

通信波长下混合表面等离子体纳米激光器的研究

王志斌, 董伟*

燕山大学电气工程学院, 河北 秦皇岛 066004

摘要 设计一种包含顶角经过圆角处理的金属脊和特定三角形空气间隙层的混合表面等离子体激元波导结构, 这种特定三角形结构和其他材料的组合有效提高了纳米激光器的性能。应用有限元法, 借助于 COMSOL Multiphysics 软件分别构建二维平面和三维体积模型, 使用模态分析模块对该波导结构的波导特性与激光器特性进行分析。结果表明, 当工作波长为 1550 nm 时, 所设计波导的光场约束可以达到较好的亚深波长水平, 同时保持较大的传输长度。该波导结构可以实现表面等离子体激元模式和纳米线模式之间的超强耦合, 耦合强度最高可以达到 0.96, 传播长度可以达到 28047 nm。将该结构应用于激光器, 通过调整波导设计参数获得了高质量因子、低能量损耗、低阈值极限、超小的有效模式体积。与单一三角形空气间隙结构相比, 在相同的参数下, 所设计的结构具有更强的光场限制能力和微腔束缚能力。该结构有望应用于片上互连、光子集成电路、光学存储、光信号处理等领域。

关键词 激光光学; 光栅; 混合表面等离子体; 纳米激光器; 有限元法; 通信波长

中图分类号 TN25; TN24

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201845.0401013

Hybrid Surface Plasmonic Nano-Laser at Communication Wavelength

Wang Zhibin, Dong Wei

Institute of Electrical Engineering, Yanshan University, Qinhuangdao, Hebei 066004, China

Abstract We propose a hybrid surface plasmonic waveguide structure containing a metal ridge with rounded corners and a special triangular air gap layer. The combination of this particular triangular structure and other materials effectively improves the performance of nano-lasers. We apply the finite element method and use COMSOL Multiphysics software to construct the two-dimensional and three-dimensional models, and use the modal analysis module to analyze the waveguide characteristics of the waveguide structure and the parameters of the laser. The results indicate that the optical field confinement of the designed waveguide can reach a better deep-subwavelength level while maintaining a long propagation length at the 1550 nm operating wavelength. The waveguide structure enables super strong coupling between the surface plasmon polariton mode and the cylindrical mode. The maximum coupling strength is 0.96 and the propagation length is 28047 nm. When this structure is applied to nano-lasers, we adjust the waveguide design parameters to obtain the higher quality factor, lower energy loss, threshold limit, and ultra-small effective mode size. Compared to the previously reported structure with a single triangular air gap, this structure has stronger capacity of field confinement and microcavity bound with the same geometric parameters. So this structure is expected to be applied in the fields of on-chip interconnects, photonic integrated circuits, optical storage, and optical signal process.

Key words laser optics; gratings; hybrid surface plasmons; nano-laser; finite-element method; communication wavelength

OCIS codes 140.3945; 050.6624; 240.6680

收稿日期: 2017-08-29; **收到修改稿日期:** 2017-10-22

基金项目: 国家自然科学基金青年基金(61107039)、河北省自然科学基金青年基金(F2012203202)、河北省百人计划(4570018)

作者简介: 王志斌(1977—), 男, 博士, 教授, 硕士生导师, 主要从事光电测试与光纤通信方面的研究。

E-mail: ioe@ysu.edu.cn

* **通信联系人.** E-mail: 1962899053@qq.com

1 引 言

近年来,纳米光子学应用在数量和多样性上呈现爆炸式增长^[1-2]。在光子学和光电子学领域,半导体或光子晶体介质腔虽然可以被设计成具有超高Q因子的结构,但光学模式的物理尺寸普遍存在衍射极限,并且总是大于单位立方波长(λ/n^3)。由于缺乏可用于光学元件和器件的有用光学性质,几十年来,在上述领域中金属材料的发展相当缓慢。最近,金属材料在等离子体激元框架中表现出的性质引起了研究人员的兴趣^[3],利用金属纳米结构的表面等离子体共振可实现超小型体积和高局部场增强^[4],同时,等离子体激元系统在亚波长范围内控制光物相互作用的能力为在纳米光子学中产生许多新颖的概念和应用提供了新的契机^[5-6]。表面等离子体激元(SPP)是沿着金属和电介质之间的界面传播的电磁波模式,其功率在两种介质中呈指数衰减。SPP被认为是纳米光子集成电路中引导光的合适候选者,因为它可以限制和引导超过衍射极限的纳米尺度的光^[7]。到目前为止,人们已经在实验上证明了各种等离子体结构,例如金属缝结构^[8]、金属槽波导^[9]、金属绝缘体-金属波导^[10]和金属楔形波导^[11]。然而,由于金属部件引起较大的欧姆损耗,这类波导结构存在传播损耗与光场限制能力之间的制约关系^[12]。一般说来,良好的场限制通常伴随着非常短的传播长度。为了权衡场约束和传播长度之间的关系,李志全等^[12-13]提出了一种混合等离子体激元波导(HPW),实现了表面等离子激元在较强的模式约束下的长距离传播。基于HPW的以上优点,2009年Oulton等^[14]研制出一种半导体纳米线表面等离子体激光器。

传统的微型半导体激光器自1960年起经历了近60年的不断发展,为光互连、生物检测、医疗、纳米光刻和数据存储等领域提供了高性能的光源。不同于传统微型半导体激光器^[14],表面等离子体纳米激光器不是光学谐振腔在光学系统中的抽运和反馈,而是在电磁波作用下自由电子的受激振荡,它还可以在纳米尺度上产生强烈的局域表面等离子体共振^[15-16]。然而,在实际应用中等离子体纳米激光器因为传输损耗高和激光阈值大而影响其进一步发展,增益材料的选择亦是限制获取可用阈值的重要因素之一^[17]。因此,将混合SPP的框架应用到微型

