

带有对称三角肋的混合表面等离子体波导

王志斌¹, 尹少杰^{1*}, 段晓宁¹, 邓玉萍², 董伟¹, 孔祥瑞¹

¹燕山大学电气工程学院, 河北 秦皇岛 066004;

²鞍山师范学院物理科学与技术学院, 辽宁 鞍山 114007

摘要 设计了一种金属三角肋和增益介质三角肋完全对称并带有圆柱形空气缝隙的新型混合等离子体波导结构。采用 COMSOL Multiphysics 软件, 分别仿真了波导的二维和三维耦合电场分布模型, 并基于有限元法分析了波导的模式特性。研究表明: 当工作波长为 1550 nm 时, 设计的波导结构具有很强的光场约束能力、超长的传输距离、超低的传输损耗和增益阈值。对波导的结构参数进行了优化, 当波导的有效模场面积达到 $0.0022\lambda^2$ 时, 波导的传输距离能够达到 69805 nm, 传输损耗低至 0.0017; 基于此波导的激光器也具有很低的增益阈值, 为 49.3 cm^{-1} 。最后研究了实际制备过程中可能出现的制作误差对波导性能的影响, 并分析得出此波导结构对制作误差具有较高的容忍度。与同类型带有空气缝隙的波导结构相比, 此波导的综合性能更优, 在各种集成纳米光子设备中具有很大的应用潜力。

关键词 光电子学; 等离子体激元; 混合表面等离子体波导; 有限元法; 模式特性; 制作误差容忍度

中图分类号 TN252

文献标志码 A

doi: 10.3788/CJL202047.0313001

Hybrid Surface-Plasmon Waveguide with Symmetrical Triangular Ribs

Wang Zhibin¹, Yin Shaojie^{1*}, Duan Xiaoning¹, Deng Yuping²,

Dong Wei¹, Kong Xiangrui¹

¹School of Electrical Engineering, Yanshan University, Qinhuangdao, Hebei 066004, China;

²School of Physics Science and Technology, Anshan Normal University, Anshan, Liaoning 114007, China

Abstract In this study, a novel hybrid plasma waveguide with a cylindrical air gap and fully symmetrical metal and gain medium triangular ribs was designed. The two- and three-dimensional coupled electric-field-distribution models of the waveguide were built using COMSOL Multiphysics software. The mode characteristics of the waveguide were analyzed based on the finite element method. Results indicate that the designed waveguide exhibits strong optical field constraint capability, overlong propagation distance, ultra-low propagation loss, and gain threshold at 1550-nm operating wavelength. We optimize the structural parameters of the waveguide, and when the effective mode field area of the waveguide reaches $0.0022\lambda^2$, the propagation length and propagation loss are 69805 nm and 0.0017, respectively. Furthermore, the laser based on the waveguide exhibits a low gain threshold of 49.3 cm^{-1} . Finally, the tolerance of the waveguide performance against these possible fabrication imperfections is analyzed. It is concluded that the waveguide structure exhibits good tolerance to possible fabrication imperfections. Compared with the same type of waveguide structures with air gap, the waveguide demonstrates good comprehensive performance and great potential in various integrated nanophotonic devices.

Key words optoelectronics; plasmon polaritons; hybrid surface plasmon waveguide; finite element method; modal properties; fabrication error tolerance

OCIS codes 250.5403; 240.6680; 230.7370

1 引 言

随着微型纳米加工技术的发展, 纳米光子学领

域取得了重大突破, 对小尺寸高性能纳米光子器件的需求越来越大^[1-2]。表面等离子体激元(SPPs)在空间尺寸上远小于自由空间波长, 能够突破衍射极

收稿日期: 2019-08-07; 修回日期: 2019-09-12; 录用日期: 2019-10-14

基金项目: 河北省自然科学基金(F2017203316)、河北省百人计划(4570018)

* E-mail: 13273366756@163.com

限^[3],具有独特光学性质的 SPPs 已被广泛应用于亚波长尺度的光学器件中。鉴于 SPPs 的优异特性,学者们提出了很多类型的基于 SPPs 的波导结构,如金属膜、金属棒、金属槽、金属楔等^[4-10]。传统的基于 SPPs 的波导虽然已经表现出很大的优势,但这种波导的传输损耗与光场约束能力之间存在着制约关系。为了实现更远的电磁模式传输距离和更严格的模场限制能力,研究人员提出了混合等离子体波导(HPW)^[11]。HPW 结合了等离子体模式和高折射率的介电模式,将光场限制在低折射层的狭小空间内,减小了传播损耗^[12]。由于前所未有的高效的光传输能力,HPW 已被视为下一代集成光学元件和电路的关键技术之一。Oulton 等^[11]提出了一种由半导体-绝缘体-金属(SIM)组成的混合等离子体波导,跨越间隙的 SPP 模式和波导模式的耦合实现了电场能量的储存功能,能够在非金属区域中实现亚波长下的传输能力。Bian 等^[13]提出了一种由 CdS 组成的新型混合等离子体结构,该结构在光学频率下具有较低的泵浦阈值,同时保持了亚波长光学模式尺度和显著降低的模态损耗。Chen 等^[14]提出了一种新颖的混合等离子体波导,该波导由薄金属膜两侧对称放置的电介质纳米线组成,通过介电圆柱波导模式和薄金属膜长程 SPP 模式之间的相互作用,可以实现深亚波长模式及较远的传播距离。Xu 等^[15]提出了一种圆柱形混合等离子体波导(CHPW),这种混合结构可以支持径向极化模式的有效传播,具有良好

