## 文章编号: 2095-4980(2013)06-0871-04

## 基于 FDTD 的表面等离子体慢光波导传输特性分析

李 锋,冯英霞

(江苏科技大学 电子信息学院, 江苏 镇江 212003)

摘 要:表面等离子体可以在亚波长尺度上实现对可见光及红外光的控制处理,对光集成的 发展有巨大的推动作用。设计了金属—介质—金属结构的表面等离子光波导,利用时域有限差分 法(FDTD)对其色散特性、群速度、场强分布进行分析。结果表明,在一定的频率范围内,此结构 的光波导可以支持慢光模式,且群速度色散较小,可有效控制光脉冲的畸变,保持信号的完整性。 关键词:表面等离子体;光波导;慢光;时域有限差分

中图分类号: TN252 文献标识码: A doi: 10.11805/TKYDA201306.0871

# Propagation properties analysis for surface plasmons slow light waveguide by FDTD

LI Feng, FENG Ying-xia

(School of Electronic Information, Jiangsu University Science of Technology, Zhenjiang Jiangsu 212003, China)

**Abstract:** Surface Plasmons(SPs) can process visible light and infrared light in subwavelength scale, which can provide a huge boost to the development of optical integration. The theoretical basis of the Finite Difference Time Domain(FDTD) method is introduced, and a slow-light waveguide with Metal-Insulator-Metal(MIM) structure is designed. An analysis on dispersion property, group velocity and field intensity distribution of this waveguide is performed with FDTD. It is shown that the waveguide can support slow light propagation and suppress the pulse distortion into some tolerable values simultaneously, when setting the frequency in an appropriate region in the dispersion curve.

Key words: Surface Plasmons; waveguide; slow light; Finite Difference Time Domain

表面等离子体(SPs)是入射光子和金属表面的自由电子相互耦合形成的局域电磁模,在可见光频和红外光频 范围内,可有效突破光的衍射极限并对光具有出色的控制能力。SPs在垂直金属表面上形成消逝场,场振幅呈指 数衰减,因此其电磁能量被强烈地约束在金属表面附近,具有强大的近场增强效应<sup>[1-2]</sup>。慢光指的是群速度小于 真空中光速的光信号。慢光的获得,要求色散曲线在一定频率范围内斜率为正且足够大,常用的方法有2种:一 是通过材料共振改变群速度;另一种是从材料结构入手来实现<sup>[3-5]</sup>。表面等离子体光波导获得慢光正是基于后一 种方法,本身不需要特殊的材料,在常温下即可。

本文设计了基于金属-介质-金属(MIM)结构的表面等离子体光波导,利用时域有限差分法(FDTD)<sup>[6]</sup>对该光波导的色散特性进行分析,对光波导的时域波形进行模拟仿真,为低群速度提供依据。

#### 1 时域有限差分法

1966年, K S Yee首次提出一种电磁场数值计算的新方法——时域有限差分(FDTD)方法。对电磁场*E*,*H*分量在 空间和时间上采取交替抽样的离散方式,利用这种方式将麦克斯韦方程组转化为一组差分方程,然后逐步推进求 解空间的电磁场。Yee提出的这种抽样方式后来被称为Yee元胞(图1)。FDTD随时间推进,可方便给出电磁场的时 间演化过程,并在计算机上显示,是一种有效的求解电磁波方程的方法。

麦克斯韦旋度方程为:

$$\nabla \times \boldsymbol{E} = -\frac{\partial \boldsymbol{B}}{\partial t} - \boldsymbol{J}_m \tag{1}$$
$$\nabla \times \boldsymbol{H} = \frac{\partial \boldsymbol{D}}{\partial t} + \boldsymbol{J} \tag{2}$$

式中: *E*为电场强度; *B*为磁通量密度; *J*<sub>m</sub>为磁流密度; *H*为磁场 强度; *D*为电通量密度; *J*为电流密度。

在直角坐标系中,式(1)和(2)可改写成下面的2个公式:

