

综 合 评 述

CO₂ 激光器及有关研究的进展

最 高 指 示

一切外国的东西，如同我们对于食物一样，必须经过自己的口腔咀嚼和胃肠运动，送进唾液胃液肠液，把它分解为精华和糟粕两部分，然后排泄其糟粕，吸收其精华，才能对我们的身体有益，决不能生吞活剥地毫无批判地吸收。

《新民主主义论》

一、前 言

自第一台气体激光器成功运转以后，气体激光器便迅速向前发展，从现有的波长数、光谱纯度、功率、效率发展的情况来看，其成就远远超过半导体和液体等激光领域，在某些方面还超过了固体激光器。其中特别令人注目的是 CO₂ 激光器的发展。

CO₂ 激光器，由于它的输出功率高，效率高，目前已达连续万瓦以上^[1]，效率达 33%^[2]；它又是能进行 Q 开关的第一种气体激光器，因此可以获得具有亚微秒持续时间高功率的脉冲，其脉冲重复率仅受基本放电过程的速度限制。因而这种激光器一跃而成为工业、军事及科研领域中的有利工具。尽管目前 CO₂ 激光器在某些方面仍存在问题，加之目前还缺乏一种吸收系数低

(在 10.6 微米附近)、物化特性好、能耐高辐射强度的红外材料，限制着高功率器件的发展，但它仍然是非常有前途的。本文试图在这些方面作一简单介绍。

二、高功率输出

一般说来，气体激光器在连续输出功率方面已超过固体器件，而 CO₂ 激光器又比其他类型气体激光器的输出功率强得多。除了已有 100 瓦连续输出的氩离子激光器外，其他气体激光器在毫瓦的范围，效率小于 1%，而 CO₂ 激光器在一九六七年的水平已达连续输出 1 万千瓦的数量级，最高效率达 33%。它的功率的年度增长情况见图 1，大约是每年增长一个数量级。

在探讨高功率 CO₂ 激光器的研究工作中大约有如下几方面的进展：

大型器件

1966年末,即已宣布获得连续输出1,200瓦,采用的放电管结构是“折迭式的^[3],两根长10米的管平行放置,通过光学耦合使二者耦合起来,等效于管长20米的激光管。由于折迭的成功,使得能在实验室内进行较大型的激光器件研究实验。

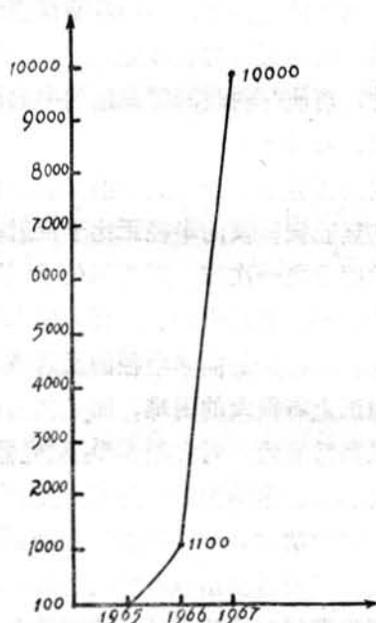


图1 CO₂激光器功率增长情况。

在一定的激光器长度内,每米放电管长度的输出功率是随激光器长度的增长而增加的。美帝陆军导弹司令部已进行过实验,它的实验装置是从10米装置发展起来的。使用大激光器件时,每米放电长度得44瓦,27呎长激光器,每米约100瓦,150呎的装置达到每米180瓦^[4]。每米放电长度功率值随激光器长度增长而增长。粗略地说来,这是因为激光器变长之后,能同时参加振荡的波型数目增多了。但是,当长度达到一定值之后,各个模之间的距离已足够近,以至模之间的相互作用足够强,使得它们之间的互相关换作用占主要地位,这种增长就到了饱和。

增益

获得大功率输出,激光管的长度是可观的。为了减少由于长度增加而增加的孔径衍射损失,于是企图以加大放电管的直径来提高输出功率。放电管加粗,功率能否以相应的比例增加?图2和图3是关于静态和流动

