

改进型混合表面等离子体微腔激光器的研究

董伟 王志斌

Improved hybrid plasmonic microcavity laser

Dong Wei Wang Zhi-Bin

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 67, 195204 (2018) DOI: 10.7498/aps.67.20180242

在线阅读 View online: <http://dx.doi.org/10.7498/aps.67.20180242>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn/CN/Y2018/V67/I19>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

[X-两环结构的光学特性研究](#)

Optical property of X-two ring structure

物理学报.2018, 67(15): 157301 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.67.20172582>

[氘在碳钨共沉积层中的滞留行为研究](#)

Deuterium retention in carbon-tungsten co-deposition layers prepared by RF magnetron sputtering

物理学报.2013, 62(19): 195202 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.62.195202>

[深亚波长约束的表面等离子体纳米激光器研究](#)

Study of plasmonic nanolaser based on the deep subwavelength scale

物理学报.2013, 62(13): 135201 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.62.135201>

[CVD 金刚石中的氮对等离子体刻蚀的影响](#)

Influence of nitrogen in diamond films on plasma etching

物理学报.2013, 62(7): 075202 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.62.075202>

[电子温度各向异性对霍尔推力器中等离子体与壁面相互作用的影响](#)

Effect of electron temperature anisotropy on plasma-wall interaction in Hall thruster

物理学报.2012, 61(20): 205202 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.61.205202>

改进型混合表面等离子体微腔激光器的研究*

董伟 王志斌†

(燕山大学电气工程学院, 秦皇岛 066004)

(2018年1月31日收到; 2018年7月23日收到修改稿)

设计了一种拥有增益介质脊和空气间隙的改进型混合表面等离子体微腔激光器, 并在微腔的两端面镀一层 50 nm 厚的银反射镜, 有效地提高了纳米激光器的性能. 基于 COMSOL Multiphysics 软件分别构建二维截面和三维立体模型, 在 1550 nm 的工作波长下对该改进型结构的传输性能以及微腔性能进行分析. 结果表明: 该激光器具有显著的亚波长限制能力和很大的传输距离, 最长距离可以达到 1.29 mm. 测试该激光器的微腔性能时, 通过调整结构参数获得了高质量因子、低增益阈值以及深亚波长下的超小有效模式体积 $0.001092 \mu\text{m}^3$ 和超高的 Purcell 因子 8.29×10^5 . 与先前结构对比, 在结构参数统一时, 所设计的结构具有更低的激光激射阈值和更强的微腔局域能力. 所设计的改进型混合表面等离子体微腔激光器可以作为各种光子器件的基本构建模块, 并可应用于传感、纳米聚焦和纳米激光等领域.

关键词: 混合表面等离子体波导, 纳米激光器, 有限元法, 微腔

PACS: 95.85.Ls, 73.20.Mf, 73.40.Qv, 42.79.Gn

DOI: 10.7498/aps.67.20180242

1 引言

表面等离子体激元 (surface plasmon polaritons, SPPs) 是沿着金属和电介质两种材料的交界面传播的电磁表面波^[1], 其分布在交界面垂直方向上的场强呈指数衰减^[2]. SPPs 是高度集成的光子器件和电路的关键技术, 可以在比光学极限小得多的尺度上操纵光的传播^[3,4]. 在一系列的波导设计中, 包含金属材料的 SPPs 结构可以实现亚波长范围内良好的光透射, 例如金属纳米颗粒波导^[5]、金属条纹波导^[6]、金属凹槽波导^[7]和金属楔形波导^[8]. 相比于传统的全介电波导, 该结构具有更好的光学性能. 然而, 由于金属部件引起的大的欧姆损耗, 该结构仍然受到“限制”和“损失”之间的严重制约关系, 极大地阻碍了其实际应用. 文献^[9, 10]设计了一种混合等离子体激元波导 (HPW): 通过在金属结构和高折射率电介质结构之间加入低折射率电介质层, 实现了表面等离子激元在较强光

场限制下低损耗的传播. 基于 HPW 的应用, 2008 年美国加州大学的张翔团队^[11]设计出了一种介质环-介质-金属组成的混合结构, 拓宽了 SPPs 的应用范围.

具有低阈值电流和良好输出功率的超小型半导体激光器是单光子芯片上高密度集成的关键^[12], 其中常规法布里珀罗 (FP) 激光器是最重要的类别之一, 该激光器最为主要的组成结构是引入了法布里珀罗 (F-P) 共振腔. F-P 共振腔本质上是一种将入射光波转化为稳定共振的光学谐振腔. 通过稳定的共振可以将光波限制在腔内一个很小的空间中, 使得共振进一步增强^[13]. 传统的光学谐振腔会受到光波衍射极限的限制, 结构尺寸无法小于波长尺寸, 这严重限制了激光器的进一步发展. 随着对电磁场超强的表面局域性在 SPPs 应用中的发现, 使得激光器突破衍射极限实现亚波长尺寸成为现实. 基于 SPPs 和传统的光学谐振腔的优点, 将 SPPs 与传统的光学谐振腔结合成混合等离子体微腔激光器是纳米激光器进一步发展的重要方向. 1946 年,

* 国家自然科学基金青年科学基金 (批准号: 61107039)、河北省自然科学基金青年基金 (批准号: F2012203202) 和河北省百人计划项目 (批准号: 4570018) 资助的课题.

† 通信作者. E-mail: ioe@ysu.edu.cn

Purcell^[14]提出了将激发态原子置于同光波长尺寸相似的介质谐振腔中,从而很好的改善了自发辐射的特性. 2009年,张翔团队^[15]研制出了一种混合表面等离子体纳米激光器,利用的就是金属和增益介质的耦合激发表面等离子体,并通过纳米线的两个端面形成F-P腔来实现反射振荡.

结合微腔的共振增强特性和HPW结构的表面局域优势,本文提出了一种结合纳米微腔和HPW的改进型混合表面等离子体微腔(IHPM)激光器. 该IHPM结构主要是将HPW与常规的F-P光学微腔相结合,既表现出SPPs的表面局域性,又带有传统光腔结构的谐振特性. 通过模型设计在COM-SOL Multiphysics 软件中进行研究. 仿真结果显示:该结构具有突出的光限传输性能和微腔局域性能,尤其在有效模式体积、质量因子、传输距离、增益阈值和Purcell因子等表征激光器性能的各个参数中都表现出了超高的性能. 该IHPM激光器的提出可以进一步研究和优化混合表面等离子体纳米激光器,以实现更小的有效模式体积和高珀塞尔因子.

