

激光振荡器内光束质量演变的机理研究

潘孙强^{1,2*} 赵智刚² 刘崇² 葛剑虹² 项震²

¹浙江省计量科学研究院, 浙江 杭州 310018

²浙江大学现代光学仪器国家重点实验室, 浙江 杭州 310027

摘要 激光振荡器内光束质量的演变机理对获得高光束质量激光至关重要。综合考虑激光晶体的热效应和增益导引效应,建立了激光振荡器的理论模型,仿真计算并实验验证了激光振荡器内光束质量的演变。基于理论模型,研究了光束质量演变的机理。指出带负球差激光通过激光晶体时,其负球差可以被晶体正球差补偿,从而改善光束质量。这一机理对激光振荡器和放大器实现高光束质量激光输出具有重要意义。

关键词 激光器; 热致畸变效应; 光束质量; 球差补偿

中图分类号 TN248.1

文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP52.111406

Mechanism Investigation of Beam Quality Evolution within Laser Oscillator

Pan Sunqiang^{1,2} Zhao Zhigang² Liu Chong² Ge Jianhong² Xiang Zhen²

¹Zhejiang Province Institute of Metrology, Hangzhou, Zhejiang 310018, China

²State Key Laboratory of Modern Optical Instrumentation, Zhejiang University, Hangzhou, Zhejiang 310027, China

Abstract The mechanism investigation of beam quality evolution within laser oscillator is of crucial importance for high beam quality laser output. Combining the thermal effect and gain guiding effect, a theoretical model of laser oscillator is presented. The beam quality evolution inside a laser oscillator is numerically simulated and experimentally verified. The mechanism of beam quality evolution is investigated based on the theoretical model. When the laser beam with negative spherical aberration passes through the laser crystal, the negative spherical aberration can be compensated by the positive spherical aberration of the crystal, resulting in beam quality improvement. This mechanism is meaningful for high beam quality output of laser oscillator and amplifier.

Key words lasers; thermal aberrations; beam quality; spherical aberration compensation

OCIS codes 140.3285; 140.3410; 140.3480; 140.3580

1 引言

高功率、高光束质量的激光无论是在科研、工业领域,还是在军事领域,都有极其广泛和重要的应用^[1-2],比如非线性频率变化、激光高精度加工以及激光武器等,因此控制并提高激光光束质量具有重要的实用价值和现实意义。

通常认为热畸变是导致激光光束质量恶化的主要原因,为提高光束质量通常需要减小热畸变。量子亏损是导致热效应的主要原因,为减少量子亏损效应,可采用波长更长的抽运光。Nd:YVO₄激光器通常采用808 nm 半导体激光进行抽运,最近几年采用880、888和914 nm等更长波长的激光进行抽运,实现了高功率、高光束质量的激光输出^[3-5]。薄片激光器和板条激光器则采用不同几何形状的增益介质缓解热效应,实现高功率、高光束质量激光输出^[6-7]。更为主动的方式是采用相位共轭技术或者变形镜技术^[8-9]来自动补偿热畸变,但是这些技术较为复杂。

收稿日期: 2015-06-09; 收到修改稿日期: 2015-06-30; 网络出版日期: 2015-10-11

基金项目: 浙江省重大科技专项(2012C13010-1), 浙江省省属科研院所专项(2013F10058、2015F10024), 浙江省质监系统重大科研项目(20140111)

作者简介: 潘孙强(1986—),男,博士,主要从事激光器及激光光谱方面的研究。

E-mail: pansunqiang@gmail.com

最近几年,清华大学的巩马理课题组^[10-12]综合考虑热效应和增益导引效应,研究了激光振荡器内的激光光束质量演变,提出增益导引效应有助于改善激光光束质量。本课题组近年来也开展了一系列研究,理论研究并实验分析了热效应和增益导引效应^[13]对放大器中激光光束质量的影响,指出可以通过选择合适的参数,使得信号光的球差与放大级激光晶体导致的球差符号相反,当信号光通过放大级时其球差被激光晶体的球差补偿,从而改善激光光束质量^[14-18]。同时也实验研究了激光振荡器内的光束质量演变^[19],但还未开展对光束质量演变的机理研究。

