

非稳腔氧碘激光器近场杂散光传输特性

魏继锋^{1,2,3} 常 艳¹ 黄德权¹ 周 山¹ 苏 毅¹ 安建祝⁴ 孙利群² 张 凯¹

¹ 中国工程物理研究院应用电子学研究所, 四川 绵阳 621900

² 清华大学精密计量与仪器科学国家重点实验室, 北京 100084

³ 中国工程物理研究院研究生部, 北京 100088; ⁴ 北京应用物理与计算数学研究所, 北京 100088

摘要 氧碘高能激光近场存在较多的杂散光, 这些光会严重影响光束传输和光束质量控制。通过对杂散光的产生机理、类型和传输规律的分析 and 模拟确定了不同类型杂散光的测量方法。利用两个能量计测量了 30 m 通道自由传输时的传输效率, 利用测试光阑获得了通道内杂散光角谱曲线和镜面散射光能量。实验表明 30 m 通道自由传输时的能量损失约为 5.2%, 杂散光的角谱随着传输距离的增加逐渐增大, 角谱也会随着光束质量的恶化显著增加。利用角谱曲线可以获得通道内任意位置处光阑上的热负荷, 这为高能激光热管理技术奠定了坚实的基础。

关键词 激光光学; 化学氧碘激光; 杂散光; 光阑; 角谱; 传输

中图分类号 O436 文献标识码 A doi: 10.3788/AOS201434.0214004

Near-Field Propagation Characteristics of Stray Light for Unstable Resonator Chemical Oxygen-Iodine Laser

Wei Jifeng^{1,2,3} Chang Yan¹ Huang Dequan¹ Zhou Shan¹ Su Yi¹
An Jianzhu⁴ Sun Liquan² Zhang Kai¹

¹ Institute of Applied Electronics, China Academy of Engineering Physics, Mianyang, Sichuan 621900, China

² State Key Laboratory of Precision Measuring Technology and Instrument, Tsinghua University, Beijing 100084, China

³ Graduate School of China Academy of Engineering Physics, Beijing 100088, China

⁴ Institute of Applied Physics and Computational Mathematics, Beijing 100088, China

Abstract A lot of stray light spreads in the near field of chemical oxygen-iodine laser, which has serious effects on beam propagation and beam quality control. Measurement methods for different types of stray light are brought out by analyzing and simulating generation mechanisms, types and propagation rules of the stray light. Efficiency for 30 m free propagation is measured by two energy meters. Angular power spectral curve in the channel and scattering energy reflected by the mirror are got by measurement diaphragms. Experimental results show that the energy loss after 30 m free propagation is 5.2%, angular power spectrum increases with propagation distance and deterioration of beam quality increasing. The heat burthens on all diaphragms in the tunnel can be calculated with angular power spectral curve, which lays a good foundation of heat control technology for high energy laser.

Key words laser optics; chemical oxygen-iodine laser; stray light; diaphragm; angular power spectrum; propagation

OCIS codes 140.3295; 140.1550; 260.2160; 260.1960; 120.5820

1 引 言

激光束在近场传输中有部分光会偏离主光束传

播方向, 随着光束的传播这部分光将会超出光斑几
何尺寸范围, 最终沦为杂散光。在激光的功率能量

收稿日期: 2013-07-29; 收到修改稿日期: 2013-10-19

基金项目: 国家 863 计划

作者简介: 魏继锋(1980—), 男, 博士研究生, 副研究员, 主要从事激光参数诊断与评估技术方面的研究。

E-mail: wjfc02000@163.com

导师简介: 孙利群(1965—), 男, 博士, 教授, 主要从事光谱测试与激光干涉测试技术方面的研究。

E-mail: sunlq@pim.tsinghua.edu.cn

较低时杂散光的占比也较低,其影响主要体现在使成像系统信噪比降低上^[1-3],但是当激光的功率和能量较高时,将有相当一部分能量会损耗在光学通道内,并使光学镜架及防护光阑温度升高甚至损坏,同时光学镜架及光阑温度变化和热变形会造成扰动使得光束质量急剧恶化,严重影响氧碘化学激光(COIL)的传输^[4-5]。目前各种文献上还少有高能激光杂散光近场特性相关的研究和报道,迫切地需要对高能激光近场杂散光的传输特性作深入研究,获得杂散光占总能量的比例及其传输角谱特征。利用杂散光的角谱及比例就可以计算出光学通道内任意位置处的杂散光的强度,这为杂散光的防护和进一步研究提供重要的参考。