2 模型设计

本文所设计的IHPM激光器结构如图1所示. 该结构由磷砷化镓(InGaAsP)增益介质脊、带有三角形缝隙的二氧化硅(SiO₂)介质层以及银纳米线构成,其中青色的组件是金属银(Ag)纳米线. 为了降低尖点制作的工艺难度同时避免出现奇点,本设计对增益介质脊的顶端尖角做了凸起处理,使其凸起设计的圆的直径为 d . 橙色的组件是二氧化硅(SiO₂)介质层,浅青色的组件为低折射率的

空气缝隙. 提出的IHPM激光器结构充分利用三角形的空气缝隙和介质脊结构,从而减少传播损失和维持紧密场约束. 在该激光器结构下,增益介质脊的顶角定义为 θ ($\theta = 2\alpha$),增益介质的底部高(h_1)为100 nm,介质脊的高(h)为 $a/2/\tan \alpha$, a ($a = 180$ nm)为介质脊三角形的底边长,增益介质宽度(w)为400 nm. 介质脊凸起到银纳米线的间距设为 h_3 ,银纳米线的半径为 r ,长度 L 为10 μm ,纳米线的中心放置在空气三角形层的顶点处. h_2 的大小根据 h_4 确定. 在1550 nm的工作波长下,各个材料的Ag, InGaAsP, SiO₂, 空气的相对介电常数分别为: $\epsilon_m = -129 + 3.3j$, $\epsilon_{\text{InGaAsP}} = 11.38$, $\epsilon_{\text{SiO}_2} = 2.25$, $\epsilon_0 = 1$. COMSOL仿真时首先建立二维模型,然后添加电磁波频域,最后加入模式分析. 全局参数定义包括工作波长 λ_0 、频率 $f_0(c_{\text{const}}/\lambda_0)$ 、顶角 θ 、增益介质底部高 h_1 、介质脊高 h 、介质三角形的底边长 a 、增益介质宽度 w 、介质脊凸起到银纳米线的间距 h_3 ,银纳米线的半径 r 、长度 L . 模块每个组成部分的材料参数设置包括材料的相对介电常数、相对磁导率、电导率. 其中银为 $-129+3.3i$, 1, 0; InGaAsP为11.38, 1, 0; SiO₂为2.25, 1, 0; 空气为1, 1, 0. 模式分析参数设置包括模式分析频率为 f_0 , 模式搜索方法为手动,待求的模式数为1. 实验制备中首先该结构避免了将III-V材料生长在金属上,使用生长法生长出一定厚度的InGaAsP层,然后在InGaAsP层上沉积一层固定厚度的SiO₂层,然后利用AgNO₃和维生素C在SDS/ethanol溶液中可以合成高表面积/体积比的银纳米线,然后用EBL以银纳米线为中心将二氧化硅层蚀刻成三角形^[16]. 从理论上分析,在一定程度上是可以实现的^[17,18].

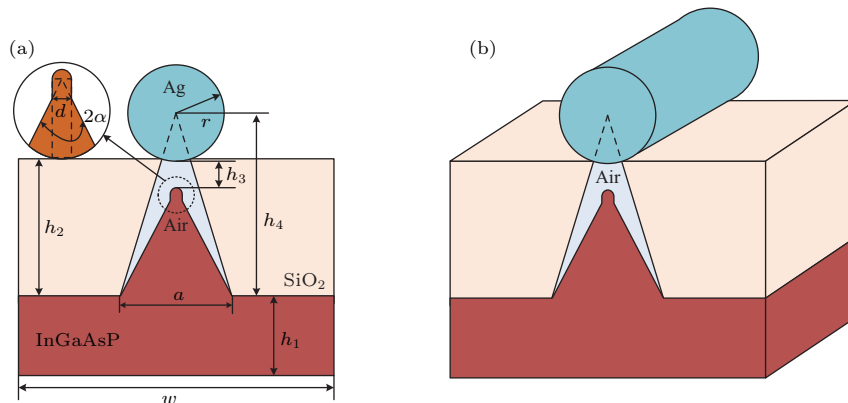


图1 (a) 波导结构的二维剖面图; (b) 波导的三维结构图
 Fig. 1. (a) Two-dimensional profile of waveguide; (b) Three-dimensional structural diagram of waveguide.

3 激光器传输特性分析

3.1 模式特性参数

通过使用基于有限元法 (FEM) 的软件 COMSOL 的本征模来求解 Maxwell 方程, 从而对 HPW 的模式特性进行了数值研究. 得到二维波动方程 [19]:

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

式中 n 为模型材料的折射率, n_{eff} 为模式的有效折射率, ∇ 为微分算子, φ 为标量波函数.

模式特性是衡量激光器综合特性的重要参数标准. 模式特性可由一个复合波矢表征, 其平行分量用 $\beta + i\alpha$ 定义传播常数 [20], 这里 β 和 α 分别是相位和衰减常数. 模式的有效折射率可以由模式复折射率的实部 [20] 表示, $n_{\text{eff}} = \text{Re}(N_{\text{eff}}) = \beta/k_0$, 其中 k_0 是光在真空中的波矢量, $k_0 = 2\pi/\lambda$. 传播长度是当介质与金属结构间的电场强度衰减到 $1/e$ 时 SPPs 沿介质与金属面传播的距离, 在波导光场约束力不变时, 其值越大越好. 定义为 [21] $L_m = 1/2\alpha = \lambda/[4\pi\text{Im}(N_{\text{eff}})]$, 其中 $\text{Im}(N_{\text{eff}})$ 是模式复折射率的虚部. 而有效模式面积定义为模式总能量与最大电磁能密度之比, 定义为 [22,23]

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

这里, $\mathbf{W}(\mathbf{r})$ 为场强矢量, 定义为 [22,23]

$$\mathbf{W}(\mathbf{r}) = \frac{1}{2} \left\{ \text{Re} \left[\frac{d(\boldsymbol{\varepsilon}(\mathbf{r})\boldsymbol{\omega})}{d\boldsymbol{\omega}} \right] |\mathbf{E}(\mathbf{r})|^2 + \mu_0 |\mathbf{H}(\mathbf{r})|^2 \right\}, \quad (3)$$

其中 $\mathbf{E}(\mathbf{r})$ 和 $\mathbf{H}(\mathbf{r})$ 分别为电场场强分布矢量和磁场场强分布矢量, $\boldsymbol{\varepsilon}(\mathbf{r})$ 为相对介电常数矢量, μ_0 为真空中的磁导率, $\max(\mathbf{W}(\mathbf{r}))$ 为场能量峰值. 归一化模式面积代表了空间分布中电场能量的集中性, 其值越小代表波导结构越大的光场约束能力, 定义为 [23] $SF = A_m/A_0$, 其中 $A_0 = \lambda^2/4$ 是自由空间中衍射极限模场面积, λ 为波导工作波长. E_{loss} 定义为波导中光的传输损耗, 在波导光场约束力不变时, 其值越小越好, 具体表示为 [24]

$$E_{\text{loss}} = -20n_{\text{im}}k_0 \lg e \approx -2n_{\text{im}}k_0 \times 4.34, \quad (4)$$

其中 n_{im} 是模式复折射率的虚部, 通过 4.34 将传输损耗 μm^{-1} 转化为 $\text{dB}/\mu\text{m}$; 负号代表增益为正时最

终的传输损耗为负数. 由于 HPW 结构中金属材料会产生欧姆损耗, 所以等离子体激元波导的场强约束能力和传播距离之间会产生矛盾冲突. 通常, 场限制能力强时一般对应着非常短的传播距离. 为了综合考虑场约束和传播距离的关系, 引入品质因数 Fom [25], 将其定义为 $Fom = L_m/SF$, Fom 值越大, 对应越好的波导综合性能.