本文实验研究和理论分析了激光振荡器内激光光束质量演变的机理。首先综合考虑热效应和增益导引效应,基于激光晶体薄片模型和谐振腔迭代算法建立了激光振荡器的理论模型;进而由理论模型数值仿真并实验验证了激光振荡器内光束质量的演变;最后理论分析了光束质量演变的机理。

2 理论模型

激光振荡器结构示意图如图1所示,激光振荡器由高反射率腔镜(HR)、输出耦合镜(OC)、端面未掺杂的复合激光晶体组成, L_a 和 L_b 分别为振荡器长、短臂长度。

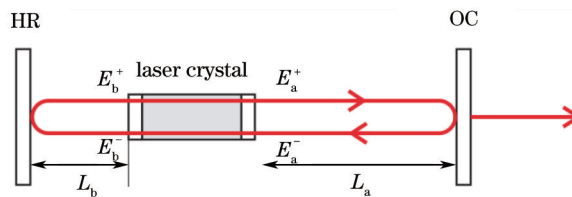


图1 激光振荡器结构示意图

Fig.1 Schematic diagram of laser oscillator

将激光振荡器沿光轴方向展开,采用谐振腔迭代算法(Fox-Li迭代算法)^[11]仿真计算激光振荡器内的激光模式。初始光场沿着光轴方向传播,经多次迭代得到稳定光场分布,即为激光振荡器的自再现模。

激光在自由空间的传播可由标量衍射角谱理论直接计算。激光晶体内的增益分布和折射率分布都是非均匀的,可采用薄片模型^[11,13]计算激光在晶体内的传播。即将激光晶体切成垂直于光轴的薄片,薄片上的增益分布和折射率分布沿光轴方向可认为是均匀的,可由衍射的角谱理论计算激光传播。薄片后的光场分布可由下式计算得到:

$$E(x, y, z + \Delta z) = \exp\left[-\frac{i}{2k}\nabla_{\perp}^2 + \frac{g}{2} - ik_0\Delta n_T\right]\Delta z E(x, y, z), \quad (1)$$

式中 Δz 为薄片厚度,算子 $\exp[-(i\Delta z/2k)\nabla_{\perp}^2]$ 表征激光在均匀介质中的传播, g 为薄片上的增益分布, Δn_T 为薄片上的折射率分布。

基于激光晶体薄片模型和谐振腔迭代算法就可以仿真计算激光在振荡器内的传播,建立了激光振荡器的理论模型,具体理论模型可参见文献[11,13]。

3 光束质量演变的数值仿真和实验结果

激光振荡器的实验装置如图2所示,采用简单的平平腔结构。激光振荡器长臂长度 $L_a=260$ mm,短臂长度 $L_b=110$ mm。复合激光晶体 $\text{YVO}_4/\text{Nd}:\text{YVO}_4/\text{YVO}_4$ 的尺寸为 $3\text{ mm}\times 3\text{ mm}\times 20\text{ mm}$,两端未掺杂的 YVO_4 的长度均为 2 mm ,采用光纤耦合 808 nm 半导体激光器(LD)双端抽运,抽运激光束腰半径为 $400\text{ }\mu\text{m}$,每端抽

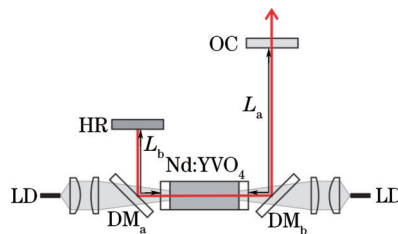


图2 双端抽运 Nd:YVO₄激光振荡器实验装置图

Fig.2 Experimental setup of dual-end-pumped Nd:YVO₄ laser

运激光器最大输出功率为 50 W。双色镜 DM_a 、 DM_b 镀对 1064 nm 高反、808 nm 高透膜, 与高反射率腔镜 (HR)、反射率为 60% 的输出耦合镜组成谐振腔。

激光振荡器采用动态稳定腔结构获得大基模体积, 实现高功率、高光束质量激光输出。当总抽运功率为 60 W 时, 获得 25.4 W 基模激光输出。输出耦合镜输出激光光束质量因子 $M^2 = 1.3$, 如图 3 所示。

