

高功率激光驱动器终端光学组件研究现状

李富全 韩伟* 王芳 张小民 魏晓峰 冯斌 向勇 贾怀庭 李恪宇

(中国工程物理研究院激光聚变研究中心, 四川 绵阳 621900)

摘要 终端光学组件是高功率激光驱动器的核心单元之一,承担着频率转换、光束聚焦、谐波分离和测量取样等功能。通过光学和结构设计可以实现终端光学组件的基本功能,满足高功率激光驱动器开展各项实验的基本要求,但是激光导致的终端元件损伤问题和强紫外光传输带来的若干非线性效应是制约终端光学组件总体性能的关键问题。综述了国内外高功率激光驱动器终端光学组件的研究历程,分析了终端光学组件面临的主要问题,并探讨了终端光学组件设计的主要思路。

关键词 激光器;高功率激光驱动器;终端光学组件;激光损伤;非线性效应;设计

中图分类号 TN248 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/LOP50.060002

Research Status of Final Optics Assembly in High-Power Laser Facility

Li Fuquan Han Wei Wang Fang Zhang Xiaomin Wei Xiaofeng Feng Bin
Xiang Yong Jia Huaiting Li Keyu

(Laser Fusion Research Center, China Academy of Engineering Physics, Mianyang, Sichuan 621900, China)

Abstract Final optics assembly (FOA) is one of the most important parts in high-power laser facilities. The FOA primary functions include frequency conversion, focusing, wavelength separation and diagnostic beam sampling, which can be realized through optimized FOA optical and structural design. Such a design can meet the basic requirements of high-power laser facilities for different experiments. However, laser-induced damage of final optics and several nonlinear effects resulting from high intensity ultraviolet (UV) laser pulses are major concern during FOA design, construction and operation. This paper reviews the development process of FOA in high power laser facilities, analyzes the core consideration, and discusses the main solution in FOA design.

Key words lasers; high-power laser facility; final optics assembly; laser-induced damage; nonlinear effect; design

OCIS codes 140.3580; 140.3330; 190.5890

1 引言

高功率激光驱动器是开展高能量密度物理和激光惯性约束聚变研究的有力工具^[1,2],世界各大国纷纷建造各自的兆焦耳高功率激光驱动器,如美国2009年建成的国家点火装置(NIF)^[3],法国正在建设的兆焦耳激光装置(LMJ)^[4]和我国的神光系列装置^[5]。

兆焦耳高功率激光驱动器通常由上百路激光构成,利用钕玻璃作为增益介质,采用多程放大技术,以获得兆焦耳级的能量输出。如美国的NIF装置由192路激光组成,可产生1.8 MJ(对于3.5 ns约500 TW的功率)351 nm的激光能量输出。其单束激光始于主振荡器和激光二极管抽运的光纤放大器,产生纳焦耳级脉冲;经过脉冲整形后,进入预放大器将脉冲能量放大至焦耳量级;然后,进入由功率放大器和多程主放大器组成的主激光系统,将单束激光能量进一步提升至数十千焦耳量级;最后进入终端光学组件(FOA)^[6]将激光波长从1053 nm转换至351 nm,并聚焦至真空靶室靶点,获得 10^{14} W/cm²以上的聚焦功率密度。

收稿日期: 2013-01-26; 收到修改稿日期: 2013-03-01; 网络出版日期: 2013-05-14

作者简介: 李富全(1974—),男,副研究员,主要从事高功率激光驱动器靶场光束控制技术方面的研究。

E-mail: bachangzu@163.com

* 通信联系人。E-mail: tonyhan2000@163.com

终端光学组件是高功率激光驱动器的核心单元之一,它位于整个激光链路的末端,实现激光频率转换,完成激光聚集和精确定位,提供各种极端状态的实验条件。作为激光驱动器的输出界面,终端光学组件体现了整个驱动器的综合性能,并直接决定了物理实验的效果,其功能和性能要求是激光驱动器中最为复杂的单元之一。另一方面,终端光学组件又是整个激光链路中承受三倍频激光通量最高的部位,也是最易发生激光损伤的区域,一直以来,终端光学组件都是激光驱动器中的薄弱环节和瓶颈单元。因此,终端光学组件的设计、研制和运行维护是高功率激光驱动器的主要科学技术和工程问题之一。本文综述了国内外主要高功率激光驱动器终端光学组件的研究历程和经验,分析探讨了终端光学组件研制中的核心问题,为我国兆焦耳激光驱动器的设计和研制提供借鉴。

