

封离型 CO₂ 激光器

北京电子学研究所 501 组

CO₂ 激光器是气体激光器中功率较大、效率较高的一种器件。激光波长在 10.6 微米附近 (相应于 CO₂ 00°1—10°0 跃迁)。自从 1964 年国际上出现这类器件以来,已有多钟的型式。连续波功率从几百毫瓦至几十千瓦,脉冲能量从几毫焦耳到几千焦耳,可以满足各种不同的应用要求。

早期的 CO₂ 激光器都是流动型的,即气体从放电管的一端流入,在放电过程中发生各种物理的和化学的变化后,从另一端用真空泵排出。这种类型的激光器仍然保留至今。例如,目前美国广泛使用于工业加工和科学研究的 50 瓦和 250 瓦产品就是这种类型。流动型激光器具有制造工艺简单、容易维护的优点,并且几乎不存在寿命问题。但是由于需要附加的气瓶和真空泵,使整个系统复杂化,气体的流动、真空泵的振动使输出功率和频率不稳定。稍后发展的封离型器件没有这些缺点,适合于中小功率工业加工和进行有关光通讯、光雷达等的基本研究,但在最初的发展阶段,功率和效率都比流动型差得远,寿命仅有几十小时,甚至更短。因此,研制高效率长寿命的封离型器件就是一项重要的课题。

一、激光器的设计

1. 管型

图 1 至图 3 是典型的封离型器件。在图 1 的器件中,腔镜片——球面镀金全反射镜和平
面输出窗镜是直接密封在放电管上的,所以称为内腔式激光器。又因为腔镜片是事先对准好
不必再调节的,所以又称为“固定内腔式”。图 2 的器件也是固定内腔式。但在腔内放置了一个布儒斯特偏振片,所以激光器输出光束的偏振方向是严格固定的。图 3 的器件中有一个腔

(上接第 20 页)

流是 40 安培时的最大输出功率是 8.3 瓦,测得相应的管压降是 410 伏,所以效率是 5.1×10^{-4} 。

图 6 是在最佳工作条件下,输出功率与放电电流的关系。测得的阈值电流是 5 安培,所以图 6 说明,相对于阈值电流,输出功率开始以大于 $P \propto I^2 - I_{\text{阈}}^2$ 的比例关系增加^[4],其中 P 是输出功率, I 是放电电流。

图 7 是放电电流为 20 安培时,用三棱镜摄谱仪摄得的激光输出的光谱成份。

参 考 资 料

- [1] W. B. Bridges A. N. Chester, A. S. Halsted, I. U. Parker, *Proc. IEEE*, **59**(5), 724 (1971).
- [2] В. Ф. Китаева, А. П. Одинцов, Н. Н. Соболев, *Успехи физических наук*, **99** (3), 361 (1969).
- [3] R. I. Rudko, C. L. Tang, *J. Appl. Phys.* **38** (12), 4731 (1967); **39** (8), 4046 (1968).
- [4] G. Herziger, W. Seelig, *Z. Physik*, **219** (1), 5 (1969).

镜片与激光管分离,真空密封是靠布儒斯特角窗,这种形式称“外腔式”。又由于只有一个镜(反射镜或输出镜)与激光管分离,另一个镜片仍固定在激光管上,所以有时也称为“半内腔式”或“半固定腔式”。固定内腔式的优点是使用方便,但制作工艺要求较高。外腔式的优点是便于在腔内插入各种元件(如光阑、调制器等)进行实验。



