

表面等离子波导及应用

王五松^{1,2}, 张利伟³, 张冶文^{4*}

- (1. 中国振华集团云科电子有限公司, 贵州 贵阳 550018;
2. 贵州航天计量测试技术研究所 贵州省功率元器件可靠性重点实验室, 贵州 贵阳 550009;
3. 河南理工大学 物理化学学院, 河南 焦作 454000;
4. 同济大学 电子与信息工程学院, 上海 201804)

摘要: 本文在介绍表面等离子波导基本理论的基础上, 主要对表面等离子波导的若干应用进行综述, 包括基于表面等离子波导实现的光学和微波频段的慢波效应、类电磁感应透明现象、可调滤波器, 以及通过对电磁波绕射而实现的隐身效应等。最后指出该领域存在的问题与挑战, 并对今后的发展趋势进行了展望。分析认为, 通过引入增益介质、采用超导材料等方法降低表面等离子波导材料的损耗、减少工艺制作的难度是今后亟待解决的问题。

关键词: 表面等离子波导; 特异材料; 慢波效应

中图分类号: TNO11.4; TB383 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/CO.20150803.0329

Surface plasmon waveguide and its applications

WANG Wu-song^{1,2}, ZHANG Li-wei³, ZHANG Ye-wen^{4*}

- (1. Yunke Electronics Co., LTD. of China Zhenhua Group, Guiyang 550018, China;
 2. Key Laboratory of Power Components Reliability in Guizhou Province, Guizhou Aerospace Institute of Measuring and Testing Technology, Guiyang 550009, China;
 3. School of Physics and Chemistry, Henan Polytechnic University, Jiaozuo 454000, China;
 4. School of Electronics and Information Engineering, Tongji university, Shanghai 201804, China)
- * Corresponding author, E-mail: yewen.zhang@tongji.edu.cn

Abstract: On the basis of Surface Plasmon Polariton (SPP) waveguide dispersion relation being derived systematically, the applications of SPP waveguide are summarized in this paper. The slow wave effect in SPP waveguide, the EIT (electromagnetically induced transparency)-like phenomenon, the tunable SPP waveguide filter at optical and microwave frequencies, the SPP waves cloaking through diffraction are mainly introduced. Problems and challenges in this field are pointed out finally, and the future developing trend is prospected. Analysis indicates that reducing the loss of the surface plasmon waveguide materials and the difficulty of the production process by introducing gain mediums and superconducting materials are the problem to be solved

收稿日期: 2014-10-11; 修订日期: 2015-12-13

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (No. 10904032); 贵州省科学技术基金资助项目 (No. J[2014]2076); 贵州省科技计划资助项目 (No. Z[2014]4001); 河南理工大学基金资助项目 (No. J2013-09, No. T2015-3)

urgently in the future.

Key words: surface plasmon waveguide; metamaterials; slow wave effect

1 引言

表面等离子激元 (Surface Plasma Polaritons, SPPs) 是指沿两种介质的分界面传播的电磁波, 并且在偏离分界面时, 其振幅随距离增加按指数衰减^[1-2]。它只存在于介电常数 (对 TM 波) 或磁导率 (对 TE 波) 符号相反的两种介质的界面上, 早在 1957 年 Ritchie 就预言了 SPPs 的存在^[3]。SPPs 是一种具有慢传播特性的电磁波, 可以实现亚波长分辨, 该特性在实现亚波长尺度的光学器件设计方面将具有广阔的应用前景^[4-8]。SPPs 的激发可以采用棱镜耦合或者金属栅格, 使光子与 SPPs 波矢匹配, 典型的激发方式有 Kretschman 模型和光栅激发模型。在这两种情况下, 表面波均沿着金属/介质界面传播^[9-10]。

特异材料 (metamaterials) 具有类金属的光学性质, 它的介电常数 (磁导率) 在一定的频段可以为负, 因此特异材料结构能够支持不同频段的 SPPs^[11-12]。一般来说, 表面等离子体的激发需要动量匹配, 常用的方法有衰减全反射法, 然而对于对称结构的特异材料波导所支持的表面等离子体, 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^[13]。特异材料包含双负材料、单负材料以及零折射率材料 (即有效介电常数和/或有效磁导率等于零的材料)^[14-17]。介电常数和磁导率同时为负的材料称为双负材料 (DNG, $\epsilon < 0, \mu < 0$); 单负材料包含电单负材料和磁单负材料两种类型, 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, $\epsilon < 0, \mu > 0$), 介电常数为正而磁导率为负的材料称为磁单负材料 (MNG, $\epsilon > 0, \mu < 0$)。普通介质材料的介电常数和磁导率都为正 (即双正材料 (DPS, $\epsilon > 0, \mu > 0$)), 支持电磁波的传播; ENG 材料和 MNG 材料均不支持电磁波传播, 在这些材料中电磁场为消逝场。金属 (如金、银、铜等) 在等离子频率以下,

即为 ENG 特异材料。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^[18-19]。

SPPs 具有对电磁波在亚波长尺度内的约束和局域特性, 并且有望突破衍射极限实现器件的小型化 (如纳米尺寸), 进而大大提高光子器件的集成度。因此可以通过激发表面等离子体波来有效调控光的位相、方向及快慢。它在许多领域都具有重要的潜在应用价值, 例如构建等离子体波导以实现光信号的延迟、滤波以及隐身等多个方面。本文主要以表面等离子体波导在光信号延迟、滤波以及隐身技术等方面的应用为例, 来介绍该领域的研究进展及其意义。

2 理论基础

2.1 金属/介质结构中的 SPPs

图 1 给出了金属/介质界面上的表面等离子激元 (即 TM 模式)。在金属/介质界面结构中, SPPs 波矢可写为 $k = \frac{\omega}{c} \sqrt{\frac{\epsilon_1 \epsilon_2}{\epsilon_1 + \epsilon_2}}$, 这里 ϵ_1 为金属材料的有效介电常数, ϵ_2 为介质的有效介电常数。可见, SPPs 波矢大于真空中的电磁波波矢。

