

光学元件波前畸变对驱动器光路设计的影响

徐林波 卢兴强 雷泽民

Influence of phase error of optical elements on optical path design of laser facilities

Xu Lin-Bo Lu Xing-Qiang Lei Ze-Min

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 67, 024201 (2018) DOI: 10.7498/aps.20171877

在线阅读 View online: <http://dx.doi.org/10.7498/aps.20171877>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn/CN/Y2018/V67/I2>

---

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

[剪切光束成像技术对纵深目标的成像](#)

Sheared-beam imaging of object with depth information

物理学报.2017, 66(20): 204202 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.66.204202>

[基于杂散光抑制要求的光学表面粗糙度控制方法研究](#)

Method of controlling optical surface roughness based on stray light requirements

物理学报.2017, 66(19): 194201 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.66.194201>

[矢量基尔霍夫公式经典证明的漏洞与新的严格证明](#)

Flaws in classical proofs of vector Kirchhoff integral theorem and its new strict proof

物理学报.2017, 66(16): 164201 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.66.164201>

[激光陀螺变锁区现象的研究与讨论](#)

Research and discussion on the lock-in threshold variation of ring laser gyro

物理学报.2012, 61(18): 184204 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.61.184204>

[反射式单级衍射光栅](#)

Reflection type single-order diffraction grating

物理学报.2012, 61(15): 154203 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.61.154203>

## 光学元件波前畸变对驱动器光路设计的影响\*

徐林波<sup>1)2)</sup> 卢兴强<sup>1)†</sup> 雷泽民<sup>1)2)</sup>

1)(中国科学院上海光学精密机械研究所, 高功率激光物理联合实验室, 上海 201800)

2)(中国科学院大学, 北京 100049)

(2017年8月20日收到; 2017年9月21日收到修改稿)

高功率激光驱动器光路设计要考虑像传递、鬼像规避和杂散光管理等多项优化措施. 基于衍射光学传播理论, 从输出负载能力提升的角度研究大口径光学元件波前特性对驱动器光路设计参数优化的影响. 研究表明, 驱动器末级光路的排布间隔如果控制在  $6\text{ m}$  以上, 将非常有助于提高激光驱动器的输出负载能力. 一般情况下, 波前峰谷值达到  $0.34\lambda$  的单块大口径光学元件能使高功率激光的近场光束质量最大下降约  $10\%$ , 达到  $1.36\lambda$  后最大下降约  $21\%$ ; 波前分布特性不同的多片大口径光学元件的波前相消叠加有利于降低中频波前部分对装置负载能力的影响, 但是, 大口径光学元件的非线性效应会加重中频波前对装置输出负载能力的影响; 在限定大口径元件损伤阈值  $20\text{ J/cm}^2$  的前提下, 光路排布紧凑的激光驱动器末级输入激光通量控制在  $16.8\text{ J/cm}^2$  之下不易损伤光学元件. 相对宽松的光路设计可以进一步提高末级输出激光的平均通量水平, 非常有利于激光驱动器装置输出负载能力的提升.

关键词: 衍射光学, 元件波前, 光路设计

PACS: 42.25.Fx, 42.15.Dp, 42.55.-f, 42.60.Jf

DOI: 10.7498/aps.67.20171877

## 1 引言

末端输出光束质量的好坏是影响高功率激光驱动器负载能力提升的重要因素之一<sup>[1]</sup>. 分布在世界各国的高功率激光驱动器装置有美国的国家点火装置(NIF)<sup>[2]</sup>、法国的兆焦耳激光器(LMJ)<sup>[3]</sup>、英国的MAGPIE<sup>[4]</sup>、俄罗斯的Iskra-6<sup>[5]</sup>、中国的神光II<sup>[6]</sup>和神光III<sup>[7]</sup>等. 这些激光装置的光路设计有一个共同点, 就是在放大链路末端都是助推放大器配合传输空间滤波器的结构. 根据神光系列激光装置实验结果和相关文献报道<sup>[8-10]</sup>, 传输空间滤波器的注入透镜损伤是限制激光驱动器装置输出通量提升的重要因素. 在光路设计中采取措施保护好这块透镜至关重要.

实验与相关研究表明, 传输空间滤波器透镜受到的损伤和光束的小尺度调制现象有关<sup>[11,12]</sup>. 由

于光路前级空间滤波器的存在, 激光驱动器输出光束质量主要受末级放大段内大口径光学元件波前特性的影响<sup>[13]</sup>. 在相关研究方面, 周丽丹等<sup>[14-16]</sup>研究了高功率固体激光装置光学元件“缺陷”分布的功率谱密度方法及等效求法, 并且针对线性介质、非线性介质以及空间滤波器的情况, 研究了功率谱密度与光束近场强度分布的定量关系, 还研究了光学元件“缺陷”密度对助推放大级光束质量的影响. 针对光学元件波前畸变产生的原因, 文献<sup>[17, 18]</sup>研究了激光二极管抽运氦气冷却钕玻璃叠片激光放大器热致波前畸变, 对于高功率激光光束, 薄光学元件局部热变形对光束的扰动是产生较高光强调制的重要原因. 文献<sup>[19]</sup>研究了光学元件波前畸变与远场斯特列尔比的定量关系. 但从高功率激光装置的负载能力的角度出发, 对光学元件面形与光路排布的影响的研究并不是很充分.

