

光栅反射镜作激光器后腔镜输出基横模线偏振光

方 茗¹ 高健存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 利用共振泄露型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 槽深的直线型光栅反射镜,并通过微纳加工工艺制备了相应的样品。用对比法对样品进行测量,测得光栅反射镜对 TE 光的反射率为 87%,对 TM 光的反射率为 98%,验证了其在中心波长 1064 nm 处的偏振选择作用,与理论计算结果相符。使用光栅反射镜作为后腔镜,搭建了中心波长为 1064 nm 的 Nd:YAG 激光器,在抽运电流为 20.1 A 时获得了 14.4 W 的基横模线偏振光输出,经过实验测量,输出光偏振度可达到 95.7%。

关键词 激光器;线偏振;光栅;光学器件;亚波长

中图分类号 O436 文献标识码 A doi: 10.3788/CJL201441.0302001

Generating Linearly Polarized TEM₀₀ Mode Laser Beam with Grating Mirror as the Back-Cavity Mirror

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

(¹ Department of Physics, Tsinghua University, Beijing 100084, China
² Institute of Applied Electronics, China Academy of Engineering Physics, Mianyang, Sichuan 621900, China)

Abstract With the polarization-selective property of the resonance leaky-mode grating mirror, a 35-layer grating mirror with 1000 nm period and 70 nm groove depth is designed and manufactured. The corresponding sample is prepared through the micro-nanofabrication process. The bi-reflectivity of the sample is measured by contrast method, and its reflectivity is about 87% for TE wave and 98% for TM wave, which proves its polarization selection at the central wavelength of 1064 nm, and that is agree with theoretical result. Then the grating mirror is placed in a Nd:YAG laser cavity as the end mirror, with which a linearly polarized TEM₀₀ laser beam at 1064 nm is got, its degree of polarization is about 95.7% and power is 14.4 W with pump current of 20.1 A.

Key words lasers; linear polarization; grating; optical elements; sub-wavelength

OCIS codes 050.1950; 050.6624; 140.3580; 140.3070; 230.4000

1 引 言

激光在应用时,对其偏振态有一定的要求,比如在精密测量时避免由于干涉导致的对比度下降问题等^[1]。在各种偏振态中,线偏振光在材料研究、医疗、工业、信息传输、粒子操控等各方面都有着重要的应用^[2-5]。输出线偏振光通常需要依靠布鲁斯特元件的偏振选择特性来实现,例如对激光晶体上按布鲁斯特角度进行切割,或者在激光谐振腔内放置

布鲁斯特窗^[6]。采用光栅反射镜来实现线偏振激光输出,可以在已经成型的激光组件基础上进行改造,对晶体本身没有严格要求,还可以避免在腔内另外安装布鲁斯特元件造成的功率损失。

亚波长光学元件指特征尺寸相当于或者小于工作波长的光学元件,其反射率、透射率、偏振特性、光谱特性都与常规衍射元件不同^[7]。亚波长光学元件在反射元件、偏振器件、窄带滤波器、轴对称光学元件

收稿日期: 2013-07-30; 收到修改稿日期: 2013-08-26

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

作者简介: 方 茗(1987—),男,硕士研究生,主要从事激光器方面的研究。E-mail: fangm04@163.com

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

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

等方面有广阔的应用前景。由于微加工工艺的发展,亚波长光学元件在近年来得到了广泛的研究^[8-9]。

Bel'tyugov 等^[10]在 1988 年设计了一种由多层膜与亚波长金属光栅结构结合来产生偏振选择作用的光学元件,称为光栅反射镜。当两个正交偏振光射入光栅反射镜时,由于亚波长光栅的双折射效应,它们在被多层膜结构反射时会经历不同的光程差,而不同层次的反射光相互干涉就产生了某个波长处反射率的异常变化,比如某个偏振光的特定波长处反射率突然增高或降低。人们可以利用光栅反射镜的反射率异常,在激光谐振腔中引入不对称性,从而实现特定偏振光的输出。在随后的研究中,人们设计出了具有全介质的光栅反射镜。全介质光栅反射镜具有反射效率高、制造工艺简化、输出功率提高、寿命更长等优点。

光栅反射镜的数值计算方法包括时域有限差分算法(FDTD)、基于严格耦合波理论的传输矩阵算法(S 矩阵算法)等。本文采用计算结果更为精确速度更快的 S 矩阵算法作为数值计算工具,对光栅反射镜的参数进行了研究,设计并制备了 35 层镀膜的光栅

