

# 高能化学氧碘激光激光近场高频光角谱特性研究

魏继锋<sup>1,2,3</sup> 安建祝<sup>4</sup> 苏毅<sup>1</sup> 陈兴无<sup>1</sup> 万敏<sup>1</sup> 张卫<sup>1</sup> 范国滨<sup>5</sup>

<sup>1</sup> 中国工程物理研究院应用电子学研究所, 四川 绵阳 621900

<sup>2</sup> 清华大学精密计量与仪器科学国家重点实验室, 北京 100074; <sup>3</sup> 中国工程物理研究院研究生部, 北京 100088

<sup>4</sup> 北京应用物理与计算数学研究所, 北京 100094; <sup>5</sup> 中国工程物理研究院高新技术研究中心, 北京 100094

**摘要** 高能化学氧碘激光(COIL)激光近场存在着大量的高频光,这部分光会对光束质量及强光通道附近的系统造成严重的危害,因此需要研究这些高频光在近场的传输规律。分析了各种不同的高频光的产生机理和特性,其中输出镜的衍射和高阶模对高频光的贡献最大,因此是主要研究对象。通过在光学通道内设置多个测试光阑测量了不同位置的能量,并根据该位置的空间角计算出高频光角谱。采用了三种不同的研究方法分别计算在不同出光时间下的角谱特征,得到了较一致的结果。研究结果表明高频光的角谱越往通道后端数值越大,当光束质量恶化时角谱值增大,通道内的能量损失增加。根据角谱曲线可以计算出每个防护光阑上的功率和能量,这为高能 COIL 激光系统热管理技术奠定了坚实的基础。

**关键词** 激光技术; 高能激光; 高频光; 衍射; 测试光阑; 角谱; 拟合

中图分类号 O348 文献标识码 A doi: 10.3788/CJL201441.0502009

## Research on Near-Field Angular Power Spectrum Characteristics of High Frequent Light in High Energy Chemical Oxygen Iodine Laser

Wei Jifeng<sup>1,2,3</sup> An Jianzhu<sup>4</sup> Su Yi<sup>1</sup> Chen Xingwu<sup>1</sup>

Wan Min<sup>1</sup> Zhang Wei<sup>1</sup> Fan Guobin<sup>5</sup>

<sup>1</sup> Institute of Applied Electronics, China Academy of Engineering Physics, Mianyang, Sichuan 621900, China

<sup>2</sup> State Key Laboratory of Precision Measurement Technology and Instrument, Tsinghua University, Beijing 100074, China

<sup>3</sup> Graduate School of China Academy of Engineering Physics, Beijing 100088, China

<sup>4</sup> Institute of Applied Physics and Computational Mathematics, Beijing, 100094, China

<sup>5</sup> High-Tech Equipment Center, China Academy of Engineering Physics, Beijing 100094, China

**Abstract** Much high frequent light exist in the near-field of the high energy chemical oxygen iodine laser (COIL), which cause serious harm to beam quality and system near the high power beam tune. So it is necessary to study the propagation laws of the high frequency light. The generating mechanism and characteristics of different high frequent light are analyzed. Since the diffraction of cavity mirror and higher-order modes contribute to most of the high frequent light, they are main objects of the study. The energies of different positions are measured by the measurement diaphragm set in the beam tune. The angular power spectra of the high frequent light are calculated according to the corresponding space angles on the diaphragm. The angular power spectrum curves changing with the duration are analyzed by three different methods, and the accordant results are got. The research results show that the angular power spectrum in the front is bigger than that in the back, and the angular power spectrum increases with the deterioration of beam quality, and in the same time, the energy loss may enhance, too. The power and energy on each defending diaphragm can be calculated with the angular power spectra, which lays a good foundation of heat control technology for the high energy COIL.

**Key words** laser technique; high energy laser; high frequency light; diffraction; measurement diaphragm; angular power spectrum; fitting

**OCIS codes** 140.3295; 140.1550; 260.2160; 260.1960; 120.5820

收稿日期: 2013-10-15; 收到修改稿日期: 2013-11-10

基金项目: 国家高技术发展计划

作者简介: 魏继锋(1980—),男,硕士,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

本文电子版彩色效果请详见中国光学期刊网 www.opticsjournal.net

## 1 引 言

由于光腔及光学通道内各种光学元件的衍射效应以及高阶模等的影响,在高能化学氧碘激光(COIL)的近场存在着大量的高频光,这些光功率和能量绝对值会比较高,通常在近场传输中就会偏离主激光,辐照在镜架或者光阑上<sup>[1-2]</sup>,并使镜架和光阑的温度急剧升高,光阑温度升高会增大光学通道内湍流的影响,镜架温度急剧升高会增大镜面的应力,从而严重影响高能激光的光束质量<sup>[3-10]</sup>,为此需要研究这些高频光在近场的传输特性,为高频光的抑制和热管理工作的开展奠定坚实的基础。

