

文章编号: 1001-3806(2010)02-0145-04

热不灵敏激光谐振腔补偿特性研究

袁晓东^{1,2}, 蒋新颖², 郑建刚², 胡东霞², 段文涛², 蒋东宾², 金国藩¹

(1. 清华大学 精密测试技术与仪器国家重点实验室, 北京 100084; 2. 中国工程物理研究院 激光聚变研究中心, 绵阳 621900)

摘要: 为了实现热容激光器远场可聚焦性的实时控制, 采用角锥棱镜阵列作为准相位共轭反射镜对光束波前进行被动式实时补偿。详细研究了阵列角锥棱镜谐振腔的光学特性, 通过优化谐振腔的构型, 进行腔内滤波, 抑制角锥之间的共轭模式, 获得了在保持90%输出能力条件下的单模输出, 中心主斑能量集中度提高了约4.5倍, 远场可聚焦性与传统的平-凹腔比提高约10倍。结果表明, 角锥棱镜阵列谐振腔具有热不灵敏的特性, 可显著提高热容激光器的远场聚焦能力。

关键词: 激光技术; 单模; 热不灵敏谐振腔; 可聚焦性

中图分类号: TN248.1 **文献标识码:** A **doi:** 10.3969/j.issn.1001-3806.2010.02.001

Research on compensation characteristics of thermal insensitive cavity

YUAN Xiao-dong^{1,2}, JIANG Xin-ying², ZHENG Jian-gang², HU Dong-xia²,
DUAN Wen-tao², JIANG Dong-bin², JIN Guo-fan¹

(1. State Key Laboratory of Precision Measurement Technology and Instrument, Tsinghua University, Beijing 100084, China; 2. Research Center of Laser Fusion, China Academy of Engineering Physics, Mianyang 621900, China)

Abstract: The output beam profile from a heat capacity laser is instantaneously changing because of the temperature continually rising during laser shots. In order to improve the focusing capability of heat capacity laser and realize real time controlling of the far field spot, a cube corner array (CCA) is used as a quasi-phase conjugate mirror to realize a passive and real time compensation of the wave front error. The compensation capability of a thermal insensitive cavity with a cube corner array was studied in detail. The structure of the cube corner array resonator was optimized by using an intra-cavity filter to reject the conjugation mode between different cube corners. The energy concentration of the single mode with an intra-cavity filter was improved to 90%, approximately 4.5 times of the multi-modes without the intra-cavity filter. The focusing ability of such a CCA resonator was improved about 10 times of a traditional planar-concave resonator. The simulation and experiment results show that the cube corner array cavity is thermal insensitive, which can increase the focusing ability of a heat capacity laser.

Key words: laser technique; single mode; thermal insensitive cavity; focusing capability

引言

热效应是高重复率运转的固体激光面临的难题之一。无论是连续运转的高平均功率固体激光器, 还是热容激光器, 要高功率稳定运行, 都必须解决热效应对光束质量的影响^[1-2]。对连续运转的高平均功率固体激光而言, 主要是通过一种特定的方式来补偿热效应。经过近20年的发展, 连续运转的高平均功率固体激光的热补偿技术已趋于成熟, 形成了众多的热效应补偿方法^[3]。MAGNI等人^[4]证明了凹-凸谐振腔对热透镜

效应的补偿作用, 也有人^[5]提出了望远镜谐振腔来补偿热效应。此外, 利用折叠镜谐振腔可补偿像散, 利用正交 Porro 棱镜可补偿热致双折射效应引起的退偏等^[3]。但这些补偿都是针对一种特定的构型和稳态热效应实现的, 即在激光发射期间, 流入和流出激光介质的热量是平衡的。当抽运条件、冷却条件或介质工作条件方式变化时, 这种补偿不仅达不到预期的目的, 而且可能产生负作用。采用自适应补偿^[6]可以较好地抑制动态热效应, 但由于系统复杂、响应慢, 只能补偿一定变化量的热效应, 无法实现实时补偿。

热容激光器提出了一种新的工作模式, 它将固体激光的发射和冷却过程分离, 在冷却时不发射, 发射时不冷却。激光发射时, 工作介质处于“绝热”状态, 这样可避免发射过程中由于冷却造成的热效应。而冷却时, 由于没有激光发射, 可大大简化冷却方式, 提高冷却效率。但由于热容激光器工作在高温条件下, 受抽

基金项目: 中国工程物理研究院基金重大资助项目 (Z0405)

