

文章编号: 0258-7025(2002)05-0397-05

激光主动成像雷达 CO₂ 激光器研究

江 东¹, 周鼎富¹, 侯天晋¹, 郑从众¹, 董太原²

(¹西南技术物理研究所, 四川成都 610041; ²南方冶金学院, 江西赣州 341000)

提要 介绍了用于激光主动成像雷达的射频激励小型波导 CO₂ 激光器(主振激光器和本振激光器)的设计和实验结果。主要实验结果为:主振激光器调 Q 频率 41.67 kHz, 脉冲宽度(FWHM)150 ns, 峰值功率 360 W, 本振激光器连续输出功率 3.05 W, 主振、本振激光器输出激光模式 EH₁₁, 短期稳频度 1.76×10⁻⁸, 长期稳定 P20 支输出。

关键词 CO₂ 激光器, 调 Q, 光雷达

中图分类号 TN 248.2⁺2; TN 958.98 **文献标识码** A

Study on CO₂ Laser for Active Imaging Lidar

JIANG Dong¹, ZHOU Ding-fu¹, HOU Tian-jin¹, ZHENG Cong-zhong¹, DONG Tai-yuan²

¹South West Institute of Technical Physics, Chengdu 610041
²South Metallurgy College, Ganzhou 341000

Abstract An experiment of mini waveguide CO₂ laser including master oscillator and local oscillator, excited by radio frequency (RF) for active imaging lidar is reported in this paper. The following main experimental results have been gotten: 150 ns pulse width (FWHM), 360 W peak power at 41.67 kHz pulse repetition frequency by electrooptical Q-switch for master oscillator. 3.05 W CW output for local oscillator. EH₁₁ mode, long-time stable P20 line output with 1.76×10⁻⁸ stability (short time) for this laser.

Key words CO₂ laser, Q-switch, lidar

1 引 言

激光主动成像雷达一般采用脉冲外差、帧频扫描成像工作体制,其激光发射源包括脉冲体制工作的主振激光器和连续工作体制的本振激光器,其中对主振激光器要求具有高的重复频率以满足一定的扫描帧频数、高的峰值功率以满足一定的成像距离,激光器还要求主振和本振必须工作在同一支线内且应具有满足外差探测要求的频率稳定性和输出稳定性,同时还应具有基模输出、小型化及长寿命等特点。本文介绍了一种用于激光主动成像雷达的小型射频激励波导 CO₂ 激光器的设计和实验结果。

2 激光器设计

主振激光器和本振激光器均采用小截面全陶瓷波导结构。图 1 为其结构示意图,激光波导由四块

99% Al₂O₃ 电真空陶瓷组合而成,波导尺寸为 2.5 mm×2.5 mm×335 mm。在波导截面和材料(折射率)等因素一定的情况下,决定波导传输损耗的主要因素是其平直度和表面光洁度,为此必须保证陶瓷材料的平直度、波导安装平直度和将陶瓷表面的光学级别抛光。

用于主动成像激光雷达的 CO₂ 激光器要求结构小型化和紧凑化,为此我们把主振激光器和本振激光器设计为一体化对称结构,即主振激光器和本振激光器共用同一真空室,结构上呈左右完全对称,均为半外腔结构,满足主振激光器插入调 Q 晶体及本振激光器插入调频晶体或用于偏频锁定的 PZT 元件安装。一体化同真空室结构使得器件体积减小、工作气体容积加大、且便于整体安装调试,高机械强度的完全对称结构,保证了机械稳定性和应力的均匀对称释放。主体封接采用高精度精密抛光面冷挤

收稿日期:2001-03-07

作者简介:江东(1960—),男,高级工程师,主要从事军用激光应用研究。E-mail:301@mail.sc.cninfo.net

压铜封以保证整体结构稳定性和真空性能,同时对器件所有发热部位进行有效的直接水冷,特别对作为激光谐振腔的关键元件光栅实行直接的有效冷却,以消除其热变形造成的影响,从而保证整个系统的热稳定性和机械稳定性。激光器外形尺寸为 $600\text{ mm} \times 170\text{ mm} \times 75\text{ mm}$, 激光器器件及小型射频(RF)电源照片见图 2。

