

doi: 10.3788/gzxb20174608.0814002

低阈值混合表面等离子体纳米激光器的仿真设计

李志全¹, 冯丹丹¹, 白兰迪¹, 刘同磊¹, 岳中¹, 顾而丹¹, 李文超²

(1 燕山大学 电气工程学院, 河北 秦皇岛 066004)

(2 东北大学秦皇岛分校 控制工程学院, 河北 秦皇岛 066004)

摘要:设计了一种包含圆柱形纳米线、空气间隙和半圆顶金属脊结构的低阈值纳米激光器. 通过有限元法对激光器的模式特性、品质因数以及增益阈值进行数值计算, 并研究了这些特性因子随结构几何参数(空气间隙、金属脊宽度和纳米线半径)的变化情况. 结果表明, 通过对参数进行调整, 激光器的性能得到了显著优化. 在最优参数下, 增益阈值可达 $0.47 \mu\text{m}^{-1}$, 传输损耗仅为 0.018. 本文设计的纳米激光器能够实现低阈值的亚波长激射和低损耗传输, 在生物医学、光通信等领域有广泛的应用前景, 可为小型化和集成化的纳米设备提供技术支持.

关键词:表面等离子体; 有限元法; 增益介质; 模式特性; 纳米激光器

中图分类号: TN253

文献标识码: A

文章编号: 1004-4213(2017)08-0814002-9

Simulation Design of a Low Threshold Hybrid Plasmonic Nanolaser

LI Zhi-quan¹, FENG Dan-dan¹, BAI Lan-di¹, LIU Tong-lei¹, YUE Zhong, GU Er-dan¹, LI Wen-chao²

(1 Institute of Electrical Engineering, Yanshan University, Qinhuangdao Hebei 066004, China)

(2 School of Control Engineering, Northeastern University at Qinhuangdao, Qinhuangdao Hebei 066004, China)

Abstract: A low threshold nanolaser that contains nanowires, air gap and semicircular-top metal nanoridge structure was proposed. Through the finite element method to model characteristics and the quality of the laser gain factor and threshold for numerical calculation, the characteristic factor was studied with the geometric parameters (air gap, metal ridge width and nanowire radius) change. The results show that the property of the laser is optimized by adjusting the parameters. Under the optimal parameters, the gain threshold can reach $0.47 \mu\text{m}^{-1}$ and the transmission loss is only about 0.018. This shows that the nanolaser structure can achieve low threshold sub wavelength lasing and low loss transmission. It has a wide application prospect in the fields of biomedicine, optical communication etc. It provides technical support for miniaturization and integration of nano devices.

Key words: Surface plasmons; Finite-element method; Gain medium; Modal properties; Nanolasers

OCIS Codes: 140.3945; 050.6624; 240.6680

0 引言

随着微纳技术的进步和集成光学的迅速发展, 光子器件不断趋于微型化、高度集成化. 但是, 受到光的衍射极限的限定, 传统半导体激光器的径向尺寸最大仅为几个波长(微米)量级, 难以将其与现有的纳米级光电子器件进行有效集成^[1], 阻碍了集成式激光器的发展. 近年来, 表面等离子体(Surface Plasmons, SPs)^[2]技术的出现突破了集成光学的发展瓶颈. 作为一种表面电磁模式, SPs 仅存在于两种介电常数符号相反的介质之间, 其表面波特性能够将光牢牢地限制在两者交界面上. 另外它在空间尺寸上的波长比自由空间小得多, 故

基金项目: 河北省百人计划(No. 4570018)和河北省自然科学基金(No. F2014501150)资助

第一作者(导师): 李志全(1954—), 男, 教授, 博士, 主要研究方向为集成光学、光纤传感及非线性光电检测. Email: lzq54@ysu.edu.cn

收稿日期: 2017-03-22; 录用日期: 2017-05-10

<http://www.photon.ac.cn>

不会受到衍射极限的影响. 然而, 对于 SPs 波导存在光场限制能力和传输损耗之间的平衡问题. 为了在实现较低传输损耗的同时获得较强的光场限制能力, 研究者提出很多不同类型的 SPs 波导结构, 并应用于纳米激光器中. 2008 年, Oulton 提出了一种典型的混合表面等离子体波导^[3], 即首先将一层低折射率的介质薄膜镀在金属平板层, 然后再把一个高折射率的圆柱形介质纳米线放在介质薄膜上, 结果同时达到了超强纳米级光场约束和低损耗传输的目的, 最后进行实验, 将其应用于纳米 SPs 激光器中, 实现了激光器亚波长尺寸的约束. 目前, SPs 纳米激光器的主要设计结构有 MIM 结构纳米激光器^[4]、圆柱形金属纳腔面发射^[5]纳米激光器、纳米线 SPs 激光器^[6-8]、纳米粒子 SPs 激光器^[9]等.

谐振腔是表征纳米激光器性能优劣的一个重要参数, 谐振腔具有良好限制能力和局域性, 是激光器的关键, 同时还要保证更小的增益阈值. 本文引入更低折射率的空气间隙, 将高增益介质和表面等离子体波导相结合, 设计了一种包含圆柱形纳米线、空气间隙和半圆顶金属脊结构的低阈值混合表面等离子体纳米激光器. 利用有限元法, 在 COMSOL Mutiphysics 软件中计算了在 490 nm^[10-11] 工作波长下, 该纳米激光器结构的电场分布及结构几何参数对该结构的模式特性、品质因数以及增益阈值的影响, 找到最优几何参数. 讨论改变几何参数时谐振腔对光子限制能力和增益阈值的变化. 与文献[8]中的边缘耦合结构相比, 本文提出的纳米激光器结构在最优参数下具有良好的谐振腔特性和更小的增益阈值, 最多降低到原来的 1/10, 纳米激光器的综合性能有了较大的提升.

