介质加载型混合表面等离子体波导的损耗特性

李志全[1],牛力勇[1],严 蕾[1],朱 君[1,2],王志斌[1],郑文颖[1]

(1. 燕山大学 电气工程学院,河北 秦皇岛 066004;
2. 广西师范大学 电子工程学院,广西 桂林 541004)

摘 要:为实现长距离传输及亚波长尺度的模式限制,在传统介质加载型表面等离子结构的基础上,设计了一种微孔介质加载混合表面等离子体波导,采用时域有限差分法(FDTD)对该波导模式场分布及传输特性进行了相应的研究。研究表明所设计的波导结构具有较强的局域场限制,通过在孔内填充增益介质,使混合等离子体波导的传输损耗得到了补偿,输出端的表面等离子激元实现了增益放大。结果表明,通过调整波导的几何参数和电磁参数,可以显著提高波导的场限制,降低波导本身的损耗,其中当孔与金属之间距离为 44 nm 时,波导的损耗达最小约为−13 dB/μm。这一设计可以为光子器件集成提供一定的理论和实验借鉴价值。

关键词:混合表面等离子体波导; 介质加载; 增益介质; 传输特性

中图分类号:TN256 **文献标志码**:A **文章编号**:1007−2276(2015)02−0677−05

Propagation properties of a dielectric-loaded hybrid surface plasmonic waveguide

Li Zhiquan[1], Niu Liyong[1], Yan Lei[1], Zhu Jun[1,2], Wang Zhibin[1], Zheng Wenying[1]

(1. Institute of Electrical Engineering, Yanshan University, Qinhuangdao 066004, China;
2. College of Electronic Engineering, Guangxi Normal University, Guilin 541004, China)

Abstract: In order to realize long propagation distance and achieve subwavelength mode confinement, a dielectric-loaded hybrid surface plasmonics waveguide with a nano-hole was designed, which was based on traditional dielectric-loaded surface plasmonics waveguide. The propagation properties and mode field distributions of this novel hybrid waveguide were studied using finite-difference time-domain(FDTD) method. The results show that the structure could strongly modulate the local field enhancement. Furthermore, the nano-hole was filled with gain medium which leads to a gain enhancement, and the propagation loss could be compensated. In short, adjusting the geometrical parameters can significantly improve the confinement of the SPPs fields and reduce the losses of the waveguide. It also shows that the transmission loss is up to −13 dB/μm in the case of d=44 nm. This surface plasmonics waveguide can be used for subwavelength optical confinement and applied to the field of photonic device integration and sensors.

Key words: hybrid surface plasmonic waveguide; dielectric-loaded; gain medium; propagation properties

收稿日期:2014−06−05; **修订日期**:2014−07−03

基金项目:国家自然科学基金(61107039);河北省自然科学基金(F2012203204);广西师范大学博士科研启动基金

作者简介:李志全(1954−),男,教授,博士,主要从事光纤传感及非线性光电检测方面的研究。Email:lzq54@ysu.edu.cn

通讯作者:朱君(1985−),男,博士,主要从事表面等离子激元传输方面的研究。Email:zhujun1985@gxnu.edu.cn

0 引 言

当前表面等离子体(SPP)波导结构的研究已成为微纳光学的热点领域，基于表面等离子体的光子器件能够突破传统光子器件存在的衍射极限的限制，为进一步将光子和电子的优势结合在一起并在芯片上应用提供了可能[1]。等离子体波导及相关器件在微纳米光电子集成领域拥有巨大潜力，近些年，出现了几种等离子体波导结构，如：金属条与金属纳米圆柱波导[2]，耦合纳米圆柱波导[3]，金属-V 型波导[4]，金属-介质-金属波导[5]等。然而，这些波导结构中所存在的传播损耗，场限制和物理尺寸等问题影响了波导的传输性能。为了同时实现较长的传播距离并提高波导的模式限制，近年来，混合表面等离子体波导的研究获得了越来越多的关注。这些混合等离子体波导对深亚波长尺度的光集成有很大的影响，尤其是介质加载混合等离子波导，由于金属表面附近的介质折射率差增强了金属-介质界面的 SPP 波局域化，使其具备亚波长场限制下的低损耗[6-8]。2007年曾有报道 Holmgaard[9]等人验证了介质加载等离子体波导具有很好的横向模式场限制和侧向模式场限制作用，并且具有合适的传播距离。2009 年东南大学则指出在金属条的另一边同样放置一个高折射率介质层形成对称的介质加载等离子波导可以显著提高波导的传输性能，但是模式尺寸相对较大[10]。2010 年 Chu[11]等提出了一种双层介质加载混合等离子波导，结果表明，这种波导结构可以实现强烈的场限制以及相对较长的传播距离，但是表面等离子体波导传输损耗仍然很大。

