

高压横流准分子激光器的流场效应

祁建平 楼祺洪 丁泽安 霍芸生 王润文

(中国科学院上海光机所)

提要: 本文采用平面剪切干涉仪测量了高压横向流动准分子激光气体的流速。分析了放电能量使气体加热对激光输出的影响,均匀的横流技术使激光器在每秒16个脉冲频率下获得18W平均功率输出。

Gas flow effects in pulse avalanche discharge XeCl excimer lasers

Qi Jianping, Lou Qihong, Ding Zean, Huo Yunsheng, Wang Runwen

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

Abstract: The gas velocity of a high pressure transverse flow excimer laser was measured with laser interferometer. The effects of gas heating caused by gas discharge on the laser output power were analysed theoretically. Maximum output power of 18 W at 16 pps was obtained with uniform transverse flow technology.

重复脉冲运转下的准分子激光器由于放电产生的热能使气体温度上升,因此必须用有效的方法来排除激光工作区的废热。方法之一是使激光工作气体平行于光轴的纵向流动系统,由于流速较低和管壁阻尼的影响,仅能在低平均功率的激光器中使用。对于输出功率为10W以上的准分子激光器,使激光工作气体垂直于光轴快速流过放电区是排除激光工作区废热的有效方法。本文的目的是研究一台输出功率在10W以上的横向流动准分子激光器的流场特性及其对激光输出的影响。

我们曾用皮托管测量了横流系统的流场分布和速度^[1]。其中流速的测量是在一个大

气压的氮气中进行的,由于用玻璃管制成的皮托管较难在高压下使用,只能用外推的方法计算在激光工作气体高压下的流速。本文采用非接触式测量方法,用一台平面剪切干涉仪测量了高压下(3~4atm)激光工作气体(HCl:Xe:Ne)的相对流速及其随风机电压的变化。用皮托管在一个大气压下进行定标,上述方法可以测量高压下的气体流速。在此基础上,我们研究了不同流速下、不同重复率下激光输出特性。实验结果表明:在低重复率下(例如每秒5次),激光输出功率与气体流速基本上无关;当进一步提高重复率(例如每秒16次以上),激光输出功率随

收稿日期:1986年2月17日。

气体流速的增大呈现上升的趋势，而气体不流动时，激光输出功率会大幅度下降。利用横流放电激光器的热效应模型可以很好地解释上述实验结果。

一、用平面剪切干涉仪测量横流区的流速

实验所用的横流型激光器是一台 X 射线预电离快放电泵浦横向流动 XeCl 准分子激光器，输出波长为 308 nm，其详细结构可参阅文献[1]。用平面剪切干涉仪测量工作气体的流动特性的光路由图 1 给出。经过扩束的 He-Ne 激光束透过气体流场进入平面剪切干涉仪后分成二束，然后又汇合到同一输出端产生干涉条纹，干涉条纹的密度及分布反映气体流场的特性。

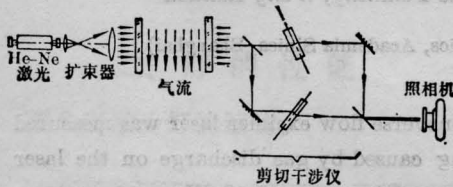


图 1 用平面剪切干涉仪测量横流流动准分子激光器流速的光路

在激光器内充入 Ne:Xe:HCl 激光混合气体，通过改变使气体流动的风机直流电机驱动电压，可以改变风机的转速从而改变激光混合气体的流动速度。图 2 给出一组不同的风机直流电机驱动电压下的干涉条纹相片。从这组照片可以看到，随着风机直流电机驱动电压 V 的增加，干涉条纹变密。这是由于 V 的增加使气体流速增加。

由于在平面剪切干涉仪中，通过调整能保证两光路的等光程使时间剪切值 $\Delta t = 0$ ^[2]，所以干涉条纹可简化为仅与空间位移量有关，在我们的实验条件下，流速愈大，空间位移量愈大，条纹愈密。测量图 2 中各张照片中条纹间的距离(为精确起见，测量 10 条干