1 模型设计与理论分析

1.1 模型设计分析

SPs 是一种在金属-介质界面上传播的特殊形式的电磁表面波, 是金属中的电荷密度波与入射电磁波之间耦合作用的结果. 通过分析可以得出, 在金属-介质表面, SPs 波只有一种传播形式—TM 模. 其色散方程^[12]是

$$k_{\text{spp}} = \frac{\omega}{c} \sqrt{\frac{\epsilon_m \epsilon_d}{\epsilon_m + \epsilon_d}} \quad (1)$$

式中, $\frac{\omega}{c}$ 是光在空气中的波矢量, ϵ_m 、 ϵ_d 是金属的介电常数和介质的介电常数.

SPs 激发的电磁场主要集中在金属-介质交界处, 在垂直于界面的方向上向两侧迅速衰减, 相对于介质电磁场在金属中的衰减速度更快. 传输长度计算公式为

$$L_{\text{spp}} = \lambda_0 \frac{(\epsilon'_m)^2}{2\pi\epsilon''_m} \left(\frac{\epsilon'_m + \epsilon_d}{\epsilon'_m \epsilon_d} \right)^{3/2} \quad (2)$$

式中, ϵ'_m 是金属相对介电常数的实部, ϵ''_m 是金属相对介电常数的虚部. 由式(2)可知, 欲使 L_{spp} 比较大, 要求金属材料的 ϵ'_m 大一些, 而 ϵ''_m 小一些. 满足该条件的金属一般有金(Au)和银(Ag), 本设计中选择 Ag 作为波导结构中的金属^[13]. 此外, 金属尖角处更容易出现激发出 SPPs, 但制作不易实现, 故本文采用金属脊型结构.

图 1(a) 为所设计的包含圆柱形纳米线、空气间隙和半圆顶金属脊结构的纳米激光器示意图, 图 1(b) 为其二维剖面图. 该混合表面等离子体纳米激光器由四部分构成, 最上面放置的是硫化镉(CdS)纳米线, 其次是 CdS 纳米线和金属银脊之间的空气间隙, 最下层是半圆顶金属银脊, 最后由氟化镁(MgF₂)材料将这三部分连在一起. 各部分几何参数为: 圆柱形 CdS 纳米线的半径为 r , 纵向长度 L 为 30 μm , 金属脊的高度 h_0 为 92 nm, 宽度为 w_0 , CdS 纳米线和半圆顶金属脊之间的空气间隙槽宽度为 w_g , MgF₂ 层的宽度 w 为 100 nm, 高度为 h 为 100 nm. t 为高增益介质纳米线底端与半圆顶金属脊顶端的间隙, 本文通过改变空气槽宽度 w_g 和纳米线半径 r , 使得 t 能够在 2~8 nm 范围内变化. 要制作该结构, 首先在硅片

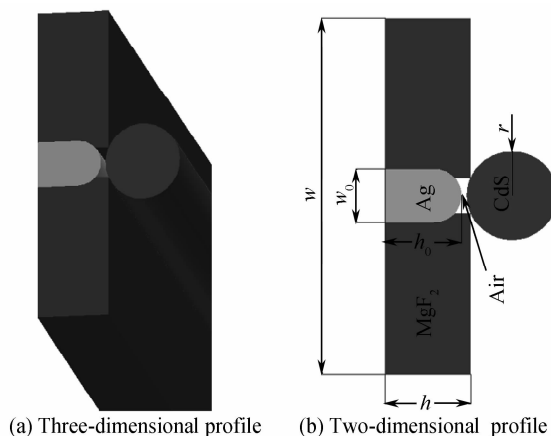


图 1 纳米激光器示意图

Fig. 1 The structure of the nanolaser

基底上镀一层宽度为 w_0 , 高度为 h_0 的矩形金属银结构, 以金属银膜宽度的 $1/2$ 为圆心, 用聚焦离子束法在银膜上制作半径为 $w_0/2$ 的半圆形金属脊, 最后再以其上边缘的 $w_0/2$ 处为中心, 在金属银膜两侧对称蒸镀一层宽度为 200 nm , 高度为 h 的 MgF_2 介质层. 然后通过干刻蚀法在银脊的上面形成一个宽度为 w_g 的空气间隙, 最后通过微纳操作在空气槽上方纵向放置一个半径为 r , 长度为 L 的 CdS 纳米线.

为了实现较低的损耗, 采用 MgF_2 层将 CdS 纳米线、空气间隙和金属 Ag 连接在一起. 这是因为在金属 Ag 和纳米线之间的空气间隙处, 半导体纳米线波导模式与金属界面的表面等离子体模式相耦合, 导致部分电场能量的局域效应. 而 MgF_2 层在结构中恰好能够起到储存能量的作用, 达到减少空隙间能量损耗的目的. 所以该纳米激光器不仅具有较低的传输损耗, 同时也保持了光场的高局域性.

1.2 纳米激光器特性参数

有效折射率(n_{eff})和传输损耗(α_{eff})、归一化有效模场面积(SF)以及限制因子(Γ)反映混合表面等离子体纳米激光器的模式特性. 有效折射率的虚部表征模式的传输损耗, 归一化模式面积(The normalized mode scaling factor, SF)描述的是电场能量空间分布的集中性, 归一化模场面积越小, 则该结构对光场的约束能力越强. SF 定义为有效模场面积 A_{eff} 与衍射极限模式面积 A_0 的比值, 计算公式^[8]为

$$\text{SF} = A_{\text{eff}}/A_0 \quad (3)$$

有效模场面积 A_{eff} 为

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

E 是电场强度. 衍射极限模场面积 A_0 定义为

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

式中, λ 是真空中波长.

