

## 摘 要

Langmuir 探针具有仪器简便, 操作简单, 诊断能力强, 适用范围广, 获得信息丰富等众多优点, 因此, 它是低温等离子体诊断领域的重要分析工具, 但同时其也存在易受干扰的弊端, 需要进一步改进, 以适应越来越复杂的等离子体环境。

针对对 Langmuir 探针造成干扰的不同因素, 本文提出了不同的解决方案, 分别从抗干扰原理、抗干扰装置和实验结果三方面予以说明。积分网络: 用于消除等离子体环境中的噪音干扰; 滤波器网络: 用于消除射频等离子体环境中的射频干扰; 差分放大器: 用于消除同轴电缆上的诱导噪音干扰。

本文着重介绍了积分网络, 对其工作原理, 电路结构, 提高探针信噪比做了详尽阐述, 并以积分网络为基础设计出一套基于计算机的新型积分 Langmuir 探针系统, 包括探针电源部分和数据采集部分。此系统的显著特点是: 采用数字电路设计, 数字信号传输提高抗干扰能力; 提供可调的(本文诊断实验中使用的电压扫描范围:  $-30\text{V} \sim +30\text{V}$ ) 的电压扫描范围, 可以对不同空间电位分布的等离子体进行诊断; 数据采集过程运用积分网络同步完成模/数转换过程, 降低了系统复杂程度和设计成本; 提出了一种在等离子体诊断中有效抑制噪音干扰的方法, 大幅度提高了探针的信噪比; 采用数据采集卡为接口与计算机系统进行数据通信, 提高了整套系统的智能化程度。目前此系统已成功应用于具有噪音干扰环境的 ECR 等离子体源中, 实验表明: 此探针系统具有良好的抗干扰效果, 得到的 I-V 特性曲线平滑, 无明显的背景干扰信号, 获得高出传统 Langmuir 探针 10db 的探针信噪比。

**关键词:** Langmuir 探针 等离子体诊断 抗干扰 信噪比 I-V 特性曲线

## **Computer based high signal-to-noise ratio Langmuir probe system**

### **Abstract**

Langmuir probe possesses a lot of advantages in plasma diagnostics, such as simple equipment and operation, strong diagnostic ability, acquiring rich information etc, so it takes an important role in plasma diagnostics. But there are also some disadvantages need to be improved.

Three noise elimination methods in Langmuir probe diagnostics were reviewed. Integrate-and-dump techniques: using integrate-and-dump network, which can suppress fluctuant noise effectively; filter: a filter using a translation line formed by a cascade networks has been developed to reject the rf(radio-frequency) noise; differential amplifier: using dual-cable circuit and differential amplifier, the induced noise due to the RC characteristic of coaxial cables can be eliminated effectively. The methods include noise elimination principles, noise elimination equipments and experiment results.

In this paper, we designed a new Langmuir probe system based on integrate-and-dump network. Novel features of the system include: the use of integrate-and-dump techniques to implement the process of analog-to-digital conversion and to provide effective noise suppression; increase signal-to-noise ratio dramatically; and use data processing card to communicate with a host computer. Successful operation of the system has been demonstrated in the electrically noisy environment of an ECR plasma source.

**Key Words:** Langmuir probe, Plasma diagnostics, Noise elimination, Signal-to-noise ratio, I-V characteristics curve

## 1 等离子体诊断学的发展历程

人们认识到等离子体的存在已经两个多世纪,随着人们对等离子体物理现象观察和研究的不断深入,等离子体科学的内涵已经变得十分丰富,其分支也越来越多,已经扩展到自然科学和工程技术的各个领域。放电物理学、大气物理学、空间物理学和宇宙物理学的研究成果丰富了等离子体物理学的内容,同时也促进了实验等离子体物理学的发展,对等离子体状态和过程进行测量诊断的原理和技术方法也获得了巨大的进步,并且一直处于迅速发展变化中。

