

文章编号: 0258-7025(2010)10-2451-05

# 基于热致双焦点选模的径向、切向偏振激光器

于 益 庞 毓 孙殷宏 王卫民 高清松

(中国工程物理研究院应用电子学研究所, 四川 绵阳 621900)

**摘要** 侧抽运 Nd:YAG 棒对径向偏振光和切向偏振光具有不同的热焦距, 利用 He-Ne 激光器输出的线偏振光和旋转狭缝测量 Nd:YAG 棒的径向、切向热焦距, 设计谐振腔使得只有一种偏振光能低损耗稳定振荡。在 440 W 抽运功率下, 获得 31.7 W 径向偏振激光, 光束质量因子  $M^2$  约为 2.5, 调整腔长后, 在 470 W 抽运功率下, 获得 30.2 W 切向偏振激光, 光束质量因子  $M^2$  约为 2.8。实验结果表明, 利用热致双焦点选模可以获得较大功率的径向、切向偏振激光输出, 但激光器对抽运功率敏感。

**关键词** 激光器; 径向偏振; 切向偏振; 热致双焦点

**中图分类号** TN248.1

**文献标识码** A

**doi:** 10.3788/CJL20103710.2451

## Radially or Azimuthally Polarized Laser Based on Mode Selection of Thermally Induced Bifocus

Yu Yi Pang Yu Sun Yinhong Wang Weimin Gao Qingsong

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

**Abstract** Side-pumped Nd:YAG rods have different radial and azimuthal thermal focal lengths. Radial and azimuthal thermal focal length are measured with rotary slit and polarized He-Ne laser. A laser oscillator is designed to produce low-loss stable oscillation in a single polarization. At the pumped power of 440 W, radially polarized beam at 31.7 W with  $M^2 = 2.5$  is achieved. And at the pumped power of 470 W, azimuthally polarized beam at 30.2 W with  $M^2 = 2.8$  is achieved. The results show that radially or azimuthally polarized beam with higher power can be achieved with mode selection of thermally induced bifocus, but the laser is sensitive to pumped power.

**Key words** lasers; radial polarization; azimuthal polarization; thermal bifocus

### 1 引 言

径向、切向偏振激光束是指偏振态具有旋转对称特性的激光束。径向偏振光在材料加工中比线偏振光、圆偏振光有更高的效率<sup>[1]</sup>。径向偏振光在高精度显微镜、粒子捕获、加速<sup>[2]</sup>和光镊等领域也引起广泛的关注。在棒状固体激光器中, 热致双折射引起的像差、双焦点一直困扰棒状介质固体激光器向高功率、高光束质量发展。棒状激光介质温度分布基本呈旋转对称分布, 故径向、切向偏振光可以避开热致双折射像差、双焦点, 从而提高输出激光的功率和光束质量<sup>[3]</sup>。

目前, 获得径向、切向偏振激光的技术途径很

多。通过两束相互垂直的线偏 TEM<sub>01</sub> 光束相干叠加可以获得径向、切向偏振激光<sup>[4,5]</sup>; 在谐振腔内用旋转布儒斯特镜<sup>[6-8]</sup>、多层介质膜光栅选偏已经在 CO<sub>2</sub><sup>[9]</sup>和 Nd:YAG<sup>[10]</sup>激光器中得到了应用; 利用组合波片<sup>[11,12]</sup>、液晶池<sup>[13]</sup>或光栅<sup>[14]</sup>亦可将线偏振光直接变换为径向偏振光, 但是这些方法往往需要研制特别的器件、严格的对准或者只能获得低功率的输出。

侧抽运条件下棒状 Nd:YAG 介质对径向偏振光和切向偏振光具有不同的热焦距, 本文利用棒状激光介质的热致双焦点现象, 通过合理的谐振腔设计使得一种偏振光损耗远大于另外一种偏振光, 从而产生径向或切向偏振光<sup>[15]</sup>。