的光场限制能力和较低的传输损耗。

基于以上研究背景,本文提出了一种完全对称并带有空气缝隙的 HPW。波导的介质包裹层中嵌入空气槽的优势在于空气缝隙作为低折射率介质具有存储能量的作用,可以降低能量的损耗,进而提高波导的性能。本结构主要由三角肋金属材料以及与之对称的倒立三角肋半导体材料组成。在工作波长为 1550 nm 时,本文基于有限元法利用 COMSOL Multiphysics 仿真软件分析了这种结构的模式特性等,并研究了基于此波导结构的激光器的特性,最后给出了制作本波导结构的方法并对可能出现的制作误差进行了分析讨论。结果表明,此结构具有较高的制作误差容忍度,这对该理论模型应用于实际生产具有重要意义。

2 结构设计与特性参数

2.1 结构设计

提出的完全对称并带有空气缝隙的 HPW 结构如图 1 所示。波导结构分为四部分,高折射率的砷化镓(GaAs)半导体作为增益介质,低折射率的二氧化硅(SiO₂)作为包裹层,中间嵌入圆柱形空气缝隙,底部是带有三角肋的金属材料银(Ag)。增益介质和金属顶端的尖角分别与空气缝隙接触,可以形成很好的模式局域性。圆形空气槽不存在棱角,更能集中电场。增益介质和金属三角肋分别嵌入二氧化硅包裹层中,两者完全对称。

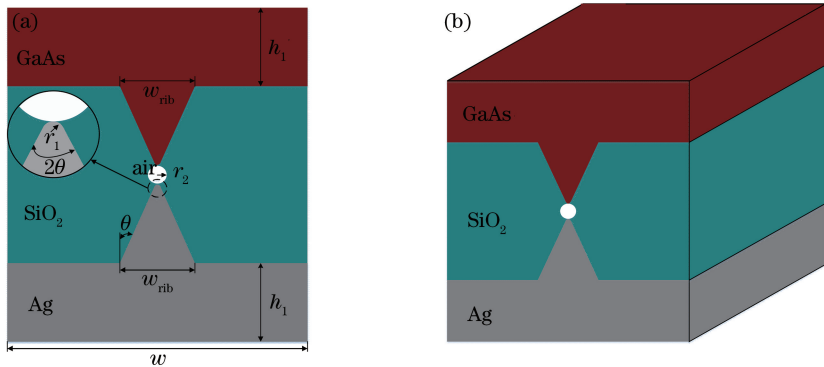


图 1 波导结构示意图。(a)二维剖面图;(b)三维立体图

Fig. 1 Schematics of waveguide. (a) Two-dimensional profile; (b) three-dimensional structure

波导结构的宽度 $w = 400$ nm,底部和顶端的高度 $h_1 = 100$ nm,两个三角肋的高度 h_2 均为 100 nm,三角肋顶端的角度均为 $2\theta = 74^\circ$,三角肋底边长度 $w_{rib} = 2h_2 \tan \theta$ 。由于在实际制作中边缘宽度为零的结构(如尖角等)很难实现,所以为了避免出现奇点,将三角肋的顶角进行圆角化处理,圆角半

径为 r_1 ,中间圆形空气缝隙的半径为 r_2 。

2.2 相关特性参数

波导的模式特性是衡量其性能的重要指标,主要包括模式有效折射率(n_{eff})、归一化模场面积(A_{SF})、传输距离(L_p)、传输损耗(α_{eff})、能量限制因子(Γ)和品质因数(α_{FOM})等。在 COMSOL

Multiphysics 软件中可以直接得出 HPW 的复折射率 N_{eff} , 则 HPW 的有效折射率为复折射率的实部, 即 $n_{\text{eff}} = \text{Re}(N_{\text{eff}})$ ^[16]。归一化模场面积表示为对光场能量的约束性, 计算公式为^[17-18]

$$A_{\text{SF}} = A_{\text{eff}}/A_0, \quad (1)$$

其中,

$$A_{\text{eff}} = \frac{1}{\iint |E|^4 dx dy} \left(\iint |E|^2 dx dy \right)^2, \quad (2)$$

$$A_0 = \lambda^2/4, \quad (3)$$

式中: A_{eff} 为有效模场面积; A_0 为衍射极限模场面积; E 为混合模式中电场强度的大小; λ 为真空中的输出波长。

传输距离定义为 HPW 中激元波的功率下降到初始值的 e^{-1} 时, 沿着金属-介电质界面传输的距离, 计算公式为^[17]