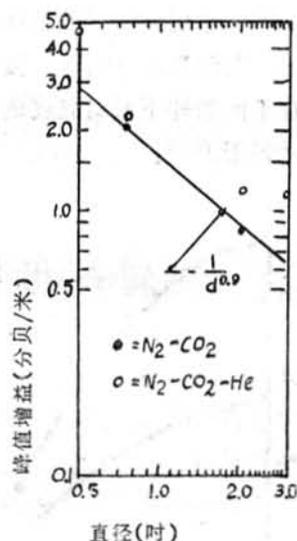


图2 N₂-CO₂和 N₂-CO₂-He 混合气体激光器峰值增益与管径的关系。

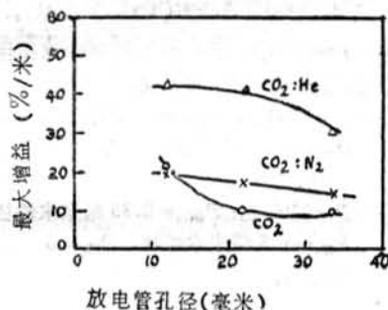


图3 CO₂, CO₂:N₂和 CO₂:He 混合气体激光器的最大增益与放电管直径的关系。

态的增益与放电管直径的关系^{[6][7]}。总的说来,不管流动态或静态,增益是近乎反比例于放电管直径,因此,单位长度的工作物质激光功率与放电管直径无关^[5]。造成这种情况的主要原因,据解释是由于弛豫衰变所致^[8]。在放电管直径比较大的情况下工作,使

CO₂分子的下能级空出，可以提高功率和效率。但在收缩放电和气体过热的影响下，若再增加管径，功率不会继续增加。由于放电的收缩，在放电管轴上比其周围的比功率要高。如果使气体冷却，则对其轴线的效果最差。致使工作区域每米的辐射功率不超过100瓦。因而采用非收缩放电辐射。放电管中气体过热对激光功率有极重要的影响。图4表示在不同条件下测量温度的分布。而温度分布满足于方程：

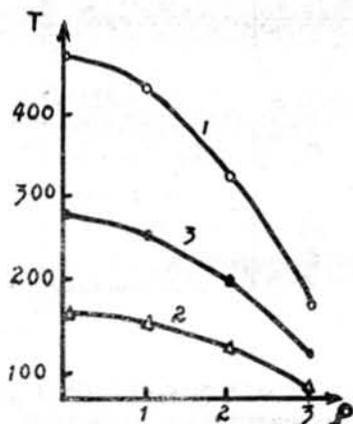


图4 管内温度分布($T^{\circ}\text{C}$, ρ 厘米)。

- 1— $P=1000$ 瓦, $P_{\text{CO}_2}=0.35$ 毫米水银柱, $P_{\text{N}_2}=1.5$ 毫米水银柱。
- 2— $P=1000$ 瓦, $P_{\text{CO}_2}=0.35$ 毫米水银柱, $P_{\text{N}_2}=1.5$ 毫米水银柱; $P_{\text{He}}=65$ 毫米水银柱。
- 3— $P=2200$ 瓦; $P_{\text{CO}_2}=0.35$ 毫米水银柱, $P_{\text{N}_2}=1.5$ 毫米水银柱, $P_{\text{He}}=6.5$ 毫米水银柱。

$$T(\rho) = \frac{F}{4\lambda} (r_0^2 - \rho^2)$$

式中, F ——热流密度, 可由实验确定;

λ ——导热率;

r_0 ——管半径;