激光器中是现阶段提高激光器性能的一个重要研究方向^[18]。随着微纳米器件加工技术和工艺的日益成熟,众多具有特殊潜质的基于HPW的纳米激光器得到了深入的发展。2013年,Bian等^[19]设计了基于纳米线的HPW结构的激光器,实现了微型激光器的亚波长尺度和低阈值;2014年,Lü等^[20]提出HPW结构,并将该结构应用到激光器中。

根据微型激光器的发展现状,在HPW结构的基础上,为了进一步提高纳米激光器的综合性能,本文提出一种具有独特三角形腔的HPW结构,在1550 nm通信波长下优化该波导结构,并将其应用于激光器。将该结构在COMSOL Multiphysics软件中应用有限元法进行仿真研究,结果显示,该结构不仅具有优良的波导特性,而且在激光器应用中的性能也非常突出,尤其是在衡量激光器性能的重要参考因素方面,如模式约束因子、模态损耗、增益阈值、品质因数和有效模式体积等,表现出了优越的性能,使得激光器在小型化和高集成度等方面的性能得到进一步优化。

2 模型设计与制备方法

提出的具有独特三角形空气腔的HPW结构如图1所示。该波导结构在单一楔形金属的顶端覆盖带有特定三角形空气缝隙的介质层,并在介质层中镶嵌砷化镓(GaAs)纳米线。其中,深蓝色部分是金属材料银(Ag),为了规避奇点带来的影响、降低制作难度,对楔形金属的顶端尖角做圆角处理,使其尖角的顶端圆角的半径为 r_1 ;粉色部分为二氧化硅(SiO_2)介质层;白色部分为低折射率的空气缝隙。设计三角形的空气缝隙和楔形金属是为了提高亚波长光子集成中的电路和元件的密度,提高场约束能力。研究表明,金属和电介质之间的狭窄空间可以限制光线,同时锋利的金属边缘具有良好的场约束能力^[21]。在该波导结构下,楔形金属的顶角定义为 $\theta(\theta=2\alpha)$,金属材料的高 $h_1=100$ nm,金属楔形的高为 $a/2\tan\alpha+r_1(1/\sin\alpha)$, a 为楔形三角形金属的底边长,金属宽度 $w=400$ nm。金属楔形顶端到纳米线的距离为 h ,纳米线的半径为 r ,长度 $L=10$ μm ,纳米线介质的圆心与缝隙三角形的顶点重合。 $h_3=10$ nm。设工作波长为1550 nm,在该波长下,Ag、GaAs、 SiO_2 、真空的相对介电常数分别为 $\epsilon_{\text{Ag}}=-129+3.3j$, $\epsilon_{\text{GaAs}}=12.25$, $\epsilon_{\text{SiO}_2}=2.25$, $\epsilon_0=1$ 。

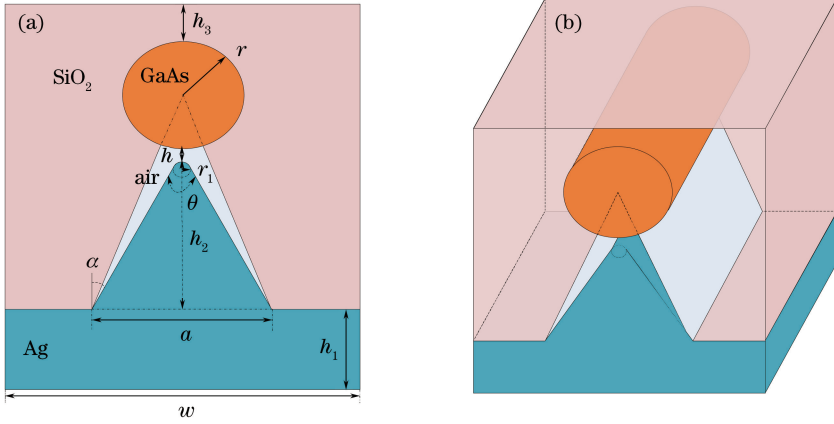


图 1 波导结构的(a)二维剖面图与(b)三维结构图

Fig. 1 (a) Two-dimensional profile and (b) three-dimensional structural diagram of waveguide

对于该 HPW 的实验制造,可以使用溅射法或电子束蒸发法实现 Ag 层的高精度沉积。随后,可以使用“气-液-固”法制造具有高精度尺寸的 GaAs 纳米线^[22],将 GaAs 纳米线定位在 SiO₂ 包层上,并用 SiO₂ 覆层覆盖纳米线。基于现有的纳米制造技术水平,在理论上该结构可以制造实现。

3 波导传输特性

3.1 模式特性参数

在特定的边界条件下通过求解 Maxwell 方程组进行模场分析,得到二维波动方程^[23]:

$$[\nabla^2 + (n^2 - n_{\text{eff}}^2) (2\pi/\lambda)^2] \varphi = 0, \quad (1)$$

式中 n 为模型材料的折射率, n_{eff} 为有效折射率, ∇ 为微分算子, φ 为标量波函数, λ 为波导工作波长。

为了权衡波导在亚波长下的光限制能力,并对混合波导的性质进行全面研究,引入归一化模场面积 M_{sf} 、传输距离 L_m 、品质因子 F_m , 以及在耦合模理论下的混合模式特性 $|a(r, h)|^2$ 和耦合强度 $\kappa(r, h)$ 的概念。 M_{sf} 代表了空间分布中电场能量的集中性, 值越小代表波导结构的光场约束能力越大。 M_{sf} 定义为有效模场面积 A_m 同衍射极限模式面积 A_0 的比值^[24-25]:

$$M_{\text{sf}} = A_m / A_0, \quad (2)$$

$$A_m = \frac{E_m}{\max[W(r)]} = \frac{1}{\max[W(r)]} \iint W(r) d^2r, \quad (3)$$