本文主要研究增益介质区域中储存的能量, 因此这里计算的限制因子是增益介质中的能量和总能量的比值. 限制因子为

$$\Gamma = \frac{W_s}{W} \quad (6)$$

式中, W_s 表示的是增益介质区域中储存的能量, W 表示的是模场总能量.

品质因数 Q 反映了谐振腔对光子的束缚能力, 品质因数计算公式为

$$Q = 2\pi f \frac{\epsilon}{P_\delta} \quad (7)$$

$$\epsilon = n_0 h f V \quad (8)$$

$$P_\delta = -\frac{d\epsilon}{dt} = -\frac{dn}{dt} h f V = \frac{n_0}{\tau_R} \exp(-t/\tau_R) h f V \quad (9)$$

$$Q = 2\pi f \tau_R = 2\pi f \frac{L}{\delta C} \quad (10)$$

式中, f 是腔内光场的频率, ϵ 是腔内存储的总能量, P_δ 是单位时间内损耗的能量, n_0 是 $t = 0$ 时刻光子数密度, h 是普朗克常量, V 是谐振腔体积, n 是谐振腔内光子数密度, τ_R 是谐振腔的时间常数, δ 是腔内损耗, L 是谐振腔的长度. 本文不考虑谐振腔的其他损耗, 即只有谐振腔镜面损耗.

增益阈值 g_{th} 是反应激光器性能优劣的重要依据, 它是当激光器实现激射所需要的最小增益值, 计算公式^[14]为

$$g_{\text{th}} = [k_0 \alpha_{\text{eff}} + \ln(1/R)/L] / \Gamma(n_{\text{eff}}/n_{\text{wire}}) \quad (11)$$

式中 L 为 CdS 纳米线的长度, 即谐振腔长度, 文中取谐振腔长度为 $30\ \mu\text{m}$; R 是端面反射率, 端面反射率 R 定义为

$$R = (n_{\text{eff}} - 1) / (n_{\text{eff}} + 1) \quad (12)$$

式(10)中, 右边第一项表示传播损耗(α_{eff}), 包括金属损耗和纳米线与 Ag 脊耦合产生的辐射损耗; 第二项表示谐振腔镜面损耗. 其中 k_0 为真空中的波数, $k_0 = 2\pi/\lambda$, n_{wire} 为增益介质纳米线的折射率, 比例因子 $n_{\text{eff}}/n_{\text{wire}}$ 为模式有效折射率的增强部分^[15].

2 数值仿真及分析

2.1 场强分布分析

该混合表面等离子体纳米激光器结构工作波长是 490 nm, 增益介质硫化镉(CdS)折射率是 2.4, 氟化镁(MgF₂)折射率是 1.4, 金属银(Ag)折射率是 $0.05 + 3.0391i$. 利用基于有限元法的 COMSOL Multiphysics 软件建立数学模型. 仿真过程使用模式分析, 内部采用散射边界条件, 在空气间隙区域, 网格设置为较细以保证仿真结果的精确性. 三维仿真结果如图 2. 图 2(a)为混合表面等离子体纳米激光器结构的三维仿真图, 图 2(b)对应图 2(a)中 x - y 横截面的电场分布. 在抽运光的激励下, 金属受激表面产生电子, 与外来光子共振产生表面等离子体激元. 同时, CdS 纳米线作为激光增益介质, 其中的原子受到激发后形成粒子数反转状态. 表面等离子体激元的一部分电磁场能量入纳米线中, 形成纳米线电磁模式, 与纳米线中固有的电磁模式相互重叠并发生耦合^[16-17], 而纳米线作为本文所设计的谐振腔, 当混合模式进入 CdS 纳米线时沿纳米线方向传播, 光在振荡过程中被极大放大后从谐振腔的两端面发射.

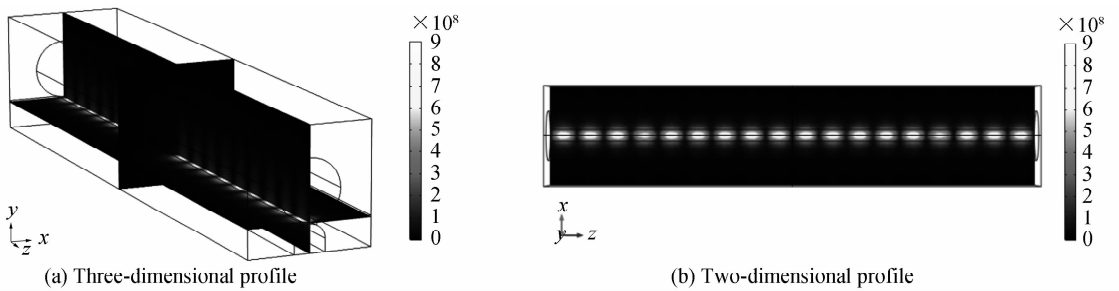


图 2 激光器三维仿真结果

Fig. 2 3D simulation diagram of nanolaser

图 3(a)为二维模型耦合后激发的归一化导模电场分布图(其中 $r=90$ nm, $w_g=60$ nm, $w_0=70$ nm), 图 3(b)和(c)对应图 3(a)中水平和竖直虚线处的归一化电场分布. 由图 3 可知, 纳米线和半圆顶金属脊中间的空隙处场强增强效应显著, 能量高度局域化, 这正是金属界面的表面等离子体模式与高增益介质纳米线波导模式相耦合的结果.

