

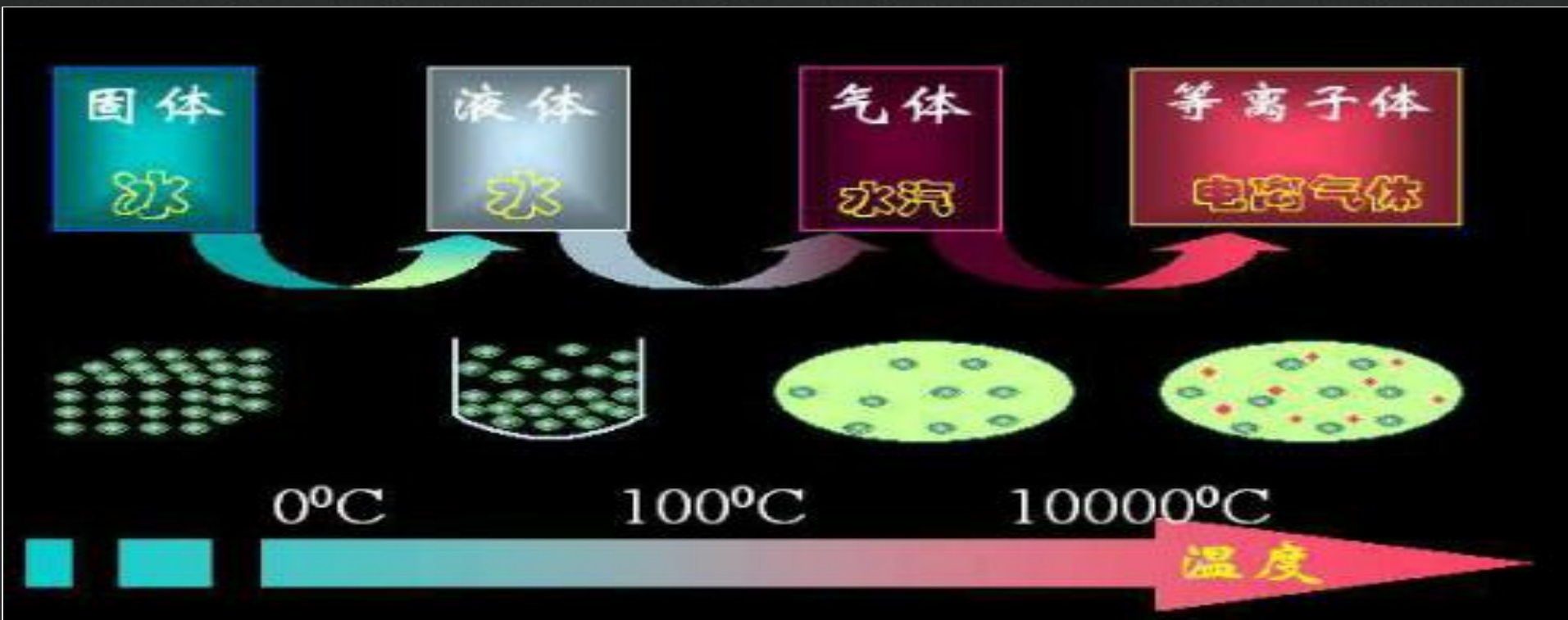
# 等离子体物理实验

——等离子体特性研究及光谱测量

朱令涵 13307110503

张海云 13340190002

# 等离子体



宏观准中性  
集体效应

# 内容：

一、 原理简介

二、 等离子体的I-V特性

三、 帕邢定律的验证（影响击穿电压的因素）

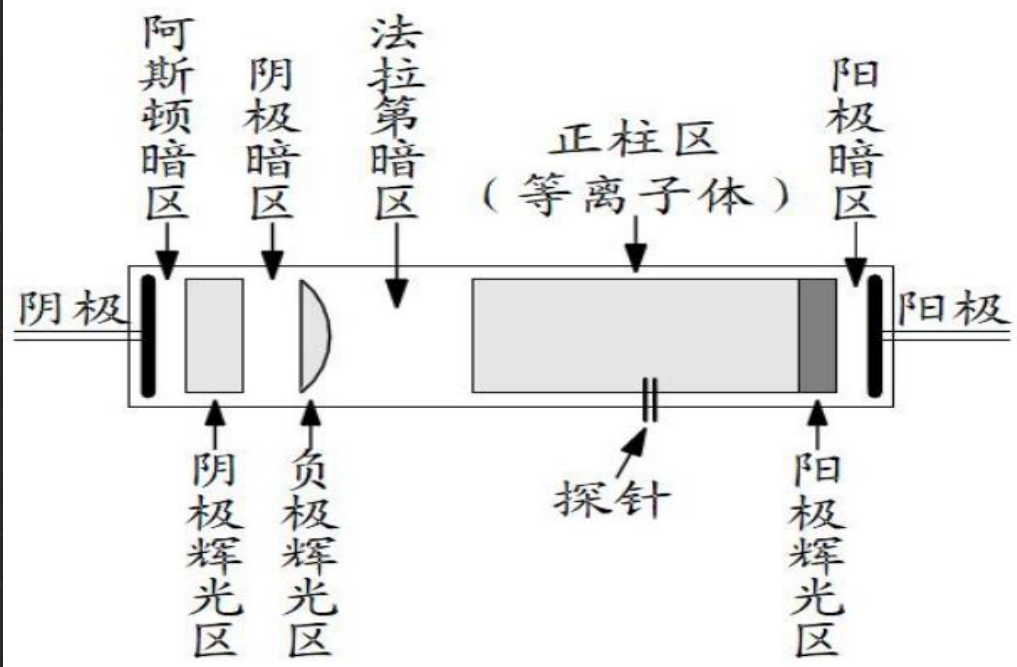
四、 双探针法测电子温度

五、 光谱测量

六、 实验结论

# 一、实验原理

## 1. 气体放电理论



## 击穿电压

$$V_b = \frac{Cpd}{\ln \left[ \frac{Apd}{\ln \left( 1 + \frac{1}{\gamma} \right)} \right]}$$

