

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

赵东峰¹ 王 利¹ 林尊琪¹ 邵 平¹ 季来林^{1,2} 蔡志坚¹ 郇 融¹ 戴亚平^{1,2} 朱健强¹

(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 中国工程物理研究院上海激光等离子体研究所, 上海 201800)

摘要 提出一种可实现 351 nm 波长激光高通量传输的终端光学组件(FOA)的物理设计方案,研究了设计优化方法,并利用神光 II 装置第九路系统开展了实验研究。实验共进行了 33 发激光发射;激光光束净口径 $\phi 310$ mm, 时间脉冲宽度 3 ns, 1053 nm 波长激光能量 1000~4500 J。实验获得最高三次谐波转换效率 69.6% 和 351 nm 波长激光传输通量 3.76 J/cm^2 , 同时监测到高通量激光传输引起的动态环境污染颗粒变化数和光学元件激光诱导损伤等现象。实验结果表明,通量密度约为 $3 \text{ J/cm}^2 @ 351 \text{ nm}$ 的光学元件损伤主要是由激光传输散射鬼光束辐照材料所激发的污染物所致。

关键词 激光器;高功率激光装置;终端光学组件;三倍频激光;激光诱导损伤

中图分类号 TN241 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201138.0702001

Experimental Study of 351 nm Propagation with High Fluence on No.9 System of SG-II Laser Facility

Zhao Dongfeng¹ Wang Li¹ Lin Zunqi¹ Shao Ping¹ Ji Lailin^{1,2}
Cai Zhijian¹ Wu Rong¹ Dai Yaping^{1,2} Zhu Jianqiang¹

(¹ National Laboratory on High Power Laser and Physics, Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics,
Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China
² Shanghai Institute of Laser Plasma, China Academy of Engineering Physics, Shanghai 201800, China)

Abstract A physical design scheme of final optical assembly (FOA) to achieve 351 nm propagation with high fluence is introduced. The method of optimization design is researched and the experimental study is completed on No. 9 system of SG-II laser facility. 33 shots have been fired with beam diameter of 310 mm, laser pulse width of 3 ns and 1053 nm energy from 1000 to 4500 J. In the process of the experiment, the most efficiency of third harmonic conversion is 69.6% and the maximum fluence of 351 nm propagation is 3.76 J/cm^2 . And emphasis is given on the number of contamination change inside the FOA and the process of the optical damage originating from the high fluence propagation. The results show that the first cause to the optics damage with 3 J/cm^2 at 351 nm is induced by amounts of contaminants which come from the scatter laser irradiating to materials.

Key words lasers; high power laser facility; final optics assembly; third harmonic laser; laser induce damage

OCIS codes 140.3580; 140.3610; 140.3330; 290.2745

1 引 言

高功率激光装置是将微焦耳量级 1053 nm 波长 ($1\omega_0$, 基频) 激光经分光束、口径滤波扩大和能量多程放大到千焦耳至兆焦耳量级, 再经过谐波转换和透镜聚焦于微米量级或毫米量级的实验靶上, 获得

的峰值激光功率密度达到约 10^{14} W/cm^2 ^[1], 用于满足惯性约束、天体物理、生物材料和经典物理等领域需求研究。随着物理实验研究的深入, 要求高功率激光装置提供更高的可聚焦能力和高的经典吸收效率, 这就不仅要求研制的装置具有更多的激光束数

收稿日期: 2010-12-14; 收到修改稿日期: 2011-03-25

基金项目: 国家 863 计划(2007AA804)资助课题。

作者简介: 赵东峰(1976—), 男, 副研究员, 主要从事高功率激光技术方面的研究。E-mail: dfzhao@sion.ac.cn

(如 2009 年 3 月建成的美国国家点火装置 192 束^[2]),而且要提高单束激光运行通量(美国国家点火装置设计指标达到 $8.0 \text{ J/cm}^2 @ 351 \text{ nm}, 5 \text{ ns}^{[3,4]}$)和三次谐波转换效率(美国国家点火装置达到 $80\%^{[3,4]}$)。我国神光 II 装置共有 9 束激光聚焦于 $\phi 1.5 \text{ m}$ 球形真空靶室或 $1.2 \text{ m} \times 1.8 \text{ m}$ 舱室 X 激光真空靶室内,从事多种激光与等离子体相互作用物理实验,已高效稳定运行 10 年,提供大能量打靶实验约 4000 余发次。其中 8 束激光装置于 2000 年建成,为双程放大结构,输出激光光束净口径为 $\phi 220 \text{ mm}$,单束 $1\omega_0$ 激光运行输出能量 750 J,三次谐波的转换运行效率约为 50% ;第九路多功能高能激光系统于 2006 年建成,为单程放大结构,输出激光光束净口径为 $\phi 310 \text{ mm}$,单束 $1\omega_0$ 激光能量 5200 J,为之前 8 束的 6.9 倍,三次谐波转换效率相当^[5,6]。

我国高功率激光装置以神光 II 装置为代表,已为国内外相关基础研究领域科学探索和高功率激光技术发展做出贡献,但由于色分离膜层抗损伤阈值限制,其 351 nm 波长 ($3\omega_0$, 三倍频) 激光运行通量只能控制在小于 $1 \text{ J/cm}^2 @ 3 \text{ ns}$,在 2007 年进行楔形镜与聚焦透镜组合的色分离实验演示时,神光 II 装置第九路系统在三倍频频率转换晶体处激光通量达到 $2.8 \text{ J/cm}^2 @ 3\omega_0, 3 \text{ ns}^{[7]}$ 。因此,由于装置三倍频激光运行通量相对较低,在一定程度上制约了相关物理实验研究的深入,也成为装置性能提升的瓶颈,必须研究攻关解决。