由于高频光的成分复杂,在空间上和时间上均是不断变化的,而且主要分布在主激光束外围较大空间内,这给高频光的测量和分析工作带来了较大的困难,目前这方面的研究还没有相关的文献报道。本文在光学通道内设置多个测温光阑,通过测量通道内不同位置处的高频光能量间接得到高频光强度变化信息,并采用三种不同的研究方法计算出整个通道内高频光角谱特性。

## 2 高频光产生机理分析

在 COIL 激光产生和近场传输过程中许多的因素都会造成光线偏离主光束成为高频光,下面将一一对其进行分析。

### 1) 光腔腔镜衍射

根据激光原理的相关知识,激光是光束在光腔中不断放大和衍射的结果<sup>[11]</sup>,光束每经过腔镜反射一次均会发生一次衍射,其中对近场高频光特性影响主要体现在输出镜对光束的衍射上。在光学传输通道内这种衍射符合菲涅耳衍射特征,文献[12]中对于一个 $\Phi 200$  mm 口径的均匀平面波进行了模拟,在距离光腔出口 30 m 的位置处 $\Phi 200$  mm 口径以外的光能积分后约占整个光束总能量的比例为 1.7%。然而实际光束由于热效应、光学元件的像差影响、流场特性及腔内介质和其他各种激光器参数的影响导致光束质量恶化和光束不均匀,实际波面与平面波会存在很大差异,此时主光束周围的高频分量必然会比理想平面波高得多,随着光束在近场不断传输,这些衍射光逐渐偏离主光束。由于主光束的功率密度通常较高,这部分高频光由主光束衍射产生,其相对强度通常会较其他部分的衍射高得多,并且由内向外强度会快速衰减,因此这部分高频光是本文的主要研究对象之一。

### 2) 高阶模

为了获得高功率和高能量,COIL 激光的光腔通常设计成非稳腔,而且光腔的菲涅耳数通常较大,这会导致大量的高阶横模的产生,主光束通常为基模,其他一些高阶模随着主光束一起输出,高阶模随着阶数的增大发散速度也会急剧增大,所占能量的比例则会急剧减小,高阶模也是高频光的主要来源,在本文中也作为主要研究对象。

### 3) “寄生波”

COIL 激光内部流场特性非常复杂,而且存在结构的周期性,必然会使高频分量增加,另外当局部较小的一个区域内气流和介质在一定条件下满足激光震荡条件时,将会产生小尺度的“寄生波”。这种“寄生波”与主光束具有完全不同的波阵面,其传播规律与主光束也不同,但由于“寄生波”的产生具有较大的随机性,并且占总能量的比例很小,因此不作为本文的主要研究对象。

### 4) 光学元件和光阑的衍射

在光学传输通道内存在着量的光学元件和光阑,但是基于安全的原因光学元件和光阑的口径通常要比主光束的口径大得多,因此光学元件和光阑只会对经过的高频光造成二次衍射,结合因素 1) 和 2) 中的分析,这种二次衍射对高频光总量和分布的贡献远小于光腔腔镜的衍射和高阶模的影响,因此本文忽略其影响。

### 5) 镜面散射

由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生散射,但单块光学镜对高频光的贡献相对腔镜的衍射和高阶模小得多,为了简化研究模型,本文忽略镜面散射的影响。

上述 5 部分高频光中腔镜的衍射和高阶模的影响最显著,本文将围绕着这两部分高频光的传输特性开展研究。

## 3 高频光传输理论及研究方法

尽管高频光存在多种成分,但不管是衍射分量还是高阶模的影响均可以看作是多个波阵面在通道中某一位置的叠加,因此可以以光腔输出镜为起点进行分析,而研究对象则为通道内主光束覆盖区域以外的部分,为了获得高频光强度在主光束外围设置有环形测试光阑,光阑内径比主光束外径稍大,光阑的中心与主光束的中心基本重合。由于光阑外环部分的功率密度很低,对光学通道内器件和光束质量的影响已经可以忽略了,因此这里重点研究测试光阑环带上的