A, C —— 常数  
 $\gamma$  —— 二次发射系数

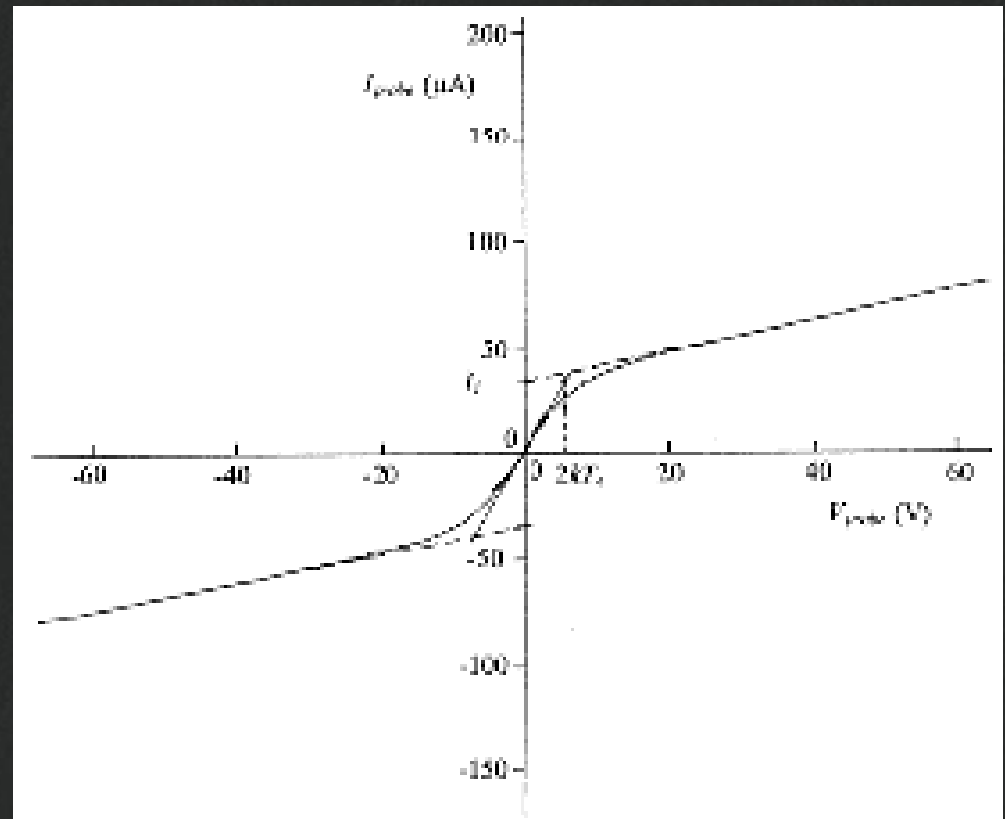
— 特定气体击穿电压  
仅依赖于pd乘积  
—— 帕邢定律

# 一、实验原理

## 2. 静电探针诊断——电子温度

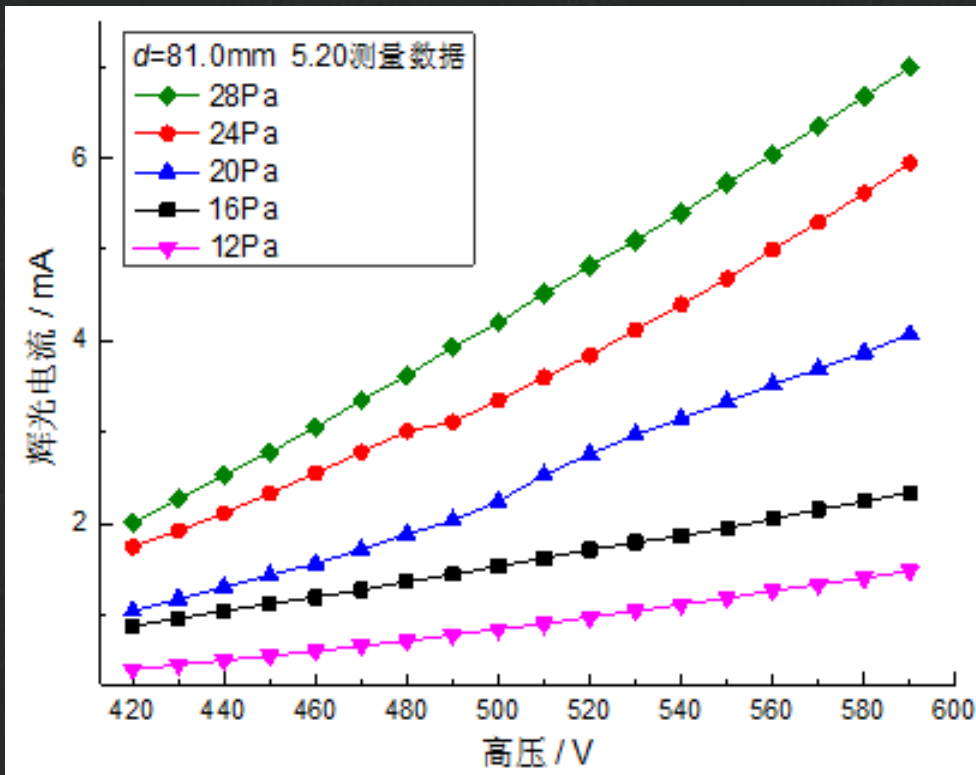
$$T_e = \frac{eI_i}{2k \frac{dI}{dV}_{(I=0, V=0)}}$$

