

# 光泵 CF<sub>4</sub> 16 微米激光器\*

伍 始 一

(中国科学院电子学研究所)

## 提 要

本文介绍了由 TEA CO<sub>2</sub> 激光器的 9R(12) 跃迁线泵浦冷却的 CF<sub>4</sub> 分子, 获得 16 μm 激光输出. 泵浦光用限孔光阑得到 TEM<sub>00</sub> 单横模, 由低气压 CO<sub>2</sub> 增益池压缩线宽, 并与光泵腔良好的模式匹配下, 以 700mJ 的泵浦源能量获得 25mJ 左右的 16 μm 激光输出能量. 光量子转换效率达 7% 左右. 激光脉宽窄于 150ns, 该器件可在约 0.5Hz 重复率下, 以 20mJ 的输出能量运转数千次.

## 一、引 言

激光分离同位素的研究在国际激光物理、化学界引起了广泛重视. 因为这种方法具有成本低、铀矿利用率高等优点, 可能成为今后解决能源短缺的重要途径之一. 激光在国民经济中如此重大的应用又反过来促进一些特定波长、高功率、高效率、高重复率的激光器的发展. 16 μm 激光是激光分离同位素研究中, 铀化合物红外光化学实验的重要波段<sup>[1]</sup>. 最近几年国际激光界有数十种 16 μm 激光的产生方法在竞争着. 目前普遍认为采用高功率、高效率脉冲 CO<sub>2</sub> 激光器的频率下转换是全面满足分子体系激光分离铀同位素要求的有希望的途径. 光泵 CF<sub>4</sub> 16 μm 激光器就是其中之一.

光泵 CF<sub>4</sub> 16 μm 激光器自 1977 年问世以来<sup>[2]</sup>, 引起了各国激光界极大的关注和兴趣. 目前这种激光器在光泵效率、频率调谐、光谱分析、脉冲重复率等方面均取得了很大的进展<sup>[3-7]</sup>.

光泵 CF<sub>4</sub> 16 μm 激光器是用选频 TEACO<sub>2</sub> 激光器的 9 μm 带的一系列激

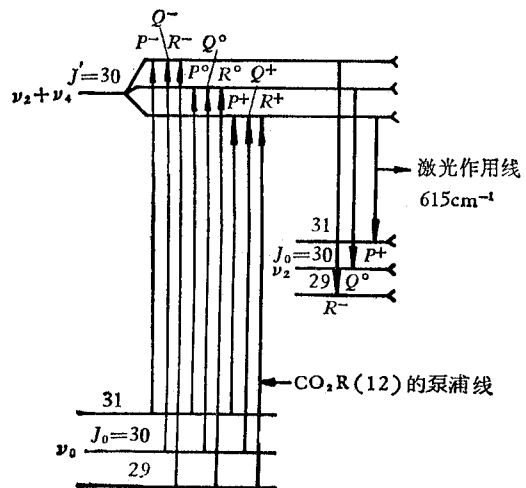


图1 CF<sub>4</sub> 激光器能级图  
Fig. 1 The energy level diagram for CF<sub>4</sub> laser

\* 1981年5月19日收到.

光跃迁线去泵浦  $\text{CF}_4$  分子的  $\nu_2 + \nu_4$  复合带, 从而形成  $\nu_2 + \nu_4$  带与  $\nu_2$  带之间的粒子数反转, 产生热带的  $16\mu\text{m}$  激光跃迁. 在  $605\text{--}650\text{cm}^{-1}$  范围内已获得近百条激光跃迁线, 如图 1 所示<sup>[8]</sup>.

