

褶皱金属结构平板波导传输特性研究

杨剑锋¹ 杨晶晶¹ 闫肃² 邓伟¹ 黄铭^{1,3}

¹云南大学无线创新实验室 信息学院, 云南 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, 云南 昆明 650091

摘要 证明了两块表面具有亚波长凹槽结构的金属板平行放置构成的褶皱金属结构平板波导与等离子体辅助平板波导存在相同点和不同点;并且设计了凹槽深度渐变的对称褶皱金属结构平板波导来实现传输模和表面模的相互转换。研究表明,由于在波导中间区域场分布和能量主要集中在褶皱表面,放入其中的理想导体圆柱不影响其场分布和传输特性,即深度渐变的对称褶皱金属结构平板波导具有隐形效应;褶皱金属结构平板波导阻带上边带截止频率随放入褶皱内样品的介电常数呈线性变化,能够用于介质传感;以柴油、液态石蜡和橄榄油等样品的检测为例,证实了其太赫兹传感特性。该工作对研究褶皱金属结构平板波导的应用,探索其在太赫兹波的传输、调控以及太赫兹器件研制等方面具有指导意义。

关键词 材料;褶皱金属;平板波导;表面等离子体;太赫兹波

中图分类号 O441 **文献标识码** A

doi: 10.3788/AOS201535.s116004

The Transmission Characteristics of Corrugated Metal Parallel-Plate Waveguide

Yang Jianfeng¹ Yang Jingjing¹ Yan Su² Deng Wei¹ Huang Ming^{1,3}

¹Wireless Innovation Laboratory, School of Information Science and Engineering, Yunnan University, Kunming, Yunnan 650091, China

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

³Key Laboratory for Spectrum Sensing and Borderland Radio Safety of High Education in Yunnan Province, Kunming, Yunnan 650091, China

Abstract The corrugated metal parallel plate waveguide composed by two parallel plates with subwavelength corrugations on both surfaces shows some similarities and differences with plasmon-assisted parallel plate waveguide are confirmed. A symmetrical corrugated metal parallel plate waveguide with gradually changed depth of corrugations is designed to convert electromagnetic wave between transmission mode and surface mode. Due to the field distribution and the power flow are concentrated on the corrugated surface at the intermediate region of the waveguide, a cylindrical perfect electric conductor put into the center of the waveguide does not affect its field distribution and transmission characteristics, namely the waveguide has stealth effect. The cutoff frequency of the upper sideband of corrugated metal parallel plate waveguide's band gap changes linearly with the permittivity of sample substance which is filled in the corrugations, and therefore it can be used in dielectric sensing. The terahertz sensing characteristics are confirmed by the detection of samples such as diesel, liquid paraffin and olive oil. This work is helpful for exploring the application of the corrugated metal parallel plate waveguide in terahertz wave transmission, manipulation and terahertz device design.

收稿日期: 2015-01-06; **收到修改稿日期:** 2015-03-10

基金项目: 国家自然科学基金(61161007, 61261002, 61461052)、教育部博士点基金(20135301110003, 20125301120009)、中国博士后基金(2013M531989, 2014T70890)、云南省自然科学基金重点项目(2013FA006)

作者简介: 杨剑锋(1988—),男,硕士研究生,主要从事微波及超材料方面的研究。E-mail:408671175@qq.com

导师简介: 黄铭(1963—),男,博士,教授,主要从事微波、超材料及谱传感方面的研究。

E-mail:huangming@ynu.edu.cn(通信联系人)

Key words materials; corrugated metal; parallel plate waveguide; surface plasmon; terahertz

OCIS codes 160.3918; 240.6680; 230.7400; 120.7000

1 引 言

二氧化硅光纤用于光信号的传输,硅集成电路用于电信号的处理,它们是现代通信和计算机系统的基石。现已证明,表面等离子体激元(SPPs)是光电信号处理的桥梁,利用它进行波矢变换可实现光与电子系统的无缝连接^[1]。SPPs是在金属与介质分界面上光和自由电子相互作用的形成的混合激发态,其振幅在分界面上有最大值,而在垂直方向上呈指数衰减^[2,3]。由于光场分布和能量的局域性,SPPs被广泛用于集成光学、化学和生物传感^[4-11]。另外,表面增强拉曼、自体荧光及二次谐波产生成像等技术均与SPPs密切相关^[12-14]。由于金属的等离子体频率在光频段,因此金属在太赫兹波段的介电常数与可见光波段相比非常大,近似为理想导体,使得太赫兹波段SPPs在金属表面的场约束性能很差,从而限制了其在太赫兹波段的应用。为了解决这个问题,Pendry等^[15,16]提出了类表面等离子体激元的概念。研究表明,在金属表面设计凹槽和亚波长小孔能够实现场的亚波长约束,从而为在微波和太赫兹频段应用SPPs效应开辟了有效途径。将SPPs的概念推广到微波和太赫兹频段有助于获得高度约束的电磁波,并将太赫兹波器件的尺寸减小到亚波长量级以实现高度集成。

现已证明,褶皱金属结构类表面SPPs模式的局域性及可调性不仅可以用于减少传输线之间的串扰^[17,18],而且可以用于控制太赫兹源的辐射^[19]、激光增强^[20-22]、模式转换^[23-25]、改进天线和传感器性能^[26-27]等许多方面。然而,目前文献报道的研究工作都集中在低频段单层褶皱金属结构与SPPs的相似性及其应用方面,它们在高频段电磁特性的差异及双层褶皱间的耦合与波导传输特性尚未见报道。本文研究了褶皱金属结构平板波导(CMPPW)的传输模、表面模以及阻带特性,并与等离子体辅助平板波导(PPPW)进行了比较,分析了两者的相似之处及各自的特征;研究了褶皱结构几何参数对传输特性的影响,并通过调整褶皱结构的深度设计深度渐变的对称CMPPW波导实现了传输模与表面模的相互转换;分析了对称CMPPW波导内部由于场分布和能量局域在褶皱表面而产生的斗篷效应,并探讨了波导的传感应用。

