

# 新型纵向快流一氧化碳激光器\*

张健 吴念乐 王建伟 赵钧 徐亦庄

(清华大学现代应用物理系, 北京, 100084)

**摘要** 报道了一种集纵向和横向连续波一氧化碳激光器优点的新型器件. 采用快速流动方法和循环流动技术, 获得了 100 W 级的激光输出功率, 并使工作气体的消耗降到极低水平.

**关键词** 纵向激励, 快速流动, 循环, 连续波, CO 激光器.

## 引言

由于 CO 激光器在红外波段  $\Delta V = 1$  的激光波长约为  $5 \mu\text{m}$ , 其波长约为目前工业上常用  $\text{CO}_2$  激光器波长的一半, 因此不论是聚焦性能还是被材料吸收性能都有明显优点<sup>[1]</sup>.

我们研制了一种纵向快速流动 CW CO 激光器, 得到了 100 W 的功率输出. 迄今为止, 国内外的纵向流动 CW CO 激光器均为开放式的<sup>[2~6]</sup>, 即工作气体一次流过放电管即被排放, 气体消耗量很大, 极不利于器件的实用化. 我们首次将横向流动 CW CO 激光器中的循环技术用到纵向器件中, 采用快速循环与慢速换气相结合的工作方式, 使工作气体寿命提高了 60 多倍. CO 激光器研制的另一个难点是如何使工作气体降温 (最好是降到 100 K 左右), 因为 CO 激光器在低温下才有较高的功率和效率. 快速流动可以克服 CO 激光器对工作气体冷却的限制, 提高了输出功率. 但同时给气体的有效冷却带来更大困难. 我们采用板翅式液氮换热器为工作气体预冷, 使放电管入口处工作气体温度降至 153 K.

## 1 实验装置及性能

图 1 为 CO 激光器放电管示意图, 它是一个全石英的三层套管结构. 中心放电管冷却长度为 89 cm, 管直径为 2.0 cm. 中心管处于液氮池中, 最外层为杜瓦保温套. 两端为  $\text{CaF}_2$  布儒斯特窗口.

我们通过对多种金属材料的放电研究, 发现钽能较好地稳定放电气体中的 CO 成份<sup>[7]</sup>.

图 2 为配气及循环系统方框图. 工作气体的配气比例通过各自的流量计控制. 快速循环增压是靠一台国产 ZJ-300 型罗茨泵, 这是一种工业用真空泵, 粉尘和油污染严重, 经

\* 国家自然科学基金资助项目

本文 1993 年 11 月 29 日收到, 修改稿 1994 年 2 月 23 日收到

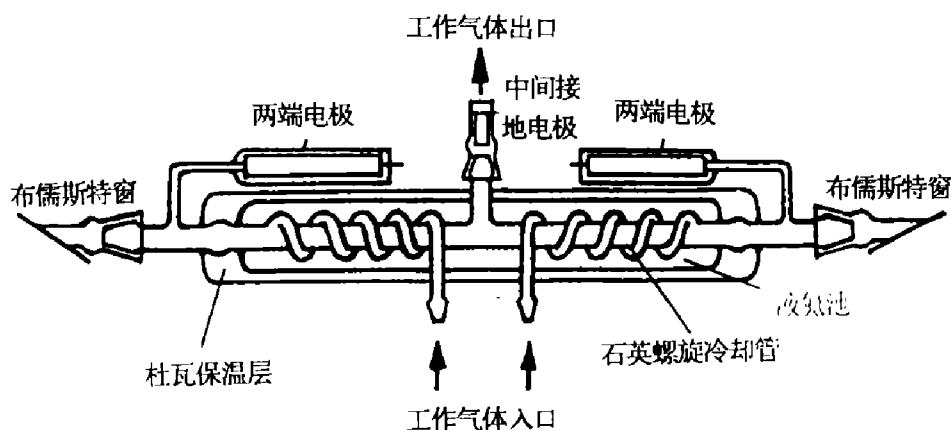


图 1 CO 激光器放电管示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the discharge tube of CO laser

我们多方面改进, 使之成功地应用到激光器上. 工作气体的流量可以由循环路上的阀门 A 和 B 控制. ZJ-300 泵的最高入口气压为 1333 Pa.