2 杂散光产生机理

杂散光的空间频率与主激光束的空间频率通常并不相同,因此传输规律也有所差异,并且不同类型的杂散光产生机理和传输规律也不尽相同。高能激光的腔镜多数为凹凸共焦腔^[6],图1中给出了一种典型的高能激光腔镜结构示意图,包括一个凸镜(M2)、一个凹镜(M1)和一个输出镜(M3)。

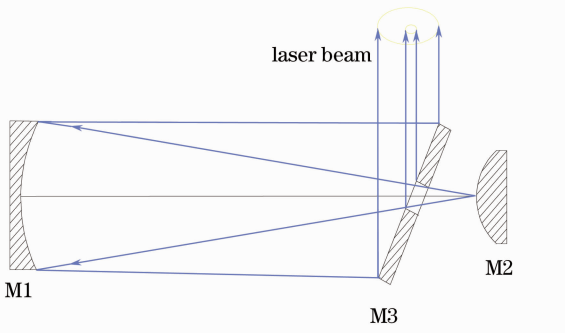


图1 高能激光腔镜的基本结构示意图

Fig. 1 Diagram of basic construction of endoscope for high energy laser

根据激光原理的相关知识,COIL杂散光主要包括以下几部分:光腔腔镜和其他光学元件及光阑衍射、高阶模、几何损耗、镜面散射等。这几种成分的杂散光往往是叠加在一起的,尤其是衍射光和高阶模,很难用测试手段分别将其测量出来。首先分析高阶模,高能激光出射光可近似超高斯束或者球面波处理^[7],下面给出了一组典型的非稳腔光腔参数:光腔长度为12 m计算,口径 $\Phi 200$,波长为1.315 μm 。该激光器对应的菲涅耳数约为634,对于如此之高的菲涅耳数,必然会有众多高阶模从输出镜输出,这部分光与主光束(基模)相比具有不同

的波阵面,并且发散角随着阶数的增加不断增大^[8]。衍射光是杂散光的主要来源,由于光学通道中光学器件及光阑数量众多,另外激光的光束质量的恶化也会加大外围衍射光的占比。在**高能激光杂散光特性研究**中,由于研究的区域主要集中在光学传输通道,其距离通常只有数十米,满足菲涅耳衍射条件,因此可以利用基尔霍夫-菲涅耳衍射公式来进行数值计算。另外由于光学镜表面的粗糙度以及镜面可能被污染等造成的影响会使得光束在镜面发射散射,这种散射也会增加杂散光的占比,这种散射主要集中在偏离反射光 $\pm 15^\circ$ 的范围内,尽管其占比较少,但是由于光学元件的数量众多,通常会有十余块,因此其影响也不容忽视。最后由激光原理的相关知识可知几何损耗主要发生在光腔内部,通常这部分占比相对于衍射等小得多,而且其发散速度也相对其他成分大得多,通常在光腔内部或者在激光器出口附近就衰减殆尽,因此通常忽略其影响。

根据上面的理论分析,衍射光和高阶模在杂散光中的占比较大,并且其传输规律也类似。

3 杂散光近场传输规律

由于菲涅耳衍射积分公式是一个复二重积分,没有解析表达式,可以利用其卷积形式,结合快速傅里叶变换进行数值模拟分析,菲涅耳衍射积分公式为^[9]

$$E_2(x_2, y_2) = \frac{1}{i\lambda z} \exp(ikz) \iint_{\mathcal{S}} E_1(x_1, y_1) \times \exp\left\{\frac{ik}{2z}[(x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2]\right\} dx_1 dy_1, \quad (1)$$

式中 (x_1, y_1) 为入射场坐标, (x_2, y_2) 为衍射场坐标, $E_1(x_1, y_1)$ 为入射光振幅, λ 为波长, k 为波矢, z 为传输距离。

由(1)式可以得到菲涅耳衍射积分的卷积形式为

$$E_2(x_2, y_2) = \exp\left(i\frac{2\pi z}{\lambda}\right) \mathcal{F}^{-1}\left\{\mathcal{F}[E_1(x_1, y_1)] \times \exp[-i\pi\lambda z(f_x^2 + f_y^2)]\right\}. \quad (2)$$

式中 \mathcal{F} 和 \mathcal{F}^{-1} 分别表示傅里叶变换和逆傅里叶变换。设入射光斑为平面波,光束外径 $R_2 = 100$ mm,内径 $R_1 = 37.5$ mm,波长 $\lambda = 1.315$ μm ,计算得到光束传输30 m时的光斑分布如图2所示。