2 波导模型及传输特性

2.1 波导模型

图1为两种波导模型,其结构在 y 和 z 方向上无限延伸,中间浅蓝色区域0是厚度为 g 的空气层。图1(a)是PPPW波导模型,图中 $x = -g/2 - d$ 和 $x = g/2 + d$ 的边界为完美导体(PEC)边界;黄色区域1、2是厚度为 d 的等离子体材料(PM),其等效介电常数为 $\epsilon(\omega) = \epsilon_\infty - \frac{\omega_p^2}{(\omega^2 + i\omega\Gamma)}$,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。图1(b)是CMPPW波导模型,图中PEC平板波导内侧为褶皱金属结构, a 为凹槽宽度, d 为周期, h 为深度,凹槽内填充空气。

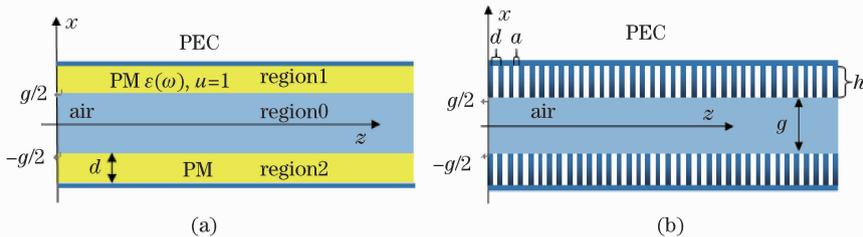


图1 波导模型。(a) PPPW;(b) CMPPW

Fig. 1 Waveguide model. (a) PPPW; (b) CMPPW

2.2 波导的传输特性

色散关系描述了波导的传输特性,PPPW波导结构的色散关系为^[28]:当 $\beta < k_0$ 时, $\tan(\beta_a g/2)/\tanh(\beta_b d) = \beta_b/[\epsilon(\omega)\beta_a]$, $\cot(\beta_a g/2)/\tanh(\beta_b d) = -\beta_b/[\epsilon(\omega)\beta_a]$;当 $\beta > k_0$ 时, $\tanh(\beta_a g/2)/\tanh(\beta_b d) = -\beta_b/[\epsilon(\omega)\beta_a]$, $\coth(\beta_a g/2)/\tanh(\beta_b d) = -\beta_b/[\epsilon(\omega)\beta_a]$ 。CMPPW波导的色散关系为^[23]: $\beta \coth(g\beta_c/2)/k_0 = a \tan(k_0 h)/d$,

$\beta_i \tanh(g\beta_c/2)/k_0 = \text{atan}(k_0 h)/d$, 式中, $\beta_a = \sqrt{k_0^2 - \beta^2}$, $\beta_b = \sqrt{\beta^2 - \epsilon(\omega)k_0^2}$, $\beta_c = \sqrt{\beta^2 - k_0^2}$, k_0 为真空中的波矢。在空气层厚度 $g = 50 \mu\text{m}$ 的条件下, 根据两种波导结构的色散方程画出了如图 2 所示色散曲线。图 2(a) 是 PPPW 波导的色散曲线, 计算时取 PM 宽度 $d = 0.1g$, 等离子体频率 $f_p = 3\text{THz}$, 表面等离子体频率^[28] 为 $f_{sp} = f_p/\sqrt{2} = 2.12 \text{THz}$ 。图 2(c) 为 CMPPW 波导结构的色散曲线, 计算时取 $h = 25 \mu\text{m}$, $d = 10 \mu\text{m}$, $a = 5 \mu\text{m}$ 和 $g = 50 \mu\text{m}$, 在此几何参数下褶皱金属结构的凹槽基模谐振频率为 $f_1 = 3\text{THz}$, 其等效等离子体频率为 $f_p = 3\text{THz}$ 。图 2(b) 和 (d) 分别为两种波导色散曲线在 $0 \sim 4\text{THz}$ 频段的放大, 浅蓝色区域表示阻带。图 2(a) 中斜直线表示色散关系为 $\beta = \omega/c$ 的横电磁模(TEM), 而在 CMPPW 波导中满足此色散关系的模式并不存在, 为了便于观察和分析在图 2(c) 以及下文中引入该直线。比较图 2(a) 和 (c) 可得, 图中红色虚线所示两种波导色散关系的频率范围和变化趋势完全一致, 并且均位于斜直线上方的传输区, 这说明两种波导中均存在相同的传输模式。将这些传输模式与色散关系为 $\beta^2 = k_0^2 - (m^2 \pi^2)/g^2$ (m 为模式数) 的平板波导^[23] 的传输模式进行了比较, 结果表明这些模式与平板波导的传输模式一致。由此可见, 图 2(a) 和 (c) 中蓝色实线分别为平行金属板传输模式与 PM 层和褶皱金属结构谐振模相互耦合产生的新模式。值得注意的是, CMPPW 波导中蓝色曲线穿过了参考直线, 这表明在该结构中阻带上方出现了慢波分支。另外, 由图 2 可得, PPPW 和 CMPPW 波导的阻带下方均存在对称模(SM)和反对称模(AM); 对比图 2(b) 和 (d) 可得, 它们的不同之处在于, PPPW 波导中对称模的群速 ($v_g = d\omega/d\beta$) 经历了由正到负的变化, 反对称模群速存在负值, 而 CMPPW 波导中当频率趋近于阻带下边界时, 群速趋于零。

