

# 双放电 CO<sub>2</sub> 激光器的应用

傅裕寿

(中国科学院力学研究所)

## 一、双放电 CO<sub>2</sub> 激光器的特点、由来及基本原理

双放电 CO<sub>2</sub> 激光器是一种脉冲式气体激光器。它具有在高气压下实现大面积均匀放电、高重复率、大能量、高峰值功率、脉冲宽度可调、转换效率较高、结构简单等优点。

早期出现的 CO<sub>2</sub> 激光器是纵向放电,即放电方向与光轴取向一致。但是这类器件一般只能是低气压下运转,并且要想得到高功率的输出,激光管就要加长,电极距离也相应地加大,要求较高的工作电压,这对进一步提高输出,增加效率较为困难,也给实际应用带来许多不便。

事物的矛盾推动着技术的发展。横向放电方式的采用给 CO<sub>2</sub> 激光技术又开辟了一条新的途径。

但是,横向放电的困难在于,在高气压下均匀放电存在不稳定性,放电易转化为局部的,形成细丝状的大电流密度收缩电弧放电。为此,人们曾先后采用大量串有电阻或电容的针状电极列阵对金属板或棒放电(即电阻针电极,电容针电极)见图 1,以期达到限制大电流密度,消除收缩电弧而得到均匀放电。不过,在这类器件中,如用电阻针形电极,每个电阻都要消耗一定的能量,注入能量越大,消耗能量也较高。至于用电容针形电极,则需要大量价格昂贵的电容,而且结构臃肿。实验表明,效率低,激励体积难以扩大,不能有效地消除电弧等根本弱点,限制了这类器件的进一步发展。于是,便出现了双放电预电离技术(包括由双放电原理发展的紫外光预电离技术)及随后发展起来的更有成效的电子束预电离技术。目前采用这种技术已达到 24% 的效率。预电离技术的利用引起了广泛的重视,并取得了迅速发展。

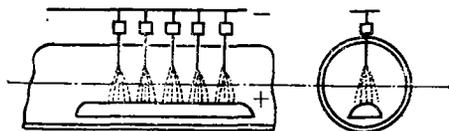


图 1 电阻电容针型电极

双放电的基本思想源于大量实验和理论的分析。即,要实现混合气体的均匀稳定放电,需要一个最佳的  $E/P$  值( $E$  是电场强度,  $P$  是工作气压)。研究表明:在电场作用下,放电激光管内的自由电子有双重作用。一方面,它通过与工作气体分子的碰撞产生新的电子—离子对,以抵消由于空间复合和对边壁双极性扩散的损耗,维持放电,因而要求有较高的电场或者说维持高的  $E/P$  值以产生足够的电子浓度。另一方面,自由电子通过对 N<sub>2</sub> 和 CO<sub>2</sub> 分子的碰撞激励气体分子,增加激光跃迁上能级的粒子数,实现反转条件,而这后一作用却只须要较低的  $E/P$  值。这显然是一个很大的矛盾。这一矛盾限制了普通放电激光器达到很高的效率,但也正是这一矛盾却促进了双放电技术的产生。双放电技术的基本思想是使电离工作气体和

激励气体分子分别进行。办法是在阳极之间添加一个辅助电极,采用二次相继放电。第一次放电以低能量、高电场(约  $10^5$  伏/厘米)形成气体预电离,产生出沿主电极表面均匀分布的空间电子云;然后进行第二次大能量、较低电场(约  $10^4$  伏/厘米)的主放电,它在整个放电体积中维持相当的电离度而又给予气体工作物质以有效的激励。双放电技术合理地利用了输入电能,大大地提高了器件的效率,并且能在几个大气压下正常运转。

双放电电极结构形式有栅网状阴极结构(图2)、立体阴极结构(图3)及叶片状阴极细玻璃毛细管型结构等。由于叶片状阴极结构采用细玻璃毛细管作为触发丝——阴极绝缘介质,结构比较合理、简单、有效,因此,采用这种结构的研制者较多,典型结构示于图4。