\* 国家自然科学基金(批准号: 60707019)资助的课题.

† 通信作者. E-mail: xingqianglu@siom.ac.cn

本文基于衍射光学传播理论, 研究解决末级放大段内的大口径光学元件面形特性对光束近场质量的影响, 寻求有利于装置负载能力提升的光路排布措施. 首先给出研究所用的理论模型和理论计算工具; 其次通过理论计算, 对比研究单片大口径元件波前和多片组合的大口径元件波前对驱动器末端输出光束近场质量的影响特性; 最终给出如何通过优化激光驱动器的光路设计, 才能有效规避大口径光学元件面形特性对驱动器输出负载能力提升的不利影响, 从而使激光驱动器装置获得更高的输出能力水平. 本文研究工作基于激光物理、光学与光路设计 Laser Designer 软件开展, 取得的研究成果对激光驱动器末级光束质量的评估、提升和控制有重要参考价值, 同时也可为大口径光学元件的加工特性优化提供一定的参考.

## 2 理论模型

激光物理、光学与光路设计 Laser Designer 软件有驻波谐振腔系统设计、行波谐振腔系统设计、几何光传播系统设计、激光脉冲放大系统设计和光束衍射传播系统设计五大理论计算功能, 曾用来承担并完成了神光 II 升级激光装置和 A 构型验证激光装置的物理、光学和光路设计. 其中, Laser

Designer 软件的光束衍射传播系统设计模块可以调用 ZYGO 干涉仪实际测量到的大口径光学元件的面形数据计算光束在空间中传播时的近场和远场演化特性. 使用的计算理论模型为

$$2ik \frac{\partial E}{\partial z} + \nabla_{\perp}^2 E + 2k^2 \frac{n_2}{n_0} |E|^2 E + ik_0(\alpha - \beta)E = 0, \quad (1)$$

式中,  $n_0$  为线性折射率,  $n_2$  为非线性折射率系数,  $k = 2\pi/\lambda$ ,  $\alpha$  和  $\beta$  分别为介质的损耗和增益系数.

在利用分布傅里叶变换法数值求解方程 (1) 时, 使用的方形激光脉冲表示为

$$E(x, y, t) = A_0 \exp \left\{ -\frac{\ln 2}{2} \cdot \left[ \left( \frac{x^2}{a_x^2} \right)^{n_x} + \left( \frac{y^2}{a_y^2} \right)^{n_y} \right] \right\} \times \exp \left[ -\frac{\ln 2}{2} \cdot \left( \frac{t}{\tau} \right)^{2m} \right], \quad (2)$$

式中,  $A_0$  为信号振幅;  $n_x, n_y$  分别表示激光脉冲  $x, y$  方向上的空间分布 (当  $n_x, n_y = 1$  时为高斯分布, 当  $n_x, n_y > 1$  时为超高斯分布);  $a_x, a_y$  分别为  $x, y$  方向上的半高全宽,  $m$  表示不同的脉冲时间波形,  $t$  为时间坐标,  $\tau$  为脉冲时间波形的半高全宽.

高功率激光装置的末级放大光路都可以等效为图 1 所示的形式.

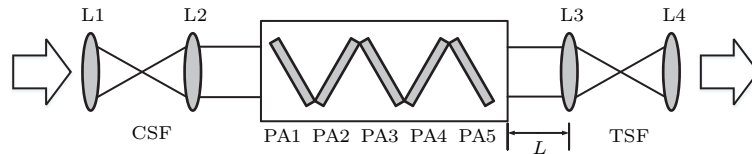


图 1 高功率激光装置的末级放大光路示意图

Fig. 1. Schematic diagram of final stage amplifying light path in high power laser device.

图 1 中 CSF 为前级空间滤波器, 可以把高功率激光驱动器前级光路引入的高频调制成分滤掉, 光学元件 PA1—PA5 为出现在末端放大光路内的大口径光学元件,  $L$  为最后一块大口径光学元件到末级空间滤波器的注入透镜 L3 是最容易被损伤的大口径光学元件, 因此本文重点研究由大口径光学元件 PA1—PA5 对距离  $L$  段内的近场光束质量的影响.

