

# 确定 KrF 激光光束品质的光楔法

夏江帆 王乃彦

(中国原子能研究院 北京 102413)

**提要** 运用光楔对发散角较大、光束品质不够好的 KrF 激光光束进行了分光测量, 测量了 KrF 激光光束的一维能量分布和远场发散角; 具体计算了 KrF 激光光束剖面的能量密度分布的均匀性。

**关键词** KrF 激光, 光楔法, 分光, 能量分布, 远场发散角, 均匀性

## 1 引 言

精确测量 KrF 激光的光束品质, 能为改进 KrF 激光光束品质提供定量依据; 它还能 KrF 激光的其它应用研究提供参考乃至适用性判据。而当激光聚焦打靶不再仅仅是一种理论设想时, 测量激光光束的空间分布和远场发散角就具有特别重要的意义: 光束品质成为激光与靶耦合物理的重要判据。

确定激光的光束品质的出发点是测量激光的横向分布; 测量脉冲激光的横向分布的基本思想是测量接收平面上能量的细致分布结构。由于 KrF 激光的中心波长在远紫外, 这使得直接测量光束剖面的能量分布十分困难。除了光楔法之外, 套孔法和圆环法<sup>[1]</sup>以及多次曝光法<sup>[2]</sup>都是在测量激光远场发散角时发展起来的方法, 如果针对细致的光强分布情况, 进行二维描写和数据处理, 就能得出 具体的二维能量密度分布, 计算出均匀性。

光楔可将激光光束分成许多个能量密度相对分布相同但能量密度大小逐次衰减的子光束, 这就为更准确地确定光束剖面的能量分布提供了可能。

## 2 光楔分光实验

### 2.1 光楔的制造

光楔设计的工作, 是寻找一种适于真空紫外的透射材料, 按照 KrF 激光束的基本特点和尺寸确定光楔的几何参数和物理参数。

目前唯一满足对光楔物理要求的玻璃材料是熔融石英, 认为光楔是一个偏向角很小的棱镜, 其质量标准按照棱镜规定, 按此标准, 选定远紫外透射材料 JGS1 作为毛坯。

直接利用几何光学作为计算的基础, 采取棱镜计算中常用的展开方法, 光楔的几何量与分光常数如下。光楔 1: 工作面尺寸为  $65 \times 45$  (mm), 偏向角为  $1^\circ \pm 1'$ , 全反射面的反射率为 0.99, 透射面的反射率为 0.50; 光楔 2: 工作面尺寸为  $84 \times 45$  (mm), 偏向角为  $1^\circ \pm 1'$ , 全反射

面的反射率为 0.99,透射面的反射率为 0.45。

光楔设计表面光洁度为  $\lambda$  级光学表面,平面度为  $\lambda$  (248 nm),表面粗糙度要求达  $\lambda/10$ 。

## 2.2 光楔镀膜与标定

真空紫外波段的镀膜历来是一个难点,由于真空度限制的材料问题、多层介质膜系的膜层厚度控制等问题限制着这一波段的镀膜精度;而且由于材料的吸收,即使膜层完全达到设计要求,也不能直接用作进一步实验的依据,这里光楔分光行为的标定成为紫外光楔能否使用的关键。因此,精确的紫外光楔实验室标定采用了平均值方法。

## 2.3 光楔实验

光楔法测能量密度分布的实验待测激光束由中国科学院安徽光机所研制生产的 Tol-100A KrF 放电型准分子激光器输出,该激光束经过光楔分光后,由  $\phi 220$  mm 的石英透镜 ( $f = 53$  cm) 聚焦在感光板上。

实验感光板为银盐感光材料紫外 III 型光谱干版,它对 230~250 nm 波长的光敏感。其线性范围较大,灰雾总密度(线性段起始点)不大于 0.5,感光黑密度最大可达 3.0。

取定激光器工作电压为 24 kV,腔内工作气压为 2 atm,气体预混比为 He·Ne·Kr·F<sub>2</sub> = 330·265·40·1,激光腔采取 F-P 平行平面腔,输出耦合镜未镀膜,其反射率约为 8%,透射率为 90% 以上,全反镜反射率为 95% 左右。

刚开始实验时未加光阑,发现荧光对结果有影响,后分别加  $\phi 8$  mm 圆孔光阑和 8×25 (mm) 矩形光阑进行了实验,并比较了光阑在不同位置的光斑情况以考察自发辐射噪声 (ASE) 的影响,获得比较理想的结果。