为了进一步分析所设计的改进型结构的综合性能, 引入平均能量密度 I , I 定义为波导横截面中指定部分的能量与横截面积的比值, 再用整个波导的横截面能量进行归一化处理. 可以表征激光器中固定部分的能量分布, 其表达式为 [26]

$$I = \frac{P_S/S}{P_A} = \Gamma/S, \quad (5)$$

其中, P_S 为指定部分的能量值, S 为指定部分的横截面积, P_A 为整个波导的横截面能量, Γ 为能量限制因子 [27,28],

$$\Gamma = P_S/P_A = \iint_S \mathbf{W}(\mathbf{r}) dA / \iint_{\text{all}} \mathbf{W}(\mathbf{r}) dA.$$

3.2 激光器电场分布

对 IHPM 激光器结构的仿真分析是基于 COMSOL Multiphysics 软件的模式分析模块实现的, 使用完美匹配层 (PML) 可以消除模型边界处的多余散射波, 以此来消除非物理散射的影响. 同时将空气间隙区域和增益介质脊区域网格化设置为较细以确保仿真结果的准确性. 通过去掉高阶模, 得到二维尺度下归一化的电场分布 ($r = 130 \text{ nm}$, $d = 13 \text{ nm}$, $h_3 = 3 \text{ nm}$, $2\alpha = 65^\circ$), 如图 2 (a) 和图 2 (b) 所示. 由图 2 (a) 可明显地看出, 电场能量在介质脊顶端到金属纳米线的低折射率空气间隙中得到了高度增强, 这是由于银纳米线边缘处的 SPP 模式与 InGaAsP 脊模式之间相互重叠发生耦合, 将光主要限制在空气间隙处实现了高度局域化增强效应和能量约束. 同时为了更加准确地表明耦合增强部分的能量分布, 将在后文中以平均能量密度的形式给出分析. 如图 2 (c) 和图 2 (d) 所示, 在 x 轴和 y 轴方向上电磁能量都被限制在了极小的面积上. 同无空气缝隙的结构 (图 2 (b)) 对比, 所设计的 HPW 结构 x 向和 y 向电场分布都更集中, 场强约束能力更好.

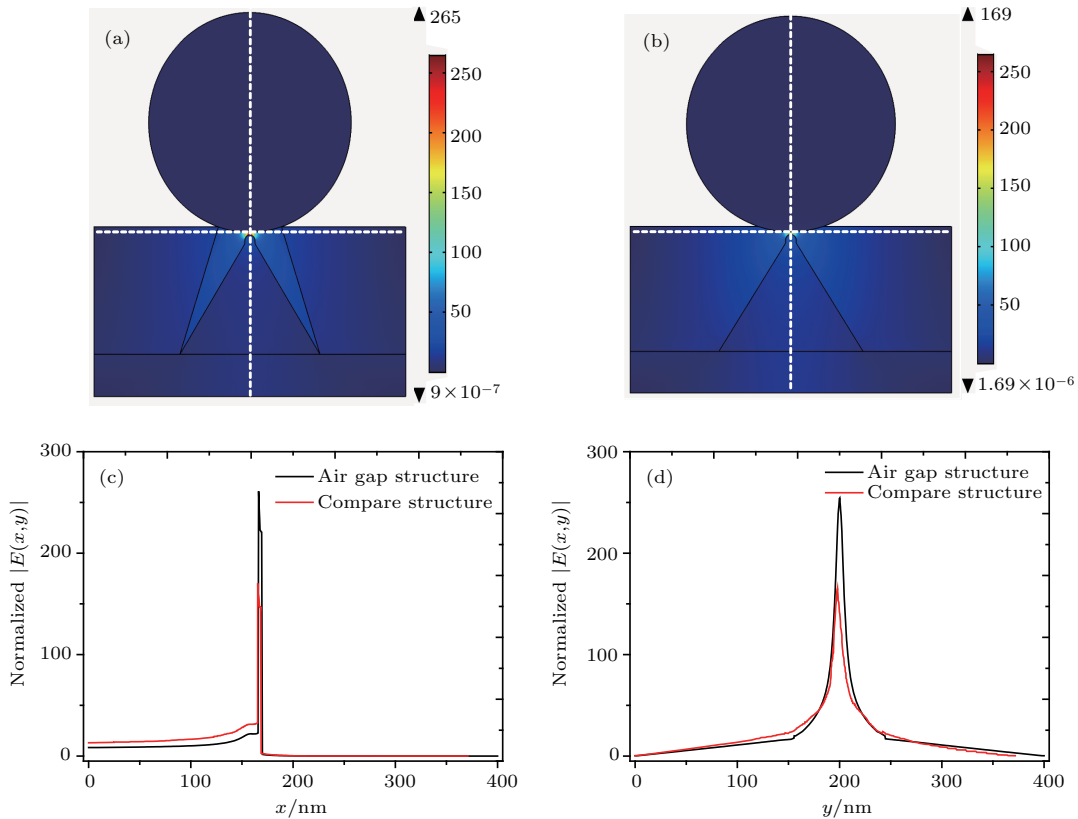


图2 (a) 波导基模归一化电场分布图 ($r = 130 \text{ nm}$, $d = 13 \text{ nm}$, $h_3 = 3 \text{ nm}$, $\theta = 65^\circ$); (b) 无空气缝隙对比结构基模归一化电场分布 ($r = 130 \text{ nm}$, $d = 13 \text{ nm}$, $h_3 = 3 \text{ nm}$, $\theta = 65^\circ$); (c), (d) 分别为 (a) 和 (b) 中沿着水平和垂直虚线处的电场分布
Fig. 2. (a) Normalized electric field distribution of the fundamental mode of proposed waveguide ($r = 130 \text{ nm}$, $d = 13 \text{ nm}$, $h_3 = 3 \text{ nm}$, $\theta = 65^\circ$); (b) normalized electric field distribution of the fundamental mode of no air gap compare structure ($r = 130 \text{ nm}$, $d = 13 \text{ nm}$, $h_3 = 3 \text{ nm}$, $\theta = 65^\circ$); (c) and (d) show normalized electric field distribution along the horizontal and vertical dashed lines in figure 2(a) and 2(b).

3.3 结构几何参数对激光器输出特性影响

为了突出改进结构的优势, 将所设计的结构与无空气缝隙结构进行对比. 同时为了更为全面地分析改进型激光器的特性, 不仅分析了银纳米线半径 r 和介质脊直径 d 对输出特性影响, 还分析了介质脊顶端到银纳米线的距离 h_3 对输出特性的影响. 图 3 所示为 r , d 和 h_3 变化对归一化模式面积、传输损耗以及传输距离的影响. 介质脊顶端到纳米线的距离 h_3 分别取 1, 3 和 10 nm, 介质脊顶端圆直径分别取 $d = 3, 7, 10, 13, 16 \text{ nm}$, 纳米线的半径 r 范围为 65—135 nm. 如图 3(a) 所示, 随着 r 和 d 的增大, 归一化模式面积 SF 逐渐减小, 主要是因为随纳米线的半径和介质脊直径的增大, 金属银和增益介质的重叠面积增大, 导致该 HPW 中增益介质和纳米线之间的模场限制能力增强. 同时当随着高度 h_3 的值变大, 金属银和增益介质的重叠面积将减小, 导致归一化模式面积增大, 耦合作用减弱. 当纳米线的半径 r 在 65—135 nm 变化时 SF 始