$$L_p = \frac{\lambda}{4\pi \text{Im}(N_{\text{eff}})}, \quad (4)$$

式中: $\text{Im}(N_{\text{eff}})$ 为模式复折射率的虚部。

波导中的传输损耗包括金属的欧姆损耗以及增益介质砷化镓与金属银耦合产生的辐射损耗, 用模式复折射率的虚部表示, 即 $\alpha_{\text{eff}} = \text{Im}(N_{\text{eff}})$ ^[18]。能量限制因子用于衡量波导中能量分布的情况, 本文定义为增益材料中能量与波导结构模场总能量的比值, 计算公式为^[18]

$$\Gamma = \frac{W_s}{W} = \frac{\iint_s W_s(x, y)^2 dx dy}{\iint_{\text{all}} W(x, y)^2 dx dy}, \quad (5)$$

式中: W_s 为增益材料中储存的能量; W 为模场的总能量。

增大模场的约束力, 传输距离就会变小。综合考虑两者的关系后, 引入品质因数。品质因数的定义为 L_p 与 A_{SF} 的比值^[17], 即

$$\alpha_{\text{FOM}} = L_p/A_{\text{SF}}. \quad (6)$$

3 电场分布与性能分析

3.1 电场分布

本文利用的数值计算方法是有限元法 (FEM)。该方法虽然将问题进行了简化, 但能保证结果的准确度, 已被广泛应用于纳米结构的计算中。在工作波长 $\lambda = 1550 \text{ nm}$ 的条件下, 使用 COMSOL Multiphysics 软件对波导结构进行仿真。金属银的相对介电常数可由 Drude 模型计算得出: $\epsilon_m = -9.2 + 0.3i$ ^[19]; 空气介质、砷化镓、二氧化硅的相对介电常数分别为 $\epsilon_{\text{air}} = 1, \epsilon_{\text{GaAs}} = 12.25, \epsilon_{\text{SiO}_2} = 2.25$ 。

首先建立波导结构的几何模型, 然后在每个区域定义不同的材料属性, 在进行模型网络划分时, 使用较细的网络划分密度来确保计算的准确性, 最后利用模式分析对波导模型进行求解。图 2(a)~(b)

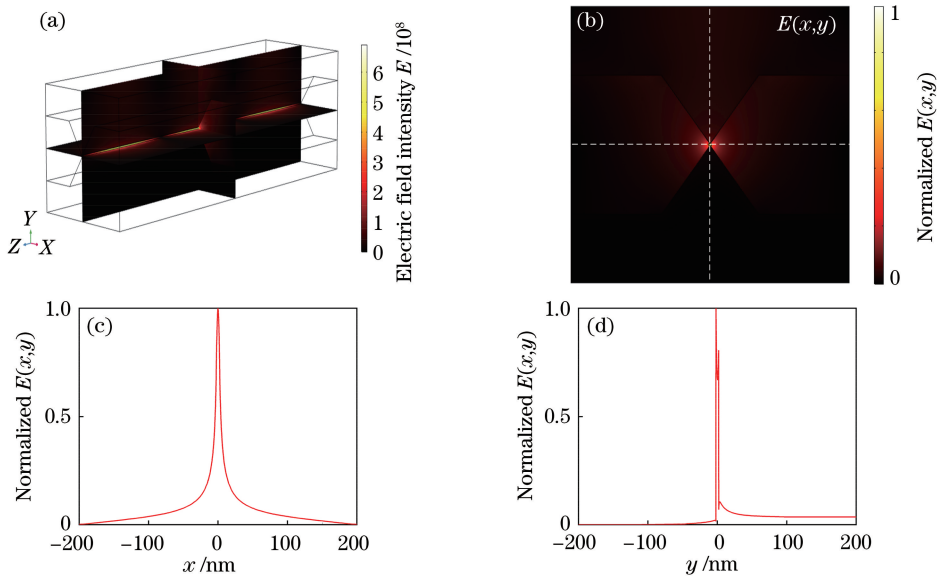


图 2 所设计波导的电场强度分布。(a) 三维立体电场强度分布图; (b) 二维电场强度分布图 ($r_1 = 1 \text{ nm}, r_2 = 2 \text{ nm}$);

(c) 沿图 2(b) 中水平虚线的归一化电场强度分布; (d) 沿图 2(b) 中垂直虚线的归一化电场强度分布

Fig. 2 Electric field intensity of proposed waveguide. (a) Three-dimensional electric field intensity; (b) two-dimensional electric field intensity ($r_1 = 1 \text{ nm}, r_2 = 2 \text{ nm}$); (c) normalized electric field intensity along the horizontal dashed line in Fig. 2(b); (d) normalized electric field intensity along the vertical dashed line in Fig. 2(b)

