

准分子激光的光束特性研究

楼祺洪

(中国科学院上海光机所, 201800)

八木隆志

(日本工业开发研究所)

摘要: 本文采用二维 CCD 阵列检测准分子激光的光束特性。研究了长时间运转下, 光束的均匀性和光束重心的漂移。并讨论了它们与放电稳定性之间的关系。

关键词: 准分子激光, 光束特性, CCD 阵列

Study on beam characteristics of excimer lasers

Lou Qihong

(Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Academia Sinica, Shanghai)

T. Yagi

(Industrial Research Institute, Japan)

Abstract: The beam characteristics of excimer lasers are detected by using a two dimensional CCD array. The beam uniformity and the drift of the gravity center of the beam pattern are investigated for long term operation of excimer lasers. The relationship between the beam characteristics and discharge stability are discussed.

Key words: excimer lasers, beam characteristics, CCD array

准分子激光是迄今最强的紫外光源, 近年来它正由科学研究的应用向工业应用和医疗应用发展。这就要求准分子激光器具有稳定的输出功率和能量, 良好的光束均匀性和发散角。虽然近期的测试表明, 目前商品型准分子激光器能基本上满足工业应用的要求^[1], 但是长时期运转下的准分子光束特性的研究还没有详细的报道。本文的目的就是研究长时间运转下准分子激光束的光束均匀性, 并讨论了它们与放电稳定性之间的关系。

实验采用的检测系统是一个具有二维光二极管阵列的成像系统^[2], 我们用它检测了光束的均匀性, 光强重心的漂移以及光束的发散角。实验结果表明, 虽然在新的激光气体条件下, 可以获得均匀的光束分布, 但随着激光脉冲数的增加, 光束均匀性变差。与此同时, 激光气体中卤素浓度下降, 激光脉冲时间变短。

实验装置

准分子激光束可以在许多材料的表面上留下永久性的记号, 其中有一些被用于检测光束的均匀性。最常用的是未曝光而显影的黑色照相纸和打印机中的热敏纸。但是它们对激光能量的响应特性往往是非线性的, 仅能用于定性的检测。

采用二维 CCD (电荷耦合装置) 可以获得激光光强的精确的分布特性。同时, 采用高速控制线路, 它可以在高重复率下检测每一个脉冲的强度分布。本实验中采用的装置类似于文

表 1 被测试准分子激光器的特性

激光器	A	B
放电间距(mm)	25	22
放电宽度(mm)	9	10
放电电压(kV)	24	30
放电电流(kA)	5	9.5
气体流速(m/s)	15	10
气体压力(mPa)		
F ₂	6	7
Kr	150	150
He	2644	2543
激光能量(mJ)	200	200
最大重复频率(Hz)	200	150
最大平均功率(W)	40	30

献 [3] 的结构。为了获得近场分布及远场分布, 根据不同的实验条件采用不同的聚焦透镜焦距。为了使入射到 CCD 上的光强在它的线性响应范围之内, 检测器前有一组已定标的滤光片。

计算机软件可提供 x 方向 (放电方向) 及 y 方向 (气体流动方向) 的光强分布, 也可以实现三维显示。

二种紫外预电离准分子激光器被用于光束特性检测, 它们没有采用气体净化装置, 卤素浓度检测器用于准分子激光气体中卤素浓度的实时检测。二台激光器的基本特性由表 1 给出。

光束特性测量

1. 光束的均匀性

我们首先检测激光器 A 放电电极中心沿放电方向的激光光强分布, 其结果如图 1 所示。图 1 的最上端是激光器刚刚换上新的工作气体时的分布。这里我们定义一个基本均匀区 $\Delta x = x_2 - x_1$ 。在这个区域内的激光平均强度为 I_{av} , 而强度的起伏 ΔI 表示 Δx 范围内最大强度与最小强度之差。在初始条件下 $\Delta I/I_{av} \leq 4\%$ 。

然后我们固定激光器的放电电压, 让它在高重复频率 250 Hz 下连续运转。在整个过程中, 不断地记录下光强分布, 其结果表明, 随着脉冲个数的增大, $\Delta I - I_{av}$ 也随之增大。图 1 的下部给出了脉冲个数为 1×10^5 、 2×10^5 、 4×10^5 和 6×10^5 个脉冲后的光场分布。当脉冲数为 6×10^5 时, $\Delta I/I_{av}$ 增加到 16% 左右。

上述数据仅考虑了一维分布的情况, 如果考虑二维分布情况, 不均匀性更为严重。图 2 给出不同脉冲个数下光均匀性的二维分布。其中各种条件下纵座标具有相同的标尺刻度。由图可见, 当脉冲个数为 6×10^5 时, 光场看上去比较均匀。但是当我们把纵座标尺度放大六倍以后, 可以看到十分明显的不均匀分布, 其结果由图 3 给出。

