

电子束控制放电CO₂激光器及其应用

傅裕寿 王春奎 方慧英

一、引言

对于高功率激光器,从实用观点而论,电子束控制的激光器是目前最受欢迎的器件。苏联的列别捷夫物理研究所和美国的阿拉莫斯实验室,自70年以后都投入了很大的力量,取得了引人注目的成绩。美国阿符科公司利用电子束激光技术早已取得了每脉冲2000焦耳的输出,脉冲宽度为微秒量级。现在阿拉莫斯实验室达到了数万焦耳的输出,已用于激光核聚变的研究。

由于电子束控制激光器输出能量大,因此,它在激光破坏研究、激光处理、激光等离子体的研究,激光医学和光声效应中都是极为有用的工具。

二、电子束控制激光器机理

众所周知,要想提高气体激光器输出功率,必须扩大有效激励体积,增加单位体积输入电能,提高输入能的利用效率。

由CO₂激光的跃迁机理可知,输出10.6微米红外光的00°1→10°0跃迁的激光量子效率约为41%。文献[1]指出,当电场强度E与总的中性粒子密度N之比E/N约为 1×10^{-16} 伏·厘米²时,45%的电子能量直接传输给CO₂激光的上能级(00°1),并且所有电子能量的90%以上都直接参与CO₂或N₂的振动激发。在E/N值约为 1×10^{-15} 伏·厘米时,有大约80%的电子能量用于CO₂和N₂的电子激励,在0.5~2.0电子伏范围内(即E/N值在 10^{-16} 到 10^{-15} 伏·厘米²范围内),主要的电子能量转移过程从振动激励变为电子激励,在普通CO₂激光器的典型条件下,平均能量为1.0电子伏特时,约70%的电子能量是通过N₂(V=n)→CO₂(001)转移的。

研究表明,放电激光器中自由电子在电离气体中起着双重作用。一是产生离子对,以抵消由于复合和对边壁的双极性扩散效应的损耗,而维持电离状态,这就要求有较高的电场来产生足够的电子浓度。二是通过对N₂和CO₂分子的碰撞激励气体分子,以增加上激光能级的粒子数,这需要一个最佳的E/P值(P是工作气压)。实验表明,电子温度在1电子伏左右时,其电子对激励N₂、CO₂到上能级特别有效。

显然,要使放电产生的自由电子同时达到上述两个目的是有矛盾的,利用电子束控制技

术则可较理想的解决这个问题。

电子束控制可以把自由电子的二重作用分开。由于这种技术是体电离性质，能达到整个工作气体分子的均匀电离，致使气体阻抗减小，介质导电，然后启动主放电，故其主放电可以在较低场强下独立选择较好的E/P值进行。如果选择适宜，可以将80%~90%的电子能量转移给N₂和CO₂的振动能态。这样，就有希望获得近于30%的量子效率，这无疑是一项诱人的指标。

由于电子束参数可独立控制，工作介质的体积原则上不受限制，可维持较大的电子浓度，因此，即使在高的工作气压下也可以维持均匀放电。

总之，电子束控制激光器是为获得大功率大能量输出较为理想的器件。

三、冷 阴 极 发 射 枪

目前，电子束放电技术常依阴极发射特点分类，一般分为冷阴极枪和热阴极枪。我们将着重研究前者。

冷枪是脉冲发射，脉冲长度可达微秒量级，其发射电流密度遵守朗谬尔-查理定律。

等离子形成有一定电压阈值，阈值大小同阴极形状有密切关系。在等离子体形成前，场致发射决定着二极管阻抗，表达式为：

$$Z_{\text{平板}} = \frac{433}{\sqrt{V}} \frac{(d - V_p t)^2}{S} + Z_F e^{-t/\tau^*} \quad (1)$$