为了提高混合等离子体波导的模式限制，降低波导的损耗，优化等离子体波导的传输性能，文中对这种基于介质加载的混合表面等离子体波导的传输特性做了进一步的研究。文中设计了一种微孔介质加载混合等离子体波导，并对其模式场分布，及其传输参数随波导中的几何参数与电磁参数的变化关系了相应的研究。

1 混合表面等离子体波导的理论分析

1.1 设计结构

基于双层介质加载混合表面等离子体波导所提出的一种微孔混合等离子体波导结构如图 1 所示。其中该 SPPs 沿着波导 z 轴传播，在 y 方向 (与 z 垂直)衰减。

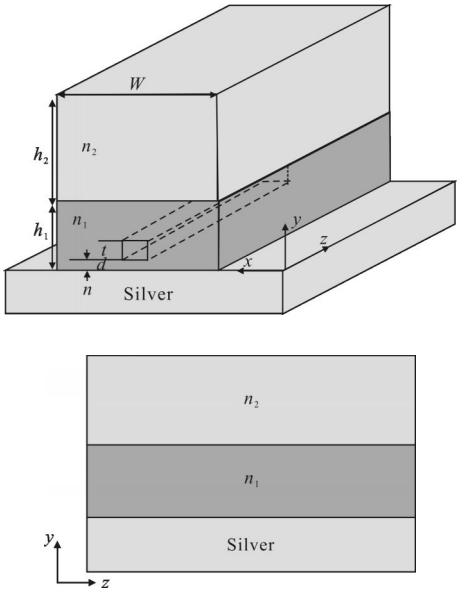

图 1 微孔介质加载混合表面等离子体波导结构和 y-z 平面上的微孔介质加载混合表面等离体波导结构

Fig.1 Schematic structure of a dielectric-loaded hybrid surface plasmonic waveguide with nano-hole and schematic structure of a dielectric-loaded hybrid surface plasmonic waveguide with nano-hole in the y-z plane

1.2 结构物理模型分析

建立该双层介质加载混合表面等离子体波导在 TM 模式下的电磁场物理模型：设 H_{xi}、E_{yi}、E_{zi} 分别为该结构中第 i 层的电场和磁场，由于 SPP 为 TM 偏振波，则应满足下式：

$$\frac{\mathrm{d}^2H_{xi}(y)}{\mathrm{d}y^2}+k_{yi}^2H_{xi}=0 \tag{1}$$

$$E_{xi}=-\frac{j}{\omega\varepsilon_i}\frac{\mathrm{d}H_{xi}(y)}{\mathrm{d}y} \tag{2}$$

$$E_{yi}(y)=\frac{k_{yi}}{\omega\varepsilon_i}H_{xi}(y) \tag{3}$$

其中 y 向波矢 k_{yi} 与 z 向波矢 β 满足：

$$k_{yi}=\pm\sqrt{k_0^2\varepsilon_i-\beta^2}\ ,i=1,2,3 \tag{4}$$

根据切向场连续的边界条件，在上边界切向场 (H_{xs},E_{xs}) 和下边界切向场(H_{xc},E_{xc}) 可通过传输矩阵M_i 联系起来：

$$\begin{bmatrix} H_{xs} \\ \dfrac{\mathrm{d}H_{xs}}{\varepsilon_s\mathrm{d}y} \end{bmatrix}=\prod_{i=1}^{3}M_i\begin{bmatrix} H_{xc} \\ \dfrac{\mathrm{d}H_{xc}}{\mathrm{d}y} \end{bmatrix}=\begin{bmatrix} m_{11} & m_{12} \\ m_{21} & m_{22} \end{bmatrix}\begin{bmatrix} H_{xc} \\ \dfrac{\mathrm{d}H_{xc}}{\varepsilon_c\mathrm{d}y} \end{bmatrix} \tag{5}$$

$$M_i=\begin{bmatrix}\cos(k_{yi}h_i) & -\dfrac{\varepsilon_i}{k_{yi}}\sin(k_{yi}h_i)\\ \dfrac{k_{yi}}{\varepsilon_i}(k_{yi}h_i) & \cos(k_{yi}h_i)\end{bmatrix} \tag{6}$$