反射镜,并通过微加工工艺在反射镜顶部蚀刻出亚波长光栅,设计出带有偏振选择作用的泄漏型光栅反射镜。利用经数值优化后的参数,制备出了中心波长为 1064 nm 的样品,并对样品进行了实验测量。随后以此光栅反射镜为后腔镜搭建了 Nd:YAG 激光器,实验获得了基横模的线偏振激光输出。

2 光栅反射镜的设计

作为激光器后腔镜的光栅反射镜,其性能直接影响线偏振光的出光效率与偏振纯度,因此在设计时应使其对于所需偏振光(TM 偏振)的反射率尽可能高,而对于需要消除的偏振光(TE 偏振)反射率尽可能低,这样在腔内 TM 波形成振荡,而 TE 波由于损耗过大被抑制,光栅上 TE 波与 TM 波如图 1 所示。由于制备工艺所限,所设计的光栅必须对加工误差有较强的包容性。体现在参数上即光栅对 TE 偏振的反射率光谱具有反射率尽可能低且半峰全宽大的反射率谷,因而对加工时光栅参数的微小变化不敏感。

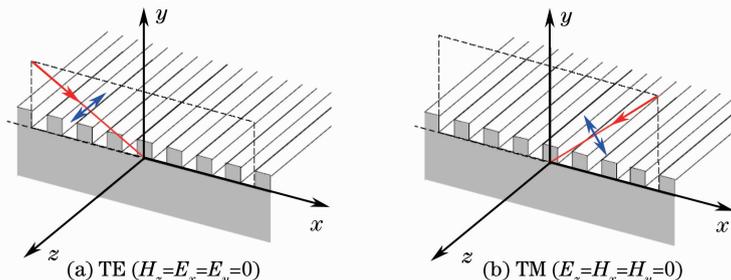


图 1 光栅上(a)TE波与(b)TM波

Fig. 1 (a) TE wave and (b) TM wave on a grating

共振泄露型光栅反射镜原理如图 2(a)所示,光栅反射镜由一个多层膜结构的高反镜及在其上刻蚀出的亚波长光栅结构构成。其中多层膜结构保证了镜面整体的高反射特性,使其可以作为激光谐振腔后腔镜使用。顶部的亚波长光栅可以使入射光在经过光栅后出现 0 级以及 1 级两个级次的衍射光。由于亚波长光栅具有双折射效应,因此可以通过调整光栅周期、槽深等一系列参数,使得 TE 波的 1 级衍射光透射效率增强,而 TM 波不变。这样设计的光栅反射镜,可以在特定波长处对 TE 偏振光(电场沿着光栅槽线方向)形成泄漏模式透射光,而 TM 偏振光(电场垂直光栅槽线方向)近乎完全被反射,中心波长处 TM 偏振与 TE 偏振光产生了反射率差

异,从而具有了偏振选择特性。

利用基于严格耦合波理论的 S 矩阵算法,用商业软件 Gsolver 5.1 对光栅反射镜进行了建模,计算出不同参数对 TE 偏振与 TM 偏振的反射率谱线^[11-13]。经过理论计算对光栅的刻蚀深度、周期、占空比等一系列参数进行了优化,确定了光栅的加工参数。所采用的光栅反射镜是在 SiO₂ 基片上交替镀上 35 层 Ta₂O₅ 与 SiO₂ 1/4 波长高反膜,在其顶层进行电子束曝光,蚀刻出深度为 70 nm、周期为 1000 nm、占空比为 50% 的光栅,光栅样品如图 2(b)所示。这样光栅反射镜可以在 1064 nm 波长处达到 TM 波反射率 99.5%,TE 波反射率 69.1% 的性能,如图 3 所示。

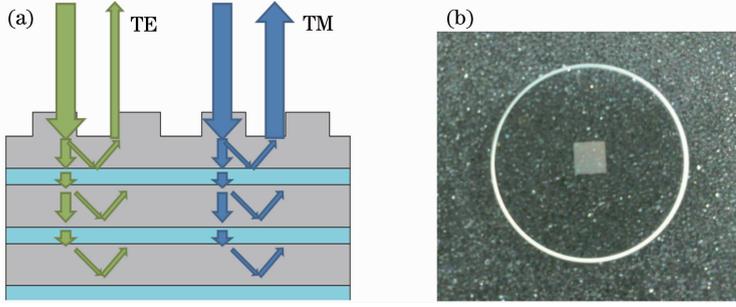


图 2 (a) 共振泄露型光栅反射镜原理图；(b) 制备的样品图

Fig. 2 (a) Schematic of resonance leaky-mode grating mirror; (b) picture of prepared sample

