

doi: 10.3788/gzxb20164510.1014004

基于表面等离子体激元的纳米激光器设计

魏来, 李芳, 周剑心

(武汉工程大学 理学院 光学信息技术实验室, 武汉 430073)

摘 要:设计了一种基于纳米线/间隔层/金属层的纳米激光器结构. 该结构中, 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耦合, 提高了场增强效应. 采用有限元法, 分析了该结构的模式特性和增益阈值随几何尺寸的变化规律. 结果表明: 该结构具有较低的传播损耗和较强的光场限制能力, 有效传播损耗最小值仅为 0.013 3, 归一化模式面积最小值仅为 0.007. 该纳米激光器结构可为发展新一代高效纳米激光器件提供理论和技术支持.

关键词: 纳米激光器; 表面等离子体; 有限元; 模式特性; 增益阈值

中图分类号: TN252

文献标识码: A

文章编号: 1004-4213(2016)10-1014004-5

Design of Surface Plasmon Polariton Nano-laser

WEI Lai, LI Fang, ZHOU Jian-xin

(Optical Information Technology Lab, School of Science, Wuhan Institute of Technology, Wuhan 430073, China)

Abstract: A surface plasmonic nano-laser structure based on a nanowire/gap/metal layer was proposed. The models produce a significant field enhancement effect through the mode-coupling between nanowire and metal layer. Modal properties and lasing threshold under different geometric shapes and parameters were investigated and analyzed by the finite element method. Simulation results reveal that this kind of nano-laser has a low propagation loss and high field confinement ability, its minimum propagation loss is only 0.013 3 and the minimum normalized mode area is only 0.007. The results provide theory and technique support to the field of new nano-laser design.

Key words: Nano-laser; Surface plasmon; Finite element; Mode properties; Threshold

OCIS Codes: 140.5965; 160.4236; 230.3990; 230.7370; 240.6680; 350.4238

0 引言

近年来,随着纳米技术的发展,器件微型化逐渐成为趋势.人们对纳米世界的深入探索,需要超小、超快的激光器将光的能量集中到亚波长尺寸区域.当光作用的结构尺寸大于光波波长时,将产生零级透射衍射波和反射衍射波以及高阶透射和反射衍射波,光束无法实现亚波长化^[1];而具有体积小、重量轻、容易复制等许多优点的亚波长器件(器件尺寸小于波长)仅有零级反射衍射波和透射衍射波产生,使得采用亚波长衍射光学元件的普通激光器可以实现光束的亚波长化.但是,该激光器的损耗较大.

基于表面等离子体激元(Surface Plasmons, SPs)^[2]的纳米激光器用表面等离子体激元替代受激辐射的光子^[3],虽然工艺较为复杂,但突破了传统光学中衍射极限的瓶颈,实现了激光器的亚波长化,具有较低的损耗和阈值.目前,表面等离子体因其局域性好、响应速度快等优点而受到广泛关注^[4-5],并且被应用于能源、光子芯片等方面^[6-7],促进了激光器微型化的发展.

人们对纳米激光器的性质进行了深入研究.2003年,Stockman^[3]为解决金属的损耗问题引入光学增益材料,实现了表面等离子体激元的受激辐射,使表面等离子体激元用于激光器成为可能.2008年,Zheludev^[8]研究组在实验上实现了表面等离子体激元的受激辐

基金项目:国家自然科学基金(No. 11204222)、湖北省自然科学基金(Nos. 2013CFB316, 2014CFB793)和武汉工程大学研究生教育创新基金(No. CX2015092)资助

第一作者:魏来(1989-),男,硕士研究生,主要研究方向为微纳光子学. Email: 80587268@qq.com

导师(通讯作者):李芳(1982-),女,教授,博士,主要研究方向为超快非线性光学和超快光谱、微纳光子学. Email: lifang_wit@hotmail.com

