

等离子体参数的自动采集

实验者：伍晔 07300190008 合作者：朱骏 07300190012

摘要：使用 Keithley236 型源测量单元，通过 labview 的编程工作，实现了直流辉光放电等离子体 Langmuir 双探针实验的数据自动采集。与传统方法得到的数据进行比较，分析了 Keithley236 型源测量单元的采集特点。并发现了一些问题。

关键词：Keithley236 型源测量单元，labview，直流辉光，等离子体，Langmuir 双探针法

引言

等离子体通常被认为是物质的第四种形态，由离子，电子和中性粒子组成。等离子体因其高温度和高能量密度的特点，有在诸多方面都有广泛应用。然而在物理本科学习中，并没有多少机会接触等离子体，我们对等离子体的概念，性质等都缺乏直观的了解。通过本次实验，可以有机会深入了解等离子体。

本实验中使用 DH2005 型直流辉光等离子体实验装置，使用 Langmuir 双探针法，可以测量等离子体的密度，温度，德拜长度等参数。

实验原理

1. 等离子体参数

等离子体密度：单位体积内（一般以立方厘米为单位）某带电粒子的数目。 n_i 表示离子浓度， n_e 表示电子密度。

等离子体温度：对于平衡态等离子体（高温等离子体）温度是各种粒子热运动的平均量度；对于非平衡态等离子体（低温等离子体），由于电子、离子可以达到各自的平衡态，故要用双温模型予以描述。一般用 T_i 表示离子温度， T_e 表示电子温度。

德拜长度：等离子体内电荷被屏蔽的半径，表示等离子体内能保持的最小尺度。当电荷正负电荷置于等离子体内部时就会在其周围形成一个异号电的“鞘层”。

$$\text{德拜长度: } \lambda_D = \sqrt{\frac{kT_e}{4\pi e^2}}$$

2. 等离子体参数的静电探针诊断原理



图 1：双探针法测等离子体参数装置示意图

假设：

(1)被测空间是电中性的等离子体空间，电子密度 n_e 和离子浓度 n_i 相等，电子与离子的速度满足麦克斯韦速度分布；

(2) 探针周围形成的空间电荷鞘层厚度比探针面积的线度小，这样可忽略边缘效应，近似认为鞘层和探针的面积相等；

(3) 电子和正离子的平均自由程比鞘层厚度大，这样可忽略鞘层中粒子碰撞引起的弹性散射、粒子激发和电离；

(4) 探针材料与气体不发生化学反应；

(5) 探针表面没有热电子和次级电子的发射。成一个异号电的“鞘层”。

设探针的面积分别为 A_1, A_2 ；电位为 V_1, V_2 ；电压 $V = V_1 - V_2 \geq 0$ 。流过探针 1, 2 的离子和电子电流分别为 $i_{1+}, i_{1-}, i_{2+}, i_{2-}$ 。对双探针，整体为悬浮的，故 $i_{1+} + i_{1-} + i_{2+} + i_{2-} = 0$ 。

则从 2 流入 1 的电流为： $i_{2,1} = i_{2+} + i_{2-} - (i_{1+} + i_{1-})$ ， $\frac{I}{2} = i_{2+} + i_{2-} = -(i_{1+} + i_{1-})$

所以：

$$\begin{cases} i_{1+} + \frac{I}{2} = i_{1-} = -eA_1 J_r e^{\frac{e(V_1 - V_s)}{kT_e}} \\ i_{2+} - \frac{I}{2} = i_{2-} = -eA_2 J_r e^{\frac{e(V_2 - V_s)}{kT_e}} \end{cases} \Rightarrow \frac{i_{1+} + \frac{I}{2}}{i_{2+} - \frac{I}{2}} = \frac{A_1}{A_2} e^{\frac{eV}{kT_e}}$$

故：

$$I = 2i + \frac{eV}{e^{\frac{eV}{kT_e}} - e^{-\frac{eV}{kT_e}}} = 2i + \tanh\left(\frac{eV}{kT_e}\right) \Rightarrow \left. \frac{dI}{dV} \right|_{(I=0, V=0)} = \frac{eI_i}{2kT_e}$$

