

波导CO₂ 激光器等离子体特性研究

马养武 陈钰清

(浙江大学光仪系, 杭州)

摘要: 本文首次报导了CO₂波导激光器的等离子体特性。用双探针法测量了不同工作条件下的CO₂波导激光器等离子体的电子温度, 得到一系列确切的电子温度测量值。并且分析了电子温度与放电电流、工作气压和混合比之间的关系。

The study of plasma characteristics of CO₂ waveguide laser

Ma Yangwu, Chen Yuying

(Department of Optical Engineering, Zhejiang University)

Abstract: This paper is the first to report the plasma characteristics of CO₂ waveguide laser. The electron temperatures of the plasma of CO₂ waveguide laser in different conditions are measured by means of a double probe technique, and a series of values of the electron temperatures of plasma is obtained. An analysis is made of the dependence of the electron temperature on the discharge current, gas pressure, and gas mixture.

一、引言

与普通CO₂激光器相比, 波导激光器典型的放电特性是高气压和小工作电流。表征这种放电特性的最主要的参量是波导放电管等离子体的电子温度。各种放电条件下的等离子体电子温度的高低, 将直接关系到激光器的跃迁强度特性和能量输出特性^[1]。因此, 等离子体的电子温度特性也是在激光器研究中所必须确切测定的重要参量。

本文首次报导了关于波导CO₂激光器放电等离子体特性的研究结果。用朗缪尔双探针法^[2]测定了在不同气压、组分、工作电流、放电管管径等工作条件下, CO₂波导管等离子体的电子温度, 获得一系列不同工作条件下的等离子体的确切电子温度值, 以及电子温度与气压、组分量、电流之间的关系曲线。这些研究测量结果为CO₂波导激光器的进一步的深入研究和激光器的最佳工作参数的选取, 提供了可靠的理论依据和实验数据。

研究结果还表明, 对于通常会出现于波导激光器中的二种放电现象, 即正常辉光放电和

非正常辉光放电，在同等的放电条件下，前者比后者具有高得多的电子温度，且后者总是远离粒子数激发过程中的最佳电子温度值，因此，应避免在波导激光器运转中出现的非正常放电现象。我们的研究表明，这种非正常放电的消除，可以通过选取适宜的放电参量（气压、组分、管径等）来实现。

二、测量原理

等离子体特性研究表明，由于静电双探针^[2]（或朗缪尔）法具有屏蔽性好和不受电场影响等特点，因而它是气体激光器放电等离子体电子温度的最适宜的测量方法。静电双探针法，是在放电管的等离子体外，加置一偏压电路，电路两端分接两支探针，并一起插入放电等离子体介质的内部，以形成一个偏置回路，就可在局部区域中收集到和测量出等离子体的有关特性，即由这偏置回路测量出的探针的 $V-I$ 关系曲线，描述了等离子体的电子温度。

在用探针测量等离子体电子温度过程中，探针通常都会以某种方式干扰等离子体，而影响测量精度。为使这种影响减小到尽可能小的程度，需对双探针参量加以仔细选取。

等离子体物理表明^[2]，一个带电粒子与等离子体的相互作用都限于一个Dobey长度 λ_D 内。因此，当选定形状为圆柱型的探针时，为使探针对被测等离子体的干扰尽可能地减小，可选的圆柱型探针的圆柱半径 r 的数值是：

$$r < \lambda_D \quad (1)$$

$$\text{式中，}\lambda_D\text{是Dobey长度，}\lambda_D = (kT/8\pi n_e e^2)^{1/2} = 4.9 (T/n)^{1/2} \quad (2)$$

式中， n_e 是电子密度； T 是气体温度； k 是波氏常数。对于波导 CO_2 激光器， T 值通常在400~470K范围内， n_e 约在 $10^{-5}/\text{cm}^2$ 数量级范围，据此，由（2）式，圆柱探针的圆柱半径 r ：

$$r = 0.15\text{mm}$$

为确保测量精度，要求探针长度与圆柱半径比尽可能大。考虑到波导放电管的情况，我们选定：

$$l/r = 10$$

即， $l = 1.5\text{mm}$ 。其中 l 是探针插入等离子体介质的长度。

三、测量装置与测量过程

1. 测量装置

图1给出波导 CO_2 激光器的双探针法测量等离子体电子温度的实验装置。波导 CO_2 激光器的放电管内直径是3mm，管长30cm。全反射镜 R_1 为镀金膜平面镜；输出镜 R_2 亦是平面镜，基片是 ZnSe 晶体，两表面分别镀增反和增透膜，总透过率为13%。波导管内充以不同组分比例和总气压的 CO_2 、 N_2 、 He 和 Xe 四种混合气体。