2 终端光学组件主要功能与组成

高功率激光驱动器通常由前端系统、预放大系统、主放大系统、光束编组站、终端光学组件和真空靶室等单元组成,如图 1 所示。其中,终端光学组件位于光束编组站之后,真空靶室之前,其主要功能如下:

- 1) 频率转换:将中心波长为 1053 nm 的基频光转换为 351 nm 的三倍频光^[7]。
- 2) 光束聚焦:将三倍频光聚焦至真空靶室靶点。
- 3) 谐波分离:由于 1053 nm 至 351 nm 的频率转换过程不可能实现 100% 的能量转换,仍然剩余一定的基频光和波长为 527 nm 的二倍频光,为了不影响物理实验,必须将剩余基频光和二倍频光在靶点位置与三倍频光实现分离。
- 4) 测量取样:抽取一定份额(通常约 2%)的三倍频光进入激光参数测量模块进行光束取样测量。

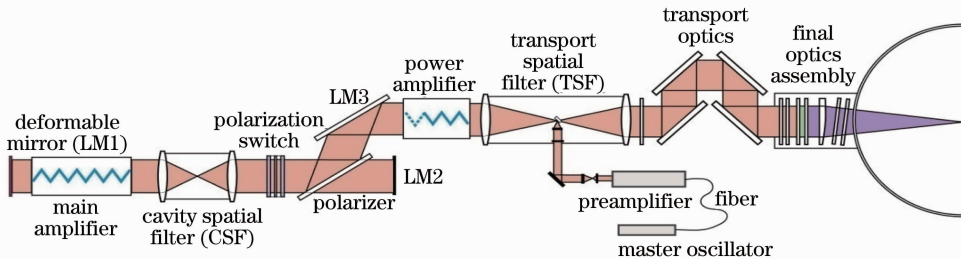


图 1 高功率激光驱动器的基本组成

Fig. 1 Illustration of high power laser facility

频率转换、光束聚焦、谐波分离和测量取样是终端光学组件的核心功能,除此之外,终端光学组件的其他功能要求还包括焦斑整形(通过相位元件和偏振均化等措施均匀聚焦光斑)、真空隔离(隔离终端光学组件与真空靶室)和碎片防护(阻挡靶碎片损伤终端元件)等。

针对上述功能要求,除机械结构外,终端光学组件的主要组成包括:

- 1) KDP/DKDP 晶体,包括一块 KDP 二倍频晶体和一块 DKDP 三倍频晶体,以实现频率转换。宽带光条件下,可能需要两块 DKDP 三倍频晶体。
- 2) 熔石英元件,包括透镜、光束取样光栅、连续相位板(CPP)和真空窗口等。

3 国外终端光学组件研究历程与现状

美国 NIF 和法国 LMJ 是兆焦耳高功率激光驱动器的典型代表,其中 NIF 已于 2009 年建成并投入运行,而 LMJ 尚在建设过程中。下面着重介绍 NIF 终端光学组件的研究历程与现状。

NIF 由 192 路激光构成,经过光束编组后,四束激光组成 2×2 集束,其中每束激光经过一套集成光学模块(IOM)完成频率转换、谐波分离和光束聚焦,然后进入真空靶室,四套集成光学模块构成一套终端光学组件。NIF 终端光学组件的研制经历了反复的设计更改和集成验证,于 2007 年完成最终定型,定型后的终端光学组件如图 2 所示。

NIF 定型后的终端光学组件工作在三种气氛环境下:1) 基频窗口前,为略高于大气的充氩管道环境;2) 基频窗口至主屏蔽片之间,即集成光学模块内部,处于 1333 Pa 动态气氛环境;3) 主屏蔽片之后,为靶室高