本文以三倍频激光传输通量高于 3 J/cm^2 为目标,提出以 type-I / type-II KDP 晶体角度失谐、楔形镜+聚焦透镜组合、光束取样光栅 (BSG) 与主防溅射板结合的基本设计思路,以杂散光分布、焦斑分布和 B 积分增量为优化条件,完成了可实现 $3\omega_0$ 高通量传输的终端光学组件 (FOA) 物理设计,重点开展了实验研究。经过 33 发次大能量激光实验测试, $3\omega_0$ 在谐波转换晶体处最高输出通量达到 3.76 J/cm^2 ,激光发射前后产生的动态环境污染颗粒数约为 $1:700$,从实验数据分析结果可以跟踪 FOA 中光学元件激光诱导损伤过程。

2 终端光学组件设计

高功率激光装置 FOA 对实现 $3\omega_0$ 高通量传输是至关重要的。它集焦斑控制、真空密封、谐波转换、谐波分离、激光聚焦、能量采样和防靶碎片溅射等功能于一体,并融合温度、气流和压强平衡等控制,包括了连续相板 (CPP)、平板窗口、type-I + type-II KDP 晶体、楔形镜、聚焦透镜、BSG/主防溅射板、次防溅射板、能量采样反射镜和采样真空窗口等 10 块光学元件,物理设计排布如图 1 所示。其中谐波转换采用 type-I 12.5 mm KDP 晶体和 type-II 10.5 mm KDP 晶体组合的角度失谐方案,来满足方口径和较高通量的要求;谐波分离采用棱镜色散原理,由楔形镜结合聚焦透镜的方案实现。

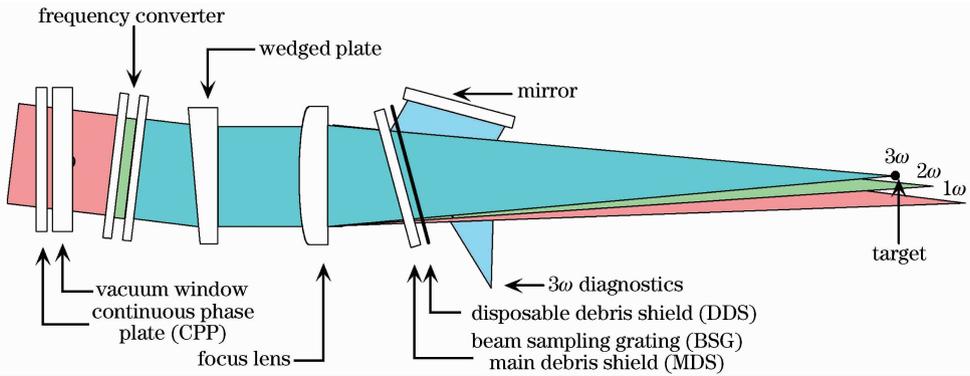


图 1 实现 $3\omega_0$ 传输的 FOA 物理设计示意图

Fig. 1 Physical design scheme of FOA to achieve 351 nm propagation

FOA 设计中最重要数值模拟分析包括杂散光分布定量数值模拟、焦斑分布和 B 积分增量设计与控制。

2.1 杂散光分布

FOA 中各光学元件均涂有 $1\omega_0, 2\omega_0$ (波长 527 nm , 二倍频) 和 $3\omega_0$ 的 Sol-gel 减反膜,初始剩余

反射率约为 0.5% 。但在 FOA 工作过程中由于多孔 Sol-gel 减反膜吸附杂质颗粒,剩余反射率将逐步提升到 $1\% \sim 2\%$,甚至于 $3\% \sim 4\%$ 的不可接受水平。对高功率激光装置输出千焦耳以上激光能量来说,光学元件微弱的多次反射、会聚,将产生大量的杂散光聚焦点,即“鬼像”。定义 n 阶“鬼像”为经过 n 次

反射、会聚产生的“鬼像”。“鬼像”位置的计算实际上是计算光线在多个光学元件表面之间反射、聚焦后的成像问题,其不同的能量密度辐照在材料上会产生不同程度的破坏^[8]。

利用成熟商用光学设计分析软件进行杂散光分布建模分析,分析的条件为:

1) $3\omega_0$ 通量为 4 J/cm^2 , 激光运行的三次谐波转换效率 60% , 入射激光的 $1\omega_0$ 通量为 6.7 J/cm^2 , 时间脉宽 3 ns ;

2) 入射 $1\omega_0$ 近场为超高斯光束, 尺寸为

$310 \text{ mm} \times 310 \text{ mm}$;

3) 考虑到 Sol-gel 减反膜在工作一段时间后性能会逐渐退化, 其透射率由 99.5% 减弱到 99% ;

4) 组件分析考虑到四阶“鬼像”(因为第四阶“鬼像”能量为 $10 \sim 100 \mu\text{J}$ 量级, 对材料存在一定破坏, 而第五阶“鬼像”能量只有 $1 \sim 0.1 \mu\text{J}$ 量级, 对材料破坏影响可以忽略);