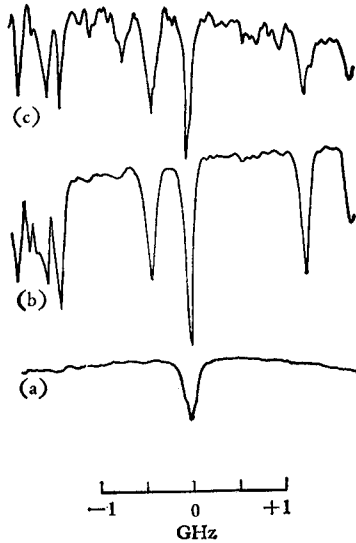


图 2  $\text{CF}_4$  二极管激光器光谱与  $\text{CO}_2 9R(12)$  线之比较. (a)  $\text{CO}_2$  在 20 托时, 对  $9R(12)$  的吸收线 ( $1073.279\text{cm}^{-1}$ ), (b) 在  $T=100\text{K}$  时,  $\text{CF}_4$  二极管激光光谱, (c) 在室温时, 二极管激光光谱  
Fig. 2 The  $9R(12)$  absorption line of  $\text{CO}_2$  at a pressure of 20 torrs (a) and the diode laser spectra of  $\text{CF}_4$  at 100K (b) and at room temperature (c)

目前我们研究的是  $\text{CO}_2$  的  $9R(12)$  跃迁泵浦  $\text{CF}_4$  的  $R(28)$  吸收线. 二条线的中心频率仅差  $30\text{MHz}$ , 见图 2<sup>[9]</sup>. 由近共振吸收产生  $P(31)$  的  $615\text{cm}^{-1}$  强激光跃迁. 这种较弱的复合带吸收过程和较强的单量子变化跃迁过程, 有可能在高功率泵浦源和吸收过程足够长的条件下, 达到较高的  $16\mu\text{m}$  激光输出. 目前已有达到  $0.1\text{J}$  的.

$\text{CF}_4$  分子是球对称分子. 对  $\text{CF}_4$  分子的深入研究表明, 科里奥利分裂和张量分裂形成极其复杂的  $\text{CF}_4$  分子光谱结构. 从激光二极管的光谱测量得知,  $\text{CF}_4$  光谱谱线是密布的, 间隔为  $0.01\text{--}0.03\text{cm}^{-1}$ , 线宽为  $0.002\text{cm}^{-1}$  左右的精细结构. 对  $\text{CF}_4$  激光的发射频率的研究<sup>[10]</sup> 已可确定在  $\nu_2 + \nu_4$  与  $\nu_2$  之间某条热带跃迁线所对应的泵浦频率. 因而在采用适当措施后, 可以满足分离同位素对光谱的苛刻要求.

## 二、光泵光路与实验装置

图 3(a) 是具有谐振腔结构的光泵系统的光路图. 图 3(b) 是获得超辐射输出的无腔结构光路图. 浦泵源是光栅选频 TEA  $\text{CO}_2$  激光器 (3) 加上低气压连续波  $\text{CO}_2$  增益池 (4) 的混合激光器. 它产生的  $9.3\mu\text{m}$  光束由红光跟踪, 通过反射镜 (8—10) 耦合进光泵腔. 光泵腔由反射镜 (14) 和  $\text{KCl}$  平镜 (12) 组成. 剩余的泵浦光束与  $16\mu\text{m}$  激光输出同时回到  $\text{KCl}$  稜镜 (11). 该稜镜将二束分开, 并由探测器 (D) 接收  $16\mu\text{m}$  输出.

**1. 混合激光器** 它是由  $100$  线/mm 光栅、两节 ( $2 \times 2 \times 60$ )  $\text{cm}^3$  放电管串接的紫外预电离 TEA  $\text{CO}_2$  激光池和长  $1\text{m}$ 、直径  $30\text{mm}$ 、气压  $10$  托、放电电流  $8\text{mA}$  左右的低气压连续波  $\text{CO}_2$  增益池联合组成的. 加上限孔光阑 (直径  $12\text{mm}$ ), 可获得窄线宽, 单横模选频的泵浦源光束.

**2. 吸收池** 它是用长  $3.77\text{m}$ 、直径  $45\text{mm}$  的石英管, 两端封上  $\text{KBr}$  的布儒斯特角窗, 外面包上铜皮制成的. 整个吸收池平放在泡沫塑料套中, 用沸腾的液氮蒸汽冷却. 池温可在室温与  $100\text{K}$  之间变化, 温度是用铜—康铜热偶测量的.