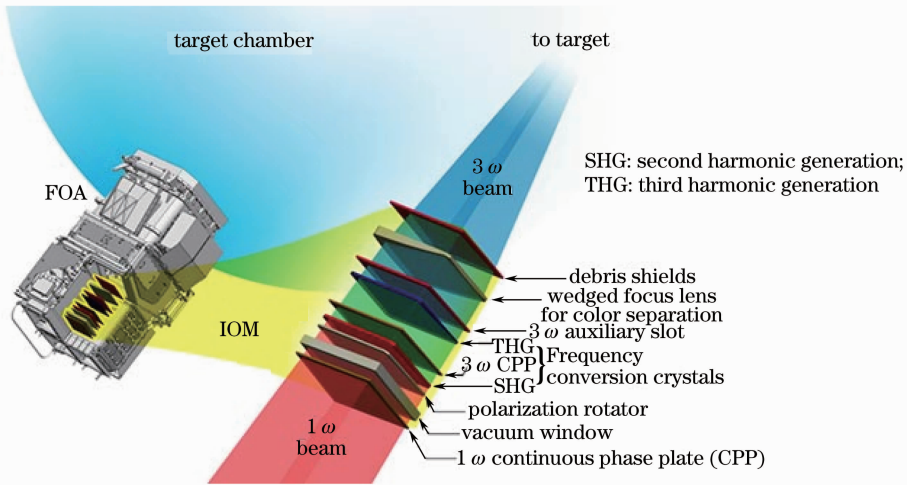


图 2 NIF 装置 2007 年定型终端光学组件

Fig. 2 NIF final optics assembly whose design was finalized in 2007

真空环境。集成光学模块内安装了 8 块大口径 ($43\text{ cm} \times 43\text{ cm}$) 光学元件, 它们实现的功能如下:

- 1) 连续相位板: 实现三倍频焦斑整形, 可位于基频光段 (基频窗口前), 二倍频光段 (二倍频晶体后) 或三倍频光段 (三倍频晶体后)。
- 2) 基频窗口: 实现光束传输管道内氦气环境与集成光学模块内 1333 Pa 气氛环境的隔离。
- 3) 偏振旋转器: 90° 旋转 2×2 集中两束激光的偏振态, 减少四束激光在靶点重合时的相干性, 实现偏振匀滑。
- 4) 二倍频晶体和三倍频晶体: 实现基频光至三倍频光的频率转换。
- 5) 离轴楔形透镜: 实现光束聚焦和色分离。
- 6) 主屏蔽片与光束取样光栅: 实现光束取样以及集成光学模块与真空靶室的隔离, 这两项功能集成在一块熔石英元件上。元件后表面刻蚀了约 20 nm 深的光栅, 少量三倍频光经光栅 -1 级衍射后进入三倍频光束诊断包, 以测量三倍频光的能量和时间波形。
- 7) 次屏蔽片: 厚度 2 mm , 由氟硼酸盐材料 (B33) 制成, 方便更换, 用以阻挡打靶产生的碎片或者蒸汽污染损伤上游光学元件。

NIF 终端光学组件的研制经历了若干次的集成验证和设计更改。1994 年 NIF 完成概念设计后, 于 1998 年在其原型样机 Beamlet^[8] 上进行了终端光学组件的首次集成验证, 暴露出严重的紫外 (UV) 损伤问题, 终端光学组件在设计运行通量 8 J/cm^2 (3 ns , 351 nm) 下连续考核了 23 发次, 紫外元件出现了严重的表面损伤, 如图 3(a) 所示^[9,10]。

通过对紫外元件损伤原因的分析, NIF 终端光学组件进行了相应的设计更改^[11], 如图 3(b) 所示, 包括用楔形透镜替代色分离光栅 (CSG), 用连续相位板取代相息相位板 (KPP), 终端光学组件内增加 1333 Pa 的气