图1 内腔式激光器

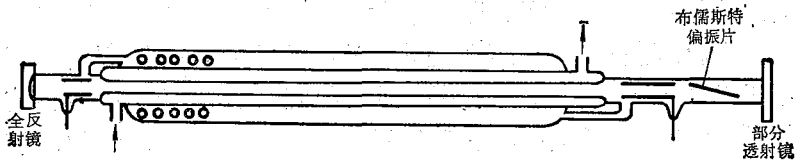


图2 内腔偏振式激光器

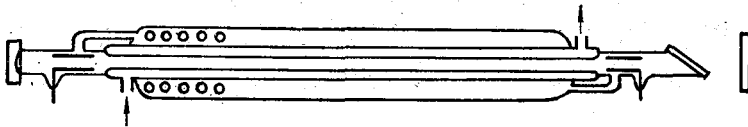


图3 外腔式激光器

2. 储气管

激光器的管壳由三个套层组成:最里面的细管是放电管,中层是水冷套,外层是储气套。储气套的直径比放电管大得多,因此大大地增加了气体容量达数十倍。此外,它使激光器结构牢固,特别是在固定内腔式的情况下,可以减轻机械形变对谐振腔对准的影响。

3. 回气管

如图1所示,阴极和阳极的通路有两条:其一为放电管,另一为通过螺旋形回气管经储气套而构成循环回路。实际的放电是走“捷径”的,所以只在放电管内有电流通过,而回气管仅仅作为一个气体循环回路。回气管应有足够的长度,并且直径不宜过大,以防止它变成放电的“捷径”。

回气管的作用是为了克服气体放电中的“电泳”现象。由于各种气体分子的电离程度不同、极性不同及质量不同,在电场的作用下,气体向两极分离,称为“电泳”现象。在单一气体放电的情况下,电泳使两极的气体浓度不同;在混合气体放电时,两极的气体成份和浓度都不同。

增加回气管使之与放电管构成循环回路,从而使气体混合均匀。早期的 CO_2 激光器没有回气管。1968年,我们在管径15毫米、长1米的激光器中观察到在放电大约一分钟后功率下降,同时放电正柱区靠近阳极和阴极的部分辉光颜色显著地变得不同,因此我们判断可能有“电泳”的影响。增加了回气管后克服了上述现象。

4. 放电管的长度和管径的选择

放电管的长度和管径的选择要考虑所需的激光功率、激光媒质的增益、对模式的要求和电

源所能提供的电压和电流等多种因素。CO₂激光器单位长度的增益与管径成反比。在10~50毫米的直径范围内，最大可能的输出功率与管径无关。采用通常的球面-平面镜谐振腔时，小管径有利于抑制高次模式。最佳放电电流随管径增大而增大，相应的放电电压则相反。根据CO₂激光器的上述特性，通常在确定长度和管径时，首先根据所需要的功率确定长度，然后根据对模式的要求确定管径，同时兼顾电源所能提供的电流和电压。典型的管长1米的器件，管径10毫米，输出功率约50瓦；管长2米的器件，管径14毫米，输出功率约100瓦；管长3米的器件，管径取20毫米，输出功率约150瓦。小管管径选择4~8毫米。

管壳的材料是石英或硬玻璃(11#或95#)。石英管膨胀系数小，性能稳定，真空去气容易。我们的器件大部分采用石英。

5. 谐振腔

对谐振腔设计的要求是：

- (1) 衍射损失小。
- (2) 需要获得单模，并且最好使全部或大部分输出功率都集中到最低次模式(TEM₀₀模)上。
- (3) 对准方便(对准误差容量大)。

对于中小功率的CO₂器件，采用球面-平面镜系统，适当地选取曲率半径 R 、镜距 L 和放电管直径 D ，基本上能满足要求。

当 $R > L$ 时，谐振腔处于稳定区域。TEM₀₀模光斑直径在球面镜和平面镜处分别为 ϕ_1 和 ϕ_2 ：

$$\phi_1 = 2 \left(\frac{\lambda L}{\pi} \right)^{1/2} \left(\frac{R^2}{L(R-L)} \right)^{1/4} \quad (1)$$

$$\phi_2 = 2 \left(\frac{\lambda L}{\pi} \right)^{1/2} \left(\frac{R-L}{L} \right)^{1/4} \quad (2)$$