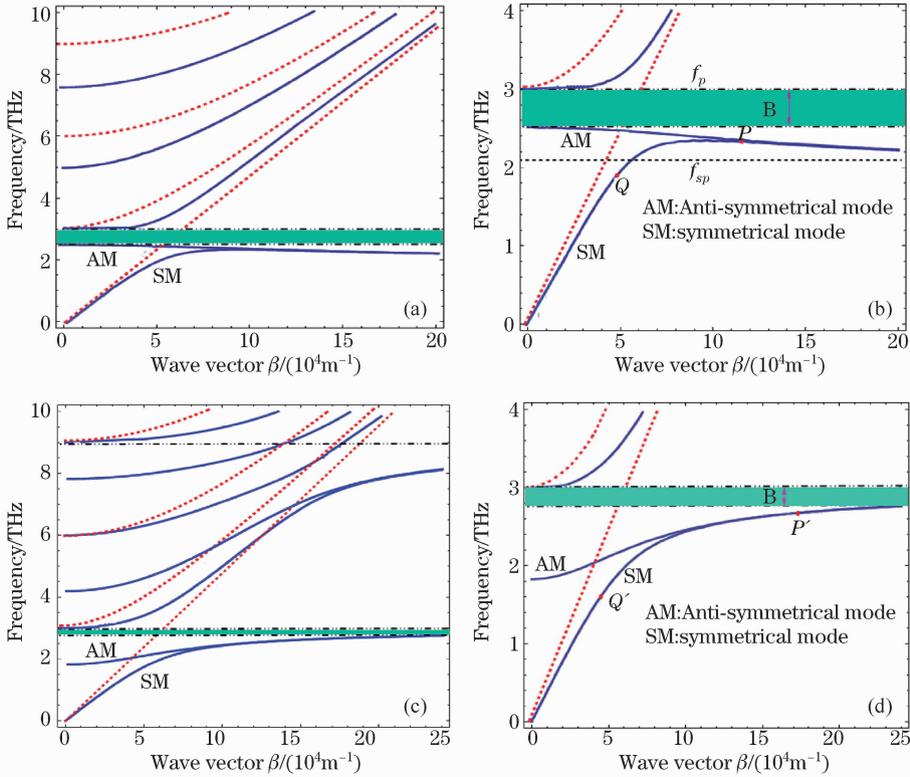


图 2 PPPW 波导和 CMPPW 波导的色散特性比较。(a) PPPW 波导的色散关系;(b) PPPW 波导在 $0 \sim 4\text{THz}$ 频段色散关系;(c) CMPPW 波导的色散关系;(d) CMPPW 波导在 $0 \sim 4\text{THz}$ 频段色散关系

Fig. 2 Comparison of the dispersion characteristics of PPPW and CMPPW. (a) Dispersion relationship of PPPW; (b) dispersion relationship of PPPW at the frequencies of $0 \sim 4\text{THz}$; (c) dispersion relationship of CMPPW; (d) dispersion relationship of CMPPW at the frequencies of $0 \sim 4\text{THz}$;

2.3 CMPPW 波导传输机理

为了研究 CMPPW 波导的传输机制, 分析了波导对称模和反对称模的特性, 和占空比 a/d 、两板间距 g 以及凹槽深度 h 对传输特性的影响, 并与 PPPW 波导进行比较。仿真时, 在图 1(b) 所示模型左右两侧设置激励和接收端口, 采用 CST 频域求解器扫频计算并提取 S 参数; 采用有限元软件 COMSOL 建立二维模型,

在特定频点提取相应的电场、磁场或能流密度分布。

2.3.1 对称模和反对称模的特性

当 $d = 0.1g$, $f_p = 3\text{THz}$ 时,图 3(a)和 3(b)分别给出了两种波导的反对称模和对称模的磁场及电场分布。对于 PPPW 波导,反对称模出现在频点 $f = 2.322\text{THz}$ 附近,对应于图 2(b)所示色散曲线上的 P 点;对称模出现在 $f = 1.9\text{THz}$ 附近,对应于色散曲线上的 Q 点。可以看出 PPPW 波导反对称模的 H_y 和 E_x 分量均具有反对称性,为表面波,它是由等离子体内正向波和反向波叠加形成的,属于驻波,无能量传输;而对称模是一种传输波,磁场渗透到了等离子体内,并且其最大值在等离子体与空气的分界面上。在几何参数 $h = 25\ \mu\text{m}$ 、 $a = 5\ \mu\text{m}$ 、 $d = 10\ \mu\text{m}$ 和 $g = 50\ \mu\text{m}$ 的条件下,仿真了 CMPPW 波导对称模和反对称模的场分布,其反对称模出现在频点 $f = 2.681\text{THz}$ 附近,对应于图 2(d)所示色散曲线上的 P' 点;对称模出现在 $f = 1.9\text{THz}$ 附近,对应于色散曲线上的 Q' 点。由图 3 可见, H_y 分量体现了场分布的反对称性,而表面波的局域性体现在 E_x 分量上,这表明在一定条件下褶皱金属结构电磁特性可等效为等离子体,进一步证实了 Pendry 等^[15]的工作;对称模的 H_y 和 E_x 分量与 PPPW 波导类似,均属于传输波。

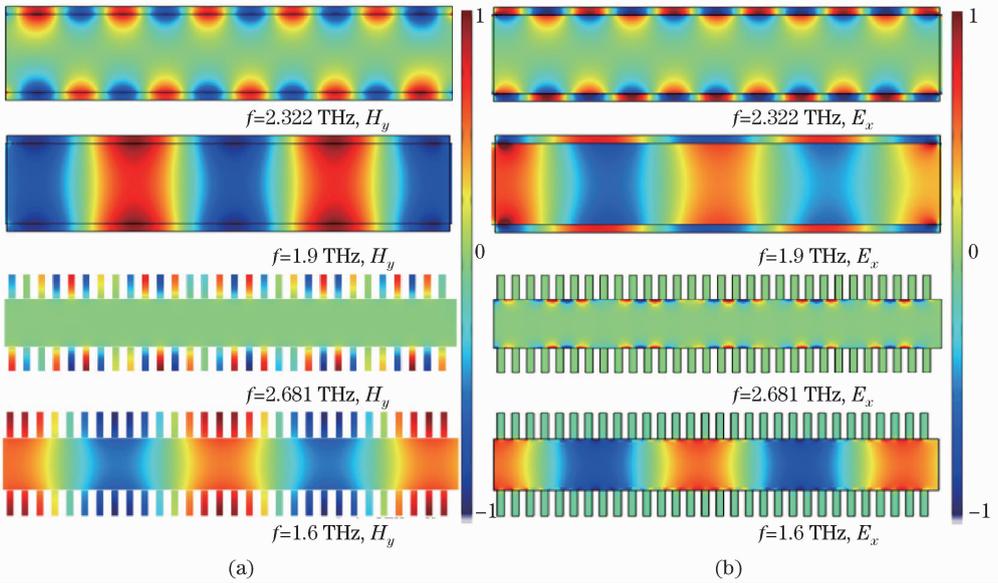


图 3 PPPW 和 CMPPW 波导的磁场和电场分布。(a) 磁场分布;(b) 电场分布

Fig. 3 Distribution of electric field and magnetic field of PPPW and CMPPW. (a) Distribution of magnetic field; (b) distribution of electric field