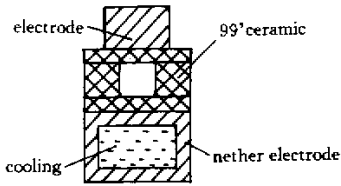


图 1 波导断面结构

Fig. 1 Cross section of waveguide structure



图 2 激光器和射频电源照片

Fig. 2 Photo of laser and mini RF supply

为满足总体要求,专门研制设计了全固态小型 RF 电源。根据一般研究结果,在最佳负载情况下,RF 激励扩散冷却型 CO_2 激光器的最佳频率与放电电极的间隔 d 近似成反比关系,对于 $d = 2.5\text{ mm}$ 的器件,最佳工作频率在 $70 \sim 150\text{ MHz}$ 范围。我们设计的小型 RF 电源采用 87 MHz 高精度晶振信号源、两级放大、双路合成输出,RF 输出功率 $120 \sim 150\text{ W}$ 。该电源采用 27 V 直流供电,调节供电电压可调节 RF 的输出功率,具有工作频率精度高、输出稳定的特点,可以获得稳定的放电匹配和较高的电光转换效率。单个电源的外形尺寸为 $200\text{ mm} \times 63\text{ mm} \times 35\text{ mm}$,可附在激光器上形成小型一体化结构。

RF 电源输出端的特征阻抗为 $R_0 = 50\ \Omega$,通过 $50\ \Omega$ 同轴电缆线将能量加到激光头上。只有当激光头的阻抗与传输线的特征阻抗相等时,才能使激光头吸收全部入射功率而不发生能量反射。由于放电等离子阻抗 R_L 涉及的因素很多,所以匹配网络参数一般还需经过实验来确定。对于我们所采用的窄波导 (2.5 mm)来说,可认为电压在横向分布是均匀的,

而在纵向却是不很均匀的。因此,采用并联分布谐振电感的放电技术,一方面使电压沿波导纵向分布均匀,另一方面调节网络的特征频率到所需的频率上。我们所采用的 π 型匹配网络如图 3 所示。其中匹配网络电感 L_1, L_2 和分布谐振电感 L_3 采用 $\phi 1.5\text{ mm}$ 紫铜丝绕制, C 为可变电容,放电时通过微调可使器件阻抗达到最佳匹配。通过调节匹配网络参数,实现整个放电区域的一次起辉、均匀放电,RF 功率有效馈入大于 90% (反射功率小于 10%)。为避免匹配网络局部发热对器件造成的不利影响和便于调整,整个匹配网络采用了全外置安装。

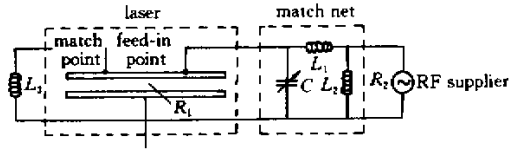


图 3 射频放电匹配网络

Fig. 3 RF discharge match net

激光器实用性的一个较重要的标志是其工作寿命,影响 CO_2 激光器工作寿命的主要因素是器件的真空气密性和放电引起的 CO_2 的分解。为防止激光功率由于气体放电分解而下降,为大幅度地提高激光器的性能(寿命、功率稳定性等),在激光器中加入了专门用于 CO_2 激光器的常温催化剂。

3 主振激光器的电光调 Q

为获得较高的激光脉冲频率和峰值功率,主振激光器采用了腔内电光调 Q 方式,其工作原理见图 4。为在腔内安放调 Q 晶体和 $\lambda/4$ 波片,采用了平-凹半外腔型,选支光栅作为平面全反射镜,输出镜为凹面部分反射镜,布氏窗同时密封放电区真空。所用的调 Q 晶体为互补型双 CdTe 电光晶体,晶体尺寸 $5\text{ mm} \times 5\text{ mm} \times 25\text{ mm}$,幅度调制(AM)晶体切割方式, $10.6\ \mu\text{m}$ 透过率 98% , $\lambda/4$ 电压 2650 V , $10.6\ \mu\text{m}$ 调制度 35% ,电阻率 $3.5 \times 10^9\ \Omega\text{-cm}$,体电容 $15 \sim 20\text{ pF}$ 。 $\lambda/4$ 波片为 CdS 材料,双面镀 $10.6\ \mu\text{m}$ 增透膜, $10.6\ \mu\text{m}$ 透过率 99% ,相位延迟 89.7° 。