## 2.4 实验误差讨论

在感光板上的光斑,仅仅因为光束不平行而有了变形,变形因子为  $d_k/d_0$ ,它与入射角  $i$  有关。此外,由于光楔分光将导致光束宽度发生变化,取中间光线为光轴,则光斑尺寸增加因子

$$w_0' = \frac{1}{\cos 2mn\alpha} \frac{d_k}{d_0} w_0 \quad (1)$$

取  $i = 15^\circ$ ,  $n = 1.51$ ,  $\alpha = 1^\circ$ ,  $k = 8$ ,则有  $w_0'/w_0 = 0.92$ ,显然当  $i$  增大时,  $w_0'/w_0$  减小;一般取  $i < 15^\circ$ ,则带来的误差不大于 8%。

## 3 KrF 激光光束远场发散角的确定

众所周知,只有激光光束才有远场发散角,原则上它是 Fraunhofer 衍射概念的延伸。远场发散角是激光最重要的光束品质之一,它体现了激光集中光能在很小的空间立体角内的能力。

焦斑法要求测出焦面上光斑的大小,不过,用数值  $w$  表征光束的大小是一种十分粗略的方法;必须从能量的集中程度出发,我们要用的是光束光斑尺寸的能量定义。可对任意的激光束定义光斑尺寸(面积)为其能量集中为 70% 所对应的光斑尺寸(面积)。光楔法的优点在于,它提供了一种精确确定焦斑大小的方法,也就是说,通过确定焦面上光束的一维能量分布以确定焦斑的尺寸。以下是一个例子。

对分光实验得到的一组分光光斑,由光楔法的原理可得出主光束光斑的能量密度分布如图 1 所示。由图 1 可得光束剖面的能量分布如图 2 所示。在得出其能量分布图的基础上由能量集中程度可得光斑尺寸,即可算出远场发散角。由该组光斑计算得出的远场发散角为

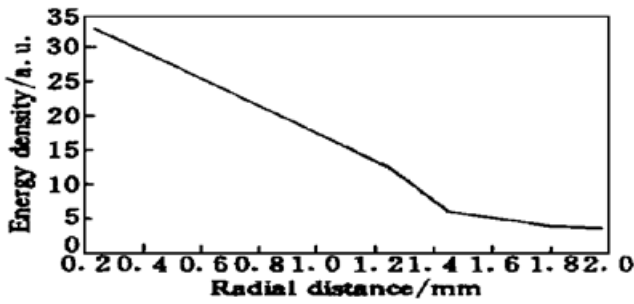


图 1 光束能量密度分布

Fig. 1 KrF laser beam energy density distribution

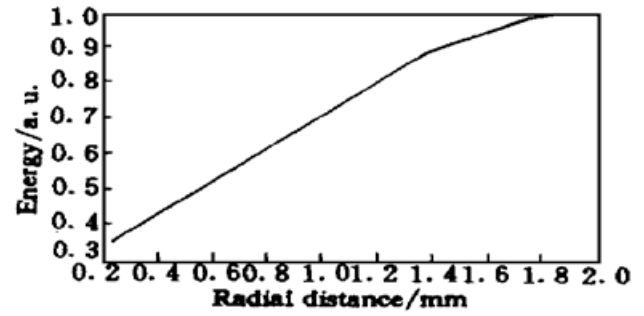


图 2 光束能量分布

Fig. 2 KrF laser beam energy distribution

$$\theta_2 = 2.08 \text{ mrad}$$

远场发散角的测量中, 可能导致误差的因素有:

(1) 透镜像差的影响。针对所用的透镜计算了实际的球差, 结果表明在理想聚焦的情况下它对焦斑的影响不大于  $5 \mu\text{m}$ , 这相当于不大于  $10 \mu\text{rad}$  的影响;

(2) 当聚焦并不理想时, 实际焦斑尺寸将大于理想焦斑尺寸。对这种情况的理论计算模拟显示当聚焦偏移量小于  $2 \text{ mm}$  时, 对焦斑的影响不大于  $70 \mu\text{m}$ , 这相当于不大于  $0.13 \text{ mrad}$  的影响;

(3) 某些测量结果较大, 典型值为  $4.02 \text{ mrad}$ , 这是因为在实验中第一次测量把光阑加在离出光口较近的地方, 它对较强的 ASE 并未起作用, 其发散角大大提高; 以后实验中光阑放在离出光口较远处, 它限制了 ASE 和荧光, 提高了光束中的激光成分。