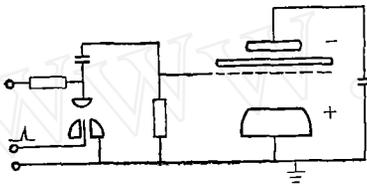


图2 双放电网孔阴极电极系统

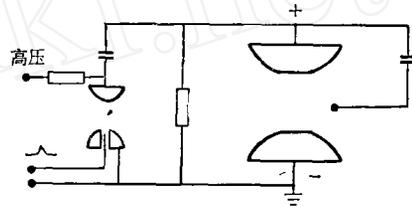


图3 立体阴极电极系统

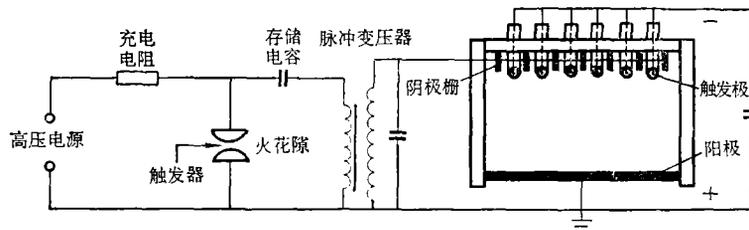


图4 叶片状阴极结构系统

## 二、双放电 CO<sub>2</sub> 激光器的应用

就双放电 CO<sub>2</sub> 激光器的应用而言,有二种明显的趋势:一是提高单脉冲的能量,同时获得超短脉冲辐射以应用于核聚变及等离子体物理研究;二是维持一定范围的单脉冲输出能量而适当地加宽辐射脉冲,或制成气体流动式高重复率脉冲器件,在一般工业加工中得到应用。这二方面的研究虽然已引起重视,但是还要克服许多困难,才能达到预期目的。

为使双放电 CO<sub>2</sub> 激光器获得高的单脉冲输出,要求在分子系统中有较大的能量存储,因而需要较大的工作体积和较高的气压。

在可利用的途径中,混合气压的增加是引人注意的。当其他条件相同时,脉冲输出能量按比例地随气压的增长而增高,而脉冲持续时间则随气压的增高成比例地缩短,因而脉冲峰值功率则同气压的平方成比例地增加。但是,随着气压的增高,也给大面积均匀放电增加了难度。

单脉冲能量的最大值取决于共振腔中 CO<sub>2</sub> 和 N<sub>2</sub> 分子的振动能量。在高气压条件下可以认为,脉冲期间氮的振动能量传递给 CO<sub>2</sub> 分子并经共振腔产生辐射。这时,单位脉冲在单位工作体积的能量存储由下式表示;

$$q = \frac{1}{2} (v_1 + f_2 v_2) \frac{P}{1 + f_2 + f_3} \frac{h\nu}{kT} \quad (1)$$

式中  $v_1$ 、 $v_2$  表示  $\text{CO}_2$  和  $\text{N}_2$  的激励程度,  $f_1$ 、 $f_2$ 、 $f_3$  表示气体混合物中的  $\text{CO}_2$  克分子浓度及有关的  $\text{N}_2$ 、 $\text{He}$  克分子浓度,  $P$ ——总压力,  $h\nu$ ——激光量子能量,  $k$ ——玻尔兹曼常数,  $T$ ——绝对温度。

设  $P=1$  个大气压,  $T=300^\circ\text{K}$ ,  $\text{CO}_2:\text{N}_2:\text{He}=1:1.5:3$ , 则有  $f_1=1$ ,  $f_2=1.5$ ,  $f_3=3$ 。在放电中能够达到的值  $v_1=v_2=0.4$ , 则得到  $q=0.04$  焦耳/厘米<sup>3</sup>或 40 焦耳/公升的输出, 这将是几乎是大气压下横向放电的极限参数。目前, 正从各方面研究达到这一参数的方法, 双放电技术即是途径之一。目前这种器件所能达到的效率已是 24%, 得到了每升 24.4 焦耳的能量。如果在一个大气压下放电达到 40 焦耳/升的指标, 在截面积为  $20 \times 20$  厘米<sup>2</sup>, 激励区长为 10 米时(可采用多级装置, 或多级振荡放大器), 则可得到  $1.6 \times 10^4$  焦耳的能量输出, 将达到核聚变点火理论所要求的激光输入能量。但是, 对双放电系统而言, 达到这一指标也将要做出极其艰苦的努力。