式中 λ 为激光波长(10.6微米)。

第二个低次模TEM₀₁*的光斑尺寸约为TEM₀₀模的二倍，因此，若适当地选择管径 D ，使 $2\phi_1 > D > \phi_1$ ，则TEM₀₀模的衍射损失很小，而TEM₀₁*的衍射损失很大，因此获得了单一的TEM₀₀模。至于更高次模式，由于衍射损失更大，所以更不可能出现了。由于管径与TEM₀₀模式尺寸相近，同时还由于放电等离子体能量向管中心收缩以及激光能级寿命长，在寿命期间激发粒子可向管心扩散等原因，因此激光功率的大部分能集中到TEM₀₀模上，有时为了使对准误差容量大些和使放电电压不致过高，选择较大的管径，例如 $D = 2\phi_1$ ，这时就会出现TEM₀₀与TEM₁₀模式竞争现象。如果在腔内插入一个直径比TEM₀₀光斑稍大的光阑或者使反射镜倾斜都能限制高次模，但采取这种方法将会减小输出功率。典型的50瓦器件取：

$$R = 3 \sim 4 \text{ 米} \quad L = 1.2 \sim 1.3 \text{ 米} \quad D = 10 \text{ 毫米}$$

半共心腔是 $R \approx L$ 时极限情况，也是常用的产生单模的谐振腔。这种腔不受管径和管长的限制，并且很容易对准。TEM₀₀模在平面输出窗处缩小为一较小的斑点(圆斑直径与 L 和 D 有关)，在球面镜处则弥散到整个球面上。这种腔也经常有模式竞争现象。为了获得稳定的TEM₀₀模，可在腔内输出窗附近放置一个小直径的光阑。

全反射镜的材料采用光学石英，便于和石英激光管进行匹配封接。输出窗和布儒斯特角窗采用Ge单晶或GaAs单晶。Ge的电阻率为30~50欧姆·厘米，高者较好；吸收系数约为

3~5%厘米⁻¹,但在温度超过50°C时吸收系数雪崩式地上升,因此Ge输出窗需要水冷,GaAs电阻率约10⁷~10⁸欧姆·厘米,吸收系数约2%厘米⁻¹,温度效应不象Ge那样严重。Ge和GaAs的膨胀系数均与硬玻璃相近,因此便于进行匹配封接。据国外报导,高阻CdTe具有更低的吸收系数(约为0.5%厘米⁻¹)。NaCl单晶虽然吸收系数比半导体材料更低,但是光学加工质量差,容易潮解,膨胀系数很大,不便于和通常的电真空材料进行匹配封接,极易炸裂,因此只在内腔偏振管中作为布儒斯特角偏振片用。

输出窗片的透过率对输出功率影响很大,最佳透过率(或反射率)与放电管的增益和谐振腔内的损耗有关。在镜片上蒸镀不同的介质膜就能控制透过率。不镀膜的Ge反射镜两个反射面的法布里干涉反射率的最大值约78%。对于典型的50瓦器件,这个反射率接近最佳值。

镜片的光学加工质量对激光器影响也很大,但是与可见光激光器相比,则可适当降低要求。平面度为1光圈,平行平面镜的平行度是10"至30"。

镜片与管壳的粘接采用6101*环氧树脂,加30~40%的顺丁烯二酸酐。固化温度是160~200°C,加热四小时。

6. 电极

由于封离型CO₂激光器需要的放电电流很小,因此可采取冷阴极。阴极材料和结构对激光器的寿命有很大的关系。设计阴极主要考虑了下列因素:

(1) 必须尽量减少阴极溅射的影响。阴极溅射至管壁相当于“消气剂”的作用;溅射至反射镜或布儒斯特窗上,会使这些光学元件沾污。为了使溅射降到最小程度,阴极应做成圆筒形,并使电子发射只在内壁进行,离子对阴极表面的轰击造成的溅射在圆筒内部相互抵消。为了防止溅射对镜片的沾污,在阴极和镜片之间应加一个光阑。这个光阑可直接点焊到阴极筒的尾部。

(2) 阴极温度必须足够高。国外报导阴极如果采用水冷套,会吸附大量的气体,使激光器的寿命大大缩短。相反,如果加热到300°C左右,铂和镍都有催化还原作用,使CO和O₂(由CO₂分解生成)还原成CO₂。