功率能量大小及分布。如果要准确得到测试光阑上的功率能量则需要对激光器输出镜处的每个波阵面采用菲涅耳衍射积分公式计算,然后再进行相干或者非相干叠加,菲涅耳衍射积分公式如下<sup>[13-15]</sup>:

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

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,  $\lambda$  为波长,  $k$  为波矢,  $z$  为传输距离。

由于涉及多个波阵面在不同区域的积分和叠加,整个计算过程非常复杂,工程实现难度很大,但考虑到整个光学通道仍然位于激光的近场所覆盖的区域内,因此可以采用几何光学的原理进行简化,如图 1 所示,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。

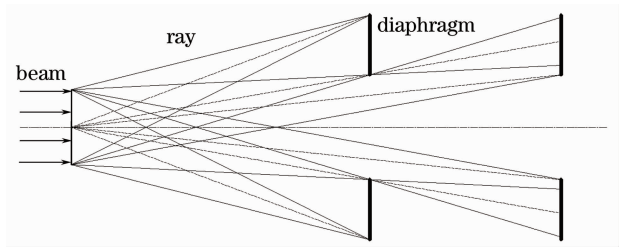


图 1 高频光传输示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the propagation for the high frequent light

根据每个测试光阑的空间角以及光阑上的功率能量就可以计算出该空间角附近的角谱,角谱的定义如下:

$$s(\theta_{ave}) = \frac{p}{\pi(\theta_2^2 - \theta_1^2)}, \quad (2)$$

式中  $\theta_{ave} = (\theta_2 + \theta_1)/2$ ,  $s(\theta_{ave})$  为  $\theta_{ave}$  处 ( $\theta_1 \sim \theta_2$  范围内) 的空间角谱,  $p$  为光阑上的平均功率,为了保证角谱的代表性,  $\theta_1 \sim \theta_2$  范围不宜过大,当  $\theta_2 \rightarrow \theta_1$  时,

$\theta_{ave} \rightarrow \theta_1$ , 此时即可代表该位置的角谱,否则则是  $\theta_1 \sim \theta_2$  范围内的平均角谱,在获得了整个通道内不同位置处的角谱以后就可以得到一条角谱曲线,根据任意光阑的空间角和角谱曲线就可以估算出该光阑上的功率能量。

图 2 为高频光在光阑上形态分布图。由图 2 中可以看出其强度分布内环远高于外环,这种规律符合菲涅耳衍射特征,另外光强的分布也存在一定的非对称性,这主要是由于实际高能激光束的分布也不均匀,并且在传输过程中会存在漂移,为了简化实验模型,在研究中不考虑其非对称性影响。

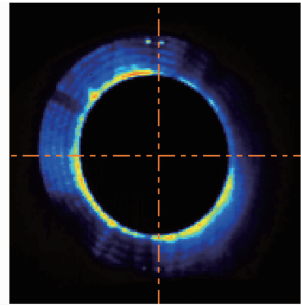


图 2 高频光形态分布

Fig. 2 Shape and distribution of the high frequency light

#### 4 测试光路布局

测试光路及光阑的布局如图 3 所示。图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,光阑后表面粘帖着多组热电偶传感器,在进行光阑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  $\Phi 210$  mm,光阑 4~7 的内径为  $\Phi 220$  mm,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,在通道末端设置有一个全吸收能量计 E3, E3 大多为量热型<sup>[16-18]</sup>,距离最后一个光阑的距离在 6 m 以上,另外由于 99% 以上主激光束能量会被全吸收能量计吸收,因此后端光路不会影响前端光阑测试精度。