2. 测量方法

据双探针法原理^[2]，等离子体电子温度 T_e 由下式给出：

$$T_e = \frac{\Delta V}{4} \times \frac{1 - 0.85s/X}{1 - 0.5s/X} \quad (3)$$

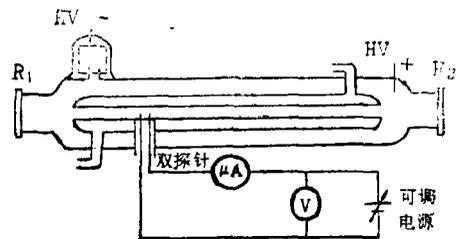


图1 双探针法测量波导 CO_2 激光器电子温度的装置

式中, $s = (s_1 + s_2) / 2$, 其中, s_1 , s_2 和 X 分别是图2中三条直线的斜率。图2给出了在所示的特定条件下, 由实验装置所测出的波导 CO_2 激光器双探针的 $V-I$ 特性曲线。

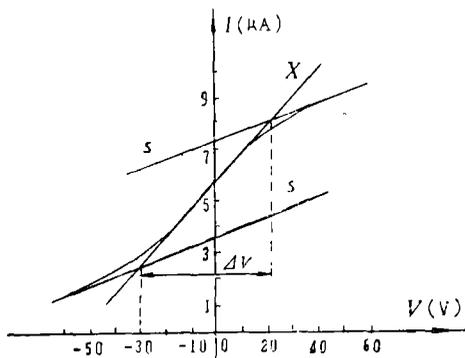


图2 波导 CO_2 激光器双探针 $V-I$ 曲线
 $\text{CO}_2:\text{N}_2:\text{He}:\text{Xe} = 1:1:4:0.3$
 放电电流5mA 总气压100Torr

我们就四种不同组分比的 CO_2 、 N_2 、 He 和 Xe 混合气体, 在不同的总气压和工作电流条件下, 用双探针法测量了等离子体的电子温度。

四、测量结果与讨论

1. 测量结果

在测量研究过程中, 我们发现, 对各种组分比都能观察到通常出现于 CO_2 波导激光器放电中的二种放电现象, 即正常辉光和非正常辉光放电。然而, 组分不同, 出现的非正常放电的几率也不同。对于某种组分比, 能在很大的气压范围 (18 Torr~150 Torr) 和工作电流范围 (1~8 mA) 内亦能观察到二种放电现象。我们给出一些不同工作条件下, 正常辉光放电状态的波导 CO_2 激光器的电子温度测量值, 以及电子温度 T_e 与不同组分比、气压、工作电流的关系曲线。同时, 也列出同一工作条件下, 二种放电状态的电子温度 T_e 的测量值, 以作分析比较。正常辉光放电状态下的 T_e 值见表 1。

表 1 电子温度 T_e 的测量值 ($\text{CO}_2:\text{N}_2:\text{He}:\text{Xe} = 1:1:5:0.5$)

T_e (eV)	I (mA)	2	3	4	5	6	7	8
150	P (Torr)	2.24	2.50	2.94	2.92	2.51	2.1	2.02
		1.87	2.13	2.40	2.22	2.01	1.89	1.91
		1.45	1.75	2.36	2.20	1.80	1.74	1.64
		1.41	1.55	2.11	2.10	1.82	1.78	1.60

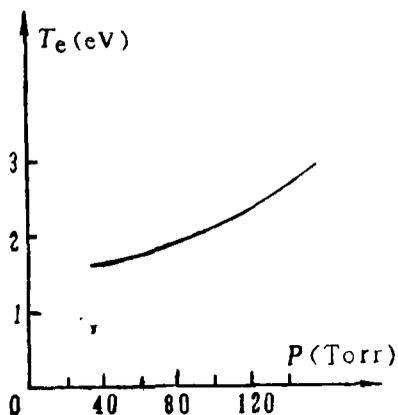
2. 讨论

在典型的 $\text{CO}_2 + \text{N}_2 + \text{He}$ 混合气体的 CO_2 激光系统中, CO_2 分子上激光能级的建立取决于 N_2 ($\nu = 1$) 的电子碰撞激发程度^[3]。而 N_2 分子电子碰撞激发截面 σ 依赖于放电等离子体中的电子平均能量^[4], 即电子温度。研究表明^[5], 对于这种典型的混合系统的电子温度分布的最适宜的范围是 2~3 eV。显然这种电子温度的适宜分布取决于气压、混合比和放电电流等放电条件的精细调整。

(1) 正常放电状态下的 T_e 与放电参数的关系

a. T_e 与总气压的关系

波导 CO_2 激光器的典型放电特性是高气压和小电流。通常工作区的气压和电流范围是100Torr和数毫安。研究表明,等离子体电子温度与总气压的关系,同混合气体组分密切相关。当 N_2 的比份低于 CO_2 比份时,随着总气压的升高, T_e 也升高,而当 N_2 的比份高于 CO_2 比份时,或Xe含量较高时,随着总气压的升高, T_e 却下降(见图3、图4)。对于波导 CO_2 激光器的气压工作范围,显然, CO_2 的比份应稍高于 N_2 比份为好。



