第34卷 第1期

2013年1月

文章编号:1000-7032(2013)01-0098-06

带有增益介质层的混合脊状等离子体波导的传输特性

李志全*,郑文颖,牛力勇,李晓云,李 莎

(燕山大学 电气工程学院,河北 秦皇岛 066004)

摘要:在传统脊状等离子体波导的基础上设计了一种带有增益介质层的新型混合脊状等离子体波导,其结构中的介质层部分包含两个区域:前区为单一介质,后区的脊是由2种介质构成的双层脊区。采用二维时域 有限差分方法分析了波导结构的传输特性,得到了 TM 模下的电场分布图,并对输出功率以及传输损耗与结 构参数和介质折射率的变化规律进行了讨论。结果表明,在波导中引入的增益介质材料磷化铟后其损耗达 到-6 dB/μm。此种波导结构对于光集成芯片的研究与制作具有重要意义。

关 键 词:混合等离子体波导;增益介质;传输特性 中图分类号:TN252 **文献标识码:**A **DOI**: 10.3788/fgxb20133401.0098

The Transmission Properties of Hybrid Ridge Plasmonic Waveguide with A Gain Medium Layer

LI ZHI-quan*, ZHENG Wen-ying, NIU Li-yong, LI Xiao-yun, LI Sha

(Institute of Electrical Engineering, Yanshan University, Qinhuangdao 066004, China) * Corresponding Author, E-mail: lzq54@ ysu. edu. cn

Abstract: A novel hybrid ridge plasmonic waveguide with a gain medium layer is presented based on the traditional ridge waveguide. Dielectric layer in the hybrid ridge plasmonic waveguide contains two parts: the first part is a single dielectric area and the second part is a double-layers ridge area containing two kinds of dielectric. The 2D-FDTD method is used to analyze transmission characteristics of the waveguide structure. The electric field distribution of TM mode is given. The dependence of output power and transmission loss on structural parameters and refractive index are discussed. The results show that the transmission loss is up to with the help of the gain medium. The waveguide structure can be applied to the research and fabrication of optical integrated chip.

Key words: hybrid plasmonic waveguide; gain medium; transmission characteristics

1 引

言

表面等离子体学是纳米光子学中非常重要的 一个方向^[1]。在表面等离子体学中,基于表面等 离子体激元(Surface plasmon polaritons, SPPs)的 表面等离子体波导(Surface plasmonic waveguides, SPWs)是目前纳米光子学中的一个研究热点^[2-5]。 SPPs 是由光和金属表面自由电子的相互作用引起的一种电磁波谐振模式,可以看作是一种沿着金属表面传播的特殊类型的光波。在金属表面,

收稿日期: 2012-07-30;修订日期: 2012-11-13

基金项目:国家自然科学基金(61172044);河北省自然科学基金(F2010002002,F2012203204)资助项目

作者简介: 李志全(1954 –), 男, 黑龙江肇东人, 博士, 教授, 主要从事光纤传感及非线性光电检测方面的研究。 E-mail: lzq54@ ysu. edu. en

这种光波传输距离可以达到数十倍于波长的量 级。光波的场强与传播方向呈指数衰减形式,横 向尺度在亚波长量级。由于不存在类似于传统光 波导的衍射极限限制,基于 SPPs 而制作的 SPWs 可以用来导引和控制光的传播。目前常见的表面 等离子激元光波导形式有金属槽型[67]、金属条 形^[8]以及金属楔形表面等离子激元光波导^[9-10]。 利用表面等离子激元的光波导结构因能够支持光 频段高度局域化的电磁场的优势而被应用在多种 领域[11],但是由于存在一定的欧姆损耗,使其应 用在光器件集成应用方面有一定的难度。目前, 很多学者提出混合等离子体波导结构可以降低亚 波长模式的局域损耗[12-18]。在混合等离子体波 导中,金属表面附近的介质折射率差同时对在金 属-介质界面传播的 SP 波局域化方面起了很重要 的作用。混合等离子体波导具有场强提高、光-物 质之间的相互作用增强以及可有效地降低干扰等 本身特有的优势,这些优势将在新型集成光子器 件制作领域中产生重大作用[16]。

本文在脊状等离子体波导结构基础上设计了 一种微米尺寸的新型混合脊状等离子体波导,这 种波导结构在很大程度上降低了波导器件在设 计、制造与加工方面的难度与复杂程度,从而提高 了波导结构的应用性能。文中波导结构采用了对 克服欧姆损耗有很好效果的增益层。在 y = 0 的 x-z 平面上,运用 2D-FDTD 法对 TM 模式下的波 导传输特性进行了分析,并讨论了波导的电场分 布、输出功率、传输损耗与波导的几何参数和电磁 参数的关系。