5) 聚焦透镜的调焦行程为 $\pm 15 \text{ mm}$ 。

最终分析确定的“鬼像”分布情况如图 2 所示。

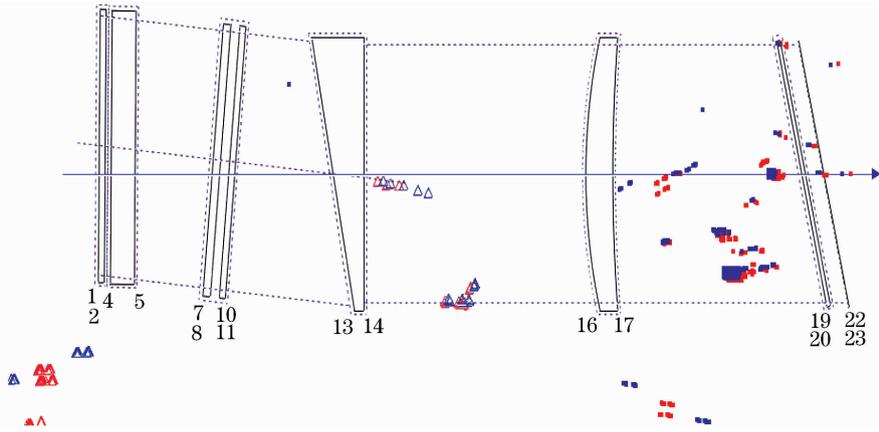


图 2 FOA 杂散光分布优化

Fig. 2 Optimization design of FOA ghost

对于杂散光分布图进行 3 点说明: 1) 实心图样为 $1\omega_0$ “鬼像”点, 空心图样为 $3\omega_0$ “鬼像”点 ($2\omega_0$ 的在 $1\omega_0$ 与 $3\omega_0$ 之间, 未标识出); 2) 各阶“鬼像”图标为: 长方形为一阶(已偏离主光路较远, 图中未能标识出)、圆形为二阶、三角形为三阶、正方形为四阶; 3) 各元件表面虚线为分析计算的安全区, 即离元件表面 10 mm 。

通过杂散光分析确定了 FOA 的物理设计排布图, 即各个光学元件的排布间距和部分元件与光轴倾斜角度, 以及聚焦透镜为非球面弯月型的基本参数。

2.2 焦斑分布

焦斑分布决定了激光远场可聚焦能力, 是反映高功率激光装置激光传输性能的重要指标之一, 而其中关键是取决于实现 $3\omega_0$ 传输、聚焦的 FOA 性能。分析采用的方法是将任意一个输入光场分解为多个加权的高斯光束, 然后对每一个高斯子光束进行追迹, 最后在观测面上对所有高斯光束进行相干叠加, 这样就可以获得光路中任意一个位置的振幅、波前以及强度信息, 其原理示意图如图 3 所示。

分析 FOA 焦斑分布条件为: 1) 入射 $1\omega_0$ 为超高斯光束, 尺寸为 $310 \text{ mm} \times 310 \text{ mm}$; 2) FOA 中各

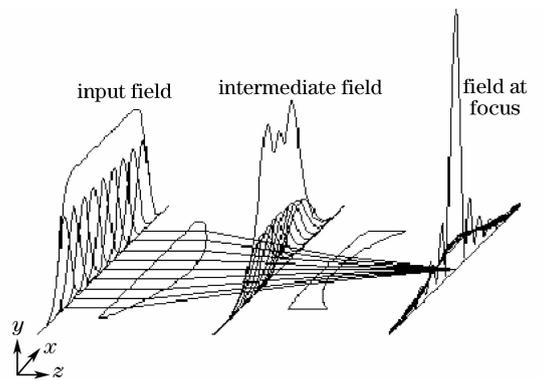


图 3 高斯光束分解、追迹以及叠加示意图

Fig. 3 Scheme of decomposition, trace and superposition of Gaussian beam

熔石英材料光学元件透过波前为 $\lambda/3$ ($\lambda = 632.8 \text{ nm}$), 晶体和次防溅射板透过波前为 1λ 。

由于杂散光分析时确定了弯月型聚焦透镜的基本参数和 BSG/主防溅射板与次防溅射板的倾斜角度, 对焦斑分布的优化方法有: 1) 修正弯月型透镜的非球面系数; 2) 减小聚焦光路中 BSG/主防溅射板厚度和次防溅射板厚度; 3) 微调聚焦透镜与 BSG/主防溅射板和次防溅射板的相对角度。通过不同条件的优化, 聚焦透镜非球面系数修正为

-1.18, 其光轴相对 BSG/主防溅射板和次防溅射板反向偏转 $160 \mu\text{rad}$, 可以平衡远场像散, 获得较好的焦斑分布, 结果如图 4 所示。最终焦斑可聚焦能力参数为: 95% 激光焦斑能量集中于 $2.2DL$ (衍射极限, 公式表达为 $2.44\lambda f/D$) 中, 聚焦透镜焦距 2234 mm , 同时以焦斑相对变大 $0.5DL$ 为边界条件, 聚焦透镜的入射激光光轴可倾斜角度范围为 $\pm 180 \mu\text{rad}$ 。