对激光器 B 我们也进行了同样方法的检测, 得到了类似的结果。

2. 光束“重心”的检测

对于上述近场分布, 可以用计算机程序计算它在 x 及 y 方向上的“重心”坐标。图 4 给出激光器 A 的计算结果, 右列是在激光工作气体工作了 4×10^5 个脉冲以后, 以重复频率 1 Hz 下获得的。作为对比, 左列是新充气条件下的结果。由图可见, 随着脉冲个数的增大, 在 x 和 y 方向的“重心”漂移幅度也随之增大。

在图 4 的最上一行, 还给出了激光脉冲能量的起伏, 这种起伏的大小与“重心”起伏的幅度

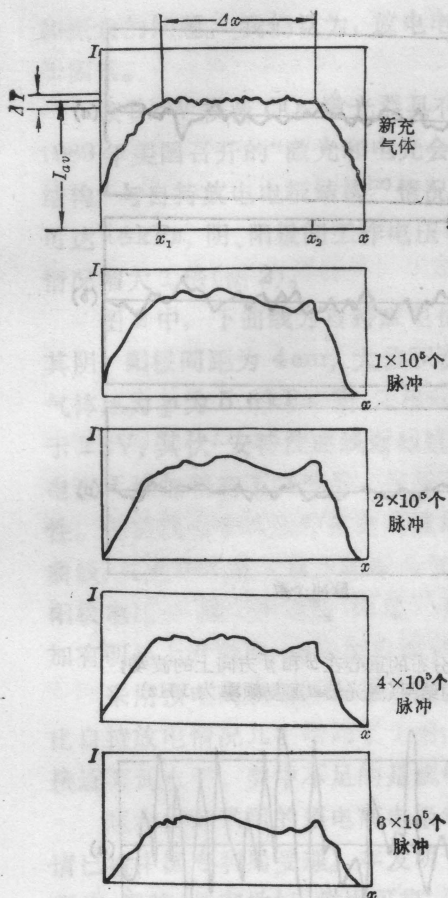


图1 激光放电区中心激光强度变化
随激光运转脉冲次数的变化
(激光器A工作在250 Hz, 采用平行平面共振腔)

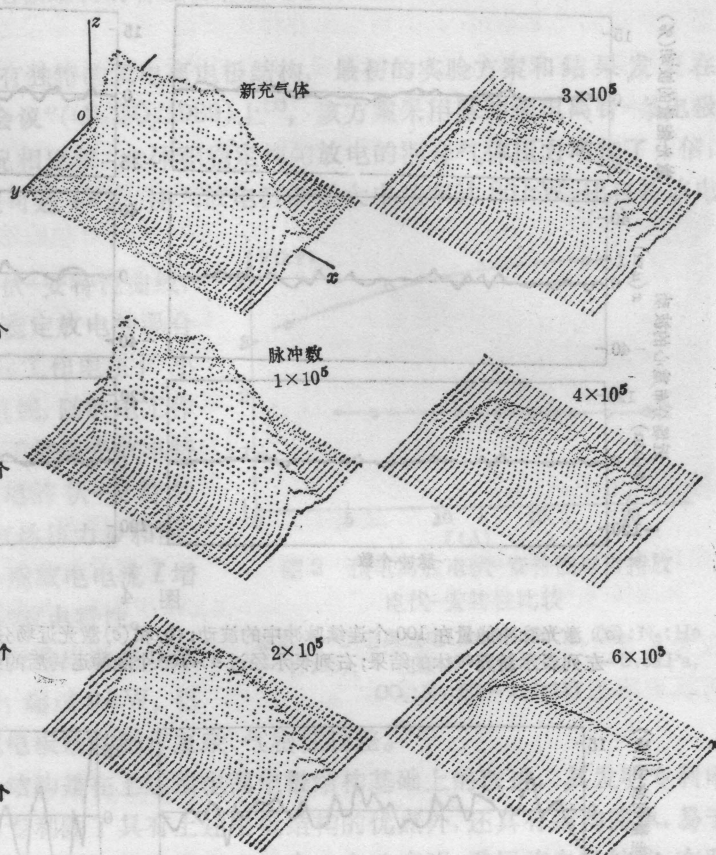


图2 激光近场二维分布随激光脉冲运
转次数的变化
(实验条件同图1)