由此可知：电子温度：

$$T_e = \frac{eI_i}{2k \left. \frac{dI}{dV} \right|_{I=0, V=0}}$$

等离子体密度：

$$n = \frac{I_+}{\sqrt{\frac{kT_e}{m_i}}}$$

德拜长度：

$$\lambda_D = \sqrt{\frac{kT_e}{4\pi e^2}}$$

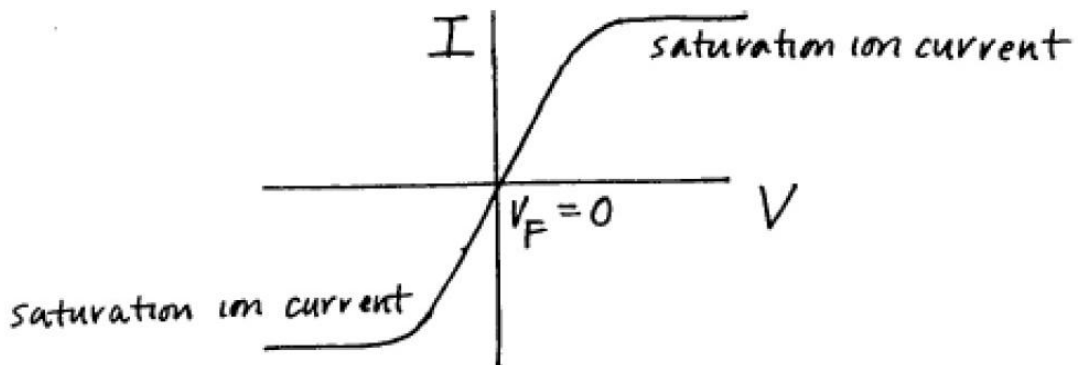


图 2：理想的双探针曲线

1. DH2005 型直流辉光等离子体实验装置

工作气体，工作气压，电极距离等影响等离子体的参数均可单独或组合调控。

2. Keithley236 型源测量单元

利用 GPIB 接口，实现与计算机的连接。可以完全进行程控，能够同时输出和测量电压或电流。精度极高。

实验内容与结果

使用 LabView 编程，使用系统提供的 Keithley236 型源测量单元驱动，编写计算机端控制程序。

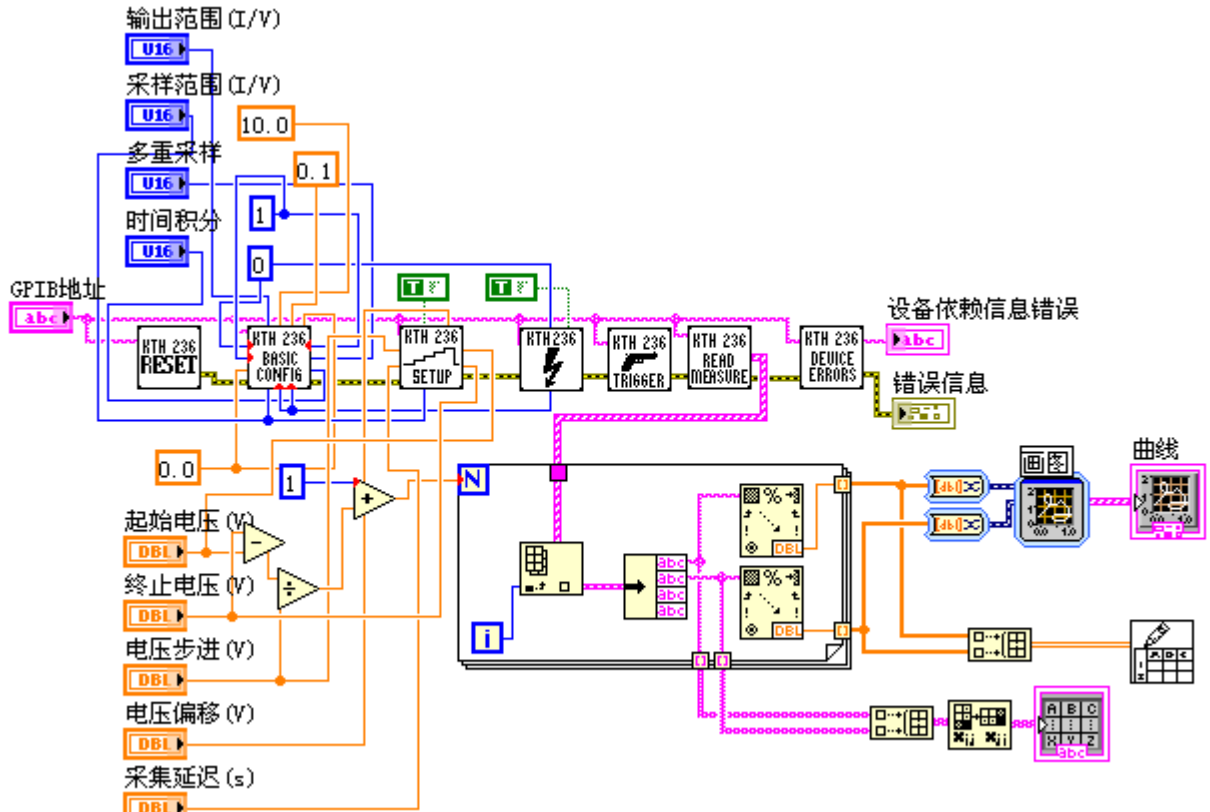


图 3: LabView 的 Keithley236 型源测量单元 auto sweep 程序图

