

# 电激励连续波 DF( $\nu$ )传能 CO<sub>2</sub> 激光器

钟 炜 袁圣付 罗 威 孙 旭

(国防科学技术大学光电科学与工程学院, 湖南 长沙 410073)

**摘要** 采用激发态 DF( $\nu$ )传能给 CO<sub>2</sub>(00<sup>0</sup>0)的方式,在双波段激光实验平台中的 CO<sub>2</sub> 增益模块上实现了 10P20(944.27 cm<sup>-1</sup>)、10P12(955.26 cm<sup>-1</sup>)CO<sub>2</sub> 激光输出。从流量控制、燃料注入方式、最佳光轴位置、功率稳定性和激光光斑五个方面开展研究,获得了 DF-CO<sub>2</sub> 激光最大输出功率为 2.3 W,激光器运转腔压为 2 kPa 左右。

**关键词** 激光器;DF-CO<sub>2</sub> 激光;传能;电激励

中图分类号 O436

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201239.0902009

## CO<sub>2</sub> Laser of Energy Transfer by a Discharge Driven Continuous Wave DF( $\nu$ )

Zhong Wei Yuan Shengfu Luo Wei Sun Xu

(College of Opto-Electronic Science and Engineering, National University of Defense Technology, Changsha, Hunan 410073, China)

**Abstract** By using the manner of the energy transferring from excited DF( $\nu$ ) to CO<sub>2</sub>(00<sup>0</sup>0), CO<sub>2</sub> spectral lines of 10P20(944.27 cm<sup>-1</sup>) and 10P12(955.26 cm<sup>-1</sup>) have been observed on the CO<sub>2</sub> gain module of the dual-band laser. Research is focused on flux controlling, fuels injecting methods, optimized position of the optical axis, power stability and beam profile. The max power of the DF-CO<sub>2</sub> laser is 2.3 W, and the cavity pressure of this laser is about 2 kPa.

**Key words** lasers; DF-CO<sub>2</sub> laser; energy transfer; discharge driven

**OCIS codes** 140.1550; 140.3460; 140.3470; 140.4130

### 1 引 言

红外成像系统在红外监测、目标定位、导弹防御等方面有着重要应用<sup>[1,2]</sup>,一些关于中、远红外双波段探测器件<sup>[3~5]</sup>和激光防护<sup>[6]</sup>的研究得到开展,使得连续波中红外(DF)、远红外(CO<sub>2</sub>)双波段激光器的研制在红外对抗方面有着十分重要的应用前景。本课题组正在研制的电激励连续波中红外(DF)、远红外(CO<sub>2</sub>)双波段激光器中,基于 N<sub>2</sub>-CO<sub>2</sub> 的双波段激光已成功实现<sup>[7~9]</sup>,而基于 DF-CO<sub>2</sub> 的双波段激光正在研制中。本文采用激发态 DF( $\nu$ )传能给 CO<sub>2</sub>(00<sup>0</sup>0)的方式实现了远红外 CO<sub>2</sub> 激光(文中简称 DF-CO<sub>2</sub> 激光),据我们所知,这也是国内首次实现的 DF-CO<sub>2</sub> 激光。

N<sub>2</sub> 分子或者卤化氢分子与 CO<sub>2</sub> 分子近共振传能均能实现 10.6  $\mu\text{m}$ (10P20)CO<sub>2</sub> 激光。后者属于转移型化学激光器<sup>[10]</sup>,其中 DF/HF 分子与 CO<sub>2</sub> 分子共振传能的方式被称为 DF/HF-CO<sub>2</sub> 激光器<sup>[11]</sup>。DF/HF-CO<sub>2</sub> 激光器本身兼有 DF/HF 化学激光器效率高、比功率大和气动 CO<sub>2</sub> 激光器能高腔压运转、排气容易的优点,曾备受强激光界的瞩目。对于 DF 和 CO<sub>2</sub> 双波段激光器的研制,使用 DF-CO<sub>2</sub> 激光器还能够与 DF 化学激光器共用燃料气体和 F 原子发生器,可以实现简化激光器结构、减少制造成本的优点。本文在实现了 DF-CO<sub>2</sub> 激光之后,还将从燃料体系、气体注入方式、最佳光轴位置、功率稳定性和激光光斑五个方面来介绍该激光器的运行条件和特征。