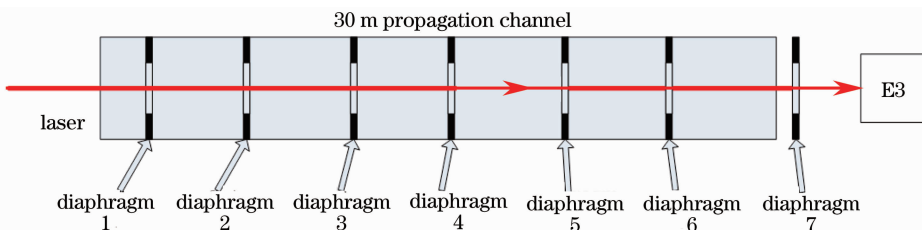


图 3 角谱测试光路布局

Fig. 3 Layout to measure the angular power spectrum

## 5 光阑测试结果

表 1 给出了 1101~1104 实验中的不同测量时间下各个光阑处所测得的归一化能量值。

表 1 不同测量时间下 7 个光阑处的能量

Table 1 Energies of the seven diaphragms with different durations

| No.         | 1101  | 1102  | 1103  | 1104  |
|-------------|-------|-------|-------|-------|
| $t/s$       | 2     | 4     | 6     | 8     |
| Diaphragm 1 | 0.143 | 0.395 | 0.660 | 0.905 |
| Diaphragm 2 | 0.085 | 0.205 | 0.343 | 0.483 |
| Diaphragm 3 | 0.074 | 0.184 | 0.288 | 0.414 |
| Diaphragm 4 | 0.022 | 0.049 | 0.078 | 0.110 |
| Diaphragm 5 | 0.042 | 0.097 | 0.161 | 0.245 |
| Diaphragm 6 | 0.047 | 0.112 | 0.192 | 0.295 |
| Diaphragm 7 | 0.128 | 0.365 | 0.631 | 1.000 |

下面将以表 1 中的测试数据为例,采用三种不同的模型和方法分析高频光角谱:简化的几何光学模型、光阑能量拟合模型和光阑功率密度分布拟合模型。

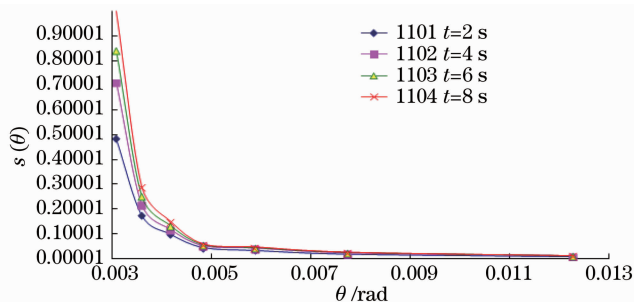


图 4 不同出光时间下的杂散光角谱曲线

Fig. 4 Angular power spectrum curves with different durations

图 5 给出了不同出光时间下各光阑上归一化后能量变化曲线。由图 5 可以看出随着传输距离增加,激光衍射到主光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的退化,光瞳外环出现弥散,造成

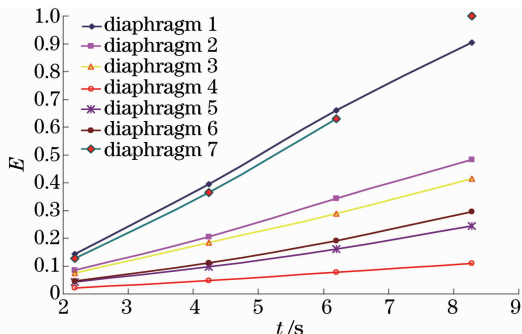


图 5 能量随出光时间的变化曲线

Fig. 5 Energy curves changing with the duration

## 6 角谱数据研究方法

### 6.1 简化的几何光学模型

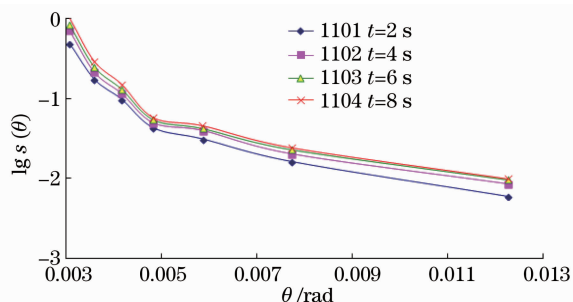
由于光阑距离光腔输出镜的距离相对光阑的尺寸大得多,因此可以将光腔输出镜处的光斑看作一个点源发出,则光学通道上每个光阑对应的角度范围如表 2 所示。

表 2 每个光阑对应的角度范围

Table 2 Angle range of each diaphragm

|             | Distance /<br>m | $\theta_1 /$<br>rad | $\theta_2 /$<br>rad | $\theta_{ave} /$<br>rad |
|-------------|-----------------|---------------------|---------------------|-------------------------|
| Diaphragm 1 | 11.83           | 0.00888             | 0.01564             | 0.01226                 |
| Diaphragm 2 | 5.03            | 0.00655             | 0.00888             | 0.007715                |
| Diaphragm 3 | 20.38           | 0.00515             | 0.00655             | 0.00585                 |
| Diaphragm 4 | 24.57           | 0.00448             | 0.00515             | 0.004815                |
| Diaphragm 5 | 28.77           | 0.00382             | 0.00448             | 0.00415                 |
| Diaphragm 6 | 32.96           | 0.00334             | 0.00382             | 0.00358                 |
| Diaphragm 7 | 39.47           | 0.00279             | 0.00334             | 0.003065                |