### 1.1 实验装置参数

#### 1.1.1 放电参数

电极间放电长度为 120 cm, 放电电极为钨筒, 放电电流为 0~30 mA, 放电电压为 0~2×20 kV, 激励方式为自持辉光放电.

#### 1.1.2 气体参数

气体混合物为 He、CO、N<sub>2</sub>、O<sub>2</sub>, 气体温度为 153~293 K, 气体压力为 667~2000 Pa (放电管出口处), 气体流速准静态时约为 400 m/s, 液氮消耗石英冷却套为 8 l/h (max.)、板翅式

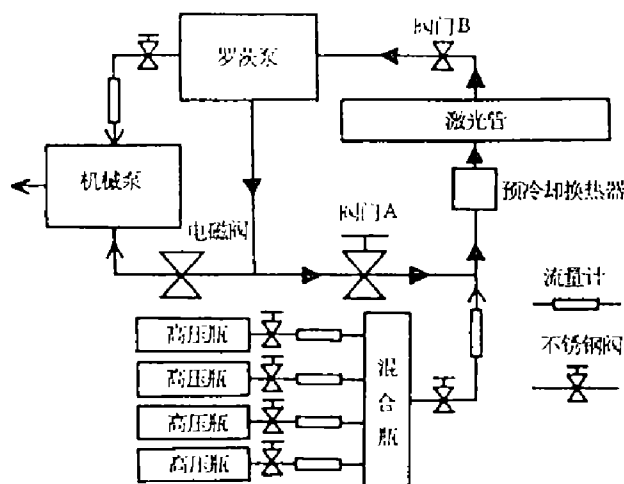


图 2 配气及循环系统方框图

Fig. 2 Block diagram of gas making-up and circulating system

预冷器为 24 l/h (max.), 罗茨泵抽速为 300 l/s, 机械泵抽速为 4 l/s.

#### 1.1.3 光学参数

激光腔长为 176 cm, 激光管直径为 2.0 cm, 有效增益长度为 89 cm, 腔全反镜曲率半径为 6 m ( $\phi 35$ ), 全谱输出镜透过率  $T=32\%$  ( $\phi 40$ ).

### 1.2 注入特性、流动特性和冷却特性

电能注入的多少直接关系到激光输出功率. 注入功率不仅与电源有关, 还与放电气体温度、压强、配比和流量有关.

图 3 为不同流动状态下注入电压随电流的变化曲线. 图 3 中 He:CO:N<sub>2</sub>:O<sub>2</sub>=6:1:2:0.01 (ml/min.),  $T_{in} = 200 \sim 203$  K. 由图 3 可见, 快流注入电压明显高于慢流注入电压, 这是

因为快速流动不断向放电区注入未电离的中性气体分子, 且不断将电离了的气体从出口带走, 从而增加了放电的难度, 可见快速流动可以明显增大注入电能. 另外, 注入电压还会随气体流量增大而增大. 工作气体中  $N_2$  气含量增大也会使电压升高<sup>[8]</sup>.

流量调节可以用阀门 A 和 B. 图 4 为改变阀门的开启角度用毕托管和压阻式压强计测量得到的流量变化曲线. 此系统允许的最大总压强为 6665 Pa, 此时罗茨泵入口气压已达 1333 Pa, 最大质量流量为 0.37 g/s.

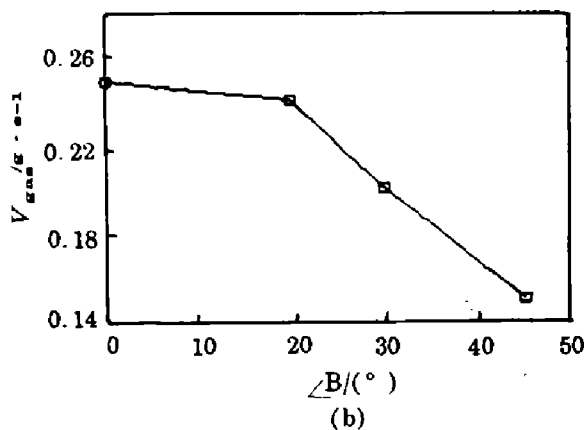
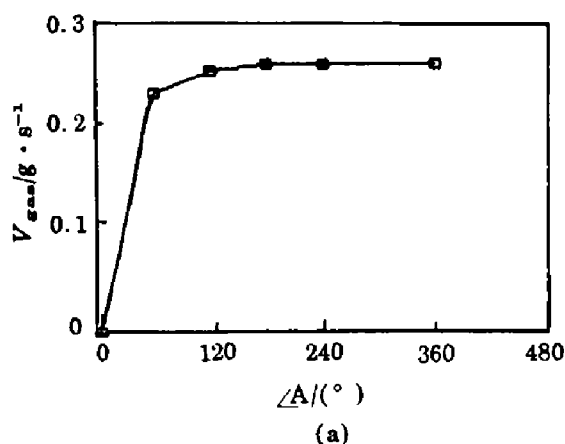


