

CO 选支激光器中的光-电流效应

王裕民 归振兴 张顺怡
(中国科学院上海光学精密机械研究所)

提 要

本文首次报导了在选支一氧化碳激光器中所观察到的光-电流效应,指出了可能的微观过程及应用。

一、引 言

氦-氖激光器和二氧化碳激光器中由于光的共振吸收或辐射而引起的介质中放电参量变化的现象(即光-电流效应),早已为人们所观察到^[1,2]。1970年 Skolnick^[3]提出可将其用作稳频手段。1976年 Green 等人^[4]在空阴极灯和放电管中研究了很多元素的光-电流效应,并已将它发展成为一种新的光谱检测方法^[5]。对这些现象也有几种机理解释, Aoki 等人^[6]用温度效应作了解释; Pepper^[7]则从激发态的电离来解释。本文报导了在 CO 激光器中所观察到的光-电效应: 电流变化与振荡光强的关系、与振动带的关系以及电流变化的特征时间等。提出了光-电效应的几种可能的微观机理,并指出它在 CO 选支激光器的调腔、调谐指示、频率和功率稳定、分子内弛豫过程的测量等方面的可能应用。

二、实验及主要结果

实验装置及测量方法见图1。激光管放电长1.8m,管径1cm,谐振腔一端是R6M反射镜,另一端为150条/毫米的平面光栅。腔内放一调制盘,当腔内光强周期性变化时,放电参量发生周期性变化。在放电回路中阳极串接100Ω电阻接地,从电阻上取出的放电电流

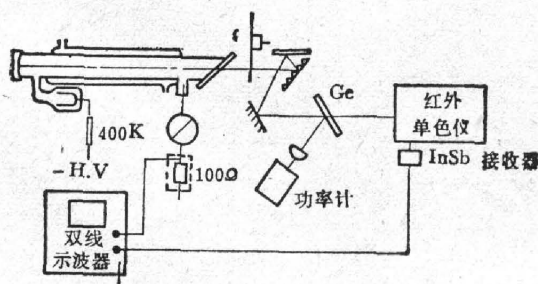


图1 实验装置

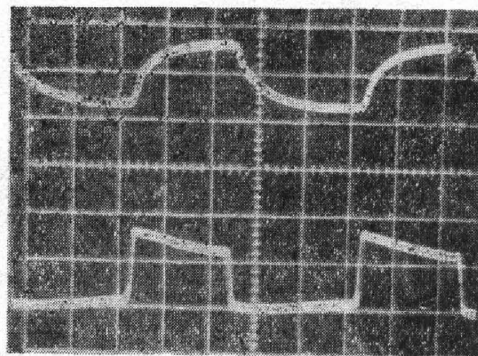


图2 电流波型(1 mA/格)(上图)和激光输出波型(100 mV/格)(下图),时标 2 ms/格

变化信号，与从单色仪出来的光信号同时输入双线示波器。电源输出电流波纹系数小于 10^{-3} 。

我们在 CO 激光器中观察到显著的光-电流效应。当直接耦合输出功率约 12W 时，若维持管压降不变，放电电流要比不振荡时增加约 7mA；当腔内光强被调制时，放电电流也发生相应的变化，图 2 给出了光强和电流变化的波型照片。从照片可见，激光开始振荡时，电流便接近指数地减小（因采用负高压放电，示波器上电流波形的极性与实际情况相反，即示波器上指数上升实际上代表指数减少）。电流变化对光强极为敏感，只要 InSb 接受器能探测到激光输出，示波器便可显示出明显的电流变化。因此我们很方便地将它用于光栅调腔及波

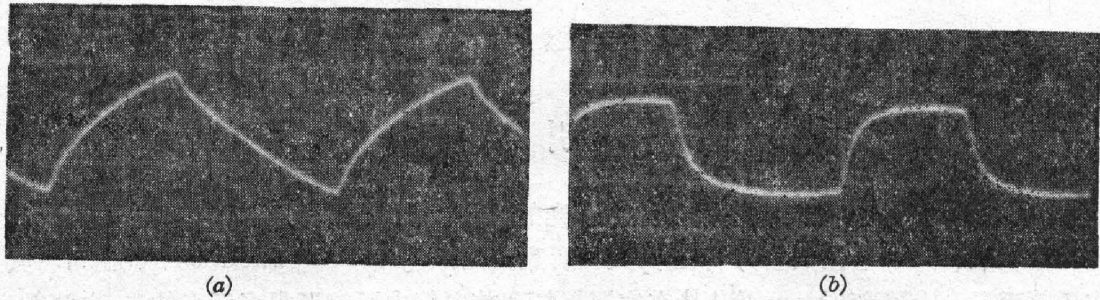


图 3 单支振荡时，不同工作电流下电流变化的波型
(a) $I_0=10\text{ mA}$, (b) $I_0=20\text{ mA}$, 示波器: 1 mA/格, 2 ms/格

