第7卷 第2期
1987年2月

光 学 学 报
ACTA OPTICA SINICA

Vol. 7, No. 2
Feberuary, 1987

CO_2-N_2 系统中光电流信号的产生机理

周光地 王朝华 杨明江
(中国科学院力学研究所)

提 要

本文采用窄带滤波器测定了 CO_2-N_2 放电管在 CO_2 激光照射下的光电流信号，并用二阶微分网络法[1]测量了相应的电子能量分布，认为：CO_2-N_2 气体放电管中，光电流信号的产生是由于处在电子激发态上的 CO_2 分子和 N_2 分子受到 10.6 μm 激光扰动，逐级电离的速率发生变化所致。

关键词：光电流效应，电子能量分布，逐级电离，激光激发。

一、引 言

CO_2 激光器是一种能量转换效率高、用途广泛的气体激光器。国内外研究者发现：CO_2-N_2 放电气体可以产生很强的光电流效应，但对其机理还没有一致的解释。例如 Lobov (1971 年)[3] 等人认为：光电流的产生主要是光辐射场引起了放电气体的电子迁移率发生变化，忽略了电离速率的变化；1979 年 Smith[3,4] 等人认为 CO_2-N_2 放电气体中的光电流的产生是由于光辐射场引起局部气体温度变化，导致电子和分子的碰撞频率改变所致。1972 年 Gehardt[5] 等人用马赫干涉仪发现：在 CO_2 激光作用下，CO_2-N_2 放电管中的局部气体密度发生了不到千分之一的变化。1982 年，Nowicki 等[6] 提出异议，他们认为处于电子基态的 CO_2 分子能级与其电离能级相距甚远，电离过程不能直接由 CO_2 分子的这些能级产生。他们假设：在光辐射场作用下，电离速率的变化是由于处在电子基态的 $N_2(v=1)$ 分子数目发生了变化，通过 N_2 分子的 $B^3\Pi_g$ 态产生的。这种观点遭到了 Smith[4] 等人的反对，Smith 等人认为：N_2 分子的 $B^3\Pi_g$ 态是亚稳态，而且 N_2 分子不存在时，光电流信号仍然存在。

为了进一步探讨 CO_2-N_2 放电气体中光电流信号的产生机理，我们对 CO_2-N_2 放电管的光电流信号和放电气体中的电子能量分布进行了测量，并对结果作了讨论。

二、实 验 装 置

实验装置如图 1 所示。其中放电管长 40 cm，内径 1.2 cm，两端是 NaCl 平面窗口。CO_2 激光器的输出功率在 14～22 W 内连续可调，用频率为 20 Hz 的斩波器调制光辐射场，通过一个 $Q=10$($Q=f_0/\Delta f$, f_0 是带通中心频率，Δf 是衰减 3 dB 处的带宽) 的窄带滤波器测量放电管的光电流信号，用电探针二阶微分网络法[1] 测量放电正柱区的电子能量分布。

三、实验结果与讨论

我们对总气压 $P=2.6$ Torr，分压比 $P_{CO_2}:P_{N_2}=1:1.5$ 的放电管在 CO_2 激光照射下，光

收稿日期：1985 年 7 月 8 日；收到修改稿日期：1986 年 4 月 28 日

© 1994-2009 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

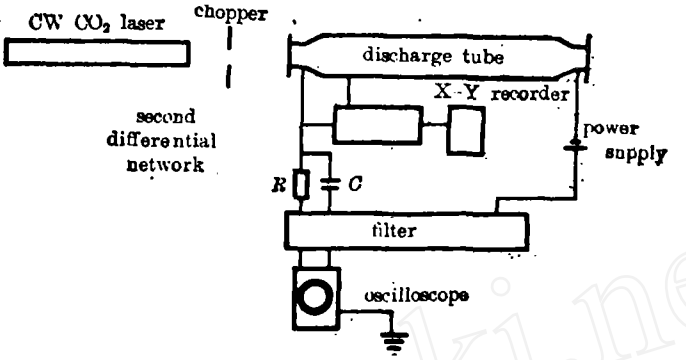

Fig. 1　Experimental Apparatus

电流信号和相应的电子能量分布作了测量。实验结果表明：

(1) 当作用于放电管的光辐射场强度 P_W 恒定时，光电流信号的强度不是放电电流的单调函数。在放电电流 $i_D=7.5$ mA 时，光电流信号最强，增加或减小放电电流，光电流信号都减弱，如图 2 所示。

