

文章编号 1004-924X(2014)06-1461-08

用于光束整形的表面等离子体双光栅结构

陈泳屹^{1,2}, 秦莉^{1*}, 佟存住¹, 王立军¹, 刘益春^{1,3}

(1. 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所发光学及其应用国家重点实验室, 吉林长春 130033;
2. 中国科学院大学, 北京 100049; 3. 东北师范大学, 吉林长春 130021)

摘要: 为了对双边布拉格反射波导半导体激光器的远场双瓣特性进行整形, 使之合并成为单瓣出光远场, 在布拉格反射波导的出光腔面上制作了表面等离子体双光栅结构。利用 Au-SiO₂ 光栅结构对表面等离子体的耦合效应和表面等离子体的透射增强现象将双瓣远场耦合成为单瓣出射, 然后通过 Au-Si₃N₄ 光栅结构将透射的表面等离子体耦合成为光子进行准直出射, 最终得到单瓣准直的远场光斑。计算结果表明: 当 Au-SiO₂ 光栅厚度为 50 nm, 填充因子为 0.5, 光栅周期为 350 nm; Au-Si₃N₄ 光栅厚度为 70 nm, 填充因子为 0.5, 光栅周期为 660 nm 时可以得到远场发散角压缩到 6.1° 的整形光斑, 比没有双光栅结构的发散角缩小了 3.6 倍; 其远场透射光功率达到了模式光源的 62%, 是没有双光栅结构单瓣出射功率的 1.59 倍; 同时腔面反射率也降低到 12.4%, 是没有双光栅结构的 0.53 倍。结果显示, 提出的双光栅结构优化了布拉格反射波导半导体激光器的出光远场特性。

关键词: 半导体激光器; 布拉格反射波导; 表面等离子体; 光束整形; 双光栅结构

中图分类号: O469; TN248.4 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20142206.1461

Dual gratings based on surface plasmons for optical beam shaping

CHEN Yong-yi^{1,2}, QIN Li^{1*}, TONG Cun-zhu¹, WANG Li-jun¹, LIU Yi-chun^{1,3}

(1. State Key Laboratory of Luminescence and Applications, Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China;
2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;
3. Northeast Normal University, Changchun 130021, China)

* Corresponding author, E-mail: qinl@ciomp.ac.cn

Abstract: To shape the beam with two-lobe far-field property from a dual side Bragg reflection waveguide semiconductor laser, a dual grating structure based on surface plasmons was prepared on the optical outlet facet of a Bragg reflection waveguide. It could combine the two lobes into a single lobe and to increase the optical intensity and quality of the beam. An Au-SiO₂ grating was used to couple photons into surface plasmons and to combine the two lobe beams into a single beam. The surface plasmons also were taken to increase the extraordinary optical transmission. On the other hand, the Au-Si₃N₄ grating was used to help the outlet surface plasmons couple back to photons, meanwhile collimating the outlet beam to increase the far-field property. Numerical simulation results indicate when

收稿日期: 2013-04-23; 修订日期: 2013-05-30.

基金项目: 国家自然科学基金重点资助项目(No. 61234004); 国家自然科学基金面上项目(No. 61176045); 国家自然科学基金青年基金资助项目(No. 61106068); 吉林省科技厅资助项目(No. 20110506)

the parameters for Au-SiO₂ show a depth of 50 nm, a filling factor of 0.5 and a duration of 350 nm, and those for Au-Si₃N₄ show 70, 0.5 and 660 nm, respectively, the outlet far-field beam will have a 6.1° divergence, which means the divergence angle shrinks by 3.6 times as that without the dual grating structure. The far-field optical transmission power reaches 62% of the model source, that is 1.59 times of the power of a single lobe far-field to the structure without the dual grating. Moreover, the cavity facet reflectivity has reduced to 12.4%, 0.53 times as the structure without the dual grating. It concludes that the dual grating structure has optimized the far field properties of dual side Bragg reflection waveguide semiconductor lasers.