**3.  $\text{KCl}$  分光稜镜** 分光用的  $\text{KCl}$  稜镜的顶角为  $69^\circ$ . 当  $16\mu\text{m}$  输出光和剩余泵浦光以布儒斯特角入射该稜镜时, 二者以  $4^\circ$  角分束穿出稜镜, 在  $1\text{m}$  外两束可分开

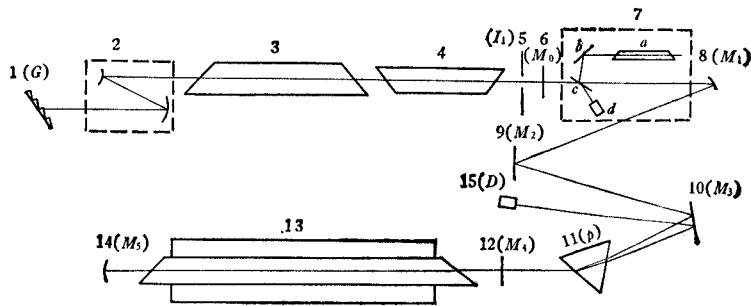


图 3(a) 光泵系统中有谐振腔结构的光路图

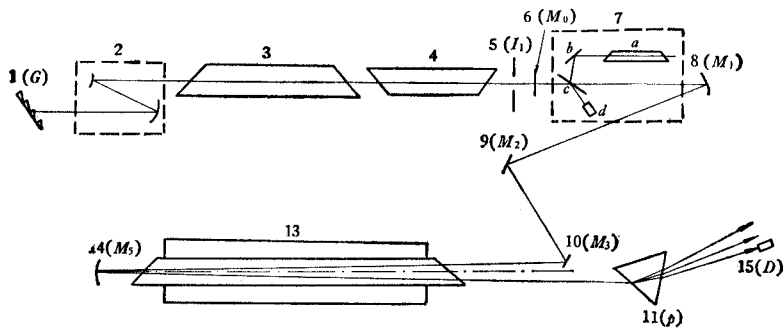


图 3(b) 超辐射输出的光路图

1—光栅 (G); 2—扩束系统; 3—TEA  $\text{CO}_2$  振荡器; 4—CW 低压增益池; 5—限孔光阑 ( $I_1$ ); 6— $\text{CO}_2$  激光输出镜 ( $M_0$ ); 7—红光跟踪系统及分束器:  $a$  为 He-Ne 管 1,  $b$  为反射镜,  $c$  为 Ge 分束片,  $d$  为分束接收器; 8—R15m 反射镜 ( $M_1$ ); 9—平面反射镜 ( $M_2$ ); 10—平面反射镜 ( $M_3$ ); 11—KCl 稜镜 ( $P$ ); 12— $16\mu\text{m}$  KCl 输出平镜 ( $M_4$ ); 13— $\text{CF}_4$  吸收池; 14—R15m 反射镜 ( $M_5$ ); 15— $16\mu\text{m}$  探测器 ( $D$ ).

Fig. 3(a) Optical arrangement for optically pumped laser system with optical pump cavity

Fig. 3(b) Optical arrangement for optically pumped laser system in superfluorescent way without optical pump cavity