式中，V_p是等离子体扩散速度，V_p = (1.5~2) 厘米/微秒；d是阴阳极间距；S是阴极发射面积；t是扩散时间；V是加速电压；τ*是等离子体形成的特征时间，Z_F是与枪结构有关的场致发射阻抗常数。冷枪的典型值是10毫微秒，其值随场强增加而趋向减小，等离子体一旦形成，场致发射效应即可忽略，这时阻抗变为：

$$Z_{\text{平板}} = \frac{433}{\sqrt{V}} \frac{(d - V_p t)^2}{A} \quad (2)$$

阴极往往制作成一排刀片，这时阻抗近似为：

$$Z_{\text{刀片}} = \frac{428}{\sqrt{V}} \frac{p^2 (d - V_p t)^2}{2\Delta W (L + \Delta W)} \quad (3)$$

式中，L是刀片长，ΔW是阴极表面的束宽，p²是场加强因子。一般取ΔW = 1.46h^{1/4}d，其中h是刀片高度，d是阴阳极之间间距。使用多排刀片可减少束发散。

通常认为“点火”过程是由局部点的场致发射开始，逐渐形成发射层，“点火”后由发射层发射电子，其阻抗特性一般可表示为：

$$Z = \frac{d^2}{SKV^{1/2}} \quad (4)$$

式中，系数K = 2.335 × 10⁻⁶，d = d₀ - vt，v是发射层扩展速度，当d₀ = vt时，Z → 0，“点火”后的枪阻抗呈指数规律衰减，即：

$$Z = Z_0 e^{-(t-t_0)/\tau_0} \quad (5)$$

式中, Z_0 、 τ_0 、 t_{i0} (枪电流起始时刻) 因运转条件不同而不同。

四、结构参数的选择

1. 运转模型

设 E_0 为气体自着火电场, 激光腔的 $E/p < E_0/p$, 预先对气体加上主电压, 此刻 $J_L(t) \rightarrow 0$ 。随后, 电子枪点火运转, 电子束穿入激励区, 气体电离。此时开始主放电, 但枪发射电流仍继续上升直到束流停止。选择适当的 E/p 值, 使主放电迅速产生一些符合要求的低能电子, 有效地激发气体粒子至上能级, 上能级集居数增大而反转输出激光。

在激励气体中输入的泵浦能量密度可用下式计算:

$$\varepsilon(t) = \int_0^t J_L(t) E_L dt \quad (6)$$

式中, $J_L(t)$ 为激励体积中的电流密度, E_L 为主放电电压。由电子密度速率方程可获得电流密度:

$$\frac{dJ_L(t)}{dt} = C_1 V_d P J_{eb} - \frac{\alpha_r}{e V_d} J_L^2 \quad (7)$$

式中, 设气体呈电中性, 忽略汤生效应和附着效应, α_r 是电子-离子复合系数, V_d 是电子迁移速率, J_{eb} 为电子束流密度, e 是电子电荷, C_1 是与电子能量和气体特性有关的参数, 典型值列于表 1。

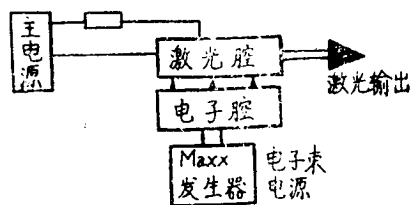


图 1 运转模型

表 1 C_1 值表

E_0 (千电子伏)	气 体 成 分 $CO_2/N_2/He$			
	2/3/5	1/2/3	1/0/3	1/0/0
	$C_1 (\times 10^{20})$ 单位为 (大气压 $^{-1}$ ·安培 $^{-1}$ ·厘米 $^{-1}$ ·秒 $^{-1}$)			
150	6.4	8.1	4.8	15
200	4.8	5.6	3.5	11
400	3.2	4.0	2.5	6.9

(7) 式把电子束控制放电的过程表达为主电流与电子束参数的直接关系。一般说, J_{eb} 是时间的函数, 简化情况下, J_{eb} 可取平均值作为常数, 解 (7) 式得:

$$J_L(t) = J_L \tanh \left(\frac{C_1 P J_{eb} \alpha_r}{e} \right)^{\frac{1}{2}} V_d t \quad (8)$$

$$\text{式中, } J_L = V_d \left(\frac{e C_1 P J_{eb}}{\alpha_r} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (9)$$