对 $\Phi 200$ 口径以外的光能积分后可得外围杂散光能量占总能量的比例约为1.7%。

对于高阶模的贡献则可以根据其横模的构成和

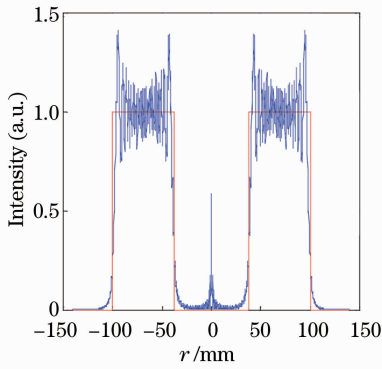


图2 激光传输 30 m 时的光强分布

Fig. 2 Intensity distribution of laser after travelling 30 m

不同横模的传输规律分析得到,通道内任意位置处横模所产生的杂散光能量为

$$E_l = \sum (E_{01} \eta_{01} + E_{10} \eta_{10} + E_{20} \eta_{20} + E_{02} \eta_{02} + \dots + E_{mm} \eta_{mm}), \quad (3)$$

式中 E_l 为通道内任意位置 l 处横模所产生杂散光(主光束几何尺寸以外的光)的能量, E_{01} 、 E_{10} 、 \dots 、 E_{mm} 分别为各个横模的能量, η_{01} 、 η_{10} 、 \dots 、 η_{mm} 分别为各个横模对该处杂散光贡献的能量权重。由激光原理可知横模随着阶数增加能量逐渐减少,发散角增大,因此通道的前端阶数越高权重越大,在后端权重逐渐降低。对于高能激光由于横模众多,要获取每个横模的能量和占比非常困难,但可以通过间接方法测量得到。

另外上面对衍射的分析和模拟均是采用理想平面波作为研究对象,而实际高能激光束的波面和光束质量相对理想情况要恶劣得多,必然会导致光束更加弥散,外围的杂散光的占比也会显著增大,因此下面将采用实验方法获取杂散光的比例以及空间角谱。

4 30 m 距离自由传输时传输效率测量

为了获得激光自由传输 30 m 后的传输效率,需要测量激光进入 30 m 传输通道前后的能量,这里测量设备可以采用能量计也可以采用靶斑仪,但最重要的是两者要具备较好的一致性。为了达到上述目的,首先对两个全吸收能量计和两个靶斑仪(在此处也作为能量计使用)进行了现场比对实验。其中,两个全吸收能量计分别简称为 E1 和 E2(测量结果也分别以 E_1 、 E_2 表示),两个靶斑仪 T1 和 T2(测量结果分别以 T_1 和 T_2 表示),4 套系统实验前均经过标定^[10-15],能量计 E1 和 E2 的口径均为 $\Phi 300$,而 T1 和 T2 的口径分别为 $\Phi 264$ 和 $\Phi 315$,由于四套系统的接收口径存在差异,如果直接测量必然会对测量精度造成一定影响,考虑到通道内光学元件的最小口径为 $\Phi 260$,超出该范围的光束将无法在通道内传输,从应用的角度出发只有该区域以内的光才有效,因此在上述 4 套设备入口前均设置有一个内环为 $\Phi 260$ 的光阑,这样设备口径对测量结果的影响就可以忽略了。实验的光路图如图 3 所示。

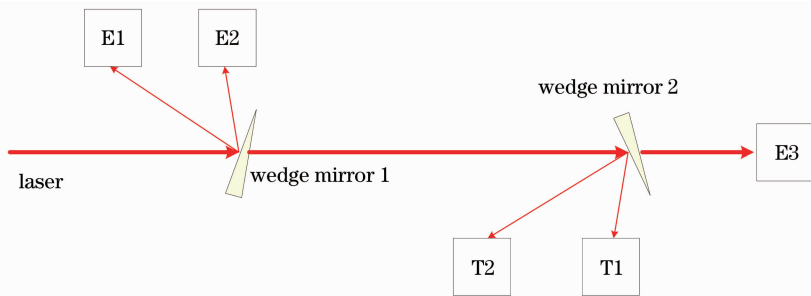


图3 测试系统一致性比对实验光路

Fig. 3 Layout for coherence contrast test of measurement system

图 3 中利用两个楔镜分光分别完成 E1 和 E2 以及 T1 和 T2 之间的现场比对, E3 为全吸收能量计,比对结果如表 1 所示(所有能量值均作归一化处理)。

由表 1 可以看出 T_1 和 T_2 之间一致性优于 E_1 和 E_2 之间的一致性,因此在通道传输效率测试中将以 T1 和 T2 的测量结果为准,测试的光路如图 4