所示为波导结构的三维和二维耦合电场强度分布图 ($r_1=1\text{ nm}, r_2=2\text{ nm}$), 可以看出, 电场能量高度集中在增益介质肋与金属肋之间的圆形空气缝隙中, 电场能量在此高度增强是因为金属的 SPP 模式与砷化镓介质模式高度耦合。图 2(c)~(d) 所示为沿着图 2(b) 中的水平与垂直线的归一化电场强度分布图, 从该图中也能清晰地看到能量高度集中在两条线交点处的空气缝隙内, 并有少量的能量渗透于砷化镓介质中, 实现了波导结构对光场能量的高度局域和约束。

3.2 结构参数对波导模式特性的影响

以下通过改变结构的几何参数来更全面地分析波导的性能。图 3 为三角肋顶端圆角半径 $r_1=5, 10, 15, 20, 25, 30\text{ nm}$ 时, 空气缝隙半径 r_2 对波导模

式特性 (包括 $n_{\text{eff}}, A_{\text{SF}}, L_p, \Gamma, \alpha_{\text{eff}}$ 和 α_{FOM}) 的影响。由图 3(a)~(b) 可知: 当固定 r_1 不变时, 随着空气缝隙半径 r_2 不断增大, 有效折射率 n_{eff} 逐渐减小, 归一化模场面积 A_{SF} 逐渐增大。这因为空气缝隙变大会导致金属银与增益材料砷化镓之间的耦合强度减小, 增大的空气缝隙也会使高度集中在间隙内的能量减少, 故而波导对光场的约束能力减弱。当 $r_1=15\text{ nm}, r_2=2\text{ nm}$ 时, 归一化模场面积 A_{SF} 达到了最小值 0.0035, 且其最大值在 0.047 附近, 说明该波导的能量可以高度集中在狭小的空间内。由图 3(c) 可以看出: 随着空气缝隙半径 r_2 增大, 增益材料中的能量占模场总能量的比值先减小后增大, 所以限制因子的值先减小然后逐渐增大, 其最小值约为 0.642, 这表明波导中的能量大部分来自增益介质砷化镓。

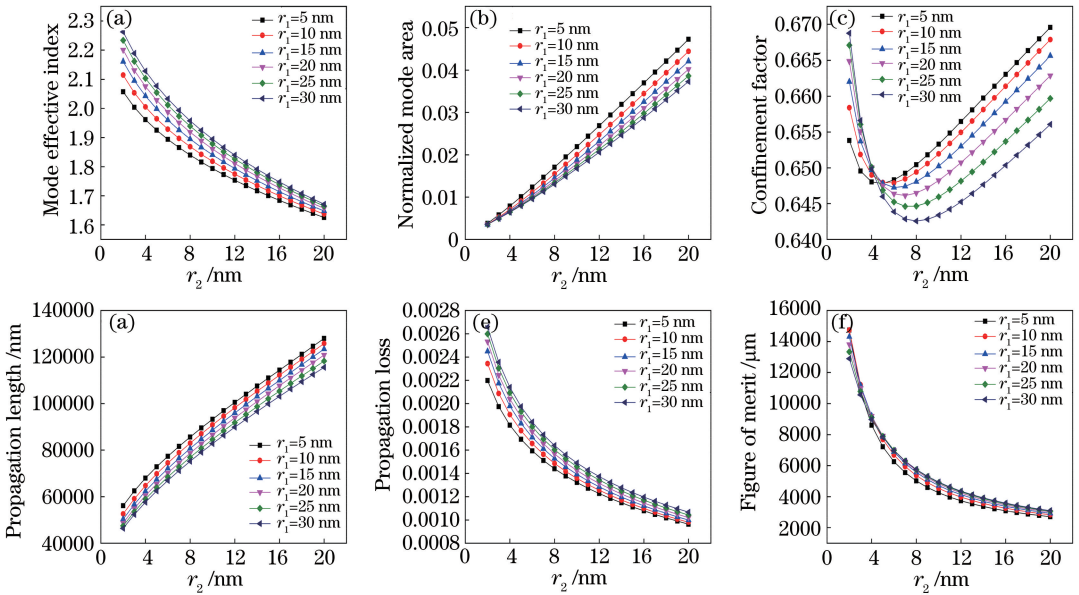


图 3 所设计波导结构的模式特性随 r_1 和 r_2 的变化。

(a) 模式有效折射率; (b) 归一化模场面积; (c) 限制因子; (d) 传输距离; (e) 传输损耗; (f) 品质因数

Fig. 3 Variations of mode characteristics of proposed waveguide structure with r_1 and r_2 . (a) Mode effective index; (b) normalized mode area; (c) confinement factor; (d) propagation length; (e) propagation loss; (f) figure of merit

