

文章编号: 0258-7025(2006)09-1214-06

对卡塞格林式多程放大器中环形光束传输的数值模拟

李 玮¹, 冯国英¹, 陈建国¹, 黄 渊², 李小东¹, 丁世鹏¹, 应 婷¹, 苏 娟¹

(¹ 四川大学电子信息学院, 四川 成都 610064; ² 核工业西南物理研究院, 四川 成都 610041)

摘要 利用光线追迹法以及分步傅里叶-贝塞耳变换法, 考虑了光阑对光束的拦截和通光作用以及激光放大过程中的增益饱和效应, 对环形腔调 Q 钕玻璃激光系统振荡器输出的光束经卡塞格林式放大器多程放大后的光场演化过程进行了数值模拟, 并进行了实验验证。分析得出现有系统中输入输出镜的阶跃反射率分布是导致输出环形光束质量不好的主要原因, 并重点对放大器的腔镜部分进行了优化设计, 提出了反超高斯反射率分布的输入镜与超高斯反射率分布的输出镜相组合的腔镜对结构。数值模拟结果表明, 该腔镜对的使用可大大改善输出环形光束的质量。

关键词 激光光学; 光传输; 多程放大; 分步傅里叶-贝塞耳变换; 环形光束; 增益饱和; 渐变反射率镜

中图分类号 TN 242 **文献标识码** A

Numerical Simulation for Transformation of Annular Laser Beam in Cassegrain Multi-Pass Amplifier

LI Wei¹, FENG Guo-ying¹, CHEN Jian-guo¹, HUANG Yuan²,

LI Xiao-dong¹, DING Shi-peng¹, YING Ping¹, SU Juan¹

(¹ College of Electronics & Information Engineering, Sichuan University, Chengdu, Sichuan 610064, China)
² Southwestern Institute of Physics, Chengdu, Sichuan 610041, China)

Abstract Taking account of the transmission characteristics of the diaphragm and the saturation of the gain in the process of light amplifying, the evolution of the beam inside the Cassegrain multi-pass amplifier is numerically simulated by using the ray-tracing and split-step fast Fourier-Bessel transform (SSFFT) methods, the annular beam is coming from Q-switched Nd:glass laser with ring cavity. Preliminary experimental verification has been carried out. Analysis indicates that the staircase-like features of the input and output mirror reflections are responsible for the poor quality of the output annular beam, and special attention has been paid on optimizing amplifier configuration. As a result, a new type of amplifier configuration is proposed, whose input mirror has an anti-super Gaussian reflection distribution and output mirror has a super-Gaussian reflection distribution. The simulated results indicate that the use of the mirror couple can improve the quality of the output annular beam considerably.

Key words laser optics; beam propagation; multi-pass amplification; split-step fast Fourier-Bessel transform; annular beam; gain saturation; variable reflectivity mirror

1 引言

在 HL-2A 核聚变系统中, 采用了从俄罗斯

Troitisk 研究所进口的由一级环形腔振荡级和一级放大级(卡塞格林式多程放大级)所组成的调 Q 钕玻璃激光器^[1], 其工作波长为 1053 nm, 单脉冲能量

收稿日期: 2006-01-06; 收到修改稿日期: 2006-03-28

基金项目: 固体激光技术国家级重点实验室基金资助项目。

作者简介: 李 玮(1982—), 女, 四川省泸州市人, 四川大学电子信息学院硕士研究生, 主要从事固体激光技术研究。

E-mail: weilishirley639@163.com

导师简介: 冯国英(1969—), 女, 四川省成都市人, 四川大学教授, 主要从事固体激光技术的研究。E-mail: guoying_feng@yahoo.com.cn