2 结构设计与物理模型

基于传统脊状等离子体波导而设计的带有增益层的混合脊状表面等离子体波导结构如图 1 所示。在这里定义 x 轴方向上为高 H,z 轴方向上为 长 L。采用入射光波长 λ = 1.55 μm 的高斯波沿着与 z 轴平行的金属/介质的分界面进行传播。 金属-介质(m-d 界面)界面上传播的 TM 模式下的电磁场物理模型^[19]如下:

$$\begin{cases} E_{j} = (E_{xj}, 0, E_{z}) \exp[i(k_{xj}x + k_{z}z - \omega t)] \\ H_{j} = (0, H_{y}, 0) \exp[i(k_{xj}x + k_{z}z - \omega t)] \\ j = d, m. \end{cases},$$
(1)

根据麦克斯韦方程组(1)及金属-介质界面 的电磁波的连续条件, 推导出 SPP 的色散关系式



- 图1 (a)传统脊状等离子体波导原理图;(b) 三维空间 上的混合脊状等离子体波导的原理图;(c)x-z平面 上混合脊状等离子体波导的原理图。
- Fig. 1 (a) Schematic of traditional ridge plasmonic waveguide.
 (b) Schematic of hybrid ridge plasmonic waveguide in the three-dimensional space. (c) Schematic of hybrid ridge plasmonic waveguide in the *x-z* plane.

如下:

$$\begin{cases} k_z^2 = k_0^2 \frac{\varepsilon_{\rm d} \varepsilon_{\rm m}}{\varepsilon_{\rm d} + \varepsilon_{\rm m}}, \\ k_{xi}^2 = k_0^2 \frac{\varepsilon_i}{\varepsilon_{\rm d} \varepsilon_{\rm m}}, \end{cases} \quad i = d, m. \quad (2)$$

把介质改换为一种能够补偿金属所引起的吸收损耗的介电常数的虚部为负($Im(\varepsilon_d) < 0$)的增益介质,所得到的 SPP 的色散关系式:

$$k_{z}^{2} = \frac{k_{0}^{2}}{\left(\varepsilon_{d}' + \varepsilon_{m}'\right)^{2} + \left(\varepsilon_{d}'' + \varepsilon_{m}''\right)^{2}} \times \left\{ \varepsilon_{d}' \left[\left(\varepsilon_{m}'\right)^{2} + \frac{\left|\varepsilon_{d}\right|^{2}}{\varepsilon_{d}'} \varepsilon_{m}' + \left(\varepsilon_{m}''\right)^{2} \right] + i\varepsilon_{m}'' \left[\left(\varepsilon_{d}''\right)^{2} + \frac{\left|\varepsilon_{m}\right|^{2}}{\varepsilon_{m}'} \varepsilon_{d}' + \left(\varepsilon_{d}'\right)^{2} \right] \right\}.$$
(3)

3 波导传输特性分析

基于上述理论分析,所设计结构材料选择为: 金属选用银,折射率 $n_{Ag} = 0.1453 + j11.3587^{[13]}$;介 质 1 采用折射率 $n_1 = 3.455$ 的 Si 材料;介质 2 选 用 Si₃N₄,折射率 $n_2 = 2.1$;介质 3 为增益层,所使 用的增益介质为 InP,折射率 $n_3 = 3.1$ 。根据表面 等离子激元放大原理^[18],取得的 InP 的复介电常 数 $\varepsilon_3 = 9.61 - j0.0183$ 。研究过程中,采用 2D-FDTD 法进行仿真,网格尺寸 $\Delta x = \Delta z = 21$ nm,边 界条件使用各向异性完美匹配层(APML)来进行 Yee 氏网格划分。时间步长 Δt = 4.658 7E – 017, 运行 6 000 步仿真模拟波导结构,并分析研究了 混合脊状等离子体波导的电场分布、输出功率以 及传输损耗特性。

3.1 波导电场分布

图 2 和图 3 具体表述了金属银与介质分界面 (x = 1.5 µm 处),z = 0~8 µm 区间内, x-z 平面上 的普通脊状等离子体波导(图 1(a))与混合脊状 等离子体波导(图 1(b))的电场分布,并进行了 对比分析。可以看出,当传播到 z = 4.5~8 µm 这 一区间时,普通脊状等离子体波导中的电磁波已 减弱至近乎消逝,而混合脊状等离子体波导中的 电磁波依然传播得很好。在这一区间内,混合波 导中的电磁波比普通波导中的电磁波分布集中, 而且混合波导中的电场强度远大于普通波导中的 电场强度。这些现象都很好地体现了混合波导结 构在光信号传输方面的优越性。

