

侧面抽运 Nd:YAG 锁模径向偏振光

李政委 陈 檬* 李 港

(北京工业大学激光工程研究院, 北京 100124)

摘要 根据 Nd:YAG 晶体侧面抽运下径向和切向热焦距的不同,以及半导体可饱和吸收镜(SESAM)被动锁模条件,利用激光二极管(LD)侧面抽运 Nd:YAG 四镜折叠 SESAM 被动锁模腔,在腔内无偏振选择器件条件下,实现锁模径向偏振光输出。模拟计算了径向偏振态和角向偏振态光斑大小与抽运电流之间的关系,分析给出了实现 SESAM 稳定锁模的条件,通过放置适当孔径的光阑,获得了最大输出功率为 13 W、偏振态纯度大于 92%、重复频率为 59 MHz 的 1064 nm 锁模径向偏振光。

关键词 激光器; 全固态激光; 径向偏振; YAG 锁模; 热焦距

中图分类号 TN248 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201441.0102006

Side-Pumped Nd:YAG Mode-Locked Radially Polarized Laser

Li Zhengwei Chen Meng Li Gang

(Institute of Laser Engineering, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China)

Abstract A mode-locked radially polarized laser is generated based on the difference of thermal focal length in side-pumped Nd:YAG and the condition of mode-locking by the semiconductor saturable absorption mirror (SESAM). The spot size of radial polarization and azimuthal polarization with different pumping currents, and the parameters of the LD side-pumped Nd:YAG four-mirror-folded passively mode-locked cavity are analyzed. The maximum output power of 13 W with the frequency of 59 MHz and the wavelength of 1064 nm is acquired. We demonstrate that the purity of the radially polarized beam is more than 92%.

Key words lasers; all-solid-state laser; radial polarization; YAG mode-locked; thermal focal length

OCIS codes 140.3410; 140.3460; 140.3538; 140.3580

1 引 言

径向偏振光和角向偏振光由于其独特的偏振特点在很多领域得到了应用,例如材料加工^[1]、粒子捕获^[2]、光学制版^[3]等。1993年, Tidwell 等^[4]使用腔内干涉法,将一束 TEM₀₁ 模的激光光束分成两束,将其中一束光斑的偏振态旋转 90°,与未旋转的另一束光相干叠加,产生了径向偏振光。此外还有报道利用热致双折射原理^[5]、圆锥形布儒斯特窗^[6]、亚波长光栅^[7]、轴对称偏振片^[8]等方法,实现连续径向偏振光的输出。目前连续径向偏振光的研究较为成熟,输出功率已达千瓦量级,并已得到实际应用。

短脉冲激光钻孔由于其热影响小,在航空航天、

微电子等领域有广泛和重要的应用前景。飞秒、皮秒超短激光脉冲打孔时,由于其产生的激光为线偏振光或圆偏振光,在钻孔加工时会造成孔壁质量和出口圆度变差^[9]从而影响加工质量,而采用径向偏振光可以消除这些影响,提高加工质量,显示出巨大的加工优势^[10-11]。因此研究锁模径向偏振光的产生具有重大意义。目前锁模径向偏振光所报道的最大输出功率为 10 W^[12]。

从半导体可饱和吸收镜(SESAM)锁模 Z 形腔出发,在腔内不需要插入偏振选择器件的情况下,利用 Nd:YAG 晶体棒自身的热效应产生锁模径向偏振光。锁模径向偏振光最大输出功率为 13 W,径向

收稿日期: 2013-08-02; **收到修改稿日期**: 2013-08-30

作者简介: 李政委(1989—),男,硕士研究生,主要从事皮秒激光器方面的研究。E-mail: 837164431@qq.com

导师简介: 李 港(1950—),男,教授,主要从事全固态超短激光技术及频率变换和扩展技术等方面的研究。

E-mail: lig@bjut.edu.cn

* **通信联系人**。E-mail: chenmeng@bjut.edu.cn

偏振态纯度大于 92%。

2 实验设计

2.1 理 论

对于侧面抽运 Nd:YAG 圆棒晶体,由于热效应可以将 YAG 晶体等效为一个透镜,其焦距表达式为^[13]

$$f = \frac{K \cdot A}{P_a} \left(0.5 \frac{dn}{dt} + \alpha C_{r,\phi} n_0^3 + \frac{\alpha r_0 (n_0 - 1)}{L} \right)^{-1}, \quad (1)$$