中间的 7 个白色模块为系统提供的驱动模块。左侧垂直排列的是控制扫描的各种参数。中间方框是一个循环，用于分离测量得到的数据。右侧是画图模块，用以描绘测量曲线。

连接计算机，Keithley236 型源测量单元与直流辉光等离子体装置。利用 236 的 sweep 功能，输出电压测量电流。

以下是我们的测量结果：

起始电压: -100V
 终止电压: 100V
 电压步进: 0.5V
 采集延迟: 0.5S
 多重采样: 8次
 时间积分: 50Hz 线循环

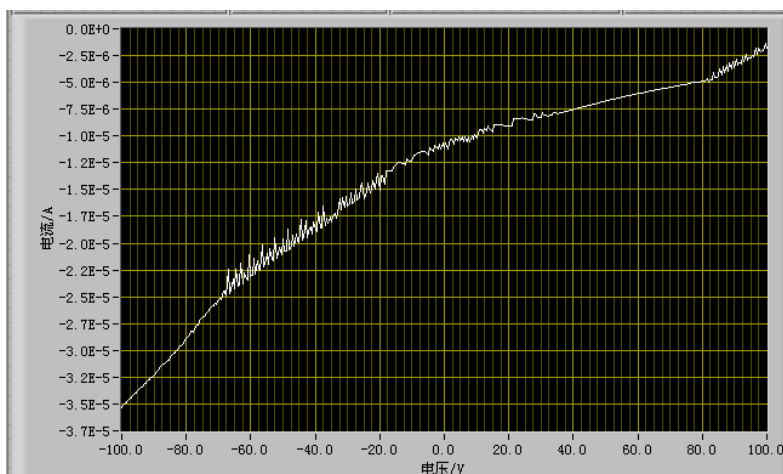


图 4: 直流辉光等离子体测量曲线

起始电压: -20V
 终止电压: 20V
 电压步进: 0.5V
 采集延迟: 0.5S
 多重采样: 16次
 时间积分: 50Hz 线循环

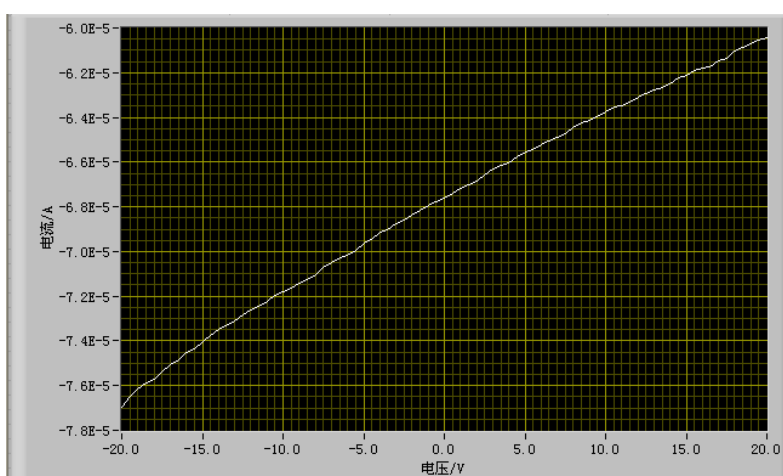


图 5: 直流辉光等离子体测量曲线

可以看到与前文中的理想曲线相差甚远。理论上, 在探测电压为 0 时测得的电流也应为 0, 也即所谓的零点。零点附近的曲线斜率比远离零点处的斜率要大一些。而实际的测量中电流恒负, 并且完全没有这些特征。我们怀疑是不是探针根本没落在正确的等离子体区域内。接下来我们使用实验装置自带的电压输出和电流表测量。结果如下:

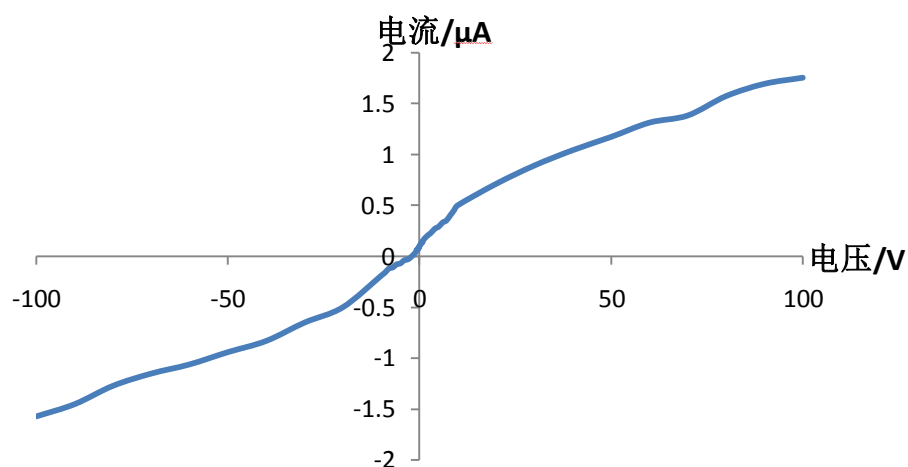


图 6: 使用自带仪器双探针法测量曲线
 出现了理论中的曲线特征。也就是说, 等离子体没有任何问题。

接着我们怀疑是电表显示有问题，我们用万用表测量了所有电表的显示情况。发现很重要的一点是：所有的电表显示的值都是正确的。

于是，根据上图，我们列出了几点问题与猜测：

①使用 236 测量得到的数据电流恒负，也许是零点位置的问题。

②电流大了一个量级。

③-100V 至 100V 范围内没有应有的曲线特征（精度足够。如果是曲线平移，范围不可能那么大。实际测量中只有 1V）

④曲线斜率与气压有关（由于-100V 至 100V 扫描时耗时过长，等离子体内的压强一直在变小，而曲线也恰恰显示了斜率变小的趋势。最后的突变点，是人为加大了气压所致，这更证明了这一猜测）

⑤曲线有不规则起伏（可能是噪声干扰所致）

接下来，我们的实验重点就放在了逐一验证解决这些问题上。

首先是仪器可靠性和零点位置的验证。我们将测量单元外接一个 $10^5\Omega$ 的电阻。使用与等离子体扫描相同的电压范围。

起始电压：-100V
终止电压：100V
电压步进：0.5V
采集延迟：0S
多重采样：关闭
时间积分：快速
(0.416ms)

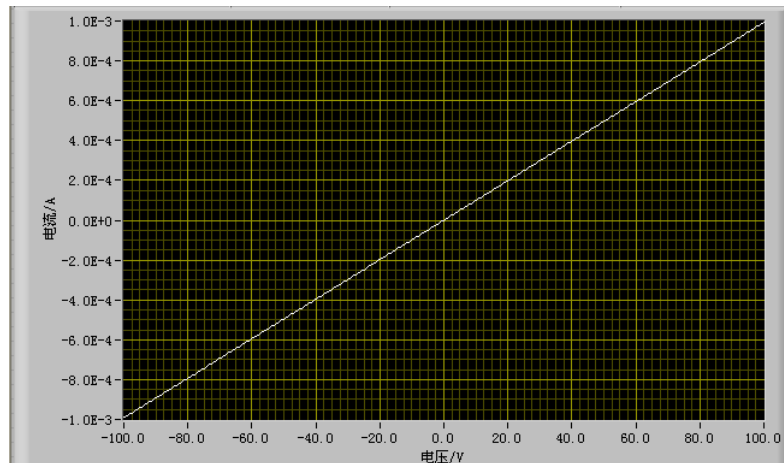


图 7：100k Ω 电阻-100V~100V 测量曲线

可以看到曲线起伏很小，而零点位置也比较精确。曲线的斜率正确反映了电阻的阻值。这一测量可以证明使用计算机控制 Keithley236 型源测量单元的测量是成功的，其结果，至少在待测物体是电阻的情况下，是准确的。而考虑到测量的电流较大（mA 量级），噪声干扰应该不会明显，故此结果不能说明噪声的影响。