在 CdTe 晶体插入腔内的情况下,无论是连续工作状态还是脉冲调制工作状态,都会因为腔内激光通过晶体和晶体上加载调制高压而发热,从而产生所谓的晶体热透镜效应和晶体的热变形,导致激

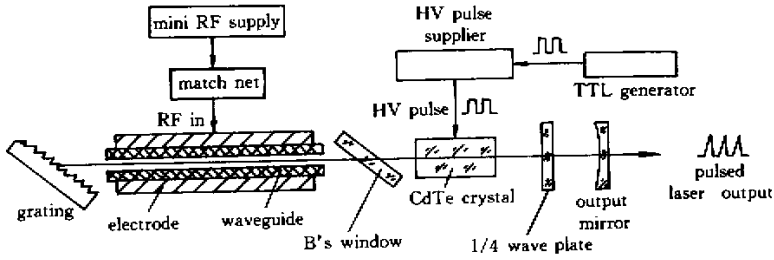


图 4 主振激光器示意图

Fig. 4 Sketch of main oscillator

激光器工作不稳定、效率降低甚至损坏晶体本身。为克服晶体发热对激光器带来的不利影响,本激光器中对晶体组件采取了独立的直接水冷却。

CdTe 电光调 Q 在工作方式上分为退压式和加压式两种。退压式工作无需在腔内加 $\lambda/4$ 波片,但由于 CdTe 晶体存在所谓的“光弹效应”,故必须采用过退压措施加以克服,这对高压调制电源将增加特殊的要求。加压式工作方式要在腔内加入 $\lambda/4$ 波片,在晶体不加载高压时用 $\lambda/4$ 波片封锁激光振荡使激光器处于低 Q 状态,然后瞬间快速加载高压使激光器处于高 Q 状态输出调 Q 激光脉冲。由于高压脉冲电源关系,本激光器采用加压式调 Q 工作方式,这种工作方式要求在 $\lambda/4$ 波片前的激光为全线偏振状态,为此采用了本身不具任何偏振性能的各向同性全陶瓷方型波导结构,然后用腔内布氏窗和选支光栅(同时作为器件真空封接元件)同向双重起偏以获得较高的偏振度。

由于激光谐振腔采用了半外腔结构、平-凹腔型,因此耦合损耗是必须予以重点考虑的,本器件中主要考虑的是 EH_{11} 模的输出耦合损耗问题。根据波导激光器的反馈方法及耦合损耗理论^[1], EH_{11} 模高斯光束的等相位面近似为球面,与波导口高斯光束束腰相距为 z 的等相位面的曲率半径为

$$R'(z) = f \left(\frac{z}{f} + \frac{f}{z} \right) \quad (1)$$

其中 $f = \pi \omega_0^2 / \lambda$ 为高斯光束的共焦参数, ω_0 为波导口高斯光束束腰, λ 为波长。设计半外腔腔型时,如果在距离波导口为 z 处安装曲率半径 $R = R'(z)$ 的输出镜,则反射面对高斯光束作自再现变换,即各阶拉盖尔-高斯光束将精确地沿入射方向返回波导口,获得有效耦合和最低耦合损耗,实现反射镜与 EH_{11} 模的模相匹配。理论计算表明,最适合于半外腔应用的为 III 类耦合:即当 $z/f = 1, R = R' = 2f$