收稿日期: 2010-02-10; 收到修改稿日期: 2010-05-26

作者简介: 于 益(1977—), 硕士, 研究实习员, 主要从事激光二极管抽运固体激光器方面的研究。

E-mail: smart\_leo@163.com

## 2 实验装置

实验采用的激光器结构如图 1 所示,后腔镜 M1 采用曲率半径为 540 mm 的凸面全反镜,耦合输出镜为反射率为 30% 的平面镜,小孔光阑用于限制

高阶横模,连续侧向抽运 Nd:YAG 模块(Nd:YAG 棒直径为 4 mm,长度为 106 mm)由中国工程物理研究院应用电子学研究所自行研制封装,其最大抽运功率为 1 kW。

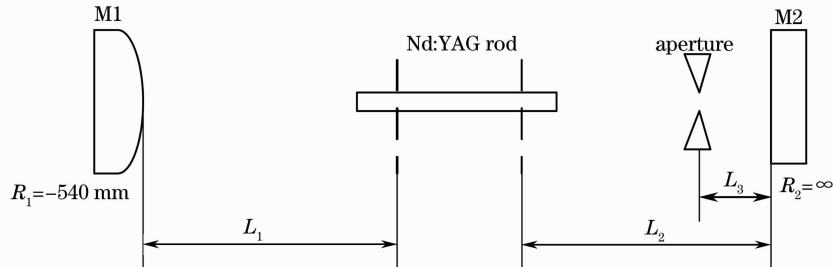


图 1 径向、切向偏振激光器示意图

Fig. 1 Schematic diagram of radially or azimuthally polarized laser

Nd:YAG 棒在环形侧抽运条件下相当于双透镜,利用线偏 He-Ne 激光器、扩束器、旋转狭缝和 CCD 可测量抽运模块在不同电流情况下的径向、切向热焦距,测试装置如图 2 所示。其中狭缝旋转中心与 Nd:YAG 棒中心一致,当 He-Ne 光偏振方向与旋转狭缝平行时测得径向热焦距;当 He-Ne 光偏振方向与旋转狭缝垂直时测得切向热焦距。

该抽运模块一般工作在 30 A,此时抽运功率约为 450 W,测得该抽运电流条件下 Nd:YAG 棒的径向、切向热焦距分别为 222 mm 和 251 mm。在有激光输出的情况下热焦距应略有增加,假设激光提取 5% 时,径向、切向热焦距分别约为 233 mm 和 264 mm。

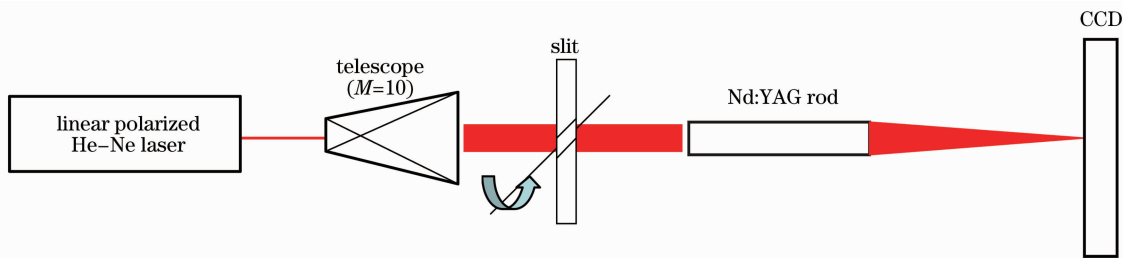


图 2 热焦距测量装置示意图

Fig. 2 Experimental setup for thermal focal length measurement

## 3 激光器设计

热焦距为  $f$  的 Nd:YAG 棒可以用一个焦距为

$f$  的薄透镜近似。以耦合输出镜 M2 为参考,图 1 中的谐振腔往返一周矩阵为

$$M = \begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & L_2 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{1}{f} & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & L_1 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{2}{R_1} & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & L_1 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{1}{f} & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & L_2 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{2}{R_2} & 1 \end{bmatrix}, \quad (1)$$

谐振腔的约束稳定条件<sup>[16]</sup>为

$$-1 < \frac{A+D}{2} < 1, \quad (2)$$

取腔型参数为: $L_1 = 470$  mm,  $L_3 = 15$  mm,  $L_2 = 350$  mm 或者 470 mm, 谐振腔稳定性参数  $(A+D)/2$