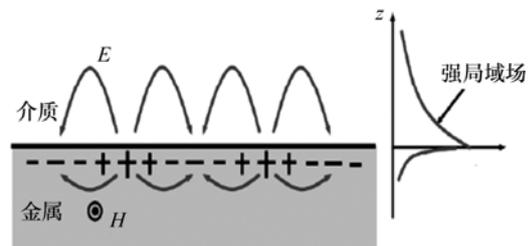


图 1 金属/介质界面上的表面等离子激元

Fig. 1 SPPs on the metal/dielectric interface

这就产生了两种效果: 第一, SPPs 波沿金属表面方向上的波矢分量增大了, 但在垂直于表面方向上的波矢分量却变成了纯虚数。所以 SPPs 波场分布局域在表面附近, 并在垂直于界面的两侧

以消逝场的形式存在。第二, SPPs 波的波长比具有同一频率的光波更短, 所以衍射效应被抑制。

根据特异材料理论, 在等离子频率以下金属可视为电单负特异材料。考虑金属/介质(ENG/DPS)组合结构, 该波导结构由半无限大的 ENG 材料($x < 0$ 区域, 介电常数和磁导率分别为 ε_1 、 μ_1)和半无限大的 DPS 材料($x > 0$ 区域, 介电常数和磁导率分别为 ε_2 、 μ_2)构成。研究表明^[20], 在该波导结构中 TM 极化的表面等离子波被激发。

对于频率为 ω 的时谐电磁波在均匀、各向同性介质中的传播, 可用下面的麦克斯韦方程来描述:

$$\nabla \times E = -\frac{\partial B}{\partial t}, \quad \nabla \times H = \frac{\partial D}{\partial t}, \quad (1)$$

$$B = \mu H, \quad D = \varepsilon E. \quad (2)$$

而对于单频平面电磁波, 则有:

$$E(r, t) = E(r)e^{-i\omega t}, \quad H(r, t) = H(r)e^{-i\omega t}. \quad (3)$$

在 $x < 0$ 区域, 磁场方程可写为:

$$H^{(1)} = e_z A e^{k_1 x} e^{iky}, \quad (4)$$

式中: e_z 为 z 方向(即垂直于 ENG/DPS 平面的方向)的单位矢量。此时的电场方程可为:

$$E^{(1)} = \frac{Ac}{\omega \varepsilon_1} (k e_x + i k_1 e_y) e^{k_2 x} e^{iky}, \quad (5)$$

式中: e_x, e_y 分别为 x (ENG/DPS 平面中垂直于界面的方向), y 方向(ENG/DPS 界面方向)的单位矢量; k 为表面等离子波波矢, k_1 、 k_2 分别为电磁波在 ENG/DPS 界面两侧的衰减波矢。 c 为真空中的光速。

在 $x > 0$ 区域, 磁场方程可写为:

$$H^{(2)} = e_z A' e^{-k_2 x} e^{iky}. \quad (6)$$

因此, 此时的电场方程可写为:

$$E^{(2)} = \frac{A'c}{\omega \varepsilon_2} (k e_x - i k_2 e_y) e^{-k_2 x} e^{iky}. \quad (7)$$

波矢 k_1, k_2, k 之间具有如下关系:

$$\begin{cases} k_1 = (k^2 - \varepsilon_1 \mu_1 \frac{\omega^2}{c^2})^{1/2} \\ k_2 = (k^2 - \varepsilon_2 \mu_2 \frac{\omega^2}{c^2})^{1/2} \end{cases}. \quad (8)$$

根据电磁场边界条件, 在 $x = 0$ 处有:

$$\begin{cases} E^{(1)} = E^{(2)} \\ H^{(1)} = H^{(2)} \end{cases}. \quad (9)$$

解此方程组, 并整理, 可得:

$$\frac{k_1}{\varepsilon_1} = -\frac{k_2}{\varepsilon_2}. \quad (10)$$

结合式(8)、(9)、(10)可得:

$$k = \frac{\omega}{c} \sqrt{\frac{\varepsilon_1 \varepsilon_2 (\varepsilon_2 \mu_1 - \varepsilon_1 \mu_2)}{\varepsilon_2^2 - \varepsilon_1^2}}. \quad (11)$$

对于 ENG 材料和 DPS 材料, 当 $\mu_1 = \mu_2 = 1$ 时, 式(11)可写为:

$$k = \frac{\omega}{c} \sqrt{\frac{\varepsilon_1 \varepsilon_2}{\varepsilon_1 + \varepsilon_2}}. \quad (12)$$

式(12)即为 ENG/DPS 波导结构中 TM 极化表面等离子波的色散关系。

2.2 金属/介质/金属结构中的 SPPs

考虑金属/介质/金属(ENG/DPS/ENG)组合结构, 该波导结构由宽度为 d 的介质($0 < x < d$)夹在两块半无限大的 ENG 材料($x < 0$ 区域和 $x > d$ 区域)包层之间构成。在这种波导结构中, 表面等离子波的色散关系为^[21]:

$$\frac{1 - \exp(k_2 \times d)}{1 + \exp(k_2 \times d)} = \frac{k_1 \times \varepsilon_1}{k_2 \times \varepsilon_2}, \quad (13)$$

$$\frac{1 + \exp(k_2 \times d)}{1 - \exp(k_2 \times d)} = \frac{k_1 \times \varepsilon_1}{k_2 \times \varepsilon_2}. \quad (14)$$

在该 ENG/DPS/ENG 波导中, 由于两个 ENG/DPS 界面上等离子波之间的耦合, 导致原来单一的表面等离子波模式分裂为两个: 对称模式和非对称模式。随着 d 的减小, 这种分裂表现的更强烈, 因为 d 越小两界面之间的耦合越强烈。式(13)对应表面等离子波的对称模式(此时电磁场对称分布), 式(14)对应表面表面等离子非对称模式(此时电磁场为非对称分布)。