图4分析了电场强度与介质1长度L₁之间的





Fig. 2 The distribution of $\mid E_z \mid$ along z-axis in the traditional ridge waveguide



图 3 混合脊状等离子体波导的沿着 z 轴的 | E, | 分布





图 4 混合等离子体波导中 z 轴方向的 | E_z | 与几何参数 L₁的关系

Fig. 4 Dependence of $|E_z|$ on L_1 along z-axis in the hybrid ridge waveguide

变化关系。从图中可以看出, L_1 的变化主要影响 电场强度在 $z=4 \sim 6.5 \mu m$ 区间的分布,并且电场 强度随着 L_1 的增大而增大。

3.2 波导几何参数对输出特性的影响

降低波导损耗,实现无损传播以及带有增益 性质的传播是本文的重点研究内容。衡量波导传 输性能好坏的参数诸如有效折射率实部、有效面积、 传播长度、输出功率及传输损耗等。波导输出功率 与传输损耗的定性关系可由 $P_{out} = P_{in} \cdot \exp(-\alpha L)$ 定性描述, $P_{out} = P_{in}$ 分别为波导的输出与输入 功率。

在介质3高度 H_3 =0.2,0.4,0.6 µm,金属银 与介质2几何尺寸参数不变的条件下,波导归一 化输出功率与传输损耗随介质1长度 L_1 的变化 关系如图5与图6所示。从图5可以看出,波导 的输出功率随着 L_1 的增加呈减小的趋势。在 0.6~1.0 µm区间时,波导归一化输出功率减小 得很快;而在1.0~2.4 µm 区间时,输出功率的 减小则变得缓慢。从图5还可以看到, H_3 越大则 波导输出功率越大。图6中,当 L_1 处于0.6~1.0 µm 这一区间时,波导的传输损耗随 L_1 的增大而 减小,并且减小的速度很快,即在这一区间内,波 导的传输损耗对 L_1 的变化反映很灵敏;在1.0~ 2.4 µm 这一范围内,传输损耗随 L_1 的增大而增 大,传输损耗在1.0 µm 处达到最小值。

图 7 显示的是在与图 6 同一条件下,介质 3 为无增益性质时,波导传输损耗与介质 1 长度 L₁ 的变化关系。从图 7 中可以看出,波导为有损传 播,且损耗最大值达到 4 dB/μm,最小值也接近 0.5 dB/μm。这大幅度降低了波导整体方面的 性能。

在混合等离子体波导结构中,介质2参数的 改变对波导输出功率和传输损耗的影响很微小, 因此为了讨论方便,介质2可与介质3绑定在一



- 图 5 H₃ = 0.2,0.4,0.6 μm,其他参数保持不变时,归一 化输出功率随几何参数 L₁的变化关系。
- Fig. 5 Dependence of normalized output power on L_1 when $H_3 = 0.2, 0.4, 0.6 \mu m$, and the other parameters unchanged.



图 6 H₃ = 0.2,0.4,0.6 μm,其他参数保持不变时,传输 损耗与几何参数 L₁的关系。

Fig. 6 Dependence of propagation loss on L_1 when $H_3 = 0.2$, 0.4, 0.6 μ m, and the other parameters unchanged.



- 图 7 介质 3 为无增益性质时,传输损耗与几何参数 L₁的 关系。H₃ = 0.2,0.4,0.6 μm,其他参数保持不变。
- Fig. 7 Dependence of propagation loss on L_1 with dielectric 3 no gain property when $H_3 = 0.2, 0.4, 0.6 \mu m$, and the other parameters unchanged.

起同时改变参数的大小,波导整体结构不发生改 变,传输特性不受影响。图 8 和图 9 为 $L_3 = L_2 =$ 1.7,2.0,2.3 μ m,其它结构参数固定不变时,波 导输出功率与传输损耗随介质 1 长度 L_1 的变化 关系。从图 8 中可看出, L_1 在 0.8 ~0.914 μ m 之 间时,归一化波导输出功率在 0.8 以上; L_1 在 0.914 ~0.955 μ m 之间时,归一化波导输出功率 在 0.6 以上。从整体上观察,波导归一化输出功 率随 $L_3(L_2)$ 的增加而增大。

本文结构通过引入增益层,使波导的传输损 耗均在 0 dB 以下,也就是说此增益介质不仅补偿 抵消了波导的内部吸收损耗,而且起到了一定的 增益效果。从图 9 可以看到, L_1 在 0.8~1.2 μ m 之间时,波导的损耗随着 L_1 的增大呈减小的趋 势;在 L_1 = 1.2 μ m 以后,传输损耗随 L_1 的增大而 增大,但损耗仍然是 0 dB 以下。在 L_1 = 1.2 μ m



- 图 8 当 L₃(L₂) = 1.7,2.0,2.3 μm,其他参数保持不变 时,归一化输出功率随几何参数 L₁的关系。
- Fig. 8 Dependence of normalized output power on L_1 when L_3 $(L_2) = 1.7, 2.0, 2.3 \mu m$, and the other parameters
 - unchanged.