与热焦距的关系如图 3 所示。由图 3 可以看出,当输出镜与 Nd:YAG 棒主面距离为 350 mm 时,径向热焦距 233 mm 对应的稳定性参数为 -0.408,切向热焦距 264 mm 对应的稳定性参数为 -1.06,由(2)式可知切向偏振激光无法稳定振荡,此时可获得径

向偏振激光输出;若将输出镜与 Nd:YAG 棒主面距离  $L_2$  增大到 470 mm,将会得到切向偏振激光输出。故输出镜与 Nd:YAG 棒主面距离  $L_2$  分别设计为 350 mm 和 470 mm,以获得相应的径向、切向偏振激光输出。

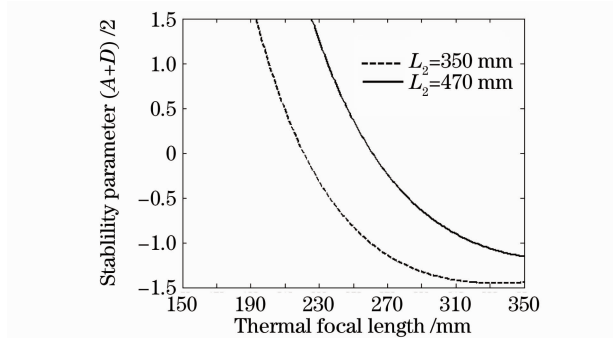


图 3 稳定性参数  $(A+D)/2$  随热焦距的变化

Fig. 3 Stability parameter  $(A+D)/2$  as a function of the thermal focal length

耦合输出镜 M2 上  $TEM_{01}^*$  模直径为

$$d_2 = 2\sqrt{2} \left[ \frac{\lambda |B|}{\pi \sqrt{1 - (A+D)^2/4}} \right]^{1/2}. \quad (3)$$

由高斯光束的传输方程可以得到  $TEM_{01}^*$  在光阑处和 Nd:YAG 棒主面处的光斑直径。图 4 为棒主面  $TEM_{01}^*$  模直径与热焦距的关系图,由图 4 可以看出,当热焦距  $f = 233$  mm,  $L_2 = 350$  mm 时,对应的径向  $TEM_{01}^*$  模直径约为 2.2 mm;当热焦距  $f = 264$  mm,  $L_2 = 470$  mm 时,对应的切向  $TEM_{01}^*$  模直径约为 2.3 mm,均约为棒直径的一半。图 5 为光阑处  $TEM_{01}^*$  模直径与热焦距的关系图,由图 5 可知,当热焦距  $f = 233$  mm,  $L_2 = 350$  mm 时,径向  $TEM_{01}^*$  模直径大约为 0.45 mm;当热焦距  $f = 264$  mm,  $L_2 = 470$  mm 时,切向  $TEM_{01}^*$  模直径约为 0.58 mm,光阑的直径分别设计为 0.6 mm 和 0.7 mm。