Key words: semiconductor laser; Bragg reflection waveguide; surface plasmon; beam shaping; dual grating structure

1 引言

双边布拉格反射波导激光器(Bragg Reflection waveguide Laser, BRL)^[1]是一种新型的半导体激光器。这种激光器的波导结构在有源层两边对称地引入了缺陷层和周期性的折射率相间的布拉格反射镜,构建了有缺陷的一维光子晶体波导结构,因而也被称为布拉格反射波导(Bragg Reflection Waveguide, BRW)^[2]。光线在 BRW 中传播时,由于受到两边的布拉格反射镜不断反射,使得光学模式在激光器的谐振腔中得到扩展,并且只有满足四分之一波长条件的光线可以在波导中传播和增益;其他不满足波长条件的光线会很快地衰减和耗散,被 BRW 过滤掉,从而形成光线呈一定入射角度在波导中传输的模式光源。这种激光器更容易获得高功率,低阈值(~157 A/cm²)^[3]和高温度稳定性^[4],并且具有单模出射、远场快轴出射光发散角可以降低到 20°以下^[5]等特点(传统半导体激光器的远场快轴发散角约为 30~40°)。然而由于 BRW 两端的布拉格反射镜不断的反射,这种半导体激光器的远场出射光斑呈双瓣状,出光功率被分成两部分,因此亮度会降低,每瓣功率只有总功率的一半,使其应用受到限制。表面等离子体(Surface Plasmon, SP)是一种由于金属表面电子被外界电磁场激发而振荡,并传播于金属-介质表面的二维电磁场模式^[6-9],拥有超越衍射极限对光子进行调制的能力。在周期结构的金属光栅中,光栅可以提供额外的动量辅助外来光子耦合成为 SP,而 SP 会在光栅的另外一侧重新放出光子,从而使得透射光远远超过

衍射极限(这种现象被称为透射增强,Extraordinary Optical Transmission, EOT)^[10-12];另外,金属光栅的周期性结构可以对 SP 重新耦合形成光子的过程进行调制,从而控制出射光的方向和发散角^[13-16]。

本文在 BRL 的腔面上设计双光栅结构,通过 Au-SiO₂ 光栅结构耦合 BRW 的出射光子形成 SP,增进 EOT 现象,增大透射光功率,减小反射率,将双瓣远场耦合变为单瓣远场出射;然后通过 Au-Si₃N₄ 光栅结构将透射的 SP 重新耦合为光子出射并进行优化,最终得到了单瓣准直的远场光斑。

2 结构设计

图 1 为双边 BRL 器件模型示意图(彩图见期刊电子版),其中 808 nm 的 BRW 满足四分之一波长条件。由于只有满足四分之一波长条件的光线可以在 BRW 中传播和振荡,因而 BRW 可以提供一定倾斜角度入射的模式光源。

表面等离子体的波矢 k_{sp} 和真空中的波矢 k_0 满足如下关系^[6]:

$$k_{sp} = k_0 \sqrt{\frac{\epsilon_1 \epsilon_m}{\epsilon_1 + \epsilon_m}}, \quad (1)$$

其中: ϵ_m 是 Au 介电常数的实部, ϵ_1 是周围介质的介电常数。介电常数和折射率的关系为 $\epsilon = (n - ik)^2$ 。取 SiO₂ 的折射率为 1.45,空气的折射率为 1。在光子耦合成为 SP 的时候,光栅结构提供了额外的动量,从而满足:

$$k_{sp} = k_0 \sin \theta + ZG, \quad (2)$$

其中: θ 为入射角度, Z 为整数, $G = 2\pi/\Lambda$ 为光栅

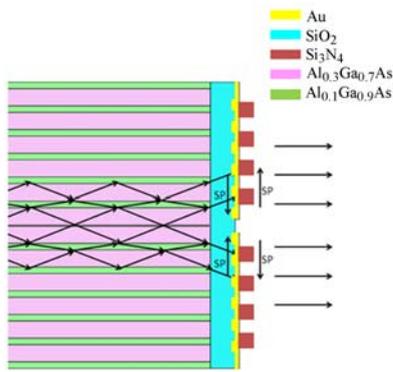


图 1 BRL 的 SP 双光栅光束整形器件模型(图中结构并非按照一定比例绘制)

Fig. 1 Model of beam shaping by SP dual grating structure on facet of BRL (figure is not drawn to scale)

结构的布拉格波矢^[17-18]。BRW 波导提供的一定角度的入射光线正好可以满足式(2),因而可以设计光栅结构使得 BRW 中的光子在端面以极高的效率耦合成为 SP。基于这个思路,本文在端面制作了双光栅光束整形结构。模式光首先在 Au-SiO₂ 光栅的表面耦合成为 SP,并沿着 Au-SiO₂ 光栅表面传播,利用 EOT 现象增加光的透射率并减小反射率。耦合的 SP 沿狭缝传播出来,由 Au-Si₃N₄ 光栅的衍射重新转换成光子,并在增大透射率、减小反射率的基础上准直出射。