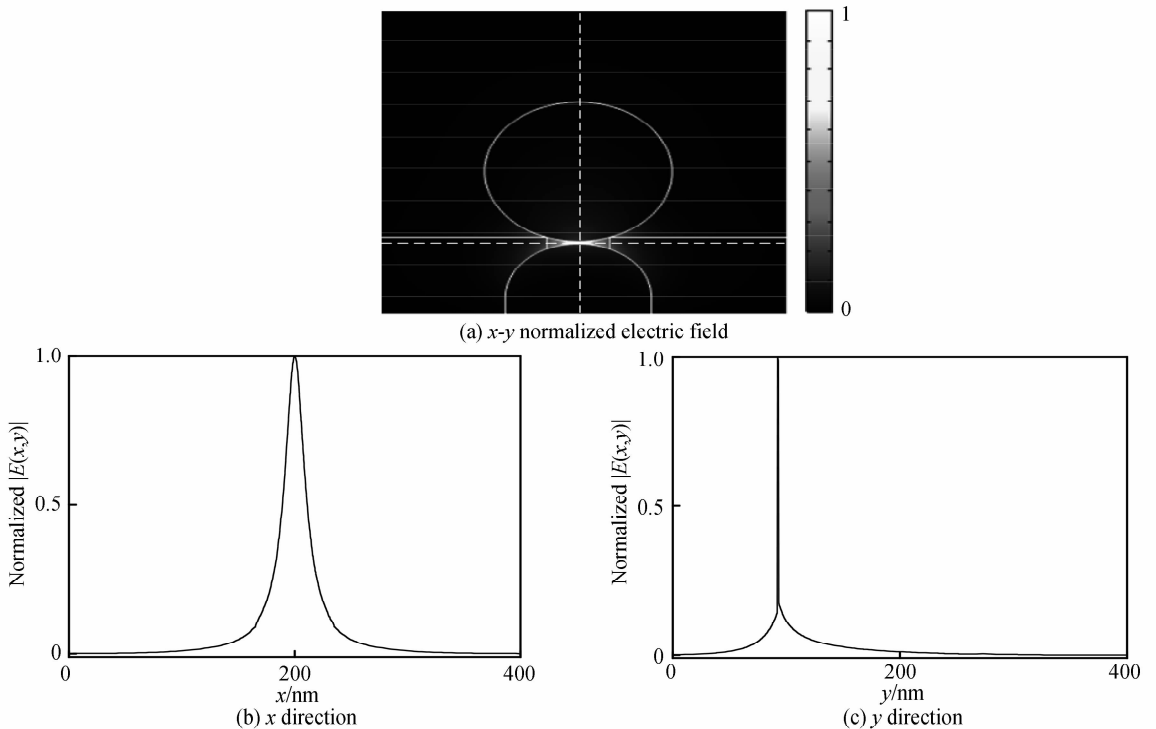


图 3 激光器归一化电场分布

Fig. 3 Normalized electric field of the nanolaser

2.2 激光器特性分析

2.2.1 空气间隙和纳米线半径对激光器特性的影响

先固定金属脊宽度为 100 nm,分别讨论当纳米线半径 r 为 80 nm,85 nm,90 nm,95 nm,100 nm 时,激光器的模式特性随空气间隙槽宽度 w_g 的变化情况.由图 4(a)和(b)可以看出,随着空气间隙宽度 w_g 的增大,模式的有效折射率和传输损耗均先降低后升高,这是因为空气间隙槽宽度 w_g 较小时,纳米线和半圆顶金属脊之间的高度 t 相对较大,更多能量集中在金属脊的周围,这就导致了较大的损耗.随着空气间隙槽宽度 w_g 的增大,波导模式和表面等离子体模式之间的耦合作用增强,同时由于结构的“电容”增强效应将光主要限制在空气间隙处,此时的损耗便呈现出下降趋势.但当空气槽间隙增大到最佳间隙值时,波导模式和表面等离子体模式的耦合作用不再显著,而空气间隙槽宽度 w_g 的持续增大却使混合模式在金属中的损耗更大.从图 4(c)和(d)可知,增加空气间隙槽宽度 w_g 可以使混合模式和增益介质重叠区域增大,相当于减小增益介质纳米线和金属脊之间的高度,使有效模场面积减小,同时增大了限制因子.电场的模场约束能力通过归一化有效模场面积 SF 来描述,若 $SF < 1$,可实现输出光场的亚波长尺寸约束,若 $SF \ll 1$,则可以实现输出光场的深亚波长约束^[15].从图 4(c)中可以清楚地看出,空气间隙槽宽度 w_g 在 20~60 nm 范围内变化时,其归一化有效模场面积始终小于 0.04,表明该混合表面等离子体纳米激光器结构可以实现对光场的深亚波长