ρ ——离轴的距离。

当泵浦功率增加时, 放电管中心温度成非线性增加, 因此, 气体过热时导热率也增加。当放电中心温度达 500°C 时, 如果放电

管径增加一倍, 那末每米长的放电管功率将会提高4倍。引入水蒸汽放电时, 每米放电管的功率可获得300~400瓦。

谐振腔的改进

谐振腔是激光器的重要组成部分。气体激光器的增益一般都比较小, 因此, 通常的气体激光器都是选择在谐振腔的“低损耗”区工作, 例如选用共焦腔。CO₂激光器的增益比较高, 工作物质的长度适当时, 进行适当的设计, 可使“高损耗区”腔结构中的增益超过损耗, 实现振荡^[8]。

根据福克斯和李等关于谐振腔结构的理论, 共焦腔振荡模的半径正比于反射镜曲率半径的四分之一次方, 要获得较大的模体积, 势必要求用几十米、几百米曲率半径的反射镜。这样大的曲率半径的反射镜不仅在光学加工上有很大的困难, 而且在谐振腔准直上也非常麻烦。对大型CO₂激光器件, 采用“高损耗区”中的腔结构是有必要的。

除腔的结构外, 反射膜的质量和反射镜的形变对激光器输出也有较大的影响。在激光器工作期间, 输出端的介质膜及全反射镜的金膜, 由于受到高强度辐射作用而发生变化, 表面形成局部损坏; 此外, 输出端反射镜及全反射镜的基体, 由于强辐射功率作用而发热, 发生形变。以上的变化都导致谐振腔的失调, 大大降低激光器的性能。

在半导体锗上涂一种多层膜, 制成几乎无损耗而且结实耐用的反射镜, 它的损失约0.3% (在通常的设计中, 锗的损失约为2%左右), 防水, 抗酸, 还可以经受较宽范围的温度变化 (从室温到 250°C); 并能在15秒钟内恢复原状。采用这种反射镜后, 输出可以增加50%到70%^[10]。

普通的气体激光器, 谐振腔是由两块完整的球面反射镜组成的。这样的结构, 腔内

的激光传输是“单通路”的。美帝陆军导弹司令部物理科学实验光谱分部已采用一种叫“复式光路”的腔结构，这种结构可增加功率和效率。实验结果表明，在内径为 10.2 厘米的激光器中，得到效率 33%；内径为 7.7 厘米的激光器，得到效率 23%^[2]。这是一个令人鼓舞的实验结果。

红外材料研究

CO₂ 激光器输出端的反射镜要能透过 10.6 微米的辐射，用在高功率器件时，同时还要求吸收系数小，高功率辐射作用不易损坏表面。通常用在红外光学仪器中的红外材料——盐的氯化物，如 NaCl、KCl 等，它们的吸收系数虽然很小，但易于潮解。一块表面经光学抛光的 NaCl，暴露于空气中，几分钟之后，表面就损坏了；而且这种晶体

含有某种杂质时，受微小的热扰动也易破碎。高电阻率半导体锗和硅对 10.6 微米的辐射吸收系数也不大，但它们的吸收带随温度变化很灵敏。例如，对于硅单晶，在温度 400°C 左右，透过率就只有 5% 左右；而锗，则在 200°C 左右就几乎截止在 10.6 微米。红外-2 和红外-6，经实验使用表明，在中等功率水平的器件中使用还是可以的，目前认为较好的是红外-4。表 1 所列的是目前 CO₂ 激光器所采用的红外窗口材料，表 2 是几种材料的功率限。随着 CO₂ 激光器件功率的日益提高，要求吸收系数小（在 10.6 微米附近）、能耐高温、机械性能良好的红外材料越来越迫切，这也将对今后红外材料的研究起着—个促进作用。

表 1 CO₂ 激光器常用窗口材料^[1]

材 料	折 射 率	菲 涅 耳 反射系数	法 布 里-珀 洛 反射系数	吸 收 系 数	潮 解 否?
NaCl 晶体	1.49	0.039	0.145	$\ll 0.01 \text{ 厘米}^{-1}$	有
KCl 晶体	1.454	0.034	0.127	$\ll 0.01 \text{ 厘米}^{-1}$	有
BaF ₂ 晶体	1.42	0.030	0.113	0.077 厘米 ⁻¹	稍有
KRS-5 晶体	2.38	0.117	0.490	0.02 厘米 ⁻¹	稍有
红外-2	2.19	0.139	0.429	$\approx 0.55 \text{ 厘米}^{-1}$	无
红外-4	2.4	0.170	0.497	$\approx 0.1 \text{ 厘米}^{-1}$	无
锗	4.0	0.360	0.779	$\approx 0.07 \text{ 厘米}^{-1}$	无

