

神光-Ⅱ装置三倍频实验中靶场单元技术的改进^{*}

赵东峰, 戴亚平, 黄关龙, 邵平, 华能, 尹宪华

(中国科学院上海光学精密机械研究所 高功率激光物理国家实验室, 上海 201800)

摘 要: 主要介绍了为了满足神光-Ⅱ高功率激光装置三倍频光(351nm, 3 ω)的物理实验要求, 靶场三倍频模拟光源和瞄准监视系统两个主要单元技术的改进。即三倍频模拟光源由基频光(1.053 μ m, 1 ω)通过腔外的 KTP+BBO 晶体倍频获得, 再经八路分光系统和主激光耦合; 瞄准监视系统由透射式光学系统改进为反射式光学系统, 避免原系统存在较大的色差, 提高瞄准精度。

关键词: 靶场单元技术; 三倍频; 模拟光; 瞄准监视系统

中图分类号: TN248

文献标识码: A

神光-Ⅱ高功率激光装置是我国自行研制的用于惯性约束核聚变(Inertial Confinement Fusion, ICF)研究的大型激光装置之一。对于 ICF 物理研究来说, 较短的激光波长有利于提高激光与等离子体的耦合效率, 并且只产生较少的超热电子^[1]。所以世界上各国用于惯性约束聚变的高功率激光装置都是向短波长打靶的方向发展。神光-Ⅱ装置在完成了基频光(1.053 μ m, 1 ω)打靶实验后, 于 2000 年下半年开始进行三倍频光(351nm, 3 ω)打靶实验的准备工作, 2001 年正式进行三倍频光打靶实验。

对于高功率激光装置来说, 在从 1 ω 打靶到 3 ω 打靶的转变过程中, 所要做的工作不仅包含三倍频晶体研制、加工和使用, 以及光学元件的更换等工作, 还包括测量、监视、控制等其他单元技术的改进。特别是对于高功率激光装置的终端——靶场来说, 所要进行的技术改进更多, 除了各种反射、透射光学元件材料和膜层的改变以外, 还包括一些用于靶定位、靶瞄准等目的的单元技术的改进。其中最主要的就是用于靶瞄准的三倍频模拟光源的研制和用于靶定位瞄准的瞄准监视系统的改造。

1 三倍频模拟光源的研制

与主激光同轴、同波面、同波长的模拟光系统是实现靶场光路调整、靶位精密瞄准和精密调焦的重要保证。模拟光源对靶场光路中测试仪器的对准调整, 3 ω 晶体光轴的精密调试, 也同样十分重要。

神光-Ⅱ高功率激光装置中 ICF 由基频光打靶过渡到三倍频光打靶后, 原有的基频模拟光源已经不能完全满足装置上进行的各种物理实验的要求。一方面 X 光激光实验和状态方程实验在大多数情况下仍然采用基频光打靶方式; 另一方面, 今后的 ICF 实验主要采用三倍频光打靶方式。因此, 如何同时满足多种物理实验对模拟光的要求, 实现精确瞄准和精确靶镜调焦就成了神光-Ⅱ装置靶场运行工作中的一项重要课题, 特别是三倍频光打靶时与主激光同轴、同波面模拟光的提供更是亟待解决的关键问题。目前, 这也是国内外高功率激光装置都面临的一项重要的靶场单元技术问题。