(2) 当放电电流恒定时，光电流信号的强度不是作用于放电管的光辐射场强度的单调函数。光电流信号的强度随着光辐射场强度的增加经过一极大值后又下降，如图 3 所示。

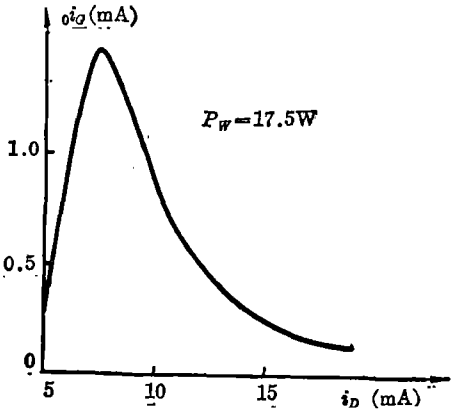

Fig. 2　Relation between OGS and Discharge Current

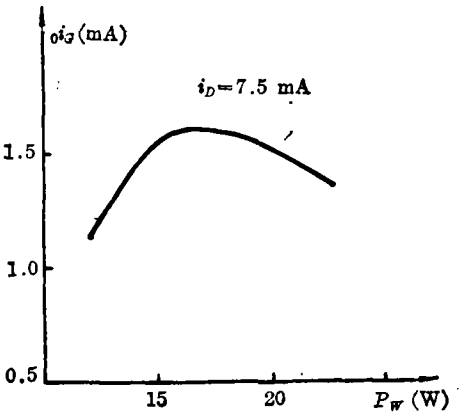

Fig. 3　Relation between OGS and Intensity of Radiant Field

(3) 光电流信号的强度与放电管中的电子能量分布和电子密度有着密切的关系，如图 4、图 5 所示。图中实线和虚线分别表示无光辐射场和有光辐射场条件下记录的曲线。

(4) 当放电管内只充有 CO_2 气体时，会产生较弱的光电流信号，如图 6 所示。

根据 Druyesteyn 方法[7]，电子能量分布函数 $f(E)$ 与电子密度 n_e 的乘积可表示为

$$n_e f(eV_p)=\frac{\alpha}{e^2A_p^2}\left(\frac{2m}{e}\right)^{1/2}\cdot V_p^{1/2}\frac{d^2i}{dV_p^2}, \tag{1}$$

其中 m、e 分别是电子的质量和电荷，A_p 是球形探针的表面积，V_p 是探针对周围等离子体的电位差，(d^2i/dV_p^2) 是探针电流对电压的二阶导数。

对(1)式积分，可以计算出在光辐射场作用下，放电管中电子密度的相对变化量。表 1 给出了在光辐射场作用下，放电电流和电子密度相对变化量的比较。其中 P_W 表示入射光

© 1994-2009 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

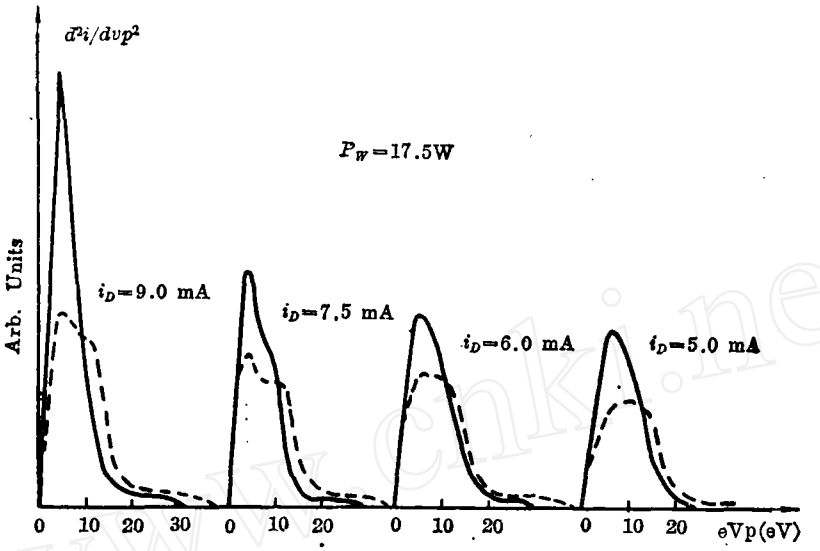

Fig. 4 Changes of $d^2i/dV_p^2 \sim eV_p$ distribution with the changes of discharge current