随着空气缝隙半径 r_2 增大, 高度集中在空气缝隙内的能量逐渐分散于低折射率介质中, 使得传输过程中的欧姆损耗减少, 所以 r_2 增大, 传输损耗 α_{eff} 降低, 如图 3(e) 所示。在 $r_1=5\text{ nm}, r_2=20\text{ nm}$ 时, 传输损耗取得最小值 0.00096, 整体的平均损耗也很小, 为 0.0014, 极大地降低了波导的传输损耗, 并增大了波导的传输距离, 传输距离最大为 128017 nm。从图 3 中还可得知, α_{eff} 和 A_{SF} 的变化趋势恰好相反。随着损耗降低, A_{SF} 却在逐渐变大, 原因是空气缝隙的增大使传输损耗减少, 导致空气中的峰值能量密度减小, 模场限制能力减弱。因此不能简单地通过

增大空气缝隙半径 r_2 来提高波导的传输距离, 因为这将导致归一化模场面积 A_{SF} 变大, 波导对模场的约束能力减弱, 降低波导的性能。故而本文引入品质因数来平衡这一矛盾。如图 3(f) 所示, 随着空气缝隙半径 r_2 增大, 品质因数逐渐减小, 增大 r_1 可以增大品质因数的值, 但效果不显著, 说明 r_1 对品质因数的影响较小。从图 3 可知, 当 $r_1=10\text{ nm}, r_2=2\text{ nm}$ 时, 品质因数的值最大, 为 14739 μm , 此时波导的光场限制能力较好。

从图 3 可知, 增大三角肋顶端圆角半径 r_1 时, 金属银与高增益介质砷化镓的重叠面积逐渐增大,

则金属银与砷化镓材料的耦合强度变大,使波导的模场约束能力增强,所以保持 r_2 不变时,归一化模场面积随着 r_1 的增大而减小。随着金属与增益材料的有效接触面积变大,耦合程度增加,传输过程中的能量损耗增加,传输距离变小。

3.3 结构参数对激光器增益阈值的影响

将设计的低传输损耗的 HPW 应用于纳米激光器中,本文仅研究结构参数对激光器增益阈值的影响。激光器的谐振腔长度 L 和端面反射率 R 是影响增益阈值大小的主要因素。高折射率半导体砷化镓可以作为谐振腔的材料,取 $L = 30 \mu\text{m}$,而端面反射率 R 和增益阈值 g_{th} 的计算公式分别为^[20]

$$R = (n_{\text{eff}} - 1) / (n_{\text{eff}} + 1), \quad (7)$$

$$g_{\text{th}} = [k_0 \alpha_{\text{eff}} + \ln(1/R)/L] / \Gamma(n_{\text{eff}}/n_{\text{wire}}), \quad (8)$$

式中: $k_0 = 2\pi/\lambda$; n_{wire} 为半导体材料的折射率,即 $n_{\text{wire}} = n_{\text{GaAs}} = 3.5$ 。图 4 为增益阈值受三角肋顶端圆角半径 r_1 和空气缝隙半径 r_2 影响的变化曲线图。

基于此波导结构的纳米激光器整体上具有很低的增益阈值,这有利于激光的激发。从图 4 中可以看出:当 r_1 为定值时,随着 r_2 增加,增益阈值呈不断减小的趋势;若保持 r_2 不变,则随着 r_1 增大,增益阈值不断增大,但当 r_2 较大时, r_1 的变化对增益阈值的影响不断减小,且随着 r_1 减小及 r_2 增大,增益阈值的变化趋于稳定。通过减小 r_1 和增加 r_2 可以得到较低的阈值水平,当 $r_1 = 5 \text{ nm}$ 且 $r_2 = 20 \text{ nm}$ 时,增益阈值最小,约为 21.5 cm^{-1} ,整体的平均阈值可以达到 39.2 cm^{-1} 。

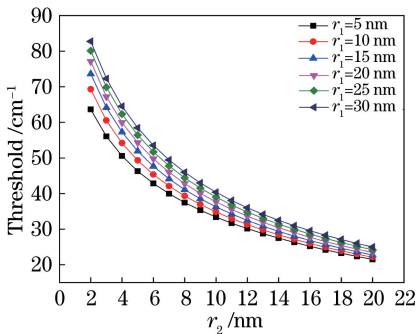


图 4 激光器的增益阈值随 r_1 和 r_2 的变化

Fig. 4 Variation of threshold of laser with r_1 and r_2

4 波导制作与结构容差度分析

4.1 波导的制作方法

本文所设计的波导结构较为简单,在一定程度上是可以实现的,但由于直接在一个整体中切割制作,中间的圆柱形空气缝隙不易得到,所以将此波导

分成两个部分,最后通过组合装配得到一个完整的波导结构^[21]。制作原理如图 5 所示。

使用磁控溅射法制备一层均匀且厚度为 200 nm 、宽度 $w = 400 \text{ nm}$ 的金属层,然后利用聚焦离子束(FIB)^[16]技术在金属层的中央刻蚀一个高度 $h_2 = 100 \text{ nm}$ 的三角肋,并将三角肋顶角进行圆角化处理,圆角半径为 r_1 。同样,可以利用电子束曝光技术在高折射率砷化镓材料上刻蚀相同的三角肋,如图 5(a)所示。再利用等离子体增强化学气相沉积(PECVD)技术在带有三角肋的金属层上形成一定厚度的二氧化硅包裹层,使二氧化硅低折射率层覆盖整个三角肋,并用化学-机械抛光(CMP)^[22]工艺制成平坦的顶面,如图 5(b)所示。之后利用干蚀法在二氧化硅包裹层顶端的中间刻蚀出半径为 r_2 的半圆柱形空气槽,使圆柱形空气槽与三角肋顶端相切,如图 5(c)所示。最后采用微纳米操作技术将两个带有半圆形空气槽的结构完全对称地放置在一起,如图 5(d)所示。基于现有的纳米光刻技术,以上都是相对成熟的工艺,对本波导结构的制作及利用具有重要意义。