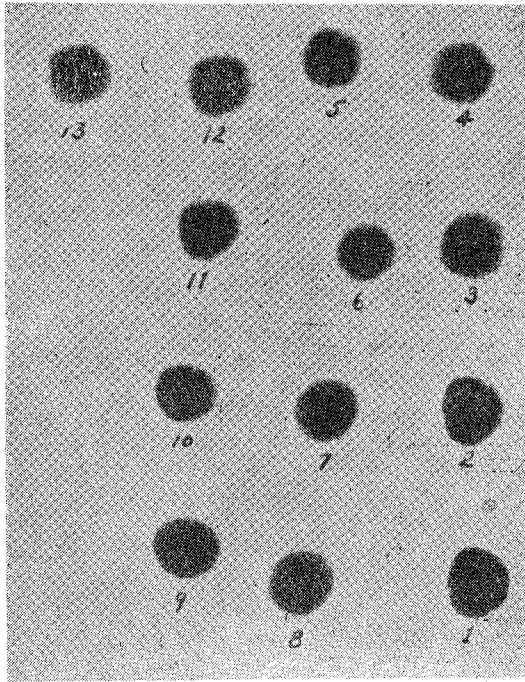
(1) grating (G) (2) beam expanding system (3) TEA  $\text{CO}_2$  device (4) CW  $\text{CO}_2$  gain cell (5) iris ( $I_1$ ) (6) output mirror (7) He-Ne laser tracer (8) (9) (10) coupled mirror (11) KCl splitting prism (12) KCl output mirror (13)  $\text{CF}_4$  cell (14) reflective mirror (15)  $16\mu\text{m}$  detector

70mm.

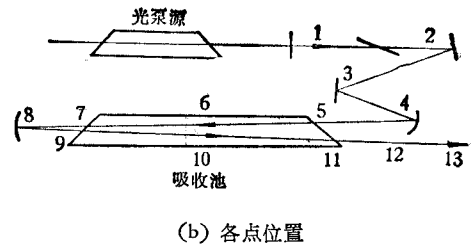
4. 光泵系统 图 3(a) 是具有谐振腔结构的光路图, 光泵腔由曲率半径为 15m 的反射镜(14)和 KCl 平镜(12)组成. KCl 平镜上镀有介质双色膜, 这使它对  $16\mu\text{m}$  光的反射率大于 60%, 对  $9.3\mu\text{m}$  光的透过率大于 90%. 图 3(b) 是超辐射输出模式的无腔结构光路图, 它的耦合镜(8)是平面镜, (10)和反射镜(14)都是曲率半径为 15m 的球面镜. 图 4(a) 是泵浦源在图 4(b) 光路上各用热敏纸显示的光斑. 从图可看出泵浦源光束在腔中有很均匀的能量密度.

### 三、实验结果和讨论

采用图 3(b) 光路, 获得了稳定的 20—25mJ 的  $16\mu\text{m}$  激光输出. 测量时用吉林大学



(a) 光斑图



(b) 各点位置

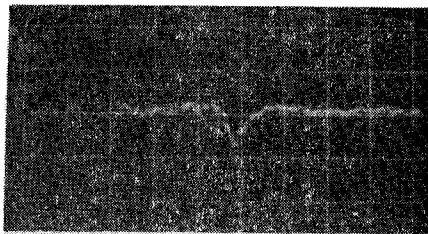
图 4 光泵源在光路各点的光斑

Fig. 4 The spots of TEA CO<sub>2</sub> laser at different points of the optical path

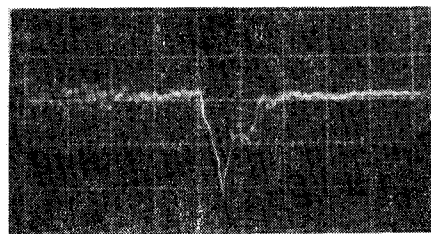
生产的热堆探测器(国家计量院校准)测量  $16\mu\text{m}$  能量;用 JN-1 能量计(国家计量院校准)测量泵浦源能量;用 Rank Hilger 公司生产的 600 型单色仪测得输出波长;采用 Ge 光子牵引探测器及 Tektronix 的 485 型示波器对泵浦光和  $16\mu\text{m}$  输出光的脉冲波形分别进行观测拍照。根据测量和实验得出以下结果。

