

泛频 CO 激光器研究进展

林洪沂^{1,2}, 郭 劲¹, 檀慧明¹, 宁大勇^{1,2}, 陈兆兵^{1,2}, 李殿军¹

(1. 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033; 2. 中国科学院研究生院, 北京 100039)

摘要:介绍了国内外泛频 CO 激光器最新进展, 指出了我国同国外发达国家存在的差距, 并介绍了一些关键的技术要求。

关键词:泛频 CO 激光器; 2.6 ~ 4.2 μm 激光; 单线激光; 多线激光

中图分类号: TN248 **文献标识码:** A

Research and Progress of First Overtone CO Laser

LIN Hong-Yi^{1,2}, GUO Jin¹, TAN Hui-ming¹, NING Da-yong^{1,2}, CHEN Zhao-bing^{1,2}, LI Dian-jun¹

(1. Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China;
2. Graduate School of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China)

Abstract: The paper is a review of researches on FO CO laser, the main attention being paid to the quite new experimental results jointly obtained by scientific team of the Lebedev Physics Institute (Russia), Troitsk Institute for Innovation and Fusion Research (TRINITI) (Russia) and Air Force Research Lab (USA). We also point out the large gap between China and developed countries and introduce a number of key technical requirements.

Key words: first overtone CO laser; the spectral range of 2.6 ~ 4.2 μm; single line laser; multi-line laser

1 引言

最近几年 CO 激光器逐渐引起了大家广泛的关注。CO 激光器可以实现基频和泛频两个波段激光输出。基频 ($\Delta\nu = 1$) 波段, 可以实现了 4.8 ~ 8.4 μm 的激光输出, 高功率主要工作在 5 μm 左右^[1], 主要应用于加工工业。泛频波段 ($\Delta\nu = 2$), 可以实现 2.6 ~ 4.2 μm 激光输出, 起初输出功率较低, 主要应用于光谱研究。最近几年由于其长波段良好的空气透过率特性, 引起了很多科技工作者关注^[1-16]。

泛频 CO 激光器波长可调谐, 它的光谱可以覆盖 HF 和 DF 激光器, 而且光谱间的分离间隔比它们小数倍。泛频波段的长波区 (3 ~ 4.2 μm) 处在大气窗口处, 有良好的空气透过率特性。相对于中红外 OPO 激光器, 它的转换效率高, 输出功率大^[2], 而且光束质量好。高功率的 CO 激光器可以应用于长波激光雷达, 生物威胁探测, 也可以用来干扰中波红外系统和导弹预警卫星系统。

2 国内外的发展现状

由于 CO 激光器光谱的特殊性及其特殊的应用价值, 很多学者对大功率泛频 CO 激光器进行了大量的研究。在国外, 俄罗斯莫斯科列别杰夫 (Lebedev) 物理研究所和特罗次克 (Troitsk) 研究所, 德国航空航天中心的应用物理研究所和波恩大学应用物理研究所, 以及美国科特兰空军基地空军实验室在泛频 CO 激光器的机理和实验研究方面做了大量的工作。在国内大连理工大学也做了一些有价值的工作。

2.1 美国的研究现状

美国主要集中在直流电激励泛频连续 CO 激光器的研究上。早在 1977 年, 美国就报道了世界首台直流电激励泛频 CO 激光器^[2], 如图 1 所示。他们采用直流电激励激光混合气体 (体积比 CO:He:O₂ =

作者简介: 林洪沂 (1982 -), 男, 在读博士, 主要从事大功率激光器研究。E-mail: linyi0714@163.com

收稿日期: 2008-09-22

78:921:1,腔内压强 367Pa),利用超音速气流获得低的谐振腔温度(40K),采用内腔结构,有效增益长度为 20cm。他们获得了 20W,2.7~3.1 μm 的连续泛频激光输出,电效率仅为 0.6%。由于效率低(<1%),当时并没有引起大家的关注。