(3) 阴极材料的选择要考虑放电中的物理化学过程。化学性能活泼,易持续氧化的金属不宜使用。铂和镍都比较稳定,且有上述催化还原作用,但实验表明铂电极极易溅射,故我们选择镍。

(4) 阴极附近的热膨胀形变也是一个重要因素。由阴极引起的管壳的热膨胀形变往往会使得谐振腔的对准受到破坏,使功率下降,模式变坏。对于玻璃材料的管壳,影响尤甚。这种不均匀形变有两方面的原因:一方面是由于阴极温度必须足够高,通过热传导使附近的管壳温度升高,如果温度分布不均匀或管壳内部有应力就会造成管身弯曲形变,破坏谐振腔的准直。另一个原因是在电极并非真正从内壁发射电子的情况下,圆筒外壁的某一局部会有微弱的辉光。与此同时,附近的管壳温度特别高,但管壳的其他部分(没有辉光的部分)温度却很低,这样就产生了严重的弯曲形变。这种电极外部的辉光是很不稳定的,经常从一个方位转移到另一个方位,因此模式和功率也随之变化。为了克服这种现象,可以将阴极圆筒套进一个内径紧密配合的玻璃套筒中使电子只能从内壁发射。

7. 电源

采用普通的高压直流电流经I形或II形滤波网络以降低波纹比。由于辉光放电的负阻

特性(电流增大时,管压降下降,微变管阻是负的),必须串接限流电阻,才能使放电稳定。其阻值应大于放电管的微变管阻的绝对值,约为放电管等效内阻几分之一,一般可由实验确定。限流电阻愈大,放电愈稳定,但功率消耗也愈大。例如管径 10 毫米、长 1 米的放电管,20 毫安时管压降为 12 千伏,等效内阻为 600 千欧,限流电阻取 200 千欧以上即可。

二、输出特性

下面的实验资料若未经特殊说明,均是对放电管内径 10 毫米,长度 1 米,腔长 1.3 米的激光器而言的。

1. 输出功率与激光器参量的关系

(1) 功率与气体成分的关系

最佳气压为: CO_2 2.6 托, N_2 2.6 托, He 15 托, Xe 1 托, H_2 0.2 托。在下面气压范围内,功率变化缓慢: 其中 CO_2 1.5~3 托, N_2 1.5~3 托, He 6~20 托, Xe 0.8~1.6 托, H_2 0.2~0.3 托。

通常 CO_2 激光器含有 CO_2 、 N_2 和 He 三种成分,加入 Xe 后功率增加约 30%,再加入 H_2 后功率再增加 60%,与此相应的效率也提高。

最佳工作电流和气体成分也有关,三种成分在 13 毫安左右,加入 Xe 后为 16 毫安,五种成分时在 25 毫安以上。

(2) 功率与电流的关系

功率随电流的增加而增加,逐渐达到极大值。典型的器件采用 50 千欧滤波,300 千欧限流。10 毫安时管压降为 14.5 千伏,电源电压为 18.5 千伏,输出功率 30 瓦,激光器效率 21%,系统总效率(包括电阻上的消耗)为 16%。20 毫安时管压降为 12.5 千伏,电源电压 19.6 千伏,输出功率 40 瓦,激光器效率 16%,系统总效率为 11%。20 毫安至 35 毫安时功率增长缓慢,效率继续下降,即存在最佳电流值,电流超过时输出激光功率反而下降。

(3) 功率与谐振腔的关系

腔的对准与否对功率影响极大,有时可相差数倍。镜片的光学加工和镀膜质量可使功率变化百分之几十。在平行平面的 Ge 输出窗的一个表面上镀 ZnS-Ge 反射膜层,另一镀 ZnS 增透膜,在最佳耦合条件下,输出功率在 25 毫安时达 55 瓦。但是可能是由于真空卫生不良等原因,介质膜在激光能量的作用下很容易损坏。不镀膜的平面平行的 Ge 镜虽然输出较小,但寿命较长。