$L$  段内的近场光束质量可以采用光束填充因子为指标评价, 定义为

$$F = I_{\text{avg}}/I_{\text{max}},$$

式中  $I_{\text{avg}}$  和  $I_{\text{max}}$  分别表示空间光强分布的平均强度和峰值强度. 另外, 为评价大口径光学元件透射波前特性对光束质量的单独影响程度, 又引入相对填充因子的概念:

$$F_{\text{rela}} = F_{\text{real}}/F_{\text{idea}},$$

其中  $F_{\text{idea}}$  表示入射大口径光学元件 PA1 的光束经自由空间传播到  $L$  段内的填充因子,  $F_{\text{real}}$  表示入射大口径光学元件 PA1 的光束依次经过光学元件 PA1—PA5 后, 传播到  $L$  段内的填充因子. 相对填充因子越小, 表示末级放大段内的大口径光学元件

对出射光束质量的影响越厉害. 当相对填充因子等于1时, 末级放大段内的大口径元件的透射波前特性对末级输出光束质量没有影响.

在计算过程中, 为更好地了解光束中的高频成分对相对填充因子的影响, 还采用了64 bits的 Laser Designer 软件对计算结果进行了验证, 64 bits Laser Designer 软件可以用很高的分配内存兼顾大口径光束中的小尺度光场调制现象进行研究, 又采用并行计算的方法成功解决了因分配内存太大而导致的计算时间过长问题, 研究效率得到大幅度提升.

### 3 数值模拟

为得到有更高置信的研究结果, 计算采用的大口径光学元件面形数据来自 ZYGO 干涉仪实际测量的神光 II A 构型末级助推放大段钕玻璃的面形数据, 钕玻璃之间的排布距离参数和神光 II A 构型验证系统一致.

采用的5张钕玻璃片的实测面形分布如图2所示, 350 mm × 350 mm 口径内波前分布的峰谷(PV)值分别为0.341λ, 0.277λ, 0.278λ, 0.239λ, 0.241λ, 合计共1.376λ.

模拟计算中使用的入射激光的中心波长为

1053 nm, 脉宽为5 ns, 激光束的空间分布为10阶超高斯分布, 半高全宽光束口径为300 mm × 300 mm, 平均通量密度为19 J/cm<sup>2</sup>, 与神光 II A 构型验证系统实验中的最高输出激光通量相当. 使用的钕玻璃的厚度为40 mm, 布儒斯特角放置, 非线性折射率系数取  $1.2 \times 10^{-13}$  esu.

文献[20]指出, 根据激光惯性约束聚变驱动器打靶对焦斑的要求以及不同空间频率位相畸变对光束质量的不同影响将波前畸变划分为4个区域.

1) 低频段(空间频率  $\nu$  低于  $1/33 \text{ mm}^{-1}$ ) 的波前畸变主要决定焦斑主瓣大小, 因此对基频激光顺利过孔(空间滤波器小孔)和打靶激光进洞有影响.

2) 中频段(空间频率  $\nu$  在  $1/33$ — $1/0.12 \text{ mm}^{-1}$  之间)的波前畸变, 主要影响光束的近场调制. 根据中频段波前畸变的不同非线性增长, 又将该频段分成两部分: PSD1段( $1/33$ — $1/2.5 \text{ mm}^{-1}$ )和 PSD2段( $1/2.5$ — $1/0.12 \text{ mm}^{-1}$ ). PSD1段的位相畸变, 主要影响焦斑旁瓣, 具有一定的非线性增长, 但是非线性增长较低; PSD2段的位相畸变非线性增长非常高, 容易形成小尺度自聚焦, 增大元件损伤风险.

3) 高频段(空间频率  $\nu$  高于  $1/0.12 \text{ mm}^{-1}$ ) 的波前畸变对非线性增益没有贡献, 对能量损耗略有影响.