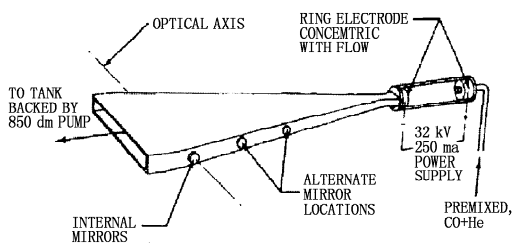


图1 电激励超音速 CO 激光器

在 2003 年,美国的科学从理论上研究了在不补充气体的情况下,实现 100W,~4.0 μm 激光输出,并且能够连续工作 100s 连续电激励泛频 CO 激光器的可行性^[3]。他们计划采用自持放电的方式,最终实现闭环运转。激光管采用 OSU 管(如图 2 所示),端面电极装置的间距为 130cm,中心直径为 13mm。放电装置采用高稳压直流电源。

2004 年^[4],他们获得了基频 5.1~5.2 μm 和泛频 2.5~3.6 μm 两个波段共 12W 激光输出,效率达 5.3%,泛频波段占输出功率的 80%。激光管的端面电极装置的间距为 170cm,中心直径为 13mm。液氮制冷区长为 138mm。采用内腔结构,气体配比为 He=9.35Torr(1Torr=133.3224Pa),N₂=1.12Torr,CO=0.9Torr,O₂<0.01Torr。

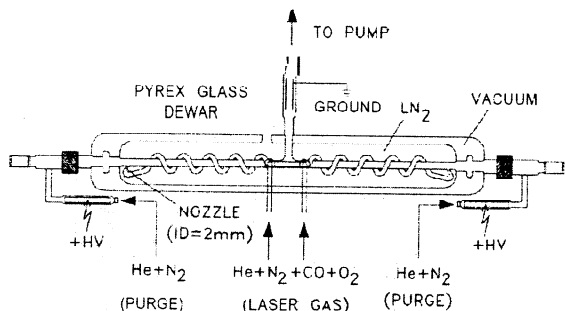


图2 连续电激励 CO 激光管(OSU 管)示意图

2006 年^[5],获得了 12W,2.6~3.9 μm 的泛频激光输出,效率达到 5%,并且实现了高阶泛频 CO 激光输出。激光管的端面电极装置的间距为 125cm,中心直径为 13mm。液氮制冷区长为 142mm。

2.2 德国的研究现状

早在 1988 年,德国就首次报道了单线输出的低温流动式直流电激励的单线 CO 激光器^[7],如图 3 所示。采用光栅输出实现了 2.86~4.07 μm 共 150

条谱线的激光输出,最大输出能量为 55mW。1993 年^[8]通过改变激光管的结构,实现了 2.62~4.07 μm ,330 条激光谱线输出,最大输出功率为 350mW。但是由于输出功率低,转换效率低,主要应用于对功率要求较低的光谱分析与频率测量。

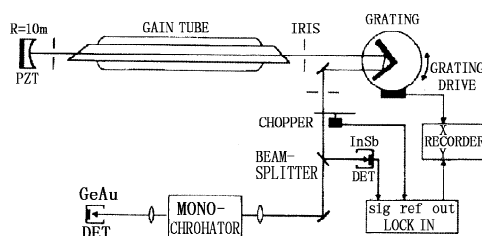


图3 小功率低温直流电激励 CO 激光器示意图

2001 年报道了室温脉冲电子束维持放电 CO 激光器^[9]。激光头的结构如图 4 所示,使用三个轴流式风机和一个热交换机使气体温度降到 5 $^{\circ}\text{C}$ 。气体采用 He:CO:N₂ 的混合气体,被激活的气体体积为 12L。谐振腔采用由凹面铜镜和 ZnSe 输出镜组成。在有效激活体积为 1.5L,气体配比 He:CO:N₂=50:12.5:37.5,输出镜 ZnSe 的透过率 T=3% 情况下,单脉冲运转时可以获得脉冲能量高达 8J 的激光输出;在重复频率为 50Hz 的重复运行时,可以获得光谱范围为 2.8~3.3 μm ,平均输出能量为 60W,电效率为 2.4% 的脉冲激光输出。