为 20~40 J。用该激光器产生的散射激光来间接测量等离子体温度,从而对等离子体性能进行诊断和研究。从环形腔振荡级出射的实心光束在放大器中往返传输后最终演变为环形光束。研究表明,环形光束的产生是由激光系统中的卡塞格林式放大级结构引起的。因此根据实际放大级结构,考虑了光阑对光束的硬边拦截作用以及光放大过程中的增益饱和效应^[1,2],利用光线追迹法^[2]以及分步傅里叶-贝塞耳变换法^[3~5],对入射光束在现有放大级中的传输进行了重点研究,对基模实心高斯光束演化为环形光束的过程建立了数学模型,并结合模拟结果和实验数据分析了现有环形光束的特点尤其是其衍射特性。分析发现因放大级腔镜上的小孔和光阑对光束的硬边拦截作用,现有环形光束具有多环结构,衍射后远场分布极不均匀,且中心会出现明显的衍射斑,这将严重影响后续等离子体温度测量的精度。为改善输出环形光束的质量,提出改换放大级腔镜的方案并设计出了反超高斯反射率分布的输入镜与超高斯反射率分布的输出镜相组合的腔镜对结构以改善输出激光的质量;数值模拟结果表明该种腔镜对可大大改善输出环形光束的质量。

2 放大器构型及数值模拟方法

卡塞格林式放大器由凹凸腔、激光棒和抽运灯、水冷系统等构成,其装置如图 1 所示。从振荡器出射的基模高斯光束经由放大级凹面镜上的小孔射入,在谐振腔中往返传输奇数次后从凸面镜处出射。在传输过程中,光束经历了衍射、激光介质增益、腔的横向几何尺寸放大以及小孔、光阑等的拦截作用后演化为环形光束。在本文中,首先结合系统实际参数,利用经典的分步傅里叶变换^[6,7]和光线追迹法等,对基模高斯光束在激光器放大级中的增益和

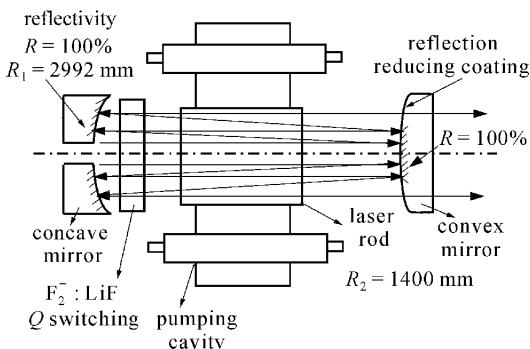


图 1 卡塞格林放大器构型

Fig. 1 Schematic of a Cassegrain multi-pass amplifier

衍射传输过程进行数值模拟^[8]。考虑到激光介质的圆柱状径向对称分布结构,在实际数值模拟时使用了分步傅里叶-贝塞耳变换。经计算和实验研究后发现:受放大器几何结构参数以及增益饱和效应等的影响,第 1,3,5,7 次输出光场逐渐增强,到第 7 次^[9]时输出光场最强,此后输出光场减弱。总的输出光场为各奇数次输出光场的非相干叠加。数值模拟得到凸面镜处各次输出光场的光强分布如图 2 所示。

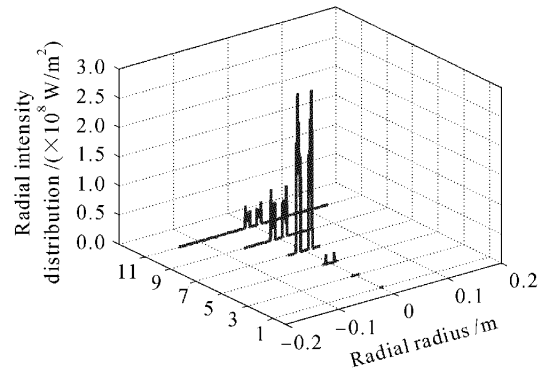


图 2 计算所得第 1,3,5,7,9,11 次出射光场的光强分布图

Fig. 2 Calculated radial intensity distribution of the output beams after being reflected by 1, 3, 5, 7, 9, 11 times inside the amplifier

3 数值模拟及其结果

3.1 数值模拟理论基础

进行数值模拟时,除采用了经典分步傅里叶-贝塞耳变换外,还着重考虑了介质中的增益饱和和效应。因增益饱和效应对在放大级中传输光束的光场分布变化有显著影响。起初,入射到放大器腔中的基模高斯光束光强较小,在增益介质中传输时,光束光强不断增大,随着光的放大,增益介质中上能级能量不断消耗,反转粒子数不断减小,从而导致与反转粒子数和受激发射截面成正比的增益系数相应减小。这种抑制机制保证了激光光强在放大到一定程度后趋于稳定,而不是无限放大。