$$W(r) =$$

$$\frac{1}{2} \left\{ \text{Re} \left\{ \frac{d[\epsilon(r)\omega]}{d\omega} \right\} |E(r)|^2 + \mu_0 |H(r)|^2 \right\}, \quad (4)$$

$$A_0 = \lambda^2 / 4, \quad (5)$$

式中 $E(r)$ 和 $H(r)$ 分别为电场和磁场的分量, $W(r)$ 为电磁能量密度, $\epsilon(r)$ 为相对介电常数, μ_0 为真空中的磁导率, ω 为角频率, A_m 定义为总模式能量与峰值能量密度的比值。 L_m 是由 $L_m = \frac{\lambda}{4\pi \text{Im}(n_{\text{eff}})}$ 定义的基本模式的传播长度^[25], 其中 $\text{Im}(n_{\text{eff}})$ 是有效模式折射率的虚部。 L_m 表征了波导结构中光的传播损耗, 如果波导的光场约束力不变, 则其越大越好。

由于金属部件存在欧姆损耗, 等离子体激元波导的场约束和传播长度之间存在权衡关系。良好的场限制通常伴随着非常短的传播长度。为了权衡场约束和传播长度之间的关系, 引入品质因数 $F_m = L_m / (2\sqrt{A_m/\pi})$ ^[25], F_m 数值越大, 则波导的综合性能越好。

在耦合模式理论下, 可以用 $|a(r, h)|^2$ 体现混合模式的特性, $|a(r, h)|^2$ 表示基于耦合模式理论的纳米线波导模式和 SPP 模式的线性叠加。具体描述为^[26]

$$\theta_{\text{hyb}}(r, h) = a(r, h)\theta_{\text{cy}}(r) + b(r, h)\theta_{\text{SPP}}, \quad (6)$$

$$|a(r, h)|^2 = \frac{n_{\text{hyb}}(r, h) - n_{\text{SPP}}}{[\text{Re}(n_{\text{eff}})(r, h) - n_{\text{cy}}(r)] + [\text{Re}(n_{\text{eff}})(r, h) - n_{\text{SPP}}]}, \quad (7)$$

式中 $a(r, h)$ 和 $b(r, h)$ 分别为纳米线波导模式和 SPP 模式的成分加权系数, $\theta_{\text{hyb}}(r, h)$ 为混合模式的有效指数, $\theta_{\text{cy}}(r)$ 为纳米线波导模式的有效指数, θ_{SPP} 为 SPP 模式的有效指数, n_{hyb} 是混合模式的有效折射率, $n_{\text{cy}}(r)$ 是波导结构没有银介质时的纳米线模式下的有效折射率, n_{SPP} 是波导结构没有纳米线介质时 SPP 模式下的有效折射率。通常, $|a(r, h)|^2$ 用于通过混合波导结构来评估波导结构模式的混合度, 即所支持

和研究的基本模式是纳米线模式或 SPP 模式,可以根据 $n_{cy}(r)$ 是否大于 n_{SPP} 来确定。如果主模式是 SPP 模式,则 $|a(r,h)|^2 < 0.5$; 如果主导模式是纳米线模式,则 $|a(r,h)|^2 > 0.5$ 。当 $n_{cy}(r) = n_{SPP}$, 并且 $|a(r,h)|^2 = 0.5$ 时,发生两种类型的电磁模式的临界耦合,这表明极化电荷和等离子体振荡相互耦合,并使纳米线模式和 SPP 模式耦合达到最大化。两种模式之间的耦合强度 $\kappa(r,h)$ 决定了间隙区域中的光能浓度。具体描述为^[25,27]

$$\kappa(r,h) = \frac{\sqrt{[n_{hyb}(r,h) - n_{cy}(r,h)] \times [n_{hyb}(r,h) - n_{SPP}]}}{\quad} \quad (8)$$

3.2 波导电场分布

基于有限元法对本波导结构进行仿真分析,使

用的软件是 COMSOL Multiphysics,在软件的模型定义中设置完全匹配层(PML)用于消除所有方向边界处的冗余散射波。在模态分析中,50 nm 厚的 PML 足以消除所有非物理散射的影响。同时,将空气间隙区域网格化设为精细,在去掉高阶模的情况下,得到二维电场分布 ($r_2 = 77.5$ nm, $r_1 = 5$ nm, $h = 1$ nm, $2\alpha = 65^\circ$),如图 2(a)所示。由图 2 可知,在金属脊顶端到纳米线的空气介质中电场强度显著增大,这种增强依赖于金属的 SPP 模式同 GaAs 纳米线模式之间的重叠耦合(其耦合特性将在后续部分详细说明)。在 x 轴截面和 y 轴截面方向上,能量都在极小的面积中得到很好地限制。同文献[28]提出的缝隙结构[图 2(b)]相比,所设计结构的横向电场分布更集中。