电子束照射时间从 $0 \sim t_0$, 显然, 该曲线与实验中的主电流波形 $J_L(t)$ 相似。由 (6)、(7)、(8) 式联立解得到泵浦能量密度:

$$\varepsilon(t) = \varepsilon_0 \{ \ln \cosh(C_1 P \alpha_r T_{es})^{1/2} \delta_1 t + \ln[1 + n_e(t_0) \alpha_r (t - t_0)] \delta_2 \} \quad (10)$$

$$\text{式中, } t \geq t_0 \text{ 时, } \delta_1 = t_0/t, \delta_2 = 1; \quad (11)$$

$$< t_0 \text{ 时, } \delta_1 = 1, \delta_2 = 0; \quad (12)$$

$$\varepsilon_0 = e V_d E_L / \alpha_r \quad (13)$$

$$n_e(t_0) =$$

$$\left(\frac{C_1 P J_{eb}}{\alpha_r} \right)^{1/2} \tanh(C_1 P \alpha_r J_{eb})^{1/2} t_0 \quad (14)$$

这里, t 为有效泵浦时间。

2. 放电参数

(1) 设放电等离子体是准中性的, 考虑非自持的情况, 放电功率近似表示为:

$$W = EJ = A \left(\frac{E}{N} \right)^2 N^2 \left(\frac{n_e}{N} \right) \quad (15)$$

式中, $A = \frac{e^2}{m} \frac{1}{\delta_e C_e}$, e 、 m 分别为电子的电荷和质量, N 为数密度, δ_e 是电子与分子碰撞的动量损耗截面平均值, C_e 是电子热速度, n_e 为电子密度, $n_e = \sqrt{S/\alpha}$, E 、 J 分别为放电电场强度与电流密度, 若电能转换激光效率为 η , 则激光输出功率可写为:

$$W_L = \eta W \quad (16)$$

理论与实验都表明, 对 CO_2 激光而言, 选取 $E/N \approx (1-3) \times 10^{-16}$ 伏·厘米² 或 $E/P = (10 \sim 20)$ 伏/托·厘米, $n_e/P = (10^{12} \sim 10^{14})$ /厘米³·大气压时, 有较高的粒子数反转。

在 CO_2 激光器中, $A = (3 \sim 5) \times 10^3$ 安/伏·厘米。取 $E/N = 2 \times 10^{-16}$ 伏·厘米², 电离分数取: $n_e/N = 1.85 \times 10^{-3}$, 即 $n_e/P = 5 \times 10^{12}$ /厘米³·大气压。由此算出放电功率密度为 $W = 25$ 千瓦/厘米³, 电子泵浦的典型值为 $5 \sim 10$ 微秒, 以 10 微秒计, 则放电能量密度为 250 焦耳/升大气压。对应不同的转换效率, 其输出能量列于表 2。

表 2

效 率	5 %	10 %	15 %	20 %	30 %
1 升输出能量 (焦耳)	12.5	25	37.5	50	75
10 升输出能量 (焦耳)	125	250	375	500	750

表 3 冷枪结构参数

序号	名 称	材 料 及 参 数	序号	名 称	材 料 及 参 数
1	外 壳	4 毫米厚不锈钢	6	枪电源 C	电容 $C = 0.5$ 微法 (6~8 个)
2	阴 极	钛箔 (或钨箔)	7	电 压	$V = 15 \sim 20$ 万伏
3	阳 极	不锈钢网 (或钨网)	8	电子窗口	钛膜 (或涤纶膜涂铝)
4	枪间距	40~100 毫米	9	开 关	充气火花隙, 铜-钨合金板
5	枪真空	9×10^{-6} 托	10	油 箱	$2200 \times 950 \times 1200$ 毫米 ³