由于大多数透射光学材料的折射率在近紫外波段和红外波段的差别很大, 所以靶镜聚焦后 1 ω 和 3 ω 光的焦点位置差别较大(约 34mm)。显然, 当使用基频光作为三倍频光打靶实验的模拟光源时, 如此大的焦距差别将给靶定位瞄准带来很大的误差。美国 LLNL 的 NIF 装置上, 采用在主空间滤波器小孔处插入光纤引导的模拟光来实现与主激光完全同轴、同波面^[2~5], 而主空间滤波器是针对基频光设计的, 所以模拟光波长的选择十分重要。在 NIF 装置较早模拟光方案中为了克服色差和靶场光学元件膜层带来的问题, 采用 389nm 光源作为模拟光^[5], 但是该波长模拟光与 3 ω 光的折射率差别仍然较大, 体现在靶镜焦距上仍有约 10mm 的焦距差别。这对靶镜调焦机构的精度要求非常高, 而且不容易实现高精度的靶瞄准。此后, 在 NIF 装置中又提出采用独立的 1 ω 和 3 ω 模拟光方案, 即使用 1 ω 模拟光来实现主激光的准直、测试仪器的对准和 KDP 晶体的在线精调, 而对于靶瞄准则使用 3 ω 模拟光。两套模拟光分别使用两套光束准直系统, 并根据使用要求分别由末级空间滤波器的小孔处插入^[2,3]。这种方案虽然解决了同轴、同波面的问题, 但是 3 ω 模拟光与主激光同波面的要求

* 收稿日期: 2002-11-26; 修订日期: 2003-12-01

基金项目: 国家 863 计划项目资助课题

作者简介: 赵东峰(1976—), 男, 主要从事高功率激光装置靶场光学技术的研究; 上海市 800-211 信箱; E-mail: zdfsiom@163.com.

却不能满足,直接影响主激光瞄准精度。此外两套独立模拟光系统会造成靶场调整复杂、周期长、工程造价高的问题。

为此,我们根据神光-II 高功率激光装置特点,选择在靶场中采用小激光器件三倍频的模拟光方案,产生的三倍频光直接用于靶瞄准;同时,三倍频后的剩余基频光和二倍频光又可以为测试仪器对准、KDP 晶体在线精调和基频光、二倍频光打靶实验提供模拟光源。从而可以使用一套系统实现多种目的,大大降低运行成本和调试周期。目前,由于光学元件膜层的原因,仅仅能够提供 1ω 和 3ω 模拟光。该套系统在神光-II 装置应用,已经过多轮物理实验的考验,证明是能够满足高精度瞄准要求的。

1.1 原理

三倍频模拟光源的基本原理是将波长为 $1.053\mu\text{m}$ 的激光通过三倍频晶体后生成 $0.351\mu\text{m}$ 的光源,该光源由扩束望远镜扩束到 $\phi 200\text{mm}$,再通过分光系统和平移反射镜耦合到主光路中。并最终将 1ω 和 3ω 光都送入靶室,从而可以同时为基频和三倍频打靶实验提供模拟光源。模拟光光斑的大小和位置由三维瞄准系统监视。整套模拟光系统位于主空间滤波器的输出端。

1.2 系统排布

整套系统主要包括 4 个部分: 1ω 和 3ω 光的生成、 1ω 和 3ω 光的扩束、两种光的分光系统和模拟光光轴与主激光光轴的耦合系统。如图 1 所示,一台非稳腔结构的 YLF 激光光源 A 输出波长为 $1.053\mu\text{m}$,重复频率为 1Hz ,最大能量为 740mJ 的激光;通过三倍频晶体 E(KTP+BBO)后,生成 $1\omega, 2\omega, 3\omega$ 光;再通过一个无色差的反射式卡塞格林扩束望远系统 G 将光束扩为 $\phi 200\text{mm}$ 口径,输入到分光系统。其中,考虑到主激光三倍频晶体(KDP 晶体)离线和在线调试测量的需要,在光路中插入了平移反射镜 B 和在线测量仪 R。

分光系统如图 2 所示。采用一分四方式,并综合考虑了 $1\omega, 3\omega$ 的能量平衡问题。半透半反板平行度 $2''$,保证 $1\omega, 3\omega$ 的同轴性;同时采用 UBK7 材料,减少 3ω 光损耗。

