

# 光电流稳频复合腔调谐 CO<sub>2</sub> 波导激光器的研究

马养武 黄霖 陈钰清 张朝阳

(浙江大学光仪系, 杭州 310027)

**提要:** 研究了 CO<sub>2</sub> 波导激光器光电流效应及光电流稳频、复合腔调谐的 CO<sub>2</sub> 波导激光器系统。获得 60 条谱线连续分立输出。单线最大输出功率为 8 W, 长时间稳定度优于 1%。

**关键词:** 光电流稳频, 复合腔调谐

## CO<sub>2</sub> waveguide laser stabilized by OGE and tuned by a grating compound cavity

*Ma Yangwu, Huang Lin, Chen Yuyin, Zhang Chaoyang*

(Department of Optical Engineering, Zhejiang University, Hangzhou)

**Abstract:** The opto-galvanic effect (OGE) of CO<sub>2</sub> waveguide laser, and CO<sub>2</sub> waveguide laser stabilized by OGE and tuned by the compound cavity were investigated. The laser operated at 60 emission lines and the maximum single line power is 8W. The stability of laser at long time is over 1%.

**Key words:** frequency stabilization by OGE, compound cavity tuning

### 一、引言

本文报道 CO<sub>2</sub> 波导激光器光电流效应和由光电流稳频复合腔调谐 CO<sub>2</sub> 波导激光器的研究结果。研究表明, 利用 CO<sub>2</sub> 波导激光器所呈现的具有明显优势的光电流效应实现稳定频率和功率, 采用光栅复合腔实现连续调谐, 是发展稳频且可调谐多功能 CO<sub>2</sub> 波导激光器的有效途径。

实验研究表明, 随着工作气压升高, CO<sub>2</sub> 分子光电流信号的幅值、灵敏度、频率响应和信噪比也随之大大提高。并由 CO<sub>2</sub> 分子激光能级速率方程导出的光电流信号数学表达式, 解释了实验测量结果。

结合我们以前关于光栅复合腔调谐 CO<sub>2</sub> 波导激光器研究成果, 建立了稳频且连续可调谐的 CO<sub>2</sub> 波导激光器系统。复合腔具有结构紧凑和频率及功率连续可调的特点。改变复合腔光栅的入射角和“耦合腔”的耦合率, 获得 60 条谱线连续输出, 单线最大功率 8 W。采用

TP801-A 型单板机为整个稳频过程和选支过程的中心控制系统, 获得长时间功率稳定度优于 0.8% 和频率稳定度为  $10^{-9}$  的实验结果。

## 二、CO<sub>2</sub>波导激光器的光电流效应特性

### 2.1 光电流信号表达式

基于 CO<sub>2</sub> 分子激光系统的工作过程<sup>[1,2]</sup>, 由 CO<sub>2</sub> 分子激光能级速率方程导出光电流信号总响应  $S(t)$  的数学表达式:

$$S(t) = S_{01}(1 - e^{-t/\tau_{1A}}) - S_{02}(1 - e^{-t/\tau_{2A}}) \quad (1)$$

和光电流信号振幅  $R(\omega)$  表达式.

$$R(\omega) = \frac{S_{01}\tau_{1A}^{-1}}{\omega^2 + \tau_{1A}^{-2}} - \frac{S_{02}\tau_{2A}^{-1}}{\omega^2 + \tau_{2A}^{-2}} \quad (2)$$

令  $\omega_0$  为调制频率反转点, 即,  $R(\omega_0) = 0$ , 则有

$$\omega_0 = (S_{01}/S_{02})^{1/2} / (\tau_{1A} \cdot \tau_{2A})^{1/2} \quad (3)$$

式中,  $S_{01}$  和  $S_{02}$  分别表示光电流信号的高频和低频响应部分;  $\tau_{2A}$  和  $\tau_{1A}$  分别是 CO<sub>2</sub> 分子上、下能级的弛豫时间;  $t$  是系统的光场作用时间,  $\omega$  是光场调制频率。

### 2.2 CO<sub>2</sub> 波导激光器光电流信号实验测量

图 1 中, 示意了复合腔 CO<sub>2</sub> 波导激光器光电流信号测量装置。波导管长 30 cm, 管径 3 mm, 组份比例为 4:3:16:1 的 CO<sub>2</sub>、N<sub>2</sub>、He、Xe 混合气体, 在 20~100 Torr 范围内变化总气