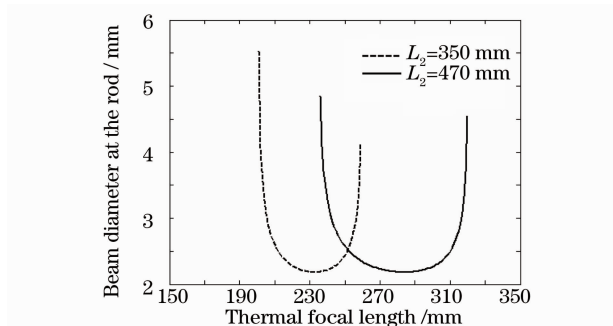


图 4 棒主面处光束直径随热焦距的变化

Fig. 4 Beam diameter at the rod as a function of the thermal focal length

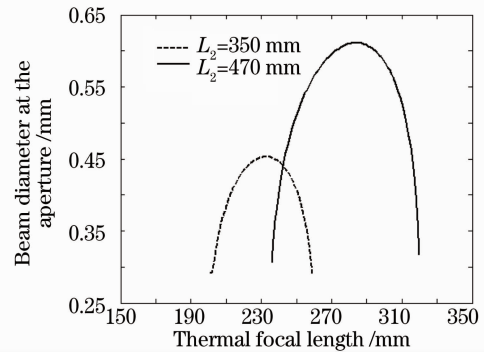


图 5 光阑处光束直径随热焦距的变化

Fig. 5 Beam diameter at the aperture as a function of the thermal focal length

## 4 实验结果与分析

径向  $TEM_{01}^*$  模光场分布可表示为

$$\begin{aligned} E_{01^*(r)}(r, \theta) = & r \cdot E_0 \frac{\sqrt{2}}{w_0} \exp\left(-\frac{r^2}{w_0^2}\right) = \\ & x \cdot E_0 \frac{\sqrt{2}}{w_0} \exp\left(-\frac{r^2}{w_0^2}\right) \cos \theta + \\ & y \cdot E_0 \frac{\sqrt{2}}{w_0} \exp\left(-\frac{r^2}{w_0^2}\right) \sin \theta = \\ & x \cdot E_{01(x)} + y \cdot E_{01(y)}. \end{aligned} \quad (4)$$

切向  $TEM_{01}^*$  模光场分布可表示为

$$\begin{aligned} E_{01^*(\theta)}(r, \theta) = & \theta \cdot E_0 \frac{\sqrt{2}}{w_0} \exp\left(-\frac{r^2}{w_0^2}\right) = \\ & x \cdot E_0 \frac{\sqrt{2}}{w_0} \exp\left(-\frac{r^2}{w_0^2}\right) \sin \theta - \\ & y \cdot E_0 \frac{\sqrt{2}}{w_0} \exp\left(-\frac{r^2}{w_0^2}\right) \cos \theta = \\ & x \cdot E_{01(y)} - y \cdot E_{01(x)}, \end{aligned} \quad (5)$$

式中  $w_0$  为束腰半径,  $r, \theta, x$  与  $y$  分别为径向, 切向,  $x$  轴和  $y$  轴方向的单位矢量。由(4), (5)式可知, 径向偏振、切向偏振  $TEM_{01}^*$  模均可认为由偏振方向垂直的  $TEM_{01(x)}$  和  $TEM_{01(y)}$  相干叠加而成。当径向偏振  $TEM_{01}^*$  模光束通过偏振片后变换为线偏  $TEM_{01}$  模, 其节线方向与偏振片方向垂直; 当切向偏振  $TEM_{01}^*$  模光束通过偏振片后亦变换为线偏  $TEM_{01}$  模, 其节线方向与偏振片方向一致。

Nd:YAG 棒主面与耦合输出镜 M2 距离  $L_2$  调整为 350 mm, 光阑直径选用 0.6 mm, 当工作电流在 29.5~31.0 A 范围内时, 获得了功率大于 31 W 的连续激光输出。当工作电流为 29.7 A 时, 测得输出激光功率 31.7 W, 光束质量因子  $M_x^2 = 2.53$ ,

$M_y^2 = 2.43$ 。在该工作条件下,切向偏振光无法稳定振荡,而径向偏振光可稳定振荡,最低阶径向偏振模式为  $TEM_{01}^*$  模,其理想光束质量因子  $M^2$  为 2。图 6 为直接测量的光强分布和通过不同角度偏振片

后的光强分布,由图可知,直接测量的光斑呈环状分布,通过偏振片后为双瓣结构,与  $TEM_{01}$  模光强分布接近,且暗带与偏振片方向垂直。因此可认为获得的激光横模为径向偏振  $TEM_{01}^*$  模。