进而可以得到色散方程:

$$F(\beta)=\frac{k_{ys}}{\varepsilon_s}m_{11}+\frac{k_{yc}}{\varepsilon_c}m_{22}-m_{21}-\frac{k_{ys}k_{yc}}{\varepsilon_s\varepsilon_c}m_{12}=0 \tag{7}$$

式中:$k_{yc}=\pm\sqrt{\beta^2-k_0^2\varepsilon_c}$; $k_{ys}=\pm\sqrt{\beta^2-k_0^2\varepsilon_s}$ 。

2 结构的波导场分布分析

基于双层介质等离子体波导的结构基础上对其进行改进, 在其介质 1 上进行挖孔操作, 结构参数为:波导的介质层宽度 w=202 nm,两个介质层厚度分别为 h_1=120 nm,h_2=200 nm,银层厚度为 h=100 nm,其中 $n_1=n_{Si}$=3.46,$n_2=n_{SiO_2}$=1.45, 增益介质的折射率为 $n_{core}=n_{GaAs}$=3.4,正方形孔厚度 t=20 nm。图 2 和图 3 分别为该波导在不同入射波长、孔内填充介质不同的情况下,输出端 3.4~4.0 μm 范围的场分布情况。

图 2(a)与图 2(b)分别描述了在光波波长 λ=1.30 μm 与 λ=1.55 μm 时 E_y 分布状态图。在这两幅图中,波导内的电磁波的 E_y 分布情况相似,但是在 λ=1.30 μm 条件下,E_y 的强度值较大,此时场的分布范围较小,场与金属表面的相互作用较强;λ=1.55 μm 时,场的分布范围较大,场与金属表面的相互作用较弱。从中可以看出波长变化影响 E_y 的强度值,但不影响 E_y 的分布状态。

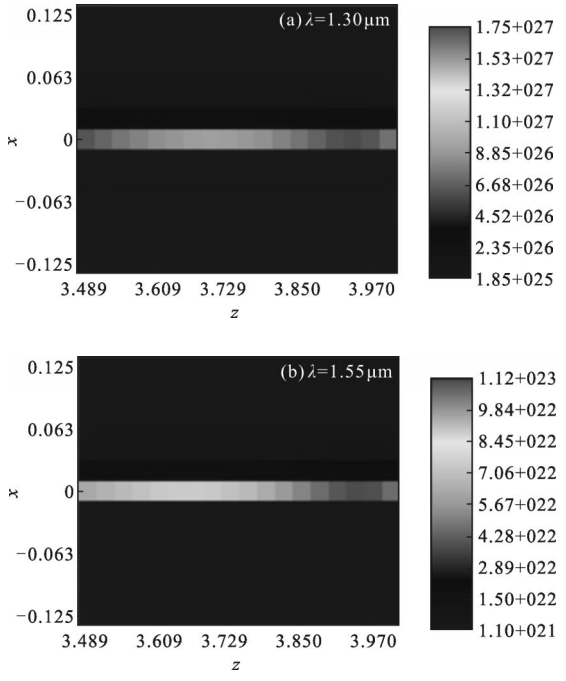

图 2 在 t=20 nm, λ 分别为 1.30 μm 和 1.55 μm 时 E_y 分布图

Fig.2 Distributions of the field E_y on the cross section when λ=1.30 μm and λ=1.55 μm at t=20 nm

图 3 表达了当入射波长 λ=1.55 μm 时, 孔内介质分别为空气,GaAs 条件下的 E_y 分布图。从图 3(a)中可以看出,在 $n_{core}=n_{air}$ 条件下, E_y 大部分分布在孔内,孔外分布的电磁波能量较小,但其 E_y 的强度值越接近波导结构的输出端,其强度值越小;在图 3(b)中,孔内填充了介质 GaAs,即 $n_{core}=n_{GaAs}$ 的情况下,此条件下的 E_y 的能量主要分布集中在孔内,并且可以看出在截取的输出端这一区间,E_y 的强度值越接近波导结构的输出端,其强度值越大,这一现象说明了在该结构的输出端 3.4~4.0 μm 区间电磁波被增益放大,波导内的损耗得到了补偿。