4.2 结构的容差度分析

根据上述方法能够制作出本文所提出的波导结构,但实际制作时不能完美地实现理论上的结构,所以很有必要研究实际制作中可能出现的偏差对波导结构性能的影响。若很小的误差就能产生很大的影响,则说明本结构对工艺要求过高,很难实现,反之则说明本结构有较高的制作误差容忍度,方便实际制作。在实际制作中,金属三角肋和增益材料三角肋是分开制作的,它们之间的精确对准很难控制,易导致圆形空气槽的上下两个半圆沿中心偏离。

如图 6(a)所示,以金属三角肋(即圆形空气槽的下半圆)为基准,上半圆向左偏移(增益材料三角肋在金属三角肋的左边)记为负,上半圆向右偏移(增益材料三角肋在金属三角肋的右边)记为正。图 6(b)为 $\Delta x = -6 \text{ nm}$ 时,波导的二维电场分布图。

图 7 所示为 r_2 、 Δx 对波导模态特性的影响,取 $r_2 = 5, 10, 15, 20, 25, 30 \text{ nm}$, Δx 从 -15 nm 变化到 15 nm 。从图 7 可知:每条曲线都较为平稳,表明制造误差对波导模态特性的影响非常小。在图 7(a)中,改变 Δx 的大小, n_{eff} 最大变化了 1.13% 。当 $r_2 = 5 \text{ nm}$ 、 $\Delta x = 15 \text{ nm}$ 时,对 n_{eff} 造成的影响最大,但此时由于空气缝隙的半径较小,且偏移误差过大,圆形空气的上下两个半圆没有接触,空气槽失去作用,过大的偏移误差已造成结构

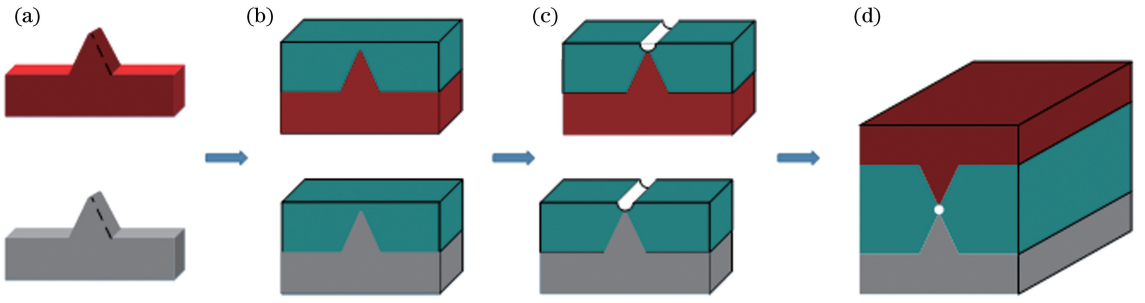


图 5 所提出的带有空气缝隙 HPW 结构的制作流程示意图

Fig. 5 Fabrication process for proposed hybrid plasma waveguide structure with air gap

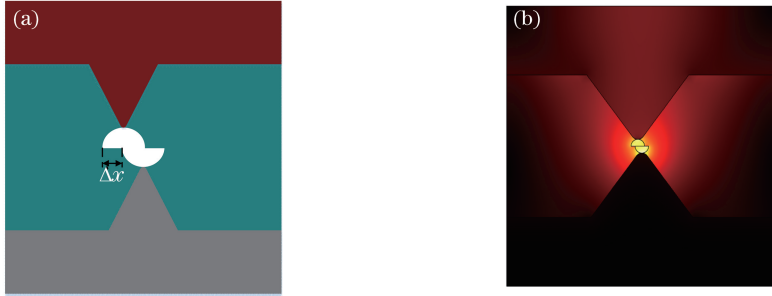


图 6 具有横向对准偏差的二维波导示意图以及波导的二维电场分布图。(a)上下两部分偏差为 Δx 的二维波导示意图;(b)对准偏差 $\Delta x = -6$ nm 时,波导的二维电场强度分布图($r_1 = r_2 = 10$ nm)

Fig. 6 Two-dimensional profile of waveguide with lateral alignment deviation and two-dimensional electric field distribution of waveguide. (a) Two-dimensional profile of waveguide with lateral alignment deviation, and the deviation of the upper and lower parts is Δx ; (b) when alignment $\Delta x = -6$ nm, two-dimensional electric field intensity distribution of waveguide ($r_1 = r_2 = 10$ nm)