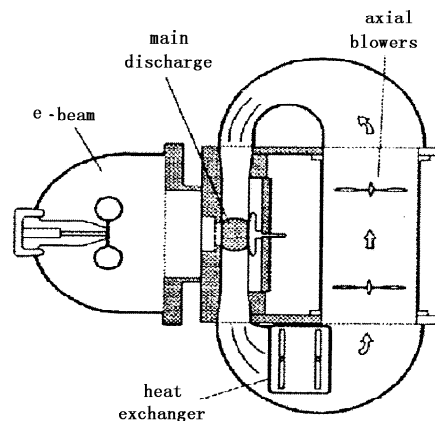


图4 室温脉冲电子束维持放电室温 CO 激光器示意图

当采用一组大尺寸的腔镜代替上述的小尺寸的腔镜的,有效激活体积由 1.5L 增加到 7L。在单脉冲运转时,可以获得单脉冲能量为 25J 的激光输出,效率为 1.3%~1.5%^[10]。作者预测:若进一步增加有效激活体积,单脉冲能量可以增加至 40J;在重复频率为 100Hz 的重复运行,平均输出功率可以达到 4kW。该激光器是在原来 CO₂ 激光器的基础改造而来的,而且室温运行也为以后的工业和军事应用提

供了非常有利的条件。

2003年,德国与俄罗斯、美国合作研制了气动膨胀冷却射频放电激励CO激光器^[1]。该激光器激光头的结构如图5所示,激光气体为CO:He:O₂(CO:He体积比为1:7,O₂适量),用特制玻璃制作的超音速喷嘴产生3Ma的超音速气流,使放电区350K的工作气体由喷嘴到谐振腔后降到100K。该激光头不需要低温制冷装置,结构紧凑,工作稳定可靠。在仅仅10cm的增益长度,可以获得2.1kW的基频输出,电效率达到21%;同时还可以获得50W、波长在2.6~2.7 μm 的泛频激光输出。这是首台报道的超音速射频激励泛频CO激光器,为以后实现4 μm 波段中红外激光器的发展打下了良好的基础。

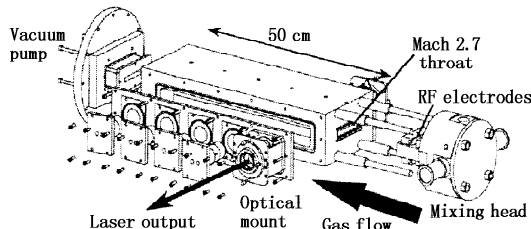
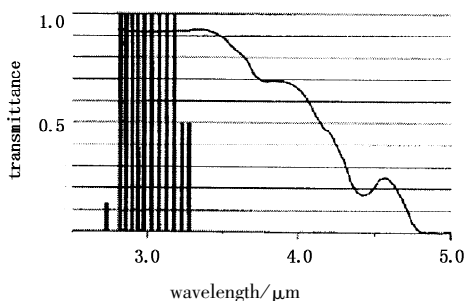


图5 气动射频放电激励CO激光器

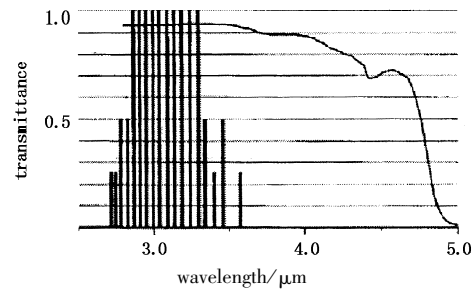
2.3 俄罗斯的研究现状

俄罗斯主要集中在低温CO激光器的研究上。

1997-1999年俄罗斯报道了低温制冷脉冲电子束控制放电激励(EBCD)CO激光器^[11-12],采用滤波片来抑制基频激光的产生。谐振腔有两面全反的铜镜组成(一面为平面镜,一面为 $R=5\text{m}$ 的球面镜),激光输出通过滤波片两面的菲涅尔反射耦合出谐振腔。利用熔融石英玻璃a(厚度为2mm)获得了~10J/L Amagat的比输出能量和3%的转换效率,输出波长2.7~3.3 μm 。利用薄熔融石英玻璃b(厚度为0.5mm)获得了~20J/L Amagat的比输出能量和4%的转换效率,输出波长2.7~3.6 μm ,如图6所示。