收稿日期: 2012-04-22; 收到修改稿日期: 2012-06-25

基金项目: 国家自然科学基金(10974255)资助课题。

作者简介: 钟 炜(1985—),男,硕士研究生,主要从事高能激光技术方面的研究。E-mail: gfk\_d\_zhongwei@126.com

导师简介: 袁圣付(1975—),男,博士,副教授,主要从事高能激光技术方面的研究。E-mail: shengfuyuan\_bb@163.com

## 2 传能体系选择

表 1 为 DF/HF-CO<sub>2</sub> 激光器反应方程和主要反应在 350 K 时的动力学参数<sup>[12]</sup>。由表 1 可知 DF(*v*) 和 HF(*v*) 均能传能给 CO<sub>2</sub>(00<sup>0</sup>0), 但是 [DF(*v*) +

CO<sub>2</sub>(00<sup>0</sup>0)] 抽运反应速率要远大于 [CO<sub>2</sub>(00<sup>0</sup>1) + DF(0)] 去激活反应速率, 而 [HF(*v*) + CO<sub>2</sub>(00<sup>0</sup>0)] 抽运反应速率略大于 [CO<sub>2</sub>(00<sup>0</sup>1) + HF(0)] 去激活反应速率。选择 DF-CO<sub>2</sub> 体系能获得较高比功率。

表 1 DF/HF-CO<sub>2</sub> 激光器反应方程和主要反应动力学参数

Table 1 Reactions and main kinetics datas of DF/HF-CO<sub>2</sub> laser

Reaction	Effect	Reaction rates (350 K) / (10 <sup>2</sup> s <sup>-1</sup> · Pa <sup>-1</sup> )
$NF_3 + He \xrightarrow{e} NF_{3-i} + iF + He$ $F + D_2/H_2 \longrightarrow DF/HF(v) + D/H$	Generate F atoms Generate DF/HF( <i>v</i> )	
$DF(v) + CO_2(00^0 0) \xrightarrow{k_1} DF(v-1) + CO_2(00^0 1)$ $HF(v) + CO_2(00^0 0) \xrightarrow{k_2} HF(v-1) + CO_2(00^0 1)$	Energy transfer	14.0 2.8
$DF/HF(v) + M \longrightarrow DF/HF(v-1) + M$	Deactivation of 激 DF/HF( <i>v</i> )	
$CO_2(00^0 1) + DF(0) \xrightarrow{k_3} CO_2(nm^l 0) + DF$ $CO_2(00^0 1) + HF(0) \xrightarrow{k_4} CO_2(nm^l 0) + HF$	Main deactivation of CO <sub>2</sub> (00 <sup>0</sup> 1)	1.4 2.7
$CO_2(00^0 1) + h\nu \longrightarrow CO_2(10^0 0) + 2h\nu$	laser	

在 DF-CO<sub>2</sub> 激光中, 冷反应 (F + D<sub>2</sub>)、热反应 (D + F<sub>2</sub>) 均能产生激发态 DF(*v*) 分子, 并且热反应能够获得较高的比功率<sup>[13]</sup>。考虑到热反应中的 F<sub>2</sub> 易燃易爆, 并且具有强烈的腐蚀性, 这里采用冷反应 (F + D<sub>2</sub>) 产生 DF(*v*)。

化学过程可以简要概括如下: NF<sub>3</sub> 和 He 混合气体通入放电管中, 被电子轰击分解产生 F 原子, F 原子在激光器主体中与通入的 D<sub>2</sub> 发生反应生成激发态的 DF(*v*) 分子, 激发态的 DF(*v*) 分子将能量传递给基态的 CO<sub>2</sub>(00<sup>0</sup>0), 产生激发态的 CO<sub>2</sub>(00<sup>0</sup>1) 分子, 最后由激发态的 CO<sub>2</sub>(00<sup>0</sup>1) 分子激射出光。