3.2 数值模拟结果

3.2.1 输入输出镜反射率阶跃分布时的数值模拟结果

在输入输出镜均为硬边截断(阶跃)的情况下,光束在放大器中往返传输多次(11 次)后总的输出光场分别衍射 0.1 m, 5 m, 10 m 后的径向光场分布以及对应的光强分布如图 3 所示。选取的参数为:腔几何放大率 2.14, 取样点数为 2048, 输入镜处截

断半径为1.5 mm,输出镜处截断半径为6.85 mm,入射光束峰值光强为 $4 \times 10^7 \text{ W/m}^2$,初始小信号增益系数为5/m。为了校核数值模拟结果,还将该数值模拟结果与实验结果(相纸采集的光斑)(见图4)进行了比较。从这两组图均可看出:在放大级输出(凸面)镜处,出射光束为空心光束^[10,11]。当传输一定距离后,在中心处出现一亮斑,这是由环形光束^[12~14]的衍射特性决定的。在实验过程中,由于放大后的激光光斑外径约为30 mm,能量约为25 J,脉宽约为35 ns,且光束在传输过程中横向细节不断变

化,用常用的 CCD 很难获得它在不同位置的实际光场分布,因此用发黑相纸直接在不同距离处采集光斑。对比图 3(d)~(f)和图 4,可以发现实验结果与数值模拟结果吻合得较好,说明数值模拟的算法和计算过程基本符合相应的物理过程;但二者的光斑结构却略有不同,图 3(d)~(f)的环形光斑具有复杂的多环结构,环间出现了极亮的环带,而从图 4 中却无法观察到相应的精细结构,这是由于实验中产生的光斑功率过大,超过相纸所能感受到的功率密度,引起相纸“饱和”所造成的。

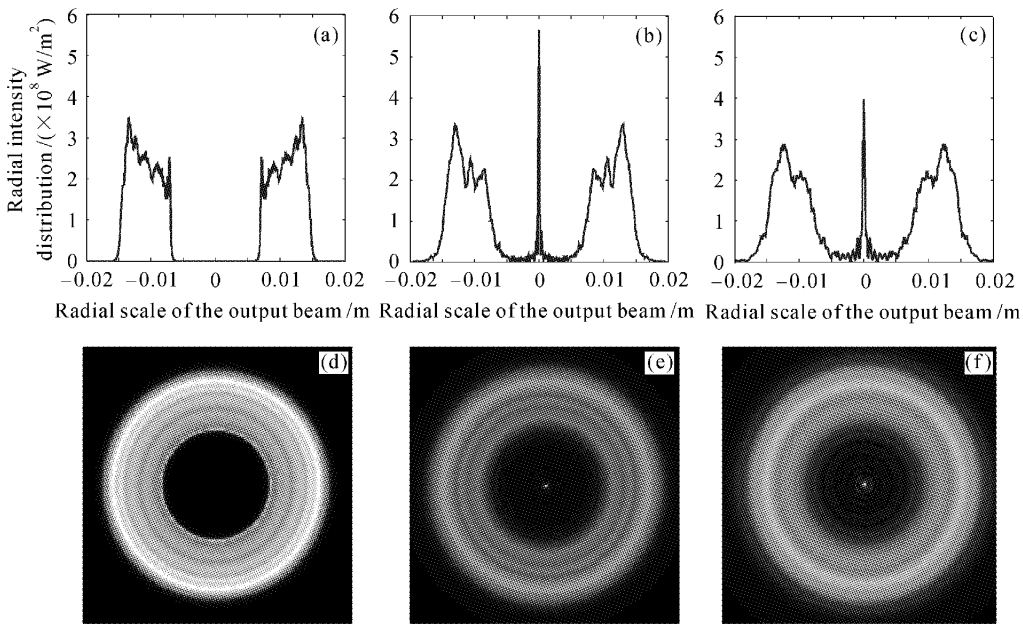


图3 腔镜反射率为阶跃分布时,计算得到的0.1 m((a),(d)),5 m((b),(e)),10 m((c),(f))处的径向光场分布与对应的光斑横向结构

Fig. 3 Calculated radial distributions and corresponding radial structures of the output beam from cavity defined by mirrors with step reflection functions, at the distance of 0.1 m ((a),(d)), 5 m ((b),(e)), 10 m ((c),(f)) from the output mirror

