

毛细管内有金催化剂的封离型 CO₂ 激光器特性研究

董小刚

(中国空气动力研究与发展中心, 绵阳, 622653)

侯天晋

王欲知

(西南技术物理研究所, 成都, 610041)

(西南交通大学物理系, 成都, 610031)

摘要: 金作为催化剂直接置入封离型 CO₂ 激光器毛细管能有效地促使放电分解的 CO₂ 复合^[1], 但也导致器件工作状态的改变^[2]。作者从管内电场分布、有效放电等离子体体积及激励效率、迁移电流、双极性扩散、管壁电荷中和与壁电流等方面作了分析, 用以自己的工艺研制的环膜、离散膜及未置金催化剂管进行了比较实验, 建立了器件的数学模型并编程数值计算, 指出加入导体环膜后将降低器件效率, 改变乃至恶化其运行状态, 明确提出离散膜和弥散膜的概念并肯定其优越性, 修正了前期工作所得“置入金环使着火电压与 *I-V* 曲线都升高”的结论。

关键词: CO₂ 激光器 工作特性 金催化剂 再生复合

Investigation of the performance characteristics of sealed-off CO₂ laser with distributed gold catalyst sited at the inner wall of the discharge capillary

Dong Xiaogang

(China Aerodynamics Research & Development Center, Mianyang, 622653)

Hou Tianjin

(Southwest Ins. of Tech. Phys., Chengdu, 610041)

Wang Yuzhi

(Dept. of Phys. Southwest Jiaotong Univ., Chengdu, 610031)

Abstract: Being a catalyst, gold sited directly in capillary of sealed-off CO₂ laser can make CO₂ effectively recombine that dissociated with the discharge, but cause change of the performance status of device yet. This paper investigated the electric field distribution, available volume of plasma and exciting efficiency, drift current, ambipolar diffusion, the neutralization of the charges on the wall in capillary, especially the wall-current, performed further contrasting test with ring film and separate film plated by

参 考 文 献

- 1 USP 4, 674, 874, Jun. 23, 1987: 1~ 6
- 2 张承铨, 刘松明, 彭长华. 国外军用激光仪器手册. 北京: 兵器工业出版社. 1989: 429~ 438
- 3 王海先. 红外与激光工程, 1997; 26(2): 27~ 31

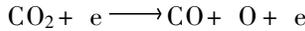
作者简介: 王海先, 女, 1956年9月出生。工程师。从事激光报警和激光测距研究工作。

means of the plating technology ourselvse and non-catalyst devices, founded their mathematical model and made program to simulate numerally, pointed out that the conducting ring film result in the efficiency decline and change or going so far as to worsen the characteristic of laser performance, definitely advanced the new concepts and relevant device design about separate and disperse film catalyst and confirmed their superiority, and, modified the conclusion of previous work, i. e., both the breakdown voltage and the terminal voltage were increasing in the gold-ring tube.

Key words: CO₂ laser performance characteristics gold catalyst disassociate and recompose

引 言

放电激励的 CO₂ 激光器工作时其工作物质 CO₂ 会发生分解^[3],



这将导致输出功率下降、工作不稳定和寿命缩短,对于封离非流动型器件问题尤为严重。常用加入催化剂的办法来促使 CO₂ 复合再生^[4]。美国专利第 4756000 号^[5]介绍了 J. A. Macken 的发明,即以金作催化剂,用溅射蒸镀连续导体膜(玻管)或粉末涂布再烧结成离散小金“岛”(陶瓷管)的方法,将金直接置入放电区,利用放电产生的大量寿命较短的高能态氧等活性组分,就近催化促复,取得了较好的效果,免除了外置催化剂需额外加热激活并使气体流动以与催化剂表面有效接触的问题^[6]。作为在稳恒乃至低频电场下为等位体的导体金,置入放电区后改变了器件的工作环境,必定对其工作特性产生影响。作者等人在前期的工作中,用 He-Ne 及一般 CO₂ 激光器的工作气体分别在有无储气套的 CO₂ 激光器中放电,比较了毛细管中置有金环及未置管的 $I-V$ 特性,除观察到有金环的器件工作明显好以外,得出加金环的管子的着火电压和 $I-V$ 曲线都有所升高的结论,并作了初步的分析、报告。由于所用器件未装储气套,因而很快显出效果。实验中的金环宽 8mm,厚 0.5mm,管径 13mm。为进一步检验其效果、分析机理与比较优劣,我们用商品管内蒸镀周期金环膜和离散无序小片金膜以及未镀金管并以实际的工作气体作了比较实验,并对周期排列的金环膜器件管内电场作了数值计算。实验结果表明,在出光工作的情况下,镀有金环的管子效率大为降低,镀离散膜的略有下降,而着火电压与 $I-V$ 曲线的升高并不明显,甚至并非必然。理论计算与分析对此给出了合理的解释,并指出,环金设计虽能较有效地催化促复,但效率低,同样输出时所需工作状态高,对器件和电源系统是不利的。而离散膜的设计显然更优。