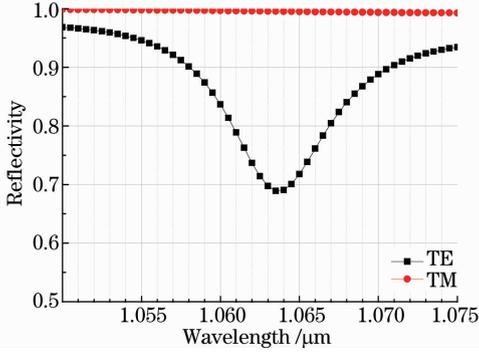


图 3 光栅反射镜反射率数值计算结果

Fig. 3 Calculative results of reflectivity of the grating mirror

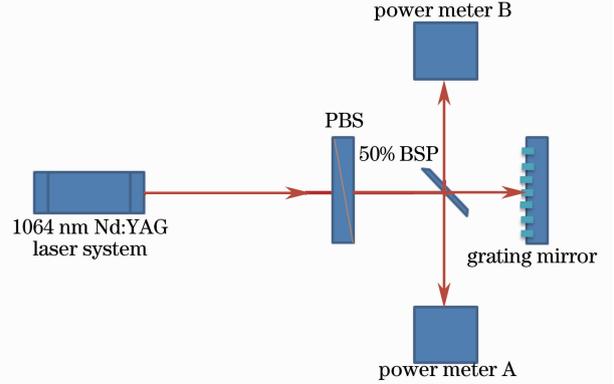


图 4 测量光栅反射镜反射率实验装置图

Fig. 4 Experimental setup for measuring reflectivity of grating

3 光栅反射镜反射率的测量

为了对光栅反射镜在中心波长 1064 nm 处的偏振选择特性进行测量,同时对计算结果进行验证,实验中使用了一台 1064 nm 半导体侧面抽运激光器、一片偏振分束镜(PBS)起偏器、45°平均偏振半反透镜(50% BSP)、一台 Gentec SOLO PE(R2)功率计 A 以及一台 Coherent PS10 功率计 B 对光栅反射镜的两个偏振反射率进行测量,实验装置如图 4 所示。功率计 A 测量入射光强度,功率计 B 测量反射光强度。由于光栅反射镜对于 TM 偏振反射率接近 100%,因此为了简化测量,假定没有刻蚀光栅的高反镜反射率为 100%。1064 nm 激光器输出的激光经过 PBS 后产生线偏振光,通过功率计 A 和 B 可以测出光栅反射镜在不同角度时对线偏振光的反射率,与没有刻蚀光栅的高反镜反射率对比,即可得到光栅反射镜对 TE 偏振和 TM 偏振的反射率。

振方向与起偏器方向夹角分别为 0°, 90°, 180°, 270°, 记录功率计 A、B 的读数 I_A 与 I_B , 其中 0° 和 180° 对应 TM 偏振, 90° 和 270° 对应 TE 偏振。各偏振状态下的反射率为

$$R_{TM0^\circ} = \frac{I_{B0^\circ}/I_{A0^\circ}}{I_{Bavg}/I_{Aavg}}, \quad (1)$$

$$R_{TM180^\circ} = \frac{I_{B180^\circ}/I_{A180^\circ}}{I_{Bavg}/I_{Aavg}}, \quad (2)$$

$$R_{TE90^\circ} = \frac{I_{B90^\circ}/I_{A90^\circ}}{I_{Bavg}/I_{Aavg}}, \quad (3)$$

$$R_{TE270^\circ} = \frac{I_{B270^\circ}/I_{A270^\circ}}{I_{Bavg}/I_{Aavg}}. \quad (4)$$

可以推导出光栅反射镜反射率的公式为

$$R_{TM} = \frac{R_{TM0^\circ} + R_{TM180^\circ}}{2}, \quad (5)$$

$$R_{TE} = \frac{R_{TE90^\circ} + R_{TE270^\circ}}{2}. \quad (6)$$

假定高反镀层的反射率为 100%, 即 $R_{st} = C \cdot \frac{I_{Bavg}}{I_{Aavg}} = 1$, C 为两个功率计比值与反射率的比例系数, I_{Aavg} 、 I_{Bavg} 分别为功率计 A 和 B 测量到的光强平均值。再将激光对准反射镜光栅中心, 旋转光栅偏