(4) 功率与放电管长度及管径的关系

从管长分别为 1 米、1.8 米、2.7 米的激光器的实验结果表明:功率基本上与长度成正比,约为 50 瓦/米。

如前所述,当长度增加时管径也相应地增加,最佳气压降低。

对于管长 1.8 米、管径 14 毫米的器件,最佳气压为: CO_2 2.0 托, N_2 3 托, He 15 托, Xe 0.6 托, H_2 0.1 托。

对于管长 2.7 米、管径 20 毫米的器件,最佳气压为: CO_2 1.0 托, N_2 2.7 托, He 12 托, Xe 0.6 托, H_2 0.1 托。

2. 模式(横模)

大多数情况下出现形状如“●”的模(TEM_{00} 基模)或形如“○”的模(TEM_{01}^*),有时放电管

不直或对光不良时也出现“:”模(TEM_{10})。

内腔式激光器经常出现基模与高次模的模式竞争现象。当一个模式转变为另一个模式时,功率也发生波动。外腔式激光器在调节反射镜以后能实现稳定的基模,在3至4小时的实验工作期间保持稳定,但是在停止工作一段时间后重新打开激光器时,往往又需要重新调节反射镜。这可能是因为调节装置的机械稳定性不良所致。

3. 光束发散角

TEM_{00} 模为 2.1×10^{-3} 弧度, TEM_{01}^* 为 3.4×10^{-3} 弧度。

4. 偏振度

当腔内放置布儒斯特角偏振片时,激光是严格的线偏振光。在测量精度0.01%的范围内,偏振度为100%。腔内没有布儒斯特角片的源管的激光偏振状态是不稳定的。

5. 跃迁竞争

由于未采取专门的波长选择措施,输出的激光波长是经常变化的,曾分别观察到P18(10.57微米)、P20(10.59微米)、P22(10.61微米)、P14(10.53微米)、P16(10.55微米)、P34(10.74微米)、R29(10.19微米)等谱线。经常出现的是P18、P20、P22,三者之间出现不规则竞争。

稳定状态时仅有一个跃迁波长,但有时出现两个跃迁并存的竞争状态,此时一个跃迁的功率逐渐上升,另一个跃迁功率逐渐下降。

6. 功率稳定度

长期的不稳定度约 $\pm 5\%$, 短期不稳定度约 $\pm 2\%$ 。

7. 寿命

根据使用激光器的有关单位的数据,器件工作数百小时后仍然良好。最近我们专门进行了寿命试验,器件工作已超过800小时,性能未变,极限寿命尚待继续试验。

为了提高封离型 CO_2 激光器的功率和寿命,我们从结构设计、气体成分、元件精度和激光器的加工工艺等方面进行了研究,主要采取了下列措施:

1. 管壳采用三层套的结构。储气套的体积比放电管大得多,大大地增加了气体容量并使激光器结构坚固。

2. 回气管克服了“电泳”现象,并且有助于加速激光器内的化学复合过程。

3. 阴极的结构和材料对寿命和稳定性有很大关系,我们采用“自热式”的圆筒形镍电极。

4. 气体成分除 CO_2 、 N_2 和 He 外,增加了 H_2 和 Xe, 可使功率提高一倍。

5. 适当地选取放电管管径和谐振腔反射镜的曲率半径,可以有效地限制高次模式(横模)。

采取上述措施后,每米放电长度输出功率可达50瓦左右,至今连续运转800多小时,性能未发生变化,预料将有更长的寿命。最大输出功率是在放电管长度为2.7米时,输出为150瓦。

据我们初步的实验工作表明:封离型的 CO_2 激光器性能稳定,使用方便,能够有很长的使用寿命,适合于中小功率应用。今后,研制输出功率数百瓦,寿命数千小时的封离型器件是可能的。为了进一步提高稳定性和寿命,应该继续改善谐振腔镜片质量和改进阴极设计。