根据表 1 中的能量数据和表 2 中的角度数据计算高频光角谱,结果如图 4 所示。



同一光阑上沉积的能量非线性增加。

### 6.2 光阑能量拟合模型

为了降低复杂度,假定主激光光斑是均匀分布的,光阑能量积分权重  $w(\theta)$  与散射光角度  $\theta$  的关系

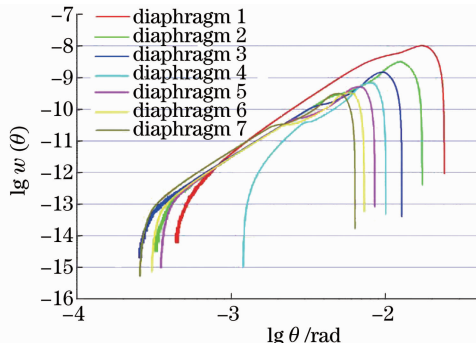


图 6 光阑能量积分关于角度的权重分布

Fig. 6 Weight distributions of the energy integral changing with the diaphragm angle

如图 6 所示。

每个光阑接收的能量  $E_i$  如下：

$$E_i = \int \omega(\theta) \cdot s(\theta) d\theta, \quad (3)$$

式中  $s(\theta)$  是散射光角谱能量密度,  $\omega(\theta)$  为积分角度权重。

分析的目标是拟合散射光角谱能量密度  $s(\theta)$ , 使得光阑能量计算值与实验值相对误差均方根  $R_m$

最小。

$$R_m = \sqrt{\sum_i [(E_i - p_i)/p_i]^2}, \quad (4)$$

式中  $p_i$  为实验值, 对应图 6 中角度范围。

根据图 6 中的角度范围对角度进行插值, 第  $i$  个插值点的角度为  $a(i)$ , 对应的角谱能量密度为  $e(i)$ , 离散点间角谱能量密度假设为双对数线性分布, 计算公式如下：

$$s(\theta) = 10 \times [\lg \theta - \lg a(i) \times \lg e(i+1) + \lg a(i+1) - \lg \theta \times \lg e(i)] / [\lg a(i+1) - \lg a(i)]. \quad (5)$$

采用蒙特卡罗求根法得到相应的角谱如图 7 所示。

由图 7 可以看出由于拟合的点较少, 拟合曲线存在较大的起伏, 因此误差也较大一些。

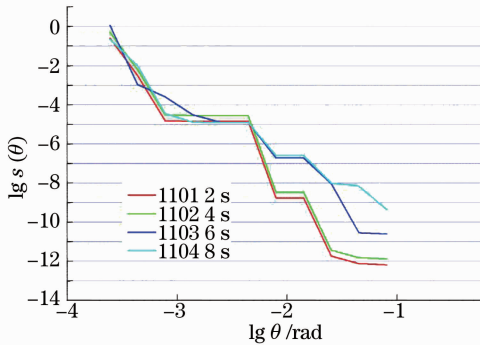


图 7 不同出光时间下的角谱曲线

Fig. 7 Angular power spectrum curves with different durations

根据图 7 中的角谱曲线也可以模拟出各个光阑上的能量, 并与实测值进行比较, 其结果如图 8 所示 (所有能量均为相对值)。

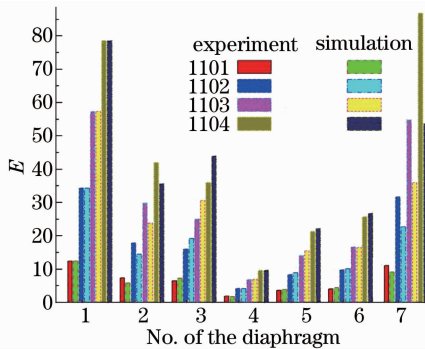


图 8 光阑上的能量模拟结果与实际结果对比

Fig. 8 Energy contrast of experimental value with simulation result of each diaphragm