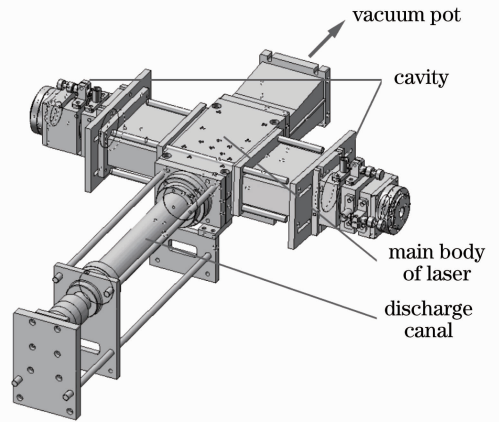


图 1 激光器主要结构图

Fig. 1 Main structure of the laser

## 3 实验装置

图 1 为激光器主要结构图, 激光器主要由放电管、激光器主体、光腔 3 个部分组成, 激光器末端连接真空罐。放电管采用 φ28 mm × 328 mm 的石英管, 放电过程为辉光放电。气体流量使用浙江余姚工业自动化仪表厂 LZB-6 和 LZB-10 两种型号的浮子流量计测量。光腔全反镜为 φ30 mm × 3 mm 的硅基底金膜全反镜, 曲率半径为 1 m; 输出镜为 φ35 mm × 3 mm 的 ZnSe 基底介质膜腔镜, 曲率半径为 2 m, CO<sub>2</sub> 波段透射率 T = 8.5%; 输出窗口为 φ35 mm × 3 mm 的 ZnSe 平面镜。激光器主体中气体喷注孔结构如图 2 所示, 沿气体流动方向有 5 排喷注孔, 依次标注为①②③④⑤(文中用①②③④⑤来分别表示沿气流方向的第 1、2、3、4、5 排注入孔), 可以通过外置气路阀门控制气体从某一排或数排喷注孔注入。相邻两排喷注孔之间距离为 8 mm, 光轴位于⑤下游 1 mm 处。

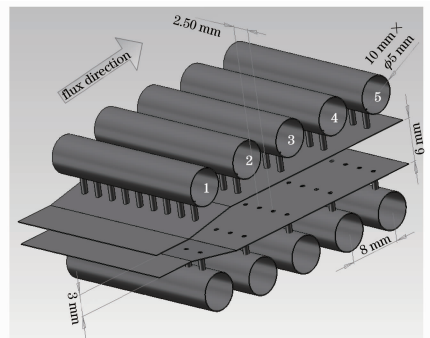


图 2 激光器气体喷注孔结构图

Fig. 2 Structure of injection orifices in the laser

## 4 实验结果及分析

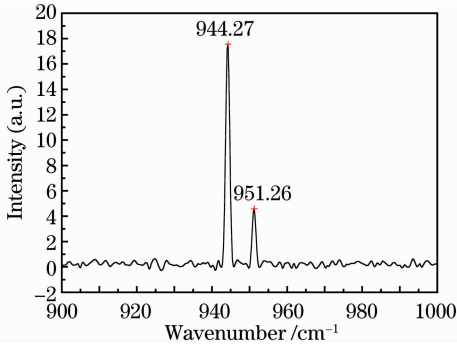
### 4.1 光 谱

表 2 为 CO<sub>2</sub> 从①注入, D<sub>2</sub> 从④注入时, DF-CO<sub>2</sub> 激光运转参数。图 3 为实验输出光谱, 出现了 CO<sub>2</sub> 激光的 10P20(944.27 cm<sup>-1</sup>), 10P12(955.26 cm<sup>-1</sup>)

谱线,光谱测量仪器为德国 Bruker 公司的 Tensor37 型傅里叶变换红外(FTIR)遥测光谱仪。

表 2 DF-CO<sub>2</sub> 激光运转参数Table 2 Working parameters of the DF-CO<sub>2</sub> laser

Pressure /kPa	NF <sub>3</sub> /(m <sup>3</sup> /h)	He/(m <sup>3</sup> /h)	D <sub>2</sub> /(m <sup>3</sup> /h)	CO <sub>2</sub> /(m <sup>3</sup> /h)	Voltage /V	Current /mA	Power /W
2.0	0.07	1.80	0.40	1.95	2400	196	2.3

图 3 DF-CO<sub>2</sub> 激光输出光谱Fig. 3 Spectrum of the DF-CO<sub>2</sub> laser

激光器运行流量参数满足如下规律: He 和 CO<sub>2</sub> 流量相当,且远大于 NF<sub>3</sub> 流量, D<sub>2</sub> 流量为 NF<sub>3</sub> 流量的 5~6 倍。为了获得较高输出功率,分别对 D<sub>2</sub> 和 CO<sub>2</sub> 的注入方式和光轴位置选择进行了进一步的实验研究。

#### 4.2 注入方式选择

对于不同气体注入方式和不同的腔压, DF-CO<sub>2</sub> 激光均存在最佳流量配比和最高输出功率<sup>[14]</sup>。实验主要考虑三种注入方式,对于每种注入方式,通过注入孔的切换改变气体注入位置;对于每个注入位置,均通过调节气流量获得最高输出功率。

