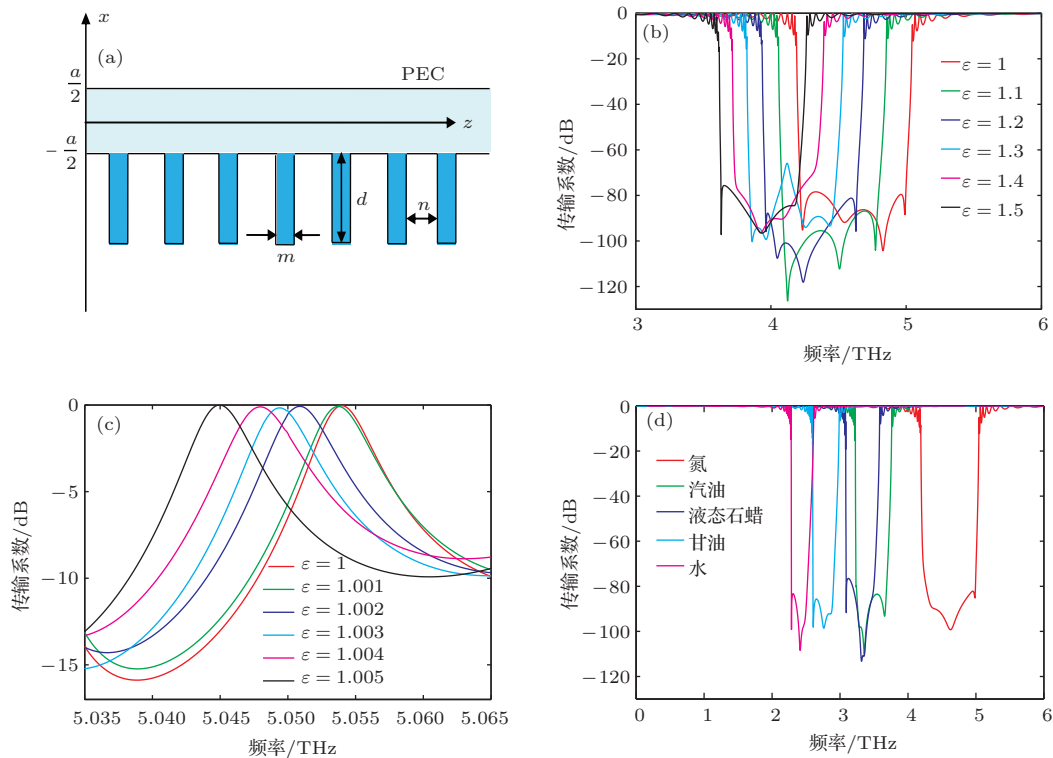


图7 (网刊彩色) (a) 褶皱金属结构辅助平板波导模型; (b) 介电常数与截止频率的关系; (c) 介电常数发生微小变化时, 等离子体频率与截止频率的关系; (d) 褶皱金属槽内填充不同材料时的传输特性与频率的关系

5 结 论

基于电磁波传输理论, 导出了等离子体辅助平板波导的场分布和色散关系表达式, 计算了其传输特性, 并通过全波仿真进行了证实. 结果表明, 等离子体辅助平板波导具有带阻特性, 上边带截止频率等于等离子体频率, 这是由等离子体层与中间媒质的谐振耦合产生的; 下边带截止频率与表面波的形成有关, 主要由表面等离子体频率和临界耦合距离决定. 与双层等离子体辅助平板波导比较, 本文用褶皱金属结构实现了等离子体材料. 为了与文献报道的太赫传感平台进行比较, 我们将不同的液体填充到褶皱金属结构凹槽中, 结果表明, 提出的传感模型能够分辨不同的液体, 并且灵敏度明显提高. 这项工作对太赫器件设计及制备具有指导意义, 下一阶段将设计传感器原型, 验证理论和仿真论结果.