一、实验与计算

1. 器件的制备 作者用熔点高,蒸气压低的钨丝作发热灯丝,金丝或小金片缠绕承载其上,在真空度约 0.01Pa 的条件下,直接在经仔细挑选比较的(主要是毛细管内径一样大)1m 长商品 CO₂ 激光器放电毛细管内通电加热至金熔融、蒸发,凝结于玻管内壁上,分别镀出了环膜及离散膜,较之于美国专利介绍的溅射、涂布烧结等方法,工艺简单,直接生成镜面金膜,不需

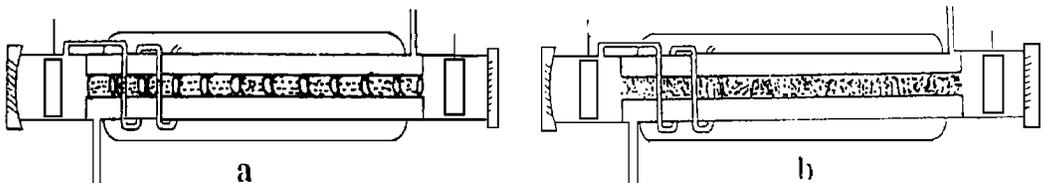


Fig. 1 Sealed-off axial discharge CO₂ laser with distributed Gold catalyst plated at the inner wall of the capillary
a—ring film' b—separating film'

后续处理。如图 1。

金膜镀制好后, 环膜管, 离散膜管和对照管(未镀膜) 并联, 经反复多次抽气, 充入 He 及普通工作气体放电除气, 并适量加入氢气以激活金表面, 最后配上工作气体再封切下来, 保证了器件配气初状态的统一, 三支管子的烧制、贴片亦由其原生产单位统一完成, 保证了在完全一致的背景下作比较实验。由于所用电源设备的限制, 充气总压低于商品器件; 为明确比较金的催化作用, 也未加入氢气、水蒸气及 Xe 等具有促复催化, 提高功率作用的气体, 故器件总的工作状态较商品器件低。

Table The initial performing data of the sample devices as soon as sealed-off

	total pressure= 2270Pa		mixture ratio: CO ₂ : N ₂ : He= 7: 13: 80		
	breakdown voltage (kV)	working voltage (kV)	working current (mA)	output (W)	laser efficiency (%)
non-catalyst	16.5	10	25	27.34	10.9
ring film	16.0	10	25	11.66	4.66
separate film	15.0	10	23.5	23.45	9.98

2. 实验结果 附表数据是配气后刚封切下来时立即测得的, 保证了配气状态未变。而为保证后续的寿命实验的进行, 未再一一测定伏安特性曲线。正如后面所分析的, 外伏安特性的些许变化并不说明什么。

3. 理论计算 以毛细管中镀有导体环膜的真实器件为背景, 考虑导体在稳恒状态下为等位体, 膜厚仅数百埃, 就数值计算所取网格而言可视厚度为 0; 毛细管玻壳外是冷却水套, 可取为电势 0 点; 除去毛细管两端的一些边缘效应, 管中的导体环序列可视为均匀周期无限排列; 按阴极位降约几百伏计算,

正柱区电位梯度可约取 100V/cm, 而我们的环宽加间隔亦约为 1cm, 故取各环电位相差 100V, 这无疑有一定的先验性, 但并不影响我们计算结果的一般性。在加上了玻壳内的场以及边界 0 条件或无限厚均匀玻壳无穷远处为线性场的条件(即仅用均匀周期无限排列而去掉玻管边界水套 0 电势条件, 这也是自然合理的)后, 可去掉一般电子光学、电子枪或电子透镜设计中对电极间的场作先验的线性或三角函数形插值的需要, 从而使计算结果更为可靠。图 2 为算得的环膜管内电场的等位线, 按等电位差绘制, 图 3 是电力线族, 按等通量画出。