作者简介: 袁晓东 (1966-), 男, 研究员, 主要从事高功率固体激光技术的研究。

E-mail: yxd66my@163.com

收稿日期: 2009-03-31; 收到修改稿日期: 2009-05-04

运非均匀性、高温下介质的辐射换热和介质内部的热传导等因素的共同作用,热容激光器也会在一定程度上受热效应影响^[7],尤其是在激光发射的初期和末期,这种影响相对较大。而且这些过程往往是毫秒到几十毫秒尺度,很难采用自适应补偿来实时消除热效应的影响。需采用相位共轭反射镜实现激光器热效应的动态补偿,从而提高激光器的平均输出功率,改善输出光束质量。

溯源反射镜作为一种被动照明器件在交通标牌上广泛应用。早在1979年,美国的BARRETT等人^[8]报道了溯源反射镜阵列补偿波前畸变,改善成像质量的研究结果。利用溯源反射镜阵列的准相位共轭特性,可实现波面畸变的动态补偿,克服热效应带来的波面畸变,实现热不灵敏激光谐振腔。本文中对角锥阵列谐振腔的补偿作用进行了理论模拟和实验研究。

1 阵列溯源反射镜准位相共轭的理论模型

角锥阵列溯源反射镜的原理如图1所示,图中虚线表示平面镜形成的波面,而相位共轭镜形成的波面则是与入射面相同,方向相反。理想的阵列角锥棱镜反射镜是相干阵列,由在平面 $z=0$ 处一系列理想的角锥阵列规则排列而成。第 n 个角锥反射镜的中心在 $r=r_n$ 面上,其有效面积由二元口径函数 $a(r-r_n)$ 给出。

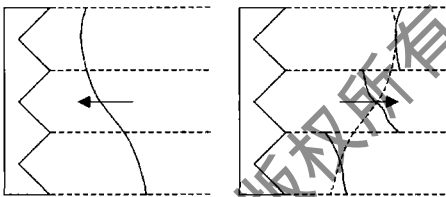


Fig. 1 Approximate phase conjugation with cube corner array

入射到阵列的波的标量形式为:

$$u_{in}(r,t) = \text{Re}[\psi_{in}(r)\exp(-i\omega t)] \quad (1)$$

式中, $\psi_{in}(r)$ 为空间变量,假设入射光波的强度分布均匀,则 $\psi_{in}(r)$ 只与位相 $\phi(r)$ 有关,是纯位相项,可写为:

$$\psi_{in}(r) = \sum_n \exp[i\phi(r)]a(r-r_n) \quad (2)$$

假设口径函数充满 $z=0$ 平面,使 $\sum a(r-r_n) = 1$ 。再假设 $\psi_{in}(r)$ 是足够慢变化的,可以在每一个单元内近似为平面波。然后可对 $\phi(r)$ 对每个 r_n 的定点进行泰勒展开:

$$\psi_{in}(r) = \sum_n \exp\{i[\phi(r_n) + (r-r_n) \cdot \nabla\phi(r_n)]\}a(r-r_n) \quad (3)$$

如果入射角度不是太大,从第 n 个角反射器输出的光波会沿入射方向返回。从入射面到反射面再到入射面

会产生相移,相移 δ_n 对非相干阵列是随机变化的。通常情况下, δ_n 还与入射角有关,但这通常是少量可以忽略。基于这些考虑,从这些阵列的输出波为:

$$\psi_{out}(r) = \sum_n \exp\{i[\phi(r_n) - (r-r_n) \cdot \nabla\phi(r_n) + \delta_n]\}a(r-r_n) \quad (4)$$

将(4)式重新写为下列形式会更清楚:

$$\psi_{out}(r) = \sum_n \exp\{i[2\phi(r_n) - \phi(r_n) - (r-r_n) \cdot \nabla\phi(r_n) + \delta_n]\}a(r-r_n) = \psi_{in}^*(r) \sum_n \exp\{i[2\phi(r_n) + \delta_n]\}a(r-r_n) \quad (5)$$

图1中给出了对公式的解释,角反射阵列至少对(5)式对应的慢变波,可视为分段的共轭器,具有准位相共轭的作用。

2 阵列溯源反射镜谐振腔补偿作用的理论模拟

2.1 “瞬态”有源谐振腔模型

稳态激光谐振腔的理论模型和模拟计算方法均已十分成熟,但对“瞬态”有源谐振腔,还没有成熟的模型。由于固体热容激光器具有工作周期内介质的温度不断升高,热效应也在不断变化的特点。因此,热容激光器的输出光束质量是随时间变化的,表现出“瞬态”特征。