### 1. 增益池对 $16\mu\text{m}$ 激光输出的作用

典型的 TEA CO<sub>2</sub> 激光器的激光发射谱线线宽为 3GHz 左右,它可在数十个谐振腔的纵模上振荡,由于腔长的热不稳定性会改变纵模之间的相对位置,在多次重复脉冲下有一定几率使纵模偏离 CF<sub>4</sub> 的窄吸收峰,因而导致  $16\mu\text{m}$  输出很不稳定。我们的实验表明波动可高达  $\pm 100\%$ 。另一方面 TEA CO<sub>2</sub> 激光器谱线线宽是 CF<sub>4</sub> 吸收线宽 (40MHz 左右)的数十倍,仅有一小部分脉冲泵浦能量可用来有效地激励 CF<sub>4</sub> 分子,因而泵浦效率低。采用低气压增益池后,虽然由于腔长过长



(a) 有增益池



(b) 无增益池

图 5 有无增益池时,  $16\mu\text{m}$  光脉冲波形 (200ns/格)

Fig. 5 The oscillogram of the  $16\mu\text{m}$  laser output (200ns/div)

(a) with CW gain cell, (b) without CW gain cell

未能满足获得单纵模的条件,但输出模式已锁在少数纵模上,线宽也大大压缩,实验结果表明光泵浦效率提高了7倍(如图5所示),波动性亦明显下降,由 $\pm 100\%$ 降到 $\pm 20\%$ 。

**2. 温度对  $16\mu\text{m}$  激光输出的影响**  $\text{CF}_4$  的下激光能级为  $435\text{cm}^{-1}$ , 在室温下粒子数为 15%, 由于复合带吸收弱, 不易形成粒子数的反转, 故输出极弱. 温度降低后, 可减少下激光能级的粒子数, 增加基态粒子数, 使光泵效率大大增高. 实验结果表明池温为 100 K 时比 150 K 时的输出能量增加了 1 倍 (图 6)。

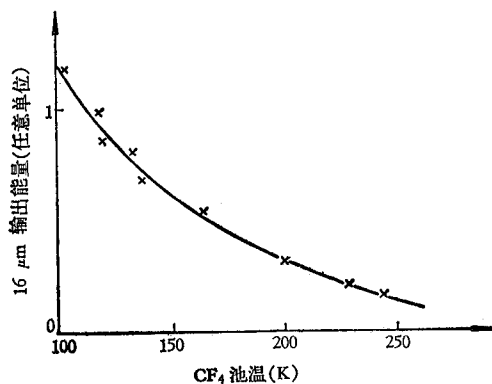


图 6  $16\mu\text{m}$  激光输出与  $\text{CF}_4$  池温的关系

Fig. 6 The output energy of  $\text{CF}_4$  laser as a function of the temperature of  $\text{CF}_4$  cell

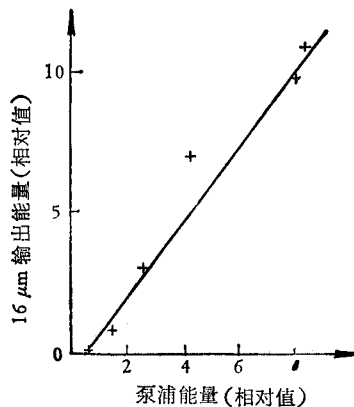


图 7  $16\mu\text{m}$  激光输出与泵浦源能量的关系

Fig. 7 The output energy of  $\text{CF}_4$  laser as a function of the pump energy

**3. 泵浦能量对  $16\mu\text{m}$  输出的作用** 实验得到器件的泵浦阈值为 65mJ. 在  $\text{CF}_4$  气压为 7 托的情况下, 泵浦源能量在 800mJ 以下时,  $16\mu\text{m}$  输出能量与泵浦源能量呈线性关系(图 7). 单模比多模泵浦总效率提高了 40%。

**4. 吸收池气压**  $\text{CF}_4$  池气压从 0.5 托至 24 托均有  $16\mu\text{m}$  输出. 130 K 时最佳气压为 5 托; 100 K 时为 6 托. 在 100 K 时较宽的气压范围内均有  $16\mu\text{m}$  输出(图 8), 有利于光泵腔内精细调谐. 池内气压从 5 托增至 18 托时,  $16\mu\text{m}$  光脉冲波形的宽度从 120ns 变到 40ns (图 9)。