从图 8 可以看到 1104 中第 7 号光阑有些扫边, 因此实测能量相对偏高, 其他各个光阑上的结果符

合得较好。

### 6.3 功率密度分布拟合模型

由于光阑的能量是采用温度传感器测量得到的, 而热电传感器均为积分型, 因此很难真实地反映光阑的功率密度分布, 但是考虑到在刚出光的最初零点几秒的时间内热量还来不及扩散, 此时的光阑背面众多的传感器的温升应该可以反映光束的功率密度分布, 为了简化计算模型忽略其分布随时间的变化, 这里取出光 0.4 s 时的温度分布计算, 图 9 中给出了各个光阑上由内环到外环的功率密度分布。

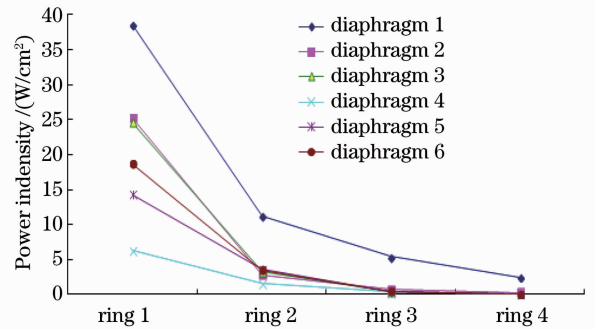


图 9 各个光阑上的功率密度分布曲线

Fig. 9 Power intensity distribution curve of each diaphragm

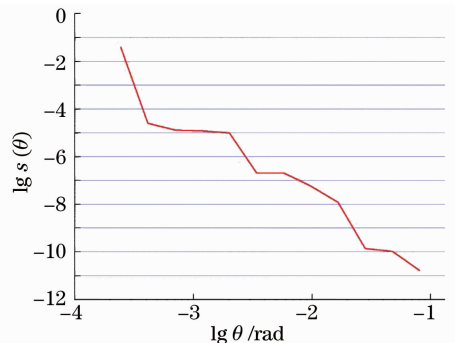


图 10 高频光角谱曲线

Fig. 10 Angular power spectrum curve of high frequency light

根据图 9 中的功率密度分布采用与 6.2 节类似的方法可以拟合出角谱分布曲线如图 10 所示。

### 6.4 三种模型测量结果比较

采用三种不同的方法对同一发数据进行处理,并将相同角度范围的角谱数据放在同一个坐标系中进行比较,其结果如图 11 所示(同种所有角谱仍然进行归一化处理)。

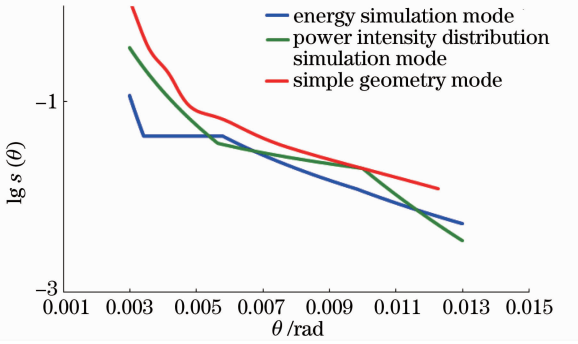


图 11 采用不同方法处理时的角谱对比

Fig. 11 Angular power spectrum contrast of the different methods

由图 11 可以看出三种不同的方法获得的角谱数据基本一致。但同时也可以看出拟合方法由于对测量点的数量要求更高,在测点有限的情况下曲线的平滑度较低,相对误差也会较大一些,但是其角谱覆盖范围较简单几何模型要大得多。

### 6.4 测量精度分析

根据第 2 节中的分析,对高频光角谱贡献最大的因素包括腔镜输出镜的衍射和高阶模。所测得的角谱中除了这两部分的贡献外,实际还包括通道内设置的多个光阑的二次衍射的成分,这部分高频光的影响可以从两个方面辩证的分析:一方面如果从实际应用的角度出发,在实际的光学通道内也存在多个光学镜和防护光阑,测试光阑对高频光角谱的影响与光学镜或者是防护光阑在实际光路中的影响

表 3 一个测试光阑的标定结果

Table 3 Calibration result of one measurement diaphragm

| No.                                    | 1     | 2     | 3     | 4     | 5     |
|--|-------|-------|-------|-------|-------|
| Calibration coefficient                | 1.137 | 1.150 | 1.185 | 1.163 | 1.146 |
| Average of the calibration coefficient |       |       | 1.156 |       |       |
| Standard deviation                     |       |       | 1.9%  |       |       |