终小于 0.0125, 这表明该结构在可控范围内实现了深亚波长的模场约束. SF 在 $r = 135 \text{ nm}$ 时取得最小值 0.00118, 同时 A_m 为 $0.000295\lambda^2$, 完全满足深亚波长约束. 从图 3(b) 中可以看出, 随着银纳米线的半径和介质脊的直径的增大, 传输距离 L_m 是逐渐减小的, L_m 在 $r = 65 \text{ nm}$, $h_3 = 10 \text{ nm}$ 时取得最大值 1.29 mm, 传输距离达到了毫米级. 同时在纳米线的半径和介质脊的直径不变的情况下, 高度 h_3 与传输距离成正相关. 其主要原因在于光场限制能力降低时, 传输过程中金属的欧姆损耗降低, 传输距离相应地变长. 图 3(c) 展现了传输损耗的变化趋势, 传输损耗随 r , h_3 和 d 的变化规律同模式面积恰好相反, 模式面积越大时传输损耗反而越小. 这主要是因为模式面积越小时, 银纳米线边缘处的 SPP 模式与 InGaAsP 脊模式之间的耦合增强, 导致金属银中能量衰减加快, 传输损耗增大. 由图 3(a)—(c) 还可以发现, 在确保结构参数统一时, 所提出的 IHPM 激光器结构比无空气层结构的

传输距离更远, IHPM 激光器结构传输长度延长了 5.28 倍左右. 归一化模式面积更小, IHPM 激光器结构归一化面积缩小了 5.13 倍左右. 传输损耗更小, IHPM 激光器结构传输损耗缩小了 2.93 倍左右. 这为激光器结构参数的选取提供了更加全面的依据. 由图 3 (a)—(c) 分析可以得出归一化模场面积的影响相对于传输损耗、传输距离正好相反, 因此

需要进一步的分析以得到归一化面积与传输损耗、传输距离之间的权衡关系.

接下来通过分析品质因数 Fom 、平均能量密度 I 和基模体积 V_{00} 来得到具有最优传输特性的激光器结构参数. 如图 4 所示, 几何参数 r , d 和 h_3 变化规律同图 3 相同. 图 4 (a) 显示了品质因子 Fom 值随着 r 和 h_3 的增大而逐渐减小, 同时又随着 d 的

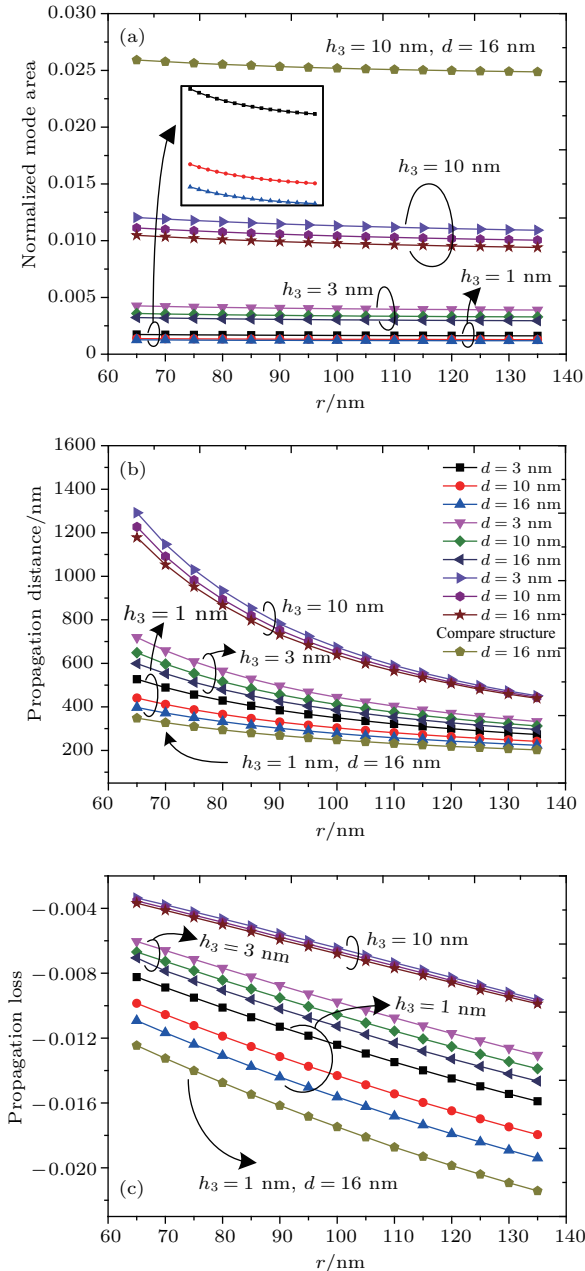


图 3 所设计的波导结构的归一化模式面积、传播长度、传输损耗随 r , d 和 h_3 的变化 (a) 归一化模式面积; (b) 传播距离; (c) 传输损耗
 Fig. 3. The SF , E_{loss} and L_m of the proposed waveguide with different r , d and h_3 : (a) The normalized mode scaling factor SF ; (b) distance L_m ; (c) distance loss E_{loss} .

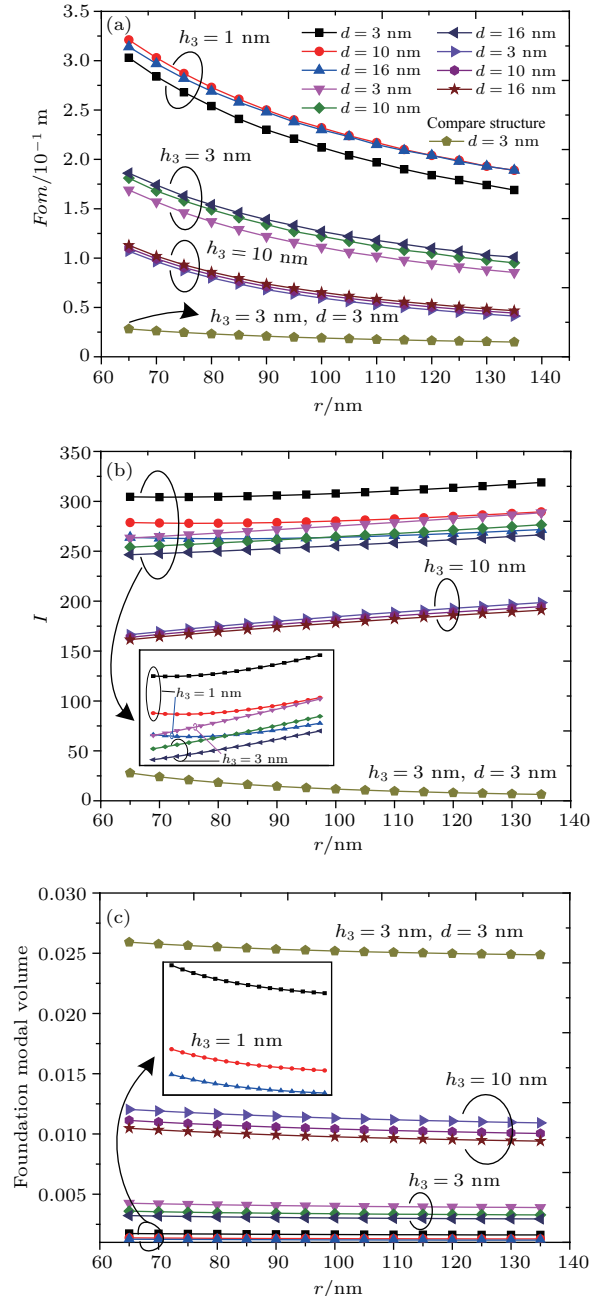


图 4 所设计波导结构的品质因数和平均能量密度随 r , d 和 h_3 的变化 (a) 品质因子; (b) 平均能量密度; (c) 基模体积
 Fig. 4. The Fom and I of the proposed waveguide with different r , d and h_3 : (a) The figure of merit Fom ; (b) average energy density; (c) foundation modal volume.