K 玻尔兹曼常数



参考书上给出的探针电流与电压关系

## 二、等离子体的I-V特性



P一定, V升高 I增大

V一定, P升高 I增大

不同压强下的等离子体伏安特性曲线



# 三、帕邢定律验证

气压在15-20Pa之间时，出现击穿电压最低点。

气压过低

—— 碰撞少

—— 电离效率低

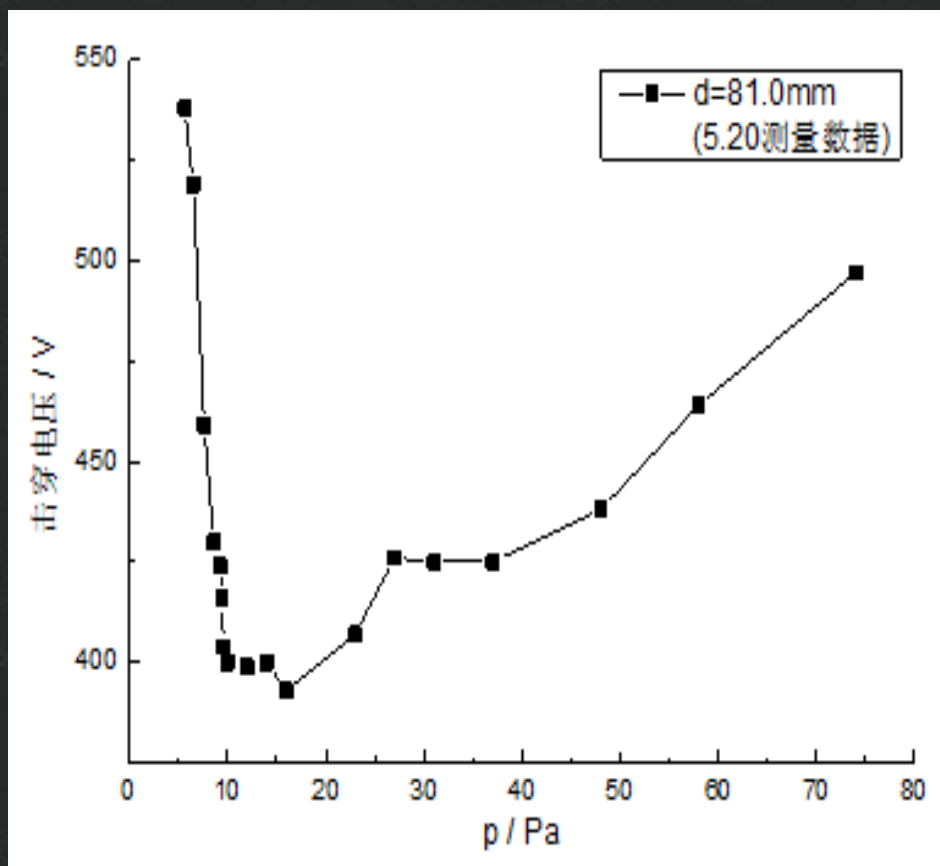
—— 击穿电压高

气压过高

—— 平均自由程短

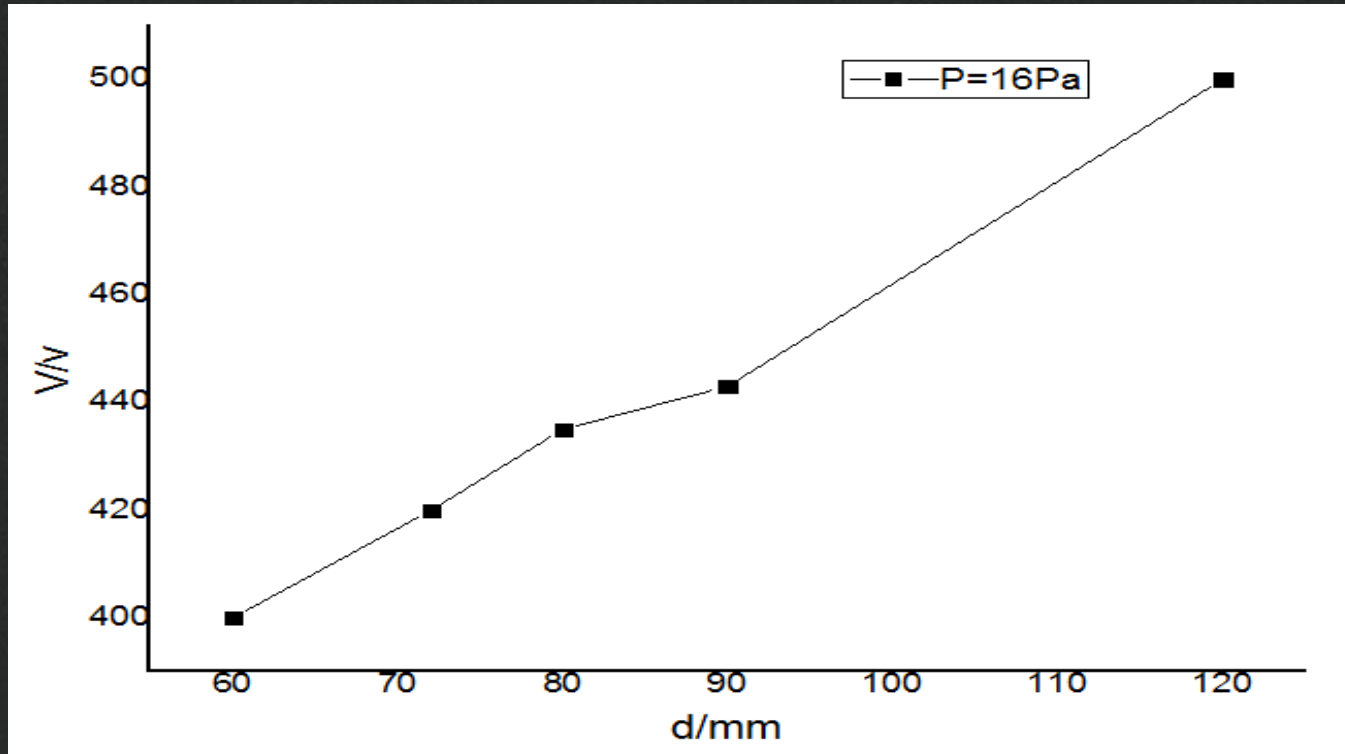
—— 获能少

—— 击穿电压高



击穿电压与压强的关系图

# 三、帕邢定律验证

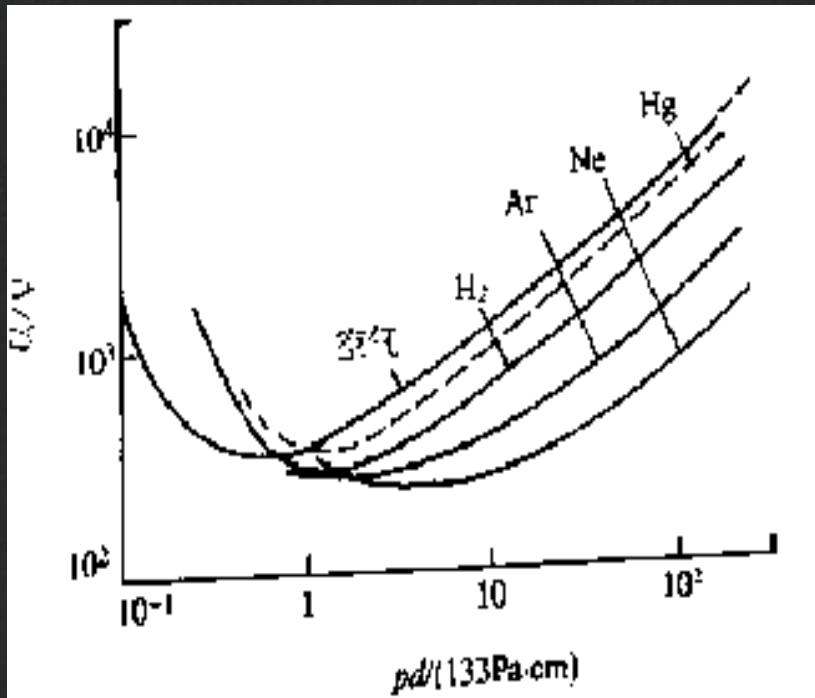


极板间距与击穿电压关系图

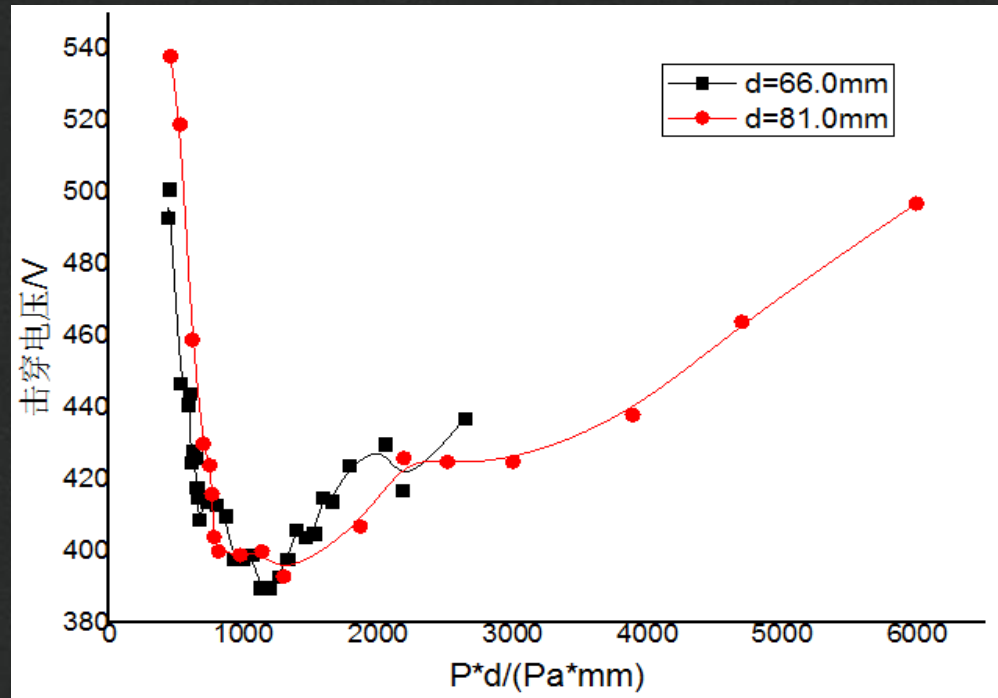
$d \leq L$  (平均自由程) 时，几乎不碰撞，  
电离效率低，击穿电压大。