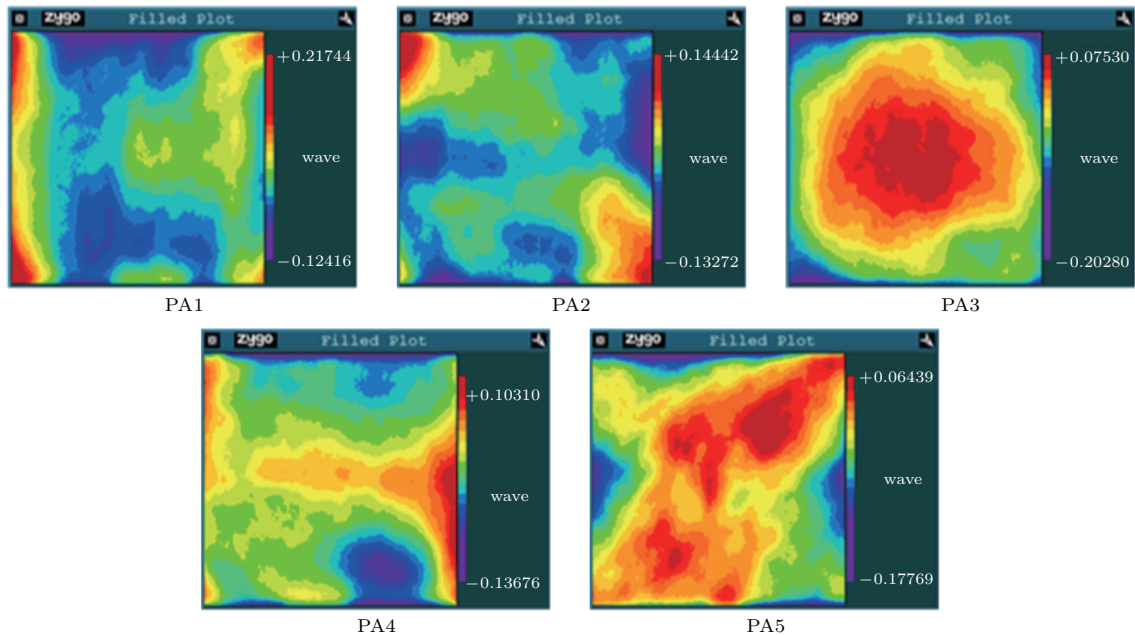


图2 神光 II A 构型末级助推放大段钕玻璃的面形数据

Fig. 2. Wavefront data of neodymium glass on Shenguang II A configuration power amplifier section.

### 3.1 波前畸变对光束质量的影响

根据波前畸变的分解, 首先研究计算仅有单片大口径光学元件PA1时图1中L段内的光束填充因子的变化. 图3(a)为采用薄片近似不考虑钕玻璃厚度的情况, 图3(b)为考虑钕玻璃厚度的计算情况. 分析图3(a)和图3(b), 当不考虑光束经过光学元件的非线性效应时, 可以发现低频段波前畸变和高频段波前畸变对光束质量的影响最小; 空间周期为0.12—2.50 mm的中频段波前畸变, 会使光束质量在光学元件后端1—2 m处下降至最低值, 这个频段的波前畸变对光束的调制作用会在光束的后续传输中由于衍射而逐渐降低; 空间周期为2.5—33.0 mm的中频段波前畸变对出射光束的

光束质量影响最大, 最多能使近场光束质量下降约10%. 考虑光束传播经过非线性介质的自聚焦效应时, 中频段波前畸变对光束填充因子的下降效果更加明显. 如图3(b)所示, 中频段波前畸变在单片大口径光学元件中的非线性传输最多能造成光束质量下降约20%, 在一定程度上限制了高功率激光驱动装置的输出负载能力.

大口径光学元件不仅来源于其加工误差, 在装夹过程中引入的波前畸变和驱动器运行时带入的一系列动态因素都有可能使光学元件的波前畸变得以放大. 模拟计算仅有单片大口径光学元件PA1时图1中L段内的光束填充因子的变化. 图4(b)表示当波前畸变放大4倍之后的情况. 对比图4(a)和图4(b), 可以发现, 在光束经过一片光学元件传播

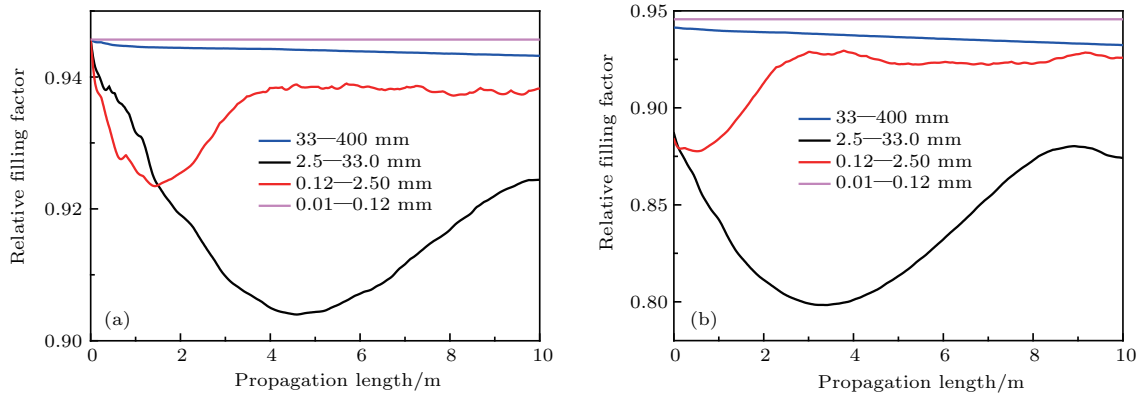


图3 PV值为 $0.3\lambda$ 时不同频率的波前畸变对光束质量的影响随着传播距离的变化 (a) 不考虑钕玻璃厚度; (b) 考虑钕玻璃厚度

Fig. 3. When the peak-to-valley of wavefront aberrance reaches  $0.3\lambda$ , the influence of wavefront aberrance at different frequencies on beam relative filling factor with the change of propagation length: (a) Not considering the thickness of neodymium glass; (b) considering the thickness of neodymium glass.

