

文章编号: 0258-7025(2003)02-0120-03

# 射频激励的铜和金离子激光器中等离子体特性的实验研究

黄建军<sup>1,2</sup>, 刘正之<sup>2</sup>, 梁荣庆<sup>2</sup>, D. Teuner<sup>3</sup>

(<sup>1</sup> 深圳大学理学院, 广东 深圳 518060; <sup>2</sup> 中国科学院等离子体物理研究所, 安徽 合肥 230031)

<sup>3</sup> 德国鲁尔大学电子工程与信息技术系, 德国 波鸿 D-44780

**摘要** 通过对射频(RF)放电电压电流及其相位角的精确测定, 结合射频放电的物理模型与等效电路, 对金属铜和金电极 He 气中的射频放电进行实验研究, 得出射频放电溅射型铜和金离子等离子体电阻、容抗、鞘层厚度与电流密度的关系; 在 Goydak 模型的基础上计算出电子密度, 得出电子密度与气体压强、放电电流密度之间的实验曲线, 并对两电极进行了比较。

**关键词** 等离子体物理学; 金属离子激光器; 射频溅射

**中图分类号** O 53 **文献标识码** A

## Experimental study on RF-discharged plasma characteristics in Au and Cu ion Laser

HUANG Jian-jun<sup>1,2</sup>, LIU Zheng-zhi<sup>2</sup>, LIANG Rong-qing<sup>2</sup>, D. Teuner<sup>3</sup>

<sup>1</sup> School of Science, Shenzhen University, Shenzhen, Guang Dong 518060, China

<sup>2</sup> Institute of Plasma Physics, The Chinese Academy of Science, Heifei, Anhui 230031, China

<sup>3</sup> Department of Electrical Engineering and Information Technology, D-44780 Bochum Germany

**Abstract** The discharge plasma characteristics of the RF sputtered Cu and Au in He gas are investigated. The sheath thickness and the real and imaginary part of the plasma impedance are obtained. In addition, on the basis of Gadyak's RF discharge model, the electron density in the discharge plasma is calculated for different pressure and current density.

**Key words** physics of plasma; metal ion laser; RF sputter

## 1 引言

由于大功率连续紫外激光器能够作为染料激光器的抽运源, 或直接应用于激光化学、激光生物、激光医学、激光光谱和非线性光学的研究; 同时在激光光刻、激光书写和激光显微等方面, 能够提高刻录精度和分辨率, 便于快速扫描和时间调制等, 因此具有广阔的应用前景, 一直受到研究者的青睐。目前获得紫外连续或脉冲功率的激光器主要是金属离子(Au, Ag, Cu)激光器, 其紫外谱线范围为 200~290

nm, 激励方式为空心阴极放电。由于空心阴极放电存在严重的阴极溅射而造成谐振腔的污染以及起弧等一系列的缺点使得激光器的寿命不长。而射频(RF)放电激励可以将电极置于放电腔外(CCRF excitation)不会产生阴极溅射而造成污染以及不易起弧等优点, 使得激光器的放电变得稳定, 从而得到长寿命的激光器, 使实用化的激光器的生产成为可能。但目前这类激光器的工作频段为可见光和红外, 连续输出的紫外波段射频激励激光器未见报道。

**收稿日期:** 2001-12-03; **收到修改稿日期:** 2002-01-31

**基金项目:** 广东省自然科学基金(编号: 980922)资助项目。

**作者简介:** 黄建军(1962—), 男, 深圳大学理学院高级实验师, 学士(目前为中国科学院等离子体物理研究所培养博士研究生), 主要从事应用等离子体技术研究。E-mail: huangjj@szu.edu.cn

这里所做的工作为 CCRF 激励的连续输出的紫外金属离子激光器积累数据打基础。

## 2 Godyak RF 放电模型

该模型<sup>[1]</sup>假定电子密度在辉光区是均匀的,鞘层中的电子密度为 0,辉光区电子的密度同离子的密度相同,放电电压、电流为正弦波(这已为实验证实),鞘层阻抗为一电容,辉光区等效为一纯电阻。鞘层电容  $C$  表示为