收稿日期:2016-05-06; **录用日期:**2016-07-06

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

射,为纳米激光器的制备提供了实验方案.2009年,张翔^[9]等在棒状增益材料和金属层之间加入间隔层,该类激光器的间隔层使损耗大大降低,一定程度上降低了激光器的阈值,使纳米激光器在室温条件下实现成为可能.2010年,Li等^[10]对方形金属谐振腔的两种模式及其机制进行了探讨,促进了纳米激光器机理的研究.2015年,Song等^[11]用掺杂的增益介质包裹银纳米颗粒合成金属纳米结构,并且改变金属纳米结构的形状和增益层的厚度,分析纳米激光器的阈值变化情况,丰富了纳米激光器的结构.目前主要的纳米激光器有纳米粒子表面等离子体^[12]激光器、纳米线表面等离子体激光器^[13]、圆柱形金属纳腔面发射^[14]纳米激光器、金属介质金属结构纳米^[15]激光器等,不同类型的激光器属性不同,适当的结构选择才能在满足要求的情况下获得性能最佳的纳米激光器.

本文以目前能在室温下实现受激辐射的纳米线结构为基础,设计了一种基于纳米线/间隔层/金属层结构的表面等离子体激元纳米激光器模型,通过有限元法,对设计模型的模式特性和阈值进行了分析,实现了纳米激光器综合性能的提升.

1 理论分析

设计的激光器的增益介质为纳米线,纳米线产生的光子与金属层耦合形成表面等离子体激元,该激元沿纳米线方向传播,在纳米线两端反射形成的F-P腔内传输振荡,被增益介质放大并实现激射.

理论分析知SPs波只能以TM模的形式在金属介质表面传播,其波矢表示为

$$k_{sp} = k_0 \left(\frac{\epsilon_d \epsilon_m}{\epsilon_d + \epsilon_m} \right)^{1/2} \quad (1)$$

式中 k_0 是自由空间平面波传播波矢, ϵ_d 和 ϵ_m 分别为介质和金属的介电常量.SPs波的传播波矢始终大于自由空间中传播的平面电磁波波矢,这是SPs波重要的物理特性之一,也是SPs波能够突破衍射极限的限制将传播场局域在亚波长的尺寸空间内,被用于微型激光器的主要原因之一.

为了使该激光器的波导结构具有较大的传输长度,金属介电常量的实部要大,虚部要小,即必须选择低损耗、低吸收系数的贵金属,一般选用金和银^[16],本文选取的金属为银.

2 物理模型

本文建立的基于表面等离子体激元的纳米激光器的物理模型如图1.由图1可以看出,该纳米激光器由CdS纳米线、金属层、位于CdS纳米线和金属层之间的间隔区域及连接这三者的MgF₂层组成,纳米线的纵向长度为10 μm,纳米线的半径固定为60 nm,目前多

数研究已经讨论了纳米线半径的影响,故本文不在讨论半径变化所带来的影响.设计中采用金属尖角与空气间隙接触,有利于形成良好的模式局域性;空气间隙为圆形,这是因为当空气间隙为空气槽或者其他形状时,电场会集中在边角位置,使光场的局域性变差,圆形间隙可以避免这种情况发生;采用MgF₂层将这三者连接起来实现损耗的降低,这是因为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耦合导致部分电场能量局域在纳米线和金属基底之间的空隙间,MgF₂层在结构中起到储存能量的作用,从而减少空隙间的能量损耗,使所设计结构能够保持较低的损耗.最终实现纳米激光器光场的高局域性和传播的低损耗.

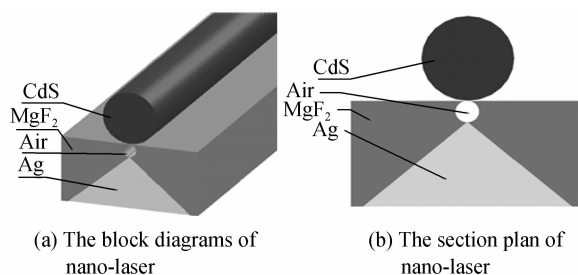


图1 纳米激光器结构示意图

Fig. 1 The structure of nano-laser

3 数值仿真及分析

该纳米激光器对应的输出波长^[17-18]为489 nm,Ag、MgF₂、CdS的相对介电常量分别为 $-9.2 + 0.3i$ 、1.96、5.76.本文采用有限元法模拟计算结构中的模式特性和增益阈值,并使用散射边界条件,对网格细化,从而获得更加精确的结果^[19-20].