靶场模拟光波面是通过调整反射式卡塞格林扩束望远镜的副镜来实现与主激光波面的一致性的。

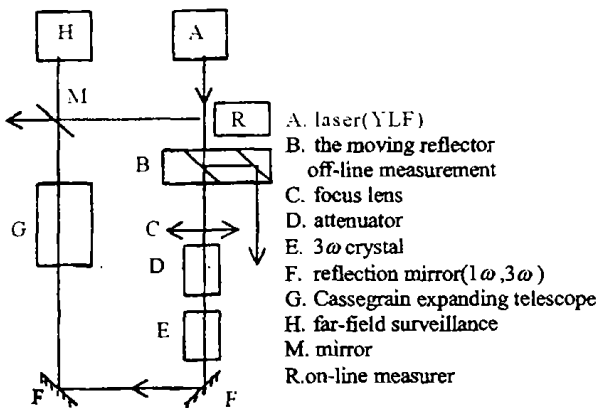


Fig. 1 Alignment of target laser($1\omega, 3\omega$)

图 1 $1\omega, 3\omega$ 模拟光光路

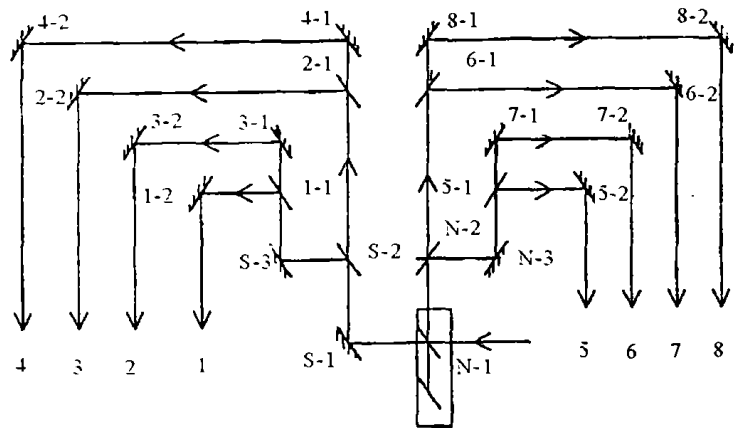


Fig. 2 Disjoining system of eight beams

mirrors of aluminium plating:8-1,8-2,S-1,1-2,3-1,3-2,2-2,4-1,4-2, N-3,5-2,6-2,7-1,7-2,S-3; half-permeation mirrors: 1-1,2-1,S-2,N-2,5-1,6-1; moving mirror:N-1

图 2 八路分光系统

靶场模拟光光轴与主激光光轴的耦合调整是通过分光系统中最后一块平移反射镜以及一套远场自动准直系统来实现的。首先将模拟光系统的最后一块反射镜(见图 2)(1-2,2-2,3-2,4-2,5-2,6-2,7-2,8-2),调至主激光光路中;反射镜中心对准主激光光束近场的中心;再调整反射镜的方位角和俯仰角,通过远场自动准直系统使模拟光的远场点与主激光的远场点一致。此时模拟光光轴与主激光光轴完全一致,可以用模拟光替代主激光进行靶场光路、测试光路、靶精密瞄准和调焦。

为了加快调整速度和提高跟踪主激光光轴的精度,对每一路最后一块反射镜采用逐步逼近法实现计算机的自动控制,目前每路的调整时间由人工的约 5min 提高到目前的 1min ,跟踪精度达到 $0.5''$ 。