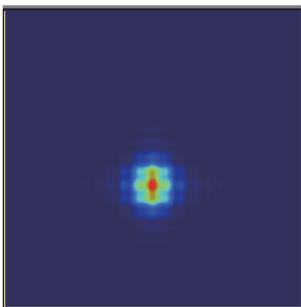


图 4 焦斑分布优化

Fig. 4 Optimization design of FOA focus

2.3 B 积分增量

B 积分是用来度量由于光学材料非线性折射率 n_2 引发的光束传输自相位调制和小尺度自聚焦非线性水平的评价参数, 也通常用作设计和评价激光系统总体性能的判据之一, 因此, 可作为 FOA 实现 $3\omega_0$ 安全传输的重要指标。分析时 FOA 的激光传输强度为常数, 同时非线性晶体和硼硅酸盐材料次防溅射板均以熔石英材料考虑, 其 $n_2 = 0.88 \times 10^{-13}$, 并且三次谐波转换后的剩余 $1\omega_0$ 和 $2\omega_0$ 各占 50%。则 FOA 的 B 积分增量计算公式为

$$B(L) = \frac{8\pi^2}{\lambda_0 C} \times 10^7 \int_0^L \frac{n_2}{n_0} P(z) dz, \quad (1)$$

$$B = B(1\omega_0) + B(2\omega_0) + B(3\omega_0), \quad (2)$$

式中 L, C, z, n_2 均取 CGSE 单位制, P 取实用单位 W/cm^2 ; P 是常量, 即驱动器输出的功率密度; $B(1\omega_0)$ 为 $1\omega_0$ B 积分增量, $B(2\omega_0)$ 为 $2\omega_0$ B 积分增量, $B(3\omega_0)$ 为 $3\omega_0$ B 积分增量。

计算参数如表 1 所示, 可计算得两个 B 积分增量: 净口径内平均 B 积分增量为 1.307, 峰值 B 积分增量为 1.801。

表 1 B 积分增量计算参数

Table 1 B -integral increment of calculate parameters

$3\omega_0$ ave-fluence $/(J/\text{cm}^2)$	4
$3\omega_0$ pulse width /ns	3
Harmonic conversion efficiency /%	60
Beam filling factor	0.6
Optics length /mm	175.7

3 实验研究

3.1 实验装置

三倍频高通量传输实验是利用神光 II 装置第九路系统和 X 激光真空靶室进行的, 主要研究内容是三次谐波转换效率、穿 $\phi 500 \mu\text{m}$ 孔靶效率、元件损坏状况和 $3\omega_0$ 光学元件能量损耗等方面, 实验方案和实验现场如图 5, 6 所示。实验共进行了 33 发。全部 $1\omega_0$ 能量输出在 $1000 \sim 4500 \text{ J}$ 间, 准方波时间脉冲宽度为 3 ns , 光束净口径为 $\phi 310 \text{ mm}$ 。实验过程中,

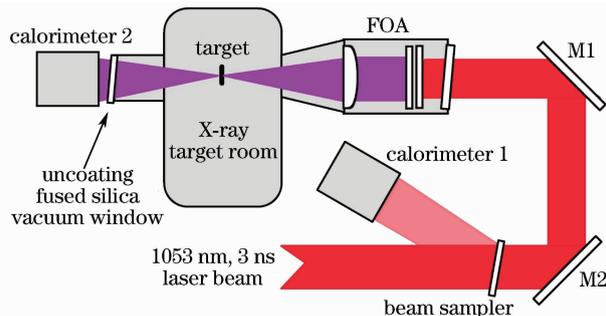


图 5 $3\omega_0$ 高通量传输实验方案

Fig. 5 Experimental scheme of $3\omega_0$ high-power propagation

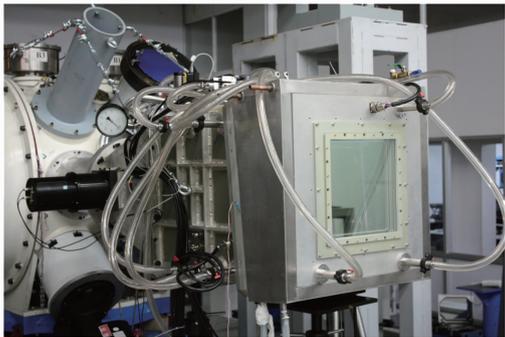


图 6 $3\omega_0$ 高通量传输实验现场图

Fig. 6 Experimental field of $3\omega_0$ high-power propagation

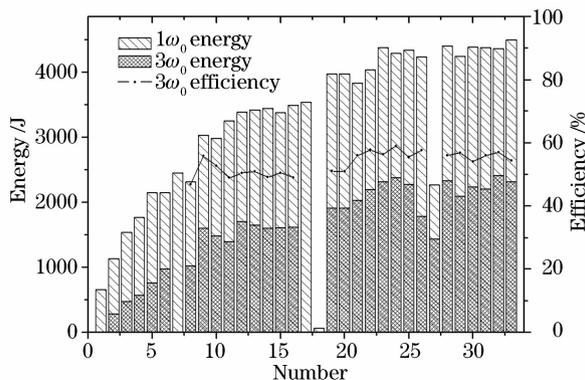


图 7 $1\omega_0$ 能量和 $3\omega_0$ 能量、三次谐波转换效率实验参数

Fig. 7 Experimental parameters of $1\omega_0$ and $3\omega_0$ energy and third harmonic conversion efficiency

FOA $3\omega_0$ 终端输出到靶能量约1000 J和约1600 J分别有9发,约2300 J有14发。具体实验发次的 $1\omega_0$ 能量、 $3\omega_0$ 能量和三次谐波转换效率如图7所示。