### 1.1 等离子体的基本特征<sup>[1]</sup>

从早期的低气压气体放电物理学,到大气物理学,直至现代的空间科学和宇宙科学都无一例外地证实了等离子体的存在。等离子体是指具有宏观时空尺度的由带等量异号电荷的微观粒子组成的准中性多粒子体系。等离子体的物理性质是多方面的,其中存在的大量带电粒子就使得等离子体成为电磁相互作用占主导地位的宏观体系。电磁作用是长程作用力,等离子体的存在和稳定需要平衡电磁作用力的相互作用来维持。热动力是等离子体中平衡电磁作用力的最重要因素,因此等离子体的宏观性质在一定程度上与气体是相似的。等离子体作为一种大量微观粒子的热力学体系<sup>[2]</sup>,热运动和电磁作用过程共存,描述其热力学性质的物理量—温度就表现出相当的复杂性,由于不同成份之间的非热力学平衡,使得必须使用多种温度,其中的中性成分、离子成分和电子成分分别具有不同的温度。电子和离子的活动使得等离子体具有极强的维持电中性的能力,电中性的维持从空间角度讲是以德拜长度 $D_e$ 为特征的,小于 $D_e$ 的空间尺度内电中性是不成立的。从时间尺度上讲,电中性的建立时间是以等离子体振荡周期 $\tau_p$ 为特征的,等离子体电中性的维持使电场强度变得十分不均匀,电场主要集中于等离子体受约束的边界鞘层处,电子和离子的惯性和温度的巨大差异是形成鞘层的内在原因。

等离子体也表现出能量转化和物种转化特性。光发射和化学反应过程是最重要的

两个过程<sup>[3]</sup>。等离子体是一个含有大量激发态基团和自由基的富能系统，富能物种成为光发射的辐射源，同时又是激发化学反应的活化物种。

等离子体的基本特征还表现在它与其它物质形态的相互作用过程<sup>[4]</sup>。电磁波具有波粒二象性，与等离子体间的作用不仅影响等离子体的电磁过程，而且影响其中的能流过程。等离子体波动的非线性和非稳定性是这种复杂性的集中体现。等离子体对电磁波的散射和吸收过程已成为等离子体诊断的重要工具。固体材料与等离子体的作用过程中，除了鞘层形成外，对材料表面的刻蚀<sup>[5]</sup>、溅射<sup>[6]</sup>、加热<sup>[7]</sup>、注入<sup>[8]</sup>和化学生长过程<sup>[9]</sup>是等离子体材料特征的主要表现形式。

## 1.2 等离子体诊断方法分类

静电探针法<sup>[10]</sup>利用的是等离子体中的静电现象；光谱学诊断方法借助的则是等离子体中的光学现象和相应过程；等离子体是一种由带电粒子和中性粒子组成的体系，作为一种电磁场介质，等离子体与电磁波的相互作用是波谱学探针的基本依据。作为一种光学介质，等离子体导致的光学干涉现象也是等离子体诊断的有效依据。等离子体也是一种化学体系，化学分析方法如质谱法、红外光谱法、拉曼光谱法<sup>[11]</sup>已有报道用于等离子体的诊断。另外等离子体中的化学反应也是等离子体诊断的重要依据，原子滴定法是常用的化学活性物种浓度的定量诊断方法。

使用最多最广泛的是各种静电探针法、光谱学方法、质谱学方法和微波探针法。因为这些方法的诊断能力强，适用范围广，操作相对简单，获得的信息丰富。下面主要介绍其中几种方法的发展历程和使用现状。

## 1.3 等离子体静电探针法的演变历程和适用范围

静电探针方法是由 Irving Langmuir<sup>[12]</sup>早在 1924 年发明的，利用探针附近的静电场与等离子体的相互作用而引起的电荷重新分布所形成的探针电流变化作为诊断依据。最初的探针理论是由 Lagminar 和 Tonk<sup>[13]</sup>给出的，然而这一理论有许多假设前提，使得从探针曲线得到等离子体信息的分析过程的适用范围受到很大限制，这些限制主要是：首先，探针对等离子体的整体状态是有影响。其次，探针附近的鞘层必须是