实验测量结果与理论结果如表 1 所示, 在以上加工参数情况下的光栅反射镜对 TE 偏振光的反射率为 98%, 而对 TM 偏振光的反射率为 87%。这个数值表明, 光栅反射镜在偏振选择特性上与理论计算的结果基本一致, 对 TM 偏振光反射率较高, 而对两种偏振模式有了明显的区分, 可以在谐振腔中

作为后腔镜使用。但是对于 TE 偏振的反射率有一定的偏差。导致这种偏差的原因主要包括:镀膜工艺导致每层介质薄膜的厚度不符合理论数值、微纳加工工艺的误差、理论计算的截断误差。导致误差的原因将在后续实验中进行研究。

表 1 光栅反射镜对两种偏振光反射率的理论值与实验值

Table 1 Theoretical and experimental values of grating mirror reflectivity for both polarizations

	Theory	Experiment
TE	69.1%	87%
TM	99.5%	98%

4 线偏振激光的输出

在直接输出线偏振光的实验中,使用的激光器模块为北京中科紫玉光电有限公司所生产 Eagle-50 型的激光二极管(LD)抽运 Nd:YAG 固体激光器。原激光器后腔镜为平凸镜与输出耦合镜构成非稳腔,可以直接输出基横模激光。将后腔镜替换为以上制备的光栅反射镜可以构成亚稳腔,如图 5 所示。由于 TE 偏振和 TM 偏振在腔内损耗不同,因此可以实现 TM 偏振起振而 TE 偏振被抑制的效果,实现高纯度线偏振激光的直接输出。

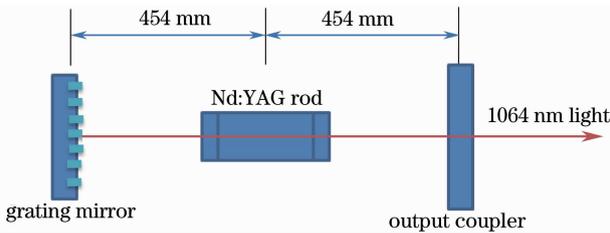


图 5 光栅反射镜作谐振腔后腔镜输出线偏振光实验装置图

Fig. 5 Experimental setup of the resonant cavity using grating mirror as the back-cavity mirror to generate linearly polarized laser

实验通过 Gentec Electro Optics 公司所生产的 SOLO 型激光功率能量计对激光的输出功率进行测量,并通过 LBA-708PC 光束分析仪对激光输出的光斑进行观察。通过对谐振腔腔长的调整,在前后腔镜距离 908 mm 时,可以在线偏振基横模情况获得最大的输出功率。调整抽运电流,测量了不同抽运电流时激光器输出的光斑形状以及功率曲线,如图 6 所示。可以发现在抽运电流 20.1 A 时,输出激光的功率达到了极大值 14.4 W,输出模式为线偏振基横模;在抽运电流继续增高时,由于晶体的热透镜效应,输出功率下降。

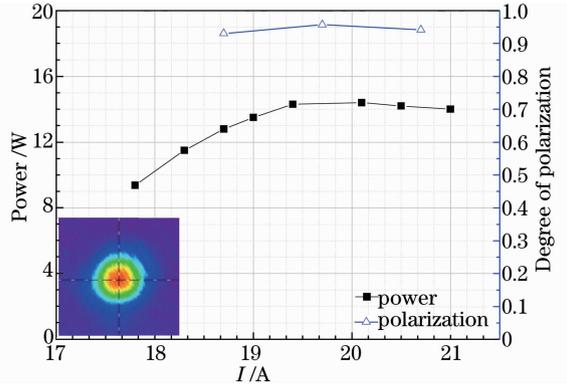


图 6 不同抽运电流时激光器输出功率与偏振度 (内插图为输出光斑)

Fig. 6 Power and degree of polarization of the output laser at different pump currents (the inset is output light spot)