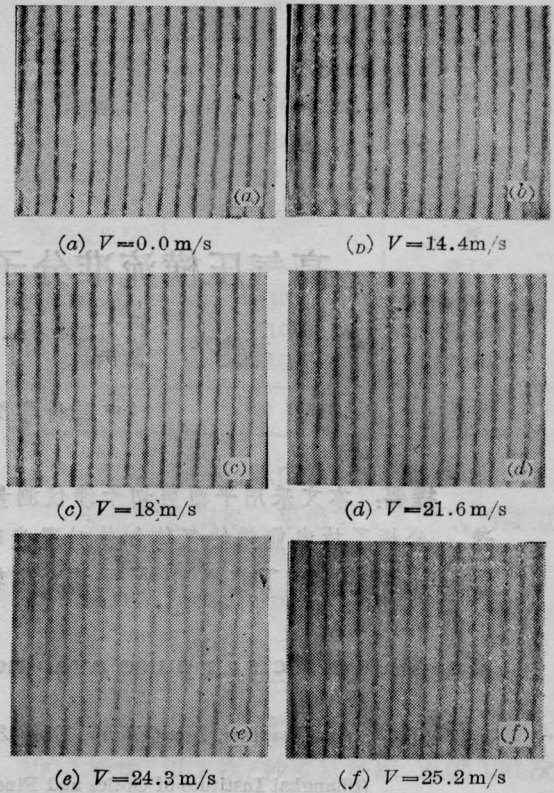


图 2 不同流速下的干涉条纹照片

涉条纹之间的距离来计算二条条纹间的平均距离)随气体流速的变化，其结果表明条纹之间间距的倒数正比于气体的流速，利用一个大气压下用皮托管测量的流速的绝对值对上述测量结果定标。并考虑了照片放大的因素，可以得到干涉条纹密度与流速的关系曲线。

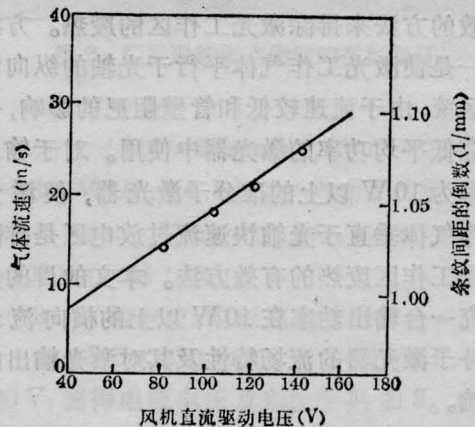


图 3 气体流速、干涉条纹密度与风机直流驱动电压之间的关系

图3中数据值与图2照片中干涉条纹间距相差了一个比例系数。这种非接触式的测量方法对于高压气体、特别是包含有腐蚀性气体(如本实验中的HCl气体)的流速测量有一定的优越性。由图3可见,当风机电压从80V上升到140V,流速大致从15m/s上升到25m/s。

二、放电的热效应

为了研究气体流动与不流动情况下激光放电的热效应,图4给出重复频率在每秒1次到10次情况下气体不流动与气体以每秒18m的速度流动情况下激光输出的特性。由于气体不流动情况下气体加热时间长短会影响激光输出特性,图中给出的结果是第1秒钟的测量值。即使仅工作1秒钟,放电的热效应已影响激光输出功率。随着放电时间的增长,热效应将更加明显,甚至使激光熄灭。为了估计热效应的影响,我们用气体放电热效应模型来解释上述实验结果,并为横流激光器的流场设计提供参数。

在气体不流动情况下,单脉冲激光能量正比于激活介质的密度 ρ_0 :

$$E = k\rho_0 \quad (1)$$

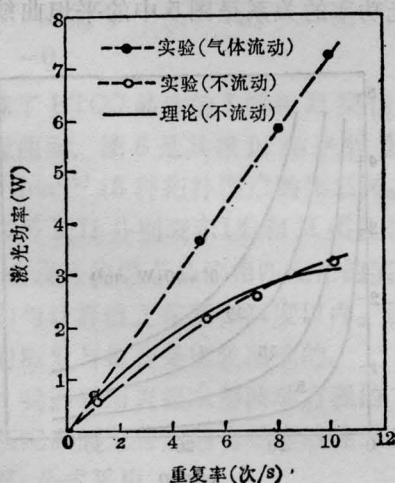


图4 流动对横向放电准分子激光输出特性的影响

(1)式中 k 为比例常数,它与工作气体混合比例、泵浦条件等因素有关,在以下实验中,我们维持这些因素不变,故可视 k 为常数。当激光以频率 f 重复脉冲工作时,由于放电产生的热量会使气体温度上升。令激光器的效率为 η ,则每个脉冲放电供给激光放电区的能量为 E/η ,而其中转化为热能的部分为

$$Q = \left(\frac{1-\eta}{\eta}\right)E \quad (2)$$

根据激光腔内压强不变原理,

$$P = \rho RT = \text{常数} \quad (3)$$

式中 P 为压强; R 为气体常数; T 为绝对温度。设 ρ_0 是在室温 T_0 时的气体密度。

由于气体加热温度上升必然会引起密度下降。令第 s 秒时的密度为 ρ_s ,温度为 T_s ,则:

$$\rho_0 T_0 = \rho_s T_s \quad (4)$$

在 s 秒时气体吸收的热量为:

$$\begin{aligned} Q_s &= \int_{T_0}^{T_s} \frac{\rho(t)V_0}{N_A} C_p dT(t) \\ &= \frac{V_0}{N_A} C_p \int_{T_0}^{T_s} \frac{\rho_0 T_0}{T(t)} dT(t) \\ &= \frac{V_0 C_p}{N_A} \rho_0 T_0 \ln\left(\frac{T(s)}{T_0}\right) \end{aligned} \quad (5)$$