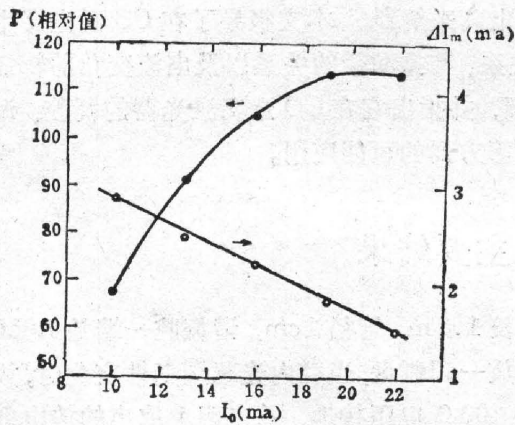


图 4 单支振荡时，激光相对输出功率(P)，当光被调制时，电流变化幅度(ΔI_m)与工作电流 I_0 的关系
(图中：实点表示输出功率，圈点表示电流变化幅度)

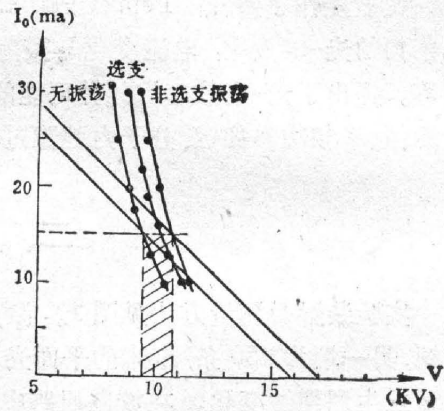


图 5 伏-安特性曲线图

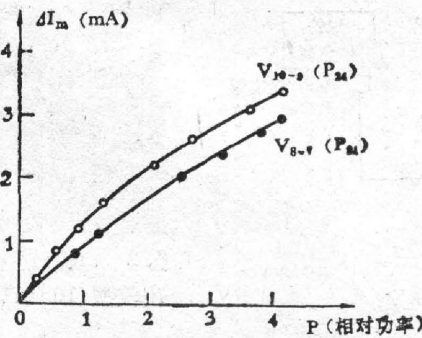


图 6 不同支振荡时电流变化幅度和输出功率的关系

长调谐指示^[8]。

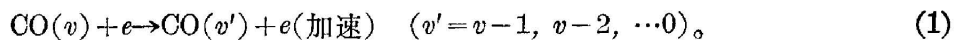
图 3 给出了电流变化波型与放电电流关系的照片, 电流越大, 电流变化的特征时间越小。图 4 画出了电流变化幅度 ΔI_m , 激光输出功率 P 与放电电流 I_0 的关系, 放电电流越大, 光电流效应越小 (ΔI_m 减少)。图 5 是测得的伏-安特性曲线, 激光振荡引起 $V-I$ 曲线移动。为了维持同样放电电流, 在有激光输出时, 输入功率要比无激光时大。我们发现, 激光输出功率与输入功率的增加值(图 5 中阴影部分)近似地成正比。

实验中, 我们还发现在同一工作电流下, 电流变化幅度与振动带有关, 振动带越高, 这个效应越明显, 典型的结果在图 6 中给出。

三、讨论结果

对原子体系及 CO_2 激光器中的光-电流效应已有较多报导和几种解释^[6,7], 但对 CO 激光器的这一效应尚无报导。根据所观察的一些现象, 本文提出如下可能的微观过程: 当激光在振动能级 $v = m+1 \rightarrow m$ 发生后, 首先引起该两能级粒子数的变化(扰动), 然后通过 $V-V$ 能量转移过程(振动态与振动态碰撞能量转移过程), 逐级引起 $m+2, m+3 \dots$ 能级粒子数减少, 如文献[9]证明, 这一扰动主要是由低振动态向高振动态传播的过程, 使粒子数在振动能级上达到一个新的平衡分布。在该过程中, 将通过下述几种方式而影响放电特性:

(1) 电子与 CO 分子振动激发态的超弹性碰撞, 使电子加速:



由于处在激发态的 CO 分子数较多($\sim 1\%$), 这个效应是显著的。它主要是增加了电子分布函数的高能尾部, 对 CO 振动激发速率影响不大, 但对电离影响很大, 如对 $\text{CO}:\text{He} = 1:20$, 20 托气体, $E/N = 1 \times 10^{-16} \cdot \text{V} \cdot \text{cm}^2$, 当 CO 的振动温度由 $4000^\circ\text{K} \rightarrow 2500^\circ\text{K}$ 时, CO 的电离速率可降低 2 至 2.5 倍^[10], 激光振荡引起高能级粒子数减少(相当于振动温度下降), 因而降低了电离速率, 导致放电电流减小。从(1)式可以看出高振动态比低振动态对电子加速更为有力, 所以随着振动能级扰动向高振动态传播, 电流逐渐减小。电流变化趋于稳定的时间应与振动扰动传播的时间相当。扰动传播的特征时间可写为^[11]:

$$\tau_{VV} \doteq \frac{n^{**} - (m+1)}{2\nu C}, \quad (2)$$

其中

$$\begin{aligned} \nu &\doteq 4\Delta E Q_{10}/T\delta_{VV}^3, \\ C &\doteq \left[\eta_V \frac{E}{N_{\text{CO}}} \frac{2.3J}{E_1} / \nu \right]^{1/2}, \\ n^{**} &\doteq \frac{1}{\delta_{VT}} \ln(C\delta_{VT}\mu), \\ \mu &= P_{10}/2\nu_0. \end{aligned}$$

n^{**} 为 CO 振动分布函数屏区上限, ΔE 为振动能级的非谐能量, δ_{V1}^{-1} 、 δ_{V2}^{-1} 分别为 $V-T$ 、 $V-V$ 交换半径, Q_{10} 、 P_{10} 分别是最低能级的 $V-V$ 、 $V-T$ 交换速率, J 及 E 为平均电流密度及电场强度, η_V 为电子的振动激发效率, 取 0.8, E_1 为 $v=1$ 能级能量, T 为气体温度, 可按 $E \cdot I = 18.9(T - T_{\text{He}})\lambda_{\text{He}}$ 估计^[12] (λ_{He} 为 He 的热导率, 本实验壁温 $T_{\text{He}} = 280^\circ\text{K}$)。利用文献[13]的数据, 对三种放电电流, 计算的振动扰动传播时间 τ_{VV} 见表 1。

表 1 电流变化的时间常数计算值与测量值比较

放电电流 (mA)	气体温度 (°K)	E/N (V·cm ²)	ν (s ⁻¹)	C (s ⁻¹)	τ_{VV} (ms)	τ_{VVT} (ms)	τ_{VT} (ms)	$\tau = (\tau_{VV}^{-1} + \tau_{VVT}^{-1})^{-1} + \tau_{VT}$ (ms)	$\tau_{测}$
10	308	0.92×10^{-16}	3.3×10^5	5.7×10^{-2}	1.2	0.88	1.5	2	2ms
15	316	1.29×10^{-16}	3.2×10^5	8.4×10^{-2}	0.88	0.51	1.2	1.52	未测
20	323	1.70×10^{-16}	3.16×10^5	11.1×10^{-2}	0.68	0.32	0.60	0.82	0.76ms

(2) VVT 和 VT 的加热效应

在 CO 分子中, 振动能量转化为平动能主要是通过 VVT 和 VT 过程。由于激光振荡减少了振动激发态的粒子数(主要是 $v > m+1$ 的能级, 而对 $v < m$ 能级影响不大)^[9], 使得气体“变冷”, 气体密度增加, 导致内阻加大, 电流减小。下面先估计 VVT 过程的时间尺度: 由文献[11]得

$$C_p \frac{dT}{dt} = \frac{4\Delta T \nu(T)}{3} C^3 \int_0^t \nu(T) dt。$$

C_p 为每个分子的平均定压比热, 上式变为微分方程为:

$$\frac{d^2T}{dt^2} - \frac{d \ln \nu}{dT} \left(\frac{dT}{dt} \right)^2 = \frac{4\Delta E C^3}{3C_p} \nu(T)^2,$$

其解为

$$T(t) = T_0 e^{t/\tau_{VVT}} \quad \text{或} \quad N \propto e^{-t/\tau_{VVT}},$$

$$\tau_{VVT}^{-1} = \nu(T) \sqrt{\frac{8\Delta E C^3}{3C_p T}} \quad (\Delta E, T \text{ 以 } ^\circ\text{K 为单位})。 \quad (3)$$

对 VT 加热过程, 利用文献[13]的结果(公式(11))得到 τ_{VT} 。

综上所述, 当激光突然建立(或切断)时, 首先引起 $v = m+1$ 能级粒子数减小(或增加), 通过 VV 能量交换过程, 扰动将在整个振动能级上传播, 但主要是在 $v > m+1$ 能级上粒子数逐次减少, 该过程通过超弹性碰撞而引起放电电流逐渐减小; 在 VV 过程的同时, 非谐能量 ΔE 转化为平动能引起气体加热(即 VVT 过程), 由于激光使激发态粒子数减少, 通过 VVT 过程气体加热也就减少, 导致气体“冷却”效果, 这个过程也使放电电流减小。由于这两个作用都是在振动扰动传播中同时出现, 所以总结果应是速率相加; 另外由于激光振荡通过 VT 过程使气体“变冷”, 只有当振动扰动传播到高振动态($v > n^{**}$)才比较显著。因为低振动态 VT 弛豫速率极小, 所以在时间上它与前面过程应是串联的。