- 图 9 当 L₃(L₂) = 1.7,2.0,2.3 μm,其他参数保持不变 时,传输损耗随几何参数 L₁的关系。
- Fig. 9 Dependence of propagation loss on L_1 when $L_3(L_2) = 1.7, 2.0, 2.3 \mu m$, and the other parameters unchanged.

时,波导传输损耗达到最小值,约为 – 4 dB/ μ m。 波导传输损耗随 $L_3(L_2)$ 的减小而增大。

3.3 增益介质对波导传输特性的影响

混合脊状等离子体波导中增益层即介质 3 在 降低波导传输损耗方面起了至关重要的作用。在 等离子体波导中,波导的传输损耗主要由金属引 起,而金属材料的介电常数 $\varepsilon_{m} = \varepsilon_{\infty} - \frac{\omega_{p}^{2}}{\omega^{2} + i\omega\gamma_{m}},$ 其 中金属引起的损耗主要由介电常数的虚部 Im(ε_{m})产



图 10 在 n₃ = 3.1 - j0.005, 3.1 - j0.01, 3.1 - j0.015 情况下, 传输损耗随几何参数 L₁的变化关系。

Fig. 10 Dependence of propagation loss on L_1 when $n_3 = 3$. 1 – j0.005, 3. 1 – j0.01, 3. 1 – j0.015.

生,因此本文选用介电常数带有负虚部的 InP 作 为介质 3,利用其电磁参数的负虚部补偿由于金 属电磁参数的正虚部所引起的吸收损耗。根据表 面等离子激元放大原理^[18]而取得的 InP 的电磁 参数为 $\varepsilon_3 = 9.61 - j0.0183, n_3 = 3.1 - j0.003$ 。图 10 为在介质 3 折射率虚部 Im(n_3)不同的情况下, 传输损耗随介质 1 长度 L_1 的变化关系。从图中 观察到,Im(n_3)的值越大,传输损耗愈小,波导增 益愈大。这更深层次地说明了带有负虚部的折射 率的重要性。

4 结 论

在微米尺度上设计了一种新型脊状混合等离 子体波导,在很大程度上降低了器件在加工制作 方面的难度与要求。采用 2D-FDTD 方法模拟了 TM 模式下波导结构的电场分布图,分析研究了 波导的输出功率以及传输损耗与波导的结构参数 以及电磁参数之间的相互变化关系。结果表明, 在混合等离子体波导中,所引入的介电常数带有 负虚部的增益介质补偿了波导内部的损耗,使波 导的传输损耗在 0 dB 以下,波导性能与传统脊状 等离子体波导相比也得到了很大的提高。

参考文 献:

- [1] Maier S A. Plasmonic: Fundamentals and Applications [M]. New York: Springer, 2007:21-25.
- [2] Barnes W L, Dereux A, Ebbesen T W. Surface plasmon subwavelength optics [J]. Nature, 2003, 424:824-830.
- [3] Ozbay E. Plasmonics: Merging photonics and electronics at nanoscale dimensions [J]. Science, 2006, 311:189-193.
- [4] Bozhevolnyi S I, Volkov V S, Devaux E, et al. Channel plasmon subwavelength waveguide components including interferometers and ring resonators [J]. Nature, 2006, 440:508-511.
- [5] Zhuang T J, Su Z S, Liu Y D, et al. Enhanced performance of small molecular weight organic solar cells by incorporating Ag nanoparticles [J]. Chin. J. Lumin. (发光学报), 2011, 32(12):1266-1270 (in Chinese).
- [6] Veronis G, Fan S H. Guided subwavelength plasmonic mode supported by a slot in a thin metal film [J]. Opt. Lett., 2005, 30(24):3359-3361.
- [7] Dionne J A, Sweatlock L A, Atwater H A, et al. Plasmon slot waveguides: Towards chip-scale propagation with subwavelength-scale localization [J]. Phys. Rev. B, 2006, 73(3):035407-1-9.
- [8] Moreno E, Garcia-Vidal F J, Rodrigo S G, et al. Channel plasmon-polaritons: modal shape, dispersion, and losses [J]. Opt. Lett., 2006, 31(23):3447-3449.
- [9] Moreno E, Rodrigo S G, Bozhevolnyi S I, et al. Guiding and focusing of electromagnetic fields with wedge plasmon polaritons [J]. Phys. Rev. Lett., 2008, 100(2):1-4.
- [10] Boltasseva A, Volkov V S, Nielsen R B, et al. Triangular metal wedges for subwavelength plasmon-polariton guiding at telecom wavelengths [J]. Opt. Exp., 2008, 16(8):5252-5260.
- [11] Xiao X X, Chen Y G. Investigation of optical wave coupling between two subwavelengh slits in metallic sheet [J]. Chin.
 J. Lumin. (发光学报), 2009, 30(5):682-686 (in Chinese).
- [12] Oulton R F, Sorger V J, Genov D A, et al. A hybrid plasmonic waveguide for subwavelength confinement and long-range