图 4 质量流量变化曲线 (He:CO:N<sub>2</sub>:O<sub>2</sub>=8:1:1:0.1 (ml/min), 总压强 3999 Pa)  
(a) 阀门 A 的影响,  $\angle B = 0$ ; (b) 阀门 B 的影响,  $\angle A = 120^\circ$

Fig. 4 Variation of mass flow rate

图 5 为气体冷却温度 (以放电管入口处气温  $T_{in}$  表示) 随时间的变化曲线. 图 5 中 1 为石英管 LN<sub>2</sub> 池冷却启动, 2 为板翅式 LN<sub>2</sub> 预冷器启动; He:CO:N<sub>2</sub>:O<sub>2</sub>=8:1:1:0.1 (ml/min.), 总压强 3999 Pa,  $\angle A > 108^\circ$ ,  $\angle B = 0$ . 可见板翅式预冷器的冷却能力是很强的, 即曲线自第“2”点起有一个很陡的下降. 到 16 min 时, 温度基本稳定在 153 K, 即极限温度. 应当注意, 我们使用的热敏元件为 BA<sub>2</sub> 型铂电阻, 它封装在一个很薄的玻璃壳内. 因此温度探测有一个弛豫时间.

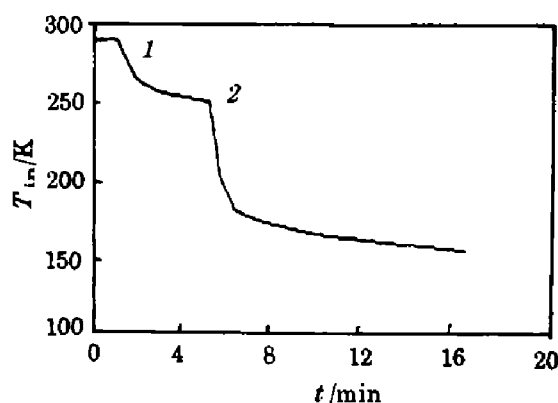


图 5 气体降温的时间历程

Fig. 5 Time history of gas cooling

## 2 实验结果和讨论

图 6 为 He、CO、N<sub>2</sub>、O<sub>2</sub> 4 种气体的配比优化曲线. 由这些曲线可以得出快速流动

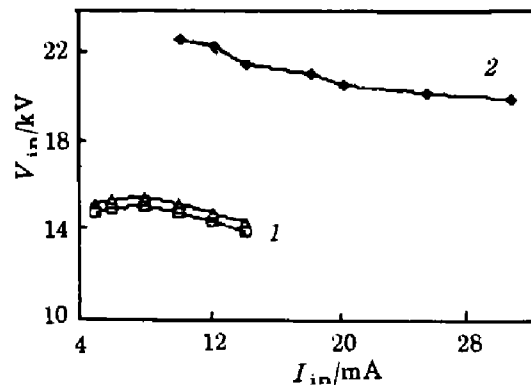


图 3 CO 激光器注入电压随电流的变化曲线  
1—慢速流动, 2—快速流动

Fig. 3 Input voltage as a function of current of CO laser

全谱线输出下最佳配气比例为  $\text{He}:\text{CO}:\text{N}_2:\text{O}_2=8:1:2:0.09$  ( $\text{ml}/\text{min}$ ), 这比慢速流动下的最佳比例  $\text{He}:\text{CO}:\text{N}_2:\text{O}_2=6:1:3.2:0.09$  ( $\text{ml}/\text{min}$ )<sup>[8]</sup>需要更多的 He, 因为快速流动需要更好的导热性以使气体冷却, 同时快速流动又增加了放电难度, 因此要少一些  $\text{N}_2$ . 而快速流动全谱比快速流动选频可以有更多的  $\text{N}_2$ . 这是因为前者比后者有更好的放电稳定性. 在慢速流动全谱和选频实验中<sup>[8~11]</sup>也有类似规律, 即全谱输出比选频输出有更大的最佳放电电流.