应用柯林斯公式^[9],建立了无源谐振腔模型。在有源条件下,对激光介质做薄片近似,即将激光介质的增益特性集总到参考平面上,每一次往返,电场乘以一个带有空间信息的增益,对于传输矩阵为 $\begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix}$ 的谐振腔,有:

$$E_2(x_2, y_2) = \left(-\frac{i}{\lambda B}\right) \exp(ikL) \iint_S E_1(x_1, y_1) \times G(x_1, y_1) \times \exp\left\{\frac{ik}{2B}[A(x_1^2 + y_1^2) + D(x_2^2 + y_2^2) - 2(x_1x_2 + y_1y_2)]\right\} dx_1 dy_1 \quad (6)$$

其中,

$$G(x_1, y_1) = \exp[(2g_0l - \delta)t(x_1, y_1)/(1 + 2E_1E_1^*/I_s)] \exp(-i\varphi) \quad (7)$$

式中, S 表示光束的有效截面, L 为激光器谐振腔的光学长度, g_0 为小信号增益系数, I_s 为饱和光强, l 为激光介质的增益长度, δ 为激光介质的损耗, φ 为由热效应引起的相位滞后, $t(x_1, y_1)$ 是根据抽运均匀性得出的小信号增益系数的调制函数,下标1和2分别表示出射面与观察面。

2.2 介质热畸变及补偿效果模拟

根据上述“瞬态”有源谐振腔模型,最主要的是获得不同时刻介质热畸变造成的波面畸变,代入有源谐振腔模型进行计算。通过模拟灯抽运热容激光器中 Nd:YAG 介质在不同时刻的温度场和应力场,获得了相应的波面畸变参量^[10]。图 2a 中给出了介质在工作 5s 后热效应导致的波面畸变,由于两端温度较高,热畸变较为严重。图 2b 为经过角锥棱镜补偿后的波面,其中单角锥的口径 6mm。

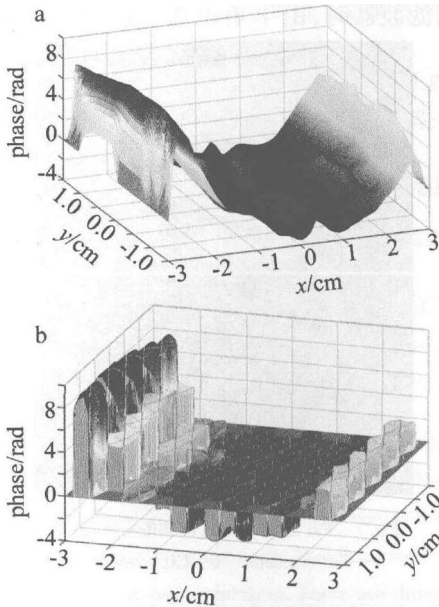


Fig. 2 Simulated wave front of Nd:YAG after ignition 5s before and after compensation by a cube corner arrays with the aperture of 6mm
a—wavefront from Nd:YAG after lasing 5s b—compensated wavefront with cube corner arrays