双光栅结构的具体参数如表 1 所示。首先在 BRW 的腔面镀 SiO₂ 结构,600 nm 厚的 SiO₂ 可以起到绝缘作用,同时可以保证在 Au-SiO₂ 光栅结构中传播的 SP 不会受到半导体 BRW 波导的影响。随后在 SiO₂ 结构右侧制作光栅结构,光栅的深度 h_1 、周期 Λ_1 和填充因子 f_1 将在后文中优化。制作好 SiO₂ 的光栅结构之后,在表面镀 100 nm 厚的 Au 层。Au 层保证了光不会直接透过金属层(Au 的穿透深度约为 20 nm)。随后在 Au 的右侧表面制作 Si₃N₄ 光栅和空气狭缝。空气狭缝的宽度为 100 nm,空气狭缝的中心正对量子阱的中心,使得出射光具有远场对称性。为得到大功率的激光器件,这一侧的腔面反射要尽量低,从而使更多的光束耦合到远场。为了得到高质量远场光斑,需要进一步优化 Au-Si₃N₄ 光栅的填充因子 f_2 和周期 Λ_2 。

表 1 双光栅结构的具体参数

Tab. 1 Parameters of dual grating structure

材料	尺寸
SiO ₂	600 nm
Au 光栅	填充因子 f_1 , 光栅深度 h , 周期 Λ_1
Au 金属层	100 nm
Si ₃ N ₄ 光栅	光栅深度为 70 nm, 填充因子 f_2 , 周期 Λ_2
空气狭缝	宽 100 nm

针对双光栅结构的设计进行时域有限差分(Finite Difference Time Domain, FDTD)仿真,仿真时 Au 部分的网格特别细化到 2 nm,远远小于金的趋肤深度(~ 20 nm)。取 SiO₂ 的折射率为 1.45,在 808 nm 处 Si₃N₄ 的折射率为 1.995 65, Au 的折射率为 $0.180\ 675 - 4.868\ 16i$ 。

3 理论模拟及结果分析

作为对比,首先给出了不存在端面双光栅结构 BRW 的光学参数。光束在双边 BRW 内,经过周期性的 Al_{0.3}Ga_{0.7}As/Al_{0.1}Ga_{0.9}As 布拉格反射镜反射,只有满足四分之一波长条件的光束会在谐振腔中谐振,其他不满足条件的光束会很快耗散掉。取光学模式的有效折射率为 $n_{\text{eff}} = 3.403\ 6$ 。BRW 波导层的 Al_{0.3}Ga_{0.7}As 和 Al_{0.1}Ga_{0.9}As 的厚度满足四分之一波长的布拉格条件:

$$k_1 a = k_2 b = \frac{\pi}{2}, \quad (3)$$

其中: a 和 b 分别是布拉格反射镜对比介质层的厚度; k_1 和 k_2 是对应层的波矢,与有效折射率的关系为:

$$k_i^2 + k_0^2 n_{\text{eff}}^2 = k_0^2 n_i^2, \quad i=1, 2, \quad (4)$$

其中: n_i 是相应层的折射率。取 Al_{0.3}Ga_{0.7}As 的折射率为 3.437, Al_{0.1}Ga_{0.9}As 的折射率为 3.632, 解得 Al_{0.3}Ga_{0.7}As 的厚度为 422.6 nm, Al_{0.1}Ga_{0.9}As 的厚度为 159.4 nm。量子阱 GaAs_{0.86}P_{0.14} 和势垒层 Al_{0.4}Ga_{0.6}As 的折射率分别为 3.636 和 3.336。BRW 的具体参数如表 2 所示。通过数值分析得到 BRW 波导中传输的 TM 模式,如图 2 (a)所示。BRW 的远场图像如图 3 所示,在 $\pm 38^\circ$

附近各有一个发散角半高全宽(Full Width at Half Maximum, FWHM)为 22.2° 的出射峰。

表 2 半导体 BRW 的具体参数

Tab. 2 Parameters of semiconductor BRW

材料	尺寸/nm	备注
Al _{0.1} Ga _{0.9} As	159.4	上 BRW, 共 6 对
Al _{0.3} Ga _{0.7} As	422.6	
Al _{0.1} Ga _{0.9} As	159.4	缺陷层
Al _{0.3} Ga _{0.7} As	407.1	
Al _{0.4} Ga _{0.6} As	10	量子阱。量子阱和附近的 两层 Al _{0.3} Ga _{0.7} As 构成双 边 BRW 波导的缺陷层
GaAs _{0.86} P _{0.14}	11	
Al _{0.4} Ga _{0.6} As	10	缺陷层
Al _{0.3} Ga _{0.7} As	407.1	
Al _{0.1} Ga _{0.9} As	159.4	下 BRW, 共 6 对
Al _{0.3} Ga _{0.7} As	422.6	
Al _{0.1} Ga _{0.9} As	159.4	