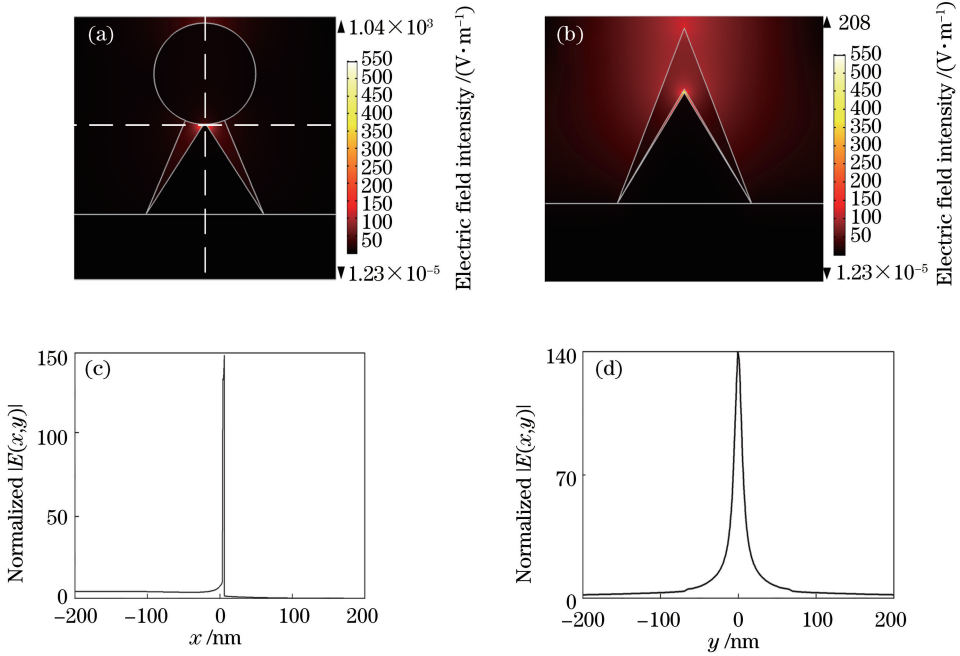


图 2 (a)波导基模归一化电场分布图($r_2 = 77.5$ nm, $r_1 = 5$ nm, $h = 1$ nm, $\theta = 65^\circ$);

(b)文献[28]结构基模归一化电场分布($h_2 = 77.5$ nm, $h = 1$ nm, $\theta = 65^\circ$);(c)(d)为(a)中沿着水平和垂直虚线的电场分布

Fig. 2 (a) Normalized electric field distribution of fundamental mode of proposed waveguide ($r_2 = 77.5$ nm, $r_1 = 5$ nm, $h = 1$ nm, $\theta = 65^\circ$); (b) normalized electric field distribution of fundamental mode of waveguide in Ref. [28] ($h_2 = 77.5$ nm, $h = 1$ nm, $\theta = 65^\circ$); (c)(d) normalized electric field distribution along horizontal and vertical dashed lines in (a)

3.3 几何参数对波导特性的影响

在耦合模式理论下对模式特性进行分析。图 3(a)所示为不同间隙距离 h 下混合模式的有效折射率随着纳米线半径 r 变化的规律。在混合模型下引导的混合模式的有效折射率超出纳米线模式或纯 SPP 模式,这是因为 SPP 模式与纳米线模式耦合导致更大的有效折射率。通过减小间隙距离 h 或增大纳米线的半径 r 可以增大模式的有效折射率,

这可以解释为,随着 r 增大或 h 减小, SPP 模式更有效地与纳米线模式耦合。 $|a(r,h)|^2$ 可用于评估混合模式是纳米线模式或 SPP 模式的程度:如果 $n_{cy}(r) > n_{SPP}$, 则 $|a(r,h)|^2 > 0.5$, 混合模式更趋向于纳米线模式,在这种情况下,大部分光能位于圆筒状纳米线中;如果 $n_{cy}(r) < n_{SPP}$, 则 $|a(r,h)|^2 < 0.5$, 混合模式更趋向于 SPP 模式,大部分的光能倾向于限制在介电纳米线和金属介质之间的空气间隙区

域中。图 3(b)显示了不同间隙距离 h 的变化与从 (7) 式导出的模式符号 $|a(r, h)|^2$ 相对于纳米线半径 r 的依赖关系。可以清楚地看到该如何调制几何参数以实现具有小模态面积的混合模式: 当间隙 h 为固定值时, $|a(r, h)|^2$ 随 r 增大而逐渐变大, h 和 r 值

较大时, 混合模式倾向于纳米线模式的较大模式特性, 因此, 可以通过减小纳米线半径以实现混合模式更多为 SPP 模式的较小模式特性。当纳米线半径 $r \approx 112.5$ nm 时, $|a(r, h)|^2 = 0.5$, 混合模式对应于具有相等的纳米线模式和 SPP 模式特性。

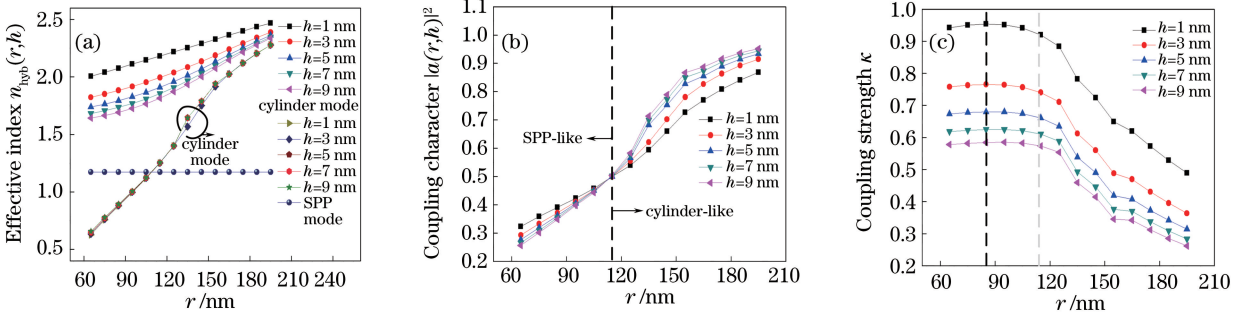


图 3 模式的 (a) 有效折射率、(b) 耦合特性和 (c) 耦合强度随 r 和 h 的变化

Fig. 3 Changes of (a) n_{hyb} , (b) $|a(r, h)|^2$ and (c) κ of proposed mode with different r and h