为使  $\text{CO}_2$  激光用于核聚变研究, 必须在尽可能短的时间内 ( $10^{-9}$  秒) 在激光器的共振腔中积累起能量。除提高气压, 改善气压比, 调整共振腔的偶合率外, 还必须利用锁模及激光器的其他装置对脉冲整形获得  $\text{CO}_2$  激光窄脉冲。锁模技术可以达到  $\text{CO}_2$  激光器的极窄脉冲, 这种原理是在激光器件中振荡的纵向模, 产生很多等频相干光场, 由于这些光场的干涉现象, 总场形成脉宽为  $1/n\Delta f$  和周期为  $1/\Delta f$  的脉冲序列, 其中  $\Delta f$  表示参与锁模的纵向模频率范围, 而  $n$  表示模数。为获得强辐射窄脉冲, 其纵向模式锁定和从序列中取出一个脉冲以及抽样脉冲的连续增益是最有意义的。在激光容器中升压时会产生转动谱线碰撞加宽现象, 频率加宽增加与单位气压比值  $\Delta\nu/P$  约为 4.5 兆赫/千, 这会引起振荡脉冲减少并在模自锁时获得超窄脉冲。当工作气体为一大气压时, 锁模或自锁模状态所获得的振荡脉宽特征值为 1 至 2 毫微秒。在  $P \geq 10$  个大气压时,  $\text{CO}_2 J$  值不同的增益互相重叠(见图 5), 使增益宽度可达  $10^{11} \sim 10^{12}$  赫, 故原则上可实现微秒脉冲输出。由锁模技术可能得到的脉冲宽度公式表达为:

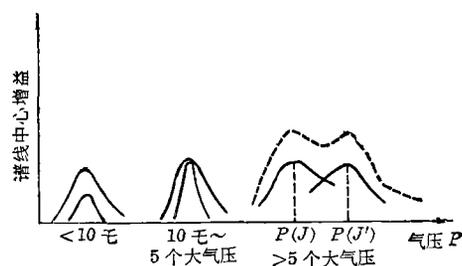


图 5  $\text{CO}_2$  激光增益线形与气压的关系

$$\tau = 0.445 \left( \frac{g_0}{\delta} \right)^{1/4} (f_c \Delta\nu)^{1/2} \quad (2)$$

式中  $\delta$  是与调制深度有关的量,  $g_0$  是单程饱和增益,  $f_c$  是锁模频率,  $\Delta\nu$  是增益线宽, 如参数取  $g_0=\delta=1$ ,  $f_c=60$  兆赫,  $\Delta\nu \sim 3 \times 10^9$  赫, 得  $\tau$  为 1 毫微秒。 $\text{CO}_2$  横向放电激光器的锁模技术发展很快。Pillth 关于大气压双放电锁模激光器的实验研究给出了很好的成果。另据报导, 当  $\text{CO}_2$  激光器锁模时用锗声光调整器整形可以获得间距为 25 毫微秒、宽度为 15 毫微秒的脉冲序列。已经有实验证实从强迫锁模中取出脉宽为 1 毫微秒的单个脉冲, 其实验用了砷化镓光电调制器。

由以上论述可见, 用于核聚变所必须的脉冲宽度参数经过努力在双放电器件上是可以达到的。

双放电器件可实现在高压下大体积均匀放电, 从而为提高激光功率输出提供了极为有利的条件, 但当辐射达到较大密度, 脉冲宽度极窄时, 产生了如何将其能量从共振腔取出的问题。当功率密度达  $10^9 \sim 10^{10}$  瓦/厘米<sup>2</sup>时, 振荡的光将使自身的激活介质击穿, 产生等离子体,

这对激光器运转是极为有害的。研究表明,激光器的饱和能量随气压的增加而增加,而其气体击穿阈值则随气压的增加而下降,这种效应则形成一个最佳运转气压,其数值约为2~4个大气压。

在达到使激活介质击穿的功率密度时,反射镜、窗口材料也将被破坏。对于NaCl,其破坏阈值大约为 $10^9$ 瓦/厘米<sup>2</sup>,当功率密度达到 $10^7$ 瓦/厘米<sup>2</sup>时,镀金属的反射镜、铜反射镜、多层介质膜反射镜都将被破坏,不能继续使用。