表 2 几种光学材料的功率限

材 料	功 率 限 (瓦)	
	空气冷却	水 冷
NaCl	1200	不可能
外红-4	200	未 试
锗	50	200~300

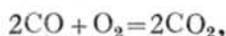
泵浦

气体激光器，除以光泵激发的铯激光器

之外，都是用放电激发的。利用电子碰撞激发受到气体放电条件的影响，粒子泵浦率受到限制。根据分子振-转能级带状特点，采用光泵激发也是可能的，或者同时使用光泵和电子碰撞激发，有可能提高功率密度。

已制成的“火焰激光器”是光泵激发 CO₂ 激光器的一个例子^[12]。它的实验示意图见图 5。

在 CO₂ 激光管两侧各放一根 CO 燃烧管，当它们燃烧时，它与空气中的氧化合：



当化学键产生时, 幅射出 4.4 微米的光, 这一幅射把中心的管内的 CO_2 分子激发到上激光能级 00^1 态, 形成 10.6 微米的受激发射。这一实验目前所获得的功率虽然很低(用 4 米长的激光管才得到 1 毫瓦的连续输出), 但这种泵浦方式还是可取的。

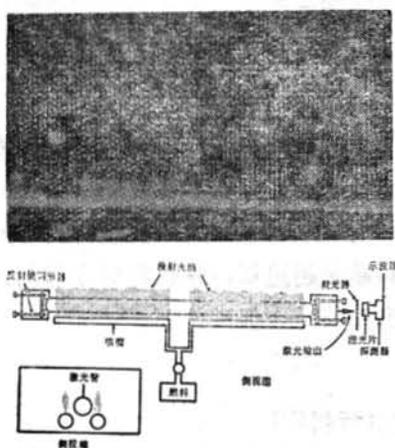


图 5 火焰激光器照片与示意图。

三、调制器件特性研究

正如前言所述, 由于 CO_2 激光器的连续输出功率高, 又能进行 Q 开关, 输出波长落在大气窗口, 大气透明度大, 因此, CO_2 激光器在军事上, 工业上都有广泛应用的显著可能性, 虽然 CO_2 激光器研制成功到今天只有四年, 但在这段时间里, 开展的研究工作是不少的, 下面仅从应用的角度出发, 摘录其中几个主要方面分别介绍。

调制

调制是对激光的振幅、频率和位相加以控制。从广义上讲, 它还包含 Q 开关。在多模同时振荡的激光器中, 调制用来锁定波型, 或者用以获得单频输出。将 CO_2 激光器进行调制, 也正如对其他激光器的调制一样, 是使它能用于通讯、信息传输、计算

机、电视机及其他应用的必要步骤。

气体激光器的调制包括改变激光管的增益、谐振腔的损失和耦合度(内调制)以及调制输出的激光(外调制)。内调制效率高, 但由于使谐振腔工作点发生变化, 因而振幅和频率同时被调制。此外, 除耦合度调制外, 调制频率有上限(100~1000兆周)。使用外调制时, 调制元件(如 ADP、KDP、GaAs 等)需要加强电场, 这是它的一个缺点。目前对 CO_2 激光器进行调制的方法有如下几种:

(1) 声光调制

有人提出应用声波的布喇格衍射对 10.6 微米的激光进行调制^[13]。实验所用的调制元件是碲(Te)。

图 6 是实验设备说明图, 图 7 是所获得的光脉冲。第一个衍射光脉冲约代表全部发射的 40%。实验分析表明, 在 5 微米到 20 微米以上的波长区, 碲将是一种室温工作的