$$C = \frac{\epsilon_0 A}{d} = \frac{1}{\omega X_c} \quad (1)$$

式中,  $\epsilon_0$  为真空介电常数,  $A$  为电极的面积,  $\bar{d}$  为鞘层时间平均厚度。等离子体放电电压  $U$  表示为

$$|U|^2 = \left(2 \frac{n_e \bar{d}^2}{\epsilon_0}\right)^2 + \left(\frac{\omega \bar{d} L}{\mu_e}\right)^2 \quad (2)$$

式中,  $\omega$  为 RF 电源的角频率,  $L$  为放电间隙,  $\mu_e$  为电子迁移率,  $n_e$  为电子密度。(2) 式中右边第一项代表加在鞘层上的电压,第二项表示加在辉光区间的电压,其值为  $U_P = I_P \cdot R_P$ ,将(2) 式改写如下

$$n_e = \frac{\epsilon_0}{2e\bar{d}^2} \sqrt{|U|^2 - (I_P \cdot R_P)^2} \quad (3)$$

式中,  $U$  为测量电压,  $\bar{d}$ ,  $I_P$  和  $R_P$  均可通过等效电路计算出来<sup>[2~4]</sup>,从而计算出电子密度<sup>[5]</sup>。实验装置及实验条件见文献<sup>[2~4]</sup>。

## 3 实验结果

对上述激光管充 He 气,压强为 1 kPa 和 10 kPa,输入射频功率从 10~100 W,频率为 13.56 MHz,在实现匹配的情况下(VSWR 约为 1.1),分别测量出激光管通过的电流、端电压以及其相位,结合放电管的等效电路,得出在不同气体压强与不同电流密度下等离子体的阻抗的实部和虚部、鞘层厚度、电子密度。

## 4 分析与结论

1) 等离子体阻抗的实部和虚部在同一个数量级,其范围在  $300 \Omega < Z < 2000 \Omega$ ,且随着电流密度和气体压强的增加而同步减少(图 2,图 3),表明随着放电电流密度的增加,欧姆能量损耗在增加,次级电子发射和电离能力增加,放电的维持机制趋同于空心阴极放电(HCD)。