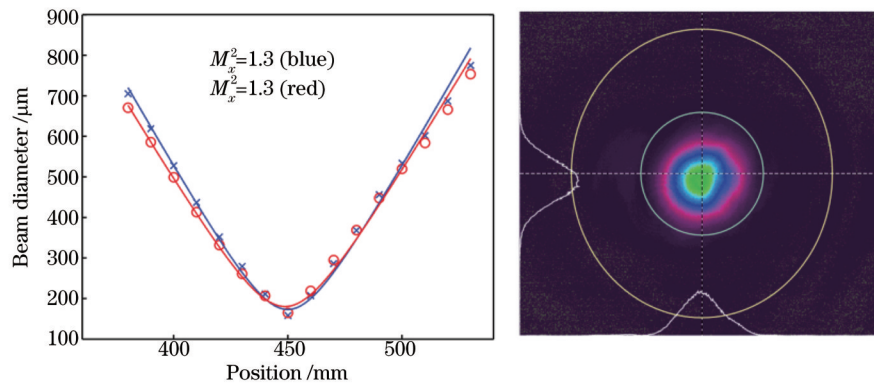


图3 总抽运功率为 60W 时输出激光光束质量

Fig.3 Output beam quality at total pump power of 60 W

为研究激光振荡器内的激光光束质量演变, 实验测量了高反射率腔镜、双色镜 (DM_a 、 DM_b) 以及输出耦合镜处的激光光束质量。高反射率腔镜的反射率不是 100%, 有部分激光从高反射率腔镜处输出, 可进行光束质量测量。激光振荡器内激光从 HR 传播到 DM_a 、从 OC 传播到 DM_b 时, 有部分激光从 DM_a 、 DM_b 处输出, 可进行光束质量测量。实验测量结果如表 1 所示, 并与理论模型的仿真计算结果进行了比对, 二者符合较好。从表 1 中可知, HR 和 DM_a 处的激光光束质量一致, OC 和 DM_b 处的激光光束质量一致, 这是因为激光从 HR 传播到 DM_a 、从 OC 传播到 DM_b 是在自由空间中传播, 不会改变激光光束质量。HR 处 $M^2 = 1.9$, OC 处 $M^2 = 1.3$, OC 处与 HR 处激光光束质量不一致, 且 OC 处优于 HR 处激光光束质量。当激光从 OC 处传播到 HR 处时, 激光光束质量恶化; 当激光从 HR 处传播到 OC 处时, 激光光束质量得到改善。

表 1 腔内激光光束质量演变

Table 1 Beam quality evolution within laser oscillator

Position	Experimental result	Numerical result
HR	1.9	2.00
DM_a	2.0	2.00
DM_b	1.3	1.38
OC	1.3	1.38

4 机理分析

4.1 晶体内激光光束质量演变

激光在自由空间中传播时, 光束质量不会改变, 因此主要分析激光在激光晶体中传播时的光束质量演变。激光在激光晶体中的传播采用薄片模型计算, 求解出晶体中的激光光场复振幅分布, 就可以计算出该光场的光束质量。激光从 HR 端传播到 OC 端, 以晶体中激光传播方向为 z 方向, 计算不同位置处的激光光束质量, 如图 4 所示。在激光晶体的两端, 激光光束质量保持不变。这是因为激光晶体两端为非掺杂的 YVO_4 晶体, 不提供增益, 并且热效应很小, 因此对激光光束质量的影响很小。晶体两端的光束质量分别与谐振腔 HR 端和 OC 端的光束质量不一样, 这是因为在仿真计算中, 考虑了激光晶体的横截面积为 $3 \text{ mm} \times 3 \text{ mm}$, 为有限面积, 因此存在着光阑效应。当激光沿着 z 方向在激光晶体内传播时, 激光光束质量首先不断的改善, 而随着传播距离的增加, 光束质量又开始恶化。但是从整体效果来看, 当激光光束沿着 z 方向通过整个晶体时, 激光光束质量是改善的。