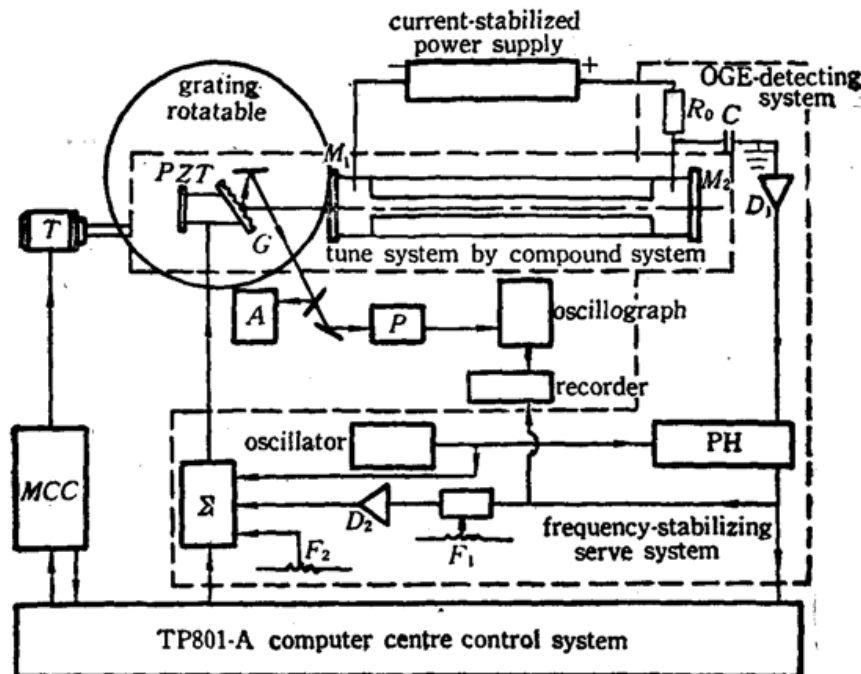


Fig. 1 Experimental setup of CO<sub>2</sub> waveguide laser stabilized by OGE and tuned by a grating compound cavity

$R_0C$ —OGE-detecting network;  $D_1$ —frequency-selection preamplifier;  $D_2$ —voltage change and power amplifier;  $F_1$ —differential compensation amplifier;  $F_2$ —bias rectifier;  $\Sigma$ —sign integration;  $PH$ —phase-detecting and synchronous integrating circuit;  $T$ —stepmotor;  $MCC$ —control circuit of stepmotor;  $A$ —CO<sub>2</sub> spectrum analyzer;  $P$ —power meter;  $G$ —grating;  $PZT$ —piezoelectric ceramic

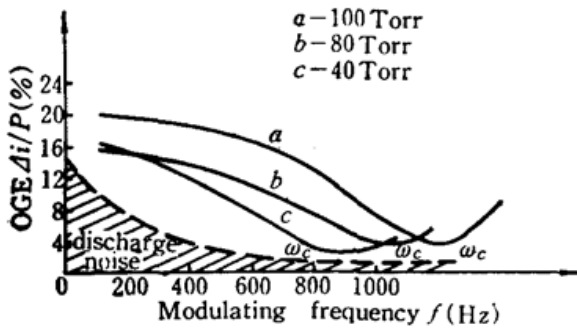


Fig. 2 OGE sign as a function of modulating frequency and pressure  $\Delta i/P$ -OGE change unit power;  $\omega_c$ -counter spot of frequency;  $I$ -operating current, 8mA.

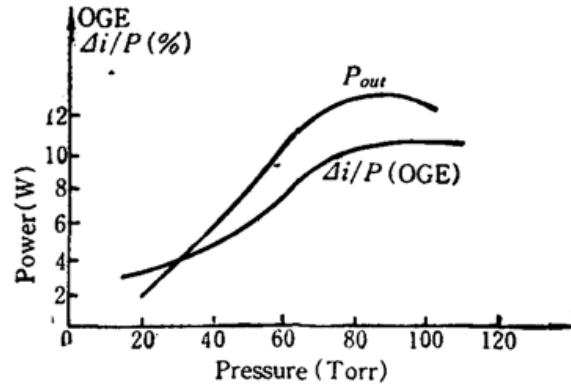


Fig. 3 OGE sign as a function of pressure and output power.  $P_{out}$ -output power;  $\Delta i/P$ - OGE variation;  $I=6$  mA,  $f=1000$  Hz