所示。

图 4 中两个楔镜的摆放角度与图 3 中完成一致,30 m 通道中抽真空置换氮气。通道传输效率测试结果如表 2 所示。

由表 2 中可以看出三次实验的一致性较好,平均传输效率为 94.80% 自由传输时的整体传输效率约为 94.8%,而杂散光能量损失约占 5.2%。

表 1 能量测量系统一致性比对结果

Table 1 Results of coherence contrast test for measurement system

No.	E_1	E_2	T_1	T_2	E_1/E_2	T_2/T_1
1	0.245	0.233	0.252	0.248	1.026	0.998
2	0.259	0.246	0.258	0.253	1.023	0.996
3	0.616	0.612	0.624	0.612	0.978	0.993
4	1.000	1.000	1.000	1.000	0.973	1.013
Root mean square					0.03	0.008

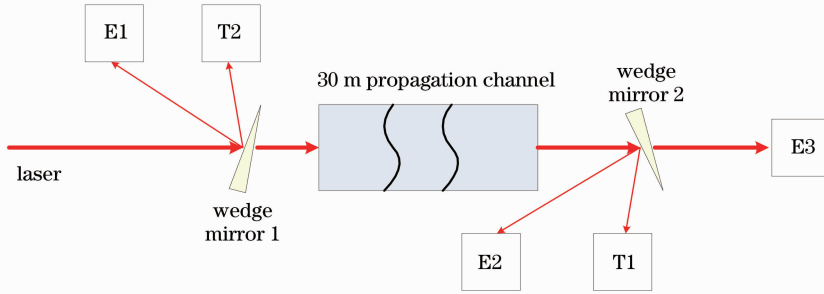


图 4 30 m 自由传输时传输效率测试光路

Fig. 4 Layout of propagation efficiency measurement for 30 m free propagation

表 2 30 m 自由传输时传输效率测试结果

Table 2 Results of propagation efficiency measurement for 30 m free propagation

No.	Efficiency	Loss
1	0.948	0.052
2	0.947	0.053
3	0.949	0.051

阑上的杂散光分布是近场效应,按几何光学传输处理,每个光阑上的杂散光分布是整个出射波面按散射角度积分的结果,后面的光阑受到前面光阑的遮挡,如图 5 所示(由于光阑和光束均是对称关系,因此图中只给出了光轴以上部分)。

根据图 5 中的几何关系在获取了某个光阑上吸收的激光能量以及对应的角度范围即可计算出该位置处的角谱,采用同样的方法可以得到所有光阑处的角谱,从而拟合出杂散光在整个近场的角谱曲线。

实验光路及光阑的布局如图 6 所示。

5 杂散光角谱测试

杂散光主要由衍射光和高阶模组成,其角谱分析均可以按照基尔霍夫-菲涅耳定律逐点积分完成,但整个计算过程和应用过程均非常复杂,考虑到光

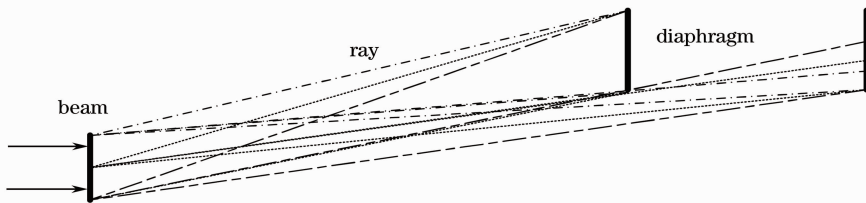


图 5 杂散光传输示意图

Fig. 5 Schematic diagram of stray light propagation

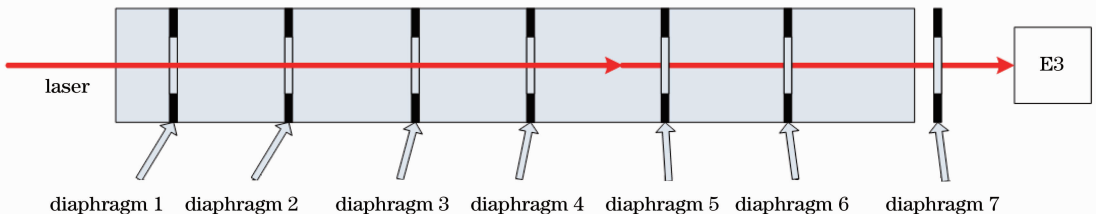


图 6 角谱测试光路布局

Fig. 6 Layout for angular power spectrum measurement

图 6 中光学通道内共设置有 7 个测试光阑,每个测试光阑前表面喷涂有黑色涂层,光阑后表面粘贴着多组热电偶传感器,光阑的吸收率和热损失实验前均经过严格标定,光阑 1~3 的内径为 $\Phi 210$,光阑 4~7 的内径为 $\Phi 220$,光阑 1~7 至激光器出口的距离分别为 11.83、16.03、20.38、24.57、28.77、32.96、39.47 m。