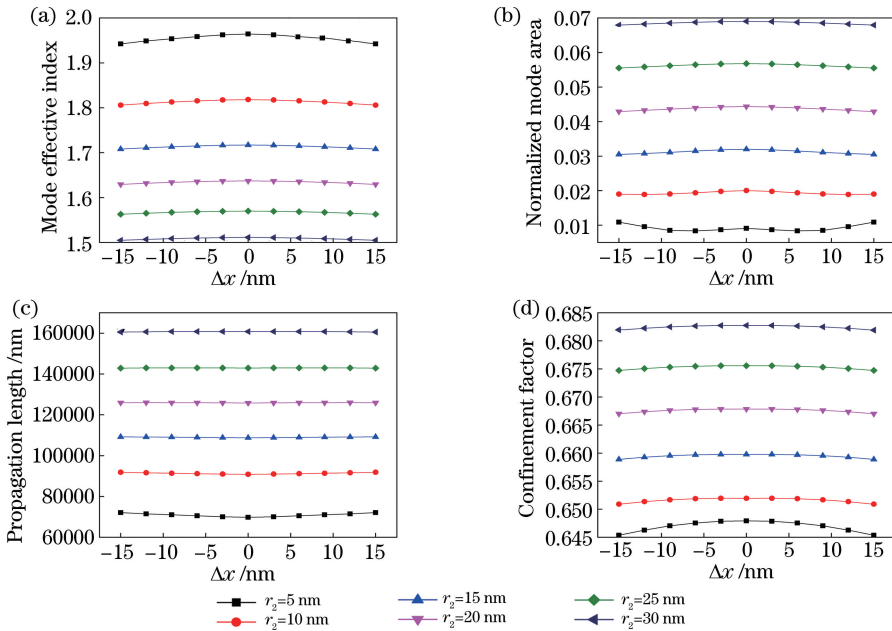


图 7 波导结构上下两部分的对准偏差 Δx 对其性能的影响。

(a)对模式有效折射率的影响;(b)对归一化模场面积的影响;(c)对传输距离的影响;(d)对限制因子的影响

Fig. 7 Influences of alignment deviation between the upper and lower parts of waveguide structure on its performance. (a) Influence on mode effective index; (b) influence on normalized mode area; (c) influence on propagation length; (d) influence on confinement factor

的严重变形,不予采纳,所以偏移误差对 n_{eff} 的影响小于 1.13%。偏移误差对归一化模场面积有一定的影响,归一化模场面积的最大变化为 7.7%。偏移误差对传输距离的影响较小,传输距离的变化为 3.3%。偏移误差对限制因子的影响更小,限制因子的变化只有 0.4%,可忽略不计。综上可知,空气半圆槽的偏移误差对性能的影响很小,说明此波导结构具有良好的制作误差容忍度。

5 结 论

本文设计了一种金属三角肋和增益介质三角肋完全对称并嵌入圆柱形空气缝隙的混合等离子体波导结构,该结构能够有效地提高波导的性能。利用 COMSOL Multiphysics 软件,基于 FEM 的数值计算方法研究了几何参数对该波导性能的影响。研究结果表明,适当调整波导结构的几何参数可以有效地提高波导的传输性能,在一定范围内通过减小三角肋顶端圆角半径 r_1 ,增大空气缝隙半径 r_2 能够增加波导的传输距离,降低传输损耗,同时也能使激光器的增益阈值减小,但会增大归一化模场面积,使波导的光场限制能力减弱。综合考虑选取 $r_1 = 10 \text{ nm}$ 和 $r_2 = 5 \text{ nm}$ 作为波导的最佳尺寸,此时归一化模场面积可达到 0.009078,有效模场面积达到 $0.0022\lambda^2$,传输距离为 69805 nm,传输损耗为 0.0017,激光器的增益阈值也具有很低的水平 (49.3 cm^{-1})。与文献[18]所提出的低阈值纳米激光器相比,在光场约束能力接近的情况下,本结构的增益阈值降低了 97%。与文献[23]报道的同样带有空气缝隙的波导结构相比,在本结构光场约束能力更强的情况下,传输损耗降低了 87.3%,增益阈值降低了 89.4%,波导的整体性能都有较大提高。最后通过分析说明了此波导结构对制作过程中可能出现的制作偏差具有较高的容忍度,这对波导的实际应用具有重要意义。本文所提出的新型波导结构可被广泛应用于密集光子集成电路和其他纳米光子元件等亚波长领域。