根据耦合模式理论, SPP 模式和纳米线模式之间的耦合强度可以由图 3(c) 中的 κ 表示, 假设 n_{hyb} 不会随着间隙距离 h 和纳米线半径 r 而改变, 当纳米线模式和 SPP 模式在 $r \approx 112.5$ nm 处满足匹配条件 $n_{\text{cy}}(r) = n_{\text{SPP}}$ 时, 耦合强度变为最大值。然而, n_{hyb} 和 $n_{\text{cy}}(r)$ 都随纳米线半径 r 增大而增加, 因此, 最大耦合强度绝不会发生在 $r \approx 112.5$ nm 处。由图 3(c) 可看出, 对于不同的间隙距离 h , 最大耦合强度出现在 $r \approx 80$ nm 附近。在 $r \approx 80$ nm, $h = 1$ nm 时耦合强度高达 0.96。从图 3(c) 还可看出, 耦合强度随间隙距离 h 减小而增大, 这主要是因为 2 个模式在 h 降低时能更有效地耦合。这里估计的耦合强度明显大于文献[25]所设计波导结构的耦合强度。

示, 归一化模式面积 M_{sf} 随着金属脊顶角和纳米线半径的增大逐渐变大, 这主要是因为随角度增大, 三角形空气间隙变大, 导致该 HPW 中主要分布在空气间隙中的能量有部分渗透到间隙外的空气中。由耦合模理论可知, 随着半径增大, SPP 模式同纳米线模式的重叠面积增大, 导致 M_{sf} 增大。 M_{sf} 在 $r = 90^\circ$ 时取得最小值 0.000191, 同时 $A_{\text{m}} = 0.00004825\lambda^2$, 完全满足亚深波长约束。从图 4(b) 可以看出, 随着金属脊顶角的增大, 传输距离 L_{m} 也逐渐增大。在顶角 θ 不变的情况下, 纳米线半径与传输距离呈正相关。这主要是得益于光场限制能力降低带来的传输损耗下降, 传输距离也相应增大。图 4(c) 展现了品质因子的变化趋势, 随着 θ 增大, 品质因子 F_{m} 先增大后减小, 随着纳米线半径 r 增大, F_{m} 同样增大。这表明该 HPW 在 $\theta = 70^\circ, r = 115$ nm 时, 波导的综合性能最好, F_{m} 最大为 135000。由图 4 还可以得到, 在保证条件相同的情况下, 本文的 HPW 比文献[28]的纯缝隙结构归一化模式面积更小, 传输

图 4 所示为 θ 和 r 变化对归一化模式面积、传输距离以及品质因子的影响。此处, 固定金属脊顶端到纳米线的距离 $h = 1$ nm, 金属脊顶端圆角半径 $r_1 = 5$ nm, 分别取纳米线的半径为 65, 77.5, 90, 102.5, 115 nm, θ 范围为 $30^\circ \sim 120^\circ$ 。如图 4(a) 所

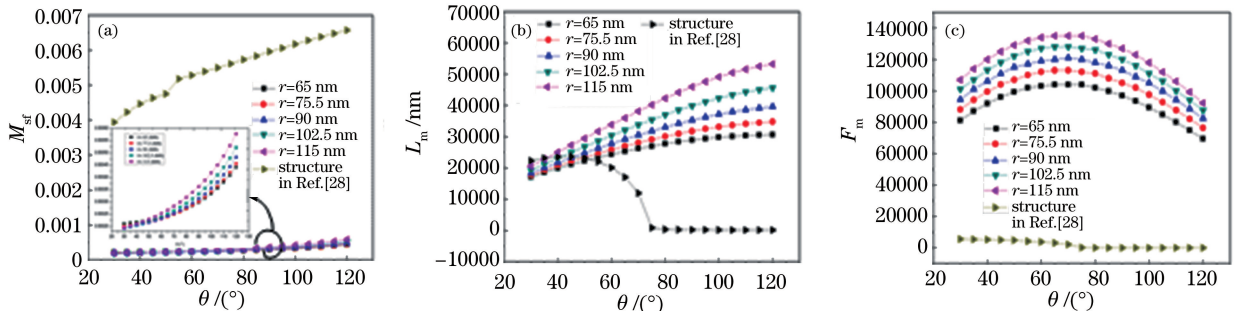


图 4 所设计波导结构的 (a) 归一化模式面积、(b) 传播长度、(c) 品质因子随 r 和 α 的变化

Fig. 4 Changes of (a) M_{sf} , (b) L_{m} and (c) F_{m} of proposed waveguide with different r and α values

距离在 $\theta = 55^\circ$ 之后明显增大(原结构处于下降趋势),其品质因子更是远大于文献[28]结构,综合性能突出。

4 本文结构的激光器特性

4.1 对激光器特性进行二维光限分析

模态损耗 α_i 和模式约束因子 Γ_{wg} 是与激光器光腔相关的 2 个重要因素。模态约束因子 Γ_{wg} 是表征模型与增益介质重叠度的指标,被定义为有源区域中模态增益与材料增益的比值。激光增益阈值是激光输出以受激发射而不是自发发射为主的最低激发电平。描述激光器每单位长度所需增益阈值 g_{th} ^[29] 被定义为 $g_{th} = \frac{1}{\Gamma_{wg}} \left[\alpha_i + \frac{1}{L_m} \ln\left(\frac{1}{R}\right) \right]$, 其中 $\alpha_i = k_0 \alpha_{eff}$ 为模态损耗, R 表示光腔镜面反射率, $R = (n_{eff} - 1)/(n_{eff} + 1)$, L_m 是光腔的长度, k_0 表示真空中的波数, $k_0 = 2\pi/\lambda$, α_{eff} 表示传播损耗, 为模式复折射率的虚部。模态约束因子 Γ_{wg} 定义为^[29]

$$\Gamma_{wg} = \frac{\frac{n_a}{2\eta_0} \int_{A_a} d\rho |E(\rho)|^2}{\int_A d\rho \frac{1}{2} \text{Re}[E(\rho) \times H^*(\rho)] \cdot \hat{Z}} \quad (9)$$

式中 η_0 是固有阻抗, n_a 是增益介质的折射率, A_a 是增益介质区域的横截面, A 是整个横截面的理想区域, E 和 H 是引导模式的复电场和复磁场。