式中 $K=0.14 \text{ W}/(\text{cm} \cdot ^\circ\text{C})$ 为热导系数, A 为晶体棒的截面积, P_a 为晶体耗散的总热量, $\alpha=7.5 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$ 为热胀系数, n 为棒的折射率, $n_0=1.82$ 为棒中心的折射率, r_0 为棒的半径, L 为棒的长度, $C_r=0.017$ 、 $C_\phi=-0.0025$ 为径向偏振态和角向偏振态光弹系数。沿半径方向(径向, $-r$ 方向)和垂直于半径方向(切向, $-\phi$ 方向)的偏振态光弹系数是两个不同的值,由(1)式可知两种偏振态对应的热焦距不同,分别为 f_r 和 f_ϕ ,因此在腔内 r 方向偏振态和 ϕ 方向偏振态的光斑大小不同。通过光阑抑制光斑大的偏振态,使光斑小的偏振态光振荡形成激光,从而实现径向偏振光或者角向偏振光的振荡。

2.2 锁模径向偏振光谱谐振腔设计

为了满足锁模条件,LD 侧面抽运 Nd:YAG 的谐振腔设计为四镜折叠腔,其光路示意图如图 1 所示。为了保证腔内振荡光的模式匹配以及锁模所需的光功率密度,腔镜 M_1 和 M_2 曲率半径分别设计为 $R_1=2000 \text{ mm}$ 和 $R_2=300 \text{ mm}$,镀 1064 nm 高反膜,反射率大于或等于 99.9%。腔长总长度约为 2.55 m,其中 Nd:YAG 晶体中心距输出镜(OC)和 M_1 反射镜距离分别为 $d_1=250 \text{ mm}$ 和 $d_2=1000 \text{ mm}$,SESAM 距 M_2 的距离为 $d_4=150 \text{ mm}$ 。Nd:YAG 棒掺杂原子数分数为 1%,两端面镀 1064 nm 增透膜,透射率大于 99.8%,尺寸为 $\phi 3 \text{ mm} \times 65 \text{ mm}$ 。实验使用的侧面抽运模块为北京吉泰基业科技有限公司的 GTPC-75S 型号模

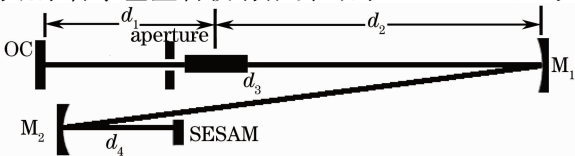


图 1 锁模径向偏振光谱谐振腔光路示意图,

$T_{OC}=10\%$, $d_1 \sim d_4$ 为各光学元件之间的距离

Fig. 1 Schematic of mode-locked radially polarized optical resonator. $T_{OC}=10\%$, $d_1 \sim d_4$ are distances between optical elements

块,抽运波长 $\lambda=808 \text{ nm}$,最大输入电功率为 500 W。

(1)式中晶体耗散总热量 P_a 可由抽运功率、抽运效率、晶体吸收率计算得出,即

$$P_a = P \cdot \eta \cdot \exp(-\beta \times l) = U \cdot I \cdot \eta \cdot \exp(-\beta \times l), \quad (2)$$

式中 P 为抽运电功率, η 为抽运电光效率, $\beta=3.5 \text{ cm}^{-1}$ ^[14] 为 Nd:YAG 对 808 nm 波长的吸收系数, l 为抽运光在晶体内的传播距离, U 和 I 分别为激光二极管(LD)抽运电压和电流。将已知的抽运电光效率 η 、晶体棒截面积 A 、长度 L 和 l 代入(1)和(2)式即可计算出 f_r 和 f_ϕ 。

根据计算出的晶体热焦距 f_r 和 f_ϕ ,利用软件 LASCAD 模拟出光阑处(距 Nd:YAG 棒中心 70 mm)径向偏振态光斑(ω_r)和切向(也称作角向)偏振态光斑(ω_ϕ)大小随 LD 抽运电流变化曲线,如图 2 所示。从图 2 可以看出 $\omega_r < \omega_\phi$,此时将光阑(Aperture)放置在晶体棒前,抑制光斑较大的角向偏振态光,即可实现径向偏振光振荡输出。

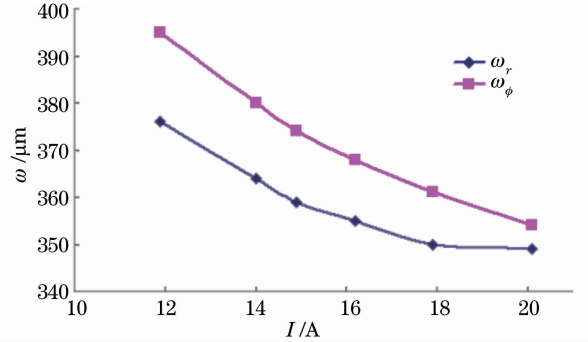


图 2 光斑半径与抽运电流关系模拟曲线

Fig. 2 Simulation curve of spot size versus pump current

实验选取调制深度 $\Delta R=0.4\%$ 、饱和通量 $F_{\text{sat},A}=0.9 \text{ J}/\text{m}^2$ 的 SESAM 作为腔内被动锁模元件。为了实现稳定锁模,必须满足锁模阈值条件^[15]

$$E_p^2 > F_{\text{sat},A} A_{\text{eff},A} F_{\text{sat},L} A_{\text{eff},L} \Delta R, \quad (3)$$