图 7 中给出了在相同条件下出光 8 s 时三发实验中各个光阑上的能量曲线(各个光阑上的能量已经归一化)。

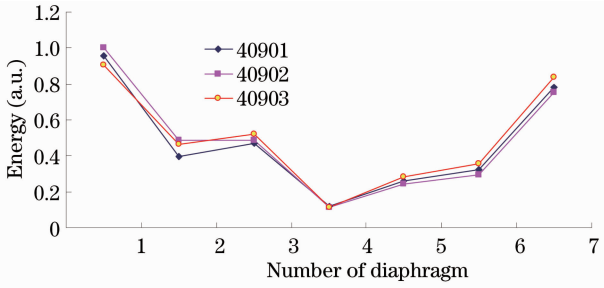


图 7 7 个光阑上的能量曲线

Fig. 7 Energy curves of seven diaphragms

由图 7 可以看出在出光 8 s 时 7 个光阑上的能量也具有较好的一致性。

图 8 中给出了不同测量时间下各个光阑处所测得的能量曲线。

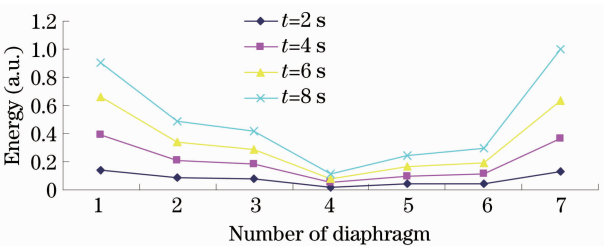


图 8 7 个光阑上不同出光时间的能量曲线

Fig. 8 Energy curves of seven diaphragms at different duration time

根据图 8 中的结果可以计算出通道内的角谱分布 $P(\theta)$ 随时间变化规律如图 9 所示。图 10 为不同光阑处不同出光时间的角谱的线图。

由图 9 和图 10 可以看出随着传输距离增加,激光衍射到主束外的能量非线性增加,实验结果与理论分析相符。随出光时间增长,激光束光束质量和近场均匀性退化,光瞳外环出现弥散,同一光阑上沉积的能量呈非线性增加。

根据图 9 的角谱即可计算出不同位置处的光阑上的热负荷,从而为高能激光通道热管理设计提供依据。

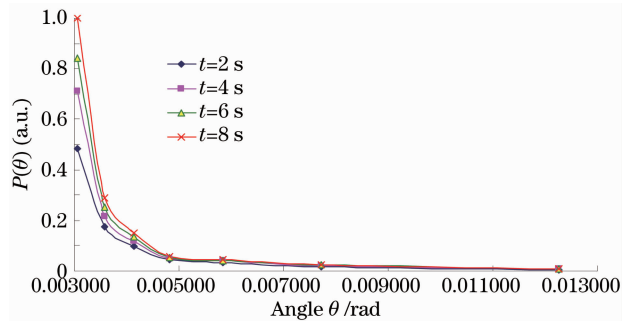


图 9 不同出光时间下的杂散光角谱曲线

Fig. 9 Angular power spectral curves of stray light at different duration time

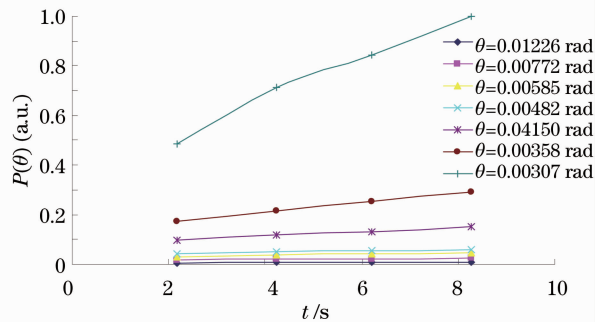


图 10 不同光阑处不同出光时间的角谱曲线

Fig. 10 Angular power spectral curves of different diaphragms at different duration time

6 镜面散射光测试

为了测试镜面的散射光强度,在一个 45° 反射镜入射光方向和反射光方向各安装一个 $\Phi 220$ 的光阑,如图 11 中测试光阑 1 和测试光阑 2,由于入射光方向还会受到来自前端的衍射光的影响,因此在测试光阑前还设置有一个屏蔽光阑,两个测试光阑距离镜面中心的距离均为 40 cm,其实际布局如图 11 所示。