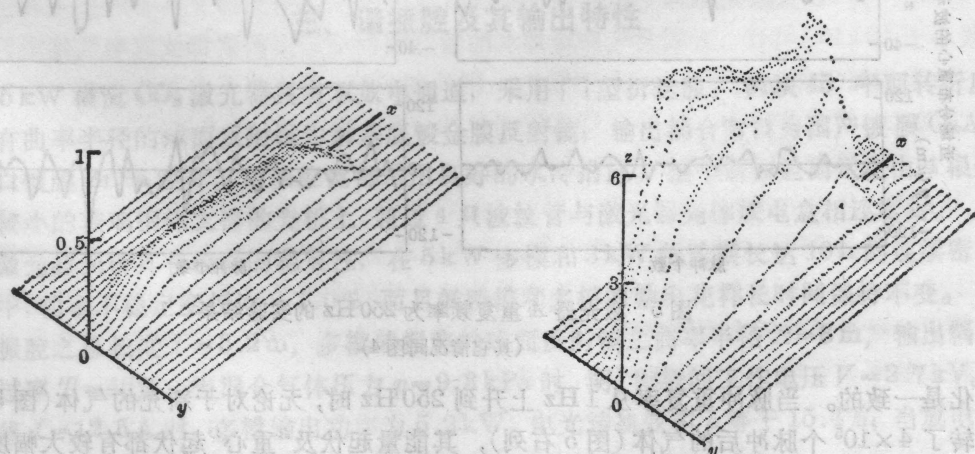


图3 经过 6×10^5 个脉冲运转后的近场分布
(下图的纵坐标比上图放大6倍, 显示了近场分布的不均匀性)

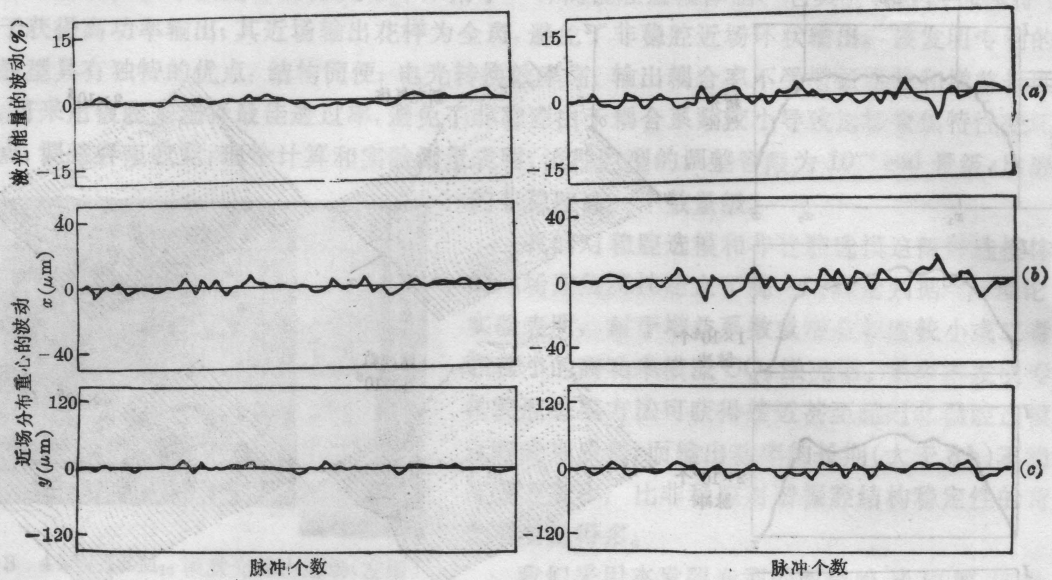


图 4

(a) 激光脉冲能量在 100 个连续脉冲中的波动; (b) 和 (c) 激光近场分布的重心在 x 和 y 方向上的波动; 左列表示新充气体的结果; 右列表示经过 4×10^5 个脉冲运转后的结果 (激光器 A 重复频率为 1 Hz)