其中 C_p 为激光混合气体的定压热容量(cal/克分子·K); N_A 为阿佛加得罗常数, V_0 为气体的放电体积。由于 $Q_s = sf\left(\frac{1-\eta}{\eta}\right)E$,由

(6)可得:

$$\frac{T_s}{T_0} = \exp\left[\frac{Q_s}{mC_p T_0}\right]$$

在 s 秒以后气体温度 T_s 为:

$$T_s = T_0 \exp\left[\frac{Q_s}{mC_p T_0}\right] \quad (6)$$

(6)式中 $m \equiv V_0 \rho_0 / N_A$ 称为气体的摩尔数,在 s 秒时气体的密度 ρ_s 为:

$$\rho_s = \frac{\rho_0 T_0}{T_s} = \rho_0 \exp(-Q_s / mC_p T_0) \quad (7)$$

当放电频率为 f 时,相应的激光功率正比于 f 和 ρ_s 的乘积:

$$I_{\text{激光}} = kf\rho_s = kf\rho_0 \exp(-Q_s / mC_p T_0) \quad (8)$$

在图4的实验条件下, $C_p = 4.968$ (cal/克分子·K), $T_0 = 300$ K; $Q \approx 32$ J 而 $\eta \sim 2\%$ 。(8)式可简化为($s=1$ s):

$$I_{\text{静止}} = 0.72f \exp(-0.082f) \quad (9)$$

其中 $R\rho_0$ 的数值是根据图4中气体流动情况下($Q_s=0$)和式(1)的单脉冲实验所确定的。图4中的实线就是根据(10)式的计算曲线,而圆点代表实验值能很好地与上述理论曲线符合。为了克服上述加热效应,要求二个激光脉冲之间激光介质通过横向流动而全部更新,此时,放电区产生的热能由于横流过程被排到放电区之外,对下一个脉冲不会产生影响,因此激光功率

$$I_{\text{流动}} = fk\rho_0 \quad (10)$$

上述结果已被实验证实(如图4)。值得指出的是,在气体流动情况下,实验上用冷却装置进行冷却激光工作气体,保持工作介质的温度维持在室温 T_0 ,故由(4)知 $\rho = \rho_0$,比较式(8)和(10)可以得到如下结论:在气体不流动时短时间工作的重复脉冲准分子激光输出功率比横向流动时要下降 $[\exp(-Q_s/mC_pT_0)]$ 倍,采用 m 较大的气体或者 C_p 较大的气体,下降倍数可以减少。

三、气体流速对准分子激光输出的影响

原则上讲,只要激光气体在二个激光脉冲之间被更新,激光输出功率应该与气体的流速关系不大。当重复频率为每秒5次时,图5显示了激光输出与流速之间的平坦关系。但是,当我们将重复频率提高到每秒16次,并为了提高输出功率加大了每个脉冲的泵浦能量时,实验结果表明,激光输出功率随气体流速的增大而呈现上升趋势。

上述结果可以用流场密度扰动的原由来解释。文献[3]分析了横流气体激光器中,由于放电功率的馈入,热扩散效应与气动冷却效应等因素会造成放电区介质的密度扰动。

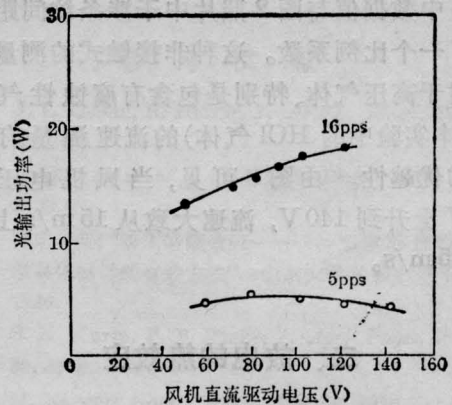


图5 不同重复频率下,气体流速与准分子激光输出功率的关系

密度扰动的幅度随注入功率的增长而增长,而随流速的增大而变小。由文献[3]给出:

$$\rho_0/\rho = 1 + \frac{W\Delta}{v\rho C_p T_0} f(x) \quad (11)$$

其中 W 为泵浦注入功率密度; Δ 为常数;定义 $\Delta\rho$ 为 $x = \pm\sqrt{2}\Delta$ 处的密度差。图6给出了在不同的注入功率密度下,放电气体密度扰动与气体流速的关系。在低的注入功率密度情况下例如 $W \leq 5$ W/cm³,它相应与本文图5中每秒5次的情况。密度扰动 $\Delta\rho/\rho$ 小对于流速从15 m/s到25 m/s变化很平坦,对激光放电的均匀性的影响程度不大。并且气体在二个脉冲之间被更新,从而气体流速对激光功率的关系呈图5中的平坦曲线。但