2.3 输出光斑特性模拟

将介质在工作 5s 后输出波面和经过角锥棱镜补偿后的波面代入有源谐振腔模型,获得了对应这两种谐振腔输出光斑的远场分布,如图 3 和图 4 所示。

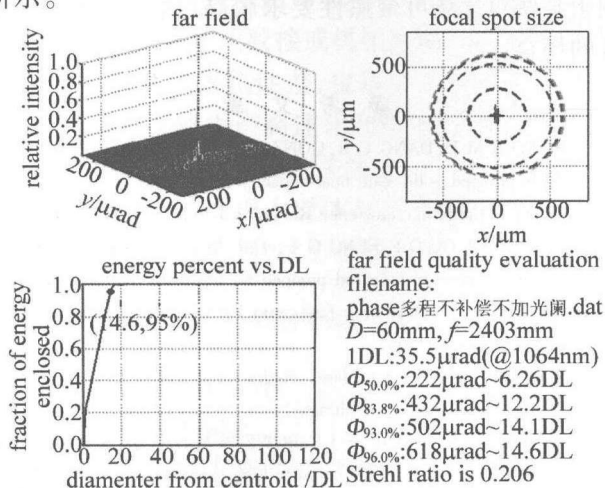


Fig. 3 Far field distribution of output laser with a F-P cavity

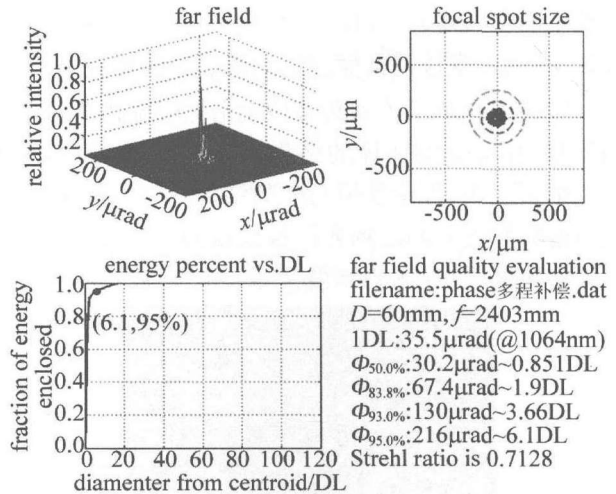


Fig. 4 Far field distribution of output laser with a cube corner array cavity

由图 3 可知,由于介质的波面只在长度方向变化较大,焦斑具有像散特点,模拟计算的平-平腔输出光斑的远场约 12 倍衍射极限 (diffraction limit, DL)。经过角锥棱镜阵列补偿后,局部波面近似为平面,但整体波面破碎。此外,对局部的小尺度波面起伏,如介质左侧变化最剧烈的部分没有补偿作用。这种“准”位相共轭的补偿作用是有限的。图 4 结果表明,阵列角锥棱镜谐振腔的光斑远场约 2 倍衍射极限,补偿效果明显。

3 实验研究

3.1 实验光路排布

实验是在“V”型有源反射镜热容激光器^[11]上开展的,光路如图 5 所示。实验中分别采用平-凹谐振

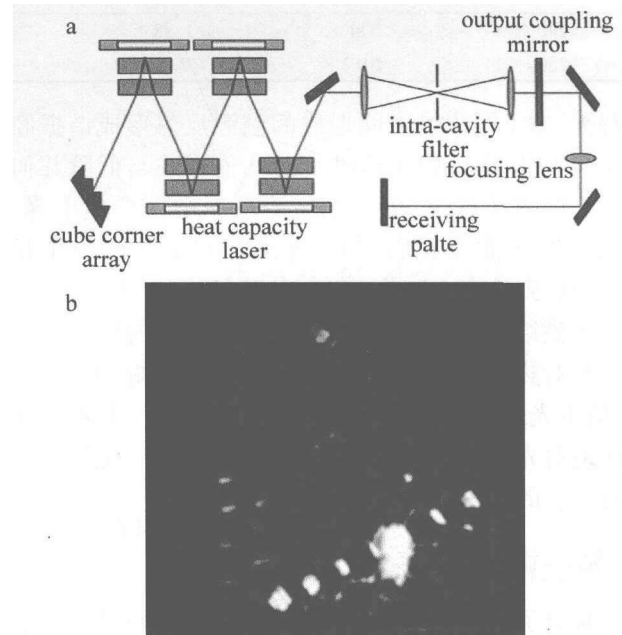


Fig. 5 Schematic of the cube corner array cavity with single mode output
a—experiment cavity with cube corner array and intra-cavity filter b—cube corner array

腔和阵列角锥棱镜谐振腔进行实验。为了抑制角锥棱镜腔中的多模运转,在腔内增加了空间滤波器。

3.2 阵列角锥棱镜谐振腔近场输出特性研究

实验中测试了阵列角锥棱镜谐振腔输出光斑的近场分布,并与模拟计算的结果进行了对比,如图6所示。结果表明,理论模拟与实验结果基本一致,该角锥棱镜谐振腔输出的近场光斑被棱镜的边和拼接缝分割成许多小区域,近场调制很大。

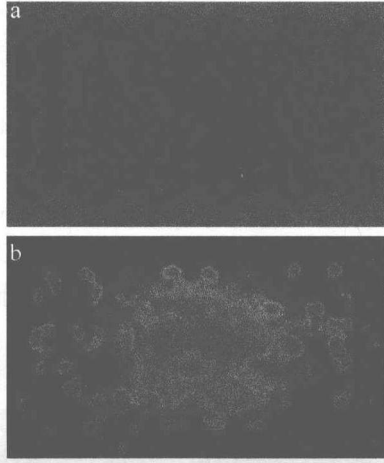


Fig. 6 Near field output of the cube corner array cavity
a—simulation result b—experimental result