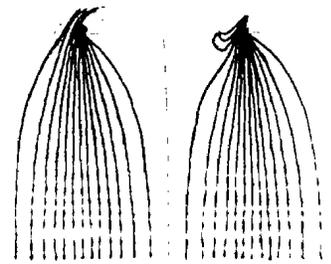


Fig. 2 Isopotentials of the electric field in ring-film capillary, drawn in equal difference



Fig. 3 Electric lines in a conducting ring period, drawn in equal flux difference

二、结果分析讨论

虽然我们没有再作器件伏安特性的测定, 但从附表所列数据可见, 并无明显一致的伏安特性变化的规律。事实上, 气体放电器件的非热平衡状态性质决定了其状态的多值性及到达稳定状态过程的随机性(如着火电压的测定就有相当大的偶然性, 与气体温度、预电离、已着火过

与否等有很大关系),因此在 20kV 上相差 300V 左右不算什么。但放电正柱区中直接引入了导体,对器件工作状态会产生影响这是肯定的。这主要有以下几个方面:

1. 放电激励的有效空间减小 这是针对有一定宽度的环金管内而言。由电子光学^[7]、数理方法^[8]乃至普通物理教材中都可得知,导体环管内的电场主要集中在轴线附近。在我们经严格数值计算而得的图 1, 2 中可见,除导体环间边缘处有较强的场外,有效激励工作气体的场都集中在管轴附近。图 2 中电力线是按等通量间隔画的,即各相邻两线之间的电通量是相同的,电力线越密处电场越强。而由于图实际是旋转对称圆柱的过轴线的剖面,故等宽度的两线在管边缘附近(图的上方)对应的场较轴线附近的更弱。导体膜表面没有切向场只有法向场,且主要集中在膜间隔处的边缘附近。这些相当奇异的场将强烈地吸引带电粒子及激发粒子(大多都因具有非对称的电多极矩甚至未饱和价键而易于在电场中极化)向其漂移,吸附上去后通过导体作电荷及能量转移而中和、消激发,而有效放电激励在轴线附近的激励粒子浓度相对边缘处要高得多,加速了向管壁的扩散。由附表可见,环膜管的输出功率是最低的,而离散膜管和未镀膜管就不是这样。

2. 带电粒子及激发粒子的运输 粒子在气体中除各向同性的热运动外,还有因浓度差异而导致的向浓度降低方向的扩散运动^[9],带电粒子在电场中还有漂移运动,可极化的激发粒子在非均匀场中也要漂移。在气体中,由于粒子间的相互碰撞,粒子的漂移路径基本上是沿电力线的。由图 3 可见,大量的电力线直接终止于导体上,这将使管内空间中的带电粒子及激发粒子减少;而且由于环中电场主要集中在轴线附近,该处的带电粒子及激发粒子浓度较边缘处高,从而更加快了向边界的扩散。

3. 导体边界上粒子的消电离、消激发作用及电荷转移、壁电流 由于固体的能带结构以及其表面的一些未饱和价键、悬挂电子云^[10]等,其相关能在相当宽的范围内分布,易于将带电粒子及激发粒子的额外能量转移、耗散掉而吸附与消激发,导体因有自由电子而使进入的电荷可移动、调整,从而一方面易于使吸附的带电粒子消电离,更可将电荷转移(主要通过自由电子的移动)而形成壁电流,由图 3 可知,导体膜的左端聚集着正电荷,右端聚集着负电荷,故左端吸附电子或带负电的粒子,右端吸附正粒子。正负粒子在导体上交换、转移电荷而中和后,再按克努曾定理随机脱附(当然也有一定的概率击出二次电子即产生 r 过程),这样就形成自右向左的宏观壁电流。

基于上述三种影响,可解释器件特性的一些表现。首先是环膜管的功率因而效率大为下降,甚至光束质量也变差(虽然可望在较长时间的使用中保持一定的稳定性)。这是因为放电激励的有效空间集中于管轴附近,边缘处的激励很弱,有效等离子体体积减小,边界上带电粒子损耗又增大,有效的放电效率降低。虽然高斯束的能量有 84% 集中在很小的束半径内,束外能量只占 16% 不到,但其对激光束振荡的形成影响很大。边界的情况对区域内的场起决定作用,这是电磁场理论的基本定律。由于管内的场将粒子引向边界,催化再生的效果较好,在较长时间的使用中保持输出不变。我们的实验已基本证实了这一点。