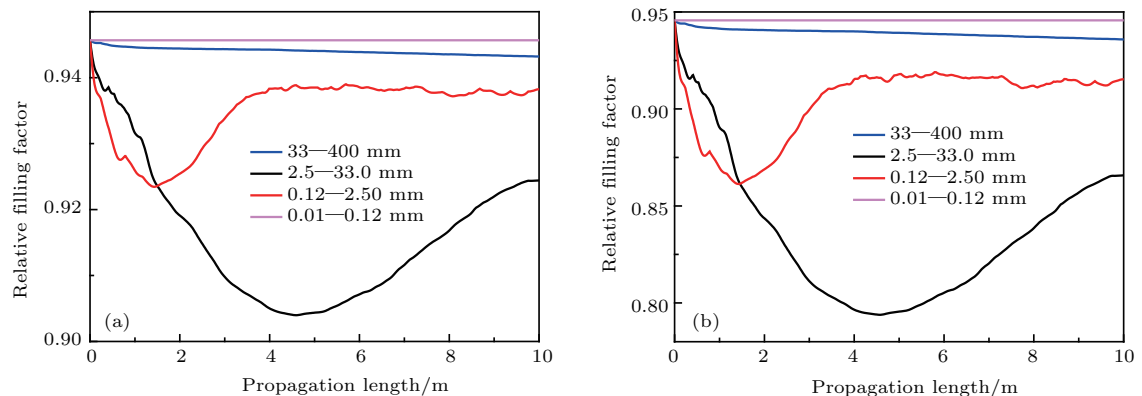


图4 仅改变PV值时不同频率的波前畸变对光束质量的影响随着传播距离的变化 (a) PV值为 $0.341\lambda$ ; (b) PV值为 $1.36\lambda$

Fig. 4. Changing the peak-to-valley of wavefront aberrance, Influence of wavefront aberrance at different frequencies on beam relative filling factor with the change of propagation length: (a) When the peak-to-valley of wavefront aberrance reaches  $0.341\lambda$ ; (b) when the peak-to-valley of wavefront aberrance reaches  $1.36\lambda$ .

时, 光学元件的波前畸变峰谷值越大, 末端光束的质量越差. 不改变光学元件波前畸变的分布, 只改变其畸变的幅度时, 波前畸变对光束质量的影响幅度也有所提升. 当波前畸变峰谷值达到  $1.36\lambda$  时, 空间周期为 2.5—33.0 mm 的中频段波前畸变最多会对光束质量的下降约 21%, 对于工作在接近光学元件损伤阈值附近的高功率激光装置, 极有可能造成光学元件的损伤.

在多程放大的高功率激光驱动系统中, 放大链路末端都是助推放大器配合传输空间滤波器的结构. 如图 1 所示, 光束需要经过 5 片大口径光学元件才能传输至下级空间滤波器, 需要考虑不同钕玻璃静态波前之间的相互影响. 模拟计算图 1 所示的光路中, 光束经过 5 片不同的钕玻璃传播后近场光束质量随传播距离的变化规律, 其中图 5 (a) 表示不考虑钕玻璃厚度的情况, 图 5 (b) 表示考虑钕玻璃厚度的情况. 分析图 3 (a), 图 5 (a) 和图 5 (b), 发现无论经过一片还是多片光学元件, 低频段波前畸变和高频段波前畸变都对光束影响质量影响最小, 并且对光束影响较平稳, 不会出现峰值. 由图 4 (b) 和图 5 (a) 对比可知, 在薄片近似的条件下, 对于中频段波前畸变, 在经过不同的多片大口径光学元件叠加之后, 近场光束质量对比仅有单片时的情况有所提升. 其中, 空间周期为 0.12—2.50 mm 的 PSD1 段波前畸变, 在经过相消叠加之后, 对近场光束质量有大约 5% 的提升. 对于空间周期为 2.5—33.0 mm 的中频段, 波前分布特性不同的多片大口径光学元件的波前相消叠加对光束质量最大提高约 8%, 在一定程度上降低了中频波前部分对装置负载能力的影响. 当考虑非线性效应的影响时, PSD1 段和 PSD2 段波前畸变分别会对光束质量多降低约 4%—6%, 加大了中频段波前畸变对装置输出负载能力的降低. 并且光束质量最差处相比较薄片近似情况下会提前 1—2 m 出现, 更容易造成排布紧凑的光学元件的损伤. 在光学元件后表面 2—3 m 处, 相对填充因子将会降至 84%, 在控制末级最大输出激光通量不超过  $20 \text{ J/cm}^2$  的前提下, 光学元件排布紧凑的光路设计方案末级输入激光的通量控制在  $16.8 \text{ J/cm}^2$  之下不易损伤光学元件. 末端光束经过 6 m 的传输之后, 由于光束在自由空间的衍射作用, 相对填充因子有所提高且趋于平稳, 驱动器末级光路的排布间隔如果控制在 6 m 以上, 将非常有助于提高激光驱动器的输出负载能力.

