

文章编号: 1001 - 2486(2011)02 - 0013 - 03

## 电激励 HF/DF 化学激光器放电管管径优化实验研究\*

罗 威,袁圣付,陆启生,闫宝珠

(国防科技大学 光电科学与工程学院,湖南 长沙 410073)

**摘要:**减小现有电激励 HF/DF 化学激光器放电管的内径有利于多模块集成,并可能有利于提高激光器性能。对内径分别为 28mm、20mm、16mm 的三种放电管的辉光放电特性及激光器运行参数进行了实验研究。注入  $\text{NF}_3$  后,三种放电管中等离子体发生了不同程度的收缩现象。内径 20mm 放电管收缩比率最小,而且总耗气量最低,激光器输出功率和电光效率最高,副 He 注入对激光器输出功率提升作用最显著。通过分析对比实验结果,提出等离子体的稳定性和体积大小,是判断放电管性能的两个直观因素。

**关键词:**化学激光器;放电管尺寸;辉光放电;激光器功率

中图分类号:TN248.5 文献标识码:A

## Experimental Study of Discharge Tube Diameter Optimize for Discharge Driven HF/DF Chemical Laser

LUO Wei, YUAN Sheng-fu, LU Qi-sheng, YAN Bao-zhu

(College of Opto-electric Science and Engineer, National Univ. of Defense Technology, Changsha 410073, China)

**Abstract:** Reducing the diameter of the discharge tube used in the discharge driven HF/DF chemical laser is useful for integration of multi-module, and may be useful for promoting the performance of the laser as well. The glow discharge characteristics and laser operated parameters of three different discharge tubes were experimental studied, and the diameter of the discharge tubes was 28mm, 20mm and 16mm, respectively. When  $\text{NF}_3$  gas was injected, the plasma necking phenomenon occurred in all three discharge tubes. For the laser which used the 20mm diameter discharge tube, the plasma necking phenomenon was the weakest, the total consume of working gas was the least, the output power and the electro-optic transfer efficiency were the highest, and the laser output power promotion effect by secondary He was the most outstanding. Through comparison, it is suggested that the stability and volume of the plasma are two intuitionistic parameters for judging the performance of discharge tubes.

**Key words:** chemical laser; inside diameter of tube; glow discharge; power of laser

放电管为电激励 HF/DF 化学激光器提供游离态 F 原子,是激光器的核心器件之一。对放电管结构参数进行优化,有助于提高放电管性能,进而提高激光器整体性能,如提高输出功率和效率、缩小体积、减少燃料和能源消耗等。多丽萍等对放电管在不同电极材料、电极间距、气体流速、镇流电阻等条件下的直流放电特性及 F 原子产量进行了实验研究<sup>[1]</sup>。但放电管管径与激光器输出性能关系的分析测量,目前没有相关的研究成果。

对于国防科技大学研制的电激励 HF/DF 化学激光器,我们观察到放电产生的辉光并没有充满整个放电管,而是收缩到中心位置形成较细的一条放电通道,因而在一定程度上减小放电管管径,对含氟气体的解离可能是无害甚至是有益的。更为重要的是,由于目前使用的放电管管径较大,

只能通过多模块并联来扩展增益区横向长度,而限制了增益介质的纵向扩展,长矩形气流通截面在高度方向的衍射损耗会限制功率水平的线性提升,并且会降低光束质量<sup>[2]</sup>。若适当减小放电管管径,则增益区在横向和纵向都可以进行合理扩展,提高激光器功率同时不会影响激光的光束质量,激光器多模块集成的体积将会大大减小,并且为激光器喷管设计提供了方便。此外,在电激励高功率  $\text{CO}_2$  激光器中,为实现大面积均匀放电采取过很多种方式<sup>[3]</sup>,它们各有优劣,而我们计划采用的放电管线性阵列方式,或许是一种较好的选择。基于以上原因及需求,本文对放电管尺寸与其辉光放电特性及激光器输出特性的关系进行了实验研究。

\* 收稿日期:2010 - 11 - 05

基金项目:国家自然科学基金资助项目(10974255/A040403)

作者简介:罗威(1985—),男,博士生。

## 1 实验装置

实验中所用的激光器的结构和工作方式与文献[4-5]基本相同,工作原理如下:  $\text{NF}_3$  和主  $\text{He}(p-\text{He})$  气预混后注入放电管,经直流辉光放电后解离出 F 原子,在光腔内与注入的  $\text{H}_2$  发生泵浦反应:  $\text{F} + \text{H}_2 \rightarrow \text{HF} + \text{H}$ ,生成振动激发态的 HF 分子,形成激光激射。副  $\text{He}(s-\text{He})$  从放电管末端注入以提高激光器性能,  $\text{N}_2$  从腔镜两侧注入以保护腔镜免受腐蚀。原放电管为外径 32mm、内径 28mm、长 388mm 的石英管,阳极为直径 2mm、尖端打磨为圆锥型的单根镍针,主气流从 6 个直径 0.8mm 的小孔中环注入,小孔均匀分布在直径 16mm 的圆上。阳极伸入放电管的长度约 74.5mm,阴极为铝环,铝环内径为 16mm。放电管外面为水冷结