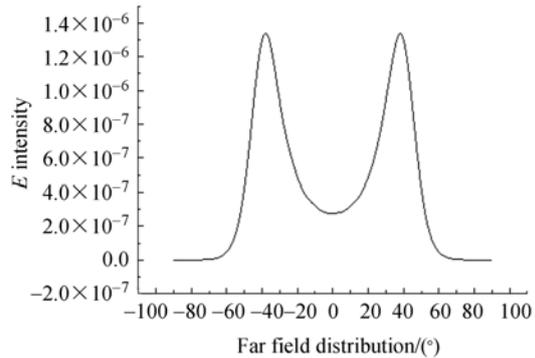


图 3 BRW 远场随角度的分布图

Fig. 3 Far-field electrical intensity according to divergence distribution of BRW

3.1 Au-SiO₂ 光栅参数优化

激光器腔体内的模式光源并非无限大的平面波,因而需要对光栅的各个参数进行优化。经过大量的数值模拟得出,在 Λ_2 为 680 nm 时远场发散角为单瓣模式。因而首先确定 Au-Si₃N₄ 光栅的参数:光栅深度为 70 nm,填充因子 f_2 为 0.5,周期 Λ_2 为 680 nm,调节 Au-SiO₂ 光栅的参数。

3.1.1 周期 Λ_1 的优化

令 Au-SiO₂ 光栅的填充因子 f_1 为 0.5,光栅深度 h 为 30 nm,调节周期 Λ_1 ,如图 4 所示。Au-SiO₂ 光栅的作用是尽可能地收集激光器光源放出的光子,为了提高出光功率,需要减小端面反射。由图可知,在 Au-SiO₂ 光栅周期为 350 nm 时,透射率达到极大值,反射率达到极小值。

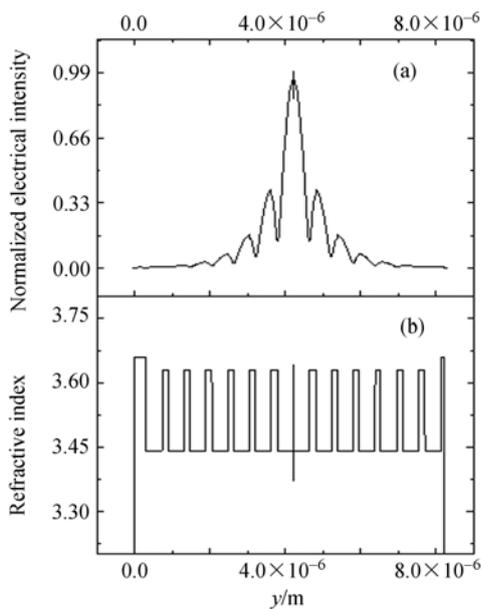


图 2 (a)BRW 中 TM 模式的电场分布数值模拟图, (b)BRW 结构的折射率随尺寸变化图

Fig. 2 (a)TM mode field in BRW, (b)Refractive index of BRW structure according to scale

在模拟中,本文采用 FDTD 对结构进行分析。以 TM 光波导模式为光源,在边界上采用完美匹配层(Perfectly Matched Layers, PML)来吸收传输和反射的光子,由此得出没有端面结构的 BRL 模式的端面反射率为 23.52%,透射率为 76.48%,平均每个远场出光瓣的能量不足光学模式总能量的 39%。