1.3 关键单元技术

1.3.1 激光器件

如何获得较高能量和较高功率密度稳定基频输出的小激光器件是模拟光系统的关键。从这个角度来说,

选用技术相对成熟的商品化 YAG 激光器最为合适。但是在 355nm 波长(1.064 μ m 1 ω 光三倍频)的激光入射时,靶镜焦距仍然与 351nm 波长激光入射时的焦距相差约 1mm。在 f 数为 3 的聚焦系统中,该偏差会使模拟光焦斑变得非常大,影响瞄准精度。所以我们最终选用了 YLF 激光器件(输出波长 1.053 μ m)。使用的 YLF 激光器件由使用 YLF 放大介质的振荡级和使用 Nd 玻璃棒的两级放大级组成,振荡级采用非稳腔结构。输出光斑口径为 ϕ 10mm,最大输出能量 740mJ,脉宽 10~16ns,校正后两个方向的发散角分别小于 1mrad 和 0.5mrad,设计重复频率 1Hz。在峰值输出时,平均功率密度为 0.16GW/cm²,峰值功率密度为 0.6GW/cm²。由于峰值功率密度过高,超过了三倍频晶体的破坏阈值,所以通常使用状态下输出能量为 510mJ。此时,平均功率密度为 0.086GW/cm²,峰值功率密度为 0.32GW/cm²。

1.3.2 三倍频晶体

由于分光系统采用一分四的分光方式,并且三倍频光束在传输中的损耗,我们期望在上述激光器件的输出条件下能够产生 10%~15% 的三倍频效率,即 50mJ 以上的三倍频激光才能满足瞄靶需要。为此,我们设计了 KTP 和 BBO 晶体组合的三倍频方案。考虑到激光器件的输出情况,KTP 晶体尺寸为 11mm \times 11mm \times 5mm,BBO 晶体的尺寸为 11mm \times 11mm \times 7mm。两种晶体和膜层的破坏阈值均为 0.5GW/cm²。此外,为了保证生成的基频、二倍频和三倍频光的同轴性,两种晶体入射面和出射面的平行度均在 10"以内。在该三倍频方案下,我们实现了大于 10% 的三倍频效率。

1.3.3 卡塞格林扩束系统

由三倍频晶体产生的 ϕ 10mm 光束要扩束到 ϕ 200mm 口径才能够作为模拟光使用;而且要求该模拟光系统同时具备提供基频和三倍频甚至二倍频模拟光的能力,所以选用一套无色差的扩束系统成为必然。为此,我们设计了一套卡塞格林扩束望远镜来实现三种波长激光的扩束。该系统扩束比为 20,光路如图 3 所示,其中为了减小球差对模拟光远场焦斑分布的影响,主镜和副镜均采用非球面镜。由于主镜和副镜处激光功率密度存在的差别,副镜采用介质膜,而主镜采用铝膜。另外,在光路中使用反射式扩束望远镜需要注意的是,由主镜通光孔处沿原光路返回的反射激光对激光器件的破坏作用。对此,通常采用的解决方法是在激光器件后插入磁光隔离器。但是磁光隔离器的加入会影响到模拟光的近场分布,进而影响其远场分布,使模拟光焦斑变大,从而降低瞄准精度。所以我们采用避免反射激光的方法是在主镜通光孔处加一个 ϕ 1mm 的小圆屏,该小圆屏经系统放大后产生的阴影足以将主镜通光孔覆盖,从而避免反激光。

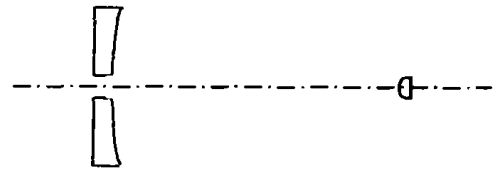


Fig. 3 Cassegrain expanding telescope

图3 卡塞格林扩束望远镜示意图

另外,在光路中使用反射式扩束望远镜需要注意的是,由主镜通光孔处沿原光路返回的反射激光对激光器件的破坏作用。对此,通常采用的解决方法是在激光器件后插入磁光隔离器。但是磁光隔离器的加入会影响到模拟光的近场分布,进而影响其远场分布,使模拟光焦斑变大,从而降低瞄准精度。所以我们采用避免反射激光的方法是在主镜通光孔处加一个 ϕ 1mm 的小圆屏,该小圆屏经系统放大后产生的阴影足以将主镜通光孔覆盖,从而避免反激光。