3.1 基于表面等离子体激光器的场强分布分析

利用有限元法计算纳米激光器的模场分布,由于纵向方向的模场分量 E_y 占据主导,这里只研究 E_y .从图2可以看出,电场的最大值位于金属与空气间隙的交界处,并在远离界面时快速衰减.在两种介质的交界

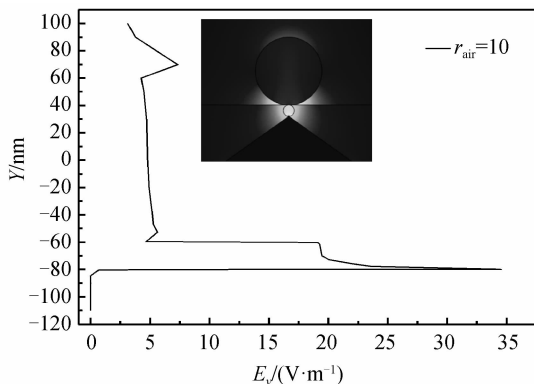


图2 电场分量 E_y 的强度分布.插图为整体电场分布
Fig. 2 The electric field distribution of E_y . The inset plot the electric field distribution of nano-laser

面,电场得到增强,但是增幅较小,可以忽略不计.并且能量主要集中在空气间隙层中,并有部分渗透到 MgF_2 材料中.总之,空气间隙处有很大的场增强效应,实现能量约束及光场分布高度局域化.

3.2 基于表面等离子体激光器的模式特性分析

为了将本文所设计的结构更好地用于纳米激光器,对模式特性进行分析,实现对输出功率和激光光束半径的评估.反映模式特性的参量主要是有效折射率 n_{eff} 、有效传播损耗 α_{eff} 、归一化模式面积 (A_{eff}/A_0)、限制因子 Γ ^[20-21].其中有效折射率和有效传播损耗分别对应等离子体波导相对传播常量的实部和自由空间相对波矢量的虚部.

归一化模式面积用于表示模式的模场约束能力.其定义为

$$A = \frac{A_{\text{eff}}}{A_0} = \frac{(\iint |E|^2 dx dy)^2 / (\iint |E|^4 dx dy)}{\lambda^2 / 4} \quad (2)$$

限制因子 Γ 用于表征增益介质纳米线的场强限制能力,其定义为 CdS 增益介质纳米线中的电场能量与该

模式波导的总电能之比.

图 3 为纳米激光器的模式特性随金属顶部角 θ 以及空气间隙半径 r_{air} 的变化.由图 3 可以看出,随着金属顶角的增大,有效折射率逐渐减小;有效传播损耗先减小后增大,整体平均损耗为 0.019 7,在 $\theta=75^\circ$ 时,有最小值 0.013 3;限制因子逐渐增大,总体的平均值能达到 49%,这表明绝大部分能量位于 CdS 纳米棒中;归一化模式面积先增大后减小,这与有效传播损耗的变化趋势相反,这是因为归一化模式面积表示的模场局域能力与有效传播损耗是一对矛盾的物理量,目前诸多的研究都在平衡这两者的矛盾关系,从而实现更好的模式特性.同时,还可以看出,归一化模式面积均远小于 0.1,平均值为 0.038 8,最小值为 0.007,这表明光场的约束能力较强,能够实现深亚波长约束.相对于金属顶角,空气间隙半径对有效折射率和归一化模式面积的影响较大,对有效传播损耗影响较小.随空气间隙半径的增大,有效折射率、有效传播损耗、限制因子均减小,归一化模式面积增大.