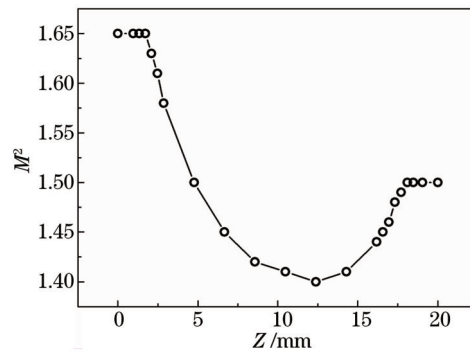


图4 晶体内不同位置处的激光光束质量

Fig.4 M^2 factor of laser field within laser crystal

激光的光束质量与激光的波前畸变有关,为了证明激光在晶体中传播时光束质量的改善,计算晶体内不同位置处的激光波前畸变:

$$W_{ab}(x,y) = W(x,y) - \sum_{n=1}^4 c_n Z_n(x,y), \quad (2)$$

式中 $W(x,y)$ 为激光波前, $W(x,y) = \Phi(x,y)/k$, $\Phi(x,y)$ 为激光光场相位, k 为传播常数。可将激光波前 $W(x,y)$ 展开成 Zernike 多项式, $Z_n(x,y)$ 为 n 阶 Zernike 多项式, c_n 为 n 阶 Zernike 系数。各阶 Zernike 多项式表征的意义如表 2 所示,低阶 Zernike 多项式 ($n \leq 4$) 不会改变激光光束质量,分别表征平移,倾斜和离焦。高阶 Zernike 多项式 ($n \geq 5$) 会引入畸变,通常会导致光束质量恶化,分别表征像散,慧差,三角散光和球差。最终求得波前畸变 $W_{ab}(x,y)$,如图 5 所示,从图中可知,波前畸变主要为球差,并且在 $z=0$ mm 和 $z=20$ mm 处,波前畸变较大;而在 $z=6.5$ mm 和 $z=12.5$ mm 处,波前畸变较小。与图 4 所示晶体内不同位置处激光光束质量的趋势是一致的,因此可用波前畸变表征激光光束质量。

表 2 Zernike 多项式

Table 2 Zernike polynomials

Order	Zernike polynomial Z_n	Aberration
1	1	Piston
2	$2\rho \cos\theta$	Tilt
3	$2\rho \sin\theta$	Tilt
4	$\sqrt{3}(2\rho^2 - 1)$	Defocus
5	$\sqrt{6}\rho^2 \sin 2\theta$	Astigmatism
6	$\sqrt{6}\rho^2 \cos 2\theta$	Astigmatism
7	$\sqrt{8}(3\rho^3 - 2\rho)\sin\theta$	Coma
8	$\sqrt{8}(3\rho^3 - 2\rho)\cos\theta$	Coma
9	$\sqrt{8}\rho^3 \sin 3\theta$	Triangular astigmatism
10	$\sqrt{8}\rho^3 \cos 3\theta$	Triangular astigmatism
11	$\sqrt{5}(6\rho^4 - 6\rho^2 + 1)$	Spherical aberration

激光波前畸变 $W_{ab}(x,y)$ 的主要畸变是球差,因此激光波前畸变 $W_{ab}(x,y)$ 可以用均方根(RMS, R)值 $R = \sqrt{\iint W_{ab}^2(x,y) dx dy} / A$ 表示,其中 A 表示 $W_{ab}(x,y)$ 的平均值, C_{11} 表示波前畸变的球差系数,如图 6 所示。对比图 4 和 6 可知,激光光束质量因子 M^2 和激光波前畸变 RMS 值的趋势是一样的。当激光光场沿着 z 轴传播时,球差系数 C_{11} 从负球差系数线性增长到正球差系数,这一趋势也可从图 5 中看出。虽然球差系数 C_{11} 是线性增长的,但是球差系数的绝对值表征了波前畸变的大小,因此球差系数的绝对值和激光波前畸变的 RMS 值符合得很好,球差系数 C_{11} 同样可以用来表征激光的光束质量。