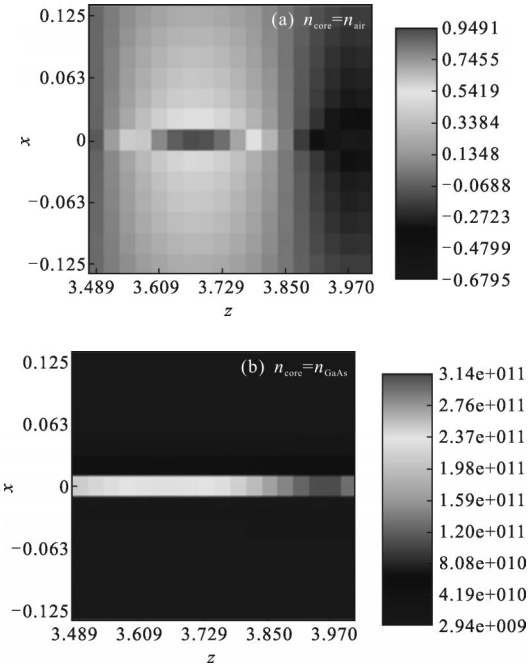

图 3 在 t=20 nm, $n_{core}=n_{air}$ 和 $n_{core}=n_{GaAs}$ 时 E_y 分布图

Fig.3 Distributions of the field E_y on the cross section when $n_{core}=n_{air}$ and $n_{core}=n_{GaAs}$ at t=20 nm

3 设计结构的传输特性的分析

有效折射率不仅与波长有关, 同时也与波导的模式有一定联系, 因此有效折射率也称为模式折射率。有效折射率的值为复数时,有效折射率实部描述的是波导内部电磁波的色散, 虚部描述的是波导损耗。研究表明,有效折射率决定了 SPP 的传播特性,

基于此下面对波导的透射率(Transmissivity),孔内传播的电磁波传输损耗(Propagation Loss)以及微孔混合等离子体波导的传输损耗与孔-金属界面之间的距离 d 的变化关系完成仿真分析。仿真条件为:在孔内填充增益介质 GaAs 情况下,设置介质的介电常数 ε 分别为 11.56,11.56-1.36j,11.56-4.08j。

图 4 描述的是波导透射率与孔-金属之间距离 d 之间的关系。从 ε=11.56,11.56-1.36j,11.56-4.08j 这三组数据中可以看出,当 ε=11.56-4.08j 时波导的透射率最大,电磁波的传输性能最好;当 ε=11.56 时波导的透射率最小,波导的传输性能最差。同时还能够观察到波导的透射率随着 d 的增大而增大。

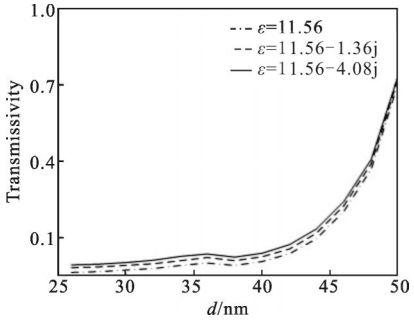

图 4 ε=11.56,11.56-1.36j,11.56-4.08j 时,透射率随几何参数 d 的变化关系

Fig.4 Transmissivity vs d as ε=11.56, 11.56-1.36j and 11.56-4.08j

图 5 描述的是波导中微孔内传播的电磁波损耗与孔-金属之间距离 d 的变化关系。图中主要讨论了

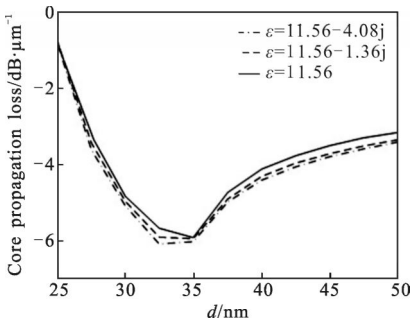

图 5 ε=11.56,11.56-1.36j,11.56-4.08j 时,孔内传输损耗与 d 的变化关系

Fig.5 Propagation loss in the nano-hole vs d as ε=11.56, 11.56-1.36j and 11.56-4.08j

增益介质介电常数 ε 分别为 11.56,11.56-1.36j,11.56-4.08j 时的孔内光波损耗曲线图。从图中可以发现,在 d=25~36 nm 这一范围时,孔内电磁波损耗值随着 d 的增大而减小;而在 d=36~50 nm 这一区间时,孔内电磁波损耗值随着 d 的增大而增大。