(a) 厚度为2mm



(b) 厚度为0.5mm

图6 泛频光谱与滤光片透过率

1999年,报道了低温制冷EBCD多线输出CO激光器^[12-13],采用两面介质镜构成的谐振腔获得了光谱范围2.5~4.1 μm 的多线激光输出。在宽带泛频波段获得最大输出效率11%,最大比输出能量为~50J/L Amagat;在短的波段2.5~2.7 μm ,完全抑制基频的情况下,激光的输出效率可以达到5%。作者预测多线输出的效率可以达到20%。

2000年,俄罗斯报道了低温制冷EBCD单线输出CO激光器^[14],采用光栅获得了413条光谱线,2.7~4.2 μm 脉冲激光输出。在比输入能量为500J/L Amagat(51J)时获得了最大的比输出能量~3J/L Amagat(0.306J);最大的单线激光效率高达0.6%,如图7所示。

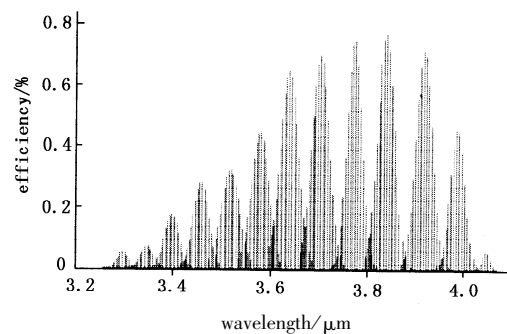


图7 单线输出效率与光谱的关系

CO:N₂=1:4, $P=4.5 \times 10^3 \text{ Pa}$, 输入能量51J, $T \sim 100\text{K}$

2006年^[15],俄罗斯科技人员为了使理论和实验更好的符合,将电光效率定义由比输出能量与比输入能量之比修正为比输出能量与局部比输入能量之比。由于局部比输入能量比比输入能量小25%~35%。因此低温制冷EBCD多线CO激光器的效率达到了16%,而单线输出效率达到了0.85%。

2007年,俄罗斯首次报道了紧凑封闭式低温运转的射频放电激励板条CO激光器^[16],如图8所示。该激光器设计简单紧凑,主要包括激光腔体和射频电源两部分以及一些辅助设备。利用液氮制冷,在

基频波段获得了最大平均功率为 12W 的 $5.1 \sim 5.4\mu\text{m}$ 激光输出,转换效率达到 14%,可以连续工作 1h 以上;最近又在泛频波段获得了 0.3W 的 $2.5 \sim 3.2\mu\text{m}$ 泛频激光输出。该激光器结构紧凑,性能可靠可以广泛应用于科学研究和工业生产。



图 8 低温射频放电激励板条 CO 激光器示意图

2.4 国内的研究现状

我国泛频 CO 激光器发展相对落后,仅 1999 年大连理工大学报道了低温流动式可调谐连续泛频 CO 激光器^[17],如图 9 所示,该系统主要由带真空夹层的液氮冷却辉光放电管、光栅选频光学谐振腔、真空配气系统和计算机控制、光电检测系统组成。最大激光单线输出功率为 55mW。

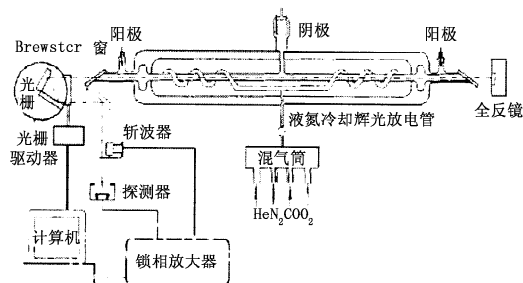


图 9 可调谐 CO 激光器系统示意图

2.5 主要差距

与国外相比,国内的研究相对滞后,主要体现在以下几个方面:

国内大部分集中在激光基频输出,泛频激光输出的报道很少。基频波段,大连理工大学、华中科技大学^[18]、北京理工大学^[19]以及南开大学^[20]都有报道,但是泛频波段仅有大连理工大学^[16]报道过。

国内大部分属于低温连续运行,室温脉冲运行的还没有报道。1999 年大连理工大学报道的泛频激光器是利用液氮冷却的,气体等离子体的温度大约为 77K。关于室温运行的基频激光器有过较多报道^[18],但是室温运行的泛频 CO 激光器还没有报道过。