2.3 表面等离子波的其他模式

考虑磁单负材料/介质材料(MNG/DPS)的组合结构, 该波导结构由半无限大的 MNG 材料($x < 0$ 区域, 介电常数和磁导率分别为 ε_1 、 μ_1)和半无限大的 DPS 材料($x > 0$ 区域, 介电常数和磁导率分别为 ε_2 、 μ_2)构成。在该波导结构中 TE 极化的表面等离子波色散关系可写为^[20]:

$$k = \frac{\omega}{c\sqrt{\frac{\mu_1\mu_2(\varepsilon_2\mu_1 - \varepsilon_1\mu_2)}{\mu_1^2 - \mu_2^2}}}. \quad (15)$$

另外,对于磁单负材料/介质材料/磁单负材料(MNG/DPS/MNG)波导结构(其中,介质材料位于 $0 < x < d$ 区域,磁单负材料位于 $x < 0$ 区域和 $x > d$ 区域),表面等离子波的色散关系为^[21]:

$$\frac{1 - \exp(k_2 \times d)}{1 + \exp(k_2 \times d)} = \frac{k_1 \times \mu_1}{k_2 \times \mu_2}, \quad (16)$$

$$\frac{1 + \exp(k_2 \times d)}{1 - \exp(k_2 \times d)} = \frac{k_1 \times \mu_1}{k_2 \times \mu_2}. \quad (17)$$

在该 MNG/DPS/MNG 波导中,由于两个 MNG/DPS 界面上等离子波之间的耦合,原来单一的表面等离子激元模式也会分裂为两个:对称模式和非对称模式。并且随着 d 的减小,这种分裂表现的更强烈,因为 d 越小两界面之间的耦合越强烈。式(16)对应表面等离子波的对称模式(此时电磁场对称分布),式(17)对应表面表面等离子非对称模式(此时电磁场为非对称分布)。

3 表面等离子波导及应用

在纳米光子学中,波导是实现光子回路的基础,对光波的传播起导引作用。表面等离子波导作为光子互连元件,能够同时起到实现光信号的延迟(即减慢光传播速度)及光子学衍射极限限制的双重作用。其主要构建形式有两种:第一种是通过金属/介质/金属、正常材料/负折射率材料/正常材料或者磁单负材料/正常材料/磁单负材料等类似的组合结构来实现。在这类波导中,由于两界面之间的 SPPs 波产生耦合,形成了被限制于介质芯层中的 SPPs 波导模式^[22-24]。第二种是通过金属/介质或者磁单负材料/正常材料等类似的组合结构来实现。

3.1 表面等离子波导中的慢光效应

减慢光传播的速度(即实现慢光效应)是表面等离子激元波导的一个重要用途。与其它支持慢光的结构(如谐振腔的直接耦合等)相比,表面等离子激元波导具有在宽频带内对电磁场实现亚波长局域的优势。而且由于表面等离子激元特殊

的色散关系,在色散曲线的截止频率处,表面等离子激元具有明显的慢波特性^[20,25],甚至能使信号停滞,利用这一点通过此类波导可以实现信号储存。

文献[24]基于二维微带传输线构建了磁单

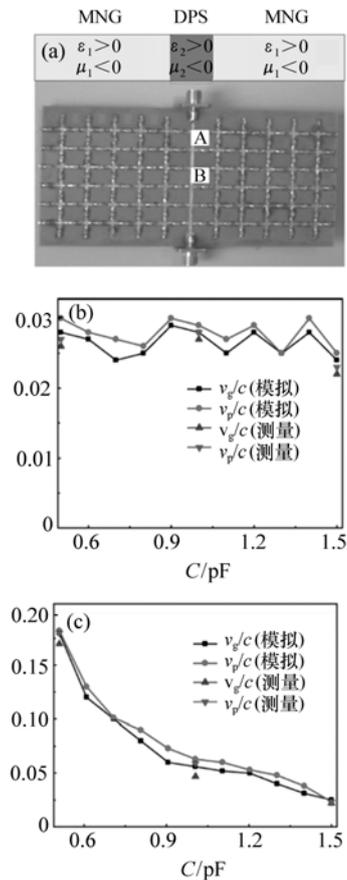


图2 (a) 基于二维微带传输线构建的 MNG/DPS/MNG 表面等离子波导; (b) 改变单元电容(即 MNG 材料的有效磁导率),该波导内的表面等离子在不同的截止频率均为慢波; (c) 在固定频率($f=1.3$ GHz)点,表面等离子波群速度 v_g 和相速度 v_p 随单元电容值(即 MNG 材料的有效磁导率)的变化趋势^[24]

Fig. 2 (a) MNG/DPS/MNG Spps waveguide based on two dimensional microstrip lines; (b) the SPP waves propagate slowly at different cutoff frequency while the unit capacitor (the effective permeability of MNG metamaterials) is changed; (c) the group velocity v_g and phase velocity v_p change with the unit capacitor^[24]

负材料/介质/磁单负材料(MNG/DPS/MNG)波导,结合该结构中表面等离子激元的色散关系对该中慢波特性和微波实验研究,实现了可调的慢波效应:慢波频率可通过电路参数(即有效磁导率)调节,同一频率点的波速度也可通过电路参数(即有效磁导率)调节(图2)。其中 v_g 为表面等离子波的群速度, v_p 为相速度群速度最低可达到真空中光速的 $1/45$ 。图3(a)为具有不同凹槽深度的金属分级光栅结构的表面等离子激元波导,左侧凹槽深度和右侧凹槽深度分别为 $h = 50 \mu\text{m}$ 和 $h = 110 \mu\text{m}$;通过该结构可以在 0.8 THz 的带宽内($0.6 \sim 1.4 \text{ THz}$)实现慢光(图3(b)),这里光的群速度变化范围为 $c/10^7 \sim c/10^2$ (c 为光在真空中的传播速度),且在该波导色散曲线的