# 三、帕邢定律验证



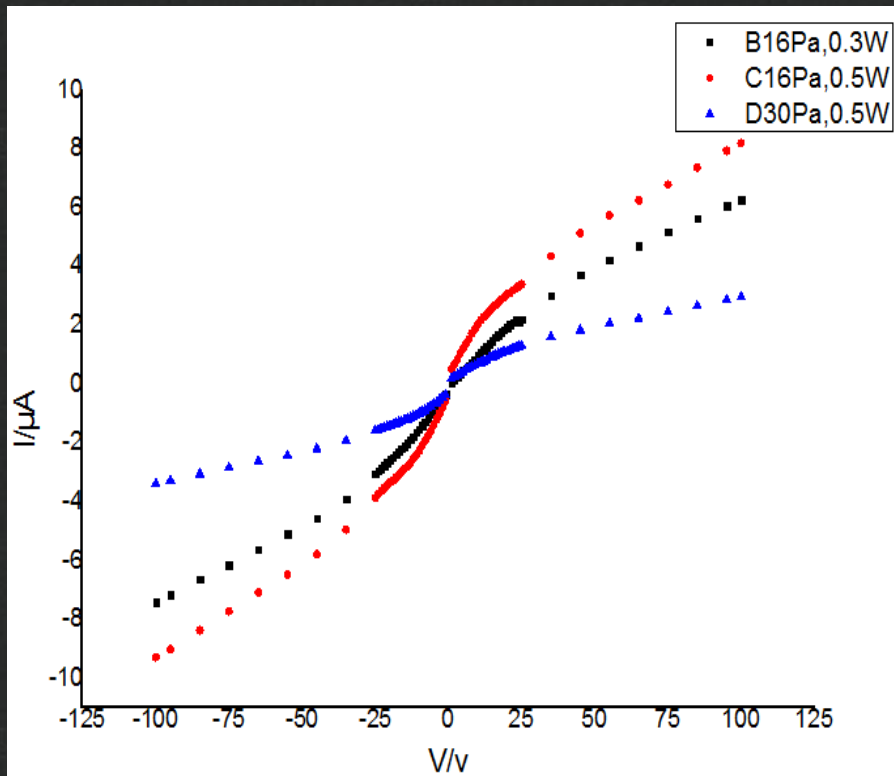
文献中给出的不同气体的击穿电压与Pd的关系图



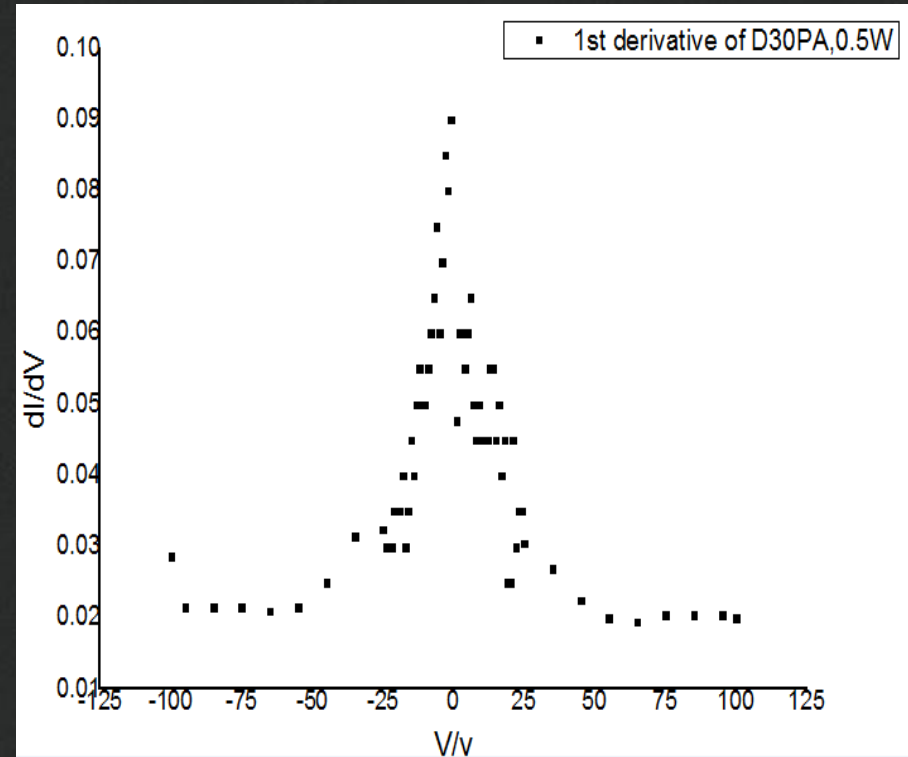
实验测得不同极板间距的击穿电压与Pd的关系图

碰撞次数增加—利于放电— $pd$ 小时（左支）起主要作用  
 每个自由程获能少—不利放电— $pd$ 大时起主要作用

# 四、双探针法测电子温度

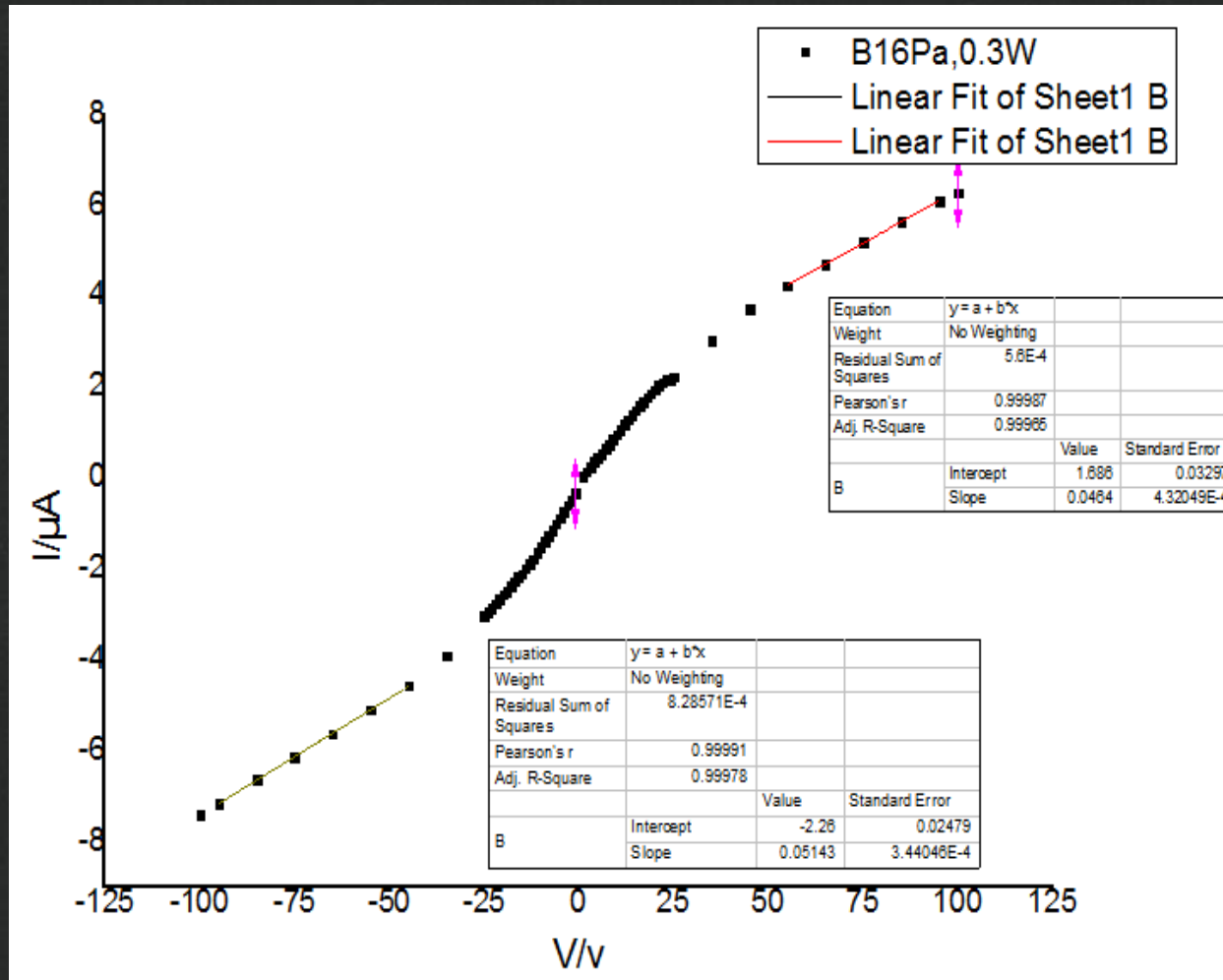