3.2 实验

实验装置总体损耗测试,即在X激光真空靶室不放置实验靶,入射激光经过FOA后全部注入能量卡计2进行全能量定标或实验后期孔靶穿孔效率测试,卡计2能量读取数与前面 $1\omega_0$ 取样镜分光能量卡计1测得的数值的比值,由1减该比值再乘百分数获得损耗数值。卡计定标实验在前期光学元件未损伤时进行,多发次定标数值很稳定,均为35%。同样方法,在第27发光学元件出现损伤并未明显增长时,测试值为37%。为测试激光入射FOA前的损耗,即 $1\omega_0$ 导光反射镜的损耗,将能量卡计2放置在FOA与M1间,在第7发测得为5.5%。这里,测试实验装置总体损耗时能量卡计2前的真空窗口为未镀膜的石英玻璃,单面透射率为96%。

实验在第10,11发入射 $1\omega_0$ 能量分别为2978.98 J和3248.21 J进行了正入射 $\phi 500 \mu\text{m}$ 孔靶(相当于 $3\omega_0$ 衍射极限焦斑的27倍,谐波转换后剩

余的 $1\omega_0$ 和 $2\omega_0$ 被靶面阻挡,未进入能量卡计2)的穿孔效率测试,由能量卡计2和FOA内能量卡计的数值比较,分别为96.2%和94.9%。在第23发和第24发入射基频激光能量分别为4130.17 J和4045 J时,再次进行了穿孔效率测试,测得效率分别为98.6%和97.5%。同时每次4000 J以上穿孔实验后对读数卡计补做对标实验。实验过程中光学元件损伤状况是实时观察的,能很清楚观察到元件损伤状况及增长与激光入射通量的关系。其中在前11发, $3\omega_0$ 传输通量小于 1.5 J/cm^2 时,光学元件未观察到损伤,而在第12发大于 2.0 J/cm^2 时,非球面聚焦透镜和楔形镜出现了个别损伤点。后续实验维持在小于 3.0 J/cm^2 过程中,非球面聚焦透镜、楔形镜、BSG/主防溅射板、次防溅射板的损伤点数量和程度均略有增加和增长。从第19发 $1\omega_0$ 入射能量3747.29 J开始, $3\omega_0$ 传输通量为大于 3.0 J/cm^2 ,相应元件损伤点在第23发出现了较严重损伤,但损伤状况一直维持到第33发。具体的光学元件损伤过程如表2所示。

表2 实验过程中光学元件的损伤状况

Table 2 Situation of optics damage at experiment

Shots	Laser energy /J	Damage situation
11	$1\omega_0$: 2500 $3\omega_0$: 1000	No damage
12	$1\omega_0$: 3383 $3\omega_0$: 1703	Focus lens: 3 damage spots on the clear aperture Wedged plat: 4 damage spots (about $\phi 1 \text{ mm}$) on the clear aperture
16	$1\omega_0$: 3489 $3\omega_0$: 1613	Focus lens: damage spots add to 9 on the clear aperture Wedged plat: have 12 damage spots and 1 damage scratch on the clear aperture BSG/MDS: 3 damage spots (about $\phi 1 \text{ mm}$) on the clear aperture
23	$1\omega_0$: 4375 $3\omega_0$: 2314	Focus lens: have 30 damage spots and 3 damage scratches on the clear aperture Wedged plat: have 30 damage spots and 4 damage scratches (about 10 mm) on the clear aperture BSG/MDS and DDS: have many damage spots (about $\phi 2 \sim 3 \text{ mm}$) on the clear aperture
32	$1\omega_0$: 4497 $3\omega_0$: 2408	Damage DDS is changed and it is not damage, but at the Sol-gel film there are imprint of laser near field and front optics damage morphology

$3\omega_0$ 谐波转换效率测试办法为能量卡计2与能量卡计1的实测比值,再结合FOA损耗因子进行修正。实验安排从第7发开始测试,结合相关实验共进行了23发,具体参数如图7所示,其中实测得最高三次谐波转换效率是第24发,其效率为58.9%(入射 $1\omega_0$ 能量为4045 J),而最高 $3\omega_0$ FOA 输出能量是第32发的2408 J(入射 $1\omega_0$ 能量为4224.3 J)。另外,在实验过程中利用颗粒计监测了FOA在激光打靶前后的动态环境变化,污染颗粒数在激光发射前约300个,激光发射后最大为20万个,前后增加

了近3个数量级。

4 实验结果与分析

4.1 光学元件 Sol-gel 膜透射率

装置总体损耗在光学元件损伤前测试为35%,光学元件损伤后测试为37%。实验中三倍频光学元件均为 Sol-gel 减反膜,包括: type-I + type-II KDP 晶体、楔形镜、非球面聚焦透镜、BSG/主防溅射板和次防溅射板,为便于分析,认为元件透射率一致。现设 FOA 的整体透射率为 T_{FOA} ,光学元件透

射率为 T , 可表示为

$$T_{\text{FOA}} = T_{\text{target}} / (T_{\text{M}} \times T_{\text{VW}}), \quad (3)$$

$$T = T_{\text{FOA}} / (T_{\text{KDP}} \times T_{\text{CPP}} \times T_{\text{window}})^{-6}, \quad (4)$$

式中 T_{target} 表示装置总体透射率, T_{M} 表示靶场反射镜传输效率, T_{VW} 表示能量卡计 2 前的未镀膜熔石英窗口玻璃的透射率, T_{KDP} 表示 KDP 晶体材料透射率, T_{CPP} 表示 CPP 基板透射率, T_{window} 表示真空窗口透射率。其中 type-I/type-II KDP 晶体材料对激光吸收效率为 6%, 而 CPP 基板和真空窗口均镀基频激光减反介质膜, 实验后仪器测试与实验前一致, 透射率为 99.5%。