2.3.2 占空比对 CMPPW 波导传输特性的影响

分别基于色散方程和数值仿真了 $g = h = 50\ \mu\text{m}$ 时,占空比 a/d 对 CMPPW 波导色散关系和传输特性的影响,如图 4 所示。可得, $\frac{a}{d}$ 越小则阻带越小,仿真结果[图 4(b)]与理论计算[图 4(a)]一致。由图 4(a)可得,在阻带上方, $\frac{a}{d}$ 越小则色散关系曲线斜率越大,并逐渐趋近于图中斜直线所示参考色散关系 $\beta = \omega/c$; $\frac{a}{d} \rightarrow 0$ 时,CMPPW 波导会退化为平板波导。图 4(b)表明,改变占空比并不影响传输系数曲线下边带的截止频率,在仿真采用的三个占空比参数下,下边带截止频率基本重合。

2.3.3 间距对 CMPPW 波导传输特性的影响

在几何参数 $h = 50\ \mu\text{m}$, $a = 5\ \mu\text{m}$ 和 $d = 10\ \mu\text{m}$ 的条件下,比较了 $g = 50\ \mu\text{m}$ 和 $g = 10\ \mu\text{m}$ 时 CMPPW 波导的色散特性曲线,如图 5(a)和(b)所示。可以看出, g 越大, 1.5THz 附近阻带宽度越小,在相同的频率范围内高次模增多。为了解释上述电磁耦合现象,根据平板波导的色散方程,分别画出了 $g = 50\ \mu\text{m}$ 和 $g = 10\ \mu\text{m}$ 时的色散曲线,如图 5(c)和(d)所示,图中从下到上分别对应于模式数 $m = 0, 1, 2$ 和 3。可以看出, g 增大则传输频率减小,并且模式间的频率间隔满足关系 $f_g = 150/g$, 其中 f_g 单位为 THz , g 单位为 μm ; 当

g 为 $50\ \mu\text{m}$ 和 $10\ \mu\text{m}$ 时, 相应的模式频率间隔 f_g 分别等于 3THz 和 15THz 。由此可见, g 增大时平板波导传输模式的频率和频率间隔同时减小, 导致了在 CMPPW 波导中平板波导传输模式与褶皱金属结构谐振模耦合在较低频段。

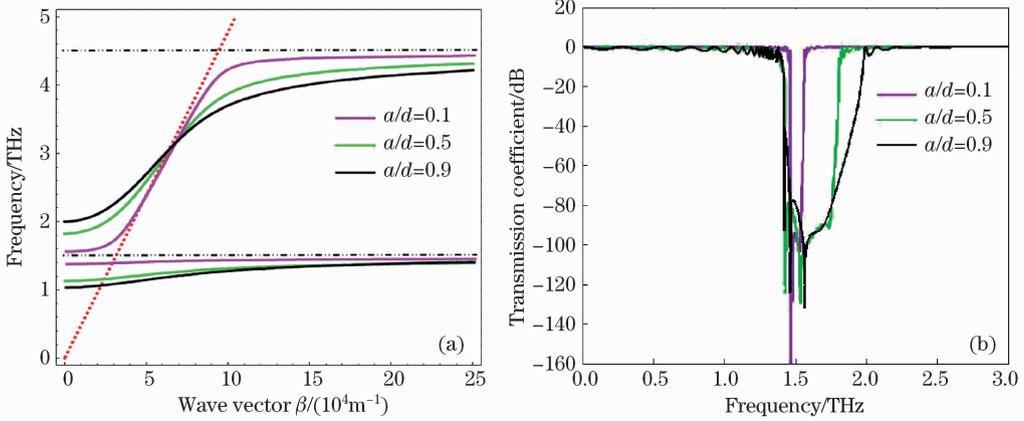


图 4 不同占空比(a/d)下 CMPPW 波导的色散曲线和相应传输系数。(a)色散曲线;(b)传输系数

Fig. 4 Dispersion relationship curves of CMPPW with different values of a/d and corresponding transmission coefficient. (a) Dispersion relationship curves; (b) transmission coefficient