## 7 讨 论

由第 6 节的分析的可知:

- 1) 近场高频光角谱随着传输距离的增加而逐渐增大,因此在光学通道后端防护的难度会增加;
- 2) 测试光阑被遮挡的部分存在着部分高频光,

是比较接近的,从这个角度出发测试光阑对测量精度的影响可以不予考虑;另外一方面实际上测试光阑的衍射效应是针对高频光,输出镜的衍射则是针对主光束,而主光束的功率密度通常比高频光功率密度高约几个数量级,因此在研究中可以忽略测试光阑二次衍射的影响。因此角谱的测量精度主要由测试光阑及其采集系统的测量精度决定。影响测试光阑测量精度的因素包括测试光阑的表面吸收系数、传感器及采集系统的精度、热损失以及校准精度等。为了保证测量精度,采用图 12 所示的校准系统。

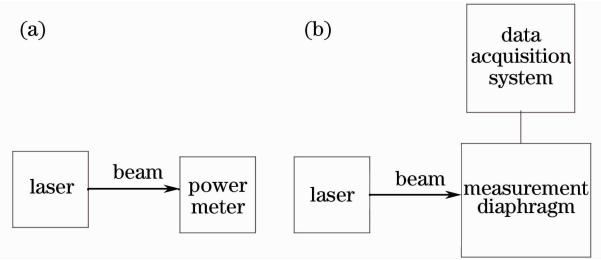


图 12 测试光阑校准框图

Fig. 12 Block diagram of calibration for the measurement diaphragm

采用图 12(a)中的布局测量激光器的输出功率,接着将测试光阑移开,换上测试光阑,按照图 12(b)的布局对测试光阑校准,图中激光器的功率约为 200 W,输出功率非稳定性引起的测量不确定度约为 2% ( $k=2$ ),功率计的测量不确定度约为 3% ( $k=2$ ),在对测试光阑的热损失进行修正以后再与激光的输出能量作比较就可以得到每个光阑的修正系数,多次测量后就可以计算出修正系数的测量不确定度,表 3 给出了其中一个光阑的标定结果。

同理可以得到其他几个测试光阑的修正系数和标准偏差,其中最大的标准偏差为 2.3%,这样通过测量不确定度合成就可以计算出所有测试光阑测量结果的最大测量不确定度为 5.8% ( $k=2$ )。

由于这部分光在计算中忽略了,因此计算的角谱值会比实际测量结果偏大一些;

- 3) 尽管测试光阑以外的区域高频光功率密度很低,但是这个区域面积非常大,因此光阑上的能量之和无法代表整个高频光的总能量;

4) 高频光角谱随出光时间的增加而增大,其原因初步判断是由于随着出光时间的增加激光光束质量和近场均匀性的退化,光瞳外环出现弥散,造成同一光阑上沉积的能量非线性增加,此结论还需进一步实验验证。

## 8 结 论

对三种不同的研究方法计算的结果进行比较,发现不管是简单的几何模型还是通过复杂的数值拟合模型计算得到的角谱曲线都具有较好的一致性,互相印证了所获得的角谱数据的真实性。由计算结果也可以看出在几种模型中简单几何模型角谱范围较小,但曲线更平滑,拟合模型覆盖的角度范围更宽,但由于测点数量有限,精度稍差。通过分析表明角谱测试精度主要由测试光阑自身的精度及标校准精度决定,角谱的测量不确定度约为 $5.8\%(k=2)$ 。分析高频光的角谱曲线可以看出高频光的角谱值越往通道后端数值越大,角谱值还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,因此当出光时间增加时,光束质量会有所退化,导致角谱会随出光时间增加而增大。根据角谱曲线可以计算出每个防护光阑上的功率能量,这为高能COIL激光系统热管理技术奠定了坚实的基础。

**致谢** 感谢常艳、黄德权、周山、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 Frank G, John F. Stray light testing of the OLI telescope[C]. SPIE, 2010, 7794: 77940W.
- 2 John F, Frank G, Tim F, *et al.*. New stray light test facility and initial results[C]. SPIE, 2008, 7069: 70690O.
- 3 A J Laderman. Thermal blooming in axial pipe flow: comment[J]. Appl Opt, 1980, 19(14): 2269—2270.
- 4 Robert E Kelly, P I W Shen. Thermal blooming in axial pipe flow: the effects of beam shape and thermal conditions at the pipe wall[J]. Appl Opt, 1980, 19(18): 3037—3039.
- 5 Jin Gang, Liu Shunfa, Li Shumin, *et al.*. Laser thermal effects in beam control system on the emitted laser quality[J]. Chinese J Lasers, 2002, 29(10): 895—899.  
金 钢, 刘顺发, 李树民, 等. 激光热效应对光束控制系统发射光束质量的影响[J]. 中国激光, 2002, 29(10): 895—899.