将实验测得的 T_{target} 在元件损伤前后为 65% 和 63%, T_{M} 为 94.5%, 代入(3),(4)式, 计算结果如表 3 所示。

表 3 FOA 和光学元件 Sol-gel 膜透射率

Table 3 Sol-gel film transmission of FOA and optics

	Undamage / %	Damage / %
FOA	25.4	27.7
Sol-gel film	96.3	95.9

4.2 三次谐波转换效率

实验测得三倍频激光在 FOA 输出的谐波到靶面转换效率最高为第 24 发的 58.9%, 此时光学元件已损伤较严重, 以 4.1 节分析的光学元件每个光学表面透射率 95.9% 进行计算, 即将实验测得数据乘以 1.18 因子, 则 type-I + type-II KDP 晶体输出位置的三次谐波转换效率最高为 69.6%。同时实验过程中 type-I + type-II KDP 晶体输出位置的谐波转换效率经数据处理, 其数值在 60%~70% 之间。

4.3 光学元件激光诱导损伤

利用 Msu25D 高分辨显微投影成像系统检测实验中光学元件损伤情况, 发现 CPP 基板、平板窗口、type-I + type-II KDP 晶体、光束取样反射镜和取样窗口等 6 块光学元件没有损伤点, 而楔形镜、聚焦透镜、BSG/主防溅射板和次防溅射板等 4 块光学元件存在较多损伤点, 尤其 BSG/主防溅射板中非光栅刻蚀面最严重, 其损伤面积约占光束口径的 3.1%。各光学元件的损伤形态有: 在激光辐照区域——表面点状损伤或块状剥离、长划痕、体内丝状, 在激光未辐照区域——表面“月晕”状损伤和表面膜层粘污, 各损伤形态如图 8 所示。

光学元件上各损伤形态存在不同诱导因素: 激光辐照区域的表面点状损伤点测度在毫米量级的是由大尺度金属颗粒污染和受前损点激光近场调制引起的, 而百微米量级及以下的为小尺度金属颗粒或

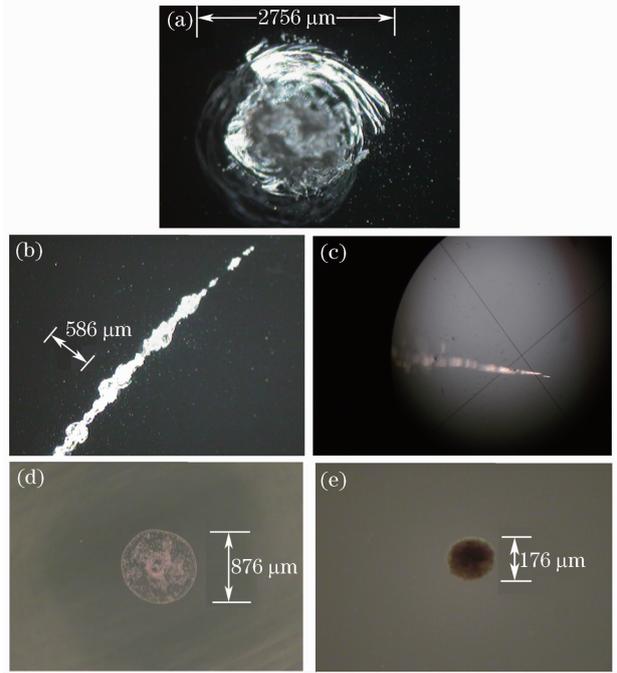


图 8 光学元件激光诱导损伤形态。(a) 激光辐照区域点状损伤; (b) 激光辐照区域长划痕损伤; (c) 激光辐照区域体内丝状损伤; (d) 激光未辐照区域“月晕”状损伤; (e) 激光未辐照区域表面膜层粘污

Fig. 8 Surface damage morphologies induced by laser. (a) Point damage located on the clear aperture brim; (b) scratch damage on the clear aperture; (c) filiform damage located on the clear aperture brim; (d) surface “mooning” damage outside clear aperture; (e) surface film contamination outside clear aperture brim

溶胶状液滴污染而引起的; 激光辐照区域的表面划痕是由光学元件基板的表面划痕和加工亚表面缺陷引起的, 这些损伤划痕的位置和尺度能与基板验收时相对应; 激光辐照区域的体内丝状损伤是激光近场局部峰值功率密度过大, 引起材料内小尺度自聚焦的破坏, 在聚焦透镜有 9 处、楔形镜有 3 处; 激光未辐照区域的“月晕”状损伤和表面膜层粘污是污染颗粒或溶胶状液滴的污染物受到杂散光辐照而引起的, 其中“月晕”状损伤是光学元件膜层的损伤, 表面膜层粘污只是污染物受辐照的烧蚀状, 未引起 Sol-gel 膜层破坏。另外, 在光学元件激光未辐照区未发现点状损伤, 可以认为杂散光的“鬼像”点已经很好地被规避。

4.4 工作环境污染分析

利用能量色散 X 射线荧光光谱仪对光学元件的激光辐照损伤点、激光辐照未损伤区、激光未辐照区, 实验的 FOA 内机械材料、硫化硅胶、电导线, 以

及未进行实验的石英玻璃和 Sol-gel 膜等样品进行测试比较。从结果分析可以发现,实验中所用的光学元件中所检测出的金属元素,较未进行实验的石英玻璃新增了硫、磷、钾、钙、锰、铝和钡等元素,而所含的铁和铜元素在量上有明显增加,其中铝和钡是