双探针法测等离子体参数的  
探针电压与探针电流关系图



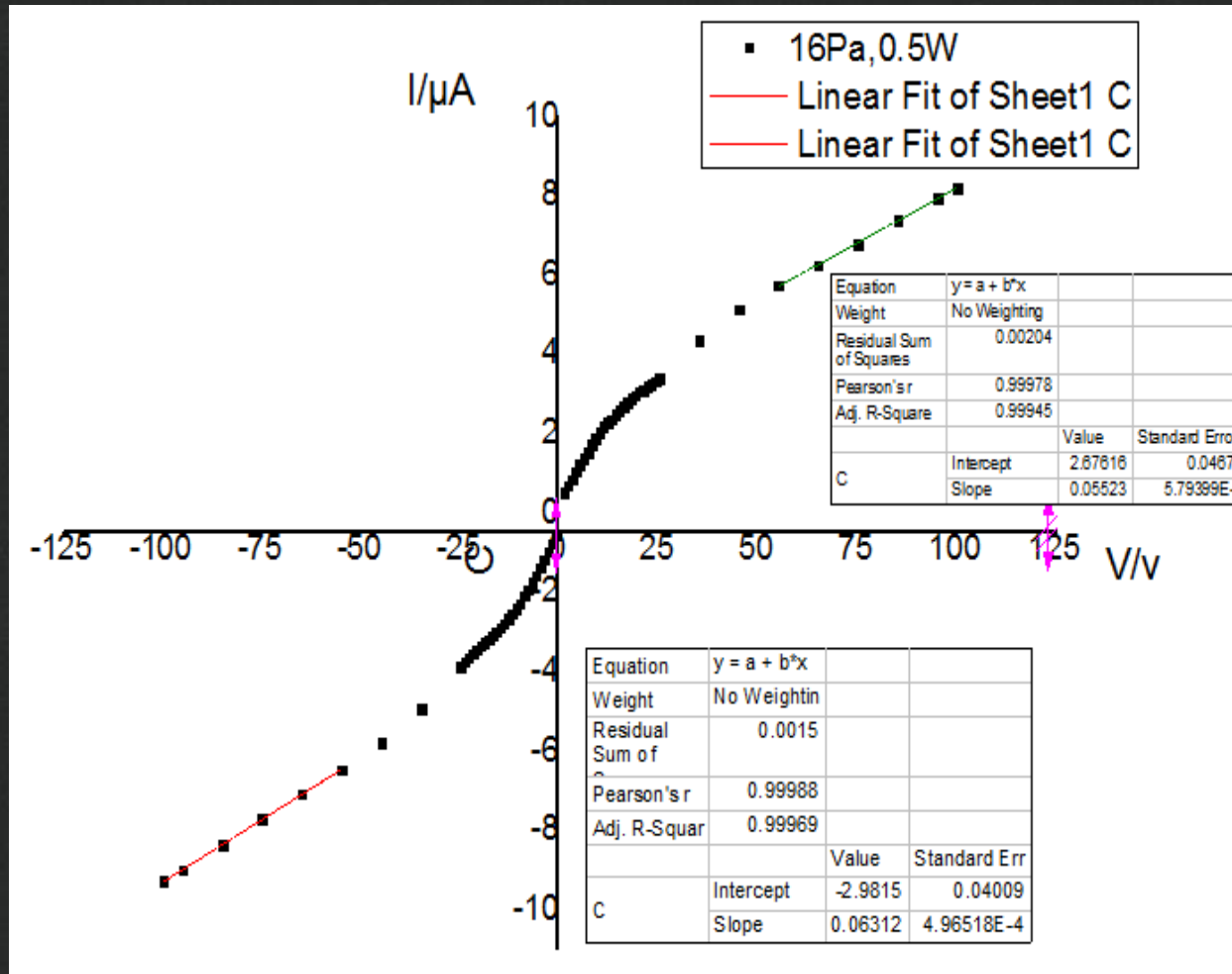
$dI/dV$ — $V$ 图像

# 四、双探针法测电子温度



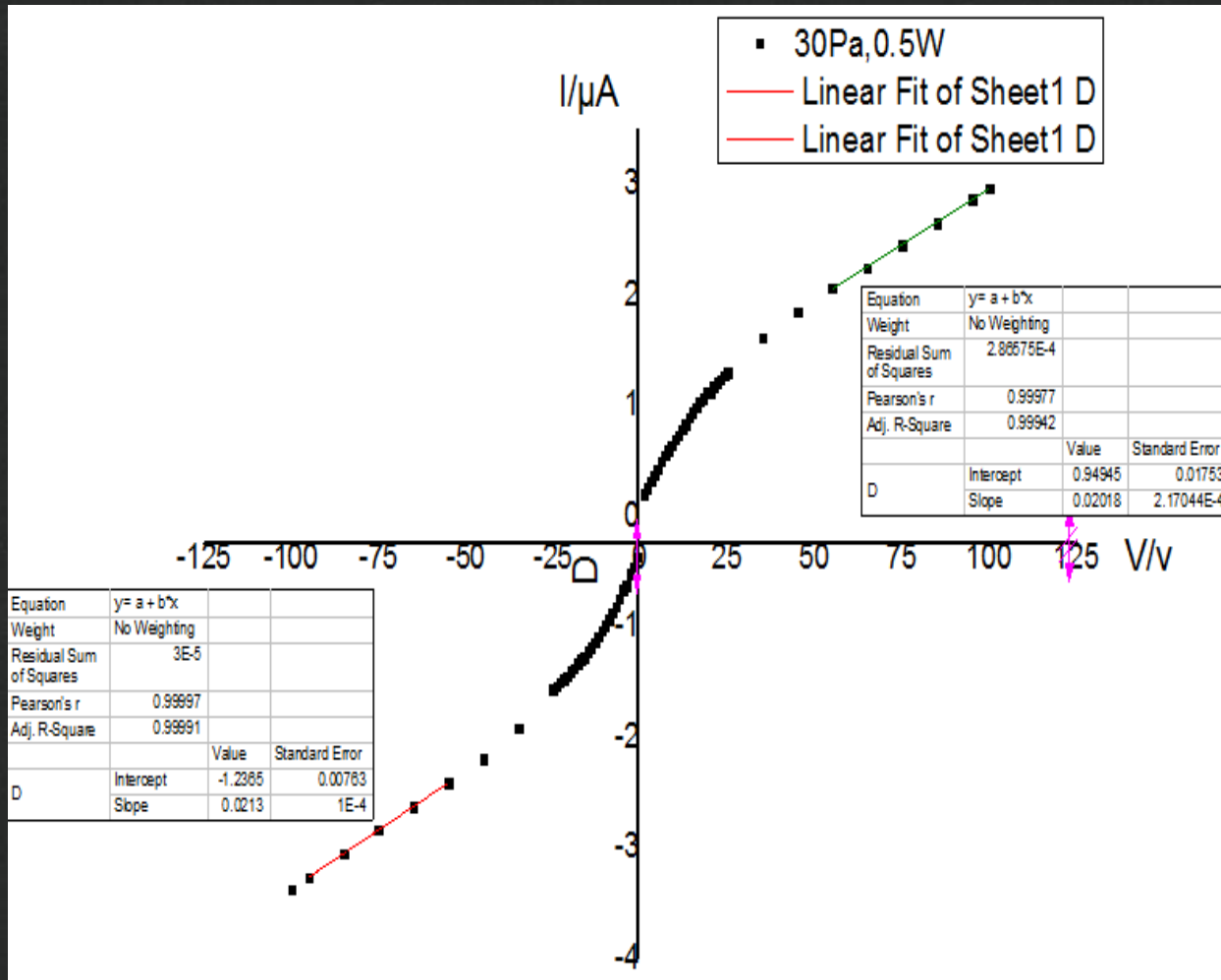
探针电流电压部分数据拟合图

# 四、双探针法测电子温度



探针电流电压部分数据拟合图

# 四、双探针法测电子温度



图像不过原点：

两探针面积不同  
(有氧化物)