式中 E_p 为腔内单脉冲能量, $A_{\text{eff},A}$ 、 $A_{\text{eff},L}$ 分别为 SESAM 上光斑面积和晶体上光斑面积,可以通过 LASCAD 对谐振腔的模拟得到; $F_{\text{sat},A}$ 和 $F_{\text{sat},L}$ 分别为 SESAM 饱和通量和晶体饱和通量。其中晶体饱和通量 $F_{\text{sat},L} = \frac{h\nu}{2\sigma_L} = 3343 \text{ J}/\text{m}^2$, $h\nu$ 为光子能量, σ_L 为 Nd:YAG 受激发射截面^[15]。

将数值代入(3)式可以得到 $E_p^2 > 3334 \times 1.92 \times 10^{-6} \times 0.9 \times 4.31 \times 10^{-8} \times 0.004 \text{ J}^2 = 1 \times 10^{-12} \text{ J}^2$,通过调节抽运电流和 SESAM 位置,使腔内单脉冲能量 $E_p^2 > 1 \times 10^{-12} \text{ J}^2$,即可满足锁模阈值条件。

3 实验结果与分析

实验中逐渐增加抽运电流并适当调整光阑大小及 SESAM 位置, 在输入电功率为 360 W 时获得 13 W 锁模径向偏振输出。图 3 为 CCD 图像分析仪

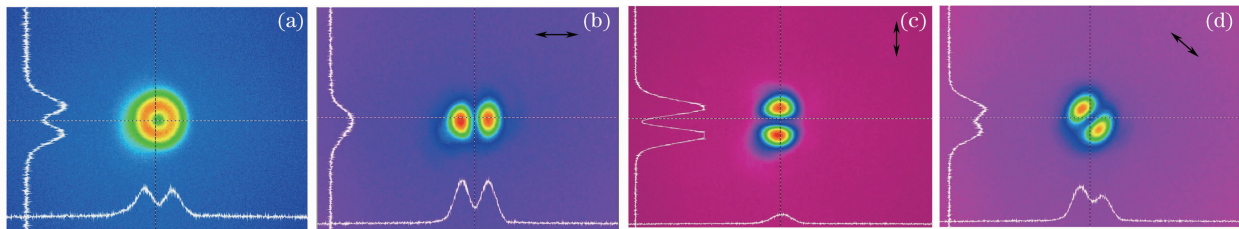


图 3 光斑强度分布图。(a) 总强度分布; (b)~(d) 经过偏振器后光斑强度分布, 箭头方向代表偏振方向

Fig. 3 Intensity distributions of output laser beam. (a) Total intensity distribution; (b)~(d) intensity distributions after beam passes through a linear polarizer, with the arrows indicating directions of polarizer

图 4 为采用快速光电管和 6 GHz 带宽的宽带示波器监测的输出锁模脉冲波形, 其中图 4(a) 示波器显示锁模脉冲间隔为 17 ns, 换算得到锁模脉冲串的重叠频率为 58.8 MHz, 此时腔内单脉冲能量 $E_p^2 = 4.9 \times 10^{-12} \text{ J}^2$, 满足前面给出的锁模阈值条件(2)式; 图 4(b) 表明锁模起伏非常小, 处于稳定锁模状态。

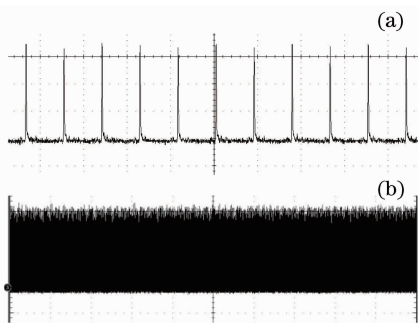


图 4 锁模脉冲串。(a) 20 ns/div; (b) 2 μs/div

Fig. 4 Laser pulses in mode-locking state.