压。对每一气压，在 2~15 mA 内改变工作电流。截光频率范围为 20~2000 Hz。

### (1) 光电流信号与工作气压、调制频率关系

图 2、图 3 为光电流信号与工作气压和调制频率关系。实验测量结果表明，随着工作气压升高， $\omega_c$  移向高频端，原因是气压升高，使  $\tau_{1A}$  减小，因而 (3) 式中的  $\omega_c$  上移。同时， $\tau_{1A}$  的减小，也使 (1) 式的  $S_{01}$  项减小，因此，当系统受到低于  $\omega_c$  的频率的光场调制时，(2) 式所示的  $R(\omega)$  随着气压升高而增加。在最佳工作气压点，上、下能级之间达到最佳粒子数分布，即对应着最大光电流信号点，并且， $\omega_c$  上移意味着可用更高的调制频率，这就使放电噪声对光电流影响减小，大大改善了信噪比。

### (2) 光电流信号与放电条件关系

图 4 所示的光电流信号与工作电流、气压关系的测量结果表明：随工作电流的变化，光电流信号出现极大值，并对应于激光器的最佳工作电流。原因是，最佳工作电流，具有最大的上能级激发速率，而下能级激发速率却较小，因此 (2) 式的  $S_{02}$  项大大提高。另外较高气压的波导激光器比同样腔长的普通激光器具有明显的光电流优势。原因是较高的气压和较小的电流将使  $\tau_{2A}$  增加和使  $\tau_{1A}$  减小，因而，(2) 式中的  $S_{01}$  项锐减， $S_{02}$  项增加，即当  $\omega < \omega_c$  时，总的光电流幅值  $R(\omega)$  也增大。

显然，CO<sub>2</sub> 波导激光器所呈现的光电流特性：高的灵敏度和幅值、响应频率及信噪比，用于波导激光器稳频是很适宜的。

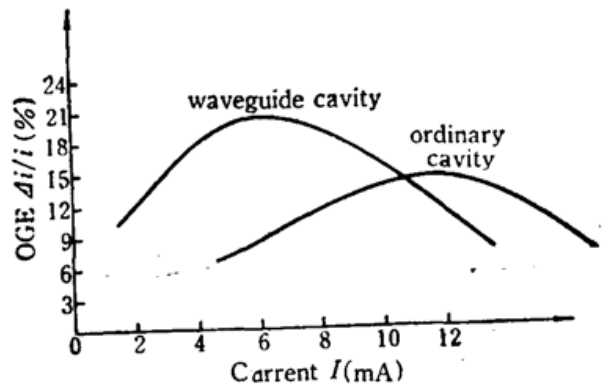


Fig. 4 OGE sign as a function of operating current and pressure ordinary CO<sub>2</sub> laser, pressure  $P=30$ Torr; waveguide CO<sub>2</sub> laser, pressure  $P=80$ Torr,  $f=1000$  Hz

## 三、光电流稳频、复合腔调谐 CO<sub>2</sub> 波导激光器

### 3.1 实验装置

结合我们以前关于复合腔调谐 CO<sub>2</sub> 波导激光器的研究成果<sup>[3]</sup>，建立了由光电流稳频、复

合腔调谐的 CO<sub>2</sub> 波导激光器系统。图 1 是系统的实验装置原理总图, 包含光栅复合腔调谐和光电流稳频伺服控制两部份。

### 3.2 光栅复合腔调谐(选支)系统

用于 CO<sub>2</sub> 波导激光器选频和调谐的腔型曾由众多的作者所研究, 并提出过多种腔型, 但这些腔型总存在有某些不足。例如, 普通光栅腔, 它的分辨率和耦合率都较低, 且在选频过程中会出现跳线现象。球面光栅腔, 虽然结构简单, 并具有好的光束质量, 但小曲率半径球面光栅加工极为困难。Fox-Smith 腔具有较小的损耗和高的分辨率, 但腔结构复杂, 调整困难, 且尺寸大, 而失去波导激光器小型化这一最大优点。据此, 我们曾提出了一种用于 CO<sub>2</sub> 波导激光器连续调谐的特殊腔型, 即图 1 所示的由光栅  $G$ , 反射镜  $M_1$ 、 $M_2$  所组成的光栅复合腔<sup>[3]</sup>。这种腔型不仅结构紧凑可靠, 而且具有高的分辨率和宽的调谐范围, 同时完全避免跳线现象。关于这种腔的基本特性已在文献[3]中详尽讨论。