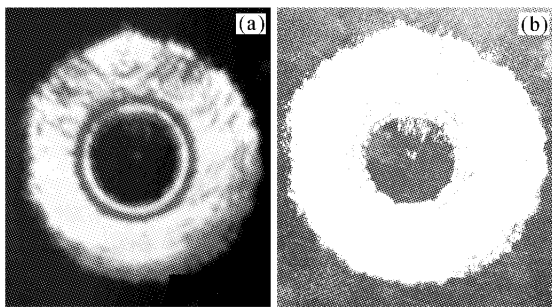


图4 实验测得的0.1 m(a)和5 m(b)处的光斑横向结构
Fig. 4 Experimental radial structures of the output beam measured at the distance of 0.1 m (a) and 5 m (b) from the output mirror

数值模拟结果和实验结果显示腔镜反射率阶跃分布时的输出光束质量不好:输出光场在自由空间衍射一定距离后,光斑有复杂的多环分布;且随衍射距离的变化,亮环的位置和大小均发生变化;远场衍射后光场中心产生很明显的衍射环。以上现象主要是由激光系统现有输入输出镜对光束的硬边截断作用(衍射效应)引起的。在实际应用中,这些因素尤其是中心衍射斑都将影响等离子体温度测量的精度和效率。因此要改善输出光束质量,一般不能直接使用硬边截断腔镜。

3.2.2 输入输出镜反射率反超高斯分布和超高斯分布相组合时的数值模拟结果

理论证明,用变反射率镜^[15~18]代替硬边截断的

阶跃输出镜可以使激光以较为平滑的空间分布输出,也可以减小环状输出光束中心衍射环的影响。因此,为了改善该系统输出光束的质量,根据 Silvestri 的理论,设计了一种超高斯变反(透)射率腔镜组来代替硬边截断的输入输出镜组。

所采用的超高斯变反射率镜的反射率分布为

$$R_r = R_{\max} \exp[-2(r/w_m)^m],$$

反超高斯变反射率镜的反射率分布为

$$R_r = R_{\max} \{1 - \exp[-2(r/w_m)^m]\},$$

式中 R_{\max} 为最大反射率(取值范围为 $0 \sim 1$), r 为镜面上的点与镜面中心的径向距离, w_m 为镜面的光斑尺寸或反射率降为峰值 $1/e^2$ 时的径向距离, m 为超高斯阶数。

经过筛选,选取了以下结构参数:输入镜(凹面镜)反射率分布为 6 阶反超高斯分布,镜面半径为 1.15 mm,中心峰值透射率为 1;输出镜(凸面镜)反射率分布为 10 阶超高斯分布,中心峰值反射率为 1,镜面的光斑半径为 5.75 mm;其他参数同腔镜硬截断时的参数。计算所得往返传输 11 次后总的输出光场分别衍射 0.1 m, 5 m, 10 m 后的光场分布以及对应的光强分布如图 5 所示。从该图可以看出,输出光的空间分布较图 3, 图 4 中的空间分布更均匀,且传输较远距离后光场都无太大的变化,说明对非稳腔采用参数设计合理的超高斯反(透)射率分布镜组,可以大大改善输出激光的光束质量。