附3 电子温度 T_e 与总气压 P 关系
 $\text{CO}_2:\text{N}_2:\text{He}:\text{Xe}=2:1:5:0.5$
 $I=6\text{mA}$

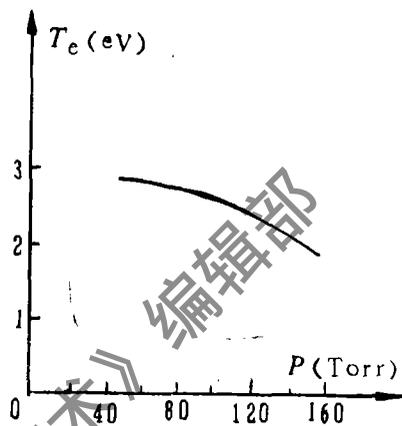


图4 T_e 与总气压 P 关系
 $\text{CO}_2:\text{N}_2:\text{He}:\text{Xe}=1:3:5:0.5$
 $I=6\text{mA}$

b. N_2 和He的影响

研究表明,混合气体中 N_2 气组分增加,将使等离子体的电子温度下降(见图5)。这是因为 N_2 分子具有较大的激发截面^[3],随着 N_2 比份的增加,电子碰撞激发几率也增加,而使得平均电子温度下降,显然混合气体中 N_2 的组分是至关重要的。如图3、图4所示的总气压与 T_e 的关系曲线中可见, N_2 与 CO_2 比份相近或稍低时,将使波导管等离子体具有最适宜的电子温度,这将有利于输出功率的提高。

He的含量多少,对 T_e 的影响不太明显。随着He含量增加, T_e 略有上升。原因是He改变了电子能量分布^[6],使得波导管等离子体中具有较高能量的电子数目有所增加。我们的研究表明,对于总气压在100~150Torr的波导 CO_2 激光器,He的组份比 P_{He}/P (见图5)

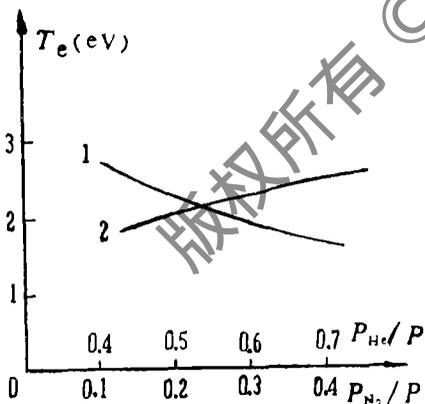


图5 T_e 与He、 N_2 组分关系
 $\text{CO}_2:\text{N}_2:\text{He}:\text{Xe}$ 为1:(0.6~3):5:0.5或为1:1:(3~5):0.5
 1- P_{He}/P 2- P_{N_2}/P

为0.6时,即 $\text{CO}_2:\text{N}_2:\text{He}:\text{Xe}=1:1.5:5:0.5$,是适宜的He含量,相当于 T_e 具有2.5eV的数值,这是最适宜的电子温度。

c. Xe的影响

Xe的加入, 明显地改变放电等离子体中电子能量的分布状态^[7], 使适合于N₂和CO₂分子碰撞激发能量的电子数目的含量大大增加, 而使建立激光上能级的电子碰撞截面 σ 明显增大, 加速了激光能级间的粒子数反过程和和提高反转密度数。我们的研究表明, 对于波导CO₂激光器, Xe的组分含量为 $P_{Xe}/P=0.04$, 是适宜的范围, 相当于具有2.5eV的最佳电子温度。

d. 放电电流对 T_e 的影响

波导CO₂激光器的放电电流通常在2~10mA范围。我们发现, 在这个工作区域, 电子温度的变化并不很敏感, 特别是在典型的4~8mA的工作区, 只要气体的组分比和总气压适宜, 等离子体即可能有2.5eV的最佳电子温度。在图7中, 给出 T_e 与 I 的关系曲线。

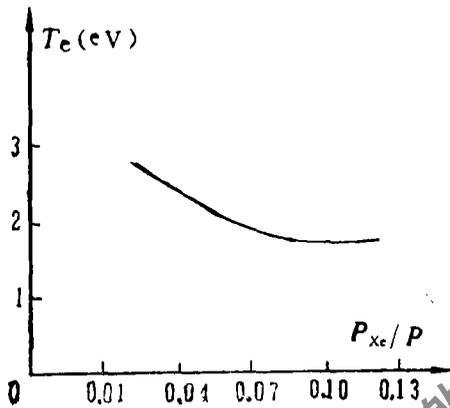


图6 T_e 与Xe组分的关系

CO₂:N₂:He:Xe=1:1:5:(0.1~1)