光腔模式的质量因子 Q ^[30] 表示当不存在带间跃迁时该模式的存储能量保留在光腔中时间的长短,与光子寿命 τ_p 相关联,通过该模式的谐振频率 ω 进入速率方程。质量因子 Q 数值越大,光微腔性能越好, \hat{Z} 为在 z 轴方向上的平均时间能量通量。

$$\frac{1}{Q} = \frac{1}{\omega\tau_p} = \frac{v_{g,z}(\omega)}{\omega} \left[\alpha_i + \frac{1}{L} \ln\left(\frac{1}{R}\right) \right] \quad (10)$$

式中 $v_{g,z}(\omega) = \left[\frac{\partial \text{Re}(k_z)}{\partial \omega} \right]^{-1}$ 是模式的群速度, k_z 为模态传播常数。取光腔的长度为纳米线长度,只考虑光腔的镜面损耗,不计光腔其他损耗。

如图 5(a)所示,当 r 与 θ 较大时, α_i 相当低,这归因于小的金属耗损,相应的对能量的限制能力较小。相反,当在 GaAs 纳米线周围的电磁能被局限在相对狭窄的低折射率空气间隙时,就会导致大的金属耗散和 α_i 。模态约束因子如图 5(b)所示,在 $\theta = 30^\circ$ 、 $r = 65 \text{ nm}$ 处出现最小 Γ_{wg} 值 0.281。 Γ_{wg} 与 θ 呈正相关,与 r 呈负相关。在 $\theta = 120^\circ$ 和 $r = 115 \text{ nm}$ 处出现最大 Γ_{wg} 值 0.563。这表明混合等离子体激元模式在该谐振腔中高度贴合,并且与有源区域重叠。图 5(c)中阈值增益 g_{th} 保持相对稳定,对于不同的 θ 值和 r 值, g_{th} 在 $0.00715 \sim 0.05 \mu\text{m}^{-1}$ 间平缓变化,最小可以到 $0.00715 \mu\text{m}^{-1}$ 。低阈值增益意味着激光器可以在低增益水平下发

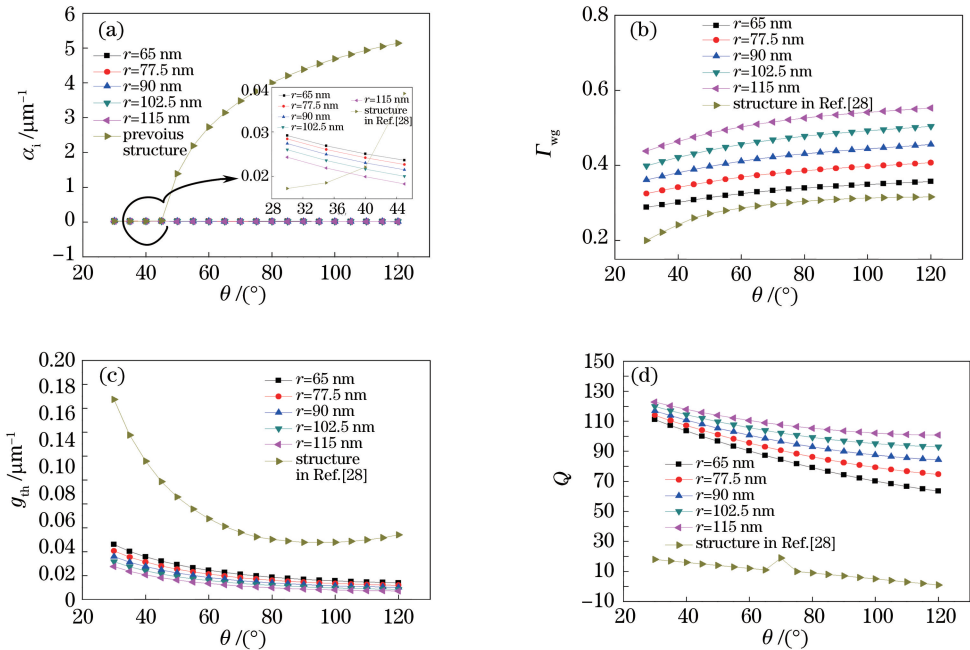


图 5 激光器的 (a) 模态损耗、(b) 模式约束因子、(c) 增益阈值、(d) 质量因子随 θ 和 r 的变化

Fig. 5 Changes of (a) α_i , (b) Γ_{wg} , (c) g_{th} and (d) Q of proposed nano-laser with different θ and r

光。由图 5(c)可知,在 r 一定时,质量因子 Q 随着 θ 的增大而变小,而当 θ 一定时, Q 随着 r 的增大而变大。这说明较小的顶角和较大的纳米线直径可以获得较好的光微腔性能。在图 5(a)~(d)中就各参数与文献[28]中的结构进行对比发现, α_i 在 $\theta > 40^\circ$ 条件下明显小于文献[28]的尖角缝隙结构,并一直处于减小趋势, Γ_{wg} 一直大于文献[28]结构, g_{th} 小于文献[28]结构 2 倍以上, Q 是文献[28]结构的 7 倍左右。本文结构在各参数性能方面表现出明显优势。

4.2 对激光器特性进行三维光限分析

为了综合分析该结构下激光器的性能,利用 COMSOL Multiphysics 软件进行三维仿真分析。在三维尺度上还原二维平面中的结构尺寸,设置结构在第三维上的深度 L_m ,以及材料的介电常数,在有限元法的基础上使用频域模块在入射波长 1550 nm 下进行仿真计算,结果如图 6 所示。图 6(a)为激光器的三维仿真图,图 6(b)为激光器中的场强在 xz 横截面上的分布图。由图 6(a)、(b)可知,在所提出的纳米激光器中,Ag 金属脊通过纳米尺度的空气间隙与半导体增益材料 GaAs 分离,使大部分电磁能量被束缚在纳米尺度的空气间隙中。混合材料的等离子体结构改变介电环境并在亚波长尺度上构建出纳米腔,其中耦合原