为了消除这些不利因素,应该要求更有效的光学元件,透过红外的新型材料,改进镜的反射和增透膜的工艺,并且采用非稳定共振腔,使其减小镜的负载,并能获得空间特性较好的光束。

### 三、双放电CO<sub>2</sub>激光器件在工业加工方面的应用

鉴于双放电CO<sub>2</sub>激光器设备简单、技术途径容易实现等优越性,许多人开始对其在一般加工方面的应用给予相当的重视。北京力学所在研制将该器件应用于印刷线路板打孔、石英片打孔方面取得了良好的效果。实验发现,在这些材料上打出一定要求的孔,双放电CO<sub>2</sub>激光器比其他固体激光器有其独特的优越性。

#### 1. 一般加工应用所需要的激光参数

几乎对所有的金属和非金属材料,当激光照射的功率密度大于 $10^6$ 瓦/厘米<sup>2</sup>时,材料将产生汽化。在 $10^5$ 瓦/厘米<sup>2</sup>左右,材料处于融化状态。加工对能量和脉宽都有一定的要求。脉宽过宽则材料的热传导占主导作用,热量容易损失在一些非加工处,且对于脆性材料,由于热传导而引起的热应力作用,使材料易破碎或产生裂缝而达不到工件的应用要求。分析表明,较短的脉宽给出较小的热应力,较长的脉宽产生较大的热应力。但脉宽过短,会使激光功率密度增高,超过一定的极限而形成高密度等离子区,它不是吸收能量就是反射能量甚至激光击穿空气,将能量耗掉,无法进行加工。

双放电CO<sub>2</sub>激光器件在大气压下脉宽都在微秒量级( $10^{-6}$ 秒),如果每脉冲输出1焦耳的能量,峰值功率即达 $10^6$ 瓦。加工时必须对光进行聚焦。经聚焦很容易使功率密度达 $10^8$ ~ $10^9$ 瓦/厘米<sup>2</sup>。例如聚焦斑点为1毫米直径,则功率密度为 $8 \times 10^9$ 瓦/厘米<sup>2</sup>。这样高的功率密度在焦点附近由于空气的污浊很易产生空气击穿,产生击穿后,即消耗掉能量。另一方面,在很短脉冲情况下,由于热传导的原因,不能使更多被加工材料吸收能量到汽化温度而被蒸发去除。实验表明,脉宽在10微秒到100微秒范围内的激光对材料加工是比较适宜的。

#### 2. 加宽双放电CO<sub>2</sub>激光器脉宽的途径

典型的双放电CO<sub>2</sub>脉冲激光器所激射的脉冲由二部分组成。第一部分是一个瞬时的尖峰,称它为主脉冲;第二部分是尖峰,随后一个长的尾巴,称这部分为松弛脉冲。增加脉冲宽度主要在降低主脉冲能量,增加松弛脉冲的宽度和能量。

增加脉宽的途径有增加混合气体中N<sub>2</sub>的比例,降低气压,减少腔体损耗及控制模式等。

##### (1) 增加混合气体中氮的比例

主脉冲是由增益开关或CO<sub>2</sub>的(001)能级被电子直接激励所引起的。而脉冲尾巴即松弛脉冲是由于在气体组分中有重的N<sub>2</sub>浓度,这些N<sub>2</sub>分子被振动激励而与CO<sub>2</sub>分子碰撞泵浦CO<sub>2</sub>分子至激光能级的能量转换所引起。实验表明:当仅以CO<sub>2</sub>气体充于激光器时,能够获

得只保留有初始尖峰的甚窄脉冲;相反,  $N_2$  浓度很大时, 主脉冲尖峰将消失, 只剩下功率比较平坦的松弛脉冲。辐射脉冲形状随  $N_2$  含量增加的变化如图 6 所示。