两探针所处等离子体电位不同

探针电流电压部分数据拟合图

# 四、探针法测电子温度

放电功率/W		0.3133	0.5076	0.51471
气压/Pa		16	16	30
$I_i / \mu A$		1.686	2.67616	0.94945
$\frac{dI}{dV}_{V=0, I=0}$	方法 1	0.11	0.16	0.056
	方法 2	0.15	0.21	0.09
$T_e / eV$	方法 1	7.401754387	8.401616323	8.508701804
	方法 2	5.617191404	6.368625211	5.272086179
离子密度	方法 1	$1.33 \times 10^{12}$	$2.89 \times 10^{12}$	$1.24 \times 10^{12}$
	方法 2	$1.12 \times 10^{10}$	$1.68 \times 10^{10}$	$7.04 \times 10^{11}$

## 数据处理结果

方法一：最靠近原点的两点的斜率平均值

方法二： $dI/dV$ — $V$ 图中最高点



## 四、探针法测电子温度

分析：

1.相同气压下，功率大的电子温度高。  
场强大，电子获能大，温度高。

2.对于气压对电子温度的影响，压强大的电子温度低。同时由前面的帕邢定律可知，16Pa左右时击穿电压最小，说明此时电子能量应该最大。

所以看得出方法2得到的结果更符合理论。

# 五、实验结论

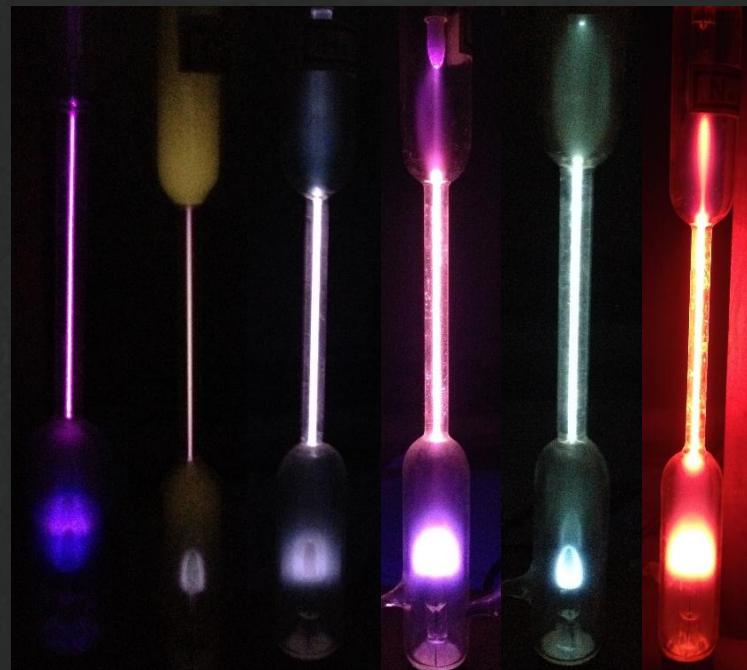
1.辉光放电过程中，辉光电流随电压、气压的增大而增大。

2.击穿电压与气压和电压的乘积有关系，而且存在一个最小击穿电压。

3. (  $d=81\text{mm}$  ) 相同气压下，功率大的电子温度高，相同功率下，压强大的电子温度低。

# 六、等离子体光谱测量

——光栅光谱仪的定标及等离子体参数的测量



# 谱线加宽机制

- 自然加宽

$$\Delta E \cdot \Delta t \sim \frac{h}{2\pi}$$

$$\Delta \nu_N \cdot \Delta t \sim \frac{1}{2\pi}$$

- 碰撞加宽

$$\Delta \nu'_N = \Delta \nu_N + a\mathcal{P}$$

- 多普勒加宽

$$\nu = \nu_0 \left( 1 + \frac{u}{c} \right)$$

$$I(\nu) = I_0 e^{-\frac{(\nu - \nu_0)^2}{\nu_0^2}}$$

$$\Delta \nu_D = 7.16 \times 10^{-7} \nu_0 \left( \frac{T}{M} \right)^{\frac{1}{2}}$$

# 谱线相对强度

- 粒子数分布

$$\frac{N_m}{N_n} = \frac{g_m}{g_n} e^{-\frac{E_m - E_n}{kT}}$$

$N$  相应能级的粒子密度

$g$  能级简并度

$E$  相应能级的激发能

$A_{nm}$  跃迁几率

- 由高能级 $E_n$ 向低能级 $E_m$ 跃迁的谱线强度

$$I_{nm} = A_{nm} \frac{h\nu}{4\pi} N_n l$$

- 对同种粒子的两条相近谱线，其相对强度

$$\frac{I_1}{I_2} = \frac{A_1 g_1 \lambda_1}{A_2 g_2 \lambda_2} e^{-\frac{E_1 - E_2}{kT_e}}$$



# 光栅光谱仪

- 光栅方程

$$m\lambda = d(\sin\theta + \sin i)$$

$m$  衍射级次

$d$  光栅常数

$\theta$  衍射角

$i$  入射角 (视为常数)