参 考 文 献

- [1] Koenderink A F, Alu A, Polman A. Nanophotonics: shrinking light-based technology[J]. *Science*, 2015, 348(6234): 516-521.
- [2] Kinsey N, Ferrera M, Shalaev V M, et al. Examining nanophotonics for integrated hybrid systems: a review of plasmonic interconnects and modulators using traditional and alternative materials [Invited] [J]. *Journal of the Optical Society of America B*, 2015, 32(1): 121-142.
- [3] Gramotnev D K, Bozhevolnyi S I. Plasmonics beyond the diffraction limit[J]. *Nature Photonics*, 2010, 4(2): 83-91.
- [4] Boltasseva A, Volkov V S, Nielsen R B, et al. Triangular metal wedges for subwavelength plasmon-polariton guiding at telecom wavelengths[J]. *Optics Express*, 2008, 16(8): 5252-5260.
- [5] Wang Y P, Ma Y G, Guo X, et al. Single-mode plasmonic waveguiding properties of metal nanowires with dielectric substrates[J]. *Optics Express*, 2012, 20(17): 19006-19015.
- [6] Guo J P, Adato R. Control of 2D plasmon-polariton mode with dielectric nanolayers[J]. *Optics Express*, 2008, 16(2): 1232-1237.
- [7] Moreno E, Rodrigo S G, Bozhevolnyi S I, et al. Guiding and focusing of electromagnetic fields with wedge plasmon polaritons [J]. *Physical Review Letters*, 2008, 100(2): 023901.
- [8] Lee I M, Jung J, Park J, et al. Dispersion characteristics of channel plasmon polariton waveguides with step-trench-type grooves[J]. *Optics Express*, 2007, 15(25): 16596-16603.
- [9] Xue W R, Guo Y N, Zhang J, et al. Propagation properties of a modified slot surface plasmonic waveguide [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2009, 27(14): 2634-2641.
- [10] Arbel D, Orenstein M. Plasmonic modes in W-shaped metal-coated silicon grooves [J]. *Optics Express*, 2008, 16(5): 3114-3119.
- [11] Oulton R F, Sorger V J, Genov D A, et al. A hybrid plasmonic waveguide for subwavelength confinement and long-range propagation [J]. *Nature Photonics*, 2008, 2(8): 496-500.
- [12] Sorger V J, Ye Z L, Oulton R F, et al. Experimental demonstration of low-loss optical waveguiding at deep sub-wavelength scales [J]. *Nature Communications*, 2011, 2: 331.
- [13] Bian Y S, Zheng Z, Zhao X, et al. Hybrid plasmonic structures based on CdS nanotubes: a novel route to low-threshold lasing on the nanoscale[J]. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 2012, 45(50): 505105.
- [14] Chen L, Zhang T, Li X, et al. Novel hybrid plasmonic waveguide consisting of two identical dielectric nanowires symmetrically placed on each side of a thin metal film [J]. *Optics Express*, 2012, 20(18): 20535.
- [15] Xu J, Shi N N, Chen Y L, et al. TM_{01} mode in a cylindrical hybrid plasmonic waveguide with large propagation length [J]. *Applied Optics*, 2018, 57

- (15): 4043-4047.
- [16] Bian Y S, Zheng Z, Zhao X, et al. Modal properties of triangular metal groove/wedge based hybrid plasmonic structures for laser actions at deep-subwavelength scale [J]. *Optics Communications*, 2013, 297: 102-108.
- [17] Feng D D, Li Z Q, Yue Z, et al. Hybrid surface plasmonic nanolaser with three dimensional optical field confinement [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2017, 44(10): 1001005.
冯丹丹, 李志全, 岳中, 等. 三维光场限制的混合表面等离子体纳米激光器 [J]. *中国激光*, 2017, 44(10): 1001005.
- [18] Li Z Q, Piao R Q, Zhao J J, et al. A low-threshold nanolaser based on hybrid plasmonic waveguides at the deep subwavelength scale [J]. *Chinese Physics B*, 2015, 24(7): 077303.
- [19] Tian J P, Sun M. Modal properties of novel hybrid plasmonic waveguide consisting of two identical dielectric nanotubes symmetrically placed on both sides of a thin metal film [J]. *The European Physical Journal D*, 2016, 70: 4.
- [20] Liu J T, Xu B Z, Zhang J, et al. Gain-assisted indented plasmonic waveguide for low-threshold nanolaser applications [J]. *Chinese Physics B*, 2012, 21(10): 107303.
- [21] Qin X J, Guo Y N, Xue W R. Numerical simulation of a surface plasmonic waveguide with double parallel columniform metallic nanorods coated with gain medium [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2011, 38(3): 0310001.
秦小娟, 郭亚楠, 薛文瑞. 带有增益介质包层的两个平行圆柱形纳米金属棒构成的表面等离子体光波导的数值模拟 [J]. *中国激光*, 2011, 38(3): 0310001.
- [22] 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]. *Optics Express*, 2011, 19(14): 12925-12936.
- [23] Li Z Q, Peng T, Zhang M, et al. Nanolaser based on hybrid plasmonic waveguide [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2016, 43(10): 1001005.
李志全, 彭涛, 张明, 等. 基于混合表面等离子体波导的纳米激光器 [J]. *中国激光*, 2016, 43(10): 1001005.