国内的输出功率很小,转换效率也很低。仅仅实现了泛频单线激光输出,多线输出的报道还没有出现。泛频激光器输出功率仅有 55mW。而国外的

单线效率达到了 0.85%,脉冲能量达到 306mJ,多线输出效率已经达到了 16%^[12-15]。

国内的研究不连续。泛频激光器从 1999 年大连理工大学报道,到现在还未见报道,只有零星的关于基频激光器的报道。显然,国内的研究机构对泛频 CO 激光器重视程度不够,研究力度相对较弱。

3 技术要求

若要实现 CO 激光器高效率,高功率输出,需要综合考虑一下几个方面:

1) 选择合适激励方法

CO 激光器的激励方式有射频放电、电子束维持放电、自持放电等。应该根据具体情况选择合适的激励方法。

2) 抑制基频激光的产生

要想实现泛频波段激光的高效率输出,很显然需要抑制基频激光的输出,一般使用的方法有:使用光栅、滤光片、腔镜镀膜等。光栅可以获得单线激光输出,输出的功率较低;而滤光片、腔镜镀膜实现多线激光输出,输出功率较高,研究人员应该根据自己的实际情况进行选择。

3) 对激光器等离子体冷却

为了保证非谐性 V-V 泵浦能够单方向的进行和提高泛频 CO 激光器的增益系数,需要对激光器的等离子体气体进行冷却,以获得较低的平动温度。文献^[21]指出,通过改变激光管结构使得液氮更有效地制冷工作气体,就可以使泛频单线激光输出效率提高 20%~30%。常用的方法有气体膨胀冷却和液氮冷却等。

4) 谐振腔的选择

与基频波段的激光输出相比,泛频波段的激光输出对谐振腔提出了更高的要求。泛频激光输出与谐振腔的损耗有更大关系,降低谐振腔的损耗可以更大幅度地提高泛频波段的输出效率。文献^[3]指出若将谐振腔的损耗降到 1%,可以实现泛频激光输出的高效运行。降低损耗常用的方法有:谐振腔采用内腔结构,而不使用外腔结构;使用镀膜的介质腔镜代替金属腔镜,以提高腔镜的反射率;降低输出窗口的损耗等。

5) 激光气体的选择

CO 激光器在工作时,除了增益介质 CO 气体外,一般还需要 He, O₂, N₂ 等气体组成的混合气体,

其中,He 的主要作用是传热和维持气体放电。 N_2 的作用比较特别,它可以与 CO 分子进行共振碰撞(N_2 的 $1 \rightarrow 0$ 与 CO 的 $38 \rightarrow 36$ 是准共振碰撞的),使 CO 分子的 $X^1\Sigma$ 态中低振动态的激发能量明显的增加,进而有利于 CO 激光器的运行。文献[14]指出:增加 N_2 的含量可以提高 $3.8\mu\text{m}$ ($38 \rightarrow 36$) 波段的激光输出功率。 O_2 的作用一是导热,二是可以缓解 CO 分子的分解($CO \rightarrow C + O$),可以延长激光器工作气体的寿命。另外水蒸气对泛频短波段的输出有很大的影响,在实验中应特别考虑。需要特别指出的是:在低温制冷的工作气体中,会产生液态臭氧。为了防止臭氧爆炸,应该及时的将产生的臭氧排除激光腔以外。

4 结束语

许多发达国家十分重视泛频 CO 激光器件与应用的研究。中小功率泛频 CO 激光器技术已经成熟,大功率泛频 CO 激光器也得到了长足的发展。而我国与国外相比,还存在很大的差距,需要相关的科技工作者做出更大的努力,缩小差距,实现我国中红外激光器的高效高功率输出。

参考文献:

- [1] W Bohn, H von Bülow, S Dass, et al. High-power supersonic CO laser on fundamental and overtone transitions [J]. *Quant. Electron.*, 2005, 35(12): 1126 – 1130.
- [2] R C Bergman, J W Rich. Overtone bands lasing at $2.7 \sim 3.1\mu\text{m}$ in electrically excited CO [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1977, 31(9): 597 – 599.
- [3] Igor V Adamovich, Matthew Goshe, Walter R Lempert, et al. Continuous wave, electrically excited, carbon monoxide laser operating on first overtone infrared bands, $2.5 \sim 4.0$ microns kinetic modeling and design [J]. *Proc. SPIE.*, 2004, 5448: 322 – 343.
- [4] Yurii G Utkin, Matthew Goshe, Igor V Adamovich, et al. Compact overtone band carbon monoxide laser [J]. *AIAA*. 2005, 746: 1 – 12.
- [5] M Goshe, Y G Utkin, I Adamovich, et al. High order overtone CO laser [J]. *AIAA.*, 2006, 1355: 1 – 17.
- [6] Yurii G Utkin, Matthew Goshe, Igor V Adamovich, et al. Compact overtone band carbon monoxide laser [J]. *Opt. Commun.*, 2006, 263: 105 – 110.
- [7] M Gromoll-Bohle, W Bohle, W Urban. Broadband CO laser emission on overtone transitions $\Delta\nu = 2$ [J]. *Opt. Commun.*, 1989, 69: 409 – 413.
- [8] E Bachem, A Dax, T Fink, et al. Recent progress with the CO-overtone $\Delta\nu = 2$ laser [J]. *Appl. Phys. B.*, 1993, 57: 185 – 191.
- [9] E Zeyfang, W Mayerhofer, S Waither. Room-temperature repetitively pulsed CO overtone laser [J]. *Proc. SPIE.*, 2001, 4184: 230 – 233.
- [10] Willy L Bohn, H A Eckel, W Riede, et al. High power CO overtone laser [J]. *Proc. SPIE.*, 2002, 4760: 486 – 490.
- [11] N G Basov, A A Ionin, A A Kotkov, et al. Pulsed laser operating on the first vibrational overtone of the CO molecule in the $2.5 \sim 4.2\mu\text{m}$ range: 1. Multifrequency lasing [J]. *Quant. Electron.*, 2000, 30(9): 771 – 777.
- [12] N G Basov, G D Hager, A A Ionin, et al. Efficient pulsed first-overtone CO laser operating within the spectral range of $2.5 \sim 4.2\mu\text{m}$ [J]. *IEEE Quant. Electron.*, 2006, 36(7): 810 – 823.
- [13] N Basov, G Hager, A Ionin, et al. Effective multiline pulsed first-overtone CO laser operating spectral range of $2.5 \sim 4.1\mu\text{m}$ [J]. *Proc. SPIE.*, 1999, 3612: 40 – 46.
- [14] N G Basov, G D Hager, A A Ionin, et al. Frequency tunable single-line pulsed first-overtone carbon monoxide laser [J]. *Opt. Commun.*, 2000, 180: 285 – 300.
- [15] A A Ionin, Yu M Klimachev, A Yu Kozlov, et al. A pulsed overtone CO laser with efficiency of 16% [J]. *Quant. Electron.*, 2006, 36(12): 1153 – 1154.
- [16] A A Ionin, L V Seleznev, A V Shelestovich, et al. Cryogenic sealed-off slab CO laser excited by repetitively Pulsed RF discharge [J]. *Proc. SPIE.*, 2007, 6735: 01 – 07.
- [17] 于清旭, 李少成, 韩瑞萍. 低温流动式可调谐连续波泛频 CO 激光器的研究 [J]. *大连理工大学学报*, 1999, 39(4): 588 – 590.
- [18] 王新兵. 室温工作的射频放电激励板条 CO 激光器 [J]. *华中科技大学学报(自然科学版)*, 2006, 34(1): 87 – 89.
- [19] 辛建国, 张旺, 焦文涛. 射频激励扩散型冷却板条波导千瓦 CO 激光器 [J]. *光学学报*, 2005, 20(5): 714 – 716.
- [20] 高贵, 傅汝廉, 高润梅, 等. 室温封离型 TEM_{00} CO 激光器 [J]. *光电子·激光*, 2003, 14(5): 493 – 495.
- [21] S Bücscher, O Schulz, A Dax, et al. Improvement of the performance of cw CO lasers by using externally ribbed wall cooled discharge tubes [J]. *Appl. Phys. B.*, 1997, 64: 307 – 309.