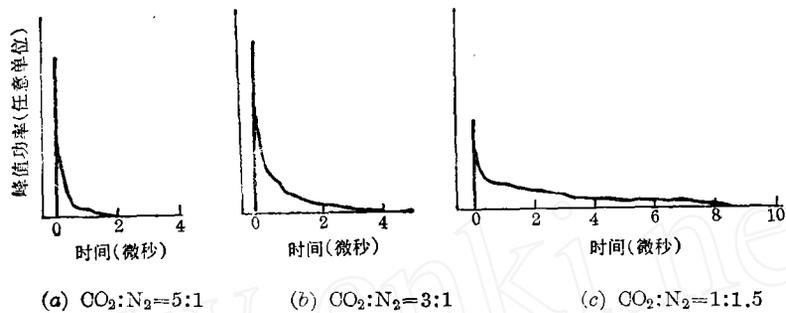


图 6 脉冲形状随  $N_2$  含量增加的变化规律

## (2) 降低气压

脉冲持续时间很大程度上由受激分子弛豫时间所决定。由于弛豫时间在高压下变短, 激光过程都在较快的时间发生。激光脉冲宽度随压力的减小反映了  $CO_2$  分子碰撞频率随气压增加。因为激光器泵浦机理主要为碰撞过程所支配。

据根上述原理, 降低混合气比的气压, 应能得到较宽的脉冲。脉冲宽度与混合气体总气压的关系示于图 7。实验中也表明, 激光脉冲形状与放电电压无关。

## (3) 变化腔体参数, 减少腔体损耗, 控制模式结构

当激光器在多模运转时, 发现有相当多的能量(大于 50%) 在脉冲的尾部, 而当激光器利用平面反射镜而限于基模运转时, 脉冲尾部明显消失, 这表明尾部结构部分是由于较慢建立起来的较高次模引起的。

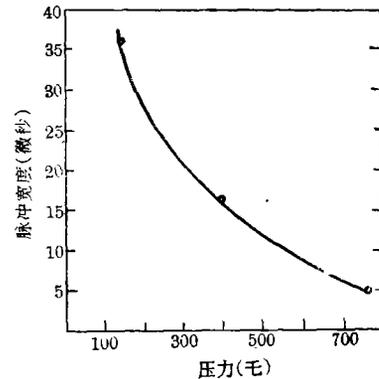


图 7 总气压与脉冲宽度的函数关系

实验指出, 调整光学共振腔的耦合情况可以调整脉冲宽度。利用高增益气体混合比  $CO_2/(CO_2+N_2)$  和高损耗共振腔可得到纯主脉冲而没有长尾巴, 相反,  $N_2$  浓度增加, 如  $CO_2/(CO_2+N_2)$  为 0.36, 且输出镜具有 85% 的反射率, 则总脉冲能量的 70% 左右是尾巴。而在极限情况下(98% 反射率),  $CO_2/(CO_2+N_2)=0.16$  时, 则主脉冲完全消失, 只有松弛脉冲存在。因为输出镜反射率高, 腔的损耗低, 此时, 高阶模容易建立。在高损耗时, 高阶模由于衍射损耗而很难建立起稳定的振荡。实验指出, 即使在大气压, 双放电  $CO_2$  激光器在每升激活体积超过 3 焦耳的输出能量时可得到比 50 微秒甚至比 150 微秒还大的脉冲宽度。

## 3. 加工应用实例

双放电  $CO_2$  激光器件最引人注意的应用可能要算快速平衡陀螺仪。在采用固体激光器去除不平衡量有下列局限性: 固体激光器一般脉宽在 1 毫秒, 这样长的脉宽, 当转子高速转动时不是会聚到轮周的一点上, 而是在转子上形成沿轮周长条的印痕, 控制去重平衡困难。采用调 Q 开关脉冲, 则脉宽过窄, 用这种方法能使用的总激光能量是有限的, 这是由于当激光能量超过一定的功率密度极限时, 形成高密度等离子区而限制每个调 Q 开关激光脉冲的材料去除量, 调 Q 激光总效率低, 不适合于工业加工。双放电  $CO_2$  激光器可制成高重复率器件, 脉宽可调, 效率高, 脉宽可调整到 10 微秒左右, 甚至更大的范围。原则上可以实现转子每转一周即产生