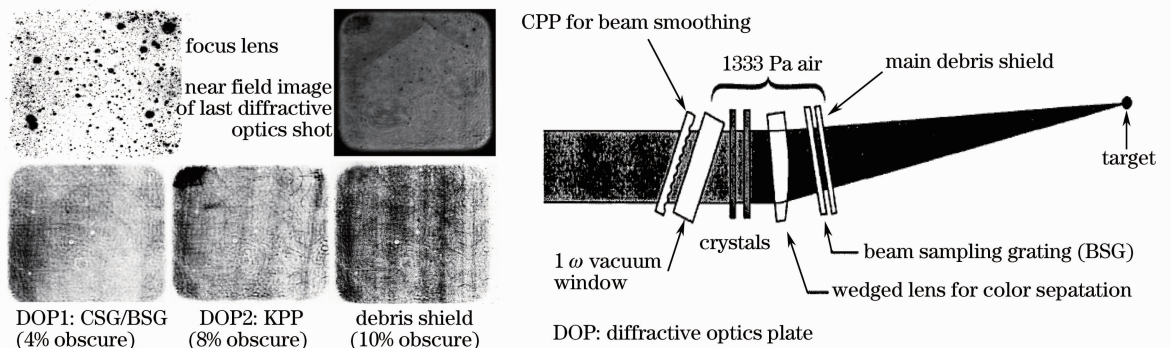


图 3 (a) NIF 终端光学组件首次集成验证暴露出的紫外损伤现象和 (b) 终端光学组件第一次设计更改

Fig. 3 (a) UV optics damage in first FOA experiment and (b) NIF new final optics assembly design after the experiment

氛环境,以及紫外元件实现在线可替换等。

2006年在NIF精密诊断系统(PDS)上开展了终端光学组件的第二次集成验证^[12],实验中进一步暴露出若干问题,如上游光学元件相位型缺陷引起的热像损伤、熔石英元件多波长交叉相位调制引起的自聚焦成丝以及光束取样光栅中受布里渊散射引起的 Zig-Zag 损伤等。针对上述实验结果,NIF重新优化排布了终端光学元件的间距,如图4所示,避免热像损伤,并将楔形透镜由平凸改为凸平设计。重新设计后的终端光学组件在PDS上开展的集成验证表明,改进后的终端光学组件能有效避免热像型紫外损伤。2007年NIF完成了其终端光学组件的设计定型。

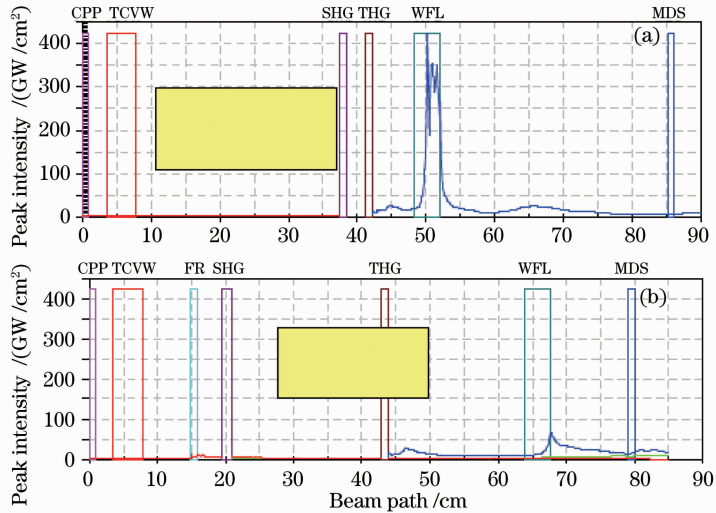


图4 终端光学组件设计更改前后的光路对比。(a)更改前;(b)更改后

Fig. 4 Comparison between NIF final optics assembly (a) before and (b) after modification

NIF于2009年3月正式建成并投入运行。截至目前,NIF运行表明其终端光学组件能满足NIF常规运行的功能和性能需求,然而终端光学组件内的紫外元件,特别是熔石英楔形透镜限制了NIF的最大输出能量和功率。紫外元件的激光损伤问题导致NIF三倍频3 ns高斯脉冲最大运行通量不能超过 8 J/cm^2 ,而强紫外光非线性传输引起的小尺度自聚焦效应导致NIF三倍频1 ns平顶脉冲峰值功率密度不能超过 3.125 GW/cm^2 ,即 $750 \text{ TW}^{[13]}$ 。

NIF终端光学组件的研制历程和现状充分说明紫外损伤与非线性效应不仅是终端光学组件设计的两大核心问题,也是制约高功率激光驱动器总体性能的关键问题。

4 国内终端光学组件研究现状

我国高功率激光驱动器研究始于二十世纪六七十年代,陆续建成了万焦耳级的神光II装置和神光III原型装置,正在建设十万焦耳级的神光III主机装置。

神光III原型装置终端光学组件现在的光路和结构设计如图5所示。终端光学组件分为倍频模块、透镜模块和过渡段模块,组件工作于1000 Pa的洁净空气环境,并通过基频窗口与光束传输管道的洁净大气相隔离,通过三倍频真空隔离片与靶室的高真空环境相隔离。终端光学组件包含7块大口径($33 \text{ cm} \times 33 \text{ cm}$)光学元件,实现如下功能:

- 1) I型二倍频KDP晶体和II型三倍频KDP晶体将基频光转换为三倍频光。
- 2) 熔石英打靶透镜将三倍频光束聚焦至靶点。打

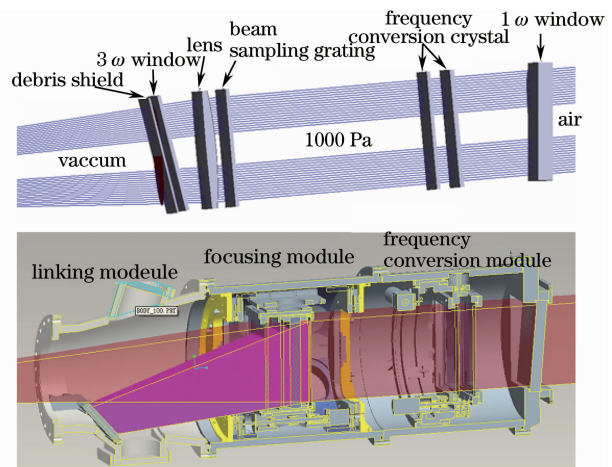


图5 神光III原型装置终端光学组件光路和结构设计

Fig. 5 Optics and structural design of final optics assembly for Shenguang III prototype facility

靶透镜为非楔形透镜,采用空间纵向色分离方案,即在光束中心挖孔 $9\text{ cm}\times 9\text{ cm}$,利用打靶透镜色差,在靶点形成局部干净的三倍频焦斑,实现三倍频光与剩余基频光和二倍频光在靶点的色分离。

3) 熔石英光束取样光栅,实现光束测量取样。

4) 熔石英基频窗口与三倍频真空隔离片分别将终端光学组件内部与光束传输管道和靶室隔离,并在组件内部形成 1000 Pa 的洁净空气环境,避免化学膜退化。

5) B33 屏蔽片,用以阻挡打靶产生的碎片或者蒸汽污染损伤上游光学元件。

神光 III 原型装置终端光学组件同样经历了集成验证和设计更改的过程。2006 年原型装置建成并开展全装置的首次集成验证,终端光学组件暴露出一定程度的紫外损伤和真空污染问题,主要原因和相应的设计更改内容包括:

1) 终端光学组件光学设计不合理,导致打靶透镜后表面剩余反射光聚焦并损伤二倍频晶体和基频真空窗口;由于元件和结构加工已经完成,光学设计难以更改,所以在倍频晶体后光路中心支撑小的吸收体阻挡剩余反射光,同时兼顾空间纵向色分离的中心挖孔。

2) 杂散光未吸收,导致屏蔽片表面剩余反射光入射至终端光学组件内壁,产生金属溅射物,污染光学元件。针对这一问题,在终端光学组件内壁相应位置安装吸收体管理剩余反射光。

3) 终端光学组件与靶室未隔离,导致靶室上各种实验设备挥发的有机物成分扩散至终端光学组件内,污染光学元件。针对这一问题,在终端光学组件后部,增加三倍频真空隔离片实现与靶室的真空隔离。

4) 终端光学组件工作于高真空环境下,导致元件表面化学膜易退化。为此,在基频窗口与三倍频真空隔离片间建立起 1000 Pa 的洁净气氛环境。

改进后的终端光学组件有效地解决了组件污染问题,缓解了紫外损伤问题,基本满足了神光 III 原型装置稳定运行的需要。

神光 III 主机装置终端光学组件采用了与原型装置终端光学组件相似的技术路线。由于主机装置光束口径更大($36\text{ cm}\times 36\text{ cm}$),三倍频运行通量更高($3.5\text{ J/cm}^2, 3\text{ ns}$),因此,主机装置终端光学组件放弃了光束中心挖孔的空间纵向色分离方案,使用楔形透镜进行光束聚焦和色分离,以提高激光能量的利用率。此外,增加了光学元件的在线可替换功能,以实现损伤元件的及时更换。