Sol-gel 膜增加的元素,这在未进行实验的 Sol-gel 膜样品能比较出,而硫、磷和钾元素是用于光学元件固定装夹的硫化硅胶成分,另外铁、铜就是 FOA 中相应机械材料溅射污染而增加的,具体以聚焦透镜检测结果为例,如图 9 所示。

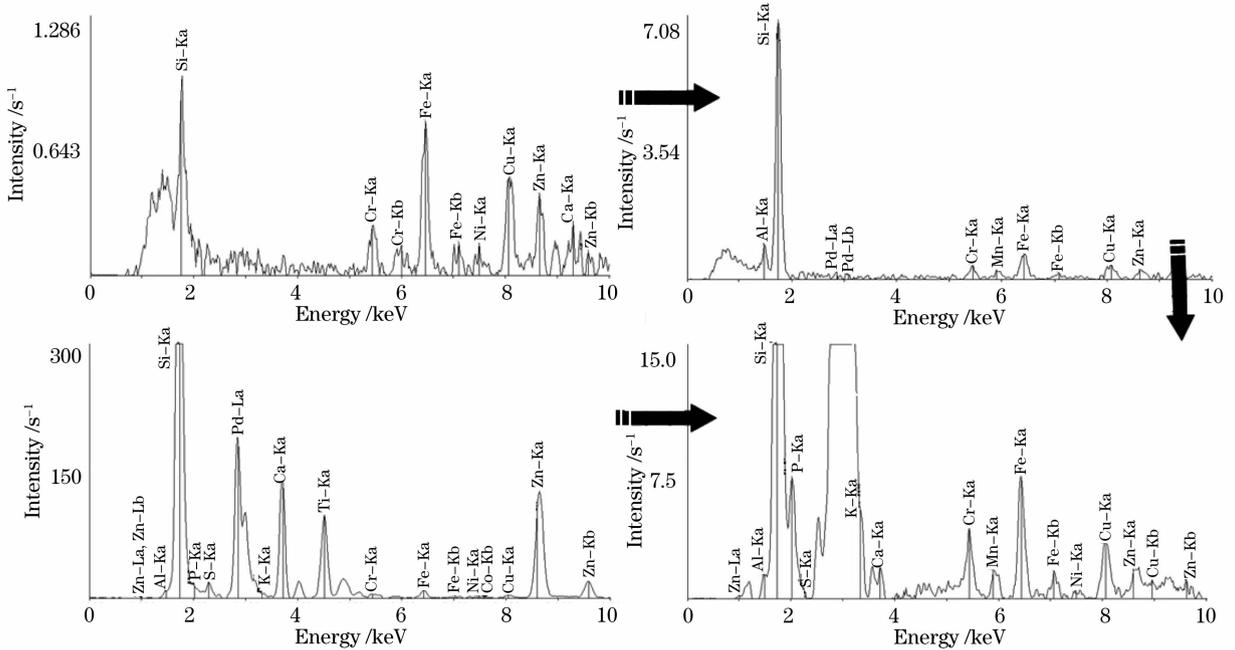


图 9 聚焦透镜受污染的分析示例

Fig. 9 Example of analysis on focus lens contamination

这是由于 FOA 在物理设计时有意将上万个杂散光偏离激光光轴而辐照在光学元件通光口径以外,致使部分机械材料、电导线和硅橡胶受到一定通量杂散光辐照,产生了污染颗粒或溶胶状液滴,成为光学元件受污染的源,其中受污染区域在高通量激光辐照时会局部受热,致使光学元件表面热熔或炸裂,成为损伤点^[1,9,10]。这在 4.3 节光学元件激光诱导损伤形态和污染颗粒数激光发射前后变化量都能得到证实。

5 结 论

完成了基于杂散光分布、焦斑分布和 B 积分增量为优化条件、可实现大于 $3 \text{ J/cm}^2 @ 3\omega_0$ 传输的 FOA 分析与研制,并利用了神光 II 装置开展了三次谐波转换效率、光学元件透射率、三倍频激光穿孔效率、光学元件损伤状态和工作环境污染颗粒数监测等相关实验研究。由实验结果可得到以下结论:

1) 物理设计以杂散光分布、焦斑分布和 B 积分增量为优化条件是可行的,并且实验结果与理论分析相符合,另外实验中应用的气流吹除污染物系统

有作用,但效果不明显。这些从实验获得三倍频晶体本身最高谐波转换效率 69.6% 和通量为 3.76 J/cm^2 ,实验中全部 4 次穿 $\phi 500 \mu\text{m}$ 孔靶效率均在 94% 以上,以及光学元件激光辐照区外损伤状态和光学元件体内丝状损伤数量等方面,就能得到很好验证。

2) 光学元件 Sol-gel 膜透射率在损伤前为 96.3% ,在损伤后为 95.9% ,相差 0.4% ,主要是光学元件受动态环境污染物和光学元件损伤引起的。可以说明,实验中 FOA 环境为真空度 1333.22 Pa ,纯度 99.99% 和湿度不大于 5×10^{-6} 的氮气,对 Sol-gel 膜性能稳定具有一定作用。但与 Wegner 等^[11] 提出必须用干燥纯空气才能维持 Sol-gel 膜性能未相吻合,有待进一步实验验证。