3.3 阵列角锥棱镜谐振腔远场输出特性研究

对普通的平-凹稳定腔和角锥阵列热不灵敏腔的

输出光束质量进行了测量,图7中给出了典型的测量结果。图7a为平-凹稳定腔结果,后腔镜为曲率半径5m的凹面镜,远场光斑约12mm×10mm,水平方向96DL、竖直方向80DL,图7b为角锥阵列反射器腔,前腔镜为平面镜,远场光斑约 \varnothing 1.5mm,10DL。结果表明,阵列角锥棱镜构成的谐振腔对大面的波面不均匀性有较好的补偿作用,光束的可聚焦性提高约1个量级。

实验研究了有无腔内空间滤波器情况下的远场光斑能量集中度,结果如表1所示。结果表明,当谐振腔内无空间滤波器时,由于角锥棱镜阵列优良的溯源反

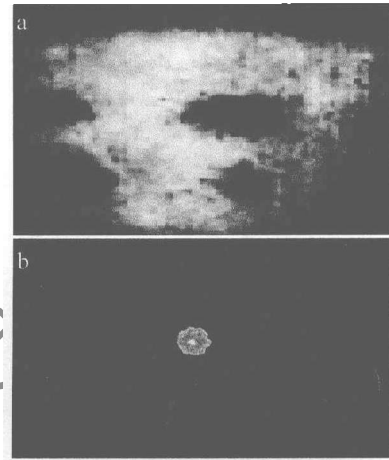


Fig. 7 Far field output of different cavity
a—F-P resonator b—CCA resonator

Table 1 The output energy concentration of cube corner cavity in multimode and single mode cavity structure

voltage/V	without intra-cavity filter			with intra-cavity filter		
	total energy/J	energy of central spot/J	energy concentration/%	total energy/J	energy of central spot/J	energy concentration/%
240	7.1	1.38	19.4	7.1	6.3	88.7
280	10.7	2.1	19.6	10.7	9.6	89.7

射特性,在不同角锥之间形成的溯源反射形成谐振腔的几何本征模式,由于这种高阶几何模式与低阶几何模式形成模式竞争,中心光斑能量集中度严重下降。而加入腔内滤波器后,中心光斑能量集中度由不足20%提高到约90%,能量集中度提高了4.5倍。

实验结果表明,采用溯源反射镜形成的热不灵敏谐振腔对热容激光器的输出光束质量有很好地改善作用,输出光斑的可聚焦性提高约一个量级。但阵列角锥棱镜对光束近场分布和波面的破碎也在一定程度上限制了它的应用。

4 结论

研究了可用于动态补偿热畸变的阵列角锥棱镜谐振腔,分析了影响这种阵列角锥棱镜谐振腔输出光斑模式的主要因素,实验研究了这种热不灵敏谐振腔的输出特性。结果表明,合理地选择热不灵敏谐振腔的

参量,严格控制加工质量,并采用腔内滤波的方法抑制高阶模,可以较好地补偿热容激光器的输出光束质量,用于某些对远场可聚焦性要求较高,而对近场要求较低场合。

参考文献

- [1] ROTTER M D, DANG C B, GONZALES S, *et al.* Recent progress in diode-pumped, solid-state heat-capacity lasers [R]. California; University of California, Lawrence Radiation Laboratory, 2003:1-7.
- [2] ZHANG S J, QU Q F, FENG G Y, *et al.* Analysis of transient temperature distribution in laser rod pumped by repetitively pulsed high-power ring-LDA [J]. High Power Laser and Particle Beams, 2004, 16(2): 145-148 (in Chinese).
- [3] WALTER K. Solid-state laser engineering [M]. Beijing: Science Press, 2002:193-207 (in Chinese).
- [4] TIDWELL S C, SEAMENS J F, BOWERS M S, *et al.* Scaling CW diode-end-pumped Nd:YAG lasers to high average powers [J]. IEEE J Q E, 1992, 28(9): 997-1009.