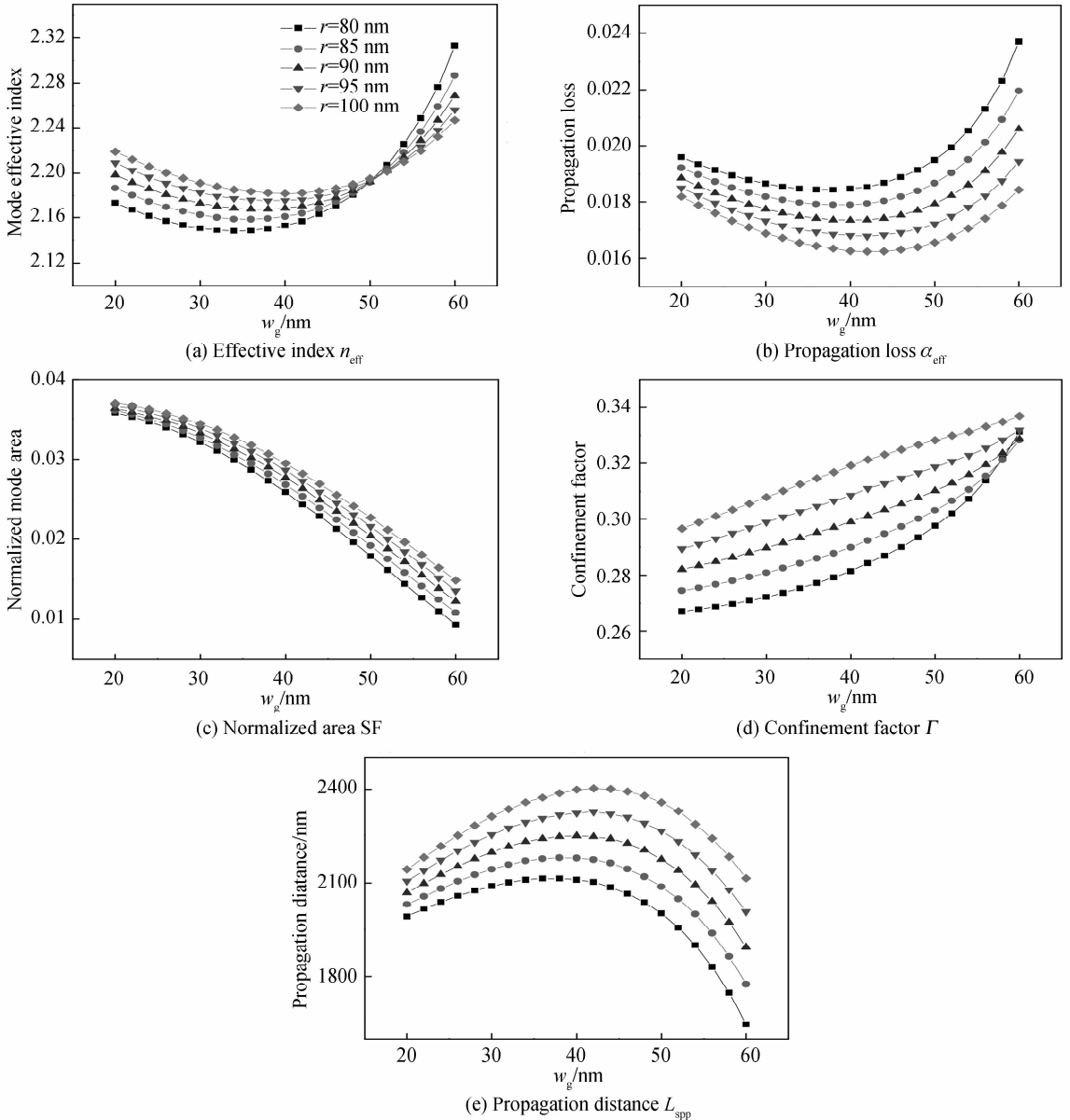


图 4 模式特性随空气槽间隙的变化

Fig. 4 The modal properties change with the air gap groove

约束. 在图 4(e) 传输距离在研究范围内先增大后减小, 和传输损耗的趋势相反, 即传输损耗越小, 传输过程损耗的能量越少, 则激光器的传输距离越长, 而固定纳米线半径, 整体呈现越来越大的趋势, 这有利于实现激光器的长距离传输. 从图 4(a)~(d) 还能看出, 随着 CdS 纳米线半径 r 的增大, 可以同时降低传输损耗和归一化模场面积并获得更大的限制因子.

讨论空气间隙槽宽度 w_g 对混合 SPs 模式的品质因数和增益阈值的影响. 由图 5(a) 可知, 随着空气间隙槽宽度 w_g 的增大, 激光器谐振腔的品质因数 Q 先减后增, 而当纳米线半径 r 为一定值时, 品质因数随着 w_g 的增大先增大后减小, 在研究范围内最大值可达到 415.68, 表明谐振腔对光子的束缚能力极强. 由图 5(b) 可知, 当空气间隙槽 w_g 在 20~60 nm 范围内变化时, 增益阈值先减后增, 因此可以在中间某一间隙宽度处取得最小值. 前半部分阈值的降低是由于混合模式和增益介质重叠的面积增大, 同时传输损耗不断减小, 而后半部分增益阈值又呈现出升高趋势, 此时限制因子虽然一直增加, 但传输损耗的增加起到了主要作用. 并且随着 CdS 纳米线半径的增大, 阈值水平整体降低. 但是, 考虑到实际应用中纳米线半径太大造成的更大模场面积的干扰超模式^[18-19], 所以纳米线半径不宜过大.