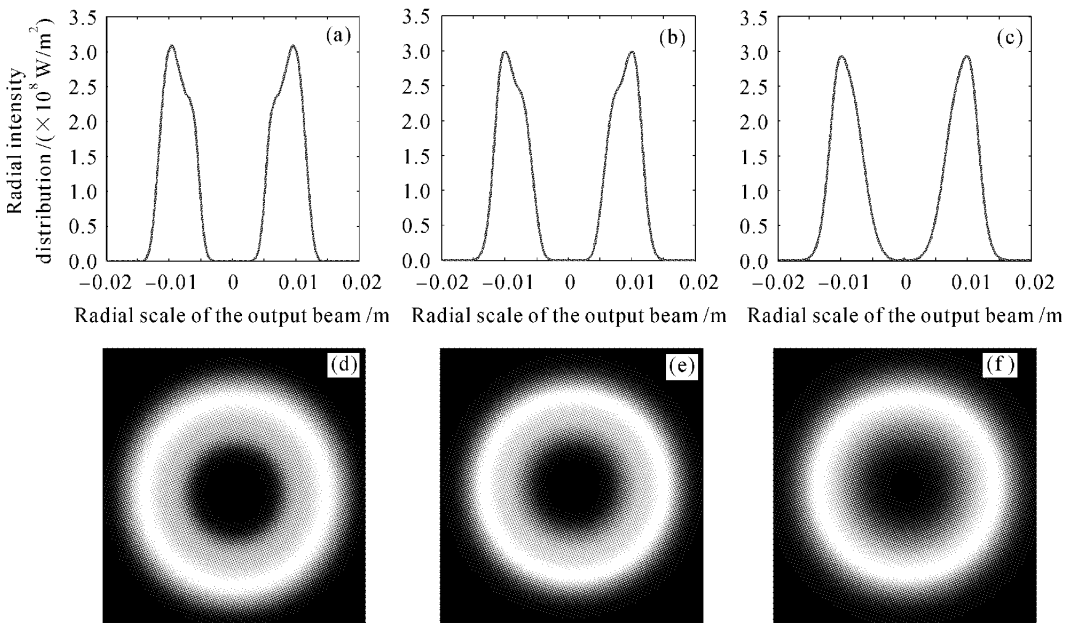


图 5 腔镜反射率为反超高斯与超高斯分布相结合时,计算得到的 0.1 m ((a),(d)), 5 m ((b),(e)), 10 m ((c),(f)) 处的径向光场分布与对应的光斑横向结构

Fig. 5 Calculated radial distributions and corresponding radial structures of the output beam from cavity defined by mirrors with anti-super Gaussian and super-Gaussian reflection functions, at the distance of 0.1 m ((a),(d)), 5 m ((b),(e)), 10 m ((c),(f)) from the output mirror

3.2.3 腔镜反射率分别为硬截断和渐变分布时的对比研究

腔镜反射率分布分别为硬截断和渐变分布时输出光场的峰值光强、峰值光强对应的径向位置、中心光强随衍射距离的变化如图 6 所示。由图可以看出,当腔镜为硬截断(阶跃)镜时,随衍射距离的变化,中心光强、峰值光强及其对应的径向位置有很强而复杂的抖动,这是由于从凸面镜处输出光束自身质量不好造成的;结合图 3 可以得出,该光场分布极

不均匀,在腔镜硬截断位置有明显的跃变,相应的频谱里引入了大量的衍射成分;经历菲涅耳衍射后,光斑呈现不均匀多环的复杂分布,且衍射环亮暗交替变化;衍射一定距离后,光场中心出现一衍射亮斑。当腔镜对为反超高斯镜和超高斯镜相结合时,峰值光强及其对应的径向位置几乎不随衍射距离变化,中心光强也近似为 0,镜面处输出光束质量较好。对应图 5 进行分析可以发现,此时输出光场分布平滑均匀,即使传输较远的距离,光场都比较稳定,光