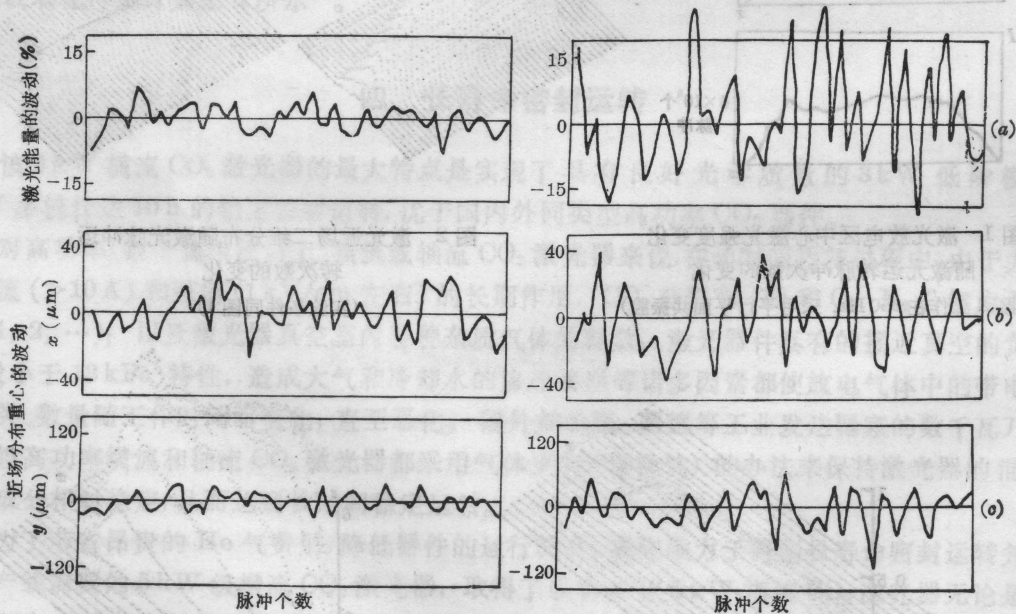


图 5 激光器 A 重复频率为 250 Hz 的实验结果

(其它情况同图 4)

变化是一致的。当脉冲重复率从 1 Hz 上升到 250 Hz 时, 无论对于新充的气体 (图 5 左列) 和运转了 4×10^5 个脉冲后的气体 (图 5 右列), 其能量起伏及“重心”起伏都有较大幅度的增加。它表明在高重复频率运转下放电的稳定性比低重复率时要差。

对于激光器 B, 其实验结果显示了一个十分有趣的现象。由于该激光器的气体流速较低,

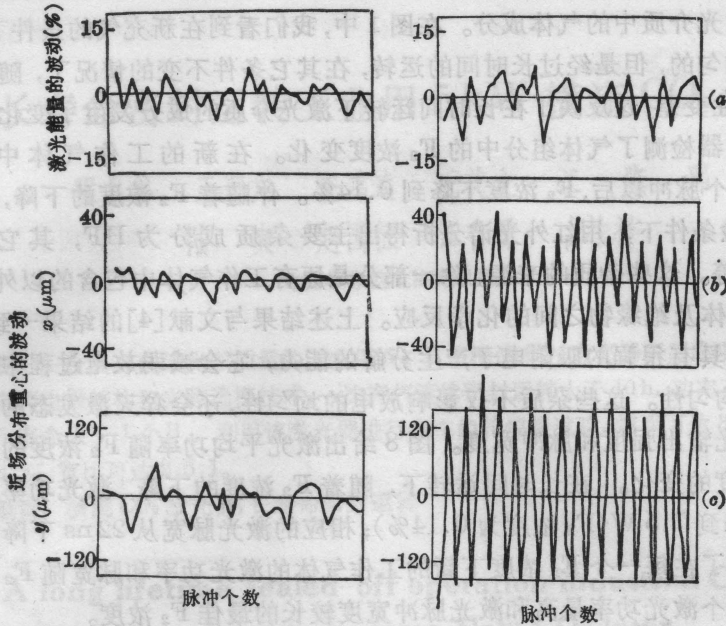


图6 激光器B重复频率为150 Hz的实验结果
(其它情况同图4)

在高重复率运转下,在 x 及 y 方向的重心漂移呈现周期性的结构,其结果见图6右列。而在1 Hz重复率下,未见这种周期性的起伏(图6左列)。另一方面,由于上述结果是在工作气体运转了 4×10^5 个脉冲后观察到的,如果换上新的工作气体,这种周期结构也不再出现。

要解释上述现象是一个复杂的问题,除了涉及到气体流速外,还可能涉及到气体组份变化及杂质产生,从而影响放电的稳定性。

3. 光束的发散角

关于多模激光束的发散角测量有多种方法。一种是用一个小孔置于聚焦光束的焦点,当这个小孔透过的激光能量为总能量的一半时,可以根据小孔的直径求出光束的发散角。由于准分子的光束一般是长方形,这种方法就不能区分二个方向上的不同的发散角。

采用 CCD 检测系统测量光束的远场分布,根据远场分布光强的一半处所对应的角度,可以分别得出 x 及 y 方向上的光束发散角。

图7给出 x (放电方向)及 y 方向(气体流动方向)上的光束发散角随脉冲重复频率的变化。随着脉冲重复频率的增加,光束发散角也会随之增加。纵座标是光束发散角(相对单位)。