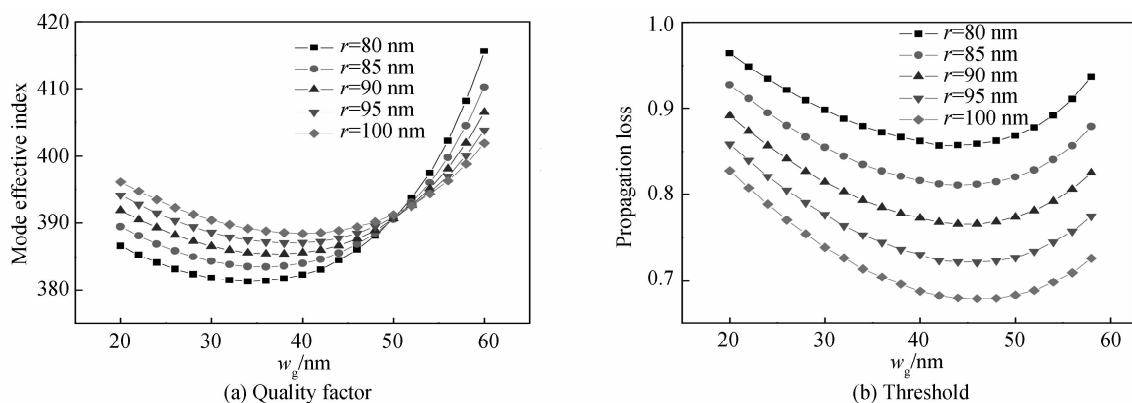


图 5 品质因数和增益阈值与 w_g 的关系

Fig. 5 Quality factor and gain threshold and the relationship of w_g

2.2.2 金属脊宽度对激光器特性的影响

分析金属脊的宽度 w_0 对纳米激光器特性的影响. 将纳米线的半径 r 固定为 100 nm, 讨论在空气间隙 w_g 分别为 20 nm, 30 nm, 40 nm, 50 nm, 60 nm 下, 该结构的模式特性随金属脊在 60~180 nm 范围内的变化情况. 仿真结果见图 6 和图 7. 从图 6 可以看到, 金属脊中的能量和总能量的比值不断减小, 这是由于金属界面的表面等离子体模式和纳米线模式之间的耦合作用不断增强, 使得传输损耗不断减少.

由图 7(a) 和 7(b) 可以看出, 随着金属脊宽度的增大, 不同空气间隙下, 激光器结构的模式特性有着相同的变化趋势, 模式的有效折射率和传输损耗不断减小. 从图 7(c) 可知, 增大半圆顶金属脊的宽度相当于增大半圆顶的半径, 即增大了曲率半径, 这样的结果是电场被限制在更大的空气间隙中, 从而使得归一化有效模场面积 (SF) 变大, 但也一定程度上减少了传输损耗. 而图 7(d) 表明, 限制因子整体呈上升趋势, 这是由于模式的总能量不断增大, 使得混合模式和增益介质区域的重叠区域增加. 由图 7 还能得出, 在研究范围内增加金属脊的宽度 w_g , 能够获得更低的传输损耗和更大的限制因子, 而对于归一化有效模场面积却有相反的作用. 从图 7(c) 中可以清楚地看到, 归一化模场面积的值已经很低, 最大值始终低于 0.45. 由图 7(e) 可得, 在纳米线半径固定不变时, 传输距离 L_{sp} 随着金属脊宽度的增加不断增大, 而固定空气间隙不变, 传输距离则呈现先增加后减小的趋势, 这和上一小节的分析完全一致, 同时传输损耗也呈现出和传输距离相反的趋势, 为了达到二者的平衡, 需要在不影响实现深亚波长约束的情况下综合考虑, 选取纳米激光器的最优结构尺寸.

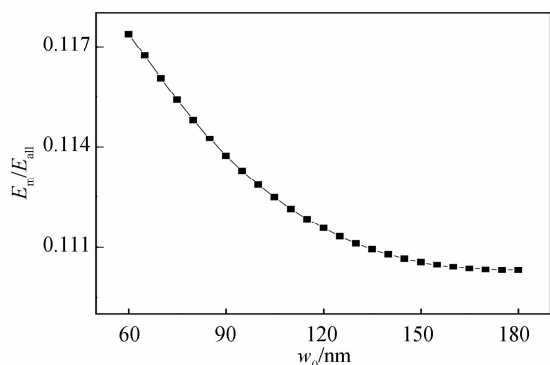


图 6 金属脊中能量占总能量的比随金属脊宽度 w_0 的变化
Fig. 6 The ratio of the energy in the metal ridge and total energy changes with the width of the metal ridge w_0