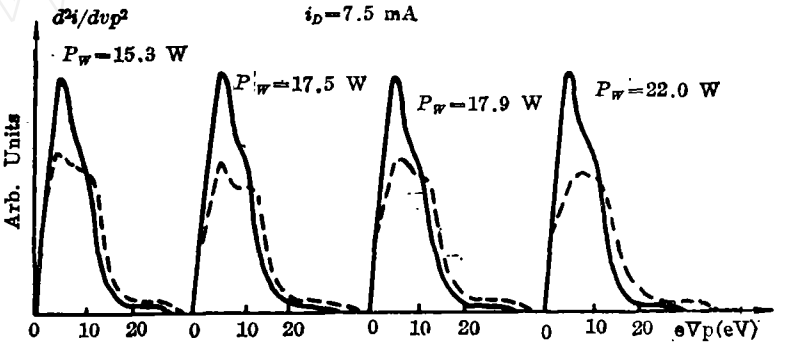

Fig. 5 Changes of $d^2i/dV_p^2 \sim eV_p$ distribution with the changes of intensity of radiant field

辐射场强度；i_{0G} 和 Δn_e 分别表示在光辐射场作用下，放电管的电流增量和放电气体中的电子密度的增量。

由表1可以看到，(i_{0G}/i_D) 与 $(\Delta n_e/n_e)$ 的比例相当，说明光电流效应的产生的确是由于光的照射引起电离加强所致。

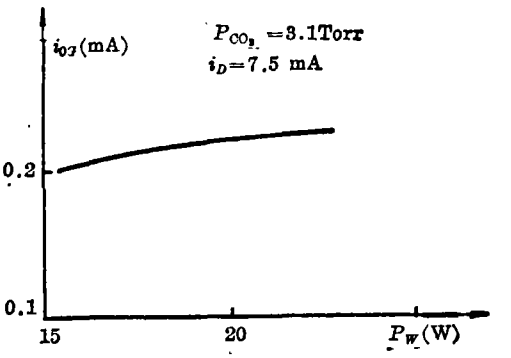

Fig. 6 Changes of OGS in the discharge filled with pure CO_2 with the changes of intensity of radiant field

从图4、图5中可以看出，无论是保持光辐射场恒定改变放电电流，还是保持放电电流恒定改变光辐射场强度，电子能量分布都有很显著的变化。当光辐射场作用 CO_2-N_2 放电管时，放电气体正柱中电子能量分布曲线出现了两个较大的峰。一个峰位于6～7 eV 附近，另一个峰位于10～11 eV 附近。与图2、图3的实验结果对照：在光电流信号强时，这两个峰的高度相差最大(≤15%)；在光电流信号较弱时，这两个峰的高度较接近，甚至分辨不出。

© 1994-2009 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

Table 1　Comparison between the relative changes of discharge current and electron density under optical radiant field

P_W(W)	i_D(mA)	i_{0G}(mA)	i_{0G}/i_D	$\Delta n_e/n_e$
17.5	5.0	0.35	7.0%	4.3%
17.5	6.0	0.81	13.5%	11.0%
17.5	7.5	1.47	19.6%	16.1%

根据 Nighan[8] 的报道，N_2 分子在 5.0, 6.7, 8.4, 11.2, 12.5, 14eV 附近有几个较大的电子激发态截面。N_2 分子在 $A^3\Sigma_u^+(v=0)$，$B^3\Pi_g$ 和 $C^3\Pi_u$ 态的能量分别在 6.7, 8.4 和 11.2 附近，寿命大约是 2sec, 10 μs 和 40ns[9,10]。由于分子的电子激发态上还含有许多振动能级和转动能级，它们在强激光作用下，也会发生布居状态的变化，这种变化将影响到处于电子激发态上的亚稳态分子的数目。因为处于亚稳态上的分子和电子碰撞逐级电离或亚稳态分子之间通过彭宁(Penning)反应电离的几率通常比电子基态上的分子和电子碰撞直接电离的几率大许多，所以，电子激发态上的分子布居状态的变化对放电气体中的电离度有很重要的影响。

1967 年 Crane 和 Waksberg[11] 发现，在 CO_2 激光作用 CO_2-N_2 放电管时，N_2 分子的正 2 带光谱($C^3\Pi_u \rightarrow B^3\Pi_g$)增强，$N_2$ 分子 $B^3\Pi_g$ 态上的分子可以通过自发辐射至 $A^3\Sigma_u^+$ 态上，而且亚稳态 $A^3\Sigma_u^+$ 的能级与 CO_2 分子 7 eV 的电子态能级很接近，处于 $A^3\Sigma_u^+$ 能级的 N_2 分子可以通过共振转移与 CO_2 分子进行能量交换，等效地延长了处于电子激发态上的 CO_2 分子的寿命，增强了处于电子激发态上的分子数目，使得通过 CO_2 分子和 N_2 分子的电子激发态逐级电离的数目增加。