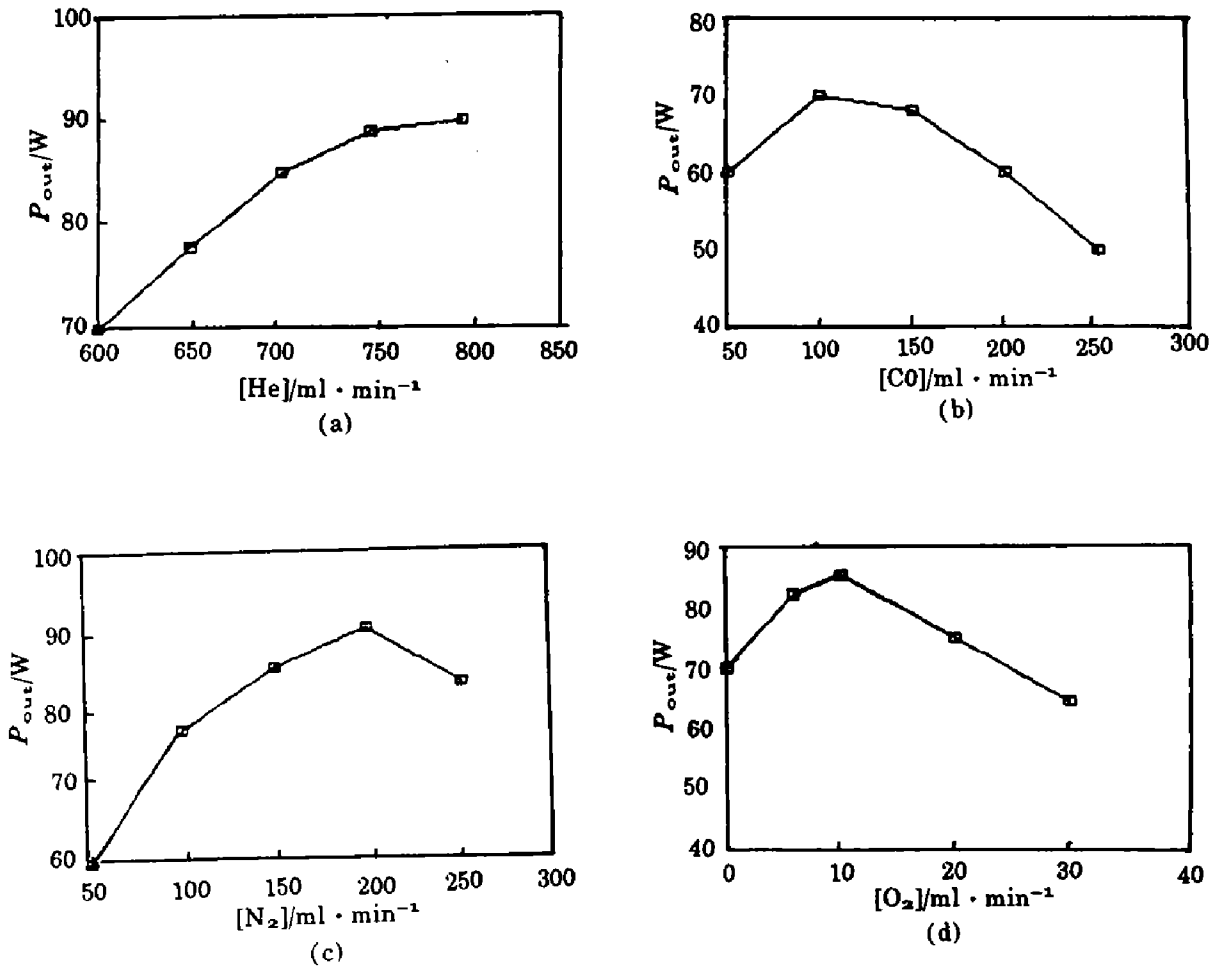


图 6 快速流动 CO 激光器气体配比优化曲线

- (a) He 气优化曲线,  $\text{He}:\text{CO}:\text{N}_2:\text{O}_2=[\text{He}]:1:2:0.09$  ( $\text{ml}/\text{min}$ ),  $P = 1320$  Pa,  $I = 25$  mA;  
 (b) CO 气优化曲线,  $\text{He}:\text{CO}:\text{N}_2:\text{O}_2=8:[\text{CO}]:2:0.09$  ( $\text{ml}/\text{min}$ ),  $P = 1320$  Pa,  $I = 25$  mA;  
 (c) N<sub>2</sub> 气优化曲线,  $\text{He}:\text{CO}:\text{N}_2:\text{O}_2=8/1:[\text{N}_2]:0.09$  ( $\text{ml}/\text{min}$ ),  $P = 1133$  Pa,  $I = 15$  mA;  
 (d) O<sub>2</sub> 气优化曲线,  $\text{He}:\text{CO}:\text{N}_2:\text{O}_2=8:1:2:[\text{O}_2]$  ( $\text{ml}/\text{min}$ ),  $P = 1320$  Pa,  $I = 20$  mA

Fig. 6 Curves of gas ratio optimizing of fast-flow CO laser

图 7 为流量对功率的影响, 图 8 为压强 (我们以放电管出口处压强为代表) 对功率的影响. 从这两条曲线可见, 在保持其它条件不变的情况下, 增大工作气体的流量或压强对提高输出功率很有利.