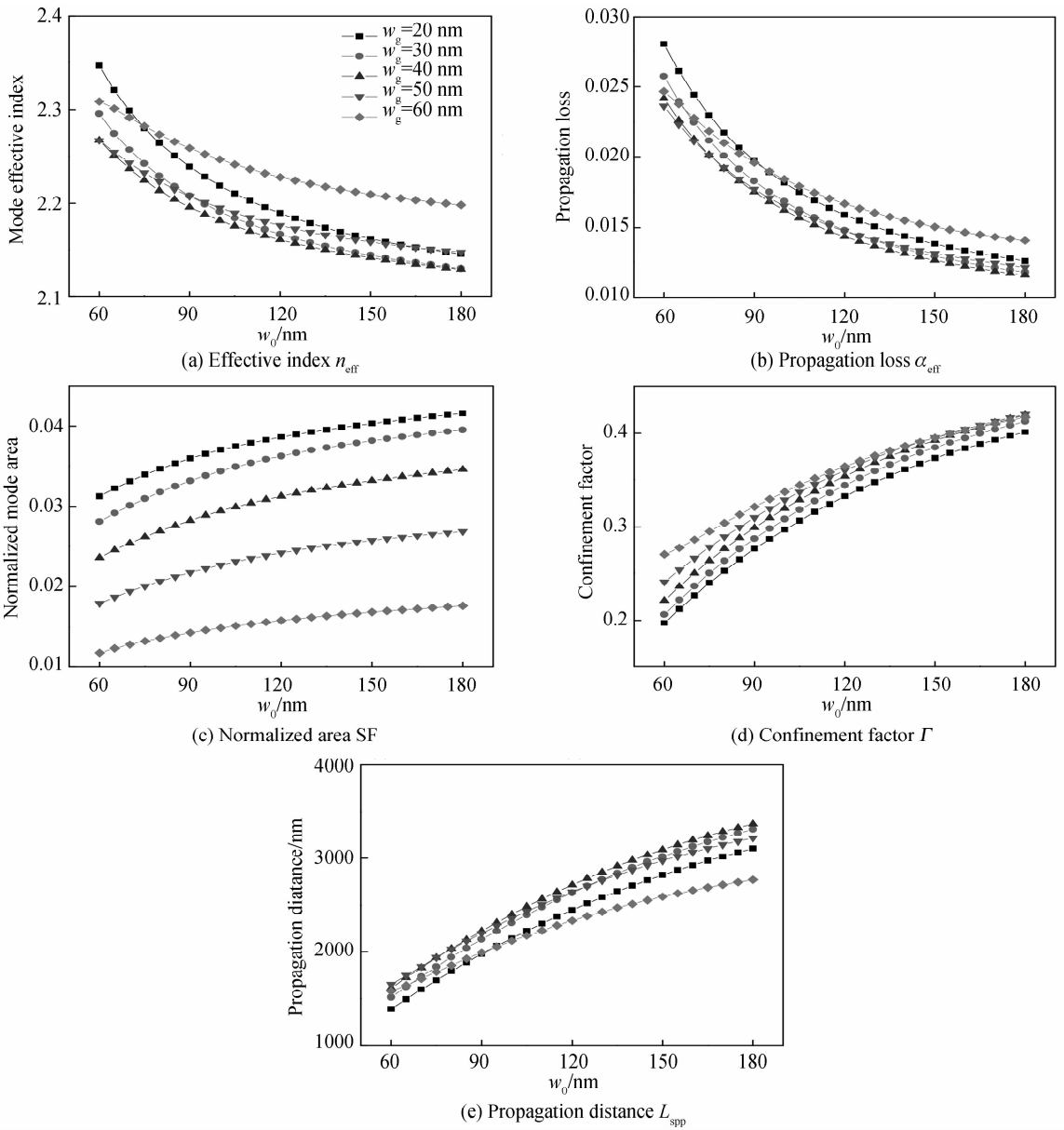


图7 模式特性随金属脊宽度的变化

Fig. 7 The modal properties change with the metal ridge width

最优结构尺寸不只需要考虑激光器的模式特性,还要考虑其增益阈值和品质因数,图8(a)和(b)是谐振腔的品质因数Q和激光器增益阈值随半圆顶金属脊宽度 w_0 的变化关系。由图8(a)可以看出,不同空气间隙

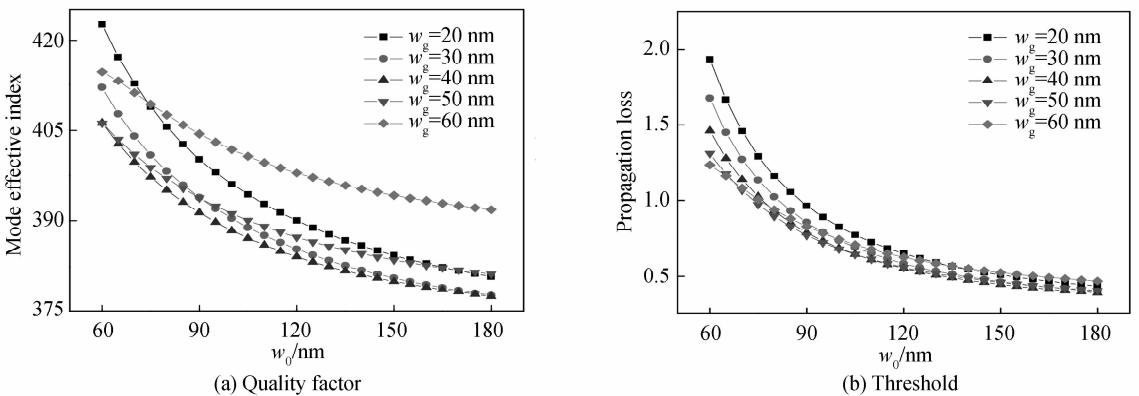


图8 品质因数和增益阈值与 w_0 的关系

Fig. 8 Quality factor and gain threshold and the relationship of w_0

下,随着金属脊宽度 ω_0 的增大,品质因数单调递减,并且减小的趋势越来越平缓,在 $\omega_g = 20 \text{ nm}$, $\omega_0 = 30 \text{ nm}$ 时,品质因数的最大值达到 422.56,表明该激光器将光很好地束缚在谐振腔内. 而图 8(b)显示,增益阈值的变化随着金属脊宽度的增加不断减小,这是因为混合模式和增益介质之间的模式重叠比较多,高增益介质纳米线能够补偿传输损耗,所以激光器的增益阈值的变化趋势和传输损耗的变化趋势一致,在 ω_g 分别取 20 nm, 30 nm, 40 nm, 50 nm, 60 nm 时,最小增益阈值都产生在 $\omega_0 = 180 \text{ nm}$ 处.

综上所述,为了使纳米激光器获得最优的性能,权衡各个几何参数对其模式特性、品质因数和增益阈值的影响,最终选择纳米线半径 r 为 100 nm,空气槽间隙 ω_g 和金属脊宽度 ω_0 分别为 60 nm 和 180 nm. 但 ω_g 和 ω_0 之间并不存在比例关系. 此时传输距离 $L_{\text{spp}} = 2772 \text{ nm}$,有效模场面积达到 $0.0044\lambda^2$,可实现对模场的超深亚波长约束和传输,并获得最小阈值. 此时的阈值为 $0.47 \mu\text{m}^{-1}$,品质因数 $Q = 392$,可实现低阈值纳米激光器的亚波长激射.