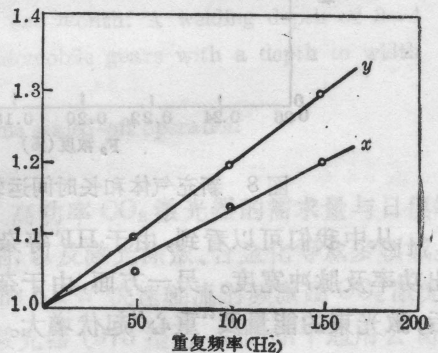


图7 激光器B的光束发散角随重复频率的变化

讨论

当采用平面平行共振腔时,近场光束均匀性很大程度上依赖于激光放电的均匀性,而放电

的均匀性又依赖于激光介质中的气体成分。在图 1 中,我们看到在新充气的条件下,激光束的近场分布基本上是均匀的,但是经过长时间的运转,在其它条件不变的情况下,随着激光脉冲数的增加,光束均匀性变差,这反映了在长时间运转下激光介质的成分发生了变化。

我们用卤素探测器检测了气体组分中的 F_2 浓度变化。在新的工作气体中 F_2 浓度为 0.26%, 经过 6×10^5 个脉冲以后, F_2 浓度下降到 0.14%。伴随着 F_2 浓度的下降,会产生很多杂质。在我们的实验条件下,用红外光谱分析得出主要杂质成分为 HF, 其它包括 CO_2 、 CF_2O 、 CF_4 和 SiF_4 等。这些杂质的来源,除一部分是原有工作气体中包含的以外,大部分来自工作气体与激光腔体及绝缘物之间的化学反应。上述结果与文献[4]的结果一致。

由于 HF 等杂质具有很强的吸附电子产生分解的能力,它会减弱放电过程中的预电离效果,从而影响放电的均匀性。这些杂质不仅影响放电的均匀性,还会猝灭激发态的准分子激光上能级,从而影响激光输出强度和脉冲宽度。图 8 给出激光平均功率随 F_2 浓度的变化以及激光脉冲宽度随 F_2 浓度的变化。在长时间运转下,随着 F_2 浓度的下降,激光功率从 14 W (F_2 浓度为 0.256%) 下降到 7.5 W (F_2 浓度为 0.14%); 相应的激光脉宽从 22 ns 下降到 17 ns。作为对比,图中还给出了在每一个 F_2 浓度下新的工作气体的激光功率和脉宽随 F_2 浓度变化。在这种情况下存在一个激光功率最高和激光脉冲宽度较长的最佳 F_2 浓度。

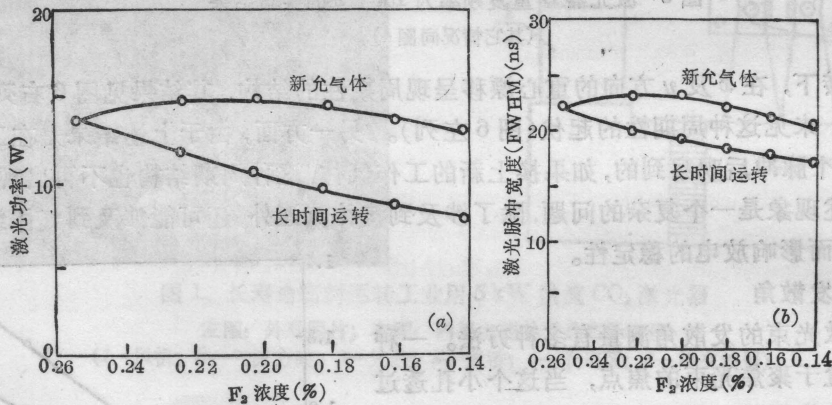


图 8 新充气体和长时间运转下,激光功率和激光脉冲宽度随 F_2 浓度的变化

从中我们可以看到,由于 HF 等杂质的存在不仅会影响光束的均匀性,而且还影响激光输出功率及脉冲宽度。另一方面,由于杂质的存在影响放电均匀性,使我们看到在长时间运转以后,激光束的能量及“重心”起伏增大。

参 考 文 献

- 1 J. Andrellos, M. Essary, H. Pummer; Proceeding of SPIE 710, Excimer Lasers and Optics, ed by Ting Shan Lut 18~19, Sep, (1986) Cambridge, Massachusetts, p. 2
- 2 T. Yagi, Y. Matsumi *et al.*, *Appl. Optics*, **28**, 3775(1989)
- 3 Y. Mastumi, T. Yagi *et al.*, *The Rev. of Laser Eng.*, **17**, 128(1989)
- 4 *Laser Focus World*, **25**, 99(1989)