## 4 激光主光斑的还原与分析

### 4.1 主光束物理光斑的还原方法

感光板上所成底片焦斑, 和真正的物理光斑是有区别的。除了感光板线性的影响外, 感光板阈值也影响了物理光斑的成像。如果要利用分光后的子光斑还原出主光束的物理光斑, 还必须对所得数据进行处理。

采用的图像分析仪是 Joyce Loebel 公司生产的 Magiscan 2, 简称 M2, 其空间分辨率为亚毫米级, 可作  $0 \sim 63$  或  $0 \sim 127$  灰度级别数字化。

处理系统的软件依据是图像处理的一般原理。简单地说, 摄像头摄取的光强是由底片的黑度  $D$  决定的, 经过  $A-D$  转换器之后, 读出图像内存的是灰度级别值  $I$ , 它们之间的关系为

$$D = A + B \log I \quad (2)$$

在图像分析仪内部, 直接存取和处理的是灰度级别值, 因此在光斑灰度分析工作中, 需利用(2)式将其转换为黑密度  $D$ 。这就涉及到图像分析仪的标定, 即针对不同的光照条件和摄像头, 求得  $A, B$  值。

为获得物理光斑, 需要对 M2 内部的数据进行修正和处理, 其基本过程为:

(1) 利用上式得出黑密度值;

(2) 假定感光板工作在特性曲线线性段, 利用下式由黑密度  $D$  可得出能量密度

$$\log \left[ \frac{H_1}{H_2} \right] = \frac{D_1 - D_2}{\gamma} \quad (3)$$

式中  $\gamma$  为底片反差系数;

(3) 将子光斑的能量密度还原为主光束的能量密度, 这由光楔分光的数据给出。

#### 4.2 分析参数的确定

为了还原物理光斑, 我们需要确定图像分析仪的标定系数  $A, B$ , 还要得出感光板的感光特性曲线, 或至少得到其反差系数。为此需由实验测量确定这些必不可少的参数。

##### 4.2.1 图像分析仪标定

图像灰度处理有赖于图像分析仪 M2 的绝对标定, 即测出(2)式中的常系数  $A, B$ , 由于  $A, B$  系数随光照条件和摄像头光圈等因素变化, 所以应在一定条件下利用标准透射灰度板, 读出相应于标准灰度的平均灰度级别值, 用这些数据对(2)式进行线性拟合, 即得出  $A, B$  系数。

实际处理过程中发现, 图像分析仪具有一定的线性范围, 它随光圈的大小及灰度级别值的大小发生变化。对于不同的光圈, 不仅  $A, B$  值将发生很大变化, 而且图像分析仪的黑密度的线性范围也有所不同。这种情况意味着进行图像扫描分析时应该通过合适选取光圈尽量在其线性范围内进行。

##### 4.2.2 感光板标定

感光板标定旨在测出(3)式中的  $\gamma$  值, 我们采取标定好的光楔来标定感光板, 用下式进行线性拟合即可得出反差  $\gamma$  值

$$D = D_0 + \gamma \log \frac{H}{H_c} = D_0' + \gamma \log H \quad (4)$$

最后得到  $\gamma = 1.2 \pm 0.2$ 。

## 5 激光光束剖面能量密度分布的均匀性

### 5.1 均匀性评价

本文采取能量密度分布均匀性的统计定义, 它由光束剖面上能量分布的细节决定, 感光版记录下的焦面光斑, 是定量研究光束剖面均匀性的依据。

#### 5.1.1 基本关系

焦斑的均匀性可由均匀偏差定量表示。均匀偏差定义为有效接收面积上某处能量密度偏离平均能量密度的程度

$$\delta_1(N) = \sup_{1 \leq j \leq N} \left| \frac{H_j}{H} - 1 \right| \quad (5)$$

式中将有效接收面积分为  $N$  块, 其能量密度分别为  $H_1, H_2, \dots, H_N$ , 这是一种粗略估算均匀性的方法,  $\delta_1(N)$  刻画焦斑均匀性是与有效接收面积的划分有关的, 当有效面积进一步细分时, 可引入均匀性偏差的统计定义, 即均匀性平均偏差

$$\delta_2(N) = \frac{\sum_{j=1}^N \left| \frac{H_j}{H} - 1 \right|}{N} \quad (6)$$

及均匀性标准偏差

$$\delta_3(N) = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^N \left( \frac{H_j}{H} - 1 \right)^2}{N}} \quad (7)$$