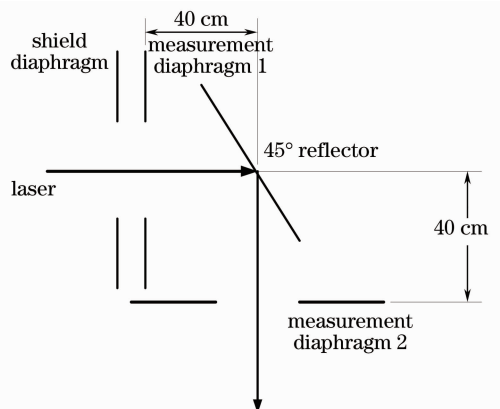


图 11 散射光测量布局图

Fig. 11 Layout to measure the scattering light

测试结果如表 3 所示(所有能量值均已归一化处理)。

由表 3 可以看出在 1 s 时单块镜子散射光占总能量的比例约 0.13%,而 8 s 时散射光占总能量的比例则增大至约 0.23%,如果考虑光阑 2 受到前端

角谱衍射的影响,可以计算出大约有 0.3% 衍射能量会到达反射光测试光阑 2。当光路中的光学元件的数量增加至 10~20 块时,镜面散射造成的总的能量损失占总能量的比例将达到 2%~5%。

表 3 镜面散射光能量测试结果

Table 3 Measurement results of the scattering light energy from the mirror

No.	Duration /s	Laser energy	Energy measured by diaphragm 1	Energy measured by diaphragm 2	Scale of the loss /%
1	1	1	0.00031	0.00104	0.14
2	8	1	0.00055	0.00186	0.24
3	1	1	0.00047	0.00075	0.12
4	8	1	0.00092	0.00134	0.23

7 分析与讨论

7.1 30 m 通道自由传输时的测量精度分析

根据上述测量方法可以得到测试的物理模型如下:

$$\bar{k} = \sum_{m=1}^n \frac{E_{T_{2m}}}{E_{T_{1m}}} / n, \quad (4)$$

$$\eta = \frac{E'_{T_2} T_t}{E'_{T_1} \bar{k}},$$

式中 $E_{T_{2m}}$ 和 $E_{T_{1m}}$ 分别为一致性比对试验中两个靶斑仪测量的结果, n 为测量次数, \bar{k} 为标定系数的平均值, T_t 为楔镜的透射率, E'_{T_2} 和 E'_{T_1} 分别为通道传输效率测试中两个靶斑仪的测试结果, η 为传输效率。

根据上述测量模型可以看出影响传输效率 η 测量精度造成影响的因素包括:靶斑仪 T1 和靶斑仪 T2 之间的重复性影响,楔镜前后摆放角度偏差影响,两个靶斑仪摆放角度和位置前后不一致影响。靶斑仪 T1 和靶斑仪 T2 之间的重复性误差造成标准偏差约为 0.8%。考虑到 COIL 光存在偏振态,入射光入射角度不同会导致 p 光和 s 光的反射率和透射率发生变化,进而影响楔镜的最终反射率和透射率发生变化。但是上面的测量模型中楔镜的透射率受到角度的影响远小于反射率受到角度的影响。楔镜的角度为 5°,摆放时角度误差按照 $\pm 3^\circ$ 计算,考虑偏振态的影响,此时角度造成的最大测量偏差约 0.6%。两个靶斑仪由于在前后摆放的位置和角度可能存在差异会造成光斑所覆盖的靶斑仪上的位置和强度有所差异,但由于靶斑仪上传感器之间的间距很小,约为 8~10 mm,对应的面积占整个光斑所覆盖面积的比例很小,可以忽略,另外由于两个

靶斑仪采用的是漫透射取样模式^[16-17],根据之前的标校结果,靶斑仪角度变化 $\pm 10^\circ$ 以内时,对测量精度造成的最大偏差约为 0.3%。根据上面的分析,传输效率的最大测量偏差约为 2% ($k=2$)。

7.2 杂散光角谱应用

由前面的分析可以看出光束质量的恶化会导致角谱增大,在没有主动光束控制的情况下,出光时间越长光束质量的稳定的难度也越大,因此导致角谱随出光时间增长,由图 10 可以明显看出这一特征。根据图 10 的曲线拟合就可以得到在无主动光束控制条件下更长出光时间时的角谱曲线。但是如果考虑主动光学控制的情况,光束质量稳定在某个数值附近时,角谱特征受到的影响就会小许多,当然这也需要在后续的实验作进一步验证。

由图 9 的角谱曲线可以看出小角度的角谱远大于大角度,因此在相同条件下后端的光阑上的热负荷高于前端的光阑,第 1 个光阑处尽管角谱数值较小,但是由于覆盖的角度范围较大,最终光阑上承受的热负荷也较高,因此在设计中需要重点考虑上述两个位置的热负荷及热管理能力。以图 6 中的光阑布局为例,在其他条件不变的情况下,对于前端第 1 个光阑可以采取在该光阑前增加一个同样规格的光阑的方式减轻其热负荷,图 12 中给出了第 1 个光阑上的热负荷与前端光阑距离 D 之间的关系。