增大而逐渐增大, 在 $r = 65 \text{ nm}$, $d = 10 \text{ nm}$, $h_3 = 1 \text{ nm}$ 时 Fom 取得最大值 3.21×10^5 . 图 4(b) 显示了空气缝隙层中的平均能量密度随着 r , d 和 h_3 的变化规律, 由图可知 I 随着 r 增大而逐渐增大, 当 $r = 135 \text{ nm}$, $d = 3 \text{ nm}$, $h_3 = 1 \text{ nm}$ 时 I 取得最大值 $318.9 \mu\text{m}^2$, 同时 I 随着 d 和 h_3 的增大而逐渐减小, 表明限制在空气介质中的能量逐渐减小. 图 4(c) 显示基膜体积 V_{00} 值随着 r 的增大而逐渐减小, 同时又随着 h_3 和 d 的增大而逐渐增大, 在 $r = 135 \text{ nm}$, $d = 16 \text{ nm}$, $h_3 = 1 \text{ nm}$ 时 V_{00} 取得最小值 $5.89 \times 10^{-4} \mu\text{m}^3$. 与无空气缝隙的结构相比较, 从图 4(a)—(c) 可以明显看到, 改进型结构的 Fom 值和 I 值分别是无空气缝隙结构的 10.74 倍和 44.99 倍左右, 同时 V_{00} 值明显低于无空气缝隙结构约 4 倍左右. 这表明 IHPM 激光器结构的综合性能更突出. 通过上述分析, 在 $h_3 = 1 \text{ nm}$ 时 IHPM 激光器的传输特性相对最好, 但是同时考虑到制备难度和工艺限制的问题, 最后将 h_3 选在 3 nm , 这样既降低了制备难度, 同时传输特性可以在可控的范围内选择. 因此通过综合 Fom , I , V_{00} , SF , L_m 和 E_{loss} 的值得出传输特性最优的 IHPM 激光器结构选定在 $r = 65 \text{ nm}$, $h_3 = 3 \text{ nm}$, $d = 16 \text{ nm}$ 时, 此时 Fom 值为 1.86×10^5 , I 值为 $288.53 \mu\text{m}^2$, V_{00} 值为 $1.84 \times 10^{-3} \mu\text{m}^3$, 归一化模场面积 SF 值为 0.0032 , 传输长度 L_m 为 $598.79 \mu\text{m}$, 传输损耗 E_{loss} 值为 -0.0072 .

4 基于该激光器的微腔特性

4.1 对微腔特性进行二维光限分析

由于光学微腔在质量因子和模式体积方面都表现出了极大的优势, 所以被广泛应用于低阈值的纳米激光器. 因此, 为了进一步提高所设计激光器的性能, 下面重点分析结合了传统的光学谐振腔和 HPW 之后的 IHPM 激光器的激射特性, 包括增益阈值、质量因子、模式体积和 Purcell 因子. 传统光学微腔主要对光波模式进行局域, 而结合谐振腔以及 HPW 的结构主要局域的是 SPP 模式, 不仅表现出优越的表面局域和近场增强特性, 还表现出良好的微腔谐振特性. 本文中光学谐振腔是基于两端面的镀银反射镜和混合表面等离子波导形成的 F-P 谐振腔. 图 5(a) 为激光器的微腔结构的端面没有镀银层的结构, 图 5(b) 为激光器的微腔结构在两个端面分别镀厚度为 t ($t = 50 \text{ nm}$) 的银层结构,

图 5(c) 为文献 [29] 中提出的微腔结构的电场分布图和侧面图. 本节的参数将从微腔两端面使用镀银反射镜与不使用两个方面进行分析.

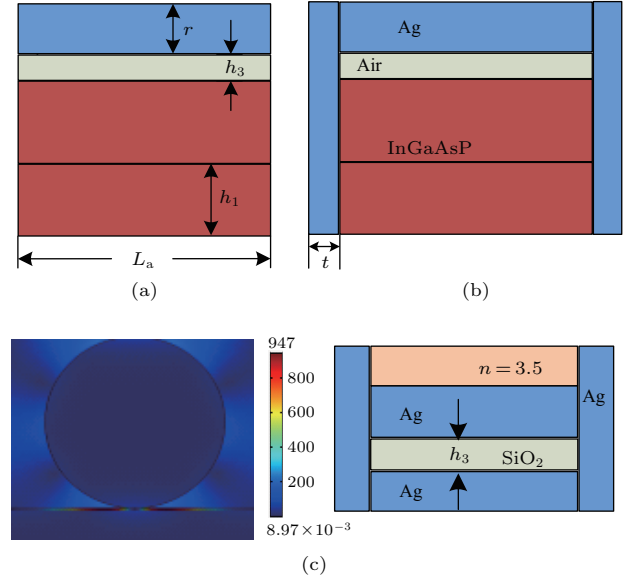


图 5 所设计的混合等离子体微腔激光器的侧视图 (a) 端面未镀银结构; (b) 端面镀银结构; (c) 先前端面镀银结构

Fig. 5. The side view of the hybrid plasmonic nanocavity laser: (a) End not plated silver structure; (b) end silver-plated structure; (c) end silver-plated structure of previous.

增益阈值和质量因子是两个展现激光器微腔特性的重要参数. 描述激光器所需增益阈值 g_{th} [28] 被定义为

$$g_{\text{th}} = (k_0 \alpha_{\text{eff}} + \ln(1/R)/L_a) / \Gamma(n_{\text{eff}}/n_{\text{wire}}),$$

增益阈值是激光输出以受激发射为主的最低增益值, 其值越小, 激光器实现受激发射的增益越小, 其品质就越高. 其中 L_a 所设计微腔的长度, 取 $L_a = 1550 \text{ nm}$, R 表示光腔镜面反射率, $R = (n_{\text{eff}} - 1)/(n_{\text{eff}} + 1)$ 为如图 5(a) 所示在微腔两端面未加入镀银层反射镜时的表达式, 如图 5(b) 所示在微腔两端面镀厚度为 50 nm 的银层反射镜 [29] 时 $R = 0.95$. n_{wire} 是增益介质的折射率, $n_{\text{eff}}/n_{\text{wire}}$ 为模式有效折射率的增强部分. 如果纳米微腔的长度 L_a 缩短到微米级时镜面损失显著增大, 此时纳米微腔的损耗主要是镜面损失. 所以这里只考虑镜面损耗. 质量因子 Q 主要用来表征微腔的光限能力, Q 值越大光限能力越强, 对光子的储存时间就越长. 其定义为 [30]:

$$Q = 2\pi f \tau_R = 2\pi f \frac{L_a}{\delta \cdot c}, \quad (6)$$

$$L_a = q \frac{\lambda}{2}, \quad (7)$$

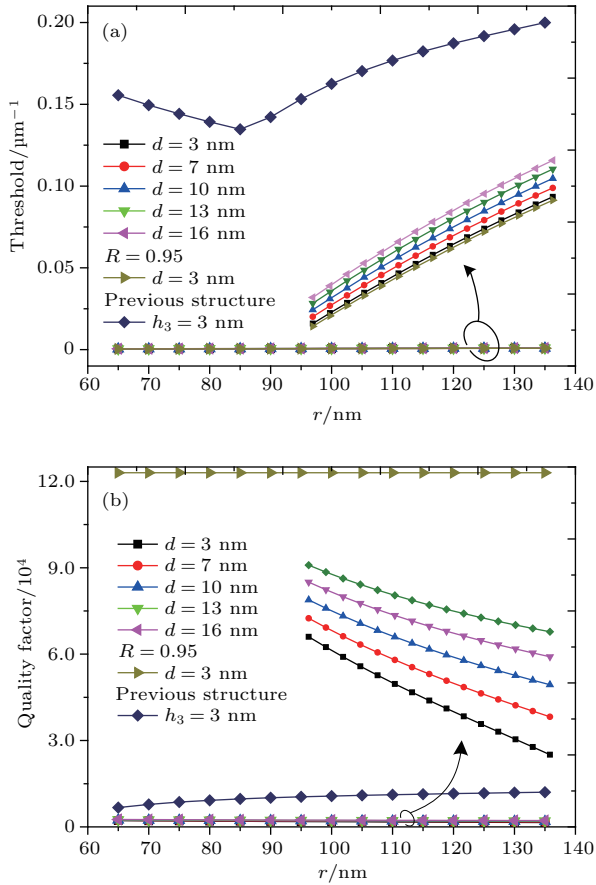


图6 激光器的增益阈值、质量因子随 r 和 d 的变化 (a) 增益阈值; (b) 质量因子

Fig. 6. The g_{th} and Q of the proposed nanolaser with different r and d : (a) The threshold gain g_{th} ; (b) quality factor Q .

其中 f 是微腔内光场频率; τ_R 是微腔时间常数; δ 是腔内损耗; q 是正整数; λ 是谐振波长, 为了能在微腔内形成稳定的振荡, 腔长取为半波长的整数倍. 如图 6(a) 所示, 当 r 与 d 较小时, g_{th} 相当低, 说明纳米线半径越大或者纳米脊直径越大则增益阈值越大, 不利于激光的产生. 在 $d = 3$ nm 时, 加入镀银反射镜结构后 ($R = 0.95$) 增益阈值明显小于未加入镀银反射镜结构的微腔, 当 $d = 3$ nm, $R = 0.95$, $r = 65$ nm 时最小的增益阈值为 $4.14 \times 10^{-4} \mu\text{m}^{-1}$. 图 6(b) 中质量因子 Q 随着 r 和 d 的增大而变小, 质量因子变小表明微腔的光限能力减弱. 因此要得到较高的质量因子同样需要较小的纳米线半径和纳米脊直径, 同时在加入镀银反射镜结构后 ($R = 0.95$), 质量因子远大于未加入镀银反射镜结构的微腔, 最大值出现在 $d = 3$ nm, $R = 0.95$, $r = 65$ nm 时为 1.23×10^5 . 这说明较小的纳米线半径和纳米脊直径可以获得较好的光微腔性能. 同样在图 6(a) 和图 6(b) 中就各参数与先前结构(如

图 5(c) 所示在保证几何参数相同时) 对比, 发现增益阈值 g_{th} 远大于本结构并且质量因子 Q 远小于加入镀银反射镜结构后 ($R = 0.95$) 的本结构. g_{th} 小于先前结构 200 倍以上, Q 是先前结构的 10 倍左右. 本结构在各个参数性能方面表现出了明显的优势.

4.2 对微腔特性进行三维光限分析

接下来通过 COMSOL Multiphysics 软件的三维模块进行三维仿真分析. 在三维尺度上将二维平面进行 Z 轴拉伸处理, 设置三维尺度的 Z 轴上的拉伸距离为 L_a , 将二维仿真中各材料的介电常数输入该三维模型, 在软件的频域模块中设置工作波长为 1550 nm 并进行仿真分析, 输出结果如图 7 所示. 图 7(a) 为激光器的三维仿真图, 图 7(b) 为激光器在 yz 横截面上的场强分布图. 由图 7(a) 和图 7(b) 可得在所设计的微腔中, Ag 纳米线利用空气层与增益介质材料 InGaAsP 分隔, 将电磁能量局域在微腔内低折射率的空气层中. 金属纳米线表面的 SPP 模式和增益介质重叠的部分可以发生耦合, 这种耦合可以使等离子体激元模式 (SPP) 实现超小体积范围内的等离子体激元. 同时, 在金属表面产生的表面等离子体激元会沿着介质脊的方向传播, 并在振荡过程中被极大地放大, 同时在纳米线的镀银端面被反射. 图 7(c) 显示了在三维光限下激光器有效模式体积随纳米线半径 r 和介质脊直径 d 变化的关系. 有效模式体积 V_{eff} 可以显著地评判三维局域化限制能力, 是反映激光器微腔性能的重要参数. 可以用激光模式的总能量的体积分与最大能量比值定义, 其定义为 [31,32]

$$V_{eff} = \frac{\iiint \mathbf{W}(\mathbf{r}) d^3r}{\max(\mathbf{W}(\mathbf{r}))}, \quad (8)$$

其中 $\mathbf{W}(\mathbf{r})$ 为场强矢量, 同 (3) 式. 由图 7(c) 可得到, V_{eff} 随 r 增大整体上呈现减小趋势, 随 d 的增大呈现增大趋势, 这说明在大的纳米线半径 r 和小的介质脊直径 d 时可以得到较强的光场限制, 同时场能量的最大体密度较大. 其最小模式体积可以达到 $0.001092 \mu\text{m}^3$.

由图 7(c) 可知微腔的有效模式体积可以实现纳米尺寸下很小的值, 介质脊顶端的电磁场密度将会被极大地改变, 这种改变就可以有效地控制自发辐射. Purcell 已经证明当原子或者量子点置于微腔的低折射率介质中时, 其自发辐射的效率可以得