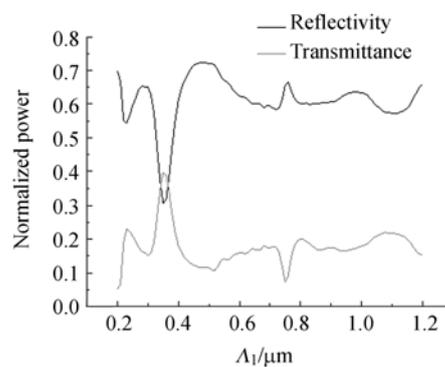


图 4 Au-SiO₂ 光栅在 f_1 为 0.5, h 为 30 nm 时,透射率和反射率随 Λ_1 变化的关系

Fig. 4 Transmittance and reflectivity versus Λ_1 with f_1 at 0.5 and h of 30 nm

3.1.2 填充因子 f_1 的优化

令 Au-SiO₂ 光栅的光栅深度 h 为 30 nm,周期

Λ_1 为 350 nm, 调节填充因子 f_1 , 得到了透射率和反射率随着填充因子变化的情况, 如图 5 所示。

由图可以看出, 随着 f_1 变大, 透射率先升高后降低, 反射率先降低后升高; 在 f_1 取得 0.5 附近, 透射率取得最大值, 反射率取得最小值, 说明此时 Au-SiO₂ 光栅对模式光源的耦合最强, 有更多的光子耦合成为 SP, 并经空气狭缝向外出射。这是因为当填充因子为 0.5 时, 一级衍射系数可以取到极大值^[19], 这也意味着有更多的光子通过光栅衍射耦合成为 SP, 增大了透射率。

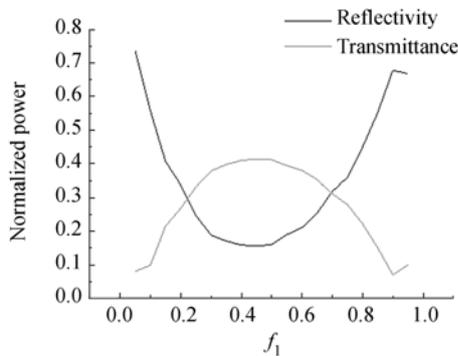


图 5 h 为 30 nm, Λ_1 为 350 nm 时, Au-SiO₂ 光栅透射率和反射率随 f_1 的变化关系

Fig. 5 Transmittance and reflectivity versus f_1 with Λ_1 of 350 nm and h of 30 nm

3.1.3 光栅深度 h 的优化

在 Au-SiO₂ 光栅周期 Λ_1 为 350 nm, 填充因子 f_1 为 0.5 时, 调节光栅深度 h , 图 6 给出了透射率和反射率随光栅深度的变化关系。可以看

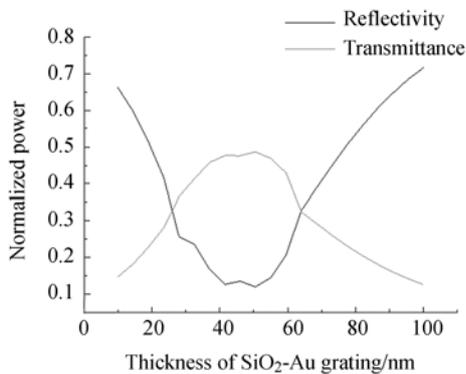


图 6 Au-SiO₂ 光栅在 f_1 为 0.5, Λ_1 为 350 nm 时, 透射率和反射率随着 h 变化的关系

Fig. 6 Transmittance and reflectivity versus h with Λ_1 of 350 nm and f_1 at 0.5

出, 随着 h 变大, 透射率先升高后降低, 反射率先降低后升高; 在 h 为 50 nm 附近, 透射率取得最大值, 反射率取得最小值, 此时 Au-SiO₂ 光栅对模式光源的耦合最强, 有更多的光子耦合成为 SP。这是因为 SP 沿着金属表面传播时, 金属光栅的深度调节了 SP 传播的距离和相位, 当外来光子在光栅上形成的局域 SP 和传输 SP 相位一致时, 它们相互叠加增强, 外来光子耦合成为 SP 的效率较高, 从而透射率增强。

3.2 Au-Si₃N₄ 光栅参数的优化

在 Au-SiO₂ 光栅 Λ_1 为 350 nm, h 为 50 nm, f_1 为 0.5 时优化调节 Au-Si₃N₄ 光栅的参数。

3.2.1 光栅周期 Λ_2 的优化

在 Au-Si₃N₄ 光栅的光栅厚度为 70 nm, 填充因子 f_2 为 0.5 时, 调节光栅周期 Λ_2 。

图 7 中可以看出, 在周期 Λ_2 为 660 nm 附近, 透射率有最大值, 反射率存在极小值。随着周期的进一步增大, 金属损耗和反射率随之上升, 导致透射率急剧下降, 在 Λ_2 为 700 nm 附近达到极小值。在 660 nm 时, 远场呈现单峰形貌, 远场发散角 FWHM 为 6.1°(见图 8(a)), 95% 的能量集中在 $\pm 4.5^\circ$ 之间; $\Lambda_2 = 700$ nm 时, 远场发散角 FWHM 为 3.1°(见图 8(b))。如果取周期 Λ_2 为 700 nm(如图 7 中 B 所示), 远场发散角 FWHM 为 3.1°, 相比没有双光栅结构的发散角缩小了 7 倍以上; 但是透射光功率只有模式光源的 27%, 同时金属损耗达到了 45%, 反射率也达到了 28%。如果取周期 Λ_2 为 660 nm(如图 7 中 A 所示)时, 远场发散角 FWHM 为 6.1°, 相比没有双