- 6 Ji Xiaoling, Tao Xiangyang, Lü Baida. Influence of laser non-uniformity and thermal effects in an inner optical system on the far-field behavior[J]. Chinese J Lasers, 2004, 31(10): 1193—1197.  
季小玲, 陶向阳, 吕百达. 激光非均匀性和内光路热效应对远场特性的影响[J]. 中国激光, 2004, 31(10): 1193—1197.
- 7 Liu Shunfa, Jin Gang, Liu Jian, *et al.*. Effect of thermal characteristics in laser transmitting channel on far field beam quality [J]. High Power Laser and Particle Beams, 2004, 16(6): 703—706.  
刘顺发, 金 钢, 柳 建, 等. 激光通道传输热特性对远场光束质量的影响[J]. 强激光与粒子束, 2004, 16(6): 703—706.
- 8 Ji Xiaoling, Zhang Tao, Chen Xiaowen, *et al.*. Spectral properties of flat-topped beams propagating through atmospheric turbulence[J]. Acta Optica Sinica, 2008, 28(1): 12—16.  
季小玲, 张 涛, 陈晓文, 等. 平顶光束通过湍流大气传输的光谱特性[J]. 光学学报, 2008, 28(1): 12—16.
- 9 Su Yi. Physics problems in high energy laser system[J]. Physics, 2005, 34(8): 583—588.  
苏 毅. 高能激光系统中的物理问题[J]. 物理, 2005, 34(8): 583—588.
- 10 Tao Xiangyang, Ji Xiaoling, Lü Baida. Suppression of the thermal effect within a beam control system in the presence of wind[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2005, 16(11): 1370—1374.  
陶向阳, 季小玲, 吕百达. 风对光束控制系统内热效应的抑制作用[J]. 强激光与粒子束, 2005, 16(11): 1370—1374.
- 11 Zhang Yuanfang, Yang Lingzhen. Theoretical and experimental study of chaos generation with single optical feedback in the He-Ne laser[J]. Chinese J Lasers, 2012, 39(1): 0102003.  
张元芳, 杨玲珍. 单反馈 He-Ne 激光器混沌激光产生的理论及实验研究[J]. 中国激光, 2012, 39(1): 0102003.
- 12 Huang Dequan, Wei Jifeng, Gao Xueyan, *et al.*. Diffraction characteristics of laser transmission [J]. High Power Laser and Particle Beams, 2013, 25(s0): 9—12.  
黄德权, 魏继锋, 高学燕, 等. 激光传输衍射特性[J]. 强激光与粒子束, 2013, 25(s0): 9—12.
- 13 Song Hongsheng, Liu Guiyuan, Qin Xifeng, *et al.*. Properties of ultrafast speckle fields in Fresnel diffraction region[J]. Acta Optica Sinica, 2013, 33(9): 0932001.  
宋洪胜, 刘桂媛, 秦希峰, 等. 菲涅耳衍射区超快激光脉冲散斑场特性的研究[J]. 光学学报, 2013, 33(9): 0932001.
- 14 Tao Hua, Zhang Guowen, Pu Jixiong. Propagation properties of partially coherent modulated electromagnetic square flat-topped pulsed beams in free space[J]. Chinese J Lasers, 2012, 39(s1): s102013.  
陶 华, 张国文, 蒲继雄. 部分相干调制方形平顶脉冲电磁光束在自由空间的传输特性[J]. 中国激光, 2012, 39(s1): s102013.
- 15 Born M, Wolf E. Principle of Optics[M]. 7th Edition. Cambridge: Cambridge University Press, 1999.
- 16 Wei Jifeng, Zhang Kai, Zhou Shan, *et al.*. Research on calibration of high-energy-laser calorimeter [J]. High Power Laser and Particle Beams, 2009, 20(11): 1832—1836.  
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): 1832—1836.
- 17 Wei J F, Sun L Q, Zhang K. Volume absorption laser energy meter for high energy laser by water absorption[J]. Appl Phys B, 2013, 110(4): 573—578.
- 18 Wei J F, Sun L Q, Zhang K. 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.