实验结果总结如下:先注入 D<sub>2</sub> 再注入 CO<sub>2</sub>,保持腔压不变, D<sub>2</sub> 从①注入, CO<sub>2</sub> 分别从②③④⑤注入,获得最大功率 0.7 W (CO<sub>2</sub> 从③通入, NF<sub>3</sub> 流量为 0.09 m<sup>3</sup>/h, 腔压为 0.9 kPa);先注入 CO<sub>2</sub> 再注入 D<sub>2</sub>,保持腔压不变, CO<sub>2</sub> 从①注入, D<sub>2</sub> 分别从②③④⑤注入,获得最大功率 2.3 W (D<sub>2</sub> 从④通入, NF<sub>3</sub> 流量为 0.07 m<sup>3</sup>/h, 腔压为 1.9 kPa); CO<sub>2</sub> 和 D<sub>2</sub> 混合注入,保持腔压不变,混合气体分别从①②③④⑤注入,获得最大功率 1.89 W (混合气体从④通入, NF<sub>3</sub> 流量为 0.05 m<sup>3</sup>/h, 腔压为 2.0 kPa)。

三种气体注入方式的优劣分析如下。考虑到 DF( $\nu$ ) 浓度随流场下降较快,实验平台 DF( $\nu$ ) 浓度峰值处于 D<sub>2</sub> 注入孔下游 5 mm 以内<sup>[8]</sup>,采用先注入 D<sub>2</sub> 再注入 CO<sub>2</sub> 方式不利于 DF( $\nu$ ) 传能给 CO<sub>2</sub> (00<sup>0</sup>0)。采用这种注入方式时,腔压为 2 kPa 左右,气体流速较慢,由于 DF( $\nu$ ) 去激活作用,没有激光输出;腔压降至 0.9 kPa,获得 0.7 W 最大输出功

率。采用先注入 CO<sub>2</sub> 再注入 D<sub>2</sub> 方式虽能获得最高的功率,但结构上需要两排喷注孔。采用 CO<sub>2</sub> 和 D<sub>2</sub> 混合注入方式虽获得略小的功率,但只需要一排喷注孔。目前由于受到实验平台规模的限制,激光输出功率不高。在较大规模激光器设计中, CO<sub>2</sub> 和 D<sub>2</sub> 混合注入方式将有利于简化气体注入结构。同时假设放电管中 NF<sub>3</sub> 的解离度相等,那么采用 CO<sub>2</sub> 和 D<sub>2</sub> 混合注入方式获得的 F 源比功率(输出功率/NF<sub>3</sub> 流量)高于先注入 CO<sub>2</sub> 再注入 D<sub>2</sub> 方式。因此,选择 CO<sub>2</sub> 和 D<sub>2</sub> 混合注入方式有利于提高燃料利用率和简化气体注入结构。

#### 4.3 光轴最佳位置

为了获得实验平台光轴的最佳位置,对于每一种注入方式在保持流量、腔压不变的前提下,调节气体喷注位置,改变喷注孔与光轴相对距离,确定光轴最佳位置。表 3 为采用先注入 CO<sub>2</sub> 再注入 D<sub>2</sub>、CO<sub>2</sub> 和 D<sub>2</sub> 混合注入两种方式时,输出光功率与光轴位置的关系。

先注入 CO<sub>2</sub> 再注入 D<sub>2</sub>: CO<sub>2</sub> 从①注入,调节 D<sub>2</sub> 分别从②③④⑤注入(腔压为 1.9 kPa); CO<sub>2</sub> 和 D<sub>2</sub> 混合注入:调节混合气体分别从①②③④⑤注入(腔压为 2 kPa)。

表 3 输出光功率与光轴位置的关系

Table 3 Relation between output power and position of laser axis

	Distance between axis and injection orifice /mm	Power /W
Inject D <sub>2</sub> after CO <sub>2</sub>	0	0
	1	0
	9	0.74
	17	0.28
	25	0.01
Inject CO <sub>2</sub> and D <sub>2</sub> together	0	0
	1	1.20
	9	1.60
	17	1.05
	25	0.04

从表 3 可以看出,不论是先注入 CO<sub>2</sub> 再注入 D<sub>2</sub>,还是 CO<sub>2</sub> 和 D<sub>2</sub> 混合注入,当腔压为 2 kPa 左右时,最佳光轴均位于喷注孔下游约 10 mm 处。