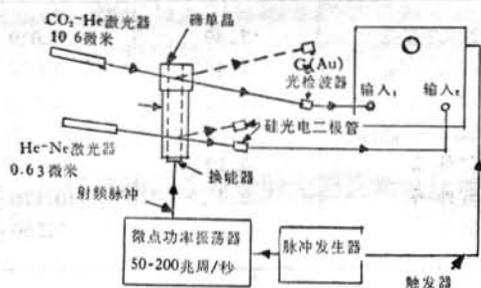


图 6 声光调制实验装置示意图。

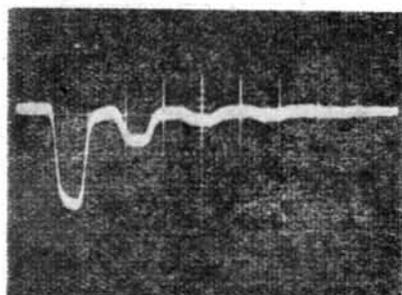


图 7 用 Ge(Au) 高速光电探测器接收到的 10.6 微米衍射光脉冲。

极其有效的光调制器,有可能使调制深度接近 100%。

(2) 电光调制

目前已有多种电光晶体调制器,但由于它们的尺寸小,电学及光学性质低劣,因而限制了其应用。较好的电光调制晶体是砷化镓。利用这种调制元件对 10 瓦的 CO_2 激光器进行调制,用 1000 伏调制信号已获得 70% 的调制度^[14]。

砷化镓的电光系数很大,耶利克测定为 1.6×10^{-10} 库/厘米。高电阻率的砷化镓在 10.6 微米附近的吸收系数很低,只有 0.0006 ± 0.002 /厘米。这一低吸收系数表明,高电阻率砷化镓对高功率 CO_2 激光器进行调制是适合的。

上述的声光或电光调制,都需要有一个供调制用的晶体,因此,它们不可避免地要受到如下的限制:

- 1) 调制元件(晶体)需要很大的驱动电压,这意味着要求有良好的高压真空电路;
- 2) 温度效应灵敏,连续使用有困难;
- 3) 尽管砷化镓等的吸收系数很小,但对高功率器件(例如到千瓦数量级的器件)调制时,由于元件吸收辐射而发热的影响将是一个麻烦问题。

(3) Q 开关

这是机械调制法之一。通过一种机械,把反射镜之一进行转动或沿光束传播方向平动,改变光束的光程,从而相对于一个未受影响的光束来说是改变了光束位相。费林等用转镜方法获得 500 赫的重复率脉冲输出^[14],布里奇斯用平移反射镜的方法获得 60 千赫的输出^[15]。这种调制法受到反射镜不能高速运动的限制;另外,调制效率还受激光工作物质上、下工作能级寿命的影响,不能获得高频率调制。

四、单模稳频

在通讯、雷达以及光谱学应用上,单模稳频器件很重要。 CO_2 激光器的输出波长较长,外界环境(如温度变化、腔长变化等)对频率稳定性的影响比之可见光激光器是不那么灵敏的;另外,在高功率输出时, CO_2 激光器往往只在一个到两个波长上振荡。在单波长工作时,几乎与多波长工作时具有同等的效率。这些都是为获得单模稳频器件带来的天然优越条件。由于到目前为止,对这一波段灵敏的探测器还很缺乏,一般的光学接收器的灵敏区域在可见光区,这给实验工作带来较大的困难,因此,这方面的研究工作进展落后于可见光区的激光器,例如 He-Ne 激光器。

已制成长 50 厘米、直径 1 厘米、运转波长在 10.59 微米的单频 CO_2 激光器件,输出功率 5 瓦^[16]。其选模方法是:

- 1) 调整谐振腔长度,以利于在这一跃迁上振荡,而抑制邻近跃迁的振荡;
- 2) 增加激光器中氮的气压,使从一个跃迁到另一个跃迁的能量快速转移;
- 3) 调制输出耦合,以实现单波长运转。