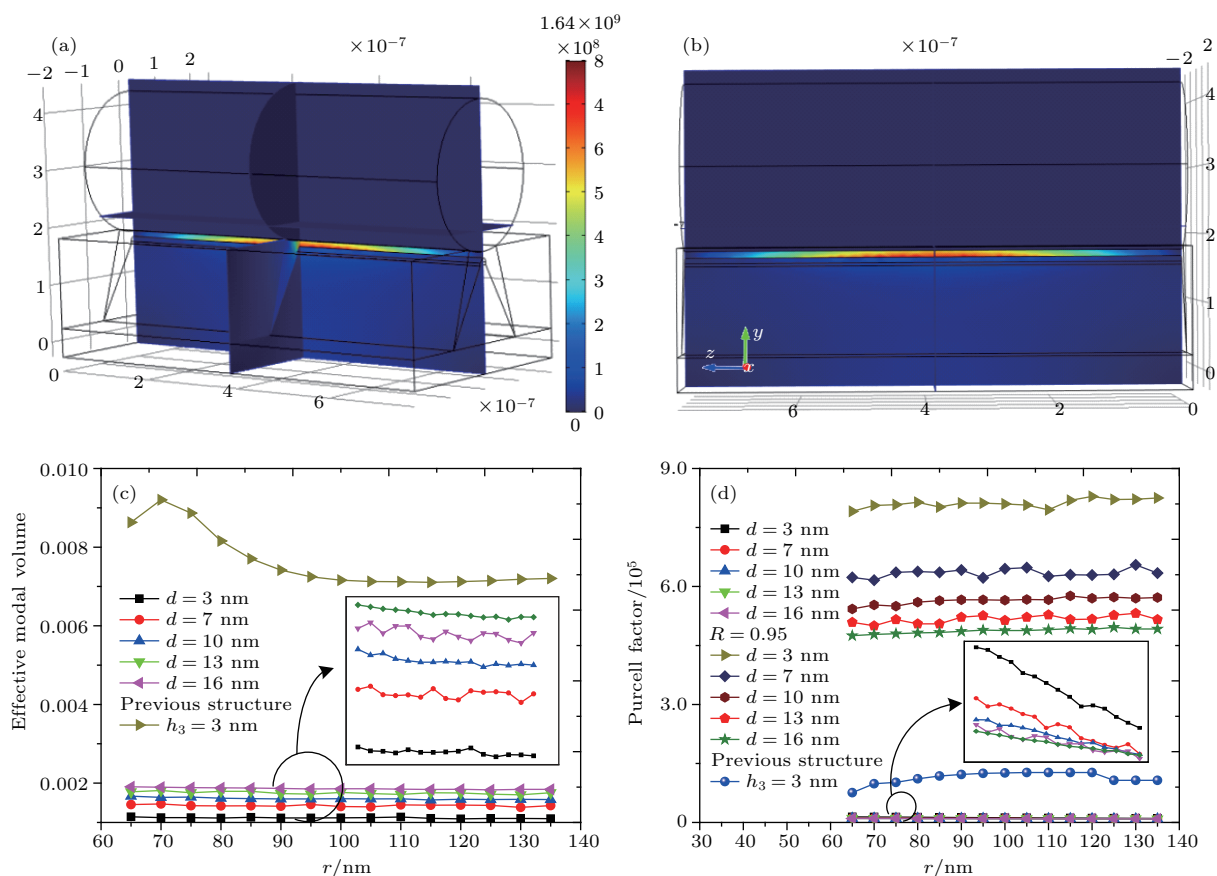


图7 激光器的三维仿真 (a) 三维仿真结果; (b) yz 横截面场强分布; (c) 有效的模式体积; (d) Purcell 因子

Fig. 7. The 3D simulation of the nanolaser: (a) 3D simulation diagram of nanolaser; (b) the field intensity distribution of xz cross section; (c) the effective modal volume V_{eff} ; (d) Purcell factor PF.

到增强, 这就是 Purcel 效应. Purcel 效应可以通过 Purcell 因子 (Purcell factor, F_p) 来定量地描述, 其值越大, 内量子效率越高, 相应的自发辐射越强烈. F_p 的定义为^[33,34]

$$F_p = \frac{3}{4\pi^2} \left(\frac{\lambda}{n} \right)^3 \left(\frac{Q}{V_{\text{eff}}} \right), \quad (9)$$

其中 n 为材料的有效折射率. 由 (9) 式可知, 为了提高微腔的自发辐射效率, 就需要提高质量因子 Q 并减小 V_{eff} . 由图 7(d) 可得在微腔两端面未加入镀银反射镜时 F_p 随 r 和 d 的增大而减小. 在加入镀银反射镜结构后 ($R = 0.95$) F_p 整体上随 r 的增大而增大, 但是随着 d 的增大仍然呈现减小趋势, F_p 的数值远大于未加入镀银反射镜结构的微腔, 最大值出现在 $d = 3$ nm, $R = 0.95$, $r = 120$ nm 时为 8.29×10^5 , 此时的 Q 值为 1.23×10^5 , 有效模式体积为 $0.001092 \mu\text{m}^3$, 实现了高质量因子 Q 和深亚波长模式体积下的超高 F_p . 由图 7(c) 和图 7(b) 同先前结构 (如图 5(c) 所示) 比较可以得出有效模式体积远小于先前的结构, 同时先前结构的 F_p 远小于

微腔端面加入反射镜的结构, 但是大于未加入反射镜的结构. V_{eff} 小于先前结构 6.5 倍以上, F_p 大于先前结构 6.5 倍左右.

5 结 论

本文在 1550 nm 波段下设计了一种带有增益介质纳米脊和金属银纳米线结构的 IHPM 激光器. 通过两方面的设计改进有效地提高了纳米激光器的性能, 包括在低折射率的 SiO_2 层加入三角形空气间隙和在微腔两端面镀一定厚度的银层. 对改进前后的结构进行了系统的研究, 包括该激光器的传输特性以及激光器模式下二维尺度和三维尺度上激光器的微腔特性. 在二维尺度下通过对激光器的传输特性进行仿真, 通过 F_{om} 值的指导可以有效地解决传输损耗和传输距离之间的矛盾关系, 并在品质因子和基膜体积的指导下得到具有最优传输特性的 IHPM 激光器结构, 激光器传输特性最优参数为 $r = 65$ nm, $h_3 = 3$ nm, $d = 16$ nm, 实现了

对光的深亚波长约束, 电磁模式的传播长度达到毫米级别. 对二维尺度和三维尺度上激光器的微腔特性分析得到, 通过在激光器微腔端面镀一层 50 nm 厚的银层可以显著提高激光器的微腔特性, 通过调整波导参数获得了高质量因子、低增益阈值以及深亚波长下的超小有效模式体积和超高的 Purcell 因子. 通过比较可知, 在结构参数统一时, 利用不同的结构参数配比, 本文设计的 IHPM 激光器性能高于先前文献提出的激光器的微腔性能. 综合考虑本文分析的数据, 在设计 IHPM 激光器传输特性最优的情况下结合激光器的微腔特性参数, 最佳结构参数可设在 $d = 16$ nm, $t = 50$ nm, $r = 65$ nm, $h_3 = 3$ nm 处, 此时的激光器综合性能相对最优. 该 IHPM 激光器结构在微纳米光学器件以及光学互连、纳米聚焦、化学检测和非线性光学显微镜等方向都有特别大的应用潜力.