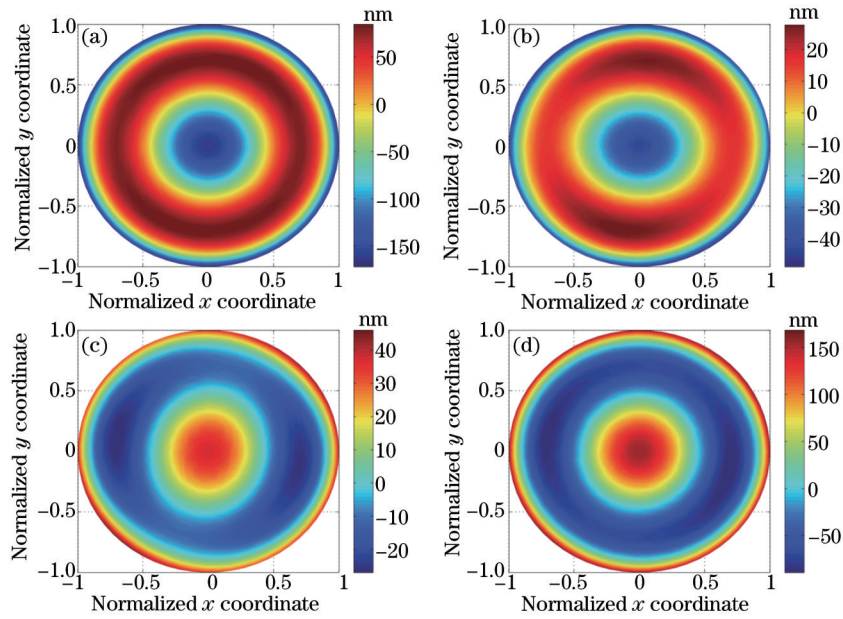


图5 晶体中不同位置处的激光波前畸变。(a) $z=0$ mm; (b) $z=6.5$ mm; (c) $z=12.5$ mm; (d) $z=20$ mm
 Fig.5 Wavefront aberrations of laser beam propagating along z direction. (a) $z=0$ mm; (b) $z=6.5$ mm; (c) $z=12.5$ mm; (d) $z=20$ mm

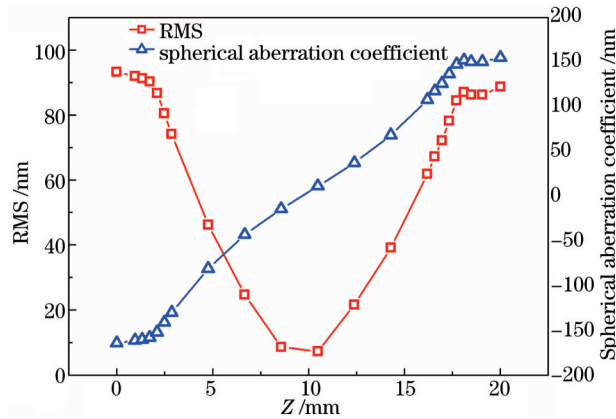


图6 晶体内不同位置处激光波前畸变的RMS值和球差系数 C_{11}

Fig.6 RMS value and spherical aberration coefficient C_{11} of laser beam wavefront aberrations inside laser crystal

4.2 晶体热效应对激光光束质量的影响

为研究晶体热效应对激光光束质量,特别是激光波前畸变的影响,仿真计算激光晶体热效应,如图7所示。图7(a)为晶体内的温度分布,沿着光轴(z 轴)方向温度分布是不均匀的,同时在 xy 平面内温度分布也是

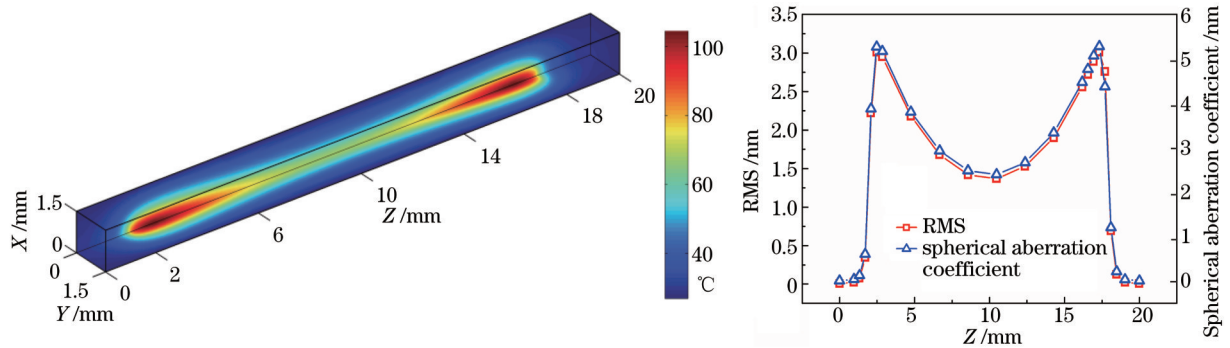


图7 (a) 晶体内温度分布; (b) 晶体薄片上光程差畸变的RMS值和球差系数 C_{11}

Fig.7 (a) Temperature distribution inside laser crystal; (b) RMS value and spherical aberration coefficient C_{11} of optical path difference over laser crystal slice