理说明等离子体激元模式能够实现超小体积的等离子体激元与微腔模式之间的耦合。因此,当在金属表面产生的表面等离子激元进入到 GaAs 纳米线时,就会沿着纳米线的方向传输,并在震荡过程中被显著放大,还会在纳米线的两个端面被激励。图 6(c)是在三维尺度下激光器有效模式体积随顶角 θ 和纳米线半径 r 变化的关系图。有效模式体积 V_{eff} 可以表现三维光场的限制作用,是表征激光器谐振腔体激光特性的重要参数。其定义为激光的模式场能量与最大能量体密度的比值^[31-32]:

$$V_{eff} = \frac{\iiint W(\mathbf{r}) d^3 r}{\max[W(\mathbf{r})]}, \quad (11)$$

式中 $W(\mathbf{r})$ 为场强矢量,表达式为 $W(\mathbf{r}) = \frac{1}{2} \left\{ \text{Re} \left\{ \frac{d[\epsilon(\mathbf{r})\omega]}{d\omega} \right\} |E(\mathbf{r})|^2 + \mu_0 |H(\mathbf{r})|^2 \right\}$, μ_0 为介质磁导率, $\epsilon(\mathbf{r})$ 为介电常数矢量, $H(\mathbf{r})$ 为磁场场强分布矢量, $E(\mathbf{r})$ 为电场场强分布矢量, $\max[W(\mathbf{r})]$ 为场能量峰值。由图 6(c)可知, V_{eff} 随顶角 θ 和纳米线半径 r 的增大整体上呈现增大趋势,这说明在 θ 与 r 相对较小时光场较强,场能量的最大体密度较大。其最小模式体积可以达到 $0.00018 \mu\text{m}^3$ 。

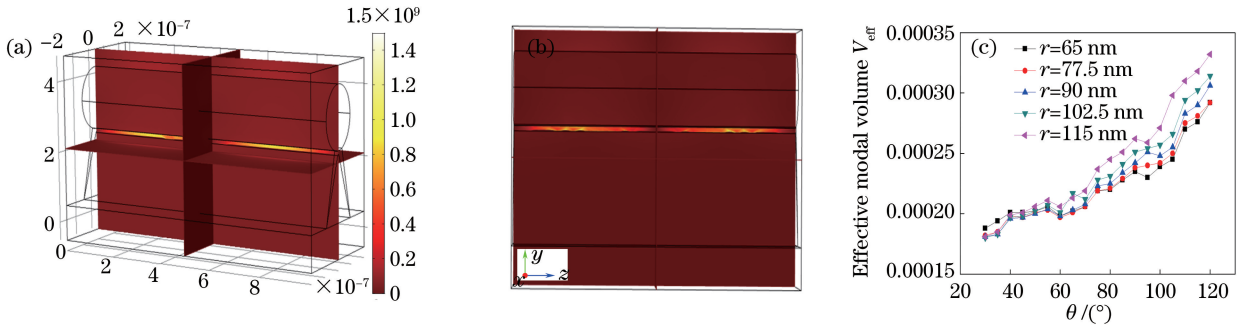


图 6 激光器的三维仿真。(a)三维仿真结果;(b) xz 横截面场强分布;(c)有效的模态体积

Fig. 6 Three-dimensional simulation of nano-laser. (a) Three-dimensional simulation diagram of nano-laser; (b) field intensity distribution of xz cross section; (c) effective modal volume V_{eff}

综合前文分析,较小的顶角会增大损耗,加大增益阈值,较大的纳米线直径会增大耦合面积使归一化面积变大,同时会增大有效模式体积,这些都是提高激光器性能和实现亚波长约束的不利因素。因此,选择激光器结构参数时应综合考虑,选出最优组合。选取 $r = 80 \text{ nm}$, $\theta = 65^\circ$,此时的模态损耗 $\alpha_i = 0.01785 \mu\text{m}^{-1}$,模式约束因子 $\Gamma_{wg} = 0.1603$,增益阈值 $g_{th} = 0.0183 \mu\text{m}^{-1}$,质量因子 $Q = 106.44$,有效模式体积为 $V_{eff} = 0.000202 \mu\text{m}^{-3}$ 。

5 结 论

在 1550 nm 的通信波长下,设计一种带有顶角经过圆角处理的金属脊和特定三角形空气介质,以及 GaAs 增益纳米线的 HPW,这种特定三角形结构和其他材料的组合有效地提高了纳米激光器的性能。系统研究了该新型 HPW 的传输特性、在耦合理论下的模式特性,以及激光器模式下二维尺度和三维尺度上的激光器特性。仿真结果表明,在 $r =$

80 nm、 $h = 1$ nm 时,由耦合理论分析可知,该波导支持的 SPP 模式和纳米线模式之间的强耦合可以使电磁模式紧密地限制在纳米线和金属脊之间的空气间隙中,并且同时实现了对光的亚波长约束,电磁模式的传播长度达到了一个很好的范围。将该结构应用于激光器时,激光器性能优越,通过调整波导参数获得了高质量因子、低能量损耗、低阈值极限,以及超小的有效模式体积。因此,该波导下的纳米激光器具有较高的光场容量限制和较低的激发阈值。比较表明,在同等条件下,通过选择适当的结构参数,本文提出的 HPW 结构具有优异的波导特性。综合考虑本文分析的数据,最优尺寸参数可选在 $r = 80$ nm、 $\theta = 65^\circ$ 处,此时的激光器参数相对最优。该波导结构在纳米尺度光学器件,以及光子集成电路、光学存储、光信号处理和生物传感器等领域都有巨大的应用前景。