接下来是研究噪声对结果的影响处在哪个量级上。我们采取的方法更换阻值更大的电阻（ $10^7\Omega$ ）缩小电压扫描范围，从而降低电流大小。放大噪声的相对强度。比较有无电磁屏蔽对结果的影响。电磁屏蔽，就是一个金属盒子。将待测部分放入盒内可以屏蔽绝大部分外界电磁波的干扰。

起始电压: -1V
 终止电压: 1V
 电压步进: 0.01V
 采集延迟: 0S
 多重采样: 关闭
 时间积分: 快速
 (0.416ms)

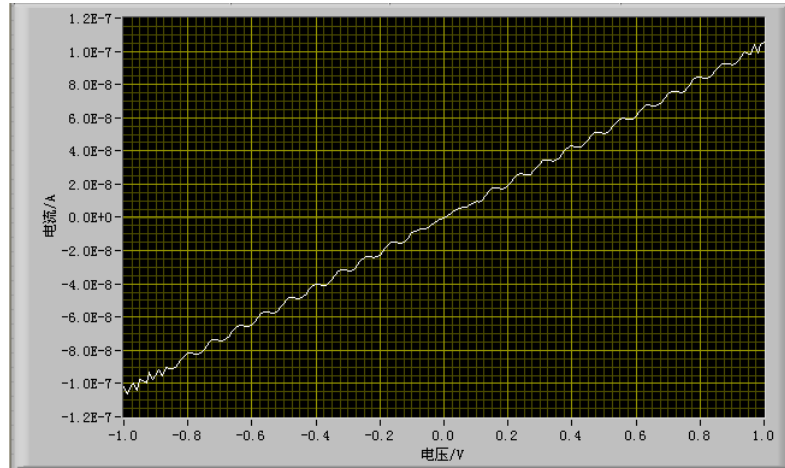


图 8: 无电磁屏蔽 100kΩ电阻测量曲线

起始电压: -1V
 终止电压: 1V
 电压步进: 0.01V
 采集延迟: 0S
 多重采样: 关闭
 时间积分: 快速
 (0.416ms)

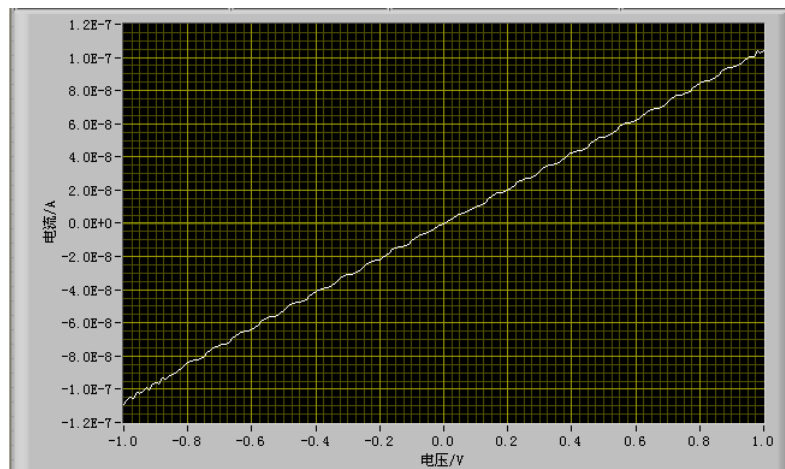


图 9: 有电磁屏蔽 100kΩ电阻测量曲线

通过观察可以看到, 在没有电磁屏蔽时, 噪声的干扰约在 10^{-9} A 量级, 通过电磁屏蔽, 可以将噪声降低至至少一半的水平。使得测量电流在 10^{-8} A 量级时基本没有干扰。

然而, 即使有噪声存在, Keithley236 型源测量单元也提供了多重采样功能来减小噪声的影响。下一步的工作就是观察多重采样功能可以把噪声消除到何种程度。测量时我们进一步缩小电压范围, 使得电流曲线中噪声的影响和测量结果量级相当。

起始电压: -0.01V
 终止电压: 0.01V
 电压步进: 0.0001V
 采集延迟: 0S
 多重采样: 关闭
 时间积分: 快速
 (0.416ms)