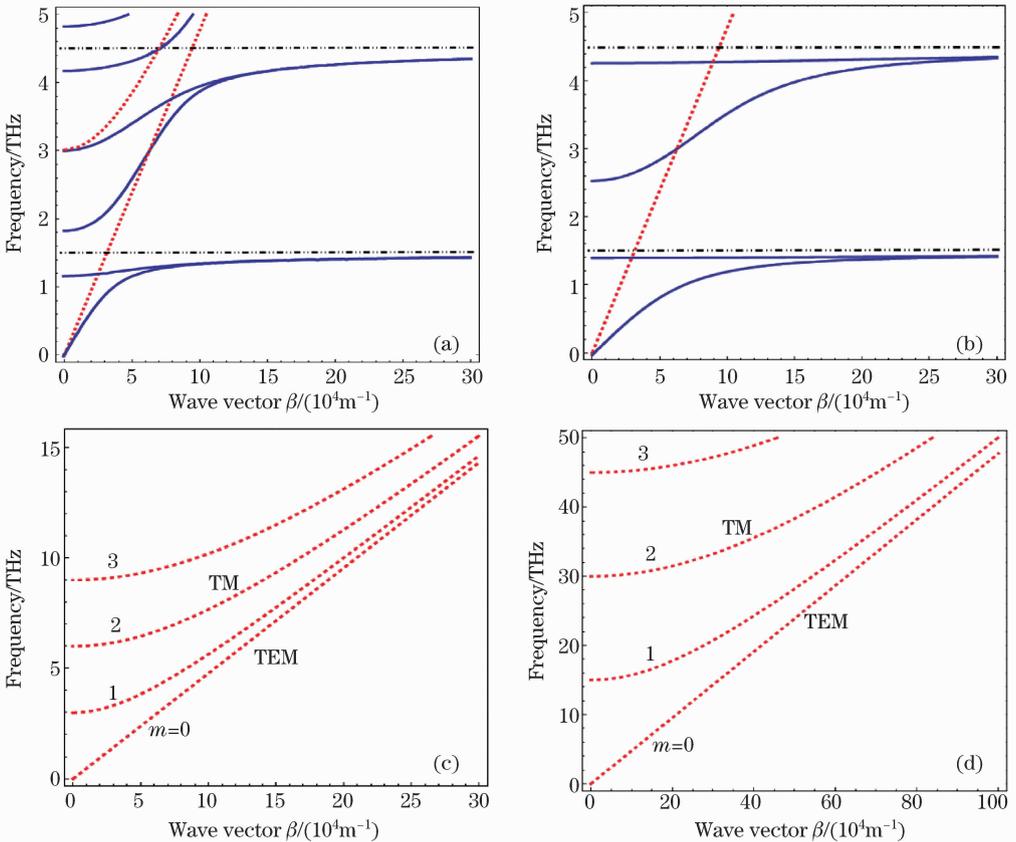


图 5 CMPPW 波导和平板波导色散特性比较。(a)CMPPW 波导, $g = 50\ \mu\text{m}$; (b) CMPPW 波导, $g = 10\ \mu\text{m}$; (c)平板波导, $g = 50\ \mu\text{m}$; (d) 平板波导, $g = 10\ \mu\text{m}$

Fig. 5 Comparison of the dispersion characteristics of CMPPW and parallel plate waveguide. (a) CMPPW, $g = 50\ \mu\text{m}$; (b) CMPPW, $g = 10\ \mu\text{m}$; (c) parallel plate waveguide, $g = 50\ \mu\text{m}$; (d) parallel plate waveguide, $g = 10\ \mu\text{m}$

2.3.4 凹槽深度对 CMPPW 波导传输特性的影响

CMPPW 波导的凹槽可以看做是一个沿着垂直方向上放置的深度为 h 的矩形谐振腔, 其谐振频率 f_m 满足的关系为 $f_m = mc/4h$, m 为奇数, c 代表真空中的光速。显然, h 改变将引起谐振频率的改变, 进一步导

致 CMPPW 波导内各种模式的耦合发生变化,因而改变了其传输特性。为了研究凹槽深度 h 对传输特性的影响,在 $g = 10 \mu\text{m}$ 、 $a = 5 \mu\text{m}$ 和 $d = 10 \mu\text{m}$ 的条件下,给出了 $h = 60 \mu\text{m}$ 和 $h = 30 \mu\text{m}$ 时 CMPPW 波导的色散特性曲线,如图 6 所示。图中虚线代表凹槽基模谐振频率 f_1 和三次谐振模频率 f_3 。可以看出,凹槽谐振频率增大时,基模谐振频率下方的对称模和反对称模的工作频段会增大,且模式曲线斜率会减小。为进一步研究 h 变化带来的影响,比较了 h 取不同值时基模和三次谐振模频率之间的模式曲线,如图 7(c) 所示。当 h 增大时,图中 2.1~3.05THz 频段的相位常数会随之增大,群速随之减小,传输模转变为表面模。

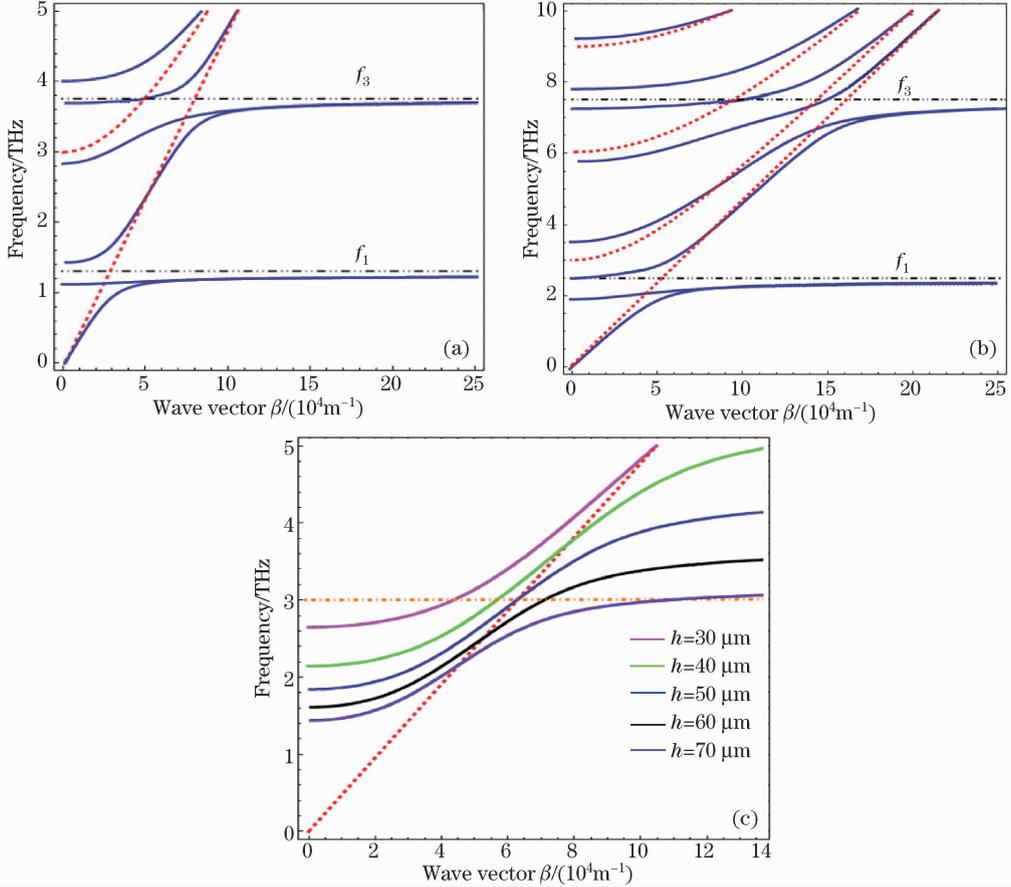


图 6 凹槽深度变化对 CMPPW 波导的色散特性的影响。(a) $h = 60 \mu\text{m}$;
(b) $h = 30 \mu\text{m}$;(c)凹槽深度的渐变对传输模式的影响