为了对输出激光偏振度进行检测,实验中使用了一片消光比 1000:1 的 PBS 起偏器,一台 Gentec SOLO PE(R2)功率计对输出激光两个偏振的功率进行了测量。调整抽运电流分别至 18.7、19.7、20.7 A,旋转 PBS 测量功率计的极大值 P_{max} 和极小值 P_{min} ,可以发现功率计达到最大值和最小值时 PBS 的角度正交,因此可通过偏振度定义公式 $P = \frac{P_{max} - P_{min}}{P_{max} + P_{min}}$ 计算出输出激光的偏振度。在 19.7 A 时输出激光达到了的偏振度的极大值。

5 结 论

设计并制造了一片 1064 nm 中心波长的光栅反射镜,通过实验测量得到了反射镜对 TE 波反射率为 87%,对 TM 波的反射率为 98%,与理论计算结果基本符合。将光栅反射镜作为固体激光器谐振腔后腔镜,可以获得稳定高效的基横模线偏振激光输出。所组装的激光器,在抽运电流 20.1 A 时达到了 14.4 W 的基横模线偏振光最大输出功率,在抽运电流 19.7 A 处达到了 95.7% 偏振度极大值。由于工艺误差以及材料参数的选取问题,导致光栅反射镜反射率理论计算值与实验测量值之间有一定的差距,该问题需要进一步的研究与实验。

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 Ahmed M A, Moser T, Pigeon F, et al.. Intra-cavity polarizing element for Nd:YAG laser[J]. Laser Physics Letters, 2006, 3 (3): 129-131.

- 2 Wang Zebin, Zhou Jinzhao, Huang Zuohua. Measuring refractive index of medium based on reflectance curve of linearly polarized light[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2012, 49(12): 121204.
王泽斌, 周进朝, 黄佐华. 线偏振光反射法测量介质材料折射率的方法[J]. *激光与光电子学进展*, 2012, 49(12): 121204.
- 3 Wei Huajiang, Xing Da, Wu Guoyong, *et al.*. Optical transport characteristics of human tissues in vitro at 808 nm linearly polarized laser irradiation[J]. *Chinese J Lasers*, 2004, 31(3): 305–309.
魏华江, 邢 达, 巫国勇, 等. 808 nm 近红外激光辐照三种不同的离体人组织的光传输特性[J]. *中国激光*, 2004, 31(3): 305–309.
- 4 Gao Qiang, Zeng Nan, Ma Hui, *et al.*. Rotating linearly polarized light imaging applied in textile testing[J]. *Chinese J Lasers*, 2009, 36(9): 2380–2383.
高 强, 曾 楠, 马 辉, 等. 旋转线偏振光成像方法在纺织品纤维检测中的应用[J]. *中国激光*, 2009, 36(9): 2380–2383.
- 5 P Galajda, P Ormos. Orientation of flat particles in optical tweezers by linearly polarized light[J]. *Opt Express*, 2003, 11(5): 446–451.
- 6 Arissian L, Rostami S, Diels J C. Modification of ellipticity of light propagating in air[J/OL]. *Bulletin of the American Physical Society*, 2013, 58(6): H6. 00002. <http://meetings.aps.org/link/BAPS.2013.DAMOP.H6.2>.
- 7 Aubourg A, Graf T, Abdou-Ahmed M, *et al.*. Wavelength selection, spatial filtering and polarization control of an Er:YAG laser cavity by resonant-grating mirror[C]. *Cleo Europe*, 2013.
- 8 Tobias Moser, Jürg Balmer, Danaë Delbeke. Intracavity generation of radially polarized CO₂ laser beams based on a simple binary dielectric diffraction grating[J]. *Appl Opt*, 2006, 45(33): 8517–8522.
- 9 Ahmed M A, Rumpel M, Voss A, *et al.*. Applications of sub-wavelength grating mirrors in high-power lasers[J]. *Advanced Optical Technologies*, 2012, 1(5): 381–388.
- 10 Bel'tyugov V N, Troitskii Y V. Polarizing laser mirrors[J]. *Soviet Journal of Quantum Electronics*, 1988, 18(5): 627–629.
- 11 Lifeng Li, Jean Chandezon, Gérard Granet, *et al.*. Rigorous and efficient grating-analysis method made easy for optical engineers [J]. *Appl Opt*, 1999, 38(2): 304–313.
- 12 Lifeng Li. Note on the *S*-matrix propagation algorithm[J]. *J Opt Soc Am A*, 2003, 20(4): 655–660.
- 13 Lifeng Li. Formulation and comparison of two recursive matrix algorithms for modeling layered diffraction gratings[J]. *J Opt Soc Am A*, 1996, 13(5): 1024–1034.

栏目编辑: 史 敏