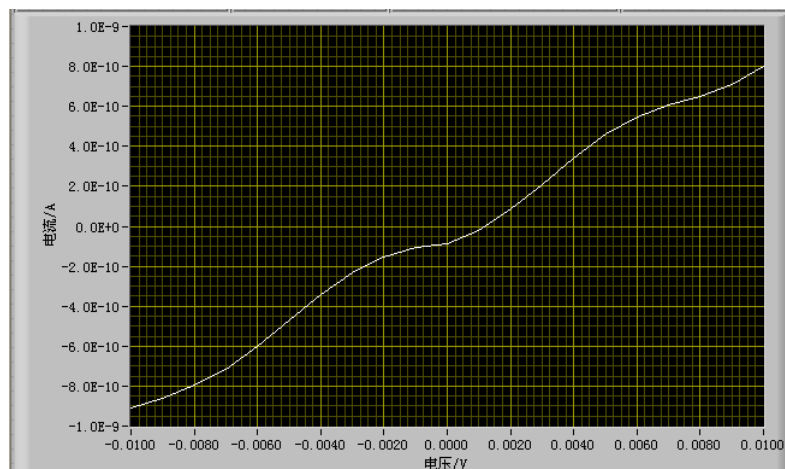


图 10: 100kΩ电阻测量曲线 电流曲线起伏很大

起始电压: -0.01V
终止电压: 0.01V
电压步进: 0.0001V
采集延迟: 0S
多重采样: 32次
时间积分: 快速
(0.416ms)

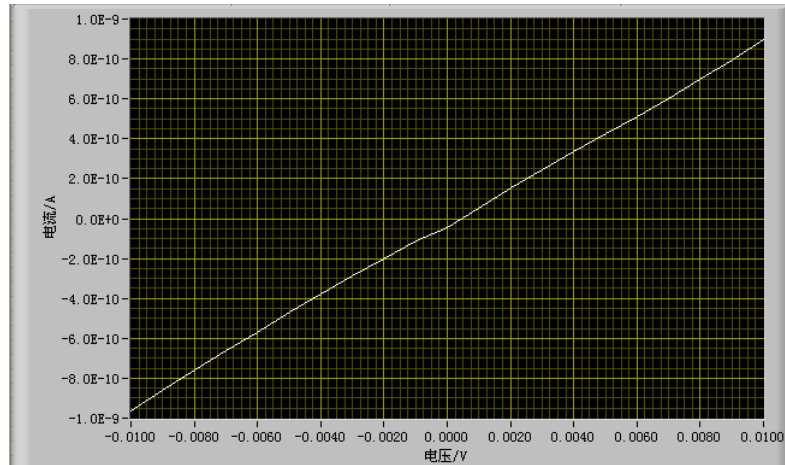


图 11: 100kΩ电阻测量曲线 电流曲线几乎没有起伏

在开启最高次数的多重采样之后, 原本 10^{-9} A 的量级的噪声干扰可以消除至在测量电流 10^{-10} A 时基本看不出起伏。考虑到实际测量到的, 在实验所需测量的量级上, 多重采样可以使噪声的干扰几乎为零。

实验结论

至此, 虽然没有完全解决问题, 我们还存有一些疑惑, 至少我们可以得到几点结论:

- ①零点电压至少在待测物体是电阻的情况下是正确的。
- ②外界干扰对结果的影响在 10^{-8} A 量级, 相对测量的量级 (10^{-6} A) 可以忽略。
- ③通过电磁屏蔽和多重采样, 可以较轻松地到达很高的测量精度 (至少 10^{-11} A)。

剩下的问题, 作者也有一些猜想, 有待进一步验证:

①-100V-100V 的测量曲线中的不规则起伏可能和等离子体本身不稳定有关, 在实验中也有观察到过等离子体的闪烁现象。这种现象在特定电压和气压条件下十分明显。在测量过程中肉眼没有发觉闪烁, 但不排除内部特性的变化。

②实际的实验扫描中, 没有得到应有的曲线性质, 在所有电压源, 电表工作正常的前提下, 只能将问题锁定在 Keithley236 测量单元中。作者推测可能是测量单元中存在电压和电流的反馈机制。使得在测量带电的等离子体中出现问题。

但是, 无论结果如何, 我们已经完成了程序的初步编写。程序和机器本身提供了一个自动采集的平台。将来可以在程序中加入各种模块改进。例如很容易可以想到的参数自动计算功能。通过这一平台, 其他类似的等离子体实验也可以通过这一程序实现自动采集, 仅需要做一些必要的小修改即可。

致谢

感谢乐永康老师的实验指导, 感谢陆昉老师提供计算机设备

参考文献

- [1]Keithley236 型源测量单元使用说明书
- [2]Labview8 编程教程