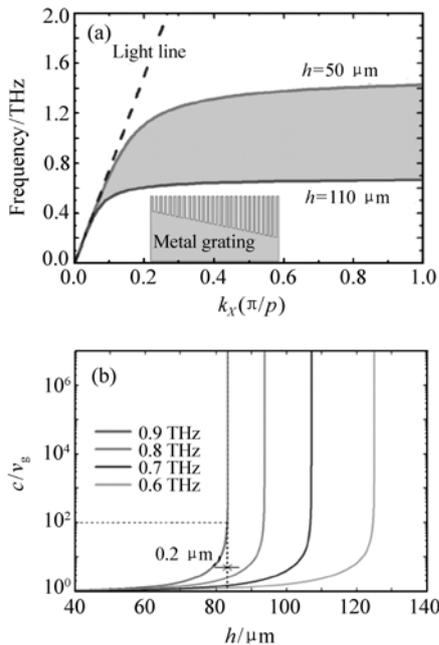


图3 (a)具有不同凹槽深度 h 的金属分级光栅结构表面等离子激元波导的色散关系,插图为分级光栅结构分布($h = 50 \sim 110 \mu\text{m}$); (b)由色散关系得出的表面等离子激元模式群速度^[18]

Fig. 3 (a) Dispersion relations of SPPs metal grating waveguide with different groove depth($h = 50 \sim 110 \mu\text{m}$); (b) group velocity of SPPs from dispersion relations^[18]

截止频率点,光的群速度可达 $c/10^7$ ^[18]。2011年,Savo等人基于前向波和后向波简并机制,对于微波频段的慢光通过单负特异材料平面波导(磁单负材料/介质/磁单负材料波导结构)进行了实验研究,最终获得了约 $1/15$ 倍真空中光速的慢光^[26]。

3.2 电磁感应透明现象

电磁感应透明(Electromagnetically Induced Transparency, EIT)是量子光学研究的一个基本问题,因其具有慢光效应、强烈非线性等突出优点,受到了国内外科学家的广泛关注^[27-29]。它是指利用另一束激光对原子媒质的光学响应进行调控,使其在原本的吸收谱线内出现一个很窄的透明窗口。同时,透明窗口内原本由二能级共振所引起的反常色散变成了极其强烈的正常色散。其本质是相干布居囚禁,即在两束光的作用下,三能级结构中的两个下能级形成相干叠加态,使两个下能级到上能级的吸收相干抵消。在发生电磁感应透明的频率处,介质的折射率会有一个快速的变化,从而引起探测光的群速度减慢,甚至停止。

经典的量子EIT实验往往需要苛刻的实验条件,例如常需要高功率的激光器,极端低温以及强磁场等实验条件等^[30]。利用特异材料可以方便地实现EIT现象,便于研究其物理特性^[31-32]。通过表面等离子波导结构来实现EIT效应不仅可以使人们更加方便的研究其特性,而且有利于突破衍射极限实现器件的小型化。文献[33]基于金属/介质/金属结构的表面等离子激元波导中Fabry-Perot谐振腔之间的相干相消效应,通过含有缺陷的表面等离子金属波导,在理论上研究了类EIT现象(图4(a)),并对其慢波特性和进行了讨论(图4(b))。文献[34]采用微带传输线方法,基于含有缺陷的由二维特异材料构成的磁单负材料/介质/磁单负材料表面等离子通道结构(图5(a)、(b)),在微波波段实验研究了类-EIT效应(图5(c))并对该效应产生的物理机制(即由于两侧谐振腔的反相谐振,导致两个缺陷中的电磁波在通道处产生相干相消,如图5(d)所示)进行了深入研究。

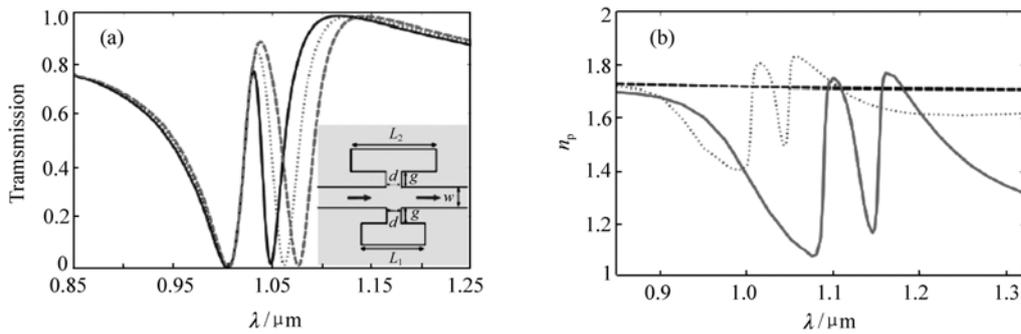


图 4 (a)金属/介质/金属表面等离子体波导结构以及 EIT 透射谱($L_1 = 600 \text{ nm}$, $L_2 = 610 \text{ nm}$ (实线), $L_2 = 620 \text{ nm}$ (点线), $L_2 = 630 \text{ nm}$ (虚线)); (b)相位折射率与波长的变化关系($L_1 = 300 \text{ nm}$, $L_2 = 310 \text{ nm}$ (实线); $L_1 = 600 \text{ nm}$, $L_2 = 610 \text{ nm}$ (点线))^[33]

Fig. 4 (a) Metal/dielectric/metal SPPs waveguide structure and EIT transmission spectrum ($L_1 = 600 \text{ nm}$, $L_2 = 610 \text{ nm}$ (solid line), $L_2 = 620 \text{ nm}$ (dotted line), $L_2 = 630 \text{ nm}$ (dashed line)); (b) relationship between phase index and wave length ($L_1 = 300 \text{ nm}$, $L_2 = 310 \text{ nm}$ (solid line); $L_1 = 600 \text{ nm}$, $L_2 = 610 \text{ nm}$ (dotted line))^[33]