当接收面积无限细分时, 整个光斑的均匀性平均和标准偏差趋向于定值, 且它们之间对于确

定的能量密度分布有确定的关系; 显然  $\delta_1, \delta_2, \delta_3$  越接近于 0, 光斑均匀性越好。

### 5.1.2 黑密度均匀性与能量密度均匀性

由上, 应该得出光束的能量密度才能计算出剖面的均匀性偏差, 但是焦面光斑只给出了黑密度; 由于不能得出曝光特性曲线的解析表达式, 仅由黑密度  $D$  不能直接得出能量密度  $H$ , 利用感光曲线线性段中  $H_j = H_0 10^{\frac{D_j - D_0}{\gamma}}$ , 可有能量密度平均偏差

$$\delta_H(N) = \frac{\sum_{j=1}^N \left| \frac{10^{D_j}}{\sum_{j=1}^N 10^{D_j}/N} - 1 \right|}{N} \quad (8)$$

计算均匀性即根据上式, 该式甚至与反差  $\gamma$  也无关。

## 5.2 结果及误差讨论

均匀性计算的部分结果如表 1, 分析该表的数据可看出, 待测激光光束的均匀性不够好, 均匀性平均偏差约为 0.5 左右。

表 1 均匀性计算结果

Table 1 Calculated uniformity of light beams

No.	1(624A)	2(624C)	3(624D)	4(824A)	5(824C)	6(623B)	7(623C)
aperture	11	11	14	14	14	16	16
corrected	0.4974	0.4980	6.03E-7	0.4753	0.1603	0.4627	0.4497
uncorrected	0.4112	0.3509	0.3962	0.3423	0.5853		

我们在计算中引入了修正因子, 其目的是恢复并计算主光束的均匀性, 方法是用归一化公式, 此时原则上对同一光楔所得不同光斑应能得出相同的结果, 事实上 1 与 2, 6 与 7 所得结果非常接近就说明了这一点。

但由于以下原因而出现了差异。

### 5.2.1 M2 动态范围有限

M2 作 0~63 灰度级别值数字化, 这也是其最大动态范围。修正因子的提出是为了扣除衰减倍率的影响, 由于实际摄像为取反图, 修正因子小于 1, 而且衰减倍率越大, 修正因子越接近于 0。经过这样的修正后动态范围必然大大降低, 而对均匀性的计算造成畸变, 例如 4 和 5; 同时我们也可看出, 如果不加修正, 则均匀性偏差随意抖动, 而不说明同一物理事实。

### 5.2.2 光圈的影响

改变光圈是为了照顾图像分析仪 M2 的线性范围并尽量扩大其动态范围, 实际中发现对于同一主光束, 如果采用不同的光圈则对结果有很大的影响, 例如 2 和 3; 3 的结果显然不可相信, 除了 5.2.1 中所述理由之外, 光圈降低时图像发虚像质变坏也是原因之一。

### 5.2.3 感光板阈值的影响

由于感光阈而切掉了本应修正计算的部分内容, 而且衰减倍率越大这种切割越大, 影响也越大, 这就使得光斑 5 要比光斑 4 均匀一些。

综合上述三种原因我们可知, 在使用光楔进行均匀性分析时, 应该尽量选取固定的合适光圈, 主要在衰减倍率较小的光斑上进行。

致谢 感谢龚坤副研究员在使用图像分析仪时给予的帮助。

## 参 考 文 献

- 1 Measurement of Laser Parameters. Shanghai : Shanghai People's Press, 1975 (in Chinese)
- 2 Gas Lasers. Shanghai : Shanghai People's Press, 1975 (in Chinese)

**An Optical Wedge Method for Determination of KrF Laser Beam Quality**

Xia Jiangfan Wang Naiyan

(*Chinese Institute of Atomic Energy, Beijing 102413*)

**Abstract** The optical wedges are designed for the measurement of the vacuum ultraviolet laser beam with a large divergence angle and not-so-good beam quality. Two wedges have been made and constructed, then applied for splitting and measuring a KrF laser beam. Treatment for experimental data obtained has two ways which constitute a complete description of the KrF laser beam: after drawing a one-dimensional energy distribution graph of the laser beam we measured the far-field divergence angle; then we calculated the uniformity of energy distribution of the KrF laser beam cross section, for this goal, an analysing program has been developed on the bases of the image analyser Magiscan (2).

**Key words** KrF laser, optical wedge method, optical wedge, beam splitting energy distribution, far-field divergence angle, uniformity