构,水冷玻璃外管尺寸为外径 45mm、内径 38mm。除原尺寸的放电管外,我们又使用了外径 24mm、内径 20mm 和外径 20mm、内径 16mm 的两种放电管进行实验,激光器其他结构基本不变。实验中采用了新型驱动电源,是能自动调节电压的恒流源,不需要镇流电阻。

## 2 实验现象及分析

### 2.1 放电管辉光观察

$\text{NF}_3$  是电负性气体,难以直接放电击穿,故在放电管中注入 He 气放电,形成导电通道,然后再注入  $\text{NF}_3$ 。使用不同内径的放电管,注入一定流量的纯 He 气进行放电,再逐渐由零增大  $\text{NF}_3$  流量,放电产生的辉光如图 1 所示。

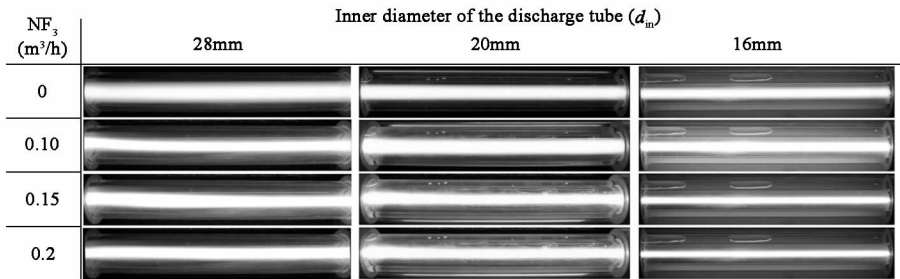


图 1 不同内径放电管放电辉光图

Fig.1 Glow in discharge tubes of different inside diameter

实验中观察发现,三种内径放电管放电的共同特点有:纯 He 放电时,放电很稳定,放电电压较低,发出相对柔和的辉光,产生的等离子体呈圆柱状均匀充满整个放电管。加入  $\text{NF}_3$  后,放电电压随  $\text{NF}_3$  流量增大而升高,产生等离子体颈缩现象,辉光相比纯 He 放电要亮很多。

三种内径放电管放电的不同之处有:(1)纯 He 放电时,辉光亮度随管径减小而增强;(2)加入  $\text{NF}_3$  后,内径 28mm 放电管放电不稳定,等离子体柱存在明显的抖动及收缩,另外两种放电管放电稳定;(3)加入  $\text{NF}_3$  后,内径 20mm 放电管辉光收缩比例最小;(4)随着  $\text{NF}_3$  流量增大,16mm 放电管辉光亮度先增强后变弱,放电产生等离子体的体积在三种放电管中相对最小,放电区亮度最大。

### 2.2 激光器出光实验

换用不同内径放电管进行了 HF 激光出光实

验,对各工作气体的流量进行了调节,使激光器输出功率达到最大值,并记录了此时关闭副 He 后的输出功率,得到的激光器运行参数如表 1 所示。需说明的是,由于布鲁斯特窗口使用时间较长,电离产生的离子对窗口的损伤较严重,因而激光器输出功率较低,但对比较不同管径放电管性能不构成影响。

由表 1 可以看出,内径 20mm 放电管耗气量最小,注入副 He 后输出功率最高,无副 He 时功率最小,副 He 对激光器输出功率提升作用非常显著。放电管末端加注副 He,能够明显改善激光器输出性能,其主要机制是降低从放电管出来的主气流的温度、提高增益区流速和减小 F 原子壁面复合<sup>[2,5]</sup>,因此,我们判断内径 20mm 放电管流出气体的温度可能相对较高。

表 1 不同内径放电管 HF 激光器运行参数

Tab.1 Operation parameter of HF lasers with different discharge tube

$d_{in}$ (mm)	Flow rate of gas ( $\text{m}^3/\text{h}$ )					Pressure (kPa)	Output power(W)		Input power(W)	
	pHe	$\text{NF}_3$	sHe	$\text{H}_2$	$\text{N}_2$		With s-He	No s-He	U(kV)	I(mA)
28	0.95	0.15	1.2	0.85	0.5	0.3	1.1	0.8	2.2	188
20	0.63	0.13	>2	0.6	0.5	0.3	1.4	0.14	2.5	180
16	0.7	0.15	1.45	0.75	0.5	0.3	0.8	0.6	2.7	182

### 2.3 现象分析

我们所使用的放电管为低气压、低电流辉光放电,对放电管特性的研究显示,放电形式为反常辉光,进一步增大电流则过渡到直流非热电弧放电。低电流情况下,等离子体只与阴极的一小部分接触,随着电流的增加,接触面积不断增大,阴极附近的一些放电区将重合,使得沿着阴极和阳极之间的整个放电发光强度大体上是均匀的<sup>[6]</sup>。