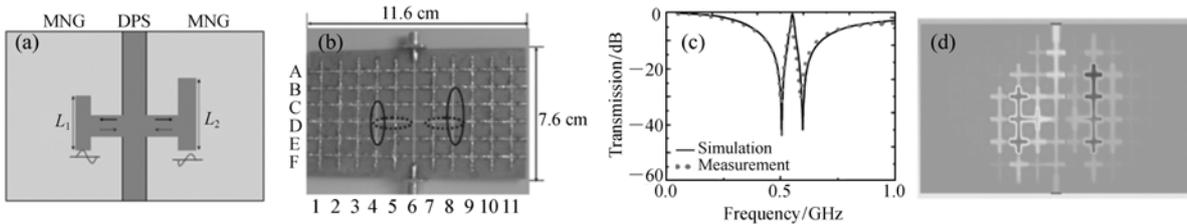


图 5 (a)含缺陷的 MNG/DPS/MNG 表面等离子通道模型; (b)基于二维微带传输线的 MNG/DPS/MNG 表面等离子缺陷通道; (c)仿真(实线)和测量(虚线)得到的透射谱; (d)含缺陷的 MNG/DPS/MNG 表面等离子通道电场分布($f = 0.55 \text{ GHz}$)^[34]

Fig. 5 (a) MNG/DPS/MNG Spps channel with defects; (b) defected MNG/DPS/MNG Spps channel based on two dimensional microstrip; (c) simulated (solid line) and measured (dotted line) transmission spectrum; (d) the distribution of electric field in defected MNG/DPS/MNG Spps channel^[34]

3.3 表面等离子波导滤波器

在未来的高密度集成平台上,表面等离子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,所以表面等离子波导组件已成为等离子领域的研究热点之一。迄今为止,已出现许多不同类型的 SPPs 波导组件,例如弯曲和分离器、Mach-Zehnder 干涉仪、Y 形组合器等^[35-38]。由于波导式滤波器具有损耗小、带外抑制好等特性,且表面等离子波导滤波器是高密度集成平台中的重要环节,所以出现了许多类型的表面等离子波导

滤波器,例如谐振环滤波器^[39-40]、齿形滤波器^[41-42]等。文献[43]研究了含 Fabry-Perot 谐振腔的金属/介质/金属结构的亚波长波导滤波器,如图 6 所示,分别改变参数 g 和 L ,可以实现不同的滤波效应。

表面等离子波导滤波器不仅可在光频段实现,而且也可在红外、微波等其它波段实现。文献[44]基于二维微带传输线结构构建了磁单负材料/介质/磁单负材料(MNG/DPS/MNG)表面等离子波导滤波器,该波导滤波器可实现低通、带阻和带通 3 种滤波效应,并且通过调整材料的电磁参数、调节亚波长谐振腔的大小、数目及耦合间

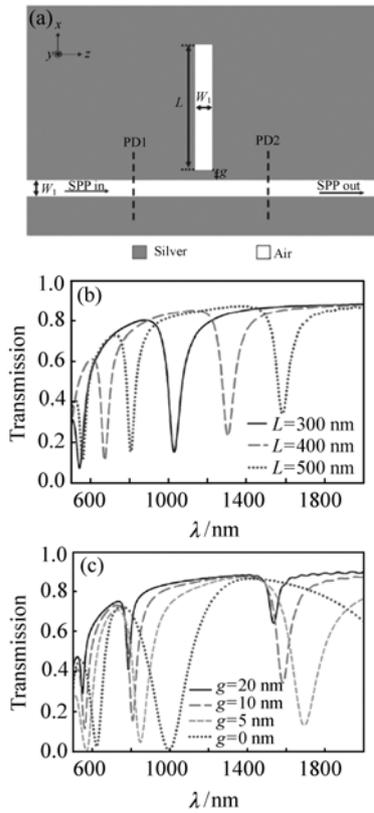


图 6 (a)含 Fabry-Perot 谐振腔的金属/介质/金属表面等离子波导滤波器结构示意图; (b)滤波器透射谱($w_1 = w_2 = 50 \text{ nm}$, $g = 10 \text{ nm}$); (c)波导透射谱($w_1 = w_2 = 50 \text{ nm}$, $L = 500 \text{ nm}$)^[43]

Fig. 6 (a) Metal/dielectric/metal SPPs waveguide filter with Fabry-Perot resonator; (b) the transmission spectrum ($w_1 = w_2 = 50 \text{ nm}$, $g = 10 \text{ nm}$); (c) the transmission spectrum ($w_1 = w_2 = 50 \text{ nm}$, $L = 500 \text{ nm}$)^[43]

距,可以调整相应的滤波性能。其中低通滤波器的通带频率可由构成 MNG 材料的单元电容(即 MNG 材料的有效磁导率)来调节;带阻滤波器的滤波性能可通过调整谐振腔长、耦合间距以及谐振腔的数目来调节;带通滤波器的性能可通过改变谐振腔长以及 MNG 材料的厚度来调整。在同一种的电路结构中实现多种可调的滤波功能,这种思想将会代表微波电路和光子电路中滤波器设计的发展方向。因为它可以简化滤波器的设计程序,提高设计效率。

3.4 表面等离子波的隐身

人们能看到物体,是因为物体对光的散射作

用使得散射光线进入到了人们的眼睛。如果能够减少散射,甚至使光线经过物体后能够恢复原来的传播方向,就能够实现隐身。特异材料对电磁波具有负折射效应,利用该性能可以达到隐身的目的^[45]。研究表明,通过在物体表面包覆一层具有一定介电常数和磁导率分布的特异材料能够使一定波长的电磁波弯曲,从而使电磁波绕过目标,最终达到隐身的目的^[46]。同样,表面等离子波在金属/介质界面传播时也会出现负折射效应^[47],利用这一点可以在金属表面的某些特定区域实现对表面等离子波传播的隐身^[48]。