表 1 中列出了纵向快速流动全谱输出 CW CO 激光器的一些实验数据. 从表 1 可见, 不同的实验最佳气体比例差异甚大, 因此要根据实验确定自身的最佳配气比. 我们的器件尺寸较小, 且温度只降低到 153 K, 因此输出功率和效率并不算高, 但由于我们采用了循环技术, 使工作气体寿命显著提高, 为同等流量器件的 60 倍以上.

我们采用快速流动技术和板翅式液氮换热器, 获得了 100 W 的 CW CO 激光输出功

率. 这是集纵向和横向 CW CO 激光器优点的器件, 循环技术使气体消耗率大大降低, 这是纵向 CW CO 激光器迈向实用的重要一步.

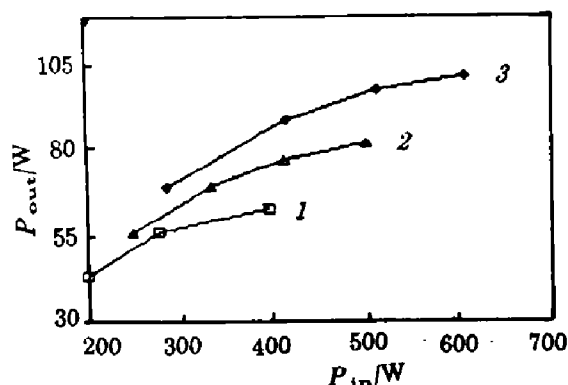


图 7 流量对快速流动全谱功率的影响  
Fig. 7 Influence of flow rate on full spectra output power of fast-flow CO laser  
He:CO:N<sub>2</sub>:O<sub>2</sub>=8:1:2:0.09 (ml/min),  
 $P = 1333 \text{ Pa}$ ,  $\angle A = 120^\circ$ ,  $\angle B = 0$ ,  
 $T_{in} = 164 \sim 168 \text{ K}$ ,  
 $V_{gas}$ : 1—0.12 g/s, 2—0.26 g/s, 3—0.37 g/s

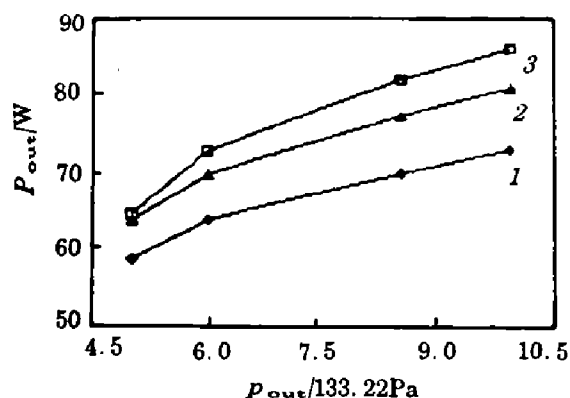


图 8 压强对快速流动全谱功率的影响  
Fig. 8 Influence of pressure on full spectra output power of fast-flow CO laser  
He:CO:N<sub>2</sub>:O<sub>2</sub>=8:1:2:0.09 (ml/min),  
 $\angle A = 120^\circ$ ,  $\angle B = 0$ ,  $T_{in}$ : 1—190~193 K,  
2—170~173 K, 3—153~158 K