CO_2 激光器稳频中最讨厌的问题看来是工作气压的变化。对工作气压变化较严格地控制后,已使频率稳定度达 10^{10} ^[18]。关于 CO_2 激光器频率稳定性的实验分析可参考 [19][20][21]。

五、器件寿命

目前所用的 CO_2 激光器件一般是流动态的和水冷的装置。工作物质不流动,管壁不用水冷,激光器的寿命便很短,输出功率随连续运转时间而迅速下降,只消一两分钟。输出强度就下降 $\frac{1}{2}$ 。

但是,这种装置在许多应用场合(例如在飞机上)就不适合了。

已制成一种叫“第二代 CO₂ 激光器”的装置,如图 8 所示。这一装置可以保证运转 2,000 小时,输出在 1 瓦以上^[22]。其特点是附设了一个贮气室。



图 8 第二代二氧化碳激光器。

从 CO₂ 激光器侧面光谱的分析表明,在 CO₂-He-N₂ 系统中,放电过程产生的 CO、N₂O 是影响 CO₂ 激光器寿命的重要因素,寻找一种催化剂,把它们还原成 N₂ 和 CO₂ 也是一个研究的方向。铂丝似乎有这种作用,具体的结果还在研究中。

六、大气透过率

光束在大气空间中传播,同时受到大气

$$A = A_P \cdot a \cdot \frac{\Delta \nu_P(295^\circ K)}{\Delta \nu_P(T)} \cdot \frac{\Delta \nu_P(\text{CO}_2)}{\Delta \nu_P(\text{空气})} \cdot \frac{N_L(T)}{N_L(295^\circ K)}$$

$$= 1.44 \times 10^2 (295/T)^{\frac{3}{2}} \cdot 10^{-170/T} [\rho(h)/\rho(0)]^{\frac{15}{29}}$$

其中 A_P 是温度为 295°K 时纯 CO₂ 的吸收系数,单位是千米⁻¹, $\rho(h)$ 是离地面高度 h 处的大气密度, T 是大气温度, N_L 是 CO₂ 分子在低能级 100° 的比例数。利用 CO₂ 激光进行测量,所得的结果为:

$$\Delta V_P(\text{N}_2) / \Delta V_P(\text{CO}_2) = 0.77 \pm 0.5$$

$$A_P = 190 \pm 10 (\text{千米}^{-1})$$

利用这两个数据对 CO₂ 激光的 P(20) 这一跃迁作了计算,结果列于表 3。

由于粒子密度随温度变化而改变,导致吸收系数 A 的增长率为 2.5%/度。例如,

各种各样的干扰。首先受人注目的是大气的透过率。8~14 微米的波长区域,在大气光学中称之为大气“窗口”。CO₂ 激光的波长中心在 10.6 微米,正好落在这个大气窗口之中。以往关于光波在大气中传播的透过率的实验测定是用非相干光源,红外区域的大气透过系数还是从太阳光谱中估计出来的。10.6 微米附近的辐射,穿过整个大气层被吸收约 70%。随着 CO₂ 激光器在军事应用上的日益重要,对于这一波长的传输情况研究也正逐步深入细致,并采用相干光源进行观察。

大气通过系数 T 定义为:

$$T = \exp\{-\int_0^l A dl\}$$

其中 l 为测量距离, A 是单位长度的吸收系数。谱线中心的 A 值正比于跃迁矩阵元与 CO₂ 低能级 100° 的密度的乘积,反比于谱线的宽度。在离地球表面低于 25 公里的大气层中,大气分子谱线的变宽主要是压力变宽,这种情况下的 A 值近似地为^[23]:

表 3 CO₂ 激光 P(20) 跃迁的大气吸收

h (千米)	T (°K)	A (千米 ⁻¹)	$\int_0^h A dl$
1	289	5.4×10^{-2}	0.059
3	269	3.5×10^{-2}	0.147
5	256	2.2×10^{-2}	0.202
8	236	0.89×10^{-2}	0.249
12	217	0.33×10^{-2}	0.285
24	221	0.16×10^{-2}	0.312
32	228	0.11×10^{-2}	0.323
40	250	0.05×10^{-2}	0.330
60	256	0.001×10^{-2}	0.334
8			0.344