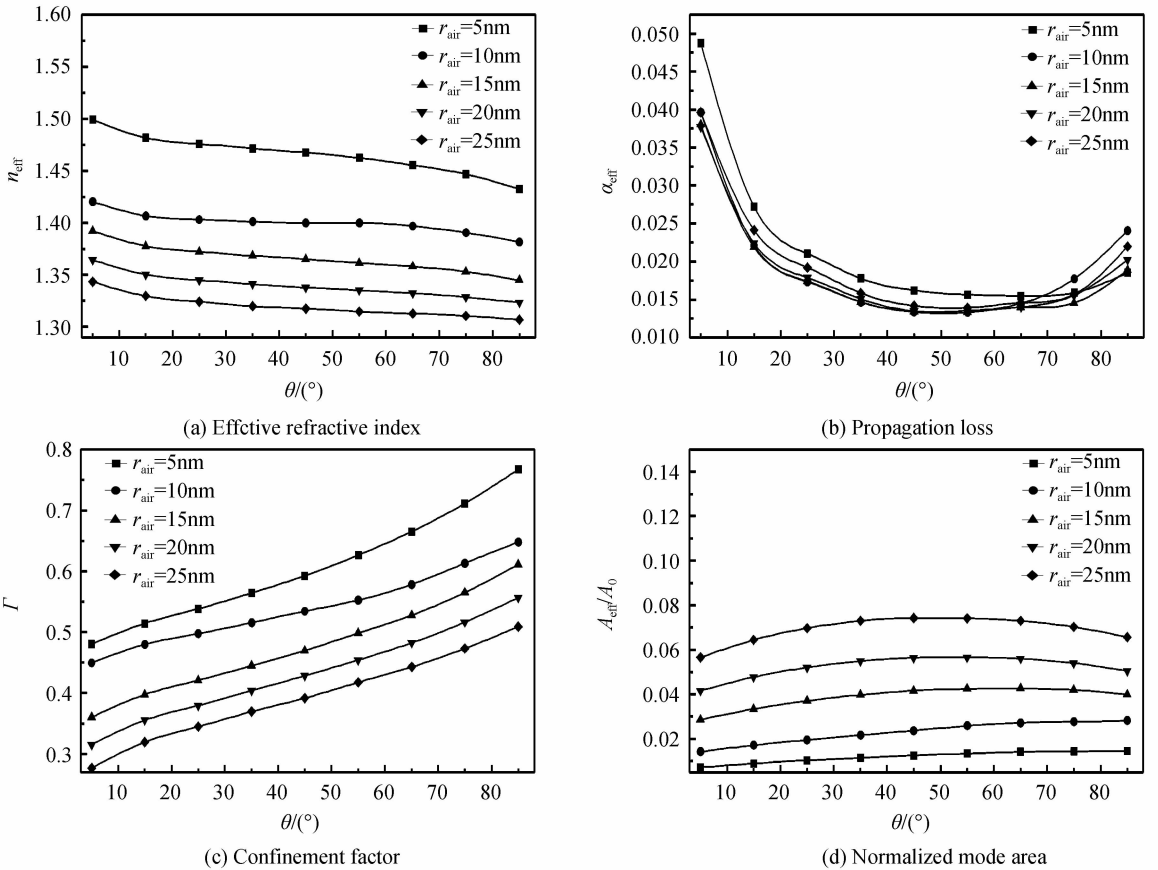


图 3 纳米激光器的模式特性随金属顶部角度 θ 以及空气间隙半径 r_{air} 的变化

Fig. 3 Mode properties of nano-laser versus degree θ and gap r_{air}

该激光器结构设计很好地解决了光场的局域性和有效传播损耗的矛盾,实现了高局域性和低损耗的共存.

3.3 基于表面等离子体激光器的增益阈值分析

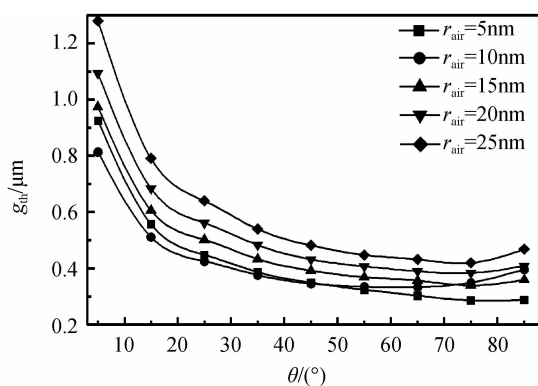
阈值是使激光器实现受激辐射的增益大小,是衡量纳米激光器工作品质的一个重要指标.激光器阈值越小,表明实现受激辐射所需要的光学增益就越少,其工作品质就越高.激光器的阈值表示为^[19]