时,耦合损耗具有极小值。本激光器采用 III 类耦合方式,波导截面为 $2.5 \text{ mm} \times 2.5 \text{ mm}$,即截面参数 $a = 1.25 \text{ mm}$,取波导口高斯光束束腰 ω_0 为^[2] $0.7032a$,则共焦参数 $f = 228 \text{ mm}$,按照 III 类耦合条件,半外腔输出镜的曲率半径为 $R = 456 \text{ mm}$,安装位置距波导出口距离为 228 mm 。在插入长度为 50 mm ,折射率 2.674 的 CdTe 晶体后,空腔部分剩余长度为 L ,考虑到晶体插入引起的光程变化,则 III 类耦合条件为^[2]

$$f = L + \frac{l}{n} = 228 \quad (2)$$

由此计算出 $L = 209 \text{ mm}$,则输出镜距波导口的安装距离应为 $Z = 209 + 50 = 259 \text{ mm}$,输出镜曲率半径仍然为 $R = 456 \text{ mm}$ 。在这里没有考虑布氏窗和 $\lambda/4$ 波片的影响。在实际应用中,由于受激光器整体长度尺寸的影响,实际安装距离略有改变,耦合效率由实验确定。

4 被动稳频

对于用于激光主动成像雷达的 CO₂ 激光器,稳频工作是其基本要求之一。对于红外波段的气体激光器,其多普勒线宽 $\Delta\nu_m$ 一般不小于 $10^8 \sim 10^9 \text{ Hz}$,而谐振腔振荡线宽 $\Delta\nu_c$ 约为 $10^6 \sim 10^7 \text{ Hz}$,即 $\Delta\nu_m \gg \Delta\nu_c$,频率牵引效应一般很小^[3],所以频率稳定性主要取决于其谐振腔振荡频率的稳定性。外部影响因素主要包括温度、机械、大气变化和电磁场影响,内部因素主要包括放电气压变化、放电电流变化以及自发辐射造成的无规噪声。被动稳频是在不增加激光器附加元件的情况下,采用一定的特殊措施实现激光频率的稳定,尽管被动稳频得到的频率稳定度低于主动稳频,但理论上仍可以达到满足成像雷达系统的使用要求,而且因为被动稳频结构简单、不增

加器件体积,因而更具有实用性。本激光器采用被动稳频技术实现输出激光的频率稳定。

如不考虑无法控制的内部因素,在被动稳频方式下影响频率稳定度的最主要因素为谐振腔腔长腔型在工作状态下的自然稳定性,而影响这一稳定性的主要来源包括温度稳定性、机械稳定性、放电气压变化以及放电电流变化等。设激光器工作频率为 ν , 频率漂移为 $\Delta\nu$, 其频率稳定度可由下式表示^[4]

$$\frac{\Delta f}{f} = \frac{\Delta n}{n} + \frac{\Delta L}{L} \quad (3)$$

其中 n 为等离子放电状态的工作气体和半外腔腔内暴露大气部分的等效折射率, L 为激光器谐振腔等效腔长。影响 Δn 变化的主要因素为放电气体温度的变化、放电气体气压的变化、外部大气压力的变化和气体扰动等。为尽量减小 Δn 变化对频率稳定度的影响,采用了高频率稳定度、高功率稳定度的 RF 激励电源,并合理设计 RF 匹配网络使激光器放电稳定,减小因放电引起的稳定性起伏,同时采用大储气空间/小放电空间(本器件的储气空间与放电空间的比例达到 400:1)和有效放电冷却以减小放电引起的工作气体气压变化,对于半外腔部分,采用了相应的大气屏蔽措施。在冷却作用时激光器工作达到热平衡状态下, Δn 的变化对激光频率稳定性的影响一般要小于 ΔL 所带来的影响。为在被动稳频方式下获得高的输出激光频率稳定度,合理的机械结构设计、低膨胀系数的超因瓦合金箱体、金属封接方式和有效冷却用以保证激光谐振腔的热稳定性和机械稳定性。另一方面,在激光谐振腔结构上采用长度补偿技术,即用短尺寸的较高膨胀系数材料反向安装谐振腔输出镜片,进行长度补偿,可起到稳定腔长的作用。

