

光栅反射镜作为激光器后腔镜输出径向偏振光

戚若阳¹ 高健存¹ 方茗¹ 唐新春¹ 唐淳² 裴正平² 于益²

¹清华大学物理系, 北京 100084

²中国工程物理研究院应用电子学研究所, 四川 绵阳 621900

摘要 利用光栅反射镜的偏振选择原理, 设计并制备了 35 层镀膜、1000 nm 周期、70 nm 槽深的圆环型微结构光栅反射镜。使用该光栅反射镜作为激光二极管抽运的 Nd:YAG 激光器的后腔镜, 通过对激光谐振腔的优化, 获得了功率为 13.4 W 的径向偏振激光。分析并设计偏振度的计算方法, 测量得到径向偏振激光的偏振度可达 97%。

关键词 激光器; 径向偏振光; 光栅反射镜; 偏振度

中图分类号 O436 **文献标识码** A

doi: 10.3788/CJL201643.0901008

Generating Radially Polarized Laser Beam with Polarization-Selective Grating Mirror as Cavity Mirror

Qi Ruoyang¹ Gao Jiancun¹ Fang Ming¹ Tang Xinchun¹ Tang Chun²
Pei Zhengping² Yu Yi²

¹Department of Physics, Tsinghua University, Beijing 100084, China

²Institute of Applied Electronics, China Academy of Engineering Physics, Mianyang, Sichuan 621900, China

Abstract By utilizing the principle of polarization-selective grating mirrors, a 35-layer circular grating mirror, with 1000 nm period and 70 nm groove depth, has been designed and fabricated. The grating mirror is placed in a laser diode pumped Nd:YAG rod laser system as the cavity mirror. After optimizing the laser system, we get a radially polarized beam, of which the degree of radial polarization and the power are 97% and 13.4 W, respectively.

Key words lasers; radially polarized light; grating mirror; degree of radial polarization

OCIS codes 140.3580; 140.3070; 050.1950; 050.6624; 230.4000

1 引言

激光自问世以来,在工业领域发挥着越来越重要的作用。电矢量具有轴对称性的偏振激光在物理研究与材料加工方面具有不可替代的优势,其中径向偏振光在金属切割、提高显微镜分辨率以及捕捉和操控金属粒子等方面都得到了广泛应用^[1-4]。1972年, Mushiake 等^[5]在氦氛激光器中加入圆锥电介质元件,通过增加除径向偏振以外其他偏振分量的损耗,首次在实验中获得径向偏振光。目前,径向偏振光的生成方法繁多。其中,采用光栅反射镜来实现径向偏振光输出的方法因为具有输出功率高、激光稳定性好等优点,成为研究的重点之一^[6]。

利用亚波长光栅的双折射效应,光栅反射镜使得正交的偏振光被多层膜结构反射时具有不同的光程差。不同层的反射光相互干涉,就会在某个波段出现反射率异常变化^[7]。本课题组设计并制备了具有 35 层镀

收稿日期: 2016-04-15; **收到修改稿日期:** 2016-05-23

基金项目: 国家自然科学基金(100976015)、国家 973 计划(2010CB922901)

作者简介: 戚若阳(1992—),男,博士研究生,主要从事激光及非线性光学方面的研究。

E-mail: qry15@mails.tsinghua.edu.cn

导师简介: 高健存(1962—),男,副教授,博士生导师,主要从事激光及非线性光学方面的研究。

E-mail: gaojc@mail.tsinghua.edu.cn(通信联系人)

膜、周期 1000 nm、槽深 70 nm 的直线型微结构光栅反射镜,验证了其在中心波长 1064 nm 处的偏振选择作用,并实现了 14.4 W 的基横模线偏振光输出^[8]。本文在直线型微结构光栅反射镜的研究基础上,阐述了设计及制备可以选择径向偏振光的圆环型微结构光栅反射镜,并将其应用于 Nd:YAG 激光系统中,实现了径向偏振激光的输出。

2 光栅反射镜的设计

光栅反射镜由一个多层膜结构的高反镜顶层刻蚀亚波长光栅结构构成,其作用是尽可能抑制除需要的偏振分量以外的其他偏振分量。利用亚波长光栅的双折射效应,可通过调整光栅周期、槽深等参数使横电场(TE)偏振的波(电场方向沿光栅槽线方向)与横磁场(TM)偏振的波(电场方向垂直于光栅槽线方向)在特定波长具有不同的反射率。直线型微结构光栅反射镜,应对 TM 偏振光的反射率尽可能高,对 TE 偏振光的反射率尽可能低。将该反射镜作为谐振腔镜应用于激光系统中时,TE 偏振光损耗较高,不能形成振荡;而 TM 偏振光损耗较低,可形成偏振激光输出。本课题组利用基于严格耦合波理论的 S 矩阵算法^[9-11],使用商业软件 Gsolver 5.1 对直线型微结构光栅反射镜建模,得到了 TE 偏振光与 TM 偏振光的反射率谱线,如图 1 所示。在 1064 nm 处,TE 偏振光的反射率减小而 TM 偏振光仍然维持较高的反射率,所以该设计可以对波长为 1064 nm 的光进行偏振选择。