流场的不均匀性、电场的不均匀性以及放电间隙形成等离子体的不稳定性,均会影响放电管注入功率的提高,从而影响激光输出功率的提高<sup>[6]</sup>。在低气压辉光放电中,等离子体不稳定性最一般的表现形式是发生辉纹(电子附着不稳定性,辉光表现为发光的薄层)和辉光崩溃或等离子体颈缩(热不稳定性,表现为很细的丝状放电),热不稳定性的原因在于电子密度的扰动或者振动能量弛豫的扰动,其对激光功率的影响相对更大<sup>[6-7]</sup>。

纯 He 放电时击穿电压很低,电流较大,故辉光很均匀,除与管壁之间很薄的鞘层外,等离子体几乎充满放电管。由于三种放电管使用相同的电极和气流通道结构,加入  $\text{NF}_3$  后,电场的不均匀性差别较小。流场可能会因为放电管管径不同造成一定差别,由于很难评判孰优孰劣,在此不做评价。更为重要的是,在三种管径放电管中均能观察到的等离子体热不稳定性现象,即等离子体的颈缩现象。引起辉光放电热不稳定性现象的原因在于电子密度的扰动或者振动能量弛豫的扰动。电子密度的扰动是由于气体密度变化和负离子产生的;振动能量弛豫的扰动,是指当传输给振动能级的电功率较大时,由振动-平动弛豫浪涌引起气体局部发热,从而引起热不稳定性<sup>[6]</sup>。 $\text{NF}_3$  是电负性气体,其击穿电压远高于 He 气,等离子体颈缩现象只在加入  $\text{NF}_3$  气体后才出现,故  $\text{NF}_3$  吸附电子产生的负离子是产生等离子体颈缩现象的重要原因。放电集中在放电管中心的放电通道,即图 1 中的中心亮区,也代表了放电产生的等离子体体积大小,外围区域因电压逐渐降低而不足以击穿  $\text{NF}_3$  和 He 的混合气体,不产生放电或产生微弱放电,氟源气流动时不会产生解离,这样不仅浪费气源,没有解离的氟源气体还是激发态 HF/DF 的强去激活剂,对激光器性能产生不利影响,因此对放电管管径进行优化是十分必要的。

放电管管径由 28mm 减小为 20mm 后,放电电流强度与放电通道体积都基本不变,因此没有放电解离直接进入增益发生器的氟源气流大为减少,故激光器运行时所需的放电混合气流量大

为减少,同时激光器输出功率更高。进一步将管径减少为 16mm 时,放电通道体积又进一步减小了,激光器功率也较低,分析其原因为:由于扩散作用大量带电离子损失在与管壁的碰撞过程中<sup>[8]</sup>,使得管壁附件的放电不能维持,放电通道进一步向中心集中。由于通过放电管的总电流基本相同,所以内径 16mm 放电管中放电通道电流密度最大,亮度最强。虽然通过了放电通道的氟源气解离度最高,但由于大量氟源气没有通过放电通道,最终导致功率下降。因此放电管内径应略大于放电所能形成的等离子体柱的半径大小,使氟源气体能充分通过放电通道,但也不会对等离子体柱的体积产生限制。

三种管径放电管中内径 20mm 放电管颈缩现象最弱,对放电通道的利用最充分,激光器输出功率最高,电光效率也是最高的。内径 28mm 放电管与内径 16mm 放电管颈缩现象都很明显,但后者等离子体的体积最小,输出功率也最低。因而放电产生等离子体的稳定性和均匀性,等离子体的体积,是判断放电管性能直观因素。

### 3 结论

对于现有电极及气路结构的放电管,一定程度上减小放电管管径,对于提高激光器功率和效率是有利的,在所选用的三种管径放电管中,内径 20mm 放电管等离子体热不稳定性现象最弱,对放电通道的利用最充分,激光器输出功率和电光效率均最高。放电管结构参数一般都需要通过大量系统的对比实验来确定优化方案,而通过观察放电管荧光的颈缩现象及放电通道的体积来初步判断放电管性能优劣,是一种简单、直观、可靠的方法。

### 参考文献:

- [1] Duo L P, Tang S K, Yu H J, et al. DC Discharge Characteristics and Fluorine Atom Yield in  $\text{NF}_3/\text{He}$ [J]. Chin. Opt. Lett., 2006, 4(3):170-172.
- [2] 王红岩. 电激励连续波红外多波段化学激光器的研究[D]. 长沙:国防科技大学, 2006, 49-63.
- [3] 徐启阳,王新兵. 高功率连续  $\text{CO}_2$  激光器[M]. 北京:国防工业出版社,2000.
- [4] 王红岩,袁圣付,张鹏,等. 电激励红外多波段化学激光器的光腔参量选择[J]. 中国激光, 2005,32(8):1040-1044.
- [5] 王红岩,袁圣付,张鹏,等. 电激励红外多波段化学激光器中稀释剂注入方式对激光输出的影响[J]. 强激光与粒子束, 2005,17(3):339-342.
- [6] 陶承刚. 电激励连续波 HF/DF 化学激光器放电系统研究[D]. 长沙:国防科技大学,2009.
- [7] 丘军林. 气体电子学[M]. 武汉:华中理工大学出版社, 1999.
- [8] 徐学基, 诸定昌. 气体放电物理[M]. 上海:复旦大学出版社,1996.