$$\lambda = A + Bx$$



图1 PG4000型微型光栅光谱仪

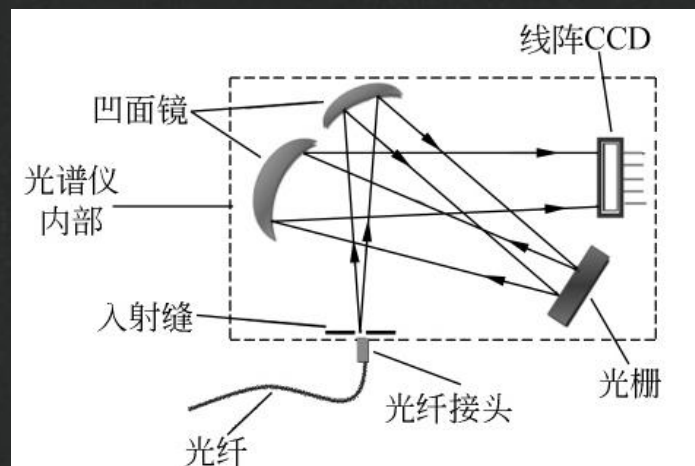


图2 光栅光谱仪的内部结构示意图



# 波长定标

## Ar等离子体的发射光谱



图5 Ar等离子体发光

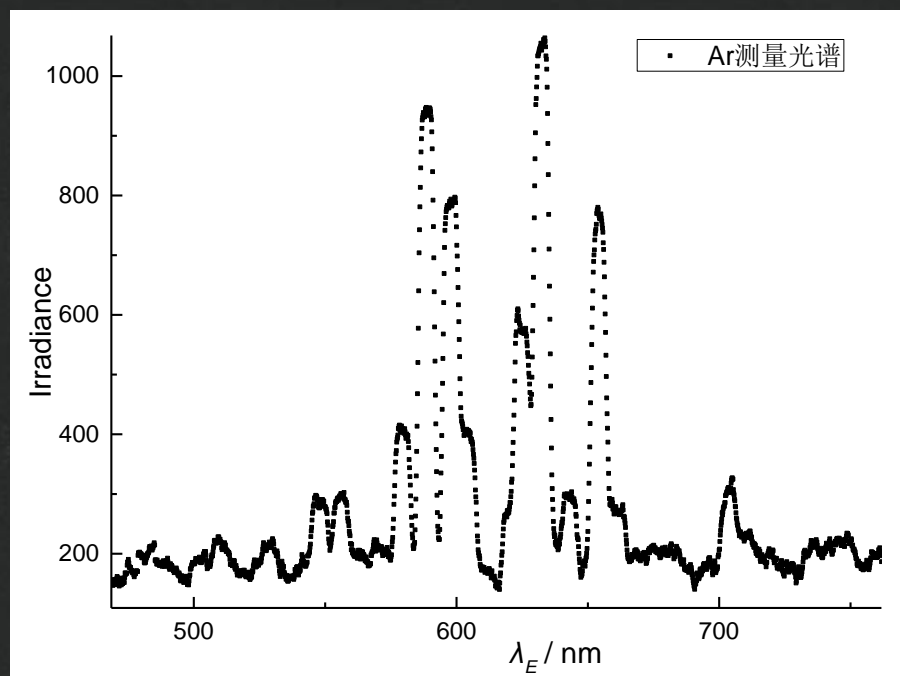


图3 Ar等离子体的测量发射光谱

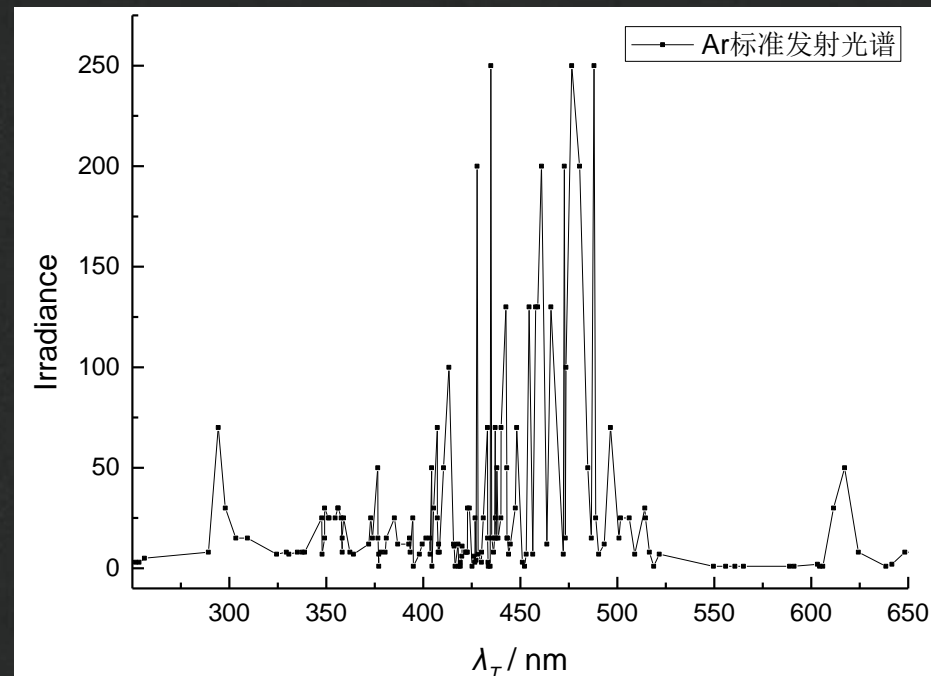


图4 Ar等离子体的标准发射光谱(来自NIST)

# 波长定标

## 波长定标方程

$$\lambda_T = (1.27 \pm 0.06)\lambda_E + (-3.31 \pm 0.37) \times 10^2$$

$$r^2 = 0.98171$$

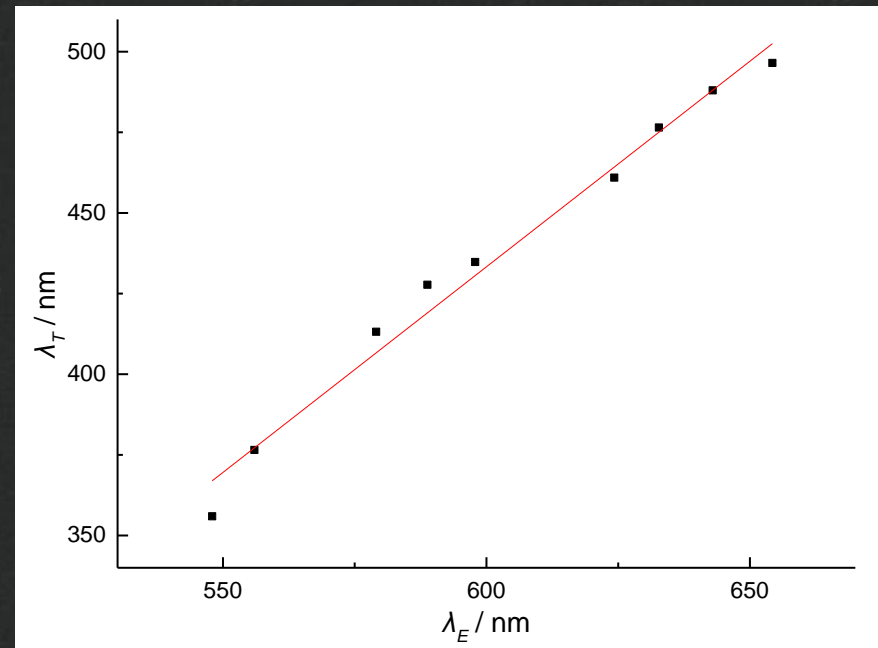


图6 波长定标曲线

# 波长定标

## Ne等离子体发射光谱



图6 Ne等离子体发光

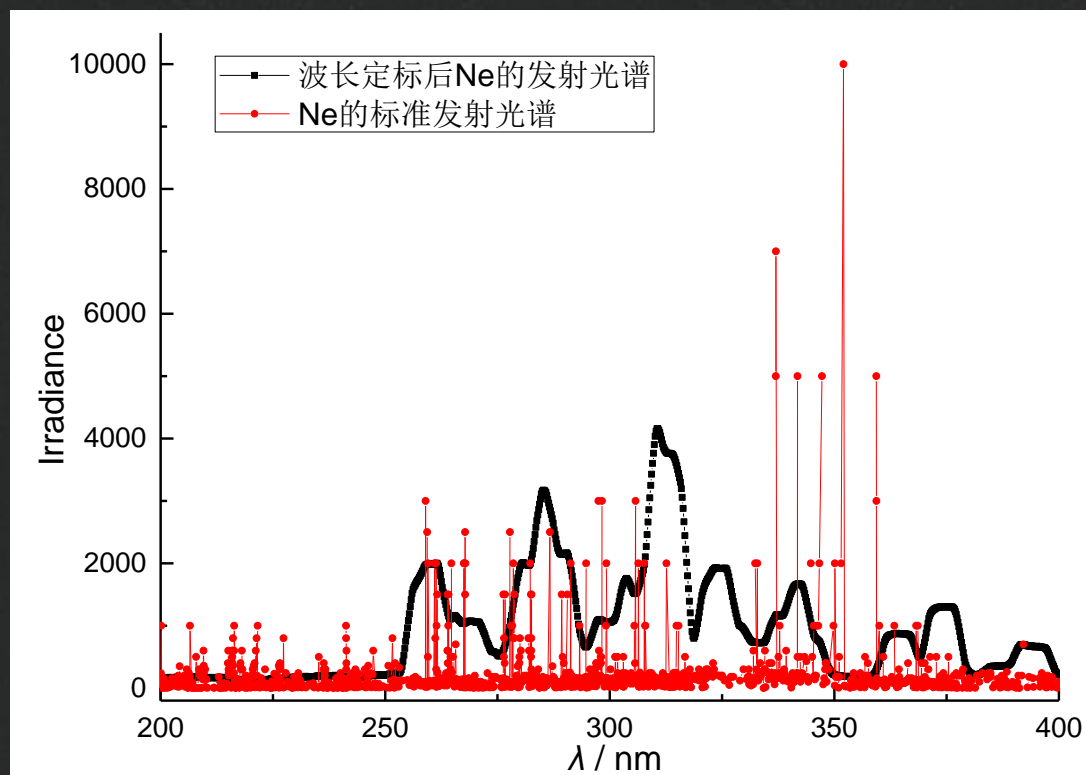


图7 波长定标后的Ne发射光谱与标准光谱比较

# 发射光谱法测等离子体温度

$$\Delta\nu_D = 7.16 \times 10^{-7} \nu_0 \left( \frac{T}{M} \right)^{\frac{1}{2}}$$