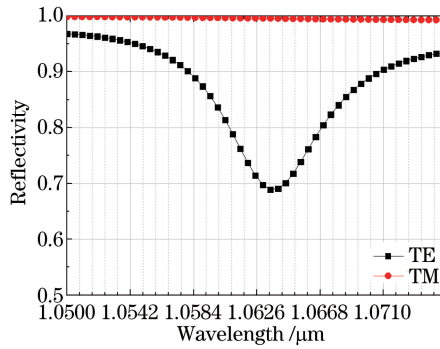


图 1 光栅反射镜的反射率数值计算结果

Fig. 1 Calculative reflectivity result of the grating mirror

当光栅槽刻蚀为图 2 所示的圆环型结构时,即可得到可以选择径向偏振的光栅反射镜。对于圆环型微结构光栅反射镜,TE 偏振光相当于沿角向偏振的光,而 TM 偏振光相当于沿径向偏振的光。周期、槽深等参数与之前设计的直线型光栅一致。其详细参数如表 1 所示。模拟分析表明^[12],微调光栅周期则 TE 波反射率曲线随周期增大而整体红移;增加光栅刻蚀槽深则 TE 波反射率的最低点下降, TM 波的反射率也略微下降;另外,占空比和刻蚀层数对反射率曲线的影响不大。表 2 为模拟分析的汇总。

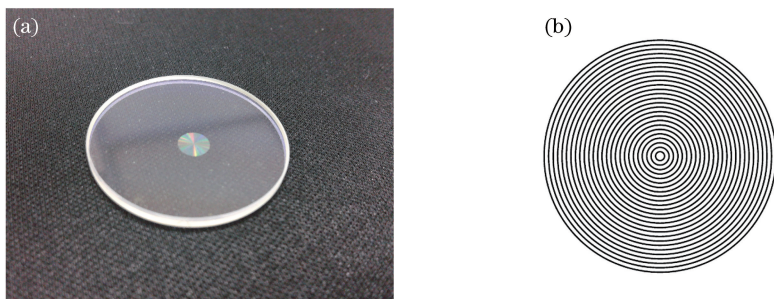


图 2 光栅反射镜(a)实物图与(b)微结构示意图

Fig. 2 (a) Photograph and (b) schematic of circular grating mirror

表 1 光栅反射镜参数

Table 1 Parameters of the circular grating mirror

| Parameter | Data |
|--------------------|--|
| Substrate material | JGS-1 |
| Size of mirror | Diameter: (25 ± 0.1) mm; thickness: (1.5 ± 0.2) mm |
| S1 | High reflector at 1064 nm (reflectivity: $>99.8\%$); Ta ₂ O ₅ , SiO ₂ , alternately, 35 layers |
| S2 | Nothing |
| Grating period | 1000 nm |
| Groove depth | 70 nm |
| Duty cycle | 0.5 |
| Etching mode | Top-etching |
| Size of grating | Diameter: (4 ± 0.1) mm |

表 2 光栅参数影响

Table 2 Influence of the grating mirror parameters

| Parameter | Grating period | Groove depth | Duty cycle | Layer number |
|----------------------|-------------------|---------------------|-------------|--------------|
| TE reflectivity peak | Moving rightwards | Decreasing | Insensitive | Insensitive |
| TM reflectivity peak | Insensitive | Decreasing slightly | Insensitive | Insensitive |

3 径向偏振光的输出与测量

实验使用的激光器模块为北京中科紫玉光电有限公司生产的 Eagle-50 型激光二极管抽运棒状 Nd:YAG 固体激光器。将后腔镜替换为光栅反射镜构成亚稳腔。实验考虑了激光棒的热透镜效应,对谐振腔进行了优化设计,获得了高质量的径向偏振激光输出。

实验装置如图 3 所示。其中偏振分束器(PBS)的消光比为 1000:1;功率计为 Gentec SOLO PE(R2)功率计;CCD 为美国 Spiricon 公司的 LBA-708PC 型激光光束分析仪;分光镜的透过率为 0.1%。棒状增益介质的直径为 2 mm,长度为 68 mm。输出耦合镜和光栅反射镜距棒状增益介质的中心均为 429 mm。图 4 为 CCD 测量的光斑强度分布图,可以看出,径向偏振光由于光斑中心偏振方向的不确定性而表现为暗区^[13]。加入 PBS 后,光斑随着 PBS 偏振方向的旋转而旋转。