#### 4.4 激光功率稳定性和激光光斑

激光输出功率采用北京物科院光电技术有限公司 LP-3C 型功率计进行测量,该功率计能产生与激光功率对应的电压信号输出。采用日本 YOKOGAWA 公司 783001 型多功能测量仪采集电压信号。激光器输出功率为 2.2 W 左右时,得到功率计电压信号随时间变化的曲线如图 4 所示。统计数据显示,稳定段(21~70 s)电压信号的稳定度 $[\pm(V_{\max} - V_{\min}) / (2V_{\text{average}})]$ 为  $\pm 1.18\%$ ,即激光器功率稳定度为  $\pm 1.18\%$ 。

为了初步研究 DF-CO<sub>2</sub> 激光光束质量,对稳定腔运行情况下的光斑进行测量。分别在距离激光输出窗口 200、350、500、650、800 mm 处用热敏纸测量

激光光斑,激光功率为 2.1 W。图 5 为测量结果。由于 CO<sub>2</sub>(00<sup>0</sup>1)增益区较长,激光为多横模输出,发散角较大,不利于远距离传输<sup>[15]</sup>。

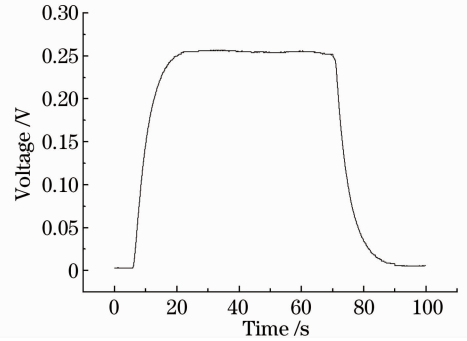


图 4 功率计信号随时间变化曲线

Fig. 4 Signal of the power meter signals versus time

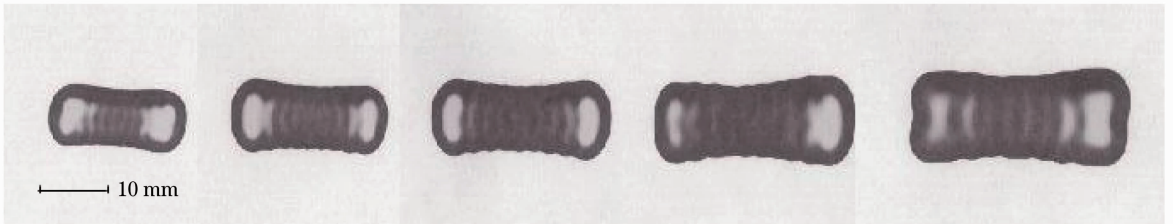


图 5 激光光斑图

Fig. 5 Beam profile of the laser

为了获得较好的光束质量,采用在激光输出镜前放置光阑的方法来减少多模成分。分别用  $\phi 4$ 、 $\phi 6$ 、 $\phi 8$ 、 $\phi 10$ 、 $\phi 12$  mm 五种型号光阑进行实验,采用  $\phi 4$  mm 光阑时,获得激光单模输出。在距离激光输

出窗口 350、500、650、800、1500 mm 处用热敏纸测量激光光斑,激光功率为 1.6 W。图 6 为采用  $\phi 4$  mm 光阑时,光斑测量结果。激光为单模输出,发散角较小。

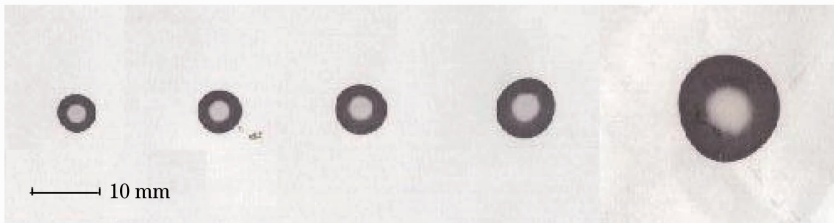


图 6 采用  $\phi 4$  mm 光阑时的激光光斑图

Fig. 6 Beam profile of the laser using  $\phi 4$  mm diaphragm

## 5 结 论

本文采用激发态 DF(v) 传能给 CO<sub>2</sub>(00<sup>0</sup>0) 的方式,在双波段激光实验平台中的 CO<sub>2</sub> 增益模块上实现了 10P20(944.27 cm<sup>-1</sup>)、10P12(955.26 cm<sup>-1</sup>) CO<sub>2</sub> 激光输出,最高光功率为 2.3 W,运转腔压为 2 kPa。受到实验平台规模的限制,激光输出功率不高。同时 DF-CO<sub>2</sub> 激光器输出功率还会受到激光器运转腔压、燃料气体注入口径、气流量变化造成的光轴移动等因素的影响。在后期工作中本课题组将继