3 结论

提出了一种包含纳米线、空气间隙和半圆顶金属脊结构的低阈值混合表面等离子体纳米激光器. 基于有限元法,在 COMSOL Mutiphysics 软件平台上建立数学模型,研究了空气间隙、金属脊宽度和纳米线半径对激光器电场分布、模式特性和增益阈值的影响. 数值计算的结果表明:当纳米线半径 $r = 100 \text{ nm}$,空气间隙 $\omega_g = 60 \text{ nm}$,金属脊宽度 $\omega_0 = 180 \text{ nm}$ 时,激光器的有效模场面积仅为衍射极限面积的 0.44%,可实现对模场的超深亚波长约束,而增益阈值仅为 $0.47 \mu\text{m}^{-1}$,品质因数 $Q = 392$,可实现纳米激光器的低阈值激射. 本文设计的纳米激光器结构具有更优越的综合性能. 为基于纳米激光器的发展提供了一定的理论依据.

参考文献

- [1] OZBAY E. Plasmonics:merging photonics and electronics at nanoscale dimensions[J]. *Science*, 2006, **311**(5758): 189-193.
- [2] MAIER S A. Plasmonics: fundamentals and applications[M]. Springer Science & Business Media, 2007: 25-29.
- [3] OULTON R F, SORGER V J, BARTAL G, *et al.* A hybrid plasmonic waveguide for subwavelength confinement and long range propagation[J]. *Nature Photonics*, 2008, **2**(8): 496-500.
- [4] HILL M T, MARELL M, LEONG E S, *et al.* Lasing in metal-insulator-metal sub-wavelength plasmonic waveguides. [J]. *Optics Express*, 2009, **17**(13): 11107-11112.
- [5] NEZHAD M P, SIMIC A, BONDARENKO O, *et al.* Room-temperature subwavelength metallo-dielectric lasers[J]. *Nature Photonics*, 2010, **4**(6): 395-399.
- [6] HUANG Xiao-ping, LIU You-liang, WANG Peng, *et al.* Optically pumped lasing and electroluminescence in ZnO/GaN nano-heterojunction array devices[J]. *Applied Physics A*, 2015, **121**(3): 1203-1209.
- [7] HUANG Xiao-ping, WANG Peng, LIN En, *et al.* Fabrication of the glass microlens arrays and the collimating property on nanolaser[J]. *Applied Physics A*, 2016, **122**(7): 649.
- [8] LV Hong-bo, LIU Yu-min, YU Zhong-yuan, *et al.* Hybrid plasmonic waveguides for low-threshold nanolaser applications[J]. *Chinese Optics Letters*, 2014, **12**(11): 103-106.
- [9] NOGINOV M A, ZHU G, BELGRAVE A M, *et al.* Demonstration of a spaser-based nanolaser. [J]. *Nature*, 2009, **460**(7259): 1110.
- [10] WANG Cong, WU Gen-zhu, ZHOU Pei, *et al.* Mode properties of hybrid plasmonic waveguide with an metal nano-rib [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2014, **43**(9): 0916001.
王聪,吴根柱,周沛,等. 纳米金属肋混合表面等离子体波导模式特性分析[J]. 光子学报,2014,**43**(9):0916001.
- [11] CHEN Jia-yin, LIU Guo-jun, WANG Jiang-an. Analysis of SPP model theory and simulation in MIM structure[J]. *Chinese Journal of Luminescence*, 2014, **35**(6): 737-741.
陈佳音,刘国军,王江安. MIM结构的SPP模式理论与仿真计算研究[J]. 发光学报,2014,**35**(6):737-741.
- [12] RAETHER H. Surface plasmons on smooth and rough surfaces and on gratings[M]. Springer Berlin Heidelberg, 1988: 6-8.
- [13] HUANG Hong, ZHAO Qing, HONG Kun-quan, *et al.* Optical and electrical properties of N-doped ZnO heterojunction photodiode[J]. *Physica E*, 2014, **57**(3): 113-117.
- [14] BIAN Yu-sheng, ZHENG Zheng, LIU Ya, *et al.* Coplanar plasmonic nanolasers based on edge-coupled hybrid plasmonic waveguides[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2011, **23**(13): 884-886
- [15] LI Zhi-quan, PIAO Riu-qi, ZHAO Jing-jing, *et al.* A low-threshold nanolaser based on hybrid plasmonic waveguides at the deep subwavelength scale[J]. *Chinese Physics B*, 2015, **24**(07): 441-447.
- [16] CHEN Lin, LI Xun, WANG Guo-ping, *et al.* A Silicon-based 3-d hybrid long-range plasmonic waveguide for nanophotonic, integration[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2012, **30**(1): 163-168.

- [17] CHEN Lin, ZHANG Tian, LI Xun, *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): 20535-20544.
- [18] LIU Sen-bo, FU Hao, LI Xiao-long, *et al.* Characteristics of polymer waveguide sensor based on local surface plasmon resonance[J]. *Chinese Journal of Luminescence*, 2016, **37**(1): 112-116.
刘森波,付浩,李小龙,等. 基于局域表面等离子体共振效应的聚合物波导传感器特性研究[J]. *发光学报*, 2016, **37**(1): 112-116.
- [19] SHARMA T, KUMAR M. Hollow hybrid plasmonic waveguide for nanoscale optical confinement with long-range propagation. [J]. *Applied Optics*, 2014, **53**(9): 1954-1957.