光栅复合腔对满足“Littor”条件的波长, 光栅  $G$  的作用相当于腔镜, 它与部份透射镜  $M_1$  组成“F-P”腔(耦合腔), 并一起与全反镜  $M_2$  组成复合腔。由谐振腔镜反射的观点<sup>[4]</sup>, 耦合腔的作用相当于一块可变反射率  $R_{tot}$  的反射镜<sup>[5]</sup>,

$$R_{tot} = \frac{(r_1 - r_3)^2 + r_1 r_3 \sin^2 \phi_b}{(1 - r_1 r_3)^2 + 4 r_1 r_3 \sin^2 \phi_b} \quad (4)$$

式中,  $r_1$ ,  $r_3$  分别是镜  $M_1$  和光栅  $G$  的反射率。耦合腔的相位移  $\phi_b$  为:  $\phi_b = (2\pi/\lambda)L_1$ , 因此, 对于由光栅方程

$$\lambda = 2d \sin i$$

选出的每一支谱线, 通过改变耦合腔长  $L_1$ , 即可获得谐振腔的最佳耦合率。同时, 由于  $M_1$  尽可能小地靠近波导管口, 使 EH<sub>11</sub> 模能以很低的损耗耦合到 TEM<sub>00</sub> 模中<sup>[6]</sup>, 因而, 复合腔激光器不仅具有紧凑可靠的结构, 而且实现了连续调谐和高功率运转。

$G$  为原刻光栅, 光栅常数是 120 条/mm。 $M_1$  的透过率是 0.8;  $G$ ,  $M_1$ ,  $M_2$  均为平面。耦合腔长( $L_1$ )为 6 cm, 主腔长( $M_1$  与  $M_2$  间距)为 30 cm。 $G$  通过压电陶瓷固定于光栅转盘上的基座上。选频过程分两步完成: (1) 微机控制步进马达转动光栅, 选出“9~11 μm”区域内共 6) 条谱线; (2) 对每支谱线, 控制压电陶瓷电压, 即调制  $L_1$ , 获最佳输出。

另一方面, 据 F. O. Chor 等人的复合腔腔模共振原理, 耦合腔相移  $\phi_b$  变化时, 不仅会影响(4)式的复合腔总等效反射率  $R_{tot}$ , 而且也将引起复合腔振荡模总相移  $\delta_e$  的变化<sup>[7]</sup>:

$$\text{tg } \delta_e = \frac{(1 - r_1)^2 r_3 \sin 2\phi_b}{(1 + r_1^2) r_3 \cos 2\phi_b - r_1 (1 + r_3)^2} \quad (5)$$

因此, 调节  $L_1$ , 也意味着振荡模波长的调谐, 此是所研究的调谐系统的基本依据。

图 5 是由(5)式计算的  $\delta_e$  与  $\phi_b$  的关系曲线。它表明适当的  $M_1$  的透过率  $r_1$ , 将有  $\delta_e$  随  $\phi_b$  变化的敏感区。图 6 是实验测量的激光输出功率(对应于复合腔的  $R_{tot}$ )与压电陶瓷位移量(对应于耦合腔长  $L_1$ )的关系。曲线表明, 对  $L_1$  的调制也即是对复合腔的腔频和场强的调制。同样, 使腔长  $L_1$  稳定, 即意味着复合腔激光器输出功率和振荡频率的稳定。

### 3.3 光电流稳频及伺服控制系统

复合腔调谐系统执行完成选支过程后, 光电流稳频反馈控制系统即开始稳频过程。振荡器输出的  $f = 1000$  Hz 正弦波调制电压作用于已处最佳选支状态的压电陶瓷上, 由此所引入