3) 从光学元件的激光辐照区均布大量尺度百微米量级及以下的点状损伤、激光未辐照区均布大量“月晕”状损伤点或表面膜层粘污可看出,在引起光学元件各种损伤因素中,动态环境污染物极可能是引起元件表面损伤并逐步增强破坏力度的首要因素,而污染物主要为杂散激光辐照机械金属材料、光

学元件侧边封装硅胶和电导线产生的气溶胶和挥发物。同时,光学元件加工过程中残余的亚表面缺陷,在激光辐照下形成毫米尺度的损伤点也是重要因素。

另外,实验中发现的气溶胶状污染物是激光与材料相互作用产生的,其特性包括:成分、射程、颗粒度、密度,以及与光学元件损伤关系,未能很好认识,也没有相关文献报道和分析。今后实验必须对产生的气溶胶状污染物加强抑制和排除,其中抑制方式将从三方面考虑:1)结构设计时有选择性地使用材料和方式,并在百级超净室按特定规程装校;2)增加特定材料和结构方式的杂散光吸收阱,避免1,2,3级杂散光直接辐照机械金属材料;3)改进光学元件侧边硅胶封装方式。

参 考 文 献

- 1 W. Koechner. Solid-State Laser Engineering [M]. Beijing: World Book Publishing Company Beijing, 2005
- W. Koechner. 固态激光工程[M]. 北京:世界图书出版公司北京公司, 2005
- 2 S. H. Glenzer, B. J. MacGowan, P. Michel *et al.*. Symmetric inertial confinement fusion implosions at ultra-high laser energies [J]. *Science*, 2010, **327**(5970):1228~1231
- 3 C. A. Haynam, P. J. Wegner, J. M. Auerbach *et al.*. National ignition facility laser performance status [J]. *Appl. Opt.*, 2007, **46**(16):3276~3303
- 4 B. M. Van Wouterghem, S. C. Burkhart, C. A. Haynam *et al.*. National ignition facility commissioning and performance [C]. *SPIE*, 2004, **5341**:55~65
- 5 Lin Zunqi, Wang Shiji, Fan Dianyuan *et al.*. SG-II laser facility improvement and its precision progress [J]. *Chinese J. Lasers*, 2001, **B10**(S):IV 6~IV 16
- 6 Lin Zunqi. Progress of laser fusion [J]. *Chinese J. Lasers*, 2010, **37**(9):2202~2207
林尊琪. 激光核聚变的发展[J]. *中国激光*, 2010, **37**(9):2202~2207
- 7 Zhao Dongfeng, Gu Zhen, Shao Ping *et al.*. Research on the third harmonic splitter based on prism [J]. *Chinese J. Lasers*, 2007, **34**(5):637~640
赵东峰,顾震,邵平等. 基于棱镜实现三倍频谐波分离[J]. *中国激光*, 2007, **34**(5):637~640
- 8 R. E. English, J. I. Miller, J. Schweyen. Ghost reflection analysis for the main laser of the national ignition facility [C]. *SPIE*, 1998, **3482**:748~753
- 9 S. Papemov, A. W. Schmid. Laser-induced surface damage of optical materials: absorption sources, initiation, growth, and mitigation [C]. *SPIE*, 2008, **7132**:71321J
- 10 M. J. Soileau. 40year retrospective of fundamental mechanisms [C]. *SPIE*, 2008, **7132**:713201
- 11 P. Wegner, J. Auerbach, T. Biesiada *et al.*. NIF final optics system: frequency conversion and beam conditioning [C]. *SPIE*, 2004, **5341**:180~189

2011年“纪念《光学学报》创刊30周年特刊” 征 稿 启 事

创刊于1981年的《光学学报》是中国光学学会主办的第一本期刊。30年来,在历任主编王大珩院士、王之江院士、王润文研究员、徐至展院士和现任主编曹健林研究员的领导下,《光学学报》取得了一系列的成绩。2010年影响因子达到2.0,在国内物理类科技期刊中排名第一,连续7年荣获“百种中国杰出学术期刊”,被世界重要检索系统EI,CA, AJ和INSPEC等收录。《光学学报》始终致力于为我国光学科技人员与国内外同行进行学术交流、开展学术讨论以跟踪学科前沿和发展我国光学事业服务。《光学学报》刊登的论文集中反映了中国光学科技的新概念、新成果和新进展,其内容主要包括光纤光学与光通信、激光光学、信息光学、光学测量、光谱学、薄膜光学、量子光学、非线性光学、光学器件和材料等。为了纪念《光学学报》创刊30周年,编辑部计划在2011年9月正刊上出版“纪念《光学学报》创刊30周年特刊”,现特向国内外广大专家征集研究快报、研究论文和综述,以期集中反映我国近年来在光学及其相关领域取得的重大成就。

征稿范围:

光学及其相关领域。

稿件类型:

- 1、简要报道课题组最新研究成果的研究快报;
- 2、具有较高的创新性的原创研究论文;
- 3、国内外知名专家亲自撰写的综述文章。

特刊稿件截稿日期:2011年7月10日

投稿方式以及格式:可通过中国光学期刊网网上投稿系统直接上传稿件(请在留言中标明“纪念《光学学报》创刊30周年特刊”投稿),详情请参见<http://www.opticsjournal.net>。本特刊投稿文体为中文,电子版请使用MS-word格式。有任何问题请咨询马沂编辑,E-mail: mayi@siom.ac.cn,电话:021-69918427-802。