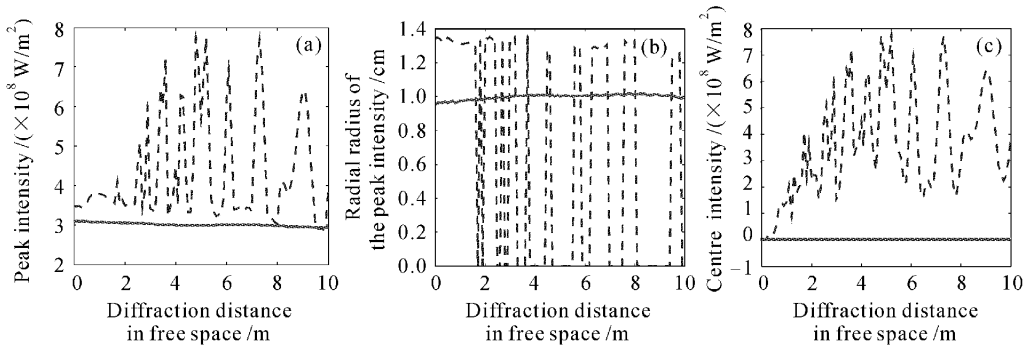


图 6

(a) 输出光场的峰值光强;(b) 输出光场峰值光强对应的径向位置;(c) 输出光场中心光强随衍射距离的变化
虚线表示腔镜为硬截断(阶跃)时的情况,实线表示腔镜组为渐变反射率镜组的情况

Fig. 6

(a) intensity of the maximum spike of the output beam; (b) radial distance of the maximum spike from the beam centre; (c) central intensity of the output beam varies with the diffraction distance. Dashed curve (rinning structure) is for the staircase-like mirrors and solid curve (smooth structure) is for the variable reflectivity mirrors

场分布中既无复杂的环带结构,也无衍射亮斑,这正是进行后续等离子体温度测量实验所期望的。因此,用变反射率镜对替代原有系统的硬截断镜来改善输出激光的质量在理论上是可行的,也很有现实意义。目前,我们正在进行采用渐变反射率镜后的激光系统的测试及对比实验工作。

4 结 论

针对现有的环形腔调 Q 钕玻璃激光系统,对其振荡级输出的光束在卡塞格林式多程放大器中的传输进行了数值模拟和实验研究。从数值模拟结果和已有的实验结果可以分析得出:

1) 在现有卡塞格林式多程放大系统的结构参数下,对输出光场作出主要贡献的是第 7 次放大后输出的光束;

2) 现有设备的输出光束质量很差,严重影响后续等离子体温度测量实验的进行。为此采用渐变反射率镜腔来削弱腔镜硬边截断对光束衍射的严重影响;

3) 选用腔镜对为反超高斯镜与超高斯镜相结合的结构可以改善硬边截断输出镜对输出光束衍射的不利影响,输出光场的空间分布较为平滑,即使在自由空间衍射相当长的距离,输出光束峰值光强及其对应的径向位置几乎不变,中心光强近似为 0,光场中心不会出现明显的衍射斑,可用于后续的等离子体温度测量,具有现实意义。

参 考 文 献

- 1 W. Koechner. Solid-State Laser Engineering [M]. Fifth Edition. Translated by Sun Wen, Jiang Zewen, Cheng Guoxiang *et al.*. Beijing: Science Press, 2002. 45~49, 132~138
W. 克希耐尔. 固体激光工程[M]. 第五版. 孙文,江泽文,程国祥等译. 北京:科学出版社, 2002. 45~49, 132~138
- 2 Chen Yuqing, Wang Jinghuan. Principles of Laser [M]. First Edition. Hangzhou: Zhejiang University Press, 2003. 154~159, 288~295
陈钰清,王静环. 激光原理[M]. 第一版. 杭州:浙江大学出版社, 2003. 154~159, 288~295
- 3 J. D. Gaskill. Linear Systems, Fourier Transforms, and Optics [M]. Translated by Feng Kaiyin. Beijing: People's Education Press, 1981. 320~322
杰克 D. 加斯基尔 著. 线性系统·傅里叶变换·光学[M]. 封开印译. 北京:人民教育出版社, 1981. 320~322
- 4 A. E. Siegman. Quasi fast Hankel transform [J]. *Opt. Lett.*, 1977, 1(1):13~15
- 5 Vittorio Magni, Giulio Cerullo, Sandro De Silvestri. High-accuracy fast Hakek transform for optical beam propagation [J]. *J. Opt. Soc. Am. A*, 1992, 9(11):2031~2033
- 6 Govind P. Agrawal. Nonlinear Fiber Optics [M]. Translated by Jia Dongfang, Yu Zhenhong *et al.*. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2002. 34~35
Govind P. Agrawal. 非线性光纤光学原理及其应用[M]. 贾东方,余震虹等译. 北京:电子工业出版社, 2002. 34~35
- 7 Lin Xiaodong. Study on small-scale self-focusing effects in ICF drivers [D]. Master Degree Thesis of Sichuan University, 2002. 24~25
林晓东. ICF 固体驱动器中的小尺度自聚焦效应研究[D]. 四川大学硕士学位论文, 2002. 24~25
- 8 Feng Guoying, Lü Baida, Zheng Wanguo. Computational simulation of the single segment Nd: glass laser amplifier [J]. *Chinese J. Lasers*, 1999, A26(8):673~677
冯国英,吕百达,郑万国. 单段钕玻璃激光放大器的计算模拟[J]. 中国激光, 1999, A26(8):673~677
- 9 Li Wei, Liang Feng, Gao Yaohui *et al.*. Evolvement of annular laser beam in Cassegrain multi-pass amplifier [C]. *Analects of Opto-Electronics Technology and System*. Beijing: Publishing