5 光栅选支

为获得单支激光输出,主振和本振激光器均采用平面原刻闪耀光栅作为选支元件,并使用一级反射一级输出的 Littrow 工作方式实现 P20 支稳定输出。为获得最佳的波导模光栅耦合效率,减小耦合损耗,作为谐振腔平面全反射镜的原刻闪耀光栅采用了近波导口直接耦合方式,即 I 类耦合,而没有采用会增加腔内元器件和不稳定性的复合腔结构。本器件光栅近波导口安装距离为 1~1.5 mm。在 I 类耦合情况下,方波导的 EH₁₁ 模的耦合效率可由下式计算^[4]

$$|c_{11}|^2 \cong 1 - \frac{1}{3}N^{-3/2} \quad (4)$$

这里 $N = a^2/(\lambda d)$ 是菲涅耳系数, a 为方波导截面半宽, d 为耦合距离。光栅刻线数为 150 线/mm, 根据衍射光栅的分辨率公式

$$\delta\lambda = \lambda/kN \quad (5)$$

这里 k 为衍射级数, N 为系数, $N = \text{光栅刻线数} \times \text{通光面积}$ 。对于 Littrow 工作方式, $k = 1, P20$ 选支安装角度理论值为 $\theta = 52.59296^\circ$, 光栅使用投影面积为 4.1154 mm², 则计算光栅分辨率为 $\delta\lambda = 0.017 \mu\text{m}$, 满足选支使用要求。由光栅公式 $\sin\theta + \sin\phi = m\lambda/d$ (d 为光栅常数), 在 Littrow 工作方式时 $\theta = \phi, m = 1$, 则光栅角度分辨率为

$$\Delta\theta = \frac{\Delta\lambda}{2d \cdot \cos\theta} \quad (6)$$

对于本器件, $\Delta\lambda = \delta\lambda, d = 1/150, \theta = 52.59296^\circ$, 计算出 $\Delta\theta = 7.2'$ 。同时激光器压力展宽也将对光栅角度分辨率造成影响,但考虑到压力展宽引入的角度偏差仅为 4.8", 故可以不予考虑。在光栅安装调整时,采用了高调节精度的 He-Ne 光+内调焦望远镜系统的远距离调节方式,保证光栅一次安装调节到位。同时采用金属冷挤压封接保证真空气密性和机械稳定性及直接水冷却方式,解决了光栅热变形问题,实现稳定选支输出。

6 实验结果

测试方法示意图见图 5。这里短期频率稳定度是指 1 s 内的稳定度,采用通行的比较法测量^[3],即直接探测主振和本振激光器(具有相同结构和运转条件)输出激光的外差差频信号,根据外差差频信号的稳定度判定激光器的频率稳定度。激光频率稳定

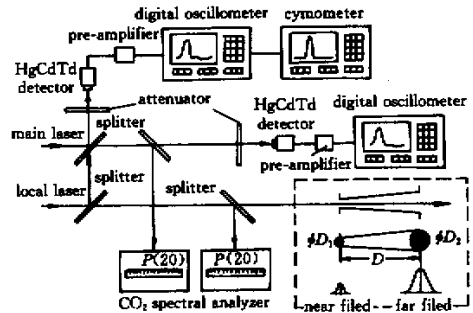


图 5 测量示意图

Fig. 5 Sketch of measurement

度用双取样阿伦方差法, 由下式确定

$$S_{\Delta f/f} = \frac{1}{f_0} \sqrt{\frac{1}{2} \frac{\sum_{i=1}^N (f_{2i} - f_{2i-1})^2}{2N}} \quad (7)$$