(2) 结构参数的实例：根据以上原理，我们设计加工了电子束控制的激光器，它是脉冲式运转，冷枪阴极形式，主要参数列于表3和表4。

表4 激光腔参数

序号	名称	材料及参数	序号	名称	材料及参数
1	激光腔	外壳-聚脂乙烯	8	输入能量	$E_p = CV^2/2 = 4500$ 焦耳 ($C = 10$ 微法, $V = 30$ 千伏) 或 $E_p = 12500$ 焦耳 ($C = 10$ 微法, $V = 50$ 千伏)
2	主阴极	不锈钢丝网			
3	主阳极	铝表面抛光			
4	板间距	10厘米	9	激发区尺寸	$d = 100$ 毫米, $L = 1200$ 毫米
5	气压	1大气压	10	激发体积	$V = \frac{\pi d^2}{4} L = \frac{\pi}{4} \times 10^2 \times 120$ (厘米 ³)
6	主电容	$C = 4 \sim 12$ 微法	11	输出窗口	Ge或KCl
7	主电压	$V = 30 \sim 50$ 千伏	12	气体	$CO_2 : N_2 : He$

五、应用电子束控制激光器开展研究

1. 激光破坏固体靶材力学效应的研究

在研究力学效应时，首先，从一维实验着手。一维条件要求受光直径与厚度之比为3:1，不满足这一条件，则沿径向有大的激波动能损失，并且在表面上形成瑞利波，由于这些损失使分析复杂化，不易得到主要参数的变化规律。

Steverding指出，异常薄的靶材，动力加载不易产生激波破坏，产生激波破坏的厚度判据，是声波通过靶材的渡越时间必须大于加载脉宽即：

$$\tau_s > \tau_L \quad (17)$$

例如，激光脉冲宽度为 0.2×10^{-6} 秒，声波在铝中的传播速度约为6000米/秒，则 $h/6000000 \approx 0.2 \times 10^{-6}$ ， $h > 1.2$ 毫米。

在作靶材动力破坏试验时，靶材不能太厚，否则，激波衰减很快。这就对激光脉宽提出了要求， 10^{-7} 秒量级是较适宜的参数。

2. 用激光束对材料进行热处理

激光对T_s，45#钢，CrWMn等钢制试件的表面作用之后，加工区域的显微硬度从300公斤/毫米²提高到1000公斤/毫米²，而在某些情况下达到2200公斤/毫米²。

对于材料表面的局部硬化，既可以利用自由振荡脉冲状态的激光，也可以利用调Q状态的激光。

当脉冲作用时，由于热波的传播，材料内部的加热持续到脉冲结束后，对于一维的情况而言，达到给定温度（例如达到淬火温度T_淬）时的最大加热层深度可以用下面的方程式进行估算：

$$Z_{max} = \sqrt{\frac{4\alpha t_0(t_0 - \tau) \ln \sqrt{t_0(t_0 - \tau)}}{\tau}} \quad (18)$$

式中, Z_{\max} 是最大加热层深度; α 是材料吸收系数; t_0 为以等温线表示的达到最大深度的时间; τ 是激光作用时间。

对于巨脉冲, 当光强不超过破坏阈值条件时, 纯粹由热过程所决定的硬化不明显, 因为加热的最大深度很小, 即 $Z_{\max} < 1$ 微米, 如果辐射脉冲宽度 $\tau_i \sim r_i^2/a$, 那么, 当材料表面上某一种加热区域的形状发展时, 激光脉冲在表面上的空间分布起极为重要作用。

当光强超过阈值 q_c 时, 在材料上形成凹陷坑, 其坑壁与原始材料相比, 已经得到硬化。

对于 Q 调激光, 光强低于 q_c (阈值) 时, 脉宽为 10^{-8} 秒, 硬化层不明显。对于光强度 $> q_c$, 脉宽为 10^{-9} 秒, 材料组织变化主要是由冲击波前沿压力决定。

当脉冲宽度为 10^{-7} 秒时, 由等离子云作用的表面加热所引起的热效应起着显著作用, CrWMn 钢的淬火区深度将近 10 微米, 其表面积约为 0.03 厘米², 远远大于聚焦面积, 热扩散深度为 $(a\tau_i)^{1/2}$, 近似为 1 微米。