- House of Electronics Industry, 2005. 116~120
- 李 玮, 梁 峰, 高耀辉 等. 卡塞格林式多程放大器中环形光束的演化[C]. 光电技术与系统文选. 北京: 电子工业出版社, 2005. 116~120
- 10 Yin Jianping, Liu Nanchun, Xia Yong *et al.*. Generation of hollow laser beams and their applications in modern optics [J]. *Progress in Physics*, 2004, **24**(3):336~380
- 印建平, 刘南春, 夏 勇 等. 空心光束的产生及其在现代光学中的应用[J]. *物理学进展*, 2004, **24**(3):336~380
- 11 Zhang Lei, Cai Yangjian, Lu Xuanhui. Theoretical and experimental study of new dark hollow beams [J]. *Acta Physica Sinica*, 2004, **53**(6):1777~1781
- 张 蕾, 蔡阳健, 陆璇辉. 一种新空心光束的理论及实验研究[J]. *物理学报*, 2004, **53**(6):1777~1781
- 12 Gadi Fibich, Boaz Ilan. Self-focusing of circularly polarized beams [J]. *Phys. Rev. E*, 2003, **67**:036622-1~036622-16
- 13 William W. Simmons, John T. Hunt, William E. Warren. Light propagation through large laser systems [J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 1981, **QE-17**(9):1727~1744
- 14 Lu Guangshan, Hu Wei, Fu Xiquan *et al.*. Study of focused annular beam [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2003, **32**(2):209~213
- 卢光山, 胡 巍, 傅喜泉 等. 环形光束的聚焦性质研究[J]. *光子学报*, 2003, **32**(2):209~213
- 15 Zhang Fang, Zhang Pinglei, Zhou Shouhuan. Cassegrain unstable resonator with variable reflectivity mirror (VRM) output coupler [J]. *Acta Optica Sinica*, 1996, **16**(10):1400~1405
- 张 放, 张平雷, 周寿桓. 由变反镜耦合输出的卡塞格林非稳腔激光技术研究[J]. *光学学报*, 1996, **16**(10):1400~1405
- 16 Chang Bing, Cai Xijie, Li Qingguo. Characterization of unstable resonator using variable reflectivity mirror [J]. *Acta Optica Sinica*, 1995, **15**(8):977~982
- 常 兵, 蔡希洁, 李庆国. 变反射率镜非稳腔优化研究——超高斯途径[J]. *光学学报*, 1995, **15**(8):977~982
- 17 Sandro De Silvestri, Paolo Laporta, Vittorio Magni *et al.*. Solid-state laser unstable resonators with tapered reflectivity mirrors: the super-Gaussian approach [J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 1988, **QE-24**(6):1172~1177
- 18 Sandro De Silvestri, Vittorio Magni, Orazio Svelto *et al.*. Lasers with super-Gaussian mirrors [J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 1990, **26**(9):1500~1509