此外,在主机装置终端光学组件的首次集成验证中,KDP 三倍频晶体出现了横向受激拉曼散射效应导致的“双肺”型体损伤,光束取样光栅出现了受激布里渊散射效应导致的前表面损伤和 Zig-Zag 型圆弧状损伤^[14]。因此,在主机装置工程终端光学组件中,采用了 KDP 三倍频晶体侧面抛光斜化抑制晶体中横向受激拉曼散射效应、增加激光带宽抑制熔石英元件中的受激布里渊散射效应等措施。

神光 III 原型装置和主机装置终端光学组件的研制历程表明污染问题、紫外损伤问题和受激拉曼散射、受激布里渊散射等非线性效应是终端光学组件中的主要问题,这些问题应在终端光学组件的设计中给予重点考虑。

5 终端光学组件设计讨论

从 NIF 和神光 III 原型及主机装置终端光学组件的研制历程和现状来看,高功率激光驱动器终端光学组件的设计和研制包括两个层次的问题:1) 基本功能的实现,如频率转换、光束聚焦、谐波分离和测量取样等,这些功能可以通过光学和结构设计实现;2) 高效性能的实现,如前所述,制约终端光学组件总体性能的关键问题是紫外损伤^[15~17]和非线性效应两大问题,这两大问题是终端光学组件设计和研制的重点和核心。

终端光学组件中的非线性效应包括纵向非线性效应(如激光长程传输受激旋转拉曼散射^[18~20]、小尺度自聚焦^[21~23]和热像)和横向非线性效应(如 KDP 晶体受激拉曼散射^[24~27]和熔石英元件受激布里渊散射^[28~30]等)。非线性效应与激光强度有关,也与终端元件介质厚度和元件排布有关,它们可以通过优化终端光学组件光学设计来缓解。除光学元件自身的抗激光损伤性能外,杂散光^[31~33]、环境因素以及元件紧密排布造成的级联损伤等^[34,35]均是引起紫外损伤的重要方面,这些问题可以通过终端光学组件的光学和结构设计来避免。

在终端光学组件运行通量一定的情况下,通过缩短激光传输的介质厚度可以抑制纵向非线性效应,如真空环境可避免激光在空气中传输引起的受激旋转拉曼散射效应,衍射元件将终端光学组件的若干功能集成

到少量光学元件上,减少紫外元件的数量。然而,真空环境会导致化学膜透射率降低,增加元件损伤风险,衍射元件表面微结构引起光束调制,加大下游元件损伤的风险,且衍射元件自身损伤阈值较低。可见,上述抑制非线性效应的措施将加大紫外损伤的风险。

另一方面,将前述 NIF 和神光Ⅲ原型及主机装置的“紧凑型”终端光学组件更改为“开放型”终端光学组件,将光学元件放置于大气环境,并拉大元件排布的间距,可能有利于缓解紫外损伤问题。首先,光学元件工作于大气环境,实现了与靶室的真空隔离,解决了真空污染和化学膜退化的问题,而且环境控制也容易实现;其次,拉大元件排布间距,使二阶以上的杂散光发散,不至于形成鬼光损伤光学元件,鬼光数量大大减少,而且上游元件损伤也不会对下游元件产生直接的污染;另外,拉大元件排布间距,还能够缓解级联热像的影响,NIF 的设计更改已经说明了这个问题。但是“开放型”终端光学组件并不是没有缺点,它可能引起长程传输受激旋转拉曼散射效应和三倍频介质厚度增加等问题,所以“开放”只能是有限度的,需要控制在上述非线性效应的阈值范围内。可见,终端光学组件的优化设计需要在抑制非线性效应与缓解激光损伤两大制约因素间获得最佳的平衡。

6 结束语

终端光学组件是高功率激光驱动器的核心单元之一,承担着频率转换、光束聚焦、谐波分离和测量取样等功能。从美国 NIF 终端光学组件和我国神光Ⅲ原型及主机装置终端光学组件的研制经验和现状来看,终端光学组件的基本功能可以通过光学和结构设计来实现,这不是终端光学组件设计和研制中的难点。制约终端光学组件的核心问题在于紫外损伤与非线性效应,终端光学组件的设计和研制应设法缓解与抑制紫外损伤和非线性效应,并在两者之间实现平衡。