当海平面温度为 0°C 时,吸收系数为 0.064 千米 $^{-1}$,即通过 37 公里的辐射尚存 10% ;而在 38°C 时,吸收系数 $A \approx 0.1$ 千米 $^{-1}$,透过率为 10% 的地方则为 24 公里。

七、接收器

由于红外波长的量子效率低,正如所有的红外接收器一样,用于 CO_2 激光的接收器的灵敏度目前还比较低。发展高灵敏度,响应时间快的红外探测器也是发展 CO_2 激光器应用的一个重要研究课题。通常所用的红外接收器,如热电偶、高莱池等,由于其响应时间慢,用于通讯系统极不理想。接收快速的红外光脉冲信号的接收器,较有前途的是锗掺杂金、铜或汞,其接收原理是将光信号变成器件的电阻变化。最近美帝山塔·巴巴拉研究中心制造的锗掺杂接收器,响应时间为 2.2 毫微秒。他们除掺入铜、金、汞外,还用其他杂质补偿这种掺杂的锗单晶,因而大大提高了响应时间。但是,这些接收器都需要低温工作,掺铜的探测器工作温度为 4.2°K ,掺汞的工作温度 4.2°K ,掺金的为 77°K 。这不仅使用不便,而且价格昂贵。要达到 4.2°K 的工作温度需要用液氮或氦作冷却剂。

美帝麻省理工学院林肯实验室正在研究一种称为光生伏打二极管探测器,用 PbSnTe 制成,能在 8 至 14 微米的红外波段内工作。这种接收器在液氮的温度(77°K)就可以接收 10.6 微米的辐射^[24]。

看来,单靠改进接收元件的材料来提高接收灵敏度和响应时间是有限制的,改进接收方法也应该是一个研究方向。现行的光信号接收都是“直接式”的,没有用上本底振荡功率。当前正在研究探讨的“光外差接收法”就是在解决这一矛盾中产生的。从光外差接

收法现在的实验技术看来,困难还很大,但这种方向是很有前途的。

八、应用研究

CO_2 激光器有许多独特之处,它的应用是广泛的。下面仅摘几个较突出的研究,简介如下。

1. 激光武器

将 CO_2 激光器用作反导弹武器看来是一个有希望的方向。美帝在 1965 年曾对把激光器用作反导弹武器作过估计,那时认为还不乐观。随着 CO_2 激光器输出功率的不断上升,期望它作为反导弹武器的信心也越来越强。美帝空军已安装了一台 800 瓦连续波 CO_2 激光器,以研究铝及多种其他材料的高能辐射效应。据推测,可能作为一种反导弹研究装置^{[25][26]}。

2. 弹道导弹的防御雷达

美帝已较大规模地研究导弹防御雷达。它可利用激光光束的高分辨率来识别真假弹头。雷瑟恩公司研制 $1,200$ 瓦小体积、大功率、高效率 CO_2 激光器,作为激光跟踪导弹雷达发射器。北美航空公司的实验型 CO_2 激光装置可提供单模高功率,作地面基地雷达。振荡管最低产生 300 瓦功率,至少可望放大到输出 $2,000$ 瓦^[27]。

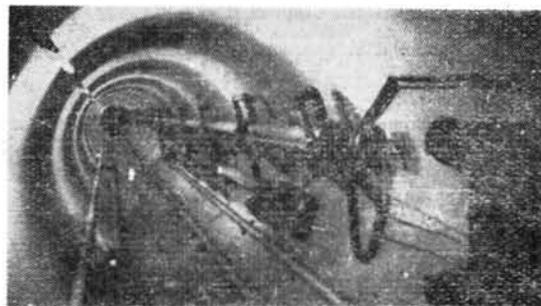


图9 美帝北美航空公司的 CO_2 激光实验装置。

3. 工业上的应用

许多物质能大量吸收 10.6 微米波长的光, 故 CO₂ 激光可用作热源。曾以 1 千瓦的连续 CO₂ 激光束轰击岩石, 再配上掘岩机, 使隧道掘进效率提高^[28]。用此热源还可作成其他的加工工具。