不均匀的。温度的非均匀分布导致晶体折射率的非均匀分布,从而引入光程差。类似于计算激光波前畸变的(2)式,将光程差按 Zernike 多项式展开,可计算光程差畸变的 RMS 值和球差系数 C_{11} ,如图 7(b)所示,为晶体薄片上光程差畸变的 RMS 值和球差系数。

由图 6 可知,在 $z=0$ mm 处,激光波前畸变为负值,主要为负球差。而随着激光沿 z 轴传播,负球差逐渐变为 0,进而增长为正球差。由图 7 可知,晶体薄片光程差畸变总是为正球差。当激光沿着 z 轴方向在晶体内部传播时,将晶体的球差系数叠加到激光波前畸变的球差系数,获得激光波前畸变球差系数的计算值,如下式所示:

$$\begin{cases} C_{\text{cal}}(z + \Delta z) = C_{\text{cal}}(z) + C_{\text{OPD}_{\text{ab}}}(z) \\ C_{\text{cal}}(0) = C_{\text{W}_{\text{ab}}}(0) \end{cases}, \quad (3)$$

式中 C_{cal} 为球差系数的计算值, $C_{\text{W}_{\text{ab}}}$ 为图 6 中激光波前畸变的球差系数。将激光波前畸变的球差系数和球差系数的计算值做比较,如图 8 所示,可知两者重合得很好,证明球差具有可加性,激光晶体内部激光波前畸变的演变是由晶体的热效应(光程差畸变)引起的。当激光通过晶体时,出射激光波前畸变的球差系数是由入射激光自身的波前畸变球差系数叠加上晶体的球差系数得到的。当入射激光波前畸变为负球差时,其负球差可以被晶体的正球差补偿,这一机理可以用于改善激光光束质量。

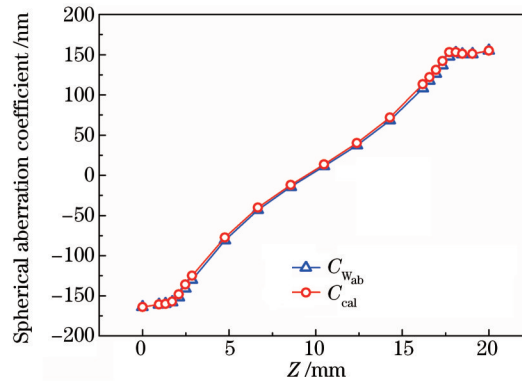


图 8 激光波前畸变的球差系数和球差系数的计算值

Fig.8 Spherical coefficient of laser wavefront aberrations and calculated spherical coefficient of laser wavefront aberrations

4.3 传播过程中激光波前球差系数的演变

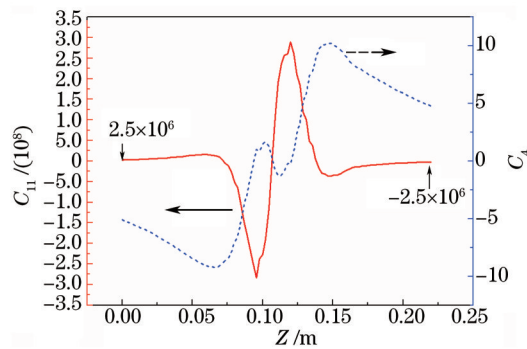
由上一节的仿真计算可知,当激光在谐振腔内振荡时,激光的波前畸变可以为负球差。如果激光波前畸变为负球差,那么就可以被晶体的正球差补偿,从而实现高光束质量输出。因此负球差是实现高光束质量输出的关键。但是激光振荡器中,激光晶体总是带有正球差,因此有必要研究激光波前畸变负球差的由来,需要研究带正球差的激光在传播过程是否产生负球差。

为简化问题,假定入射激光为理想的高斯光束,经过一个带球差的热透镜后,激光光场可表示为

$$E(r) = E_0 \exp\left(-\frac{r^2}{\omega^2}\right) \times \exp\left[j\frac{2\pi}{\lambda}(C_4 r^2 + C_{11} r^4)\right], \quad (4)$$

式中 $C_4 = -1/(2f)$, f 为热透镜焦距, C_{11} 为球差系数, $C_{11} < 0$ 表示负球差, $C_{11} > 0$ 表示正球差, E_0 表示初始入光场。