参 考 文 献

- 1 J. Lindl. Inertial Confinement Fusion: the Quest for Ignition and Energy Gain Using Indirect drive[M]. Berlin: Springer-Verlag, 1998
- 2 W. F. Krupke. Solid state lasers for application to inertial confinement fusion[C]. *SPIE*, 1995, 2633: 2~12
- 3 G. H. Miller, E. I. Moses, C. R. Wuest. The National Ignition Facility[J]. *Opt. Engng.*, 2004, **43**(12): 2841~2853
- 4 C. Cavaller. Inertial fusion with the LMJ[C]. *Plasma Phys. Control. Fusion*, 2005, **47**: B389~B403
- 5 X. T. He, W. Y. Zhang. Inertial fusion research in China[J]. *Eur. Phys. J. D*, 2007, **44**(2): 227~231
- 6 P. Wegner, J. Auerbach, T. Biesiada *et al.*. NIF final optics system: frequency conversion and beam conditioning[C]. *SPIE*, 2004, 5341: 180~189
- 7 P. J. Wegner, M. A. Hennesian, D. R. Speck *et al.*. Harmonic conversion of large-aperture 1.05- μm laser beams for inertial-confinement fusion research[J]. *Appl. Opt.*, 1992, **31**(30): 6414~6426
- 8 B. M. Van Wouterghem, J. R. Murray, J. H Campbell *et al.*. Performance of a prototype for a large-aperture multipass Nd:glass laser for inertial confinement fusion[J]. *Appl. Opt.*, 1997, **36**(21): 4932~4953
- 9 J. T. Hunt. National Ignition Facility Performance Review 1998 [R]. Livermore: Lawrence Livermore National Laboratory, 1999
- 10 J. T. Hunt. National Ignition Facility Performance Review 1999 [R]. Livermore: Lawrence Livermore National Laboratory, 2000
- 11 A. K. Burnham, L. Hackel, P. Wegner *et al.*. Improving 351-nm Damage Performance of Large-Aperture Fused Silica and DKDP Optics[R]. Livermore: Lawrence Livermore National Laboratory, 2002
- 12 T. G. Parham, S. Azevedo, J. Chang *et al.*. Large Aperture Optics Performance[R]. Livermore: Lawrence Livermore National Laboratory, 2009
- 13 Lawrence Livermore National Laboratory. National Ignition Facility User Guide[R]. Livermore: Lawrence Livermore National Laboratory, 2012
- 14 Han Wei, Huang Wangin, Li Keyu *et al.*. Stimulated Brillouin scattering damage of large-aperture fused silica grating[J]. *Chin. Phys. Lett.*, 2010, **27**(12): 124205
- 15 J. Wong, J. L. Ferreira, E. F. Lindsey *et al.*. Morphology and microstructure in fused silica induced by high fluence ultraviolet 3 ω (355 nm) laser pulses[J]. *J. Non-Cryst. Solids*, 2006, **352**(3): 255~272
- 16 A. K. Burnham, M. Runkel, M. D. Feit *et al.*. Laser-induced damage in deuterated potassium dihydrogen phosphate[J]. *Appl. Opt.*, 2003, **42**(27): 5483~5494
- 17 H. Bercegol, P. Bouchut, L. Lameignere *et al.*. The impact of laser damage on the lifetime of optical components in fusion