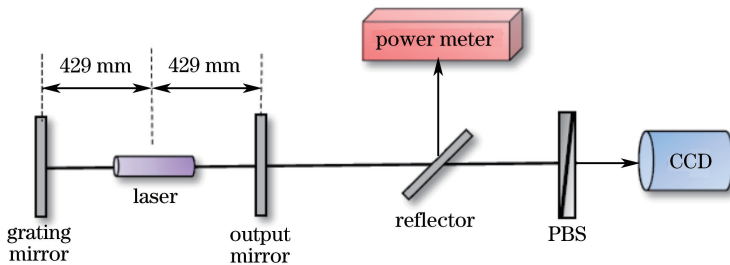


图 3 实验装置图

Fig. 3 Experimental setup of the laser system

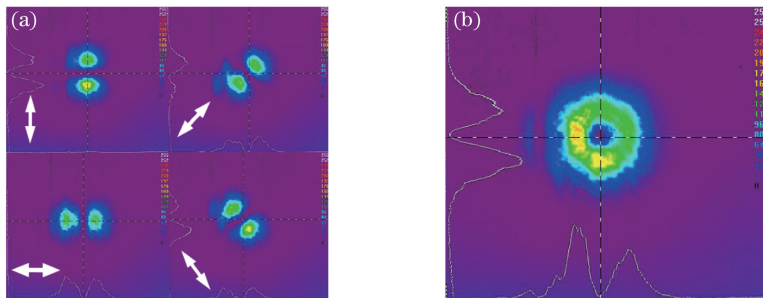


图 4 输出光斑强度分布。(a) 加入 PBS 后的光斑强度分布(箭头方向为 PBS 偏振方向);(b) 未加 PBS 的光斑分布

Fig. 4 Intensity distribution of the radially polarized beam.

(a) With PBS (arrows indicate the polarization directions of PBS); (b) without PBS

衡量径向偏振光光束质量的一个重要标准是偏振度,即径向分量的能量占总能量的百分比。通过测量加入 PBS 前后的光斑强度分布来计算偏振度。其原理如下。

在垂直于光线传播方向的平面上建立极坐标系,极轴(ox 轴)沿水平方向,如图 5 所示。假设 CCD 像点的电场强度为 E ,偏振方向与径向方向的夹角为 β 。在 CCD 前加入与 ox 轴夹角为 α 的 PBS 后,CCD 各像点的强度为 I_α 。对于该像点,径向分量的能量为 $E_r^2 = E^2 \cos^2 \beta$,加入 PBS 后 $I_\alpha = E^2 \cos^2(\beta + \theta - \alpha)$ 。 β, E 只与像点位置 r, θ 有关,与 α 无关。因此,若转动偏振片使偏振方向与 ox 轴夹角变为 α' ,则

$$2(I_\alpha - I_{\alpha'}) = E^2 \cos 2\beta [\cos(2\theta - 2\alpha) - \cos(2\theta - 2\alpha')] - E^2 \sin 2\beta [\sin(2\theta - 2\alpha) - \sin(2\theta - 2\alpha')], \quad (1)$$

分别取 $\alpha = 0, \alpha' = \frac{\pi}{2}, \alpha = \frac{\pi}{4}, \alpha' = \frac{3\pi}{4}$, 可得

$$I_0 - I_{\pi/2} = E^2 \cos(2\beta + 2\theta), \quad (2)$$

$$I_{\pi/4} - I_{3\pi/4} = E^2 \sin(2\beta + 2\theta). \quad (3)$$

因此,偏振度为

$$p = \frac{\sum E_r^2}{\sum E^2} = \frac{1}{2} + \frac{1}{2I} \int_0^\infty \int_0^{2\pi} [(I_0 - I_{\pi/2}) \cos 2\theta + (I_{\pi/4} - I_{3\pi/4}) \sin 2\theta] r dr d\theta, \quad (4)$$

式中 I 为所有像点的能量和。通过测量加入 PBS 前后的光斑强度分布,利用(4)式可计算得到径向偏振度。

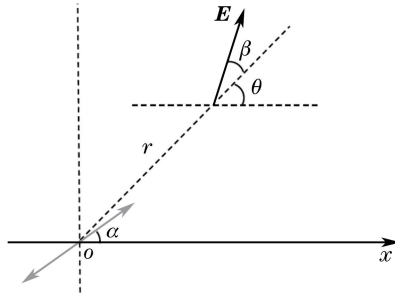


图 5 偏振度计算过程中的参数示意图

Fig. 5 Schematic of the parameters for calculating the degree of radial polarization