$$\begin{cases} \frac{\partial H_z}{\partial y} - \frac{\partial H_y}{\partial z} = \varepsilon \frac{\partial E_x}{\partial t} + \sigma E_x \\ \frac{\partial H_x}{\partial z} - \frac{\partial H_z}{\partial x} = \varepsilon \frac{\partial E_y}{\partial t} + \sigma E_y \end{cases}$$
(3)  
$$\begin{cases} \frac{\partial H_z}{\partial x} - \frac{\partial H_z}{\partial x} = \varepsilon \frac{\partial E_z}{\partial t} + \sigma E_z \\ \frac{\partial H_y}{\partial x} - \frac{\partial H_x}{\partial y} = \varepsilon \frac{\partial E_z}{\partial t} + \sigma E_z \end{cases}$$
$$\begin{cases} \frac{\partial E_z}{\partial y} - \frac{\partial E_y}{\partial z} = -\mu \frac{\partial H_x}{\partial t} - \sigma_m H_x \\ \frac{\partial E_x}{\partial z} - \frac{\partial E_z}{\partial x} = -\mu \frac{\partial H_y}{\partial t} - \sigma_m H_y \\ \frac{\partial E_y}{\partial x} - \frac{\partial E_x}{\partial y} = -\mu \frac{\partial H_z}{\partial t} - \sigma_m H_z \end{cases}$$
(4)

式中:  $E_x$ ,  $E_y$ ,  $E_z$ 和  $H_x$ ,  $H_y$ ,  $H_z$ 分别为电场和磁场在x, y和z轴上的分量;  $\varepsilon$ 表示介质介电系数;  $\mu$ 表示磁导系数;  $\sigma$ 表示电导率;  $\sigma_m$ 表示导磁率。

在FDTD离散中电场和磁场各节点的空间排布如图1所示。由图1可见,每个磁场分量由4个电场分量环绕,同样,每个电场分量由4个磁场分量环绕。电场和磁场在时间顺序上交替抽样,抽样时间间隔彼此相差半个时间步, 麦克斯韦旋度方程离散以后成差分方程,从而可以在时间上迭代求解,而不需要进行矩阵求逆运算。表面等离子 体是TM模式,  $E_x = E_y = E_z = 0$ ,将上式改写成差分方程的形式,FDTD公式为:

$$\boldsymbol{H}_{x}^{(n+1)/2}\left(i,j+\frac{1}{2},k+\frac{1}{2}\right) = CP(m)\boldsymbol{H}_{x}^{(n-1)/2}\left(i,j+\frac{1}{2},k+\frac{1}{2}\right) - \\ CQ(m)\left[\frac{\boldsymbol{E}_{z}^{n}\left(i,j+\frac{1}{2},k+\frac{1}{2}\right) - \boldsymbol{E}_{z}^{n}\left(i,j,k+\frac{1}{2}\right)}{\Delta y} - \frac{\boldsymbol{E}_{y}^{n}\left(i,j+\frac{1}{2},k+\frac{1}{2}\right) - \boldsymbol{E}_{y}^{n}\left(i,j+\frac{1}{2},k\right)}{\Delta z}\right]$$
(5)

式中系数CP(m)和CQ(m)分别为:

$$CP(m) = \frac{1 - \frac{\sigma_m(m)\Delta t}{2\mu(m)}}{1 + \frac{\sigma_m(m)\Delta t}{2\mu(m)}}$$
(6)

$$CQ(m) = \frac{\mu(m)}{1 + \frac{\sigma_m(m)\Delta t}{2\mu(m)}}$$
(7)

式中: $\Delta t$ 表示时间步长; $\Delta x, \Delta y, \Delta z$ 表示在x, y, z轴上的空间步长。这里给出 $H_x$ 分量的展开形式,其余2个分量的展开 式类似。

由于计算机容量的限制,FDTD的计算只能在有限区域内进行。为了能模拟开域电磁过程,在计算区域的截

E

 $H_{v}$ 

 $H_z$  $E_y$ 

 $H_{x} = E_{z}$ 

 $E_{v}$ 

 $E_z$ 

断边界必须给出吸收边界条件。吸收边界,即波传到边界处被吸收而不产生反射。吸收边界从开始简单的插值边界,到后来广泛采用的Mur吸收边界,以至近几年发展的完全匹配层(Perfectly Matched Layer, PML)吸收边界, 其效果越来越好。本文采用完全匹配层吸收边界。该方法于1994年由Berenger首次提出,通过在FDTD区域截断 边界设置一种特殊介质层,该层介质的波阻抗与相邻介质波阻抗完全匹配,因而入射波将无反射地穿过分界而进 入PML层。PML层为有耗介质,对入射波具有很好的吸收效果。

#### 2 MIM光波导结构模型和计算方法

本文采用的基于金属-介质-金属(MIM)结构的表 面等离子体结构及坐标如图2所示。在该结构中,第1 层和第3层采用金属银(Ag)作材料,中间一层采用介电 系数为13的电介质材料,厚度为0.5 μm,光波导外充满 空气,光源放置在光波导最左端位置。该光波导放置在 22平面上 垂直于x轴 用Drude模型<sup>[7]</sup>对全属辊进行描述