2) 等离子体鞘层的厚度随着气体压强和电流

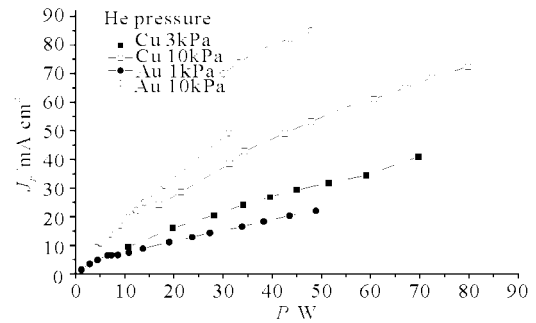


图 1 等离子体电流密度与消耗功率之间的关系

Fig. 1 Plasma current density vs the power of the plasma

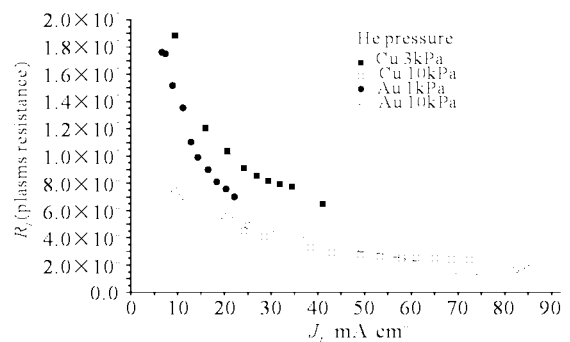


图 2 等离子体阻抗实部与电流密度关系曲线

Fig. 2 Real part of the plasma vs plasma current density

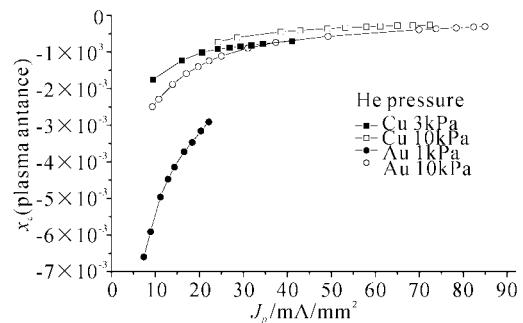


图 3 等离子体阻抗虚部与电流密度关系曲线

Fig. 3 Imaginary part of the plasma vs plasma current density

密度的增加而减小(图 4),这主要是气压和电流密度的增加导致电子密度的增加(图 5),使得德拜(Debye)屏蔽距离减小,它代表等离子体与电极之间形成的鞘层的特征厚度,与电子密度的平方根成反比。

3) 对于金属金电极来说,相同的输入功率将产生较大的电流密度,这从图 1 中可以看出,进而产生较大的电子密度。在气压达到 10 kPa,射频输入功率达到 30 W 左右时,电流密度产生一个向上跃变,

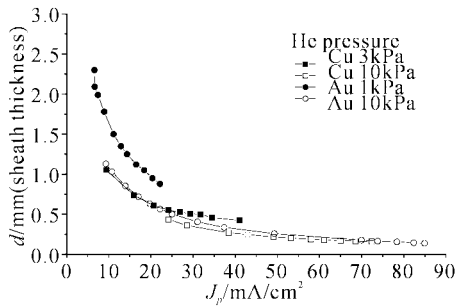


图4 鞘层厚度与电流密度的关系曲线

Fig. 4 Sheath thickness vs plasma current density

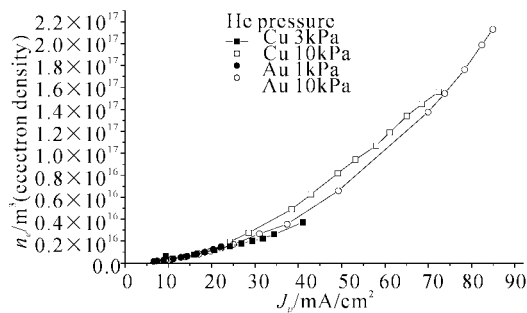


图5 电子密度与电流密度的关系曲线

Fig. 5 Electron density vs plasma current density

表明此时电极二次电子发射显著增强,而铜电极此时并没有发生类似变化。

致谢 对德国研究协会低温等离子体特别研究小组(SFB191)提供在德国期间合作研究的资助,特别是德国鲁尔大学电子工程系的 J. Mentel 教授和 Schulze 博士在实验室设备和技术以及其他方面给予的大力支持表示衷心的感谢。

## 参 考 文 献

- 1 V. A. Godyak. Soviet Radio Frequency Discharge Research [M]. Falls Church, VA: Delphic, 1986
- 2 Huang Jianjun, Yu Jianhua, D. Teuner. The probe measuring voltage current and the angle of the phase of RF discharge [J]. *Instrument Technique and Sensor* (仪表技术与传感器), 2000, **11**:1~2 (in Chinese)
- 3 Huang Jianjun, Yu Jianhua, D. Teuner. Measuring of voltage current phase angle and power at RF discharge [J]. *Electrical Measurement & Instrumentation* (电子测量与仪表), 2000, **9**:25~27 (in Chinese)
- 4 Huang Jianjun, Yu Jianhua, D. Teuner. Experimental study on impedance characteristics of the Cu ion laser at RF discharge excitation [J]. *Chinese J. Lasers* (中国激光), 2002, **A29**(2):107~109 (in Chinese)
- 5 Huang Jianjun, Yu Jianhua, D. Teuner. Plasma diagnosis of RF discharge by using impedance [J]. *Acta Physica Sinica* (物理学报), 2001, **12**(8):2403~2407 (in Chinese)