实验测量不同抽运电流时径向偏振激光的输出功率与偏振度,如图 6 所示。抽运电流为 19.0 A 时,功率达到极大值 13.4 W,偏振度也达到极大值 97%。当抽运电流大于 19.5 A 时,功率与偏振度均下降。

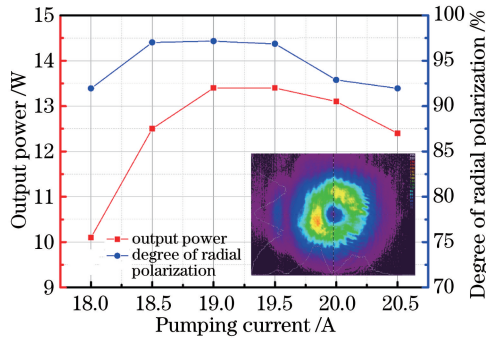


图 6 不同抽运电流时径向偏振激光的输出功率与偏振度(插图为功率最大时的光斑分布)

Fig. 6 Output power and degree of radial polarization under different pumping current (the inset shows the spot distribution at the maximum output power)

4 结 论

设计并制备了可用于产生 1064 nm 波长径向偏振激光的光栅反射镜,将其作为激光谐振腔的后腔镜获得最高为 13.4 W 的径向偏振激光输出。通过设计偏振度的计算方法,测量得到最大偏振度为 97%。实验结果显示激光输出功率及偏振度随着抽运功率提高而发生变化,这种现象可能是由激光棒热效应导致的谐

振腔失稳与模式变化引起的。如何得到高功率、高质量的径向偏振光,还需要进一步的研究。

致谢 感谢清华大学纳米中心提供的微加工工艺方面的支持。

参 考 文 献

- 1 Meier M, Romano V, Feurer T. Material processing with pulsed radially and azimuthally polarized laser radiation[J]. Applied Physics A, 2007, 86(3): 329-334.
- 2 Watanabe K, Horiguchi N, Kano H. Optimized measurement probe of the localized surface plasmon microscope by using radially polarized illumination[J]. Applied Optics, 2007, 46(22): 4985-4990.
- 3 Ashkin A. Acceleration and trapping of particles by radiation pressure[J]. Physical Review Letters, 1970, 24(4): 156-159.
- 4 Yu Yi, Pang Yu, Sun Yinhong, *et al.* Radially or azimuthally polarized laser based on mode selection of thermally induced bifocus[J]. Chinese J Lasers, 2010, 37(10): 2451-2455.
于 益, 庞 毓, 孙殷宏, 等. 基于热致双焦点选模的径向、切向偏振激光器[J]. 中国激光, 2010, 37(10): 2451-2455.
- 5 Mushiake Y, Matsumura K, Nakajima N, *et al.* Generation of radially polarized optical beam mode by laser oscillation [J]. Proceedings of the IEEE, 1972, 60(9): 1107-1109.
- 6 Ahmed M A, Haefner M, Vogel M, *et al.* High-power radially polarized Yb:YAG thin-disk laser with high efficiency [J]. Optics Express, 2011, 19(6): 5093-5103.
- 7 Aubourg A, Rumpel M, Ahmed M, *et al.* Wavelength selection, spatial filtering and polarization control of an Er:YAG laser cavity by resonant-grating mirror[C]. European Conference on Lasers and Electro-Optics, Munich, 2013: CA_P_25.
- 8 Fang Ming, Gao Jiancun, Tang Xinchun, *et al.* Generating linearly polarized TEM₀₀ mode laser beam with grating mirror as the back-cavity mirror[J]. Chinese J Lasers, 2014, 41(3): 0302001.
方 茗, 高健存, 唐新春, 等. 光栅反射镜作激光器后腔镜输出基横模线偏振光[J]. 中国激光, 2014, 41(3): 0302001.
- 9 Li L, Chandezon J, Granet G, *et al.* Rigorous and efficient grating-analysis method made easy for optical engineers[J]. Applied Optics, 1999, 38(2): 304-313.
- 10 Li L. Note on the S-matrix propagation algorithm[J]. Journal of the Optical Society of America A, 2003, 20(4): 655-660.
- 11 Li L. Formulation and comparison of two recursive matrix algorithms for modeling layered diffraction gratings[J]. Journal of the Optical Society of America A, 1996, 13(5): 1024-1035.
- 12 Fang Ming, Gao Jiancun, Wang Kun, *et al.* Study on radial polarized grating mirror[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2014, 26(1): 011008.
方 茗, 高健存, 王 坤, 等. 激光径向偏振光栅反射镜的研究[J]. 强激光与粒子束, 2014, 26(1): 011008.
- 13 Quabis S, Dorn R, Leuchs G. Generation of radially polarized doughnut mode of high quality[J]. Applied Physics B, 2005, 81: 597-600.