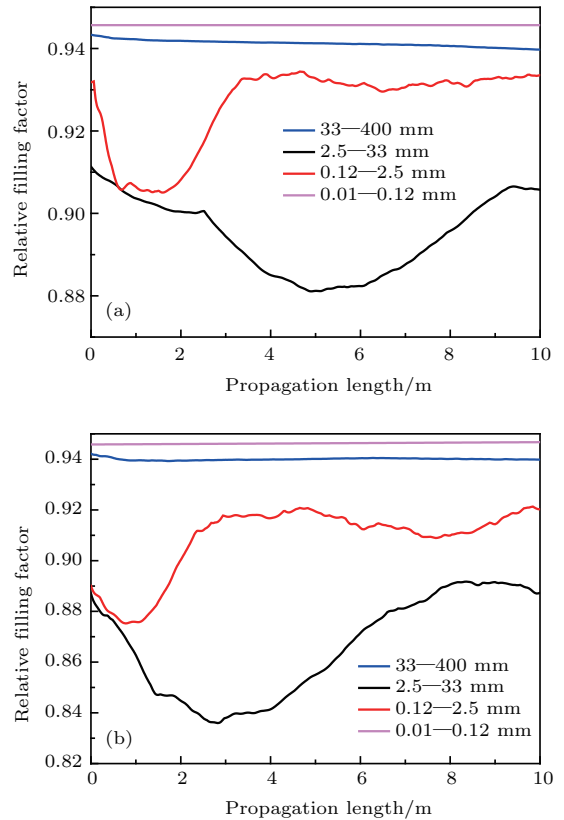


图 5 经过 5 片不同的钕玻璃片时不同频率的波前畸变对光束质量的影响 (a) 不考虑钕玻璃厚度; (b) 考虑钕玻璃厚度

Fig. 5. When the beam propagates through five different neodymium glasses, the influence of wavefront aberrance at different frequencies on beam relative filling factor with the change of propagation length: (a) Not considering the thickness of neodymium glass; (b) considering the thickness of neodymium glass.

### 3.2 数值模拟冗余度分析

实际情况下静态波前的变动, 可能会对相对填充因子产生一定的影响. 由表 1 可知, 随着波前畸变 PV 值的增加, 近场光束的填充因子在不断地下降, 两者之间呈线性关系. 因此, 在元件的加工过程中尽量减少光学元件的波前畸变, 对于提高高功率激光驱动装置的负载能力很有帮助.

表 1 不同波前畸变对填充因子的影响

Table 1. Influence of different wavefront aberrance on relative filling factor.

波前畸变 PV 值/ $\lambda$	0.688	1.376	2.752	4.128	5.504
相对填充因子最多降低/%	9	16	18	23	28

神光 II 等高功率激光驱动装置中, 入射至助推放大段的光束在经过空间滤波器之后, 可以滤去

大部分的高频分量, 在前面的主放大段, 由于AO变形镜的调整, 可以匀滑一部分的低频畸变<sup>[21,22]</sup>. 在入射至助推级放大段时, 前面会经过两块反射镜和放大器前端的窗口, 因此, 模拟了理想的高斯光束经过8块大口径光学元件的情况下, 光学元件的波前畸变对近场光束填充因子的影响. 计算结果表明, 在经过8片大口径光学元件的总波前畸变为 $2.317\lambda$ , 理想高斯光束经过传播后, 空间周期为 $2.5\text{--}33.0\text{ mm}$ 的中频段波前畸变依旧对光束质量的影响最大, 光束相对填充因子最多下降19%. 对于工作在抗损伤阈值附近的高功率激光驱动装置, 在允许光束质量下降15%的前提下, 应该控制单个光学元件加工PV值不高于 $0.26\lambda$ .

### 3.3 对高功率激光驱动器光路排布的启示

对比法国LMJ和美国NIF模拟光路排布的特点, 虽然其前端和预放的光路有所不同, 但是在放大链路的末端均采用助推放大器和传输空间滤波器的结构. 并且, 为了避免在高通量下的激光光束对空间滤波器的注入透镜的损伤, 其均将铍玻璃片出口到空间滤波注入透镜的距离设置在 $6\text{ m}$ 以上. 上海光学精密机械研究所神光II A构型光路末端铍玻璃片出口到空间滤波注入透镜的距离为 $7460\text{ mm}$ , 在这种排布情况下得到了很高的输出能力.

对于大部分运行在接近光学元件损伤阈值附近的高功率激光管装置, 如果近场光束填充因子不够高, 将严重威胁到下游光学元件的安全, 导致整个激光驱动器的负载能力下降很多. 因此为了提高高功率激光驱动器的输出能力, 在允许光束质量下降15%的前提下, 应该控制光学元件整体加工PV值在 $1.3\lambda$ 以下, 考虑到不同光学元件波前畸变的相消叠加, 单个光学元件平均加工PV值应不高于 $0.26\lambda$ .