**5. 模式匹配** 泵浦光束与光泵腔的模式匹配是影响  $16\mu\text{m}$  输出的重要因素之一. 除了单横模的泵浦束在整个光泵腔中有较均匀的泵浦能量密度外, 还必须使泵浦束与光腔模体体积尽量匹配以及泵浦束较充分地利用  $\text{CF}_4$  分子体积. 在实验中, 由于改进了模式匹配, 使  $16\mu\text{m}$  输出提高了二倍。

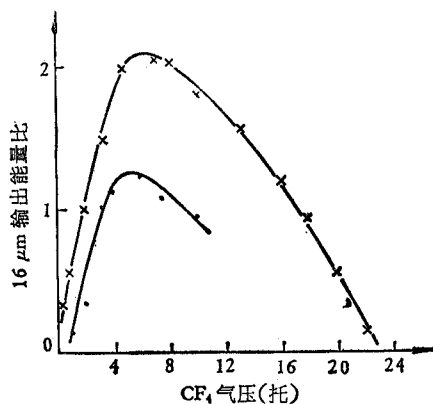


图 8  $16\mu\text{m}$  输出与气压的关系

×——130 K } 池温  
●——100 K }

Fig. 8 The output energy  $\text{CF}_4$  laser as a function of the pressure of  $\text{CF}_4$  cell (torr)  
×——at 130K cell temp.,  
●——at 100K cell temp.

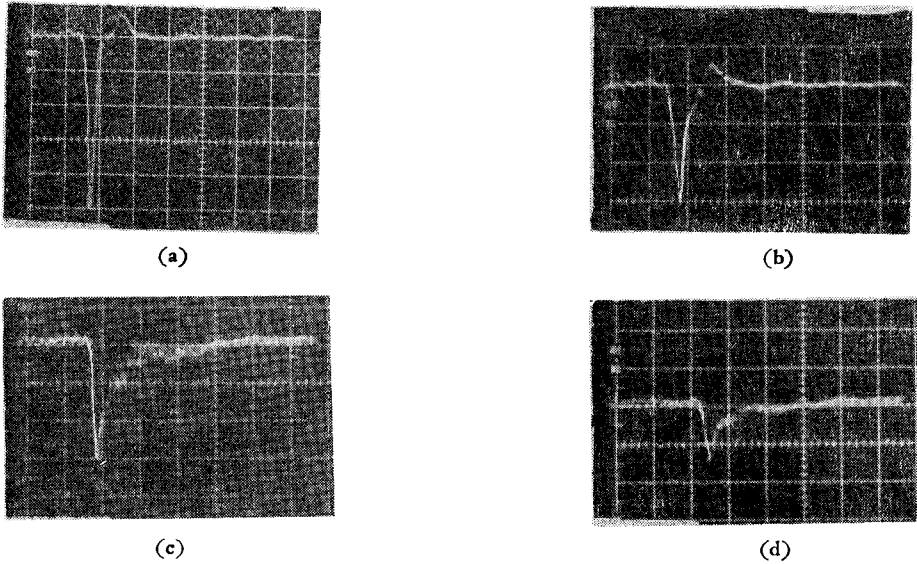


图9 不同  $\text{CF}_4$  气压下的  $16\mu\text{m}$  光波形(200ns/格)  
 (a) 18 托 (b) 15 托 (c) 6.6 托 (d) 5 托  
 Fig. 9 The shape of  $\text{CF}_4$  laser pulse with different pressure of  $\text{CF}_4$  cell  
 (a) 18 torr (b) 15 torr (c) 6.6 torr (d) 5 torr