对于最后一个光阑(光阑 7)可以通过减小与前端光阑的距离来降低光阑上的热负荷,图 13 中给出了最后一个光阑(光阑 7)上的热负荷与前端光阑距离之间的关系。

对于每个光阑上的热负荷可以采用上述方法进行设计和布局,最终到达优化设计的目的。

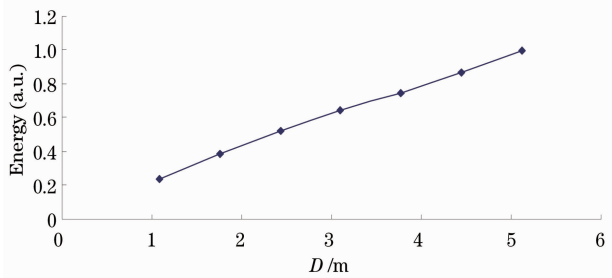


图 12 第 1 个光阑上的热负荷与前端光阑距离 D 之间的关系

Fig. 12 Relationship between heat burthen of diaphragm 1 and distance D from the front diaphragm

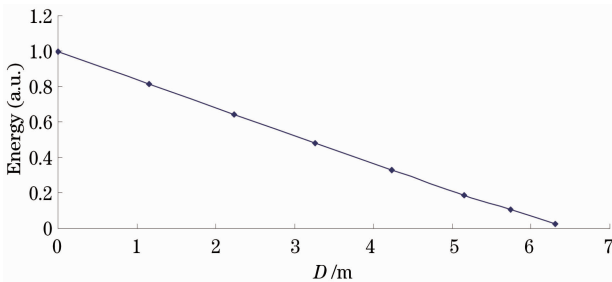


图 13 第 7 个光阑上的热负荷与前端光阑距离 D 之间的关系

Fig. 13 Relationship between heat burthen of diaphragm 7 and distance D from the front diaphragm

8 结 论

在 高 能 激 光 近 场 光 学 传 输 通 道 内 存 在 大 量 的 杂 散 光, 这 部 分 光 会 对 主 光 束 的 传 输 和 光 束 质 量 的 控 制 造 成 严 重 的 影 响。通 过 对 杂 散 光 的 产 生 机 理、类 型 和 传 输 规 律 的 分 析、模 拟, 确 定 了 不 同 类 型 杂 散 光 的 测 量 方 法, 并 通 过 不 同 的 实 验 测 量 得 到 了 不 同 类 型 杂 散 光 的 定 量 结 果 和 角 谱 特 征。在 自 由 传 输 条 件 下 30 m 的 传 输 通 道 内 能 量 损 失 约 为 5%, 越 往 通 道 后 端 其 角 谱 值 数 值 越 大。角 谱 值 会 受 到 光 束 质 量 的 影 响, 当 光 束 质 量 恶 化 时 会 导 致 角 谱 值 增 大, 通 道 内 的 能 量 损 失 会 增 加。实 验 同 样 表 明 镜 面 散 射 也 会 带 来 能 量 的 损 失。根 据 角 谱 曲 线 可 以 调 整 每 个 光 阑 的 位 置 和 尺 寸, 从 而 达 到 优 化 和 控 制 热 负 荷 的 目 的, 并 为 高 能 激 光 系 统 热 管 理 技 术 奠 定 坚 实 的 基 础。

致 谢 感 谢 万 敏、陈 兴 无、胡 晓 阳、周 文 超、刘 军、张 家 如、蒋 志 雄、何 均 章、吴 建 平、胡 鹏、沙 子 杰、冷 杰 等 在 研 究 过 程 中 提 供 的 建 议 和 帮 助。