理论分析表明, $\tau_i = 10^{-7}$ 秒, $q = 5 \times 10^6$ 瓦/厘米² 情况下, 达到 10 微米的淬火深度。

表面硬化, 对薄膜的人工老化, 即薄膜参数的稳定化也有重要的实用意义。例如, 用激光束处理喷涂在耐热结晶玻璃底板上, 厚为 300 埃的铬膜, 比在真空炉中以传统加热方法制取的薄膜稳定性要高 1~2 倍。

3. 激光热处理半导体材料和薄膜

对半导体膜的处理, 可归结为加热和建立起使单晶定向生长的固定温度梯度。当激光脉冲作用于“电子导电”型半导体薄膜(处在网状支架上的薄膜)时, 可以使膜层中生长出粗针状的单晶。

非晶体组织的锗薄膜, 用激光照射时, 可促进单晶生长, 晶体长度可达 15~20 微米。

以激光辐射碳膜层, 可使膜层退火, 结果观察到沿膜层平面取向生长出六角形石墨层, 从而消除了微观应力。

4. 激光光声效应

激光光声效应是目前研究异常活跃的重要课题, 它引起了非线性光学、声学和凝聚态物质光谱学工作者极大的兴趣。光与材料声场的相互作用的研究建立了一门新的学科——光声学, 它在实际应用中更有着光明前景。最近发展起来的光声光谱, 光声显微镜, 在海洋工程及地震研究中的应用都有着令人鼓舞的例证。

强 CO₂ 激光的发展提供了难于用其他人工方法产生的光源, 致使人工可控的产生各种频率的声波成为可能。斯坦福大学的尼尔桑(Nelson)等人[8]证明了激光诱导声子技术(Laser Induced Phonons), 简称“LIPS”技术的有效性。利用 LIPS 技术可很方便的在透明或光吸收液体和固体中产生相干超声波, 其声波频率很容易连续地在 3 兆赫到 30 千兆赫以至在更大的范围内调制。显然, 这样的可调光声信号在物理学中以及测量中都是极为有用的。

5. 激光断裂的研究

这一问题包括两部分, 一部分是用激光做破坏试验, 如当能量为 5 焦耳和脉宽约为 100 毫微秒的激光脉冲作用时, 羰铁箔片(0.1 毫米)从反面破裂, 估算表明, 在板片下面其应力为 3×10^5 公斤/厘米², 这样, 就超过钢的动荷强度值, 即 3×10^4 公斤/厘米², 因此, 板片必定破裂, 这也在实验条件下出现过。

另一部分内容是利用脉冲光源去观察裂纹及其它开裂口的发展, 例如, 应用光声效应观

察表面裂纹。

6. 强激光模拟空气点爆

强 CO_2 脉冲激光经过聚焦后引起焦点附近的空气爆炸,这是最理想的无质量点爆,对于验证点爆理论及实测其炸后各参数的发展规律是一种很好的手段。此外,诸如激光等离子点火及散射、吸收和反射的研究都是很有意义的课题。

参 考 文 献

- [1] Principles of Laser Plasmas, G. Bekifi 编, John Wiley and Sons 公司, 1976年出版。
 - [2] C.A. Fenstermacher, Bull. Amer. Phys. Soc., 1971, Vol.16, No. 42.
 - [3] J. D. Daugherty, Laser Focus, 1971, No.12, P.4.
 - [4] S. Marcus, Appl. Phys. Lett., 1972, Vol.21, No.1.
 - [5] R.T. Hodgson, Phys. Lett. 38A., 1972, Vol.3, No. 213.
 - [6] R.K. Garnsworthy, Appl. Phys. Lett., 1971, Vol.19, No.12.
 - [7] Systems, Science and Software High Power Laser System, 400, GLOBAL TECHNOLOGY INC.
 - [8] P.E.Nielsen, J.A.P., 1979, P.3938.
 - [6] 庄斗南等, 激光, 1980年, 第7卷, 第2期, 第33~35页。
 - [10] I.Chis, et al., International Conference and Shool "Laser and Application", Romania, 1982, P.91~93.
-