九、结束语

过去一年中, CO₂ 激光器研究着重在两个方面。一个是高功率器件的研制, 已能获得连续输出万瓦数量级的器件, 这是连续输出最强的激光器。器件的转换效率已高达 33%, 这是目前转换效率最高的气体激光器。不过, 在提高单位工作物质体积的能量输出方面还没有革命性的措施, 现阶段的功率密

度水平还相当低, 主要还是靠扩大器件的尺寸来实现功率增加; 因此, 器件体积相当大, 激光管的有效长度在 50 米以上。

另一个较突出的工作是 CO₂ 激光对物质的破坏效应。例如研究 CO₂ 激光聚焦于铝及其他材料, 研究材料如何获得热能, 各种材料如何传导能量, 在与材料相互作用中, 能量损耗多少, 各种材料被破坏的临界能量水平等, 这些研究都是为研究辐射武器服务的。

作为中、小型应用器件, 目前的 CO₂ 激光器器件输出功率已足够使用, 主要的问题是器件输出功率的稳定性、振荡模的选择、振荡频率的稳定和调制等。过去一年中, 这些方面的研究虽也获得很大的进展, 但仍然存在不少问题, 有待进一步研究改善。

参 考 文 献

- [1] *Electron. News*, 1967, 12, № 595, 40.
- [2] Dezenberg G. J., Merritt J. A.; *Appl. Opt.*, 1967, 6, № 9, 1541-1543.
- [3] *Microwaves*, 1966, 5, № 12, 16.
- [4] *AW & ST*, 1967, 86, № 25, 57.
- [5] AD-637023.
- [6] Cheo P., K. Cooper N. G.; *IEEE J. Quantum Electronics*, 1967, QE-3, №2, 79-81.
- [7] Deutsch T. F.; *IEEE J. Quantum Electronics*, 1967, QE-3, №4, 151-155.
- [8] Бохан П. А., Егорова Н. С.; *Журнал прикладной электротехники*; 1967, 7, №6, 954-956.
- [9] Siegman A. E., Arrathoon R.; *IEEE J. Quantum Electronics*, 1967, QE-3, №4, 156-163.
- [10] *Electronic Design*, 1967, 15, №11, 32.
- [11] Whitehouse P. R.; *Microwaves*, 1967, 6, №7, A6-A14.
- [12] *Electronic Design*, 1967, 15, №14, 26.
- [13] Dixon R. W., Chester A. N.; *Appl. Phys. Lett.*, 1966, 9, №5, 190-192.
- [14] Tolopko L. N., *Electronic News*, 1966, 11, №564, 5.
- [15] Kovacs M. A., Flynn G. W. et al; *Appl. Phys. Lett.*, 1966, 8, №3, 62-63.
- [16] *Electronics*, 1967, 40, №5, 54.
- [17] Bridyes T. J., *Appl. Phys. Lett.*, 1966, 9, №4, 174-175.
- [18] NASA-CR-82981.
- [19] *IEEE J. Quantum Electronics*, 1967, QE-3, №5, 203.
- [20] NASA-CR-83821.
- [21] AD-651615.
- [22] *Electronic News*, 1967, 12, № 582, 12.
- [23] Slephenson J. C. et al, *Appl. Phys. Lett.*, 1967, 11, №5, 164-166.
- [24] *Electronics*, 1966, 39, №23, 25-26.
- [25] *Electronic News*, 1966, 11, №578, 8.
- [26] *AW & ST*, 1967, 86, №24, 71.
- [27] *AW & ST*, 1967, 87, №8, 92, 106.