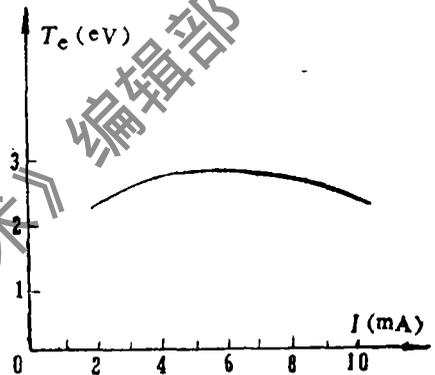


图7 T_e 与放电电流 I 的关系

CO₂:N₂:He:Xe=1:1:5:0.5
总气压为130Torr

(2) 非正常放电状态下的电子温度 T_e

在波导CO₂激光器等离子体特性的研究中, 无论是哪一种混合气体组分比例和总气压的高低, 都可观察到不同于正常放电的放电现象。这种异常的辉光放电现象, 貌似电晕放电^[8], 而进一步深入分析观察, 它不可能是电晕放电(管压降、电极形状、工作气压)。我们称之为非正常辉光放电。在对这种放电状态的研究表明, 同样放电条件下(气压、组分、放电电流), 非正常放电状态下的等离子体电子温度远小于正常放电状态下的电子温度(见表2)。各个工作电流下, T_e 值均不能超过1eV, 远偏离于最佳的2.5eV电子温度值, 其结果也显示了输出功率明显低于正常放电的工作状态。因此, 这种非正常的放电现象是必须消除的。在研究中发现, 非正常放电现象的出现几率与混合气体的组分比和波导放电管的管径密切相关, 例如, 同一管径的波导管($\phi 3\text{mm}$), 混合比CO₂:N₂:He:Xe=1:2:5:0.3时, 出现非正常放电的几率远小于混合比为CO₂:N₂:He:Xe=2:1:5:0.3时的出现几率。同一混合比, 管径大的波导管出现非正常放电的几率也小于管径较小的出现几率。这表明, 波导管中等离子体的电子温度和电子能量的分布, 也将直接影响到放电的状态和放电的稳定性。显然, 如果我们能依据等离子体中的最佳的电子温度值, 选取适当的放量参电(组分比、放电管管径、

总气压等), 不仅能获得最佳的输出功率, 而且也能提高CO₂波导激光器放电的稳定性。

表2 非正常与正常放电状态下的电子温度测量值

T_e (eV)	I						
		1.2mA	2mA	3mA	4mA	5mA	6mA
正常放电		1.56	1.89	2.13	2.40	2.32	2.28
非正常放电		0.45	0.66	0.70	0.77	0.81	0.80

注: CO₂:N₂:He:Xe=1:1:5:0.5, 总气压: $P=115\text{Torr}$

参 考 文 献

- [1] Smith A L S et al., J.Phys. D, 1979, 12:1237
- [2] [美] 克拉尔 N A 著, 等离子体物理学原理。北京: 原子能出版社, 1983
- [3] Chen P K, IEEE J.Q.E., 1967, QE-33:683
- [4] Bokhan P A, J.Appl.Spectros. (USSR), 1967, 7:954
- [5] Wiheman W J, A .P.L., 1967, 11:337
- [6] Norgovoclov M Z et al., IEEE J.Q.E., 1971, QE-7:510
- [7] Clark P O et al., IEEE J.Q.E., 1968, QE-4:263
- [8] 江剑平等, 阴极电子学与气体放电理论。北京: 国防工业出版社, 1980

作者简介: 马养武, 男, 1946年7月出生。讲师。现从事激光技术与器件的研究工作。
陈钰清, 男, 1936年10月出生。教授。1985年赴西德进修一年, 现从事激光技术与器件研究工作。

收稿日期: 1989年12月29日。

收到修改稿日期: 1990年3月3日。

· 简 讯 ·

自冷式CO₂激光穴位照射临床应用

江苏徐州市第四人民医院激光针灸室1983年底开始采用天津南开大学研制的自冷式CO₂激光针灸仪, 散焦照射经络穴位, 在内科、外科、神经科、骨伤科、妇儿科、皮肤科、五官科治疗慢性气管炎、支气管哮喘、慢性腹泻、颈腰椎增生、腰腿痛、肩周炎、腹部炎性包块、痛经、急性乳腺炎、冻疮、前列腺炎等病症, 经临床观察疗效满意, 对某些病种治疗效果优于He-Ne激光及针灸。自冷式CO₂激光针灸仪体积小, 携带方便, 操作简便, 不需水冷却, 适合无自来水的农村、工矿。

(张育勤 供稿)