依据金属/介质分界面的表面等离子波色散关系可知,在特定频率会出现反常色散(此时表面等离子波的相速度与群速度方向相反),这时金属/介质分界面对于表面等离子波为负折射材

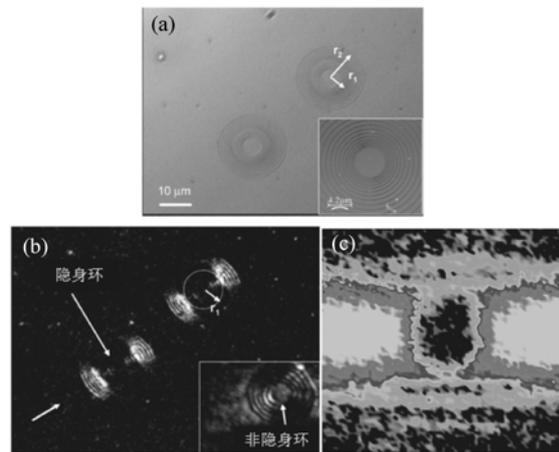


图 7 (a)由真空/金/聚甲基丙烯酸甲酯构成的二维特异材料隐身结构,插图为中央区域原子力显微图像; (b)表面等离子波在该结构中的传播, $\lambda = 532 \text{ nm}$; (c)该隐身结构中的能流分布^[48]

Fig. 7 (a) Two dimensional metamaterial cloak based on vacuum/Au/PMMA, the inset is the atomic force microscopic image of central area; (b) SPP waves propagating in this structure, $\lambda = 532 \text{ nm}$; (c) the energy flux distribution^[48]

料。结合这一理论,可以使得在金/聚甲基丙烯酸甲酯(Au/PMMA)界面传播的表面等离子波的有效折射率为负,而在同一频率下在金/真空(Au/vacuum)界面传播的表面等离子波的有效折射率为正。将以上两种结构组合排列,并适当设置各

自的比例,就可以实现表面等离子波在金/真空与聚甲基丙烯酸甲酯组合二维环状平面结构的有效折射率产生由负到正的连续变化,最终使得采用波长 $0.5 \mu\text{m}$ 的光源激发的表面等离子波绕开中心的圆形区域,实现表面等离子波传播的隐身(图7)^[48]。

在表面等离子隐身技术中,变换光学是最有效的设计方法。除此之外,Engheta 等人提出了等离子层和介质体“散射相消”的设计思想来实现隐身,这种设计思想有望获得更宽的隐身频带^[49];而 Milton 和 Nicorovici 等人则设计了基于负折射材料异常局域共振的隐身方案^[50]。

4 结束语

综上所述,表面等离子波导已成为表面等离子研究领域的热点之一。多年来,国内外多个科研机构在这一新兴学科方向开展了卓有成效的研究工作,并取得了不少激动人心的结果。本文介绍了表面等离子波导的基础理论及若干应用,包括宽频带、可调的慢波效应和光信号滤波器、隐身等等。除上述几个方面之外,与表面等离子波导相关的应用领域还涉及共振传感器、纳米激光器、颜色滤波器等多个方向。然而,为了能够将表面等离子波导的基础研究成果运用到工程实际,人们还需要面临各种挑战,例如研制出传播损耗可以与传统的波导相比拟的光频段亚波长尺寸的金

属线回路;开发基于表面等离子激元的电光、全光和压电调制器;以及如何采用增益机制来实现自主控制,进行表面等离子激元光学元件的研制;如何将光纤输出信号耦合到表面等离子激元回路中,开发深亚波长的纳米光刻蚀术。

目前,本文所展示的表面等离子波导实现方法及应用尚处于实验室研究阶段。但可以预见,随着特异材料理论和工艺技术的不断发展,将会涌现更多崭新的研究成果。未来本领域的研究将主要围绕以下三个方向:(1)加快表面等离子波导研究成果的实用化进程,如尝试在光波雷达中的应用等;(2)结合纳米技术以及 THz 光学,探讨表面等离子波导在 THz 波段的物理特性,进而探索表面等离子波导在 THz 通信中可能的应用;(3)研究降低表面等离子波导能量损耗的方法以适应远距离光通信的需要,因为目前的表面等离子波导主要基于金属以及半导体材料,导致电磁波的能量损耗较大。其中,降低表面等离子波导材料的损耗(如通过引入增益介质、甚至采用超导材料等方法)、减少工艺制作的难度应当是首当其冲的问题。

总之,表面等离子波导为科学研究和实际应用提供了难得的机遇,它涉及物理、材料、化学、能源等众多的学科和前沿,且有交叉和融合,这将为科学研究和人类科技进步开辟新的道路。为了实现这些目标,有必要在这个崭新的学科领域中开展更加广泛和深入的研究。

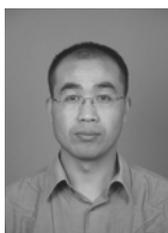
参考文献:

- [1] KATS A V,SAVEL'EV S,*et al.*. Left-handed interfaces for electromagnetic surface waves[J]. *Physical Review Letters*, 2007,98(7):073901.
- [2] PARK K,LEE B J,FU C J,*et al.*. Study of the surface and bulk polaritons with a negative index metamaterial[J]. *J. Optical Society of America B*,2005,22(5):1016-1023.
- [3] RITCHIE R H. Plasma losses by fast electrons in thin films[J]. *Physical Review*,1957,106(5):874-881.
- [4] ECONOMOU E N. Surface plasmons in thin films[J]. *Physical Review*,1969,182(2):539-554.
- [5] BURKE J J,STEGEMAN G I,*et al.*. Surface-polariton-like waves guided by thin,lossy metal films[J]. *Physical Review B*,1986 33(8):5186-5201.
- [6] 管小伟,吴昊,戴道铎. 硅基混合表面等离子体纳米光波导及集成器件[J]. 中国光学,2014,7(2):181-195.
GUAN X W,WU H,DAI D X. Silicon hybrid surfaceplasmonic nano-optics-waveguide and integration devices[J]. *Chinese Optics*,2014,7(2):181-195. (in Chinese)
- [7] 王二伟,鱼卫星,王成等. 用表面等离子体共振传感器检测纳米间距[J]. 中国光学,2013,6(2):259-266.
WANG E W,YU W X,WANG C,*et al.*. Nanogap measurement by using surface plasmon resonance sensor[J]. *Chinese Optics*,2013,6(2):259-266. (in Chinese)