由此, 总的特征弛豫时间可由下式估计:

$$\tau = (\tau_{VV}^{-1} + \tau_{VVT}^{-1})^{-1} + \tau_{VT}。 \quad (4)$$

表中列出了计算的 τ_{VV} 、 τ_{VVT} 、 τ_{VT} 和 τ 值, 图 7 画出电流变化相对值(图 3)的对数与时间的关系, 可见, 实验值与计算值符合得很好。这说明我们提出的微观过程的可能性, 当然搞清 CO 中光-电流效应的机理, 尚需进一步的工作, 必须统一考虑分子动力学及放电等离子体等过程。

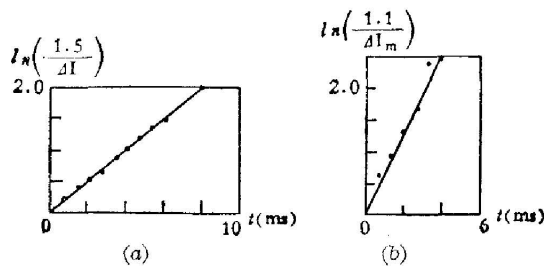


图 7 电流变化对数值与时间关系图(条件同图 3)

- (a) 放电电流 10 mA, 测量值 $\tau = 2$ ms, 计算值 $\tau = 2$ ms
 (b) 放电电流 20 mA, 测量值 $\tau = 0.76$ ms, 计算值 $\tau = 0.8$ ms

四、结 束 语

最后,应当指出,研究 CO 激光器中的光-电流效应是有一定现实的意义:

(1) 利用这一效应可不用光接受器而敏感地检测激光器输出状况,而方便地用来调腔或选支调谐指示。

(2) 由于 CO 激光器中光与电耦合极强,腔的扰动将显著地影响放电参量,由此可利用光的反馈来稳定激光输出功率和频率。

(3) 利用光-电流效应,研究分子内能量弛豫过程,这对通常测量分子内部弛豫速率的荧光法无疑是个补充。

参加本工作的还有茅文英和胡文富同志

参 考 文 献

- [1] G. Schiffner *et al.* *Proc.*; *IEEE*, 1965, **53**, No. 10 (Oct), 1657.
A. Garscadden, S. L. Adams; *Proc. IEEE*, 1966, **54**, No. 3 (Mar), 427.
- [2] A. J. Kerecman, H. Jacobs *et al.*; *IEEE J. Q. E.*, 1969, **QE-5**, No. 9 (Sep), 474.
- [3] M. C. Skolnick; *IEEE J. Q. E.*, 1970, **QE-6**, No. 2 (Feb), 139.
- [4] R. B. Green *et al.* *A. P. L.*, 1976, **29**, No. 11 (1 Dec), 727.
- [5] W. B. Bridges *et al.* *J. O. S. A.*, 1978, **68**, No. 3 (Mar), 352.
- [6] T. Aoki *et al.*; *Japan. J. A. P.*, 1971, **10**, No. 3 (Mar), 332.
- [7] D. M. Pepper; *IEEE J. A. E.*, 1978, **QE-14**, No. 12 (Dec), 971.
- [8] 王裕民,张顺怡等;《科学通报》,1980, **25**, No.24 (30 Dec), 1116.
- [9] А.П. Напармович *и др.*; *Квант.электр.* 1977, **4**, № 10 (Окт), 2125.
- [10] W. L. Morgan, E. R. Tisher; *Phys. Rev. (A)*, 1977, **16**, No. 3 (Sep), 1186.
- [11] С. А. Жданок *и др.*; *ЖЭТФ*, 1979, **76**, № 1, 130.
- [12] "High-Power Gas Laser" 1975, ed. E. R. Pike; 243~267.
M. L. Bhaunik; "High-efficiency electric discharge CO lasers".
- [13] Т. Ф. Тордиец, Ш. С. Мамедов; *ЖТФ*, 1977, **47** № 4, 831.

Opto-galvanic effect observed in branch-selected CO laser

WANG YUMIN, GUI ZHENXING and ZHANG SHUNYI

(Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Academia Sinica)

(Received 26 May 1980)

Abstract

In this paper the opto-galvanic effect observed in branch selected CO laser is first reported. The possible microscopic processes are proposed and the application of the effect is predicted.