Fig. 6 Effect of changes in the depth of the grooves on the dispersion characteristics of CMPPW. (a) $h = 60 \mu\text{m}$;
(b) $h = 30 \mu\text{m}$; (c) effect of changes in the depth of the grooves on the transmission mode

3 CMPPW 波导结构的应用探讨

3.1 模式的转换和斗篷效应

由上述分析可知,通过改变 CMPPW 波导的几何参数可以改变其传输特性,基于此,设计了图 7 凹槽深度渐变的对称 CMPPW 波导。该波导的间距 $g = 50 \mu\text{m}$,凹槽宽度 $a = 5 \mu\text{m}$,褶皱周期 $d = 10 \mu\text{m}$ 。区域 1 和 5 是长度相等的均匀 CMPPW 波导,凹槽深度 $h = 30 \mu\text{m}$;区域 3 也是均匀的 CMPPW 波导, $h = 60 \mu\text{m}$;区域 2 和 4 是凹槽深度渐变的 CMPPW 波导,长度相同。区域 2 的凹槽深度 h 由 $30 \mu\text{m}$ 渐变至 $60 \mu\text{m}$,区域 4 与之相反。根据图 6(c) 色散曲线,设置波导的中心频率为 3THz,这是因为在该频率下, $30 \mu\text{m} \leq h < 50 \mu\text{m}$ 时波导工作在传输模式; $50 \mu\text{m} < h \leq 60 \mu\text{m}$ 波导工作在表面波模式。值得注意的是, $h = 50 \mu\text{m}$ 时传输模式曲线与电磁波在真空中传输模式曲线 $\beta = k_0$ 相交,波导工作在 TEM 模。在传输模式下相位常数 $\beta < k_0$,电磁场能量大部分集中于波导的中间部分;在表面波模式下,相位常数 $\beta > k_0$,电磁场能量大部分被束缚在波导内表面。渐变结构波导实现了相位常数的变换,从而可实现传输模式向表面波模式转换,波导内

的能流密度分布如图 8 所示。由图 8 可见,在区域 1 和 5,能流大部分集中于波导中央;在区域 3 能流分布于波导的表面;在渐变区域 2 能流从波导中央转移到表面,渐变区域 4 能流从波导表面转移到中央。

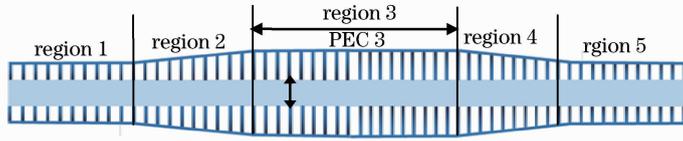


图 7 凹槽深度渐变的对称 CMPPW 波导结构示意图

Fig. 7 Schematic diagram of symmetrical CMPPW with gradually changed depth of corrugations

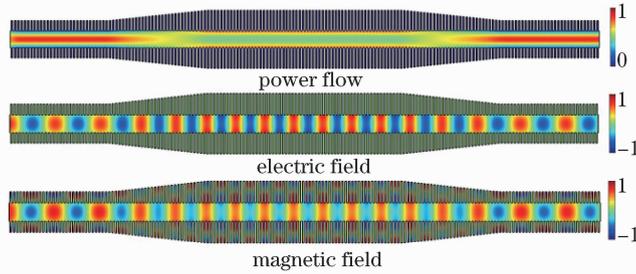


图 8 对称 CMPPW 波导的能流密度、电场和磁场分布

Fig. 8 Power flow density and distribution of electric field and magnetic field of symmetrical CMPPW

由上述分析可得,对称 CMPPW 波导中褶皱结构凹槽深度的渐变实现了传输模和表面模之间的相互转换。由于在波导中间区域场分布和能量主要集中在褶皱表面,因此推测在这一区域放入 PEC 圆柱不会对波导内的场分布和传输特性产生影响。为了证明这一推论,仿真了放入 PEC 圆柱后的电磁场分布和能流密度,如图 9 所示,图中插图为 PEC 圆柱放置区域能流密度和场分布的局部放大。比较图 9 和图 8 可见,在 PEC 圆柱放置区域场分布和能流产生了扰动,随后又恢复原来的传播状态,这一物理现象类似于 Pendry 等^[29]发现的斗篷效应。为了进一步证实上述现象,提取了波导的 S 参数,结果表明 PEC 圆柱放置前后,对称 CMPPW 波导的传输系数和反射系数一致,如图 10 所示。

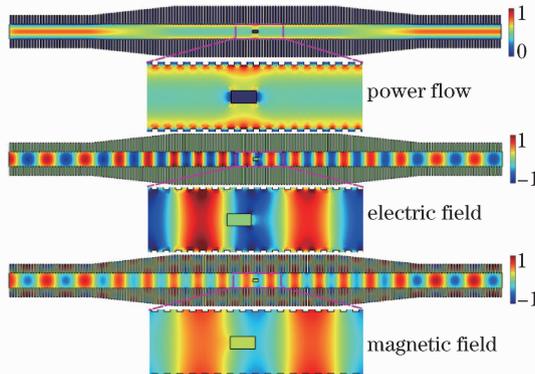


图 9 放入 PEC 圆柱后对称 CMPPW 波导的能流密度、电场和磁场分布

Fig. 9 Power flow density and distribution of electric field and magnetic field of symmetrical CMPPW after a cylindrical PEC put into