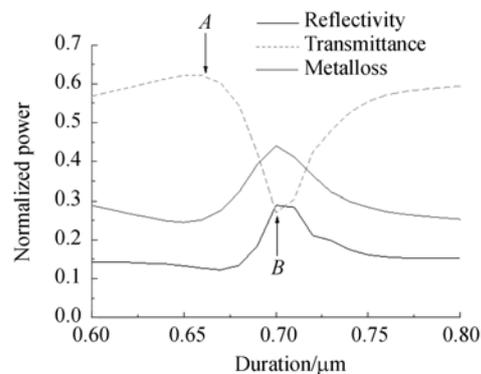
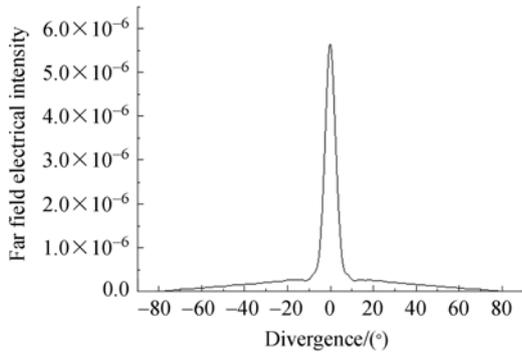


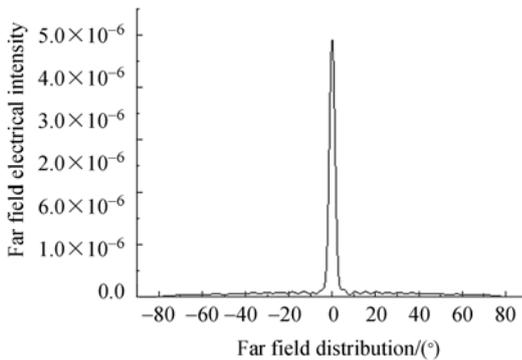
图 7 f_2 为 0.5 时, 透射率、反射率和金属吸收随 Λ_2 的变化关系

Fig. 7 Transmittance, reflectivity and metal loss versus Λ_2 with f_2 at 0.5

光栅结构的发散角缩小了 3.6 倍;并且远场透射光功率达到了模式光源的 62%,相当于没有双光栅结构单瓣出射功率的 1.59 倍,同时反射率也降低到 12.4%,相当于没有双光栅结构的 0.53 倍。



(a) $\Lambda_2 = 660 \text{ nm}$



(b) $\Lambda_2 = 700 \text{ nm}$

图 8 Λ_2 不同时的远场分布

Fig. 8 Far field distribution with different Λ_2

图 9 给出了 $\Lambda_2 = 660 \text{ nm}$ 时,双光栅腔面结构的出光电场强度的数值模拟图。从图中可以看出,BRW 的模式场光源在经过双光栅结构的过程中,光子主要被 Au-SiO₂ 光栅收集转换成 SP,并穿过 100 nm 亚波长的 Au 狭缝,再经过 Au-Si₃N₄ 光栅把 SP 重新耦合成为准直光束向外出射。电场强度稳态最强处位于 Au 狭缝附近,这是因为被 Au-SiO₂ 光栅收集转换成的 SP 都要经过 Au 狭缝,转移到 Au-Si₃N₄ 光栅上。而 Au 狭缝的尺寸只有 100 nm,当模式光源功率为 1 W 时,有 0.6 W 的能量会通过狭缝到达 Au-Si₃N₄ 光栅上。

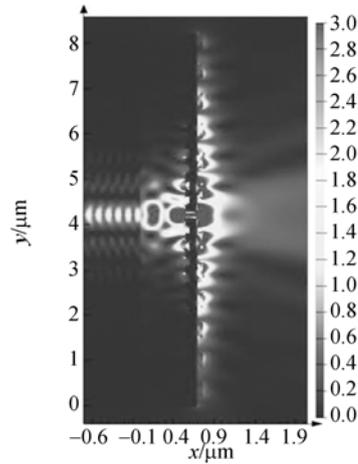


图 9 Λ_2 为 660 nm 时,双光栅腔面结构的电场强度数值模拟图

Fig. 9 Simulation result of electrical intensity for dual grating structure with Λ_2 of 660 nm