- [8] 吴青峻,吴凡,孙理斌,等. 基于表面等离子激元的超薄金属减色滤波器的研究[J]. 物理学报,2014,63(20):207801.
WU Q J, WU F, SUN L B, *et al.*. Ultrathin metallic subtractive color filters based on surface plasmon primitives[J]. *Acta Phys. Sin.*, 2014, 63(20):207801. (in Chinese)
- [9] KRETSCHMANN E, RAETHER H. Radiative decay of non-radiative surface plasmons excited by light[J]. *Zeitschrift für Naturforschung A*, 1968, 23:2135-2136.
- [10] MAIER S A. Plasmons: fundamentals and applications[D]. New York: Springer Science + Business Media LLC, 2007.
- [11] PENDRY J B, MORENO L M, GARCIA-VIDAL F J. Mimicking surface plasmons with structured surfaces[J]. *Science*, 2004, 305(6):847-848.
- [12] LOCKYEAR M J, HIBBINS A P, SAMBLES J R. Microwave surface-plasmon-like modes on thin metamaterials[J]. *Physical Review Letters*, 2009, 102(7):073901.
- [13] STEGEMAN G I, WALLIS R F, MARADUDIN A A. Excitation of surface polaritons by end-fire coupling[J]. *Optics Letters*, 1983, 8(7):386-388.
- [14] PENDRY J B, HOLDEN A J, STEWART W J, *et al.*. Extremely low frequency plasmons in metallic mesostructures[J]. *Physical Review Letters*, 1996, 76(25):4773-4776.
- [15] SMITH D R, PADILLA W J, VIER D C, *et al.*. Composite medium with simultaneously negative permeability and permittivity[J]. *Physical Review Letters*, 2000, 84(18):4184-4187.
- [16] SMITH D R, SCHULTZ S, MARKOS P, *et al.*. Determination of effective permittivity and permeability of metamaterials from reflection and transmission coefficients[J]. *Physical Review B*, 2002, 65:195104.
- [17] SILVEIRINHA M, ENGHETA N. Tunneling of electromagnetic energy through subwavelength channels and bends using epsilon-near-zero materials[J]. *Physical Review Letters*, 2006, 97(15):157403.
- [18] GAN Q, FU Z, DING Y J, *et al.*. Ultra-wide band slow light system based on THz plasmonic graded metal grating structures[J]. *Physical Review Letters*, 2008, 100:256803.
- [19] LU W T, SAVO S, CASSE B D F, *et al.*. Slow microwave waveguide made of negative permeability metamaterials[J]. *Microwave and Optical Technology Letters*, 2009, 51(11):2705-2709.
- [20] RUPPIN R. Surface polaritons of a left-handed medium[J]. *Physics Letters A*, 2000, 277:61-64.
- [21] RUPPIN R. Surface polaritons of a left-handed material slab[J]. *J. Physics: Condensed Matter*, 2001, 13:1811-1819.
- [22] ZIA R, SELKER M D, *et al.*. Geometries and materials for subwavelength surface plasmon modes[J]. *J. Optical Society of America A*, 2004, 21(2):2442-2446.
- [23] LIU L, HAN Z, HE S. Novel surface plasmon waveguide for high integration[J]. *Optics Express*, 2005, 13(17):6645.
- [24] 王五松,张利伟,张冶文,等. 基于二维特异材料波导的表面电磁波的慢波实验研究[J]. 物理学报,2013,62(2):024203.
WANG W S, ZHANG L W, ZHANG Y W, *et al.*. Experimental studies of slow wave based on the surface waves in a two-dimensional metamaterials waveguide[J]. *Acta Phys. Sin.*, 2013, 62(2):024203. (in Chinese)
- [25] PARK K, LEE B J, FU C J, *et al.*. Study of the surface and bulk polaritons with a negative index metamaterial[J]. *J. Optical Society of America B*, 2005, 22(5):1016-1023.
- [26] SAVO S, CASSE B D F, LU W T, *et al.*. Observation of slow-light in a metamaterials waveguide at microwave frequencies[J]. *Applied Physics Letters*, 2011, 98:171907.
- [27] HARRIS S E, FIELD J E, IMAMOGLU A. Nonlinear optical processes using electromagnetically induced transparency[J]. *Physical Review Letters*, 1990, 64:1107.
- [28] SINGH R, ROCKSTUH C, LEDERER F, *et al.*. Coupling between a dark and a bright eigenmode in a terahertz metamaterial[J]. *Physical Review B*, 2009, 79:085111.
- [29] JIN X R, LU Y H, PARK J W, *et al.*. Manipulation of electromagnetically-induced transparency in planar metamaterials based on phase coupling[J]. *J. Applied Physics*, 2012, 111:073101.
- [30] PHILLIPS F, FLEISCHHAUER A, MAIR A, *et al.*. Storage of light in atomic vapor[J]. *Physical Review Letters*, 2001, 86(5):783-786.
- [31] LIU N, WEISS T, MESCH M, *et al.*. Planar metamaterial analogue of electromagnetically induced transparency for plas-