3.2 传感应用

由于褶皱金属结构不仅起到了模式转换的作用,而且达到了集中电磁场的效果,因此该区域将会对环境媒质的变化非常敏感。为了研究 CMPPW 波导的传感特性,通过改变图 7 对称 CMPPW 波导凹槽内填充的材料,获得了不同材料介电常数与波导传输特性的关系,如图 11(a)所示。由图可以看出材料介电常数增大时,传输特性发生明显红移。图 11(b)给出了传输特性曲线中第一个阻带上边带截止频率与材料相对介电常数的关系,可以看出相对介电常数每增大 0.1,阻带上边带截止频率平均减小 0.09THz,灵敏度为 90um/RIU,且阻带上边带截止频率随放入褶皱内样品的介电常数呈线性变化。为了进一步探究其传感应用,在凹

槽内分别填充空气、柴油、液态石蜡、橄榄油和甘油,得到阻带上边带截止频率与样品介电常数的关系,如表 1 所示。表中相对频偏表示各种物质所对应的第一个阻带上边带截止频率与空气比较的偏移量。可以看出,该结构能明显区分不同液体。值得注意的是柴油和液态石蜡相对介电常数相差 0.0584,而它们的相对频偏相差 0.035THz,偏移量比较大,因此该传感结构具有较高的灵敏度。

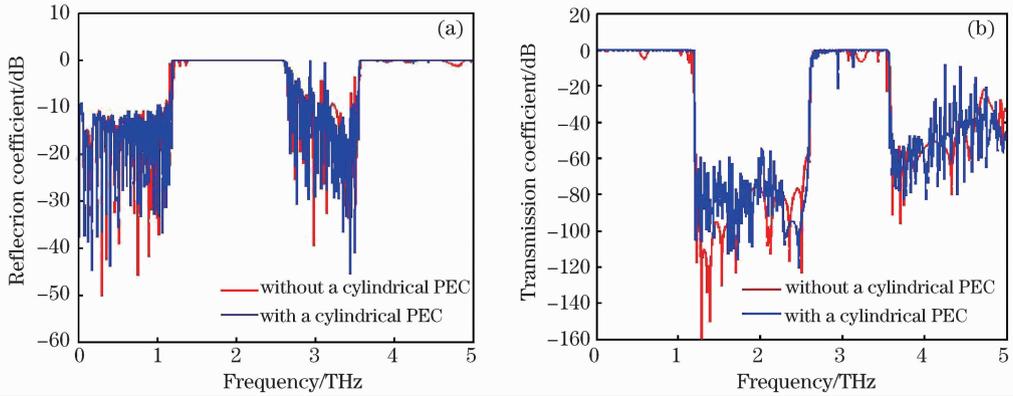


图 10 PEC 圆柱放置前后对称 CMPPW 波导的传输特性比较。(a)反射系数;(b)传输系数

Fig. 10 Comparison of transmission characteristics of symmetrical CMPPW before and after a cylindrical PEC put into. (a) Reflection coefficient;(b) transmission coefficient

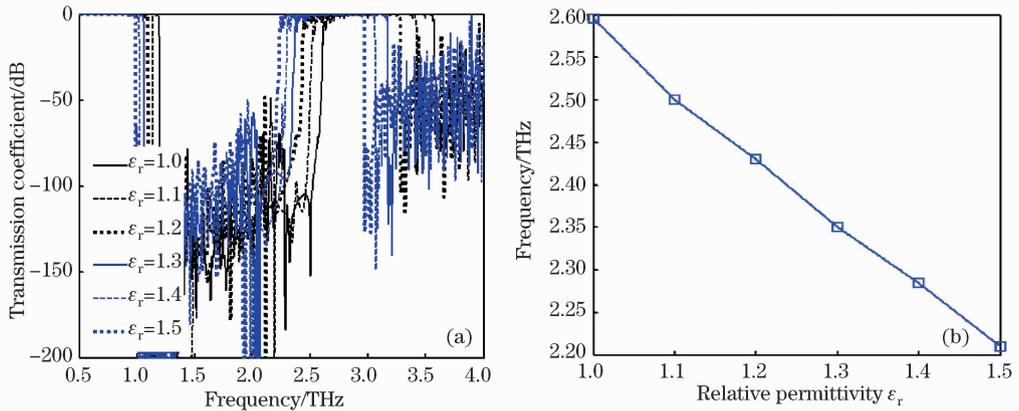


图 11 CMPPW 波导的传感特性。(a)材料相对介电常数与传输特性的关系;(b)阻带上边带截止频率与相对介电常数的关系

Fig. 11 Sensing characteristics of CMPPW. (a) Relationship between transmission characteristics and relative permittivity of materials; (b) relationship between the cutoff frequency of the upper sideband and relative permittivity

表 1 传感特性比较

Table 1 Comparison of sensing characteristics

| | Air | Diesel | Liquid paraffin | Olive oil | Glycerinum |
|-------------------------------------|-----|--------|-----------------|-----------|------------|
| Refraction | 1 | 1.45 | 1.47 | 1.51 | 1.85 |
| Relative dielectric constant | 1 | 2.1025 | 2.1609 | 2.2801 | 3.4225 |
| First stopband cutoff frequency/THz | 2.6 | 1.935 | 1.9 | 1.86 | 1.53 |
| Relative frequency deviation/THz | 0 | 0.665 | 0.7 | 0.74 | 1.07 |

4 结 论

基于 CMPPW 波导的色散方程研究了其传输特性,并与 PPPW 波导进行了比较。研究表明,两种波导均存在阻带、传输模和表面模。不同之处主要在于 CMPPW 波导阻带上方传输模存在快波和慢波分支,并且随相位常数增大其阻带下方表面模的群速趋于零;而对于 PPPW 波导,其阻带上方仅存在快波分支,阻带

下方表面模的群速经历了由正到负的变化;通过改变褶皱结构深度实现了传输模与表面模的相互转换,并设计了深度渐变的对称 CMPPW 波导结构,证明对称 CMPPW 波导不仅具有斗篷效应,而且由于褶皱金属结构在实现模式转换的同时也达到了集中电磁场的效果,因此在介质传感中具有潜在应用。