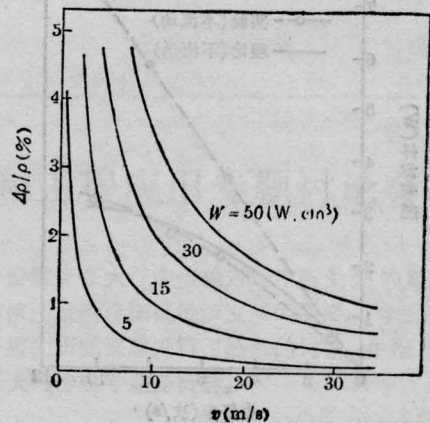


图6 在不同的注入功率密度下,放电气体密度扰动与气流速度的关系

当脉冲重复率增大,注入功率密度增大时,例如 $W > 15 \text{ W/cm}^2$,由于激光均匀放电对气体密度的变化很敏感,在 $W > 15 \text{ W/cm}^2$ 时,容易导致流注击穿的场强不均匀性。当流速增大时,就能改善其放电均匀性。因而在每秒16次运转时,随着气流速度的增大,根据以上分析,我们可以定性地解释图5中每秒16次时激光输出功率随流速的增大而增大的趋势。必须指出,上述分析要作定量计算有一定的局限性,这是由于在横向流动高气压准分子激光器中影响放电均匀性的因素除了上述考虑到的放电热能产生热膨胀效应外,还有一些其它因素,例如预电离程度、气体复合、气体成份、电场强度分布以及预电离及主放电之间的同步延时等,但根据以上分析,我们可以认为流场密度扰动是一个主要原因,它可以解释在较高重复率和较高注入功率密度下激光输出功率随流速增大而增高的趋势,这一结果对于设计更高平均功率的准分子激光器提供了设计依据。

在以上工作的基础上,我们采取比图4中更大的注入功率和更高的重复率,获得最

大输出功率为18W,其结果由图7给出。当重复频率从每秒8次上升到每秒16次时,每个激光脉冲的能量维持不变。将重复频率进一步提高的工作正在进行之中。

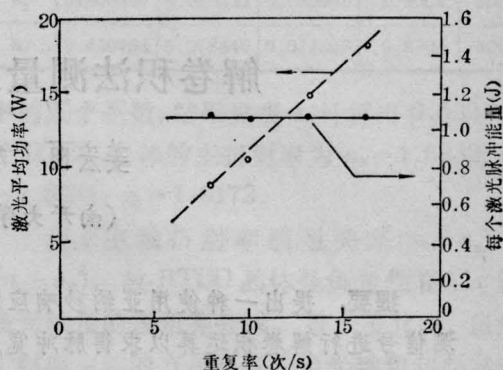


图7 激光平均输出功率、每个激光脉冲能量与重复频率的关系曲线

魏运荣、丁爱臻、董景星对本实验工作给予很多的帮助,在此深表谢意。

参 考 文 献

- [1] 楼祺洪等;《中国激光》,1986,13, No. 10, 685.
- [2] 王润文等;《激光》,1979,6, No. 2, 40.
- [3] 郑承恩等;《中国激光》,1984,11, No. 12, 727.

He-Ne 激光穴位照射治疗座疮

本病是一种毛囊、皮脂腺的慢性炎症,好发于颜面、胸背部,可形成黑头粉刺、丘疹、脓疱、结节、囊肿等损害。多发于青春期男女,常伴有皮脂溢出。青春期过后,大多自然全愈或减轻。

自1979年以来我们采用 He-Ne 激光穴位照射治疗脓疱性座疮 31 例、囊肿性座疮 19 例。临床观察疗效满意。

采用 741 型 He-Ne 激光器,输出功率为 7 mW,光斑直径 4 mm,治疗面积为 12.56 mm^2 。

取穴:体穴为阿是穴和合谷,耳穴为肺及内分泌。将激光束通过柔软的导光纤直接作用于穴位,每穴照射 5 分钟,每日治疗一次,6 次为一疗程,一疗程后嘱患者休息 3~5 天,继下一疗程。

具体疗效见表所示。

疗效分析表(例数)

疗 效	脓疱性座疮	囊 性 疮	脓疱性座疮	囊 性 疮
	全 愈	全 愈	无 效	无 效
6~12	3	—	—	—
12~18	18	6	—	—
18~30	18	10	—	—
30 次以上		2	2	1
合 计	29	18	2	1

(江苏省徐州市第四人民医院 张育勤
常秀兰 程加云
1986年4月14日收稿)