$$\Delta\nu = \frac{c}{\lambda^2} \Delta\lambda$$

$$\frac{\Delta\nu}{\nu} = \frac{\frac{c}{\lambda^2} \Delta\lambda}{\frac{c}{\lambda}} = \frac{\Delta\lambda}{\lambda}$$

$$T_1 = 7.23 \times 10^5 \text{ K}$$

$$T_2 = 8.42 \times 10^5 \text{ K}$$

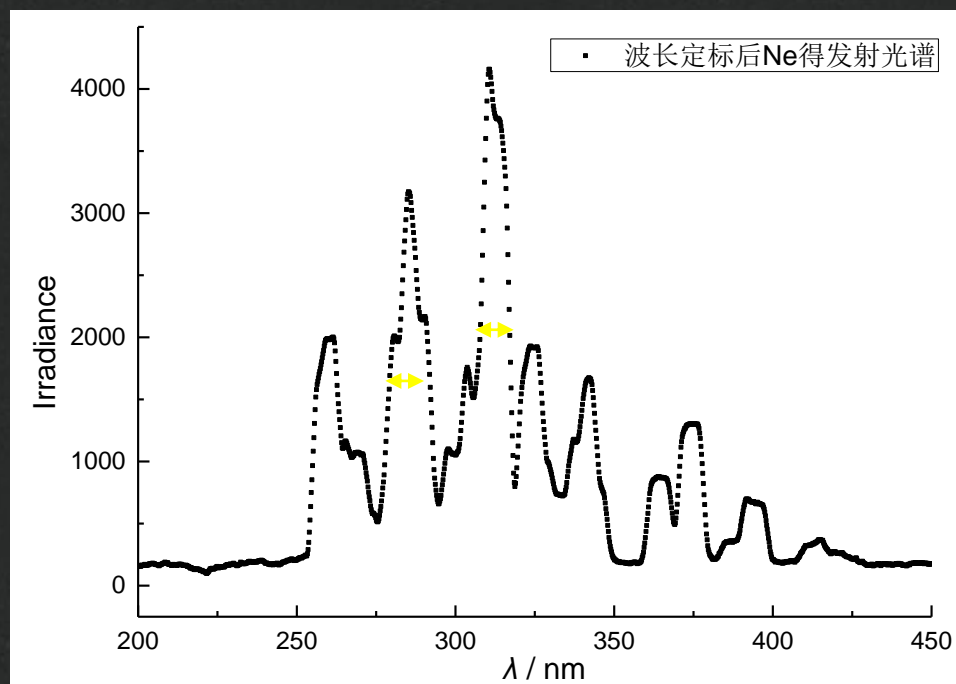


图8 用发射光谱测量等离子体温度

# 强度定标

## 黑体辐射公式

$$I(\lambda, T) = \frac{2hc^2}{\lambda^5} \frac{1}{e^{\frac{hc}{\lambda kT}} - 1}$$

## 光谱仪响应函数

$$R(\lambda) = \frac{I_M(\lambda)}{I_B(\lambda)}$$

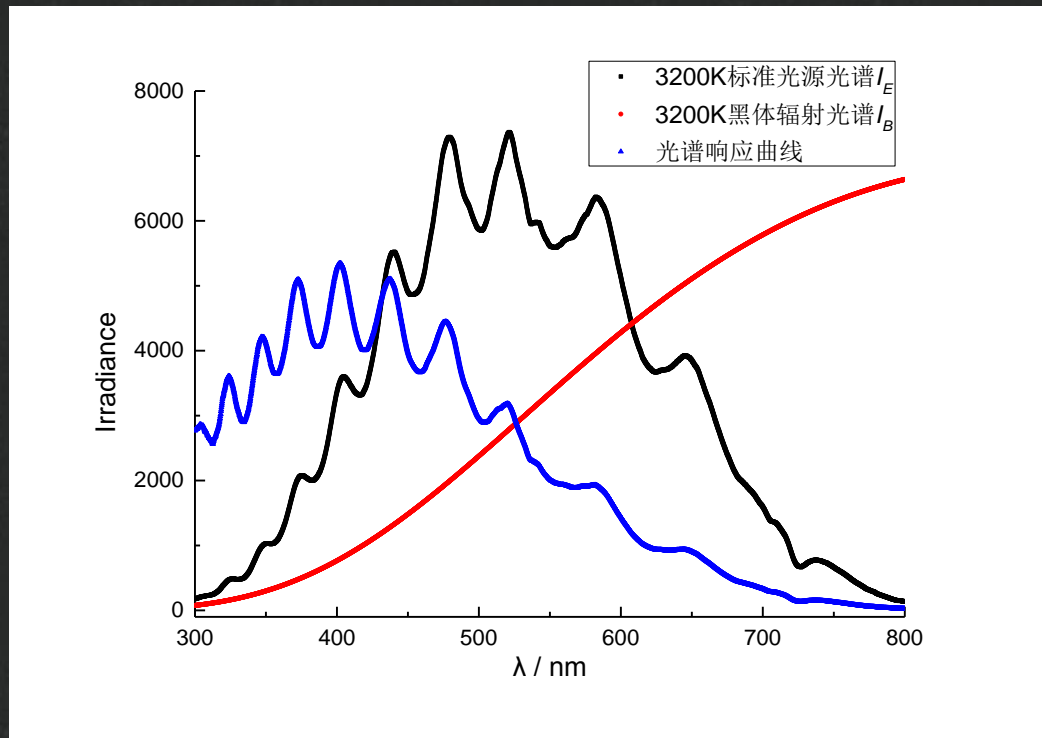


图9 标准光源发射光谱及光谱仪的强度响应函数

# 实验结论

- 光谱仪波长定标方程
- 不同等离子体的发射光谱
- 用谱线轮廓法测量等离子体温度
- 光谱仪强度响应曲线（相对强度法测量等离子体温度）



# 参考文献

- [1] 叶超, 宁兆元等. 低气压低温等离子体诊断原理与技术[M]. 科学出版社, 2010.6.
- [2] 等离子体的应用—dh2005型直流辉光等离子体实验装置. 杭州大华科教仪器研究所
- [3] 张洪志, 崔海峰等. 气体放电等离子体特性测量V-I曲线不对称特性的研究[C]. 第四届全国高等学校物理实验教学研讨会论文集
- [4] 过赠元, 赵文华. 电弧和热等离子体[M]. 北京: 科学出版社. 1986.
- [5] 陈思, 柯福顺, 乐永康. 光栅光谱仪的标定[J]. 物理实验, 2012, 32(3): 44-46.
- [6] 严建华, 潘新潮, 马增益, 屠昕, 岑可法. 直流氩等离子体射流电子温度的测量[J]. 光谱学与光谱分析, 2008, 28(1): 6-9.
- [7] <http://physics.nist.gov>

谢谢！