参 考 文 献

- 1 Z Jacob, V M. ShalaeV. Plasmonisc goes quantum[J]. Science, 2011,334(6055):463—464.
- 2 A V. Zayats, I I. Smolyaninov, A A. Maradudin. Nano-optics of surface plasmon polaritons[J]. Physics Reports,2005,408(3): 131—314.
- 3 W L. Barnes, A Dereux, T W. Ebbesen. Surface plasmon subwavelength optics[J]. Nature,2003,424(6950): 824—830.
- 4 J Wang, C Hu, J Zhang. Multifunctional and multi-output plasmonic meta-elements for integrated optical circuits[J]. Opt Express,2014,22(19): 22753—22762.
- 5 J Yang, M Huang, T Li, *et al.*. Manipulating the field distribution of a polygonal SPP resonator based on AZIM[J]. Journal of Physics D: Applied Physics,2014,47(8): 085106.
- 6 K M. Mayer, J H. Hafner. Localized surface plasmon resonance sensors [J]. American Chemical Society,2011,111(12):3828—3857.
- 7 W Zhao, J Xu, H Chen. Photoelectrochemical DNA biosensors[J]. Chemical Review,2014,114(15): 7421—7441.
- 8 E C. Dreaden, A M. Alkilany, Huang X, *et al.*. The golden age; gold nanoparticles for biomedicine[J]. Royal Society of Chemistry,2012,41(7): 2740—2779.
- 9 X Cheng, B Y H Hau, N Li, *et al.*. Fabrication of a DNA sensor based on simultaneous electrochemical impedance spectroscopy and localized surface plasmon resonance[C]. The Electrochemical Society,2013(16): 717.
- 10 Wang Gejia, Zhang Chonglei, Wang Rong, *et al.*. Extracting phase information of surface plasmon resonance imaging system [J]. Acta Optica Sinica, 2013; 33(5): 0524001.
王戈嘉,张崇磊,王 蓉,等. 表面等离子体共振成像系统相位提取[J]. 光学学报,2013,33(5): 0524001.
- 11 Feng Lihang, Zeng Jie, Liang Dakai, *et al.*. Development of fiber-optic surface plasmon resonance sensor based on tapered structure probe [J]. Acta Physica Sinica, 2013,62(12): 124207.
冯李航,曾 捷,梁大开,等. 楔形结构光纤表面等离子体共振传感器研究物理学报[J]. 物理学报,2013,62(12): 124207.
- 12 W Kiefer. Surface Enhanced Raman Spectroscopy: Analytical, Biophysical and Life Science Applications[M]. Weinheim: Wiley-Vch Press, 2013: 17—25.
- 13 Liu Yu, Xu Shuping, Tang Bing, *et al.*. Study on the relationship of surface plasmon and resonance surface-enhanced raman scattering[J]. Acta Optica Sinica, 2010, 30(1): 29—33.
刘 钰,徐抒平,唐 彬,等. 表面等离子体共振与表面增强拉曼散射相关性研究[J]. 光学学报, 2010, 30(1): 29—33.
- 14 K Thyagarajan, J Butet, O J F Martin. Augmenting second harmonic generation using fano resonances in plasmonic systems[J]. Nano Lett, 2013,13(4): 1847—1851.
- 15 J B Pendry, L Martín-Moreno, F J Garcia-Vidal. Mimicking surface plasmons with structured surfaces[J]. Science,2004,305(5685): 847—848.
- 16 F J Garcia-Vidal, L Martín-Moreno, J B Pendry. Surfaces with holes in them: New plasmonic metamaterials[J]. J. Opt. A: Pure Appl Opt, 2005,7(2):97—101.
- 17 J Wu, D Hou, K Liu, *et al.*. Differential microstrip lines with reduced crosstalk and common mode effect based on spoof surface plasmon polaritons[J]. Opt Express,2014,22(22): 26777—26787.
- 18 J Wu, D Hou, K Liu, *et al.*. Differential transmission lines with surface plasmon polaritons at low frequencies[J]. Electronics Letters, 2014,50(5): 379—381.
- 19 J Liu, R Mendis, D M Mittleman. Designer reflectors using spoof surface plasmons in the terahertz range[J]. Physical Review B,2012,86(24): 241405.
- 20 N Yu, Q Wang, M A Kats, *et al.*. Designer spoof surface plasmon structures collimate terahertz laser beams[J]. Nature Materials,2010,9(9): 730—735.
- 21 R K Li, H To, G Andonian, *et al.*. Surface-plasmon resonance-enhanced multiphoton emission of high-brightness electron beams from a nanostructured copper cathode[J]. Phys Rev Lett,2013,110(7): 074801.
- 22 Chen Yongyi, Tong Cunzhu, Qin Li, *et al.*. Progress in surface plasmon polariton nano-laser technologies and applications[J]. Chinese Optics, 2012, 5(5): 453—463.
陈泳屹,佟存柱,秦 莉,等. 表面等离子体激元纳米激光器技术及应用研究进展[J]. 中国光学, 2012, 5(5): 453-463.
- 23 M A Kats, D Woolf, R Blanchard, *et al.*. Spoof plasmon analogue of metal-insulator-metal waveguides[J]. Opt Express, 2011,19(16): 14860—14870.
- 24 Z Liao, J Zhao, B Pan, *et al.*. Broadband transition between microstrip line and conformal surface plasmon waveguide[J]. Journal of Physics D: Applied Physics,2014,47(31): 315103.
- 25 Z Fu, Q Gan, Y J Ding, *et al.*. From waveguiding to spatial localization of THz waves within a plasmonic metallic grating[J]. IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, 2008,14(2): 486—490.
- 26 X Bai, S Qu, H Yi. Applications of spoof planar plasmonic waveguide to frequency-scanning circularly polarized patch array[J]. Journal of Physics D: Applied Physics,2014,47(32): 325101.
- 27 J J Yang, M Huang, X Z Dai, *et al.*. A spoof surface WGM sensor based on a textured PEC cylinder[J]. Europhysics Letters,2013,103(4): 44001.
- 28 Y Xu, Q Wu, H Chen. Manipulating transverse magnetic modes in waveguide using thin plasmonic materials[J]. Laser Photonics Rev. , 2014,8(4): 562—568.
- 29 J B Pendry, D Schurig, D R Smith. Controlling electromagnetic fields[J]. Science,2006,312(5781): 1780—1782