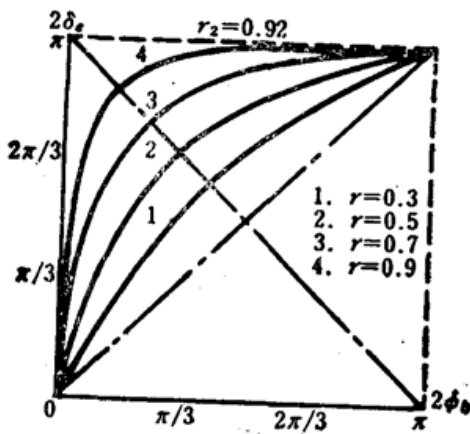


Fig. 5 Equivalent reflectivity  $r_1$  and its reflective phase change  $\delta_r$  as a function of  $\phi_0$

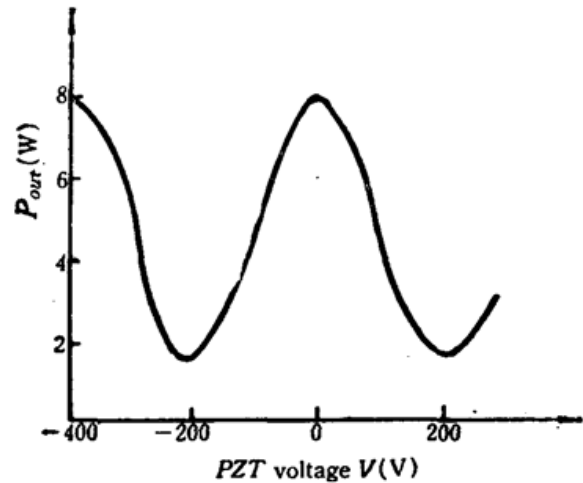


Fig. 6 Output power as a function of displacement of PZT displacement:  $\Delta L = 8 \times 10^{-3} \mu\text{m}/\text{V}$

的  $L_1$  的调制量为  $\Delta L_1$  (见图 6), 即实现激光腔内辐射场的调制 (见 (4) 式), 同时, 也伴随振荡波长在中心频率点位置的调制 (见 (5) 式)。当外界因素影响, 使激光腔长发生变化时, 由此产生的激光输出功率和频率的变化, 即影响放电管的放电阻抗, 从而取得对应的光电流变化误差信号。

如图 1 所示, 整个稳频反馈控制系统包含光电流检测和伺服反馈控制两部分。“ $R_0C$ ”网络取检的光电流信号值, 经前置选频放大器  $D_1$  放大后 (提供  $10^4$  增益), 输入伺服反馈系统, 系统中同步积分和相敏检波电路“PH”, 采用两级同步积分器和一级相关器检测微弱信号, 因而具有高的噪声抑制能力。这部分电路总增益大于  $10^4$ , 目的在于尽可能小地减少腔长  $L_1$  的调制量  $\Delta L_1$ , 以提高激光工作状态的稳定性。压电陶瓷驱动电路第一级  $\Sigma$  为信号合成, 包括锁相电路输出信号、振荡器调制信号、微机控制信号及偏压调整。合成信号经射极跟随微分放大器  $D_2$  后, 获最大为  $\pm 400$  V 输出。整个伺服电路有  $10^6$  的增益。线路微分时间为  $0.15 \text{ s} \sim 2 \text{ s}$ 。

#### 四、结果与讨论

采用 TP 801-A 型单板机作为整个装置的中心控制系统 (扩充了四个接口和设计了控制软件), 统一执行复合腔选支过程 (包括: 光栅入射角调节、定位; 耦合腔耦合率的调节、定位) 和光电流稳频伺服反馈控制过程。整个复合腔调谐光电流稳频 CO<sub>2</sub> 波导激光器系统获得如下实验运行结果:

复合腔选支全过程, 共选出 60 条谱线, 它们是:  $00^0 1-10^0$  跃迁的  $P(12)-P(44)$  和  $R(14)-R(42)$ ;  $00^0 1-02^0$  跃迁的  $P(14)-P(44)$  和  $R(16)-R(38)$ ; 全部谱线的波长分布范围是从  $9.183 \mu\text{m} \sim 10.860 \mu\text{m}$ ; 最大单线 ( $P(22)$ ) 输出功率达 8 W, 图 7 是所记录的激光谱线的输出功率。

对于各支稳定运转状态的输出谱线, 采用  $f = 1000 \text{ Hz}$ 、振幅为  $\pm 50 \text{ V}$  (相当于  $\Delta L_1 = 0.8 \mu\text{m}$ ) 的正弦波调制耦合腔长  $L_1$ , 伺服电路积分时间为  $0.3 \text{ s}$ 。我们分别测量了各个谱带的