参 考 文 献

1 Li Xiaoping, Wang Gang, Hu Tingliang. High-precision stray

- light measurement system analysis [J]. *Infrared Technology*, 2011, 33(9): 521–524.
- 李晓平, 王 钢, 胡 亭 亮. 高 精 度 杂 散 光 测 量 系 统 分 析 [J]. *红 外 技 术*, 2011, 33(9): 521–524.
- 2 G Frank, F John. Stray light testing of the OLI telescope [C]. SPIE, 2010, 7794: 77940W.
- 3 F John, G Frank, F Tim, *et al.*. New stray light test facility and initial results [C]. SPIE, 2008, 7069: 70690O.
- 4 Rao Peng, Liu Wenguang, Hua Weihong. Thermal distortion influence of reflector on output beam quality of HEL system [J]. *Optics & Optoelectronic Technology*, 2009, 7(3): 13–15.
- 饶 鹏, 刘 文 广, 华 卫 红. 反 射 镜 热 畸 变 对 高 能 激 光 系 统 输 出 光 束 质 量 的 影 响 [J]. *光 学 与 光 电 技 术*, 2009, 7(3): 13–15.
- 5 Claude A Klei. Thermally induced optical distortion in high energy laser systems [J]. *Optical Engineering*, 1979, 18(6): 591–601.
- 6 Su Yi, Wan Min. High Energy Laser System [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2004. 83–85.
- 苏 毅, 万 敏. 高 能 激 光 系 统 [M]. 北 京: 国 防 工 业 出 版 社, 2004. 83–85.
- 7 Lü Baida. Laser Optics: Laser Beam Propagation and Beam Quality Control [M]. Sichuan: Sichuan University Press, 1992. 121–122.
- 吕 百 达. 激 光 光 学: 激 光 束 的 传 输 变 化 和 光 束 质 量 控 制 [M]. 四 川: 四 川 大 学 出 版 社, 1992. 121–122.
- 8 Zhou Bingkun, Gao Yizhi. Laser Principle [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2010. 56–57.
- 周 炳 琨, 高 以 智. 激 光 原 理 [M]. 北 京: 国 防 工 业 出 版 社, 2010. 56–57.
- 9 M Born, E Wolf. Principle of Optics [M]. 7th ed. Cambridge: Cambridge University Press, 1999.
- 10 Wei Jifeng, Guan Youguang, Zhang Kai, *et al.*. Online calibration methods for high energy laser energy measuring equipment [J]. *Chinese J Lasers*, 2009, 36(9): 2399–2403.
- 魏 继 锋, 关 有 光, 张 凯, 等. 高 能 激 光 能 量 测 量 装 置 现 场 标 定 方 法 研 究 [J]. *中 国 激 光*, 2009, 36(9): 2399–2403.
- 11 Wei Jifeng, Zhang Kai, Zhou Shan, *et al.*. Calibration of high-energy-laser calorimeter [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2008, 20(11): 1798–1802.
- 魏 继 锋, 张 凯, 周 山, 等. 高 能 激 光 能 量 计 溯 源 问 题 研 究 [J]. *强 激 光 与 粒 子 束*, 2008, 20(11): 1798–1802.
- 12 Wei Jifeng, Sun Liqun, Zhang Kai. Volume absorption laser energy meter for high energy laser by water absorption [J]. *Appl Phys B: Laser and Optics*, 2013, 110(4): 573–578.
- 13 Wei Jifeng, Sun Liqun, Zhang Kai. Study on the influence of the response characteristics of the temperature sensor on the measurement accuracy of a water-absorption-based high energy laser energy meter [J]. *Meas Sci Technol*, 2013, 24(5): 055103.
- 14 Yang Pengling, Feng Guobin, Wang Zhenbao, *et al.*. Mid-infrared high energy laser beam detector array [J]. *Chinese J Lasers*, 2011, 38(7): 0702008.
- 杨 鹏 翎, 冯 国 斌, 王 振 宝, 等. 中 红 外 激 光 光 斑 探 测 阵 列 [J]. *中 国 激 光*, 2011, 38(7): 0702008.
- 15 Yang Pengling, Feng Guobin, Wang Zhenbao, *et al.*. Detector array for measuring far-field power density distribution of mid-infrared laser [J]. *Chinese J Lasers*, 2010, 37(2): 521–525.
- 杨 鹏 翎, 冯 国 斌, 王 振 宝, 等. 测 量 中 红 外 激 光 远 场 光 斑 的 光 电 阵 列 靶 斑 仪 [J]. *中 国 激 光*, 2010, 37(2): 521–525.
- 16 Pang Miao, Yuan Xuewen, Gao Xueyan, *et al.*. Spot distortion calibration in measurement of laser intensity distribution based on imaging by scattering [J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, 30(2): 451–454.
- 庞 淼, 袁 学 文, 高 学 燕, 等. 散 射 成 像 法 测 量 激 光 强 度 分 布 中 的 光 斑 畸 变 校 正 [M]. *光 学 学 报*, 2010, 30(2): 451–454.
- 17 Liu Renchen, Wu Yonggang, Xia Zihuan, *et al.*. Submicron AZO gratings and diffuse transmittance distribution [J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, 32(7): 0731001.
- 刘 仁 臣, 吴 永 刚, 夏 子 奂, 等. 亚 微 米 AZO 光 栅 及 其 漫 透 射 分 布 特 性 [J]. *光 学 学 报*, 2012, 32(7): 0731001.

栏 目 编 辑: 宋 梅 梅