- monic sensing[J]. *Nano Letters*,2010,10(4):1103-1107.
- [32] ZHANG S,GENOV D A,WANG Y,*et al.*. Plasmon-induced transparency in metamaterials[J]. *Physical Review Letters*,2008,101(4):047401.
- [33] HAN Z H,BOZHEVOLNYI S I. Plasmon-induced transparency with detuned ultracompact Fabry-Perot resonators in integrated plasmonic devices[J]. *Optics Express*,2011,19(4):3251-3257.
- [34] WANG W S,ZHANG L W,RAN J,*et al.*. Experimental demonstration of EIT effect in the metamaterial surface plasmon-like channel[J]. *Optics Communications*,2013,292:5-10.
- [35] VERONIS G,FAN S H. Bends and splitters in metal-dielectric-metal subwavelength plasmonic waveguides[J]. *Applied Physics Letters*,2005,87:131102.
- [36] LEE T W,GRAY S K. Subwavelength light bending by metal slit structures[J]. *Optics Express*,2005,13(24):9652-9659
- [37] HAN Z,LIU L,*et al.*. Ultra-compact directional couplers and Mach-Zehnder interferometers employing surface plasmon polaritons[J]. *Optics Communications*,2006,259(2):690-695.
- [38] WANG B,WANG G P. Surface plasmon polariton propagation in nanoscale metal gap waveguides[J]. *Optics Letters*,2004,29(17):1992-1994.
- [39] XIAO S S,LIU L,QIU M. Resonator channel drop filters in a plasmon-polaritons metal[J]. *Optics Express*,2006,14(7):2932-2937.
- [40] WANG T B,WEN X W,YIN C P,*et al.*. The transmission characteristics of surface plasmon polaritons in ring resonator[J]. *Optics Express*,2009,17(26):24096-24101.
- [41] LIN X S,HUANG X G. Tooth-shaped plasmonic waveguide filters with nanometric sizes[J]. *Optics Letters*,2008,33(23):2874-2876.
- [42] TAO J,HUANG X G,LIN X,*et al.*. A narrow-band subwavelength plasmonic waveguide filter with asymmetrical multiple-teeth-shaped structure[J]. *Optics Express*,2009,17(16):13989.
- [43] LIU L,HAO X,YE Y T,*et al.*. Systematical research on the characteristics of a vertical coupled Fabry-Perot plasmonic filter[J]. *Optics Communications*,2012,285:2558-2562.
- [44] WANG W S,ZHANG L W,RAN J,*et al.*. Experimental research of the tunable magnetic plasmon polaritons waveguide filter in microwave band[J]. *Optics Communications*,2013,311:201-206.
- [45] PENDRY J B. Negative refraction makes a perfect lens[J]. *Physical Review Letters*,2000,85(18):3966-3969.
- [46] SCHURIG D,MOCK J J,JUSTICE B J,*et al.*. Metamaterial Electromagnetic Cloak at Microwave Frequencies[J]. *Science*,2006,314:977-980.
- [47] SMOLYANINOV I,HUANG Y J,DAVIS C C. Magnifying Superlens in the Visible Frequency Range[J]. *Science*,2007,315:1699-1701.
- [48] SMOLYANINOV I,HUANG Y J,DAVIS C C. Two-dimensional metamaterial structure exhibiting reduced visibility at 500 nm[J]. *Optics Letters*,2008,33(12):1342-1344.
- [49] ALU A,ENGHETA N. Achieving transparency with plasmonic and metamaterial coatings[J]. *Physical Review E*,2005,72(1):016623.
- [50] NICOROVICI N A,MILTON G W,MCPHEDRAN R C. Quasistatic cloaking of two-dimensional polarizable discrete systems by anomalous resonance[J]. *Optics Express*,2007,15(10):6314-6323.

作者简介:



王五松(1978—),男,河南上蔡人,博士,2012年于同济大学获得博士学位,主要从事特异材料、表面等离子、微波元器件方面的研究。E-mail: wangwusong126@163.com



张治文(1955—),男,浙江杭州人,教授、博士生导师,主要从事特异材料、电介质材料与驻极体材料方面的研究。E-mail: yewen.zhang@tongji.edu.cn



张利伟(1979—),男,河南确山人,博士,副教授,硕士生导师,主要从事光子晶体、特异材料、表面等离子体等方面的研究。E-mail: lwzhang@hpu.edu.cn

《中国光学》征稿启事

《中国光学》为双月刊, A4 开本; 刊号: ISSN 2095-1531/CN 22-1400/04; 国内外公开发行, 邮发代号: 国内 12-140, 国外 BM6782。

- ★ 荷兰 Scopus 数据库
- ★ 美国《乌利希国际期刊指南》
- ★ 美国《化学文献》
- ★ 波兰《哥白尼索引》
- ★ 俄罗斯《文摘杂志》
- ★ 中国精品科技期刊
- ★ 中国科技核心期刊
- ★ 中国光学学会会刊
- ★ 中国科技论文与引文数据库
- ★ 中国期刊全文数据库
- ★ 万方数字化期刊全文数据库
- ★ 中国科技期刊数据库
- ★ 中国光学期刊网数据库

主要栏目:微纳光学、信息光学、集成光电子、光谱学和光谱仪器、激光技术与应用、光学功能材料、光学设计与工艺、大气与空间光学、光学仪器与测试、综述、前沿动态、产业资讯、科普教学、实验室介绍、自然科学基金项目进展、前沿热点访谈、热点论文等。

发稿类型:学术价值显著、实验数据完整的原创性论文; 研究前景广阔, 具有实用、推广价值的技术报告; 有创新意识, 能够反映当前先进水平的阶段性研究简报; 对当前学科领域的研究热点和前沿问题的专题报告; 以及综合评述国内外光学技术研究现状、发展动态和未来发展趋势的综述性论文。

欢迎投稿、荐稿。

主管单位: 中国科学院

主办单位: 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所

协办单位: 激光与物质相互作用国家重点实验室

编辑出版: 《中国光学》编辑部

投稿网址: <http://chineseoptics.net.cn>

邮件地址: chineseoptics@ciomp.ac.cn; zgxcn@126.com

联系电话: 0431-86176852; 0431-84627061 传 真: 0431-84627061

编辑部地址: 长春市东南湖大路 3888 号(130033)