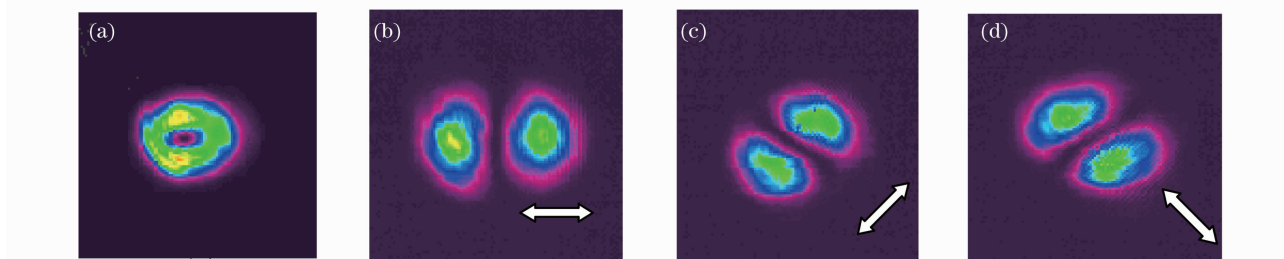


图 6 (a) 直接测得的光束光强分布,(b)~(d) 通过箭头所指方向偏振片后的光强分布( $L_2 = 350$  mm)

Fig. 6 (a) Measured total intensity distribution of the laser beam, (b)~(d) measured intensity distributions after the linear polarizer for the directions indicated by the arrows( $L_2 = 350$  mm)

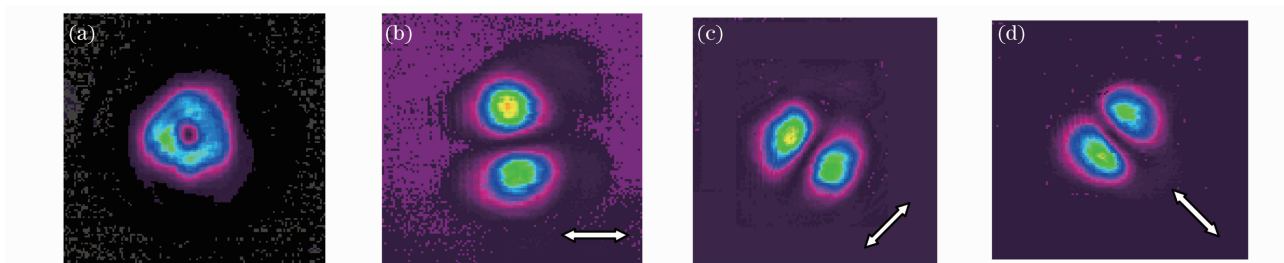


图 7 (a) 直接测得的光束光强分布,(b)~(d) 通过箭头所指方向偏振片后的光强分布( $L_2 = 470$  mm)

Fig. 7 (a) Measured total intensity distribution of the laser beam, (b)~(d) measured intensity distributions after the linear polarizer for the directions indicated by the arrows( $L_2 = 470$  mm)

将输出镜与抽运模块的主面距离增大到 470 mm,当工作电流在 30.7~31 A 范围内时,获得大于 30 W 连续激光输出。当工作电流为 30.7 A 时,测得输出激光功率 30.2 W,光束质量因子  $M_x^2 = 2.82, M_y^2 = 2.15$ 。在该工作条件下,径向偏振光无法稳定振荡,而切向偏振光可稳定振荡,而最低阶切向偏振模式为  $TEM_{01}^*$  模,其理想光束质量因子  $M^2$  为 2。图 7 为直接测量的光强分布和通过不同角度偏振片后的光强分布,由图可知,直接测量的光斑呈环状分布,通过偏振片后为双瓣结构,与  $TEM_{01}$  模光强分布接近,且暗带与偏振片方向一致。因此可认为获得的激光横模为切向偏振  $TEM_{01}^*$  模。

## 5 结 论

利用高斯光束的 ABCD 定律和自再现条件分析了热透镜对谐振腔稳定性、模直径的影响,搭建了一台基于热致双焦点选模的径向、切向偏振激光器,当抽运电流为 29.7 A(抽运功率为 440 W),Nd:YAG 棒主面与耦合输出镜 M2 距离  $L_2$  为 350 mm

时,获得 31.7 W 的连续径向偏振激光输出,光束质量因子  $M^2$  约为 2.5。当 Nd:YAG 棒主面与耦合输出镜 M2 距离  $L_2$  调整为 470 mm,抽运电流为 30.7 A(抽运功率为 470 W)时,获得 30.2 W 的切向偏振激光输出,光束质量因子  $M^2$  约为 2.8。实验结果表明利用热致双焦点选模可以获得较大功率的径向、切向偏振激光输出,但激光器对抽运功率较敏感,采用自适应热焦距补偿可获得更大的工作范围<sup>[17]</sup>。