$$g_{th} = [k_0 a_{eff} + \ln(1/R)/L] / (n_{eff}/n_{wire}) \quad (3)$$

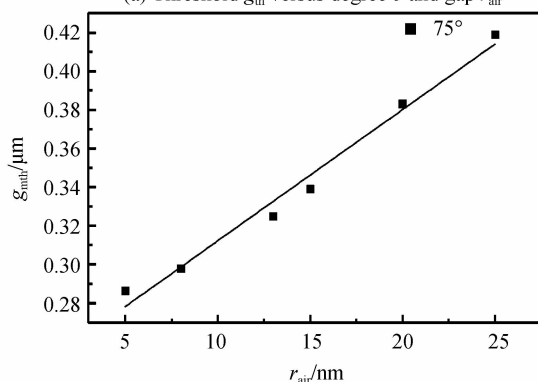
式中, $k_0 = 2\pi/\lambda$ 为真空中的波数, n_{wire} 为增益介质纳米线的折射率, n_{eff} 为模式的有效折射率实部, 比例因子 n_{eff}/n_{wire} 为模式有效折射率的增强部分, Γ 为限制因子, 端面反射率为

$$R = (n_{eff} - 1) / (n_{eff} + 1) \quad (4)$$

由图4可以看出, 随着金属顶角增大, 阈值先减小后增大, $r_{air} = 10$ nm, $\theta = 65^\circ$ 时, 取得最小值 $0.33 \mu\text{m}^{-1}$, 其他半径在 $\theta = 75^\circ$ 时取得最小值, 在 $r_{air} = 5$ nm 的阈值最低, 为 $0.286 \mu\text{m}^{-1}$, 整体的阈值平均水平为 $0.498 \mu\text{m}^{-1}$. 将所有半径(去除 $r_{air} = 10$ nm)在 $\theta = 75^\circ$ 时的最小阈值进行分析, 可以看出最小阈值随着空气间隙半径线性增长. 阈值的均值水平随空气间隙半径的增大而增大, 这是因为空气间隙的增大使得产生的表面等离子体激元的损耗增大, 进而需要的光学增益增大, 使得阈值提高.



(a) Threshold g_{th} versus degree θ and gap r_{air}



(b) The minimum threshold g_{mth} versus gap r_{air}

图4 阈值随结构的变化情况

Fig. 4 Threshold versus the structure

由模式特性和阈值分析可知, $r_{air} = 10$ nm 的综合性能最好, 其有效传播损耗平均为 0.0196 , 实现了较低的传播损耗, 其归一化模式面积平均达到 0.0196 , 为深亚波长的光场约束, 而限制因子平均达 54% , 实现了良好的能量约束, 阈值平均值为 $0.431 \mu\text{m}^{-1}$, 有最小值 $0.332 \mu\text{m}^{-1}$, 各方面均接近设计结构的最优值, 与文献[13,16]中结构相比, 实现了阈值和损耗的下降, 光场的局域性也得到提高, 由此可见, $r_{air} = 10$ nm 为所

设计结构的最优尺寸.

4 结论

本文通过理论分析和仿真设计, 提出了一种基于表面等离子体激元的纳米激光器的结构, 并从该结构的模式特性和阈值出发, 探讨了金属顶角和空气间隙半径对其影响, 结果表明, 该结构传输损耗低, 整体平均损耗为 0.0197 , 最小值仅为 0.0133 ; 场局域性好, 归一化模式面积平均值为 0.0388 , 最小值仅为 0.007 ; 阈值低, 整体的阈值平均水平为 $0.498 \mu\text{m}^{-1}$, 最小阈值仅为 $0.286 \mu\text{m}^{-1}$; 并且获得明显的场增强效应. 该纳米激光器结构为发展新一代高效纳米激光器件提供了理论和技术支持, 并在生物医疗、新型光源等领域有着潜在的应用前景.