## 4 结 论

在高功率激光驱动系统中, 需要经过很多大口径光学元件的放大才能满足物理实验的需求. 而经过光学元件时会不可避免地带入波前相位畸变, 严重影响驱动器末端的光束质量. 本文采用具有置信度的高功率激光设计软件Laser Designer对大口径光学元件不同波前畸变对驱动器末端光束质量的

影响做了数值模拟和分析. 研究表明, 当单片大口径光学元件的波前PV值小于 $0.34\lambda$ 时, 中频波段的波前畸变对光束质量影响最大, 在光学元件的加工过程中应当尽量避免这个频段波前畸变的产生. 当单片大口径光学元件的波前PV值达到 $1.36\lambda$ 时, 中频段波前畸变最多会影响光束质量下降约21%, 极易造成下游光学元件的损伤. 多片大口径光学元件波前的相消叠加在一定程度上降低了中频波前部分对装置负载能力的影响, 有利于提升激光驱动器的输出负载能力, 高通量传播条件下的非线性效应对光束近场填充因子有一定程度的降低. 在控制末级最大输出激光通量不超过 $20\text{ J/cm}^2$ 前提下, 光学元件排布紧凑的光路设计方案末级输入激光的通量控制在 $16.8\text{ J/cm}^2$ 之下不易损伤光学元件. 驱动器末级光路的排布间隔如果控制在 $6\text{ m}$ 以上, 将非常有助于提高激光驱动器的输出负载能力. 对于高功率激光装置的末级放大光路, 在允许光束质量下降15%的前提下, 单个光学元件加工PV值应该在 $0.26\lambda$ 以下, 并且随着光学元件数量的增加, 对光学元件加工质量的要求逐渐提高. 该研究结果可评估光学元件加工面形对负载能力提升的影响, 对指导光学元件加工面形控制以及驱动器末级光束质量的评估和控制有重要参考价值.

### 参考文献

- [1] Zheng W G 2014 *Load Capacity and Related Physical Problems of High Power Laser Devices* (Beijing: Science Press) pp37–40 (in Chinese) [郑万国 2014 高功率激光装置的负载能力及其相关物理问题 (北京: 科学出版社) 第37—40页]
- [2] Stolz C J 2007 *Proc. SPIE* **6834** 683402
- [3] André M L 1999 *Fusion Engineer. Design* **44** 43
- [4] Blackwell B D, Caneses J F, Samuell C M, Wash J, Howard J, Corr C 2012 *Plasma Sources Sci. Technol.* **21** 055033
- [5] Sukharev S A 1999 *Third International Conference on Solid State Lasers for Application to Inertial Confinement Fusion* Monterey, CA, USA, June 7, 1998 pp12–24
- [6] Zhu J Q 2006 *Chin. J. Nature* **28** 271 (in Chinese) [朱健强 2006 自然杂志 **28** 271]
- [7] Zheng W G, Zhang X M, Wei X F, Yu H W, Jing F, Sui Z, Li M Z, Hu D X, He S B, Peng Z T, Feng B, Zhou H, Guo L F, Li X Q, Su J Q, Zhao R C, Yang D, Zheng K X, Yuan X D 2008 *J.Phys.: Conf. Ser.* **112** 32009
- [8] Zhuang D K, Lin Z Q, Guan X P, Zhu J, Ma W X, Liu F Q, Wang D L 2002 *Acta Opt. Sin.* **22** 582 (in Chinese) [庄大奎, 林尊琪, 管小鹏, 朱俭, 马伟新, 刘凤翹, 王德林 2002 光学学报 **22** 582]