对于着火过程,按汤生放电理论,气体击穿主要靠两种电离,即 a 过程——电子被电场加速后与气体分子碰撞使之电离; r 过程——空间正离子以一定能量打到阴极(或导体环!)上产生二次电子发射。就器件而言,着火电压主要由管径、气体成分及压强,电极的间距、材料及表面状态而定。较之于未镀膜或离散膜管,管壁镀上金环后一方面缩短了所要击穿的实际空间距离,易于电子的渡越(实验中可见到在稍加一定的电压后即有间断的放电出现);但另一方面

加大了边界上带电粒子的损耗,使这种暗放电难以直接发展到雪崩自持放电。然而其对管内气体有一定的加热及预电离作用,因此着火电压并非必定升高。

对于伏安特性,虽然放电通道变细,电子轴向漂移总数减少,但由于有壁电流存在,特别是当环宽较大时壁电流可以相当大,甚至可过渡到形成新的阴、阳极放电(这个过程实际上是连续渐变的,并非必有一个截然不同的、阶跃性的“击穿”出现),因此,作为器件外特性的伏安曲线,不能断然说就是升高了,应该是当环宽较小逐渐增大时,伏安曲线也逐渐上升,但当环宽增大到并超过某个值时,有相当多的带电粒子被引导到环上作电荷转移,壁电流占相当大的比重,则伏安曲线又将下降。

最后,由于正离子被引向金环,尤其是在环间隔处的低电位端(即环膜靠近阳极一侧),正离子以较大的能量频繁地撞击金膜,将使金原子溅射而致环膜的损耗脱落。本实验中器件工作不久即已明显观察到金环靠阳极一侧出现了缺豁,其使用寿命是难以保证的。而离散金膜则没有这个问题。

可见,环宽应小到一定程度方能兼顾器件的工作效率和催化再生效果这两方面的要求,这在蒸镀工艺上是有难度的。

根据我们的比较实验、理论分析和数值计算,可知环金膜虽有较高的催化作用,但将使器件效率下降,等离子体利用率低甚至光束不稳定及电源系统不通用,而作者提出的离散膜或弥散膜兼顾了器件的效率和催化再生效果,是提高功率、延长寿命及改善光束质量的较好而颇有前途的方案。

参 考 文 献

- 1 Macken J A, IEEE J Q E, 1989; 25(7): 1695~ 1703
- 2 Wang Y Z, Dong X G. SPIE, 1997: 209~ 215
- 3 赫光生,雷仕湛. 激光器设计基础. 上海:上海科技出版社, 1979: 166
- 4 罗小兵,袁好,丘军林. 激光技术, 1988; 12(3): 7~ 10
- 5 Macken J A. USP 4, 756, 000, Jul. 5, 1988
- 6 Brown G K, SPIE Int Soc Opt Eng, 1986; 663: 136
- 7 董林夙,西门纪业. 电子光学计算机辅助设计. 北京:国防工业出版社, 1990: 3, 19
- 8 梁昆森. 数学物理方法. 北京:人民教育出版社, 1979: 3, 387
- 9 胡志强,甄汉生,施迎难. 气体电子学. 北京:电子工业出版社, 1988: 28
- 10 李作俊. 多相催化动力学基础. 北京:北京大学出版社, 1990: 2, 29

作者简介:董小刚,男,1962年2月出生。博士,副研究员。现从事光电技术及激光器研制工作。

侯天晋,男,1956年出生。研究员。现从事激光器研制工作。

王欲知,男,1932年出生。教授,博士生导师。现从事气体激光器研制及教学工作。

收稿日期:1998-01-08

• 产品简讯 •

可调谐光参量振荡器

美国加利福尼亚州 Coherent Laser Group 公司推出 Infinity-XPO 型可调谐宽带光参量振荡器,泵浦波长 355nm,可配置于该公司的 Infinity Nd:YAG 激光头内。多重泵浦的 Porro 棱镜腔和双非曲线调校保证输出较小发散度,质量高于平平腔的光束,该系统调谐范围从 420~2300nm,在 220~420nm 波段有高于 10% 的双倍效率。

於祖兰 巩马理 供稿