另一方面，根据 Klein-Rossenland 关系式

$$Q_j = \frac{g_0}{g_j}\frac{\epsilon+\epsilon_j}{\epsilon}Q_{0j}(\epsilon+\epsilon_j), \tag{2}$$

如果光辐射场作用于放电管，可促使处于电子激发态的分子发生能量转换，增加亚稳态分子的数目，那么，由于低能电子与这些亚稳态分子作用发生消激发的截面很大，放电气体中的低能电子将减少，高能电子将增加。

对图 2、图 3、图 4 和图 5 的实验结果可以这样解释：在光电流信号增强时，N_2 分子的正 2 带光谱增强，引起 $C^3\Pi_u$ 态的 N_2 分子和能量为 11.5 eV 的 CO_2 分子抽空，$A^3\Sigma_u^+$ 态的 N_2 分子和能量为 7 eV 的 CO_2 分子大量聚集。为补充这些抽空能级上的分子，需要消耗更多的 11eV 左右的电子，低能电子与亚稳态分子碰撞又增加了 7 eV 的电子，结果使电子能量分布曲线中的两个峰产生较大的差别。由于 7 eV 的能量差不多刚好是 N_2 分子和 CO_2 分子从基态电离所需能量的二分之一，通过 $N_2(A^3\Sigma_u^+)$ 分子和 CO_2(7 eV)分子逐级电离加强了对能量为 7 eV 左右的电子的消耗，使得在光辐射场作用下，电子能量分布在 7 eV 附近没有很大的变化；而由于逐级电离的增加，减少了从 N_2 分子和 CO_2 分子从基态直接电离的数目，使得高能电子增加，电子温度上升。

© 1994-2009 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

四、结 束 语

CO_2–N_2 放电气体中的光电流效应的产生主要是处于电子激发态上的 N_2 分子和 CO_2 分子受到激光扰动引起布居状态发生了变化的结果。可能的过程是：CO_2 激光首先引起处于 7 eV 和 11.5 eV 电子态上的 CO_2 分的分子的振转能级布居状态的变化，加强了处于电子激发态的 CO_2 分子到 N_2 分子相应电子态 [CO_2(7 eV)→$N_2(A^3\Sigma_u^+)$, CO_2(11.5 eV)→$N_2(C^3\Pi_u)$] 的能量转移，使处于 $N_2(A^3\Sigma_u^+)$ 亚稳态上的分子数目增加，从而增加了逐级电离，产生较强的光电流信号。

参 考 文 献

[1] 周光地等;《电子学报》, 1983, No. 2, 95。
[2] J. E. M. Goldsmith; *Contempt. Phys.*, 1981, **22**, No. 2 (Mar-Apr), 235～248.
[3] A. L. S. Smith *et al.*; *J. Phys.* (*D*), 1979, **12**, No. 8 (14 Aug), 1237～1248.
[4] A. L. S. Smith *et al.*; *J. Phys.* (*D*), 1984, **17**, No. 1 (14 Jan), 71～78.
[5] F. G Gehardt; *Appl. Phys. Lett.*, 1972, **20**, No. 3 (1 Feb), 129～132.
[6] R. Nowicki *et al.*; *J. Phys.* (*D*), 1982, **15**, No. 7 (14 Jul), 1165～1180.
[7] M. J. Druyvesteyn; *Z. Physik*, 1930, **64**, 790.
[8] W. L. Nighan *et al.*; *Appl. Phys. Lett.*, 1969, **14**, No. 8 (5 Apr), 240～243.
[9] N. P. Carleton; *J. Chem. Phys.*, 1962, **36**, No. 12 (Jun), 3460.
[10] 赫光生等;《激光器设计基础》, (上海科学技术出版社, 1979), 189。
[11] R. A. Crane *et al.*; *Appl. Phys. Lett.*, 1967, **10**, No. 9 (1 May), 237～239.

Mechanism of optogalvanic signal generated in CO_2–N_2 mixture system

ZHOU GUANGDI, WANG CHAOHUA AND YANG MINGJIANG

(*Institute of Mechanics, Academia Sinica*)

(Received 8 July 1985; revised 28 April 1986)

Abstract

The optogalvanic signal (OGS) in CO_2–N_2 discharge tube irradiated by CO_2 laser has been measured by a narrow band-pass filter, and the electron energy distribution (EED) has been measured by a second-order differential circuit. It is considered that OGS in CO_2–N_2 discharge tube is generated through step ionization when CO_2 and N_2 molecules in electric excited states are disturbed, and the rate of step ionization is changed by 10.6 μm laser irradiation.

Key Words: Optogalvanic effect, Electron Energy Distribution, Step-ionization, Laser-excitation.

© 1994-2009 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net