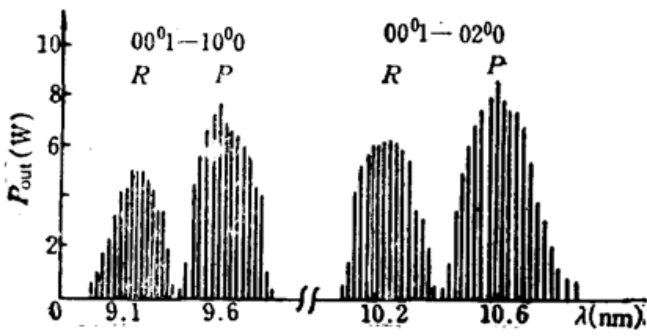


Fig. 7 The observed laser emission spectrum  
current:  $I=8\text{mA}$ ; pressure:  $P=60\text{Torr}$

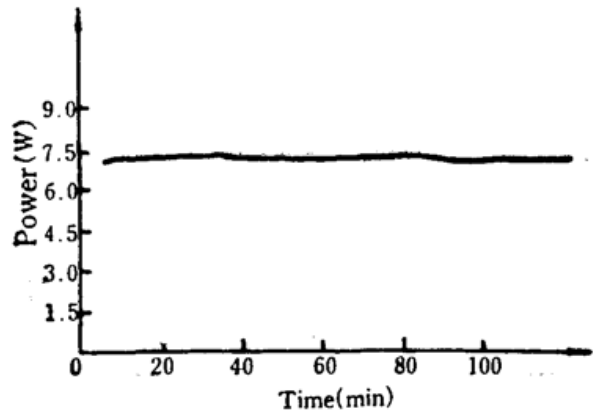


Fig. 8 Single line power stability  $00^0_1$   
 $-10^0_0$  transition  $P(22)$  line,  $I=6\text{mA}$

各支谱线的功率稳定性。结果表明,在闭环时,各支输出谱线的长时间(60 min)功率稳定性平均值是0.8%。图8给出其中的 $P(18)$ 单线输出功率曲线。

单线运转的 $\text{CO}_2$ 激光器,谐振腔长与激光器输出频率和输出功率有密切的依赖关系。计算和分析系统的频率稳定性表明,对于上述 $9\sim 11\ \mu\text{m}$ 的选频范围,相当于 $\nu=10^{13}\ \text{MHz}$ 量级的激光振荡频率,取系统输出功率平均起伏值为0.8%,由式(4)和图6可以估算出复合腔等效腔长的变化是 $\Delta L$ 约为 $3\ \mu\text{m}$ ,在系统主腔长为 $30\ \text{cm}$ 条件下,相应的单线运转频率稳定性约为 $\Delta\nu/\nu=10^{-9}$ 。

由于 $\text{CO}_2$ 波导激光器的运行特性,采用通常的方法,往往难于同时实现谱线调谐和谱线稳定(如:光谱吸收稳频法,兰姆凹陷稳频法等)。我们的研究表明,光电流稳频和复合腔调谐是发展稳频且可调谐的多功能 $\text{CO}_2$ 波导激光器的有效途径。由于 $\text{CO}_2$ 波导激光器所具有的明显的光电流优势,以及光栅复合腔具有的波导模耦合损耗低,结构简单可靠,连续可调频率和功率的特点,因此,这种组合的激光系统,既能方便地选出各支谱线,又能实现谱线的频率和功率稳定,且易获得最佳的功率输出。

### 参 考 文 献

- 1 A. L. S. Smith *et al.*, *J. Phys. D: Appl. Phys.*, **17**, 59(1984)
- 2 A. L. S. Smith *et al.*, *J. Phys. D: Appl. Phys.*, **12**, 1239(1979)
- 3 陈钰清, 马养武, 中国激光, **13**, 29(1986)
- 4 Y. E. See *et al.*, *Appl. Opt.*, **20**, 1211(1981)
- 5 C. J. Ernst, W. J. Witteman, *IEEE J. Quant. Electr.*, **QE-9**, 484(1972)
- 6 R. L. Abramo, *IEEE J. Quant. Electr.*, **QE-8**, 838(1972)
- 7 F. J. Chor *et al.*, *Appl. Opt.*, **10**, 980(1971)