6.  $\text{CO}_2$  的  $9R(10)$  激光跃迁线泵浦  $\text{CF}_4$  分子的实验结果 本实验用  $\text{CO}_2$  的  $9R(10)$  跃迁线泵浦  $\text{CF}_4$  分子亦获得了  $16\mu\text{m}$  输出, 但效率远小于  $R(12)$  线泵浦的效率. 与  $R(12)$  线泵浦结果不同的是在加上低气压  $\text{CO}_2$  增益池后吸收大大减小, 输出也大幅度地减少. 与本实验室以前的工作相比较, 用高压连续调谐的脉冲  $\text{CO}_2$  激光器, 在  $0.4\text{cm}^{-1}$  范围内连续调谐激光发射去泵浦  $\text{CF}_4$  分子, 所获得的  $16\mu\text{m}$  输出远比目前采用 TEA  $\text{CO}_2$  激光器的效率高. 由此可见, 像  $R(10)$  这样一些中心偏离  $\text{CF}_4$  吸收峰较远的泵浦线, 若采用高压连续调谐的  $\text{CO}_2$  激光器作泵浦源将显示出频率调谐的优越性. 同时, 低气压  $\text{CO}_2$  增益池作为压缩线宽的方法不再适用.

#### 四、结 束 语

光泵  $\text{CF}_4$   $16\mu\text{m}$  激光器的光泵浦效率是各种因素的综合结果. 实验结果证实了一个足够强的单横模, 窄线宽的泵浦源是获得稳定的  $16\mu\text{m}$  输出的基本条件, 而足够长的吸收过程、良好的模式匹配、在蒸气压限内尽可能低的  $\text{CF}_4$  池温是获得高泵浦效率的重要保证. 目前要进一步提高  $16\mu\text{m}$  输出. 应采用振荡——放大系统以获得大能量单横模泵浦源. 另外, 若以高压连续调  $\text{CO}_2$  激光器作泵浦源, 再用适当的法布里——珀罗标准具来压缩线宽, 则可在今后的  $\text{CF}_4$  激光器频率调谐工作中发挥特殊作用.

## 参 考 文 献

- [1] R. J. Tensen et al., *Laser Focus*, **12**(1976), 51.
- [2] J. J. Tice and C. Wittig, *Appl. Phys. Lett.*, **30**(1977), 420.
- [3] J. M. Tell and C. Eckerhardt, *Laser Focus*, **5**(1979), 60.
- [4] A. Stein and P. Rohinowitz, *Opt. Lett.*, **3**(1978), 97.
- [5] V. Yubaranov, B. I. Vasilov and V. S. Letokhov, *Soviet of Quant Elect.*, **8**(1978), 544.
- [6] S. S. Alimpier and G. S. Bavanov, *Sov. Tech. Phys. Lett.*, **4**(1978), 69.
- [7] А. П. Бабишев и др., *квантовая электроника*, **8**(1981), 231.
- [8] R. S. Medowell and C. R. Tones, *Opt. Lett.*, **4**(1978), 274.
- [9] L. J. Radziemski et al., *Opt. Lett.*, **3**(1978), 241.
- [10] C. W. Patterson and R. S. Medowell, *IEEE, J. of Quant Elect.*, **QE-16** (1980), 1164.

AN OPTICALLY PUMPED  $\text{CF}_4$  LASER

Wu Shi-yi

*(Institute of Electronics, Academia Sinica)*

The stimulated emission of  $16\ \mu\text{m}$  was obtained as a result of optical pumping  $\text{CF}_4$  molecules with the 9R(12) line of TEA  $\text{CO}_2$  laser. The pump efficiency has been increased by narrowing the frequency bandwidth of  $\text{CO}_2$  pump laser with a CW gain cell, and by matching well the pump source to the pumped resonator.

With a pump source energy of 700 mJ, a 25 mJ pulse energy of  $16\ \mu\text{m}$  laser output, an optical quantum efficiency of 7%, a pulse width of less than 150 ns were obtained. This laser can be operated pulsewise several thousand times with a repetition rate of 0.5 Hz.

The relations between the output energy of  $\text{CF}_4$  laser and some parameters ( $T$ ,  $p$ ,  $E_p$ ) have been determined experimentally.

The result of 9R(10) pump line is also observed, and compared with the result obtained with high pressure continuously tunable  $\text{CO}_2$  laser.