其中 f_0 为激光平均频率(中心频率), f_i 和 f_{i-1} 为相邻差频信号的频率, 由在频率计上测出 N 组相邻差频率序列, 通过上式即可计算出取样时间内每台激光器的频率稳定性。由于我们没有实时数字采样频率计, 故采用在规定时间内实时监测外差频率的最大变化差值 Δf_{\max} , 用下式计算激光器的频率稳定性(即在双取样阿伦方差法中取 $N = 1, f_{2i} - f_{2i-1} = \Delta f_{\max}$)

$$S_{\Delta f/f} = \frac{\Delta f_{\max}}{2f_0} \quad (8)$$

以下是主要实验结果。激光器短期稳频度为 1.76×10^{-8} (1 s 内), 7.06×10^{-8} (60 s 内)(实测外

差差频信号 1 s 内漂移不大于 1 MHz, 60 s 内不大于 4 MHz), 长期稳定输出支线 P20 ($10.59 \mu\text{m}$)。主振激光器调 Q 频率为连续 (41.67 kHz, 脉冲宽度为 150 ns, 峰值功率为 360 W, 激光模式为 EH₁₁, 激光束散为 5.86 mrad; 通过调节 TTL 触发脉冲频率即可调节激光器调 Q 频率, 调节 TTL 脉冲宽度可适量压缩或延长激光脉冲拖尾, 但激光脉冲建立时间基本是固定的。实验显示, 当 TTL 脉冲宽度小于 $1.5 \mu\text{s}$ 时激光脉冲输出变得不稳定, 当大于 $4.5 \mu\text{s}$ 时对峰值功率有一定影响。本振激光器连续输出功率为 3.05 W (半外腔结构), 激光模式为 EH₁₁, 激光束散为 6.27 mrad。图 6 为调 Q 脉冲波形图, 图 7 为调 Q 重复频率波形图, 图 8 为脉冲外差测试图, 图 9 为连续外差测试图, 图 10 为主振和本振激光能量分布图。

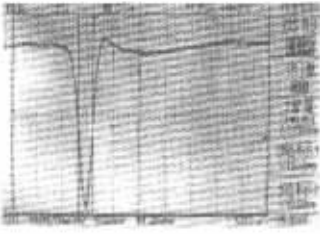


图 6 调 Q 脉冲波形图

Fig. 6 Pulse shape of main oscillator

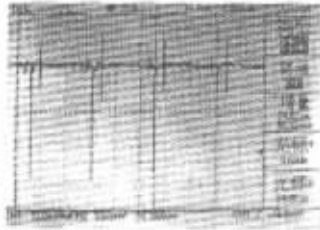


图 7 调 Q 重复频率波形图

Fig. 7 Measurement of repetition frequency



图 8 脉冲外差测试图

Fig. 8 Measurement of pulsed heterodyne frequency

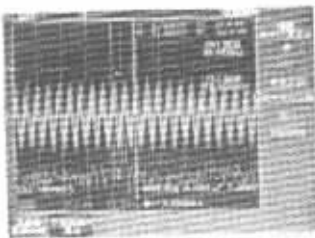


图 9 连续外差测试图

Fig. 9 Measurement of CW heterodyne frequency

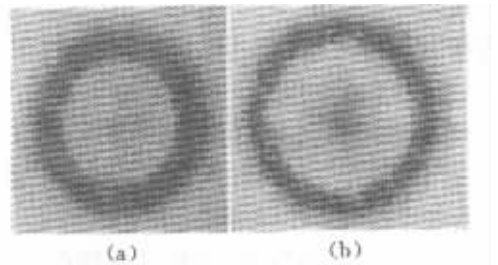


图 10 本振(a)和主振(b)激光能量分布图

Fig. 10 Output energy distribution
(a) local oscillator; (b) main oscillator

参 考 文 献

- Zhou Bingkun *et al.*. Laser Principle [M]. Beijing: The Press of National Defense, 1983. 419~421 (in Chinese)
- Sigrid Avrillier, Jacques Verdonck. Coupling losses in laser resonators containing a hollow rectangular dielectric waveguide [J]. *J. Appl. Phys.*, 1977, **48**(12): 4937~4941
- Lan Xinju *et al.*. Laser Techniques. Hunan: The Press of Hunan Science and Technology, 1979. 196, 210 (in Chinese)
- Paul E. Jackson, Denis R. Hall, Christopher A. Hill. Comparisons of waveguide folding geometries in a CO₂ z-fold laser [J]. *Appl. Opt.*, 1989, **28**(5): 935~941