参考文献

- [1] ZHAO Tong-kai, WEI Xing-zhan, DONG Xiao-chun. Nanofocusing element based on subwavelength optical microcavity[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2010, **37**(4): 147-150.
- [2] 赵同凯, 魏兴战, 董小春. 基于亚波长光学谐振腔的纳米聚焦器件[J]. *光电工程*, 2010, **37**(4): 147-150.
- [3] WANG Zhen-lin. A review on research progress in surface plasmons[J]. *Progress in Physics*, 2009, **29**(3): 287-324.
- [4] 王振林. 表面等离子激元研究新进展[J]. *物理学进展*, 2009, **29**(3): 287-324.
- [5] BERGMAN D J, STOCKMAN M I. Surface plasmon amplification by stimulated emission of radiation: quantum generation of coherent surface plasmons in nanosystems[J]. *Physical Review Letters*, 2003, **90**(2): 027402.
- [6] SUN X, WOSINSKI L, THYLÉN L. Nanoscale surface plasmon polariton disk resonators, a theoretical analysis[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2016, **22**(2): 4600106.
- [7] HAYASHI S, NESTERENKO D V, RAHMOUNI A, et al. Observation of Fano line shapes arising from coupling between surface plasmon polariton and waveguide modes[J]. *Applied Physics Letters*, 2016, **108**(5): 051101.
- [8] PETROV M I, SUKHOV S V, BOGDANOV A A, et al. Surface plasmon polariton assisted optical pulling force[J]. *Laser & Photonics Review*, 2016, **10**(1): 116-122.
- [9] HAHN C, SONG SH, OH CH, et al. Single-mode lasers and parity-time symmetry broken gratings based on active dielectric-loaded long-range surface plasmon polariton waveguides[J]. *Optics Express*, 2015, **23**(15): 19922-19931.
- [10] ZHELUDEV N I, PROSVIRNIN S L, PAPASIMAKIS N, et al. Lasing spaser[J]. *Nature Photonics*, 2008, **2**(6): 351-354.
- [11] OULTON R F, SORGER V J, ZENTGRAF T, et al. Plasmon lasers at deep subwavelength scale[J]. *Nature*, 2009, **461**(7264): 629-632.
- [12] LI Jia-qi, ZHANG Yuan, MEI Ting, et al. Surface plasmon laser based on metal cavity array with two different modes[J]. *Optics Express*, 2010, **18**(23): 23626-23632.
- [13] SONG Jun, TIAN Yu-liang, YE Shuai, et al. Characteristic analysis of low-threshold plasmonic lasers using Ag nanoparticles with various shapes using photochemical synthesis[J]. *Anticancer Research*, 2015, **33**(15): 3215-3223.

- [12] NOGINOV M A, ZHU G, BELGRAVE A M, *et al.* Demonstration of a spaser-based nanolaser [J]. *Nature*, 2009, **460**(7259): 1110-1112.
- [13] 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.
- [14] NEZHAD M P, SIMIC A, BONDARENKO O, *et al.* Room-temperature subwavelength metallo-dielectric lasers [J]. *Nature Photonics*, 2010, **4**(6): 395-399.
- [15] 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.
- [16] HUANG Hong, ZHAO Qing, JIAO Jiao, *et al.* Study of plasmonic nanolaser based on the deep subwavelength scale [J]. *Acta Physica Sinica*, 2013, **13**(62): 135201.
黄洪, 赵青, 焦蛟, 等. 深亚波长约束的表面等离子体纳米激光器研究[J]. *物理学报*, 2013, **13**(62): 135201.
- [17] WANG Cong, WU Gen-zhu, ZHOU Pei, *et al.* Mode properties of hybrid plasmonic waveguide with an metal nanorib[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.
- [18] CHEN Jia-yin, LIU Guo-jun, WANG Jiang-an. Analysis of SPP model theory and simulation in MIN structure [J]. *Chinese Journal of Luminescence*, 2014, **35**(6): 737-741.
陈佳音, 刘国军, 王江安. MIN 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.
- [19] 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.
- [20] LV Hong-bo. Hybrid plasmonic waveguides for lowthreshold nanolasers [D]. Beijing: Beijing University of Posts and Telecommunications, 2015.
吕宏博. 表面等离子体波导在低阈值纳米激光器中的应用 [D]. 北京: 北京邮电大学, 2015.
- [21] LIN Zhu. Modal properties of hybrid plasmonic waveguides for nanolaser applications[J]. *Technology Letters*, 2010, **22**(8): 535-537.