(a) 20 ns/div; (b) 2 μs/div

为了进一步验证光阑对角向(ϕ)偏振光的抑制程度, 即输出径向偏振光的偏振态纯度, 采用如下方法对输出的径向偏振光进行了偏振态纯度检测, 测

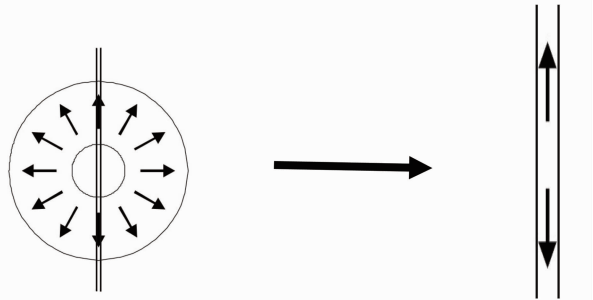


图 5 径向偏振态纯度测量

Fig. 5 Measurement of polarization purity of radially polarized laser

接收的输出光斑分布图, 其中图 3(b)~(d) 中箭头代表偏振器偏振方向。随着偏振器偏振方向的改变, 输出光斑始终为两瓣分布, 且方向与偏振箭头方向一致, 说明此时输出的激光为径向偏振光。

量示意图如图 5 所示^[15]。

使用一个竖直狭缝对准光斑中心放置, 后面放置一检偏器, 检偏器使竖直偏振方向光(如图 5 所示)通过, 其他偏振方向的光不能通过, 测量检偏器前后激光功率, 其比值表明径向偏振态的纯度。表 1 为 3 种狭缝大小下测量的激光平均功率值及径向偏振态纯度计算结果。

表 1 径向偏振态纯度测量结果

Table 1 Measurement results of radial polarization purity of radially polarized laser

Before power analyzer / mW	After power analyzer / mW	Radial polarization purity / %
200	185	92.50
265	245	92.45
730	675	92.46

4 结 论

通过对 LD 侧面抽运 Nd:YAG 晶体径向、切向热透镜焦距的分析, 研究设计了 SESAM 锁模参数, 最后获得了平均输出功率为 13 W 的锁模径向偏振光, 对应的电光效率为 3.61%, 锁模径向偏振光单脉冲能量为 220 nJ。给出了径向偏振态纯度检测方法, 经检测获得的锁模径向偏振态纯度达 92% 以上。由于实验条件所限未对锁模脉冲宽度进行测量。

参 考 文 献

- 1 V G Niziev, A V Nesterov. Influence of beam polarization on laser cutting efficiency[J]. J Phys D: Appl Phys, 1999, 32(13): 1455-1461.
- 2 Y Liu, D Cline, P He, *et al.*. Vacuum laser acceleration using a radially polarized CO₂ laser beam[J]. Methods Phys Res A, 1999, 424(2): 296-303.
- 3 R Dorn, S Quabis, G Leuchs. Sharper focus for a radially polarized light beam[J]. Phys Rev Lett, 2003, 91(23): 233901.

- 4 S C Tidwell, G H Kim, W D Kimura. Efficient radially polarized laser beam generation with a double interferometer[J]. *Appl Opt*, 1993, 32(27): 5222—5229.
- 5 I Moshe, S Jackel, A Meir. Production of radially or azimuthally polarized beams in solid-state lasers and the elimination of thermally induced birefringence effects[J]. *Opt Lett*, 2003, 28(10): 807—809.
- 6 Y Kozawa, S Sato. Generation of a radially polarized laser beam by use of a conical Brewster prism[J]. *Opt Lett*, 2005, 30(22): 3063—3065.
- 7 Z Bomzon, G Biener, V Kleiner, *et al.*. Radially and azimuthally polarized beams generated by space-variant dielectric subwavelength gratings[J]. *Opt Lett*, 2002, 27(5): 285—287.
- 8 G Machavariani, Y Lumer, I Moshe, *et al.*. Efficient extracavity generation of radially and azimuthally polarized beams[J]. *Opt Lett*, 2007, 32(11): 1468—1470.
- 9 S Nolte, C Momma, G Kamlage, *et al.*. Polarization effects in ultrashort-pulse laser drilling[J]. *Appl Phys A*, 1999, 68(3): 563—567.
- 10 M Meier, H Glur, E Wyss, *et al.*. Laser microhole drilling using Q-switched radially and tangentially polarized beams[C]. *SPIE*, 2006, 6053: 605312.
- 11 M Meier, V Romano, T Feurer. Material processing with pulsed radially and azimuthally polarized laser radiation[J]. *Appl Phys A*, 2007, 86(3): 329—334.
- 12 Huang Jianhong, Deng Jing. Passively mode-locked radially polarized laser based on ceramic Nd:YAG rod[J]. *Opt Express*, 2011, 19(3): 2120—2125.
- 13 W Koechner. Thermal lensing in a Nd:YAG laser rod[J]. *Appl Opt*, 1970, 9(11): 2548—2553.
- 14 W Koechner. *Solid-State Laser Engineering* [M]. Berlin: Springer, 2006. 58.
- 15 Li Xiao. *Passively Mode-Locked Side-Pumped Nd:YAG Laser with SESAM* [D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2007. 15—17, 34.
李 宵. *SESAM 被动锁模侧泵 Nd:YAG 激光器* [D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2007. 15—17, 34.

栏目编辑:张 腾