(下转第160页)

置中所得到的示波器采集的信号,图5为8路时间脉冲波形测试结果,表2为8路激光输出的能量和脉冲宽度测试结果。

Table 2 The energy and pulse broadening of 8 laser beams

No. of beam	1	2	3	4	5	6	7	8
energy/J	2766	2839	2323	2551	2370	2432	2223	2701
pulse width/ns	1.09	1.07	1.11	1.14	1.09	1.07	1.07	1.08

实验结果表明,利用多路时间脉冲波形测试系统可实现多路激光束脉宽的同步测试,得到的激光束脉宽符合系统测试精度要求。

3 结论

采用所设计的多路时间脉冲波形测试系统,对于多路激光的时间脉冲波形测试是可行的,它避免了由于长距离传输采用宽频带电缆带宽急剧降低的难题,可以得到准确可靠的脉冲波形测试结果,并且大大降低了激光装置的造价成本。多路光纤取样技术已成功应用于神光-III原型装置的预放和主放级诊断包中的激光脉冲波形测量中,通过对2008年度的测量数据分析,该测量系统的测量扩展不确定度小于2.5%,满足原型装置的设计指标及ICF物理实验的要求。该测量系统运行可靠,为神光-III主机装置的时间波形测量奠定了技术基础。

(上接第148页)

- [5] LU Q, KUGLER N, WEBER H, *et al.* A novel approach for compensation of birefringence in cylindrical Nd:YAG rods [J]. *Opt & Quant Electron*, 1996, 28(1):57-69.
- [6] SACKS R, AUERBACH J, BLISS E, *et al.* Application of adaptive optics for controlling the NIF laser performance and spot size [J]. *Proc SPIE*, 1999, 3492:344-354.
- [7] JIANG X Y, XU M J, JIANG D B, *et al.* Study about thermal characteristics of a V-shape active mirror heat capacity laser [J]. *Laser Technology*, 2009, 33(1):21-23 (in Chinese).

参考文献

- [1] THOMAS S, BOYD B, DAVIS D T, *et al.* Temporal multiplexing for economical measurement of power versus time on NIF [J]. *Proc SPIE*, 1997, 3047:700-706.
- [2] BOYD R D, BLISS E S, BOEGE S J. Alignment and diagnostics on the national ignition facility laser system [J]. *Proc SPIE*, 1999, 3782:496-501.
- [3] LECLERC P, ALLOUCHE V. Temporal response diagnostic for the megajoule laser [J]. *Proc SPIE*, 1999, 3492:843-850.
- [4] McEWAN T E, KILENNY J D, DALLUM G. World's fastest solid-state digitizer [J]. *Energy and Technology Review*, 1994, 10(4):1-6.
- [5] XIA Y W, YE J X, LIU H, *et al.* Study on the propagation characteristic of ultraviolet laser pulse in step index multimode fiber [J]. *High Power Laser and Partical Beams*, 1999, 11(3):284-288 (in Chinese).
- [6] YAN W Z, SUN L J, LUO Y T, *et al.* Measurement system using fiber delay sampling [J]. *Semiconductor Optoelectronics*, 2005, 26(5):464-467 (in Chinese).
- [7] SONG Y, WANG L. Effect of fiber dispersion on pulse width [J]. *Laser Technology*, 2008, 32(6):568-571 (in Chinese).
- [8] WANG G, LI K, KONG F M. Study of characteristics of polarization mode dispersion in single mode fibers with elliptical birefringence [J]. *Laser Technology*, 2006, 30(5):465-468 (in Chinese).
- [9] XU L B, LIU H, PENG Z T, *et al.* Experimental research on pulse-shape measurement of high power laser with the use of fiber sampling techniques [J]. *Optics & Optoelectronic Technology*, 2008, 6(3):35-37 (in Chinese).
- [10] XIA Y W, SUN Z H, TANG J, *et al.* Research on propagation characteristics of temporal profile in optical fibers [J]. *Optics & Optoelectronic Technology*, 2008, 6(6):5-8 (in Chinese).
- [8] BARRETT H H, JACOBS S F. Retro-reflective arrays as approximate phase conjugators [J]. *Opt Lett*, 1979, 4(6):190-192.
- [9] LÜ B D. *Laser optics* [M]. Chengdu: Sichuan University Press, 1992:53-57 (in Chinese).
- [10] YUAN X D, JIANG X Y, CAO D X, *et al.* Theoretical research on output performance of laser resonator at heat capacity model [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2006, 33(s0):93-97 (in Chinese).
- [11] DUAN W T, YU H W, XU M J, *et al.* Experiments on output scaling and amplification of a novel active-mirror laser [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2007, 34(10):1367-1370 (in Chinese).