## 参 考 文 献

- 1 V. G. Niziev, A. V. Nesterov. Influence of beam polarization on laser cutting efficiency [J]. *J. Phys. D*, 1999, **32** (13): 1455~1461
- 2 Q. Zhan. Trapping metallic Rayleigh particles with radial polarization[J]. *Opt. Express*, 2004, **12**(15): 3377~3382
- 3 M. Galina, L. Yaakov, M. Inon *et al.*. Birefringence-induced bifocusing for selection of radially or azimuthally polarized laser modes[J]. *Appl. Opt.*, 2007, **46**(16): 3304~3310
- 4 S. C. Tidwell, D. H. Ford, W. D. Kimura. Generating radially polarized beams interferometrically [J]. *Appl. Opt.*, 1990, **29**(15): 2234~2239
- 5 Lin Huichuan, Liu Hui, Pu Jixiong. Extra cavity coherent superposition for generation of radially polarized beam [J].

- Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(S1): 251~256  
林惠川, 刘 辉, 蒲继雄. 腔外相干叠加产生径向偏振光[J]. 中国激光, 2009, **36**(S1): 251~256
- 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 Zhong Lanxiang, Cao Yanjun, Li Jianlang. Radial-polarization excitation from ytterbium doped double-clad fiber laser[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2009, **38**(8): 2179~2183  
种兰祥, 曹延军, 李建郎. 掺镱双包层光纤激光器的径向偏振振荡[J]. 光子学报, 2009, **38**(8): 2179~2183
- 8 Zhong Lanxiang, Li Jianlang. Oscillating mode with radial polarization in an active Yb fiber based on a Brewster dual conical prism[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2008, **37**(3): 430~434  
种兰祥, 李建郎. 基于内腔布儒斯特双轴锥棱镜的掺镱光纤激光器的径向偏振模振荡[J]. 光子学报, 2008, **37**(3): 430~434
- 9 A. V. Nesterov, V. G. Niziev, V. P. Yakunin. Generation of high-power radially polarized beam[J]. *J. Phys. D*, 1999, **32**(22): 2871~2875
- 10 T. Moser, M. A. Ahmed, F. Pigeon *et al.*. Generation of radially polarized beams in Nd:YAG lasers with polarization selective mirrors[J]. *Laser Phys. Lett.*, 2004, **1**(5): 234~236
- 11 K. Hikaru, K. Yuichi, S. Shunichi *et al.*. Simultaneous generation of helical beams with linear and radial polarization by use of a segmented half-wave plate[J]. *Opt. Lett.*, 2008, **33**(4): 399~401
- 12 Zhang Yanli, Li Xiaoyan, Zhu Jianqiang. Generation and focusing property with high-numerical aperture lens of vectorial polarized beam[J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(1): 129~133  
张艳丽, 李小燕, 朱健强. 矢量偏振光束的产生及其高数值孔径聚焦性质[J]. 中国激光, 2009, **36**(1): 129~133
- 13 M. Godai, M. Noriaki, T. Koji *et al.*. Intense longitudinal electric fields generated from transverse electromagnetic waves [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2004, **84**(19): 3855~3857
- 14 M. L. Gilad, L. Uriel. Generation of a radially polarized light beam using space-variant subwavelength gratings at 1064 nm[J]. *Opt. Lett.*, 2008, **33**(23): 2782~2784
- 15 M. Inon, J. Steven, M. Avi. 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
- 16 Lü Baida. *Laser Optics*[M]. Beijing: Higher Education Press, 2003. 268~273  
吕百达. 激光光学[M]. 北京: 高等教育出版社, 2003. 268~273
- 17 S. R. Michelle, W. W. Eduard, G. Hansjuerg *et al.*. Generation of radially polarized beam in Nd:YAG laser with self-adaptive overcompensation of the thermal lens[J]. *Opt. Lett.*, 2005, **30**(13): 1665~1667