Fig.2 Schematic of designed plasmonic waveguide 图2 表面等离子光波导结构图

yz平面上,垂直于x轴。用Drude模型<sup>[7]</sup>对金属银进行描述,Drude模型的表达式如下:

$$\varepsilon(\omega) = 1 - \frac{\omega_p^2}{\omega^2 + i\omega/\tau}$$
(8)

式中: *ω*<sub>p</sub>为等离子体共振频率, 1/τ为弛豫时间; *ω*为频率。

采用FDTD方法对光波导进行相关特性分析,利用有限差分技术,把麦克斯韦方程组转换为稀疏矩阵本征方程,再利用PML<sup>[5]</sup>吸收边界条件就可以解决光波导的色散、模式问题。激发表面等离子TM模式使用的是高斯调制光源。计算中,将光波导划分为800×1000个网格,网格长度为0.025 μm,其中30层用来截断网格的各向异性完全匹配层,迭代步长为9000次。

#### 3 仿真结果及分析验证

通过理论分析及计算,得到表面等离子体光波导色散 关系(见图3)。群速度的表达式为:

$$V_{\sigma} = \mathrm{d}\omega \,/\,\mathrm{d}\kappa \tag{9}$$

在色散曲线中,椭圆处的曲线极为平坦,由群速度表 达式可知,在频率为6.63×10<sup>14</sup> Hz(6 630 THz)附近,该光 波导可以支持慢光模式(光的群速度可以接近于零)。此 处,随着波矢数的增加,色散曲线从负斜率变为正斜率,



为了演示所设计光波导的慢光现象,沿传输方向,在表面等离子体光波导介质层中心距光源0.05 µm,0.08 µm 和0.12 µm处设置观察点1、观察点2和观察点3,得到对应的时域波形,如图4所示。从图中可以看出,观察点处 波形表明:当工作频率为6 626 THz和6 635 THz时,光在等离子体波导内传播,衰减较小,传输的距离较长,且 波形畸变很小,可以保持脉冲信号的完整性;当工作频率为6 900 THz时,光传输过程中衰减幅度大,不可以长 距离传输,且信号波形发生了严重畸变,传输过程中无法保持脉冲信号的完整性。这和计算结果非常吻合。实验 结果表明:该光波导在一定的频率范围内可以支持较低群速度的同时还具有较低的群速度色散,可以实现以慢光 形式传输较为完整的脉冲信号。

## 4 结论

表面等离子体是获得慢光的途径之一,也是最近的研究热点。本文设计了基于MIM结构的表面等离子体光波导,并利用时域有限差分法对其进行计算仿真,获得色散曲线。通过对结果的分析,可以知道该光波导在一定的频率范围内支持慢光模式,同时还拥有较低的群速度色散。





Fig.4 Time domain waveform along propagation direction 图4 传输方向时域波形

#### 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] 王庆艳,王佳,张书练. 基于金属表面等离子激元控制光束的新进展[J]. 光学技术, 2009,35(2):163-174. (WANG Qingyan, WANG Jia,ZHANG Shulian. Progress of beam control based on metal surface plasmon polaritons[J]. Optical Technique, 2009,35(2):163-174.)
- [3] 吕雅利. 神奇的慢光[J]. 光通信技术, 2009(9):40-42. (LV Yali. The magic slow light[J]. Optical Transport Technique, 2009(9):40-42.)
- [4] 赵勇,赵华玮,张馨元,等. 慢光产生的新机理及其应用[J]. 光学精密工程, 2009,17(2):237-245. (ZHAO Yong,ZHAO Huawei,ZHANG Xinyuan, et al. Research on some new mechanisms of slow light and its applications[J]. Optics and Precision Engineering, 2009,17(2):237-245.)
- [5] Hau L V, Harri S E, Dutron Z, et al. Light speed reduction to 17 metres per second in an ultra-cold atomic gas[J]. Nature, 1999,397(6720):594-598.
- [6] 葛德彪,闫玉波. 电磁波时域有限差分方法[M]. 3版. 西安:西安电子科技大学出版社, 2010. (GE Debiao, YAN Yubo. Finite-Difference Time-Domain Method for Electromagnetic Waves[M]. 3rd ed. Xi'an:Xi'an University of Electronic Science and Technology Press, 2010.)
- [7] Martin D,George G. Electrodynamics of Solids:Optical Properties of Electrons in Matter[M]. London:Cambridge University Press, 2002.

## 作者简介:

**李** 锋(1970-),男,陕西省榆林市人,副教授,主要研 究方向为光波导技术.email:lifengsl@126.com. **冯英霞**(1985-),女,山东省潍坊市人,硕士, 主要研究方向为表面等离子体光学.