3.2.2 填充因子 f_2 的优化

在 Au-Si₃N₄ 光栅的周期 Λ_2 为 660 nm,厚度为 70 nm 时,优化调节填充因子 f_2 。如图 10 所示,填充因子依然在 0.5 附近取得最大值,并且金属损耗在填充因子 0.3 附近和 0.8 附近各存在一个极大值,在 0.5 附近存在一个极小值。这是因为在 Au-Si₃N₄ 光栅上传播的 SP 会被光栅结构衍射。这一点与 DFB 激光器中光栅的衍射原理类似^[19],即一级衍射方向垂直于光栅表面,SP 重新耦合成为光子。引入一级衍射系数 κ_1 用于描述 SP 能量重新耦合成为光子能量的强弱。

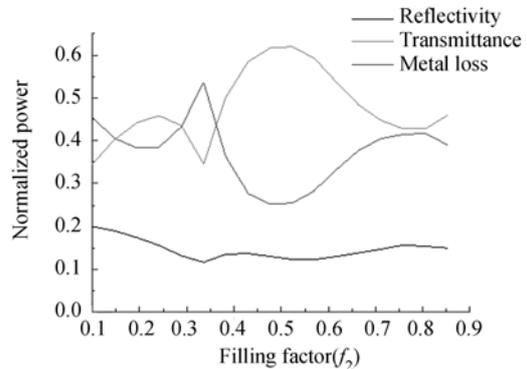


图 10 Λ_2 为 660 nm 时,透射率、反射率和金属吸收随 f_2 变化的关系

Fig. 10 Transmittance, reflectivity and metal loss versus f_2 with Λ_2 of 660 nm

由文献[19]可知, κ_1 在填充因子为 0.5 时取得极大值, 此时 SP 重新耦合成为光子的效率较高, 因而透射率存在极大值, 导致 SP 的损耗减小, 结构的透射率增强, 金属损失存在极小值。二级衍射方向与 SP 传播方向相反, 表现为 SP 在传播时被光栅结构反射, 并以 SP 的方式沿着相反方向传播。引入二级衍射系数 κ_2 表示被反射的 SP 能量。 κ_2 在填充因子为 0.25 和 0.75 的时候取得极大值, 光栅对 SP 的反射最强, SP 主要能量都被反射, 继续在金属表面传播, 这一过程很少向外辐射光子, 最终被金属损耗吸收掉, 因而金属损耗有极大值。然而, SP 在受到光栅结构反射时, 有一部分 SP 会变成 Au-空气和 Au-Si₃N₄ 的混合模式, 因而极大值位置有所偏移, 金属损耗在填充因子 0.3 附近和 0.8 附近呈现极大值。金属损耗的增大导致了相应的出射光透射率减小, 因而透射率在填充因子 0.3 附近和 0.8 附近呈极小值。

3.2.3 Au-Si₃N₄ 光栅厚度的讨论

当 Au-Si₃N₄ 光栅的厚度过大 (>90 nm) 或者过小 (<50 nm) 时, 远场光斑都将失去单瓣特性, 重新退化成为发散角较小的两个瓣。这是因

为在光栅厚度过小时, 其周期性表现得不明显, 光栅结构与纯粹的 Au 层差别变得模糊, 因而衍射效果变弱; 而当光栅厚度过大时, 将更多的表现出介质光栅的特性, 从而对 SP 产生影响。数值计算结果表明, 光栅厚度的最优值为 70 nm。

4 结 论

本文基于给定 808 nm 双边 BRL 激光器, 针对其光学模式和远场效果, 设计并优化了腔面的双光栅结构。当 Au-SiO₂ 光栅厚度为 50 nm, $f_1=0.5$, $\Delta_1=350$ nm; Au-Si₃N₄ 光栅厚度为 70 nm, $f_2=0.5$, $\Delta_2=660$ nm 时, 得到了远场发散角为 6.1° 的整形光斑, 相比没有双光栅结构的发散角缩小了 3.6 倍; 并且远场透射光功率达到了模式光源的 62%, 相当于没有双光栅结构单瓣出射功率的 1.59 倍; 同时腔面反射率也降低到 12.4%, 相当于没有双光栅结构的 0.53 倍。优化结果表明, 双光栅结构可以在将 BRL 双瓣远场合并为单瓣远场的时候, 起到光束整形作用, 从而为 BRL 提供更高的亮度和更好的光束质量。

参考文献:

- [1] LEDENTSOV N N, SHCHUKIN V A. Novel concepts for injection lasers[J]. *Opt. Eng.*, 2002, 41(12):3193-3203.
- [2] WEST B R, HELMY A S. Properties of the quarter-wave Bragg reflection waveguide: theory[J]. *J. Opt. Soc. Am. B*, 2006, 23(6):1207-1220.
- [3] BIJLANI B J, HELMY A S. Bragg reflection waveguide diode lasers[J]. *Opt. Lett.*, 2009, 34(23): 3734-3736.
- [4] TONG C Z, BIJLANI B, ALALI S, *et al.*. Characteristics of edge emitting Bragg reflection waveguide lasers[J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 2010, 46(11):1605-1610.
- [5] WANG L J, YANG Y, ZENG Y G, *et al.*. High power single-sided Bragg reflection waveguide lasers with dual-lobed far field [J]. *Appl. Phys. B*, 2012, 107(3):809-812.
- [6] MAIER S A. *Plasmonics: Fundamentals and Applications*[M]. London:Springer, 2007:21.
- [7] 熊尚, 罗雪丰, 韩立. 纯金膜表面等离子体增强的旋光效应[J]. *光学精密工程*, 2012, 20(7):1525-1531.
- [8] 王弋嘉, 张崇磊, 王蓉, 等. 差分干涉表面等离子体共振传感器的优化与验证[J]. *光学精密工程*, 2013, 21(3): 672-679.
- [9] 陈泳屹, 佟存柱, 秦莉, 等. 表面等离子体激元纳米激光器技术及应用研究进展[J]. *中国光学*, 2012(5): 453-463.
- [10] EBBESEN T W, LEZEC H J, GHAEMI H F, *et al.*. Extraordinary optical transmission through sub-wavelength hole arrays[J]. *Nature*, 1998, 391: 667-669.
- [11] PORTO J A, GARCIA-VIDAL F J, PENDRY J. Enhanced magneto-optical effect on surface of pure gold film[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2012, 20(7): 1525-1531. (in Chinese)
- [12] WANG Y J, ZHANG CH L, WANG R, *et al.*. Optimization and validation of the differential interferometric surface plasmon resonance sensor [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2013, 21(3):672-679. (in Chinese)
- [13] CHEN Y Y, TONG C ZH, QIN L, *et al.*. Process in surface plasmon polaron nano-laser technologies and applications [J]. *Chinese Optics*, 2012(5): 453-463. (in Chinese)

- B. Transmission resonances on metallic gratings with very narrow slits [J]. *Phys. Rev. Lett.*, 1999, 83(14):2845-2848.
- [12] GENET C, EBBESEN T W. Light in tiny holes [J]. *Nature*, 2007, 445:39-46.
- [13] MARTIN-MORENO L, GARCIA-VIDAL F J, LEZEC H J, *et al.*. Theory of highly directional emission from a single subwavelength aperture surrounded by surface corrugations [J]. *Phys. Rev. Lett.*, 2003, 90(16):167401-1670404.
- [14] YU L B, LIN D Z, CHEN Y C, *et al.*. Physical origin of directional beaming emitted from a subwavelength slit [J]. *Phys. Rev. B*, 2005, 71(4): 041405-041408.
- [15] LIN D Z, CHANG C K, CHEN Y C, *et al.*. Beaming light from a subwavelength metal slit surrounded by dielectric surface gratings [J]. *Opt. Express*, 2006, 14(8):3503-3511.
- [16] KIM S, KIM H, LIM Y, *et al.*. Off-axis directional beaming of optical field diffracted by a single subwavelength metal slit with asymmetric dielectric surface gratings [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2007, 90(5):051113-051115.
- [17] DITLBACHER H, KRENN J R, HOHENAU A, *et al.*. Efficiency of local light-plasmon coupling [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2003, 83(18): 3665-3667.
- [18] GHAEMI H F, THIO T, GRUPP D E. Surface plasmons enhance optical transmission through subwavelength holes [J]. *Phys. Rev. B*, 1998, 58(11):6779-6782.
- [19] JANG S J, YEO C I, YU J S, *et al.*. 1.55- μm DFB lasers with narrow ridge stripe and second-order metal surface gratings by holographic lithography [J]. *Phys. Status Solidi. A*, 2010, 207(8): 1982-1987.

作者简介:



陈泳屹(1986—),男,吉林长春人,博士研究生,2008年于南京大学获得学士学位,主要从事表面等离子体与半导体激光器方面的研究。E-mail: cyy2283@126.com

通讯作者:



秦莉(1969—),女,黑龙江鹤岗人,研究员,主要从事大功率半导体激光及应用方面的研究。E-mail: qinl@ciomp.ac.cn

(版权所有 未经许可 不得转载)