参 考 文 献

- [1] Notomi M, Yamada K, Shinya A, *et al.* Extremely large group-velocity dispersion of line-defect waveguides in photonic crystal slabs [J]. *Physical Review Letters*, 2001, 87(25): 253902.
- [2] Challener W A, Peng C, Itagi A V, *et al.* Heat-assisted magnetic recording by a near-field transducer with efficient optical energy transfer [J]. *Nature Photonics*, 2009, 3(4): 190-191.
- [3] Zhang T, Callard S, Jamois C, *et al.* Plasmonic-photonic crystal coupled nanolaser [J]. *Nanotechnology*, 2014, 25(31): 315201.
- [4] Zhang W, Huang L, Santschi C, *et al.* Trapping and sensing 10 nm metal nanoparticles using plasmonic dipole antennas [J]. *Nano Letters*, 2010, 10(3): 1006-1011.
- [5] Suh J Y, Kim C H, Zhou W, *et al.* Plasmonic bowtie nanolaser arrays [J]. *Nano Letters*, 2012, 12(11): 5769-5774.
- [6] Schuller J A, Barnard E S, Cai W, *et al.* Plasmonics for extreme light concentration and manipulation [J]. *Nature Materials*, 2010, 9(3): 193-204.
- [7] Zhang Y, Zhang Z. Ultra-subwavelength and low loss in V-shaped hybrid plasmonic waveguide [J]. *Plasmonics*, 2016, 12(1): 1-5.
- [8] Wang J C, Jiang Y L, Wang Y K, *et al.* Directional couplers base on MIM plasmonic waveguide structures [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2015, 42(2): 0217001.
王继成, 蒋亚兰, 王跃科, 等. 基于 MIM 结构等离子体波导定向耦合器 [J]. *中国激光*, 2015, 42(2): 0217001.
- [9] Ly-Gagnon D S, Kocabas S E, Miller D A B. Characteristic impedance model for plasmonic metal slot waveguides [J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2008, 14(6): 1473-1478.
- [10] Han Z, Elezzabi A Y, Van V. Experimental realization of subwavelength plasmonic slot waveguides on a silicon platform [J]. *Optics Letters*, 2012, 35(4): 502-504.
- [11] Fu Y, Hu X, Lu C, *et al.* All-optical logic gates based on nanoscale plasmonic slot waveguides [J]. *Nano Letters*, 2012, 12(11): 5784-5790.
- [12] 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.
- [13] Avrutsky I, Soref R, Buchwald W. Sub-wavelength plasmonic modes in a conductor-gap-dielectric system with a nanoscale gap [J]. *Optics Express*, 2010, 18(1): 348-363.
- [14] Oulton R F, Sorger V J, Zentgraf T, *et al.* Plasmon lasers at deep subwavelength scale [J]. *Nature*, 2009, 461(7264): 629-632.
- [15] Yu M, Song J, Niu H, *et al.* Quadrupole plasmon lasers with a super low threshold based on an active three-layer nanoshell structure [J]. *Plasmonics*, 2016, 11(1): 231-239.
- [16] Wang L, Qu J, Song J, *et al.* A novel plasmonic nanolaser based on fano resonances with super low threshold [J]. *Plasmonics*, 2017, 12(4): 1145-1151.
- [17] Stockman M I. The spaser as a nanoscale quantum generator and ultrafast amplifier [J]. *Journal of Optics*, 2010, 12(2): 150-152.
- [18] Yang W, Ji Q, Zong H, *et al.* Theoretical investigation of loss-compensating hybrid waveguide using Quasi-one-dimensional surface plasmon for green nanolaser [J]. *Plasmonics*, 2016, 11(1): 159-165.
- [19] Bian Y, Zheng Z, Zhao X, *et al.* Nanowire based hybrid plasmonic structures for low-threshold lasing at the subwavelength scale [J]. *Optics Communications*, 2013, 287(2): 245-249.
- [20] Lü H B, Liu Y M, Yu Z Y, *et al.* Hybrid plasmonic waveguides for low-threshold nanolaser applications [J]. *Chinese Optics Letters*, 2014, 12(11): 112401.
- [21] Pile D F P, Gramotnev D K. Plasmonic subwavelength waveguides: next to zero losses at sharp bends [J]. *Optics Letters*, 2005, 30(10): 1186-1188.

- [22] Kuykendall T, Pauzauskie P J, Zhang Y, *et al.* Crystallographic alignment of high-density gallium nitride nanowire arrays[J]. *Nature Materials*, 2004, 3(8): 524.
- [23] Li Z Q, Yue Z, Bai L D, *et al.* Transmission characteristics of mixed double ribbed surface plasmon waveguide[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2017, 44(5): 0513001.
李志全, 岳中, 白兰迪, 等. 混合双肋型表面等离子体波导的传输特性[J]. *中国激光*, 2017, 44(5): 0513001.
- [24] Tian J, 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]. *European Physical Journal D*, 2016, 70(1): 4.
- [25] 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.
- [26] 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.
- [27] Yang X, Liu Y, Oulton R F, *et al.* Optical forces in hybrid plasmonic waveguides [J]. *Nano Letters*, 2011, 11(2): 321-328.
- [28] Shang J P. Propagation properties analysis of hybrid surface plasmonic waveguide [D]. Guilin: Guilin University of Electronic Technology, 2015.
尚军萍. 混合型表面等离子体波导的传输特性分析[D]. 桂林: 桂林电子科技大学, 2015.
- [29] Wei W, Yan X, Zhang X. Ultrahigh Purcell factor in low-threshold nanolaser based on asymmetric hybrid plasmonic cavity [J]. *Scientific Reports*, 2016, 6: 33063.
- [30] Chang S W, Chuang S L, Lin T R. Theory of plasmonic Fabry-Perot nanolasers [J]. *Optics Express*, 2010, 18(14): 15039-15053.
- [31] Sun W Z. Three-dimensional light confinement design in hybrid surface plasmonic nanolaser [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2016.
孙文钊. 三维光场限制表面等离子体激元纳米激光器的设计[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2016.
- [32] Chou B T, Chou Y H, Chiang C K, *et al.* Realization of UV plasmonic nanolasers with extremely small mode volume [J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2015, 21(6): 399-404.