参考文献

- [1] Han Q Y, Tang J C, Zhang S, Wang C, Ma H Q, Yu L, Jiao R Z 2012 *Acta Phys. Sin.* **61** 135202 (in Chinese) [韩清瑶, 汤俊超, 张弢, 王川, 马海强, 于丽, 焦荣珍 2012 物理学报 **61** 135202]
- [2] Zhang Y, Zhang Z 2016 *Plasmonics* **12** 1
- [3] Wang M S, Zhao C L, Miao X Y, Zhao Y H, Rufo J, Liu Y J, Huang T J, Zheng Y B 2015 *Small (Germany: Weinheim an der Bergstrasse)* **11** 4422
- [4] O'Dell D, Serey X, Erickson D 2014 *Appl. Phys. Lett.* **104** 043112
- [5] Maier S A, Kik P G, Atwater H A, Meltzer S, Harel E, Koel B E, Requicha A A G 2003 *Nat. Mater.* **2** 229
- [6] Berini P 2009 *Adv. Opt. Photon. News* **1** 484
- [7] Ly-Gagnon D S, Kocabas S E, Miller D A B 2008 *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.* **14** 1473
- [8] Fu Y, Hu X, Lu C, Yue S, Yang H, Gong Q 2012 *Nano Lett.* **12** 5784
- [9] Bian Y, Zheng Z, Zhao X, Liu L, Liu J, Zhu J, Zhou T 2013 *Opt. Commun.* **287** 245
- [10] Avrutsky I, Soref R, Buchwald W 2010 *Opt. Express* **18** 348
- [11] Oulton R F, Sorger V J, Genov D A, Pile D F P, Zhang X 2008 *Nat. Photon.* **2** 496.
- [12] Chang S W, Chuang S L 2008 *IEEE 2008 International Nano-Optoelectronics Workshop (i-Now)* Japan, Tokyo, August 2–15, 2008 p195
- [13] Zhang Z G 2015 *M. S. Dissertation* (Qinhuangdao: Yanshan University) (in Chinese) [张振国 2015 硕士学位论文 (秦皇岛: 燕山大学)]
- [14] Purcell E M 1995 *Phys. Rev.* **69** 11
- [15] Oulton R F, Sorger V J, Zentgraf T, Ma R M, Gladden C, Dai L, Bartal G, Zhang X 2009 *Nature* **461** 629
- [16] Wei W 2015 *M. S. Dissertation* (Beijing: Beijing University of Posts and Telecommunications) (in Chinese) [魏巍 2015 博士学位论文 (北京: 北京邮电大学)]
- [17] Li S X, Bai Z C, Huang Z, Zhang X, Qin S J, Mao W X 2012 *Acta Phys. Sin.* **61** 115201 (in Chinese) [李世雄, 白忠臣, 黄政, 张欣, 秦水介, 毛文雪 2012 物理学报 **61** 115201]
- [18] Li Q, Yu B Q, Li Z F, Wang X F, Zhang Z C, Pan L F 2017 *Chin. Phys. B* **26** 085202
- [19] Zou C L, Sun F W, Xiao Y F, Dong C H, Chen X D, Cui J M, Gong Q, Han Z F, Guo G C 2010 *Appl. Phys. Lett.* **97** 183102
- [20] Zhang B, Bian Y, Ren L, Guo F, Tang S Y, Mao Z, Liu X, Sun J J, Gong J Y, Guo X S, Huang T J 2017 *Sci. Rep.* **7** 40479
- [21] Huang H, Zhao Q, Hong K, Xu Q, Huang X 2014 *Physica E* **57** 113
- [22] Tian J, Sun M 2016 *Eur. Phys. J. D* **70** 4
- [23] Piao R Q 2016 *M. S. Dissertation* (Qinhuangdao: Yanshan University) (in Chinese) [朴瑞琦 2016 硕士学位论文 (秦皇岛: 燕山大学)]
- [24] Dai D, Shi Y, He S, Wosinski L, Thylen L 2011 *Opt. Express* **19** 12925
- [25] Gamzatov A G, Batdalov A B, Kamilov I K, Kaul A R, Babushkina N A 2013 *Appl. Phys. Lett.* **102** 032404
- [26] Chu H S, Bai P, Li E P, Hofer W R J 2011 *Plasmonics* **6** 591
- [27] Zhu L, Zhao Y 2010 *J. Opt. Soc. Am. B* **27** 1260
- [28] Liu J T, Xu B Z, Zhang J, Cai L K, Song G F 2012 *Chin. Phys. B* **21** 107303
- [29] Cheng P J, Weng C Y, Chang S W, Lin T R, Tien C H 2013 *Opt. Express* **21** 13479
- [30] Wei B, Sheng X Z 2007 *The Principle and Application of the Laser* (Chongqing: Chongqing University Press) pp116–120 (in Chinese) [魏彪, 盛新志 2007 激光原理 (重庆: 重庆大学出版社) 第 116—120 页]
- [31] Sun W Z 2016 *M. S. Dissertation* (Haerbin: Harbin Institute of Technology) (in Chinese) [孙文钊 2016 硕士学位论文 (哈尔滨: 哈尔滨工业大学)]
- [32] Chou B T, Chou Y H, Chiang C K, Wu Y M 2015 *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.* **21** 6
- [33] Wei W, Xin Y, Xia Z 2016 *Sci. Rep.* **6** 33063
- [34] Lu Q, Shu F J, Zou C L 2013 *Opt. Lett.* **38** 5311

Improved hybrid plasmonic microcavity laser*

Dong Wei Wang Zhi-Bin[†]

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

(Received 31 January 2018; revised manuscript received 23 July 2018)

Abstract

In this paper, an improved hybrid surface plasmon nanolaser with a gain medium ridge and a layer of air gap is proposed. In order to achieve low propagation loss and sub-wavelength field confinement, a triangular air gap and a 50 nm microcavity end face silver mirror are adopted in this structure, and the combination of this particular triangular structure and silver mirror effectively improves the performance of nano-laser. In this paper, we numerically simulate the waveguide by using the finite-element method. The COMSOL multiphysics software is a superior numerical simulation software to simulate the real physical phenomena based on the finite element method. On the basis of the COMSOL multiphysics software, a two-dimensional cross-section model and a three-dimensional model are built, the transmission performance and microcavity performance of the improved structure are analyzed in detail at a working wavelength of 1550 nm. Some quantities including the electric field distribution, transmission length, normalized mode field area, average energy density, foundation modal volume, quality factor of the structure, threshold gain, quality factor, effective modal volume, and Purcell factor are considered here which are dependent on the dielectric constant and geometrical parameters. The results indicate that on a two-dimensional scale, the contradiction between transmission loss and transmission distance can be effectively solved by the guidance of Fom value, and the IHPM laser structure with optimal transmission characteristics is obtained under the guidance of quality factor and foundation modal volume. A deep sub-wavelength constraint on light is achieved: the propagation length of the electromagnetic mode reaches a millimeter level and the longest distance can reach 1.29 mm. When testing the microcavity performance of the laser separately on a two-dimensional scale and three-dimensional scale, the high quality factor, low gain threshold, ultra-small effective mode volume of $0.001092 \mu\text{m}^3$ and ultra-high Purcell factor of 8.29×10^5 are obtained by adjusting the structural parameters and plating a 50 nm-thick silver layer on the end face of the laser microcavity. Compared with the previous structure without air gaps, the designed structure has a low laser lasing threshold and strong micro-cavity local capability when these two structural parameters are unified. The designed hybrid surface plasmon nanolaser may serve as a fundamental building block for various functional photonic components and can have applications such as in sensing, nanofocusing, and nanolasing.

Keywords: hybrid surface plasmons waveguide, nanolaser, finite-element method, micro-cavity

PACS: 95.85.Ls, 73.20.Mf, 73.40.Qv, 42.79.Gn

DOI: 10.7498/aps.67.20180242

* Project supported by the Young Scientists Fund of the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 61107039), the Natural Science Foundation of Hebei Province, China (Grant No. F2012203202), and the “100 Talents Project” of Hebei Province, China (Grant No. 4570018).

[†] Corresponding author. E-mail: ioe@ysu.edu.cn