- lasers[C]. *SPIE*, 2004, **5273**: 312~324
- 18 Mark Hessian, C. D. Swift, J. R. Murray. Summary of Stimulated Raman Scattering Experiments in the Nova Air-Path and Projected Nova and Nova II System Performance Limits[R]. Livermore: Lawrence Livermore National Laboratory, 1985
- 19 E. Bordenave, T. Chies. Numerical simulations of stimulated Raman scattering in LIL transport section with Miró propagation code and comparison with ENOLIT diagnostic results[J]. *J. Phys. IV France*, 2006, **133**: 661~663
- 20 Wang Jing, Han Wei, Zhou Lidan *et al.*. Experimental research on stimulated rotational Raman scattering in air with high-power laser[J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, **31**(s1): s100410
王 静, 韩 伟, 周丽丹 等. 强激光长程空气传输受激转动拉曼散射效应实验研究[J]. *光学学报*, 2011, **31**(s1): s100410
- 21 D. Milam, J. T. Hunt, K. R. Manes *et al.*. Modeling of Filamentation Damage Induced in Silica by 351-nm Laser Pulses [R]. Lawrence Livermore National Laboratory, 1996
- 22 Hervé Bercegol, Alain Boscheron, J.-Michel Di-Nicola *et al.*. Laser damage phenomena relevant to the design and operation of an ICF laser driver[J]. *J. Physics*, 2008, **112**(3): 032013
- 23 Chen Baosuan, Zhang Junyong, Zhang Yanli *et al.*. Study of small-scale self-focusing in high-power laser system[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2012, **49**(1): 010002
陈宝算, 张军勇, 张艳丽 等. 高功率激光系统中的小尺度自聚焦研究[J]. *激光与光电子学进展*, 2012, **49**(1): 010002
- 24 R. A. Sacks, C. E. Barker, R. B. Ehrlich *et al.*. Stimulated Raman Scattering in Large-Aperture, High-Fluence Frequency-Conversion Crystals[R]. Livermore: Lawrence Livermore National Laboratory, 1992
- 25 C. E. Barker, R. A. Sacks, B. M. V. Wonterghem *et al.*. Transverse stimulated Raman scattering in KDP[C]. *SPIE*, 1995, **2633**: 501~505
- 26 Stavros G. Demos, Rajesh N. Raman, Steven T. Yang *et al.*. Measurement of the Raman scattering cross section of the breathing mode in KDP and DKDP crystals[J]. *Opt. Express*, 2011, **19**(21): 21050~21059
- 27 Wang Jing, Zhang Xiaomin, Li Fuquan *et al.*. Risk evaluation of transverse stimulated Raman scattering in large-aperture, high fluence KDP crystal[J]. *Chinese J. Lasers*, 2011, **38**(5): 0502011
王 静, 张小民, 李富全 等. 大口径 KDP 晶体紫外光横向受激拉曼散射风险判据研究[J]. *中国激光*, 2011, **38**(5): 0502011
- 28 J. M. EGGLESTON, M. J. KUSHNER. Stimulated Brillouin scattering parasitics in large optical windows[J]. *Opt. Lett.*, 1987, **12**(6): 410~412
- 29 J. R. Murray, J. R. Smith, R. B. Ehrlich *et al.*. Experimental observation and suppression of transverse stimulated Brillouin scattering in large optical components[J]. *J. Opt. Soc. Am. B*, 1989, **6**(12): 2402~2422
- 30 D. T. Kyrakis, T. L. Weiland. Determination of SBS induced damage limits in large fused silica optics for intense, time varying laser pulses[C]. *SPIE*, 1991, **1441**: 469~477
- 31 J. L. Hendrix, J. Schweyen, J. Rowe *et al.*. Ghost Analysis Visualization Techniques for Complex Systems: Examples from the NIF Final Optics Assembly[R]. Livermore: Lawrence Livermore National Laboratory, 1998
- 32 H. Benard, G. Mathieu, N. Ferriou *et al.*. Simulation and analysis of ghost images for the megajoule laser[C]. *SPIE*, 1999, 3492: 321~327
- 33 Mo Lei, Su Jingqin, Wang Fang *et al.*. CAD of the modeling stray light in the high power laser system[J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(s1): 231~234
莫 磊, 粟敬钦, 王 方 等. 高功率激光系统中杂散光分析的计算机辅助设计[J]. *中国激光*, 2009, **36**(s1): 231~234
- 34 M. D. Feit, C. D. Boley. Modeling the Interaction of the NIF Laser Beam with Laser Components[R]. Livermore: Lawrence Livermore National Laboratory, 1999
- 35 Zhao Dongfeng, Wang Li, Lin Zunqi *et al.*. Experimental study of 351 nm propagation with high fluence on No. 9 system of SG-II laser facility[J]. *Chinese J. Lasers*, 2011, **38**(7): 0702001
赵东峰, 王 利, 林尊琪 等. 在神光 II 装置第九路系统开展 351 nm 波长激光高通量传输的实验研究[J]. *中国激光*, 2011, **38**(7): 0702001