1.3.4 分光系统

分光系统除了要将扩束后的模拟光一分四以外,为了保证进入靶室的各路模拟光能量大致相同以便于瞄准,该分光系统还要综合考虑基频和三倍频光的能量平衡问题。这一点是通过解决分光镀膜层的途径来实现的。目前,经过与我所镀膜中心的共同努力,已基本实现了基频和三倍频光的能量平衡。

2 瞄准监视系统的改造

在神光-II装置中,模拟光在靶上的大小和位置是由 3 套瞄准监视系统监控的,这 3 套瞄准监视系统也是靶定位的唯一依据。原有的瞄准监视系统存在着较大的色差,仅仅能够通过调焦对 1 ω 和可见光成像,不能满足三倍频光打靶实验的要求。

我们进行了两方面工作:一是对于瞄准监视系统的改造,以原有光学系统为基础,通过改变成像物距和增大调焦行程来实现对 1 ω 光、可见光和 3 ω 光的成像。经两轮实验证实,改造后的瞄准监视系统未能完全满足三倍频打靶实验的要求。由于该系统中,可见光的成像位置和 3 ω 的成像位置正好在调焦行程的两端,而调焦行程又达到了十几 mm,这样当调焦系统的机械轴与成像系统的光轴间存在微小偏差时,就使得看到的弹着点与实际 3 ω 光的弹着点之间存在几十 μ m 的偏差,该偏差只能通过人为修正;二是重新设计和加工了一套无色差的反射式瞄准监视系统,现在正在应用,经实验一定程度上消除了误差。可 3 ω 光与物质相互作用中极易产生波长在 400~500nm 的荧光,而且与某些物质作用时荧光的转换效率极高,采用该无色差成像系统时,会将 3 ω 光掩盖而带入小量瞄准误差,现在我们正在开展这方面的工作进行解决。

3 结 论

通过对各项单元技术的改进,神光-Ⅱ装置靶场基本完成了从基频光打靶到三倍频光打靶的改造。在几轮三倍频光打靶实验中,靶场顺利地完成了各项实验任务,证明改进后的各单元技术完全能够满足目前物理实验的各项要求。

参考文献:

- [1] 王淦昌. 惯性约束核聚变[M]. 合肥:安徽教育出版社,1996. (Wang G C. Inertial confinement fusion. Hefei: Anhui Educational Publishing House,1996)
- [2] Bliss E S, Boege S J, Boyd R D, et al. Design progress for the National Ignition Facility laser alignment and beam diagnostics[A]. SPIE [C]. 1999. **3492**:285—292.
- [3] Boege S J, Bliss E S, Choccol C J, et al. NIF pointing and centering systems and target alignment using a 351nm laser source[A]. SPIE [C]. 1997. **3047**:248;258.
- [4] Bliss E S, Feldman M, Murray J E, et al. Laser chain alignment with low power local light source[A]. SPIE[C]. 1995. **2633**:760—767.
- [5] English R E, Van Wonerghem B M, Seppala L G, et al. The use of an intermediate wavelength laser for alignment to inertial confinement fusion targets[A]. SPIE[C]. 1995. **2633**:603—608.

Improvement of target area for 3ω shot experiments in SG-Ⅱ facility

ZHAO Dong-feng, DAI Ya-ping, HUANG Guan-long, SHAO Ping, HUA Neng, YIN Xian-hua
(National High Power Laser and Physics Laboratory, Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics,
the Chinese Academy of Sciences, P. O. Box 800-211, Shanghai 201800, China)

Abstract: The paper concerns the improvement of two primary technologies for $3\omega(351\text{nm})$ shot experiment in SG-Ⅱ facility target area, which are 3ω target alignment laser and optical viewing system. The $1\omega(1053\text{nm})$ laser is exported from the Nd:YLF laser and passes the KTP+BBO system to acquire the 3ω laser. And the 3ω laser is coupling-out with main laser. In order to improve the laser accurately position on the target, the reflection optical system is replaced by the transmission optical system, which avoids the effect of chromatic aberration.

Key words: Primary technology of target area; Third harmonic beam; Target alignment laser; Optical viewing system