propagation [J]. Nat. Photon., 2008, 2(8):496-500.

- [13] Dai D A, He S L. A silicon-based hybrid plasmonic waveguide with a metal cap for a nano-scale light confinement [J]. Opt. Exp., 2009, 17(19):16646-16653.
- [14] Bian Y S, Zheng Z, Zhao X, et al. Symmetric hybrid surface plasmon poariton waveguides for 3D photonic integration [J]. Opt. Exp., 2009, 17(23):21320-21325.
- [15] Flammer P D, Banks J M, Furtak T E, et al. Hybrid plasmon/dielectric waveguide for integrated silicon-on-insulator optical elements [J]. Opt. Exp., 2010, 18(20):21013-21023.
- [16] Bian Y S, Zheng Z, Liu Y, et al. Hybrid wedge plasmon polariton waveguide with good fabrication-error tolerance for ultra-deep-subwavelength mode confinement [J]. Opt. Exp., 2011, 19(23):22417-22422.
- [17] Dai D X, Shi Y C, He S L, et al. Gain enhancement in a hybrid plasmonic nano-waveguide with a low-index or high-index gain medium [J]. Opt. Exp., 2011, 19(14):12925-12936.
- [18] Wang X Y, Zhu Z W. A novel tunable filter using magnetized plasma defect in one demension photonic crystal [J]. *Chin. J. Lumin.* (发光学报), 2012, 33(7):747-753 (in English).
- [19] Maziar P N, Kevin T, Yeshaiahu F. Gain assisted propagation of surface plasmon polaritons on plannar metallic waveguide [J]. Opt. Exp., 2004, 12(17):4072-4079.

向您推荐《液晶与显示》——中文核心期刊

《液晶与显示》是中国最早创办的液晶学科专业期刊,也是中国惟一的液晶学科和显示技术领域中 综合性专业学术期刊。它由中国科学院长春光学精密机械与物理研究所、中国光学光电子行业协会液 晶专业分会和中国物理学会液晶分会主办,科学出版社出版。

《液晶与显示》以研究报告、研究快报、综合评述和产品信息等栏目集中报道国内外液晶学科和显示技术领域中最新理论研究、科研成果和创新技术,及时反映国内外本学科领域及产业信息动态,是宣传、展示我国该学科领域和产业科技创新实力与硕果,进行国际交流的平台。本刊是英国《科学文摘》 (INSPEC)、美国《化学文摘》(CA)、俄罗斯《文摘杂志》(AJ)、美国《剑桥科学文摘》(CSA)、"中国科技 论文统计源期刊"等 20 余种国内外著名检索刊物和文献数据库来源期刊。

《液晶与显示》征集有关各类显示材料及制备方法、材料物理和化学、液晶光学与光子学、生物液晶;液晶显示、有机电致发光显示、等离子体显示、阴极射线管显示、发光二极管显示、场发射显示、3D显示、微显示、真空各类荧光显示、电致变色显示及其他新型显示、各类显示器件物理和制作技术、各类显示新型模式和驱动技术、显示技术和器件应用、显示材料和器件的测试方法与技术、与显示相关的成像技术和图像处理等研究论文。《液晶与显示》热忱欢迎广大作者、读者广为利用,踊跃投稿和订阅。

《液晶与显示》为双月刊,国内定价40元。国内邮发代号:12-203;国外发行代号:4868BM。

地	址:长春市东南湖大路 3888 号	国内统一刊号: CN 22-1259/04
	《液晶与显示》编辑部	国际标准刊号: ISSN 1007-2780
邮	编:130033	国际刊名代码(CODEN): YYXIFY
电	话: (0431)86176059	传 真:(0431)84695881
E-n	nail: yjxs@ ciomp. ac. cn	网 址: www. yjyxs. com