一个激光脉冲的高重复率,已有报导对陀螺仪转子采用重复率为 250 次/秒,能量约为 300 毫焦耳的激光脉冲成功地获得平衡。在汽化材料时,为了在低峰值功率、高能量和物体上的小位移各方面都有很好的兼顾,选用 3 微秒的脉冲宽度,每个脉冲可去除 3 毫克材料。当精细平衡到足够精密时,这种高重复频率的激光器能达到约 40 毫克/分的物质去除率,因此,这样一个系统,既可用作粗平衡,又可用作精平衡,系统见图 8。

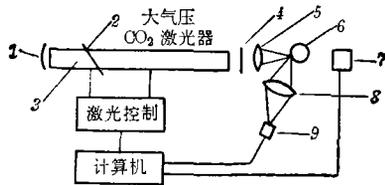


图 8 CO<sub>2</sub>激光器平衡陀螺马达的简化图  
1—谐振腔反射镜; 2—布儒斯特窗; 3—低压 CO<sub>2</sub>激光器; 4—谐振腔反射镜; 5—聚焦透镜; 6—陀螺仪转子; 7—陀螺位置传感器和不平衡位置传感器; 8—反射信号接收透镜; 9—高功率热电探测器

一个系统,既可用作粗平衡,又可用作精平衡,系统见图 8。

由玻璃纤维与塑料制品压制成的大型印刷线路板在用于制作电子仪器时须要打上千个或上万个引线孔,现有技术一般用机械加工。这种加工须用大量的 <1 毫米直径的钻头。钻头损耗量极大,钻头的生产供不应求。工人在短时间内用眼睛对准,要打出数千个孔,劳动强度大,对眼的损伤严重,且对人身有损害,急需改进工艺。利用激光打此类孔是探索的途径之一。在这方面,双放电激光器也是发挥特长的场所。因为双方电激光器的脉宽适合,加工基本是汽化机理,该材料对 CO<sub>2</sub>激光波长吸收性能良好,不产生碳化而破坏线路板的绝缘性质。使用脉宽过长的固体激光器,其结果会产生严重碳化。而且 CO<sub>2</sub>激光器可以装置流动系统,使脉冲重复率达每秒上百次,这显然是其他固体激光器所不能达到的。这种重复脉冲可以用自动控制系统操作进行高效率的生产,可望大大减轻工人劳动量,是值得下功夫研究的课题。北京力学所与北京无线电仪器厂协作利用双放电器件进行了探索性试验,取得了可喜的成果。

北京力学所在使用双放电器件对一种石英薄片元件打密集的直径 0.1 毫米左右的孔方面,由于石英对 10.6 微米波长是良好的吸收体,且脉宽可调范围合适,显示出双放电器件特有的性能。而用固体激光器对此元件打孔效果很差。

双放电 CO<sub>2</sub>激光器的另一个用途是破冰。10.6 微米波长的光在冰表面附近几乎被完全吸收,它比钕玻璃激光的(1.06 微米)吸收要大三个数量级。利用冰在张力作用下变得很脆弱的特点,用峰值功率输出高的脉冲破冰,原则上可通过在冰上打孔的方式有效地进行工作。爆炸性的蒸汽压力脉冲可以大大地帮助破裂,聚焦在冰面上的脉冲能量形成爆炸性蒸汽,它对产生裂缝极为有效。

在北方的冬季,高压电线及电话线上常因结冰而产生很大荷载,严重时,影响使用。用激光器清除冰晶具有实用价值。随着器件的发展,将在冬季航行中和渔业生产中利用激光破冰。

雾同样是强 CO<sub>2</sub>激光脉冲的可饱和吸收体。利用辐射使雾消散在航空、航海及军事上都有实用价值。辐射脉宽 10~20 微秒的激光能使雾逐滴爆炸蒸发。雾滴半径达 20 微米时,约为 5 焦耳/厘米<sup>2</sup>的能量可使其完全蒸发。

玻璃、陶瓷、橡皮、布料、纸张、塑料等材料对 10.6 微米波长的吸收性能都很好。因此,双放电 CO<sub>2</sub>激光器也能大量地在这些材料加工中得到应用。

玻璃、陶瓷、橡皮、布料、纸张、塑料等材料对 10.6 微米波长的吸收性能都很好。因此,双放电 CO<sub>2</sub>激光器也能大量地在这些材料加工中得到应用。