图 6 显示的是在与图 5 同一条件下,微孔混合等离子体波导的传输损耗与孔-金属界面之间的距离 d的变化关系。从图 6 中可以看出:在d=26~42 nm 区间时,波导的传输损耗随着 d 的增大而增大,但是增大的范围较小;而在 d=42~44 nm 这一区间时,波导的传输损耗随着 d 的增大而减小,并且减小的速度较快;d=44~50 nm 这一区间时,波导的传输损耗随着 d 的增大而增大,同时增大的速率较快。在孔内介质的介电常数 ε 分别 11.56,11.56-1.36j,11.56-4.08j 的条件下,光波在波导中的传输损耗在 ε=11.56 时最大,在 ε=11.56-4.08j 时的传输损耗最小,同时在图中可以看出,在 d=44 nm 时,微孔混合等离子体波导的传输损耗最小,约为-13 dB/μm。

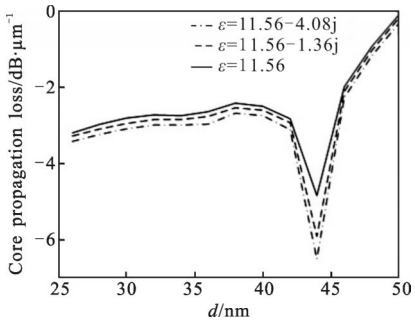

图 6 ε=11.56,11.56-1.36j,11.56-4.08j 时,波导传输损耗与 d 的变化关系

Fig.6 Propagation loss in the waveguide vs d as ε=11.56, 11.56-1.36j and 11.56-4.08j

4 结 论

在微米尺度上设计了一种新型介质加载混合表面等离子体波导,对其 TM 模式下波导结构的电磁场分布进行分析研究,并得到了波导的透射率以及传输损耗与波导的结构参数以及电磁参数之间的变化关系。结果表明该波导结构提高了电磁场的场限制,同时传输损耗得到了补偿,波导整体结构的传输性能得到了提高,通过调整波导的几何参数,微孔混合等离子体波导的传输损耗最小,约为-13 dB/μm。这种混合表面等离子体波导可以实现亚波长的光限制,用于设计高性能的纳米尺寸半导体波导与深亚波长尺寸的等离子体激光器。

参考文献:

[1] Barnes W L, Dereux A, Ebbesen T W. Surface plasmon subwavelength optics[J]. ***Nature***, 2003, 424: 824-830.

[2] Zia R, Schuller J A, Chandran A, et al. The next chip-scale technology[J]. ***Materials Today***, 2006, 9(7-8): 20-27.

[3] Maier A, Brongersma M L, Atwater A. Electromagnetic energy transport along arrays of closely spaced metal rods as an analogue to plasmonic device [J]. ***Appl Phys Lett***, 2001, 78(1): 16-19.

[4] Bozhevolnyi S I, Volkov V S, Devaux E, et a1. Channel plasmon-polariton guiding by subwavelength metal grooves [J]. ***Phys Rev Lett***, 2005, 95(4): 802-806.

[5] Pile D F P, Ogawa T, Gramotnev D K, et al. Two-dimensionally localized modes of a nanoscale gap plasmon waveguide[J]. ***Appl Phys Lett***, 2005, 87(26): 1114-1117.

[6] Li Zhiquan, Zhu Jun, Niu Liyong, et al. Analysis on SPP pulse rectifier producing THz electromotive force[J]. ***Infrared and Laser Engineering***, 2012, 41(9): 2346-2350. (in Chinese)

[7] Yang Pengfei, Yao Jianquan, Liu Xiaobo, et al. Hybrid narorod plasmonic wave guide forsub wavelength confinement [J]. ***Infrared and Laser Engineering***, 2012, 41(6): 1477-1480. (in Chinese)

[8] Zhang Bingfang, Zhang Xueru, Li Mangxue, et al. Influerveof optical nontinearityon surface Plasmon resonance[J]. ***Infrared and Laser Engineering***, 2008, 37(S2): 731-733. (in Chinese)

[9] Tobias Holmgaard, Sergey Bozhevolnyi. Theoretical analysis of dielectric-loaded surface plasmon-polariton waveguides [J]. ***Physical Review B***, 2007, 75(24): 1-12.

[10] Yun Binfeng, Hu Guohua, Cui Yiping. Bound modes analysis of symmetric dielectric loaded surface plasmon -polariton waveguides [J]. ***Opt Express***, 2009, 17 (5): 3610-3618. (in Chinese)

[11] Chu Hongson, Li Erping, Li Ping, et al. Optical performance of single-mode hybrid dielectric-loaded plasmonic waveguide-based components[J]. ***Applied Physicals Letters***, 2010, 96(22): 1-3. (in Chinese)