续开展相应研究。

### 参 考 文 献

- 1 Xue Hui. Optical design of infrared search and trace system[J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(8): 2383~2386
- 薛 慧. 红外搜索与跟踪系统中光学系统的设计[J]. *光学学报*, 2010, **30**(8): 2383~2386
- 2 Fan Jinxiang. Status que and trend of infrared system and technologies for America's ballistic missile defense system[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2006, **35**(5): 536~540
- 范晋祥. 美国弹道导弹防御系统的红外系统与技术的发展[J]. *红外与激光工程*, 2006, **35**(5): 536~540
- 3 Yang Pengling, Feng Guobin, Wang Zhenbao *et al.*. Mid-

- infrared high energy laser beam detector array[J]. *Chinese J. Lasers*, 2011, **38**(7): 0702008
- 杨鹏翎, 冯国斌, 王振宝等. 中红外激光光斑探测阵列[J]. *中国激光*, 2011, **38**(7): 0702008
- 4 Fan Changjiang, Wang Zhaoqi, Lin Lie. Design of infrared telephoto-optical system with double-layer harmonic diffractive element[J]. *Chin. Phys. Lett.*, 2007, **24**(7): 1973~1976
- 5 H. Schneider, T. Maier, J. Fleissner. High-resolution 3~5  $\mu\text{m}$ /8~12  $\mu\text{m}$  dual-band quantum well infrared photodetector array[J]. *Electron. Lett.*, 2004, **40**(13): 831~833
- 6 Shi Peng, Fu Xiuhua, Sun Yan *et al.*. Design and fabrication of double wavelength laser protective infrared antireflection coatings [J]. *Chinese J. Lasers*, 2011, **38**(4): 0407003
- 石 澎, 付秀华, 孙 岩等. 双波段激光防护红外减反膜的研制 [J]. *中国激光*, 2011, **38**(4): 0407003
- 7 Yuan Shengfu, Luo Wei, Zou Qianjin *et al.*. Measurement and evaluation of middle infrared and long infrared dual-band laser emitting spectrum [J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2012, **32**(1): 83~87
- 袁圣付, 罗 威, 邹前进等. 中远红外双波段激光器光谱模拟测量与评估[J]. *光谱学与光谱分析*, 2012, **32**(1): 83~87
- 8 Luo Wei, Yuan Shengfu, Zou Qianjin *et al.*. Gain medium matching for mid- and far-infrared dual-band laser [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2011, **23**(12): 3279~3282
- 罗 威, 袁圣付, 邹前进等. 中远红外双波段激光器增益介质匹配[J]. *强激光与粒子束*, 2011, **23**(12): 3279~3282
- 9 Shengfu Yuan, Wei Luo, Baozhu Yan. Research on a middle infrared and long infrared dual-band laser[J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2012, **10**(3): 031404
- 10 R. W. F. Gross, J. F. Bott. Handbook of Chemical Laser[M]. Beijing: Science Press, 1987. 418~451
- R. W. F. 格罗斯, J. F. 博特. 化学激光手册[M]. 北京: 科学出版社, 1987. 418~451
- 11 N. G. Basov, A. S. Bashkin, V. I. Igoshin. Chemical Laser [M]. Beijing: Science Press, 1987. 418~451
- 12 R. R. Stephens, T. A. Cool. Vibrational energy transfer and de-excitation in the HF, DF, HF-CO<sub>2</sub> and DF-CO<sub>2</sub> systems[J]. *Chem. Phys.*, 1972, **56**: 5863~5878
- 13 T. A. Cool, T. J. Falk, R. R. Stephens. DF-CO<sub>2</sub> and HF-CO<sub>2</sub> continuous-wave chemical laser [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1969, **15**(10): 318~320
- 14 T. A. Cool. MDF-The transfer chemical laser; a review of recent research[J]. *IEEE Quantum Electron.*, 1973, **QE-9**(1): 72~83
- 15 Zhou Bingkun, Gao Yizhi, Chen Tirong. Principles of Lasers [M]. Beijing: National Defence Industry Press, 2007. 49~57
- 周炳琨, 高以智, 陈倜嵘. 激光原理[M]. 北京: 国防工业出版社, 2007. 49~57

栏目编辑: 宋梅梅