参考文献

- [1] Shaghik A, Shahraam A V, Tanya M M, Derek A 2013 *Advances in Optics and Photonics* **5** 169
- [2] Chen P Y, Huang H Y, Akinwande D, Alu A 2014 *ACS Photonics* **1** 647
- [3] Pozar N M 2007 *Microwave Engineering* (Beijing: Publishing House of Electronics Industry) p83 (in Chinese) [张肇仪, 周乐柱, 吴德明等译 2007 微波工程 (北京: 电子工业出版社) 第 83 页]
- [4] Mendis R, Grischkowsky D 2001 *Opt. Lett.* **26** 846
- [5] Mendis R, Mittleman D M 2009 *Opt. Express* **17** 14839
- [6] Astley V, Reichel K S, Jones J, Mendis R, Mittleman D M 2012 *Appl. Phys. Lett.* **100** 231108
- [7] Schurig D, Mock J J, Justice B J, Cummer S A, Pendry J B, Starr A F, Smith D R 2006 *Science* **314** 977
- [8] Silveirinha M, Engheta N 2006 *Phys. Rev. Lett.* **97** 157403
- [9] Luo J, Lu W X, Hang Z H, Chen H Y, Hou B, Lai Y, Chan C T 2014 *Phys. Rev. Lett.* **112** 073903
- [10] Ourir A, Maurel A, Pagneux V 2013 *Opt. Lett.* **38** 2092
- [11] Wu Z Y, Huang M, Yang J J, Yu J, Peng J H 2009 *Chinese Journal of Lasers* **36** 458 (in Chinese) [吴中元, 黄铭, 杨晶晶, 余江, 彭金辉 2009 中国激光 **36** 458]
- [12] Li D Y, Li E P 2013 *Opt. Lett.* **38** 3384
- [13] Bahadori M, Eshaghian A, Mehrany K 2014 *Journal of lightwave technology* **32** 2659
- [14] Bozhevolnyi S I, Volkov V S, Devaux E, Laluet J Y, Ebbesen T W 2006 *Nature* **440** 508
- [15] Han B, Jiang C 2009 *Appl. Phys. B* **95** 97
- [16] Li J F, Li Z Y 2014 *Chin. Phys. B* **23** 047305
- [17] Xu Y D, Wu Q N, Chen H Y 2014 *Laser Photonics Reviews* **8** 562
- [18] Akyildiz I F, Jornet J M, Han C 2014 *Physical Communication* **12** 16
- [19] Lan F, Gao X, Qi L M 2014 *Acta Phys. Sin.* **63** 104209 (in Chinese) [兰峰, 高喜, 亓丽梅 2014 物理学报 **63** 104209]
- [20] Yang J Q, Li S X, Zhao H W, Zhang J B, Yang N, Jing D D, Wang C Y, Han J Guang 2014 *Acta Phys. Sin.* **63** 133203 (in Chinese) [杨静琦, 李绍限, 赵红卫, 张建兵, 杨娜, 荆丹丹, 王晨阳, 韩家广 2014 物理学报 **63** 133203]
- [21] Tonouchi M 2007 *Nature Photonics* **1** 97
- [22] Xu J Z, Zhang X C 2007 *Terahertz science technology and application* (Beijing: Beijing University Press) p9 (in Chinese) [许景周, 张希成 2007 太赫兹科学技术与应用 (北京: 北京大学出版社) 第 9 页]
- [23] Garcia-Vidal F J, Martin-Moreno L, Pendry J B 2007 *J. Opt. A: Pure Appl. Opt.* **7** S97
- [24] Ng B H, Wu J F, Hanham S M, Fernández-Domínguez A I, Klein N, Liew Y F, Breese M B H, Hong M H, Maier S A 2013 *Adv. Optical Mater.* **1** 543

Transmission characteristics and potential applications of plasmon-assisted parallel-plated waveguide*

Sun Jie¹⁾ Yang Jian-Feng¹⁾ Yan Su²⁾ Yang Jing-Jing^{1)†} Huang Ming^{1)3)‡}

1) (Wireless Innovation Lab of Yunnan University, School of Information Science and Engineering, Kunming 650091, China)

2) (School of Information and Electronics, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China)

3) (Key Laboratory of Spectrum Sensing and Borderland Radio Safety of University in Yunnan Province, Kunming 650091, China)

(Received 6 September 2014; revised manuscript received 25 October 2014)

Abstract

Flexible control of terahertz waves is now a research hotspot. Based on the electromagnetic theory the dispersion relation and field distributions in a plasmon-assisted parallel-plated waveguide are deduced. The transmission property of such a waveguide is obtained and confirmed by the full-wave simulation. Results show that the plasmon-assisted parallel-plated waveguide shows a band gap characteristic, and the cutoff frequency of the upper sideband is equal to the plasmon frequency; generally, the thinner the plasmon layer, the higher the cutoff frequency will be, and the narrower the bandwidth will become. Emergence of the band gap is due to the excited surface plasmon polaritons, and the coupling between surface plasmon and the medium in the waveguide. Besides, the influence of plasmon frequency and collision frequency on the transmission properties is investigated, and a method for adjusting the filter characteristic of the waveguide by tuning the plasmon frequency is proposed. Moreover, the plasmon layer is realized by a textured metallic structure, and a sensing model based on the parallel-plated waveguide is designed. Simulation results show that a 0.1 percent change in permittivity of the sample materials filling in the groove will give rise to a significant change of the cutoff frequency, which is 1.8 GHz in average; interestingly, different liquid samples such as nitrogen, gasoline, paraffin, glycerine and water can be identified through detecting the change of cutoff frequency, which further confirms the excellent terahertz sensing characteristic of the proposed sensor. This work may be helpful for the study of terahertz wave transmission, and may have potential applications in the design of terahertz devices.

Keywords: parallel-plated waveguide, terahertz, surface plasmon, sensor

PACS: 84.40.Az, 41.20.-q, 73.20.Mf, 07.07.Df

DOI: [10.7498/aps.64.078402](https://doi.org/10.7498/aps.64.078402)

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 61161007, 61261002, 61461052), the Specialized Research Fund for the Doctoral Program of Higher Education of China (Grant Nos. 20135301110003, 20125301120009), the China Postdoctoral Science Foundation (Grant Nos. 2013M531989, 2014T70890), and the Key Program of Natural Science of Yunnan Province, China (Grant No. 2013FA006).

† Corresponding author. E-mail: huangming@ynu.edu.cn

‡ Corresponding author. E-mail: yangjingjing@ynu.edu.cn