分别采用以下参数: $f = 100$ mm, $C_{11} = 2.5 \times 10^6$, 对应的球差系数为 320 nm, 将其代入(4)式,获得初始光场分布。将该初始光场沿着 z 轴传播,由标量衍射理论可计算激光光场分布。进而计算出激光波前,在激光光斑直径范围内对激光波前进行四次项拟合,就可以求解 C_4 和 C_{11} 系数,如图 9 所示。由图可知,初始光场的 $C_{11} = 2.5 \times 10^6$, 激光沿 z 轴方向传播时, C_{11} 系数并不是恒定不变的。在束腰左侧, C_{11} 系数首先逐渐增加,接着快速减小为负值;在瑞利范围里, C_{11} 系数剧烈变化;在束腰右侧, C_{11} 系数首先快速减小为负值,接着逐渐增加到 $C_{11} = -2.5 \times 10^6$ 。 C_{11} 系数关于束腰位置中心对称, C_4 系数也关于束腰位置中心对称。由此可知,带正球差的会聚激光光束经过传播后,其球差由正球差演变为负球差,这就解释了激光谐振腔内激光波前负球差的由来。

图9 沿 z 轴传播时的激光波前 C_{11} 和 C_4 系数变化曲线Fig.9 Coefficient C_{11} and C_4 of laser wavefront when the laser propagates along z axis

5 结 论

理论模型数值仿真并实验验证了激光振荡器内光束质量的演变,激光从HR端传播到OC端时,激光光束质量因子 M^2 从1.9改善为1.3。研究了激光晶体内的激光光束质量演变,指出可以用激光波前畸变的RMS值和球差系数表征激光光束质量。带正球差的激光经会聚传播后可以得到负球差;当激光从HR端向OC端传播,入射激光晶体时激光波前为负球差;激光在晶体内传播时,其负球差可以被晶体正球差补偿,从而改善激光光束质量。该机理可以用于激光振荡器和放大器的设计,通过选择合理参数改善激光光束质量,实现高功率高光束质量激光输出。

参 考 文 献

- Zhao Zhigang, Dong Yantao, Pan Sunqiang, *et al.*. 50 W class double-end-pumped Nd:YVO₄ TEM₀₀ mode solid state laser oscillator[J]. Chinese J Lasers, 2011, 38(9): 0902001.
赵智刚,董延涛,潘孙强,等. 50 W量级双端抽运Nd:YVO₄基模固体激光振荡器[J]. 中国激光, 2011, 38(9): 0902001.
- Wang Xiaolin, Tao Rumao, Zhang Hanwei, *et al.*. 1 kilowatt single-end pumped all-fiber laser oscillator with good beam quality and high stability[J]. Chinese J Lasers, 2014, 41(11): 1105001.
王小林,陶汝茂,张汉伟,等. 1 kW单端抽运、高光束质量、高稳定性全光纤激光振荡器[J]. 中国激光, 2014, 41(11): 1105001
- Ding Xin, Zhang Haiyong, Sheng Quan, *et al.*. High efficiency Nd:YVO₄ laser in-band pumped from high Stark level of ground state at 914 nm[J]. Chinese J Lasers, 2013, 40(7): 0702008.
丁欣,张海永,盛泉,等. 914 nm基态高斯塔克能级共振抽运的高效率Nd:YVO₄激光器[J]. 中国激光, 2013, 40(7): 0702008.
- Wang Yajun, Yang Wenhai, Zheng Yaohui, *et al.*. Influence of pump wavelength and Nd³⁺ doped concentration on the performance of intracavity doubling single-frequency lasers[J]. Chinese J Lasers, 2013, 40(6): 0602005.
王雅君,杨文海,郑耀辉,等. 抽运波长及Nd³⁺掺杂浓度对内腔倍频单频激光器性能的影响[J]. 中国激光, 2013, 40(6): 0602005.
- Shi Zhaohui, Liu Xuesong, Huang Yutao, *et al.*. 500 kHz, 6 ns high repetition-rate electro-optical cavity dumped Nd:YVO₄ laser[J]. Chinese J Lasers, 2014, 41(10): 1002006.
石朝辉,刘学松,黄玉涛,等. 500 kHz, 6 ns高重复频率电光腔倒空Nd:YVO₄激光器[J]. 中国激光, 2014, 41(10): 1002006.
- Chen Jinbao, Guo Shaofeng. Review on technical approaches of high energy solid-state lasers[J]. Chinese J Lasers, 2013, 40(6): 0602006.
陈金宝,郭少锋. 高能固态激光器技术路线分析[J]. 中国激光, 2013, 40(6): 0602006.
- An Xiangchao, Tang Chun, Shang Jianli, *et al.*. 10 J diode-pumped thin-disk laser in unstable resonator[J]. Chinese J Lasers, 2014, 41(8): 0802001.
安向超,唐淳,尚建力,等. 10 J级二极管抽运非稳腔薄片激光器[J]. 中国激光, 2014, 41(8): 0802001.
- Wang Haocheng, Fan Zhongwei, Yu Jin, *et al.*. Research progress of high repetition rate and high power laser with SBS-phase conjugate mirror[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2014, 51(4): 040001.
王昊成,樊仲维,余锦,等. 带SBS相位共轭镜的高重复频率高功率激光系统研究进展[J]. 激光与光电子学进展, 2014, 51(4): 040001.