- [9] Guo A L, Zhu H D, Yang Z P, Li E D, Xie X L, Zhu J Q, Lin Z Q, Ma W X, Zhu J 2013 *Acta Opt. Sin.* **33** 105 (in Chinese) [郭爱林, 朱海东, 杨泽平, 李恩德, 谢兴龙, 朱健强, 林尊琪, 马伟新, 朱俭 2013 光学学报 **33** 105]
- [10] Manes K R, Spaeth M L, Adams J J, Bowers M W 2016 *Fusion Sci. Technol.* **69** 146
- [11] Lin X D 2002 *M. S. Dissertation* (Chengdu: Sichuan University) (in Chinese) [林晓东 2002 硕士学位论文 (成都: 四川大学)]
- [12] Chen B S, Zhang J Y, Zhang Y L, Liu D A, Zhu J Q 2012 *Laser Optoelectron. Prog.* **49** 010002 (in Chinese) [陈宝算, 张军勇, 张艳丽, 刘德安, 朱健强 2012 激光与光电子学进展 **49** 010002]
- [13] Liu L Q, Jing F, Peng Z T, Zhu Q H, Cheng X F, Jiang D B, Zhang Q Q, Liu H J 2001 *National Young Academic Exchange of Laser Science and Technology* Gui Yang, China, Oct. 1, 2001 p387 (in Chinese) [刘兰琴, 景峰, 彭志涛, 朱启华, 程晓峰, 蒋东滨, 张清泉, 刘红婕 2001 全国激光科学技术青年学术交流会中国贵阳, 2001 年 10 月 1 日第 387 页]
- [14] Zhou L D, Su J Q, Li P, Liu L Q, Wang W Y, Wang F, Mo L, Cheng W Y, Zhang X M 2009 *Acta Phys. Sin.* **58** 6279 (in Chinese) [周丽丹, 粟敬钦, 李平, 刘兰琴, 王文义, 王方, 莫磊, 程文雍, 张小民 2009 物理学报 **58** 6279]
- [15] Zhou L D, Su J Q, Li P, Wang W Y, Liu L Q, Zhang Y, Zhang X M 2011 *Acta Phys. Sin.* **60** 024202 (in Chinese) [周丽丹, 粟敬钦, 李平, 王文义, 刘兰琴, 张颖, 张小民 2011 物理学报 **60** 024202]
- [16] Zhou L D, Su J Q, Liu L Q, Wang W Y, Wang F, Mo L, Li P, Zhang X M 2009 *High Power Laser and Particle Beams* **21** 326 (in Chinese) [周丽丹, 粟敬钦, 刘兰琴, 王文义, 王方, 莫磊, 李平, 张小民 2009 强激光与粒子束 **21** 326]
- [17] Huang W F, Li X C, Wang J F, Lu X H, Zhang Y Q, Fan W, Lin Z Q 2015 *Acta Phys. Sin.* **64** 087801 (in Chinese) [黄文发, 李学春, 王江峰, 卢兴华, 张玉奇, 范薇, 林尊琪 2015 物理学报 **64** 087801]
- [18] Sun X Y, Lei Z M, Lu X Q, Fan D Y 2014 *Acta Phys. Sin.* **63** 134201 (in Chinese) [孙晓燕, 雷泽民, 卢兴强, 范滇元 2014 物理学报 **63** 134201]
- [19] Zheng W, Lü K 2012 *Proc. SPIE* **8417** 841736
- [20] Liu H J, Jing F, Zuo Y L, Peng Z T, Hu D X, Zhang C L, Zhou W, Li Q, Zhang K, Jiang L, Zuo M, Sun Z Q 2006 *Acta Phot. Sin.* **35** 1464 (in Chinese) [刘红婕, 景峰, 左言磊, 彭志涛, 胡东霞, 张春玲, 周维, 李强, 张昆, 姜蕾, 左明, 孙志强 2006 光子学报 **35** 1464]
- [21] Peng X Y 2008 *M. S. Dissertation* (Shanghai: Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics) (in Chinese) [庞向阳 2008 硕士学位论文 (上海: 上海光学精密机械研究所)]
- [22] Wan D J 2007 *M. S. Dissertation* (Mianyang: China Academy of Engineering Physics) (in Chinese) [代万俊 2007 硕士学位论文 (绵阳: 中国工程物理研究院)]



# Influence of phase error of optical elements on optical path design of laser facilities\*

Xu Lin-Bo<sup>1)2)</sup> Lu Xing-Qiang<sup>1)†</sup> Lei Ze-Min<sup>1)2)</sup>

1) (*Key Laboratory on High Power Laser and Physics, Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China*)

2) (*University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China*)

( Received 20 August 2017; revised manuscript received 21 September 2017 )

## Abstract

Optical path design of high power laser facilities should consider several optimization measures such as those that are related to image transmission, ghost avoidance, and stray light management. According to the diffraction optical propagation theory, we study the the influences of wavefront characteristics of large aperture optical components on optimizing the design parameters of optical path in view of increasing the output load. The results show that the arrangement interval of the last stage optical drive can be very useful in improving the output load of the laser facilities if it is controlled to be over 6 m long. In general, a large aperture optical element with a phase error peak value of  $0.34\lambda$  can reduce the near field beam quality of a high-power laser by about 10% and give rise to a maximum decrease of about 21% when the phase error reaches  $1.36\lambda$ . Superposition of multiple optical elements with different phase error distribution characteristics can reduce the negative effect of the mid frequency phase error. However, the nonlinear effect of large aperture optical components can aggravate the influence of the intermediate frequency phase error on the damage resistance capacity of the device. Under the premise that the damage threshold of the large caliber optical element is limited to  $20 \text{ J/cm}^2$ , the using of a laser facility with a compact optical path, with an input laser energy density controlled to be below  $16.8 \text{ J/cm}^2$ , will avoid damaging the optical components efficiently. A relatively flexible optical layout can further increase the average energy density of the final output laser and is very beneficial to the enhancing of the output load capacity of the laser facility.

**Keywords:** diffraction optics, component wavefront, optical layout design

**PACS:** 42.25.Fx, 42.15.Dp, 42.55.-f, 42.60.Jf

**DOI:** [10.7498/aps.67.20171877](https://doi.org/10.7498/aps.67.20171877)

---

\* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 60707019).

† Corresponding author. E-mail: [xingqianglu@siom.ac.cn](mailto:xingqianglu@siom.ac.cn)