表 1 纵向快流全谱输出 CW CO 激光器的实验数据

Table 1 Experimental data of coaxial fast-flow full spectra CW CO lasers

项目	本文 (1992 年)	于清旭等 <sup>[2]</sup> (1990 年)	T. Hattori 等 <sup>[3]</sup> (1984 年)	T. Kan 等 <sup>[4]</sup> (1972 年)	D. G. Lim 等 <sup>[5]</sup> (1978 年)
He:CO:N <sub>2</sub> :O <sub>2</sub> (ml)	21.1:1:2:0.08	47.5:1:1:0	8.2:1:0.8:0.4	26.4:1:0.4:0.02	15:1:2:0.01
工作气压 (133 Pa)	10		10	27	35
入口温度 (K)	153	90	100	80	100
输出功率 (W)	100	115	165	400	750
比输出功率 (W/cm <sup>3</sup> )	0.359	0.167	0.480	0.815	1.44
转换效率 (%)	16.5	18	19	20	28
最大质量流 (g/s)	0.37	0.14	0.3	2	2.7
一瓶 He 使用寿命 (min)*	3600	132	66	8.5	6.3

\* 这里指一标准瓶 He 气, 即指一瓶 40 l 体积、150 atm. 压强和 293 K 温度的 He 气.

限于目前条件, 我们没有实现气温低于 153 K 的运转, 但可以预见, 若能使工作气体温度降到 100 K 左右, 同时加大我们器件的尺寸和能力, 将可以获得数百、上千瓦的 CW CO 激光输出功率. 若能实现此目标, 则会使纵向快速流动 CW CO 激光器在激光光谱学、激光化学、医疗和工业加工等方面的应用前景更为广阔.

致谢 对高玉波、黄永新、晁招刚和刘铁桩等人在技术上的大力支持表示衷心感谢.

### 参考文献

- 1 Rudlaff T, Dausinger F, Satani R et al. *Laser und Optoelektronik*, 1991,23(1):46
- 2 于清旭. 纵向放电激励高功率一氧化碳激光器的研究, 大连理工大学物理系, 博士学位论文, 1990.
- 3 Hattori H, Sakakibara K, Hasegawa A et al. *Fast-Axial-Flow CO Electric Discharge Laser and*

*Its Power-Transmission Experiments through As-S Glass Fibre*, Paper presented at 5th GCL Symp., Oxford, 20~24 August, 1984.

- 4 Kan T, Whitney W. *Appl. Phys. Lett.*, 1972,21(5):213
- 5 Lim DG, Mendoza P J, Cohn DB. *Rev. Sci. Instrum.*, 1977,48(1):1430
- 6 Grigor'yan GM, Dymshits BM *et al.* *Sov. J. Quantum. Electron.*, 1978,8(11):1382
- 7 张 健, 吴念乐, 王建纬, 赵 钧, 徐亦庄. *电子学报*, 1993,21(8):28
- 8 张 健. *纵向快速循环流动 CW CO 激光器的研究*, 清华大学现代应用物理系, 博士学位论文, 1992.
- 9 衷庆华, 张 健, 王建纬, 吴念乐, 徐亦庄. *激光与红外*, 1991,21(1):42
- 10 张 健, 吴念乐, 王建纬, 赵 钧, 徐亦庄. *中国激光*, 1993,20(7):536
- 11 Zhang J, Wu N, Wang J *et al.* *Optics and Laser Technology*, 1994,26(2):83

## NOVEL FAST-FLOW COAXIAL CARBON-MONOXIDE LASER\*

Zhang Jian Wu Nianle Wang Jianwei Zhao Jun Xu Yizhuang

(Department of Modern Applied Physics, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

**Abstract** A new-type device, which has the strong points of both coaxial and transverse CW CO lasers, is reported. The fast-flow and relatively good cooling systems led to 100 watts of laser output power, and the circulating-flow technique resulted in great reduction of the consumption of working gases.

**Key words** coaxially excited, fast-flow, circulation, continuous wave, CO laser.

---

\*The project supported by the National Natural Science Foundation of China