- 9 Xiang Rujian, He Zhongwu, Xu Honglai, *et al.*. Closed loop beam quality control for MOPA solid slab laser[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2013, 25(2): 358-362.
向汝建, 何忠武, 徐宏来, 等. 固体板条MOPA激光光束质量主动控制[J]. 强激光与粒子束, 2013, 25(2): 358-362.
- 10 Yan Xingpeng, Liu Qiang, Fu Xing, *et al.*. Gain guiding effect in end-pumped Nd:YVO₄ MOPA lasers[J]. Journal of the Optical Society of America B, 2010, 27(6):1286-1290.
- 11 Yan Xingpeng, Liu Qiang, Wang Dongsheng, *et al.*. Combined guiding effect in the end-pumped laser resonator[J]. Optics Express, 2011, 19(7): 6883-6902.
- 12 Yan X, Liu Q, Jiang X, *et al.*. The combined guiding effect in MOPA lasers[J]. Laser Physics Letters, 2013, 10(4): 045003.
- 13 Xiang Zhen, Wang Dan, Li Tong, *et al.*. Numerical simulation and analysis for gain guiding effect in master oscillator power amplifier lasers[J]. Chinese J Lasers, 2011, 38(5): 0502004.
项震, 汪丹, 李通, 等. 主振荡功率放大激光器增益导引效应的数值模拟及分析[J]. 中国激光, 2011, 38(5): 0502004.
- 14 Pan Sunqiang, Ye Zhibin, Zhao Zhigang, *et al.*. Beam quality improvement by thermally induced aberrations in a diode-end-pumped laser amplifier[J]. Laser Physics, 2013, 23(9): 095003.
- 15 Qi Yunxuan, Liu Chong, Zhang Xiang, *et al.*. Beam quality enhancement in side-pumped master oscillator power amplifier system. High Power Laser and Particle Beams, 2014, 26(9): 127-131.
亓云轩, 刘崇, 张翔, 等. 侧面抽运主振荡功率放大器中的光束质量提高[J]. 强激光与粒子束, 2014, 26(9): 127-131.
- 16 Liu Chong, Wang Yi, Ye Zhibin, *et al.*. Beam wavefront dynamical compensation by aberrations of the gain medium in laser amplifiers for beam quality improvement[J]. Optics Letters, 2014, 39(9): 2537-2540.
- 17 Ye Zhibin, Wang Yi, Zhao Zhigang, *et al.*. Method to improve beam quality by compensating spherical aberrations in master oscillator power amplifier laser systems[J]. Applied Optics, 2014, 53: 7963-7967.
- 18 Qi Yunxuan, Zhao Zhigang, Liu Chong, *et al.*. Beam quality management in multi-stage side-pumped Nd:YAG MOPA laser systems[J]. Journal of Selected Topics in Quantum Electronics IEEE, 2015, 21(1): 1-6.
- 19 Ye Zhibin, Zhao Zhigang, Pan Sunqiang, *et al.*. Beam profile evolution and beam quality changes inside a diode-end-pumped laser oscillator[J]. IEEE Journal of Quantum Electronics, 2014, 50(2): 62-67.

栏目编辑: 宋梅梅