无碰撞鞘层, 这样当电子和离子到达探针表面时的运动状态才与其在等离子体区的状态是直接相关的, 否则, 探针附近电子、离子的运动状态与等离子体状态之间没有相关性。另外必须满足的条件还包括探针表面形状要规则, 清洁; 探针表面必须是一个电子、离子的吸收体; 探针表面无辉光发生、无二次电子发射现象, 否则这些因素将极大影响探针曲线的特征和诊断结果。虽然静电探针不可避免地干扰它周围的局域环境, 但它还是能在很宽的范围内诊断等离子体参数, 如电子温度  $T_e$ , 电子密度  $n_e$ , 空间电位  $V_{sp}$  和离子束能量  $E_i$  等。测量范围  $n_e$  在  $10^5 \text{ cm}^{-3}$ - $10^{13} \text{ cm}^{-3}$ ,  $T_e$  在  $0.1 \text{ eV}$ - $10^2 \text{ eV}$ ,  $V_p$  在  $0.1 \text{ V}$ - $10^3 \text{ V}$ , 工作气压在  $10^{-4} \text{ Pa}$ - $10^2 \text{ Pa}$  的广阔范围。

最初的 Langmuir 探针是收集探针, 有许多技术弊端, 比如测量等离子体空间电位不准确, 电子饱和电流的测量也有很大随意性。为了解决这个问题, 逐步发明了双悬浮探针<sup>[14]</sup>、发射探针<sup>[15]</sup>和差分发射探针<sup>[16]</sup>。双悬浮探针的测量回路与等离子体之间的是悬浮的, 因此对等离子体的干扰最小。用于测量电子温度和离子电流是非常合适的, 但其缺点是无法用于电子密度的诊断, 并且空间分辨率也不够好。其优点是阻断了探针与等离子体间的导电回路, 避免了探针尖的辉光问题。发射探针使用的是高温灯丝, 可以避免探针表面的沉积污染, 然而高温下灯丝又出现了化学污染, 发射探针不可以用于化学活性等离子体的诊断。发射探针的最大优点是其电子发射保证了探针与等离子体间的欧姆接触, 离子正电荷鞘层不能形成, 这使得电子温度不影响探针与等离子体间的接触, 可以准确测量等离子体空间电位。其弊端是无法测量电子温度。差分探针是由发射探针和收集探针组成的悬浮双探针, 结构类似于冷悬浮双探针, 不同的是差分探针是热探针, 一支探针为发射探针, 另一支为热的收集探针。其优点是对等离子体的干扰比发射探针小, 并且克服了单探针和双探针的污染问题。在功能方面, 将差分探针与发射探针用于等离子体空间电位诊断是非常合适的, 然而却无法诊断电子温度和电子密度, 差分探针诊断等离子体电位的时间响应速度比其它任何探针都快。

普通发射探针用于诊断空间电位时, 时间分辨能力低。与发射探针类似, 单探针和双探针的时间分辨测量速率也很低, 因为这些方法的诊断过程都依赖于探针伏安曲线的记录和分析过程, 进而限制了这些探针的适用范围。

提高探针时间响应速度的方法大都是以牺牲探针的诊断能力为代价。用单探针直接指示悬浮电位可视为等离子体空间电位的一种有效探测方法。对于无碰撞鞘层而言, 悬浮电位与空间电位有如下关系:  $V_p - V_f = \frac{kT_e}{2e} \ln \frac{M}{2\pi m}$  (其中  $k$  是玻尔常数,  $T_e$  是电子温度,  $M$  是离子和电子质量,  $e$  是电子电量), 因此悬浮电位的测量可以实现空间电位的测量, 并且这种方法可以提高时间响应速度, 然而无法测量电子温度, 并且  $V_f$  与  $V_p$  间的关系也不是固定的, 一般情况下  $V_f$ ,  $V_p$  发生变化时,  $T_e$  也随之变化。另外当电子分布不是 Maxwell 分布时,  $V_f$  对高能电子成份敏感, 与低能电子无关, 此时  $V_p$  与  $V_f$  不具有上述关系。发射探针的悬浮电位在强发射时会接近等离子体空间电位, 但是强发射的程度直接影响测量准确度。除此之外发射探针无法用于高密度和超低密度等离子体, 因为在高密度等离子体中要实现强发射十分困难, 而对低密度等离子体, 探针发射时的空间电荷限制会导致测量的误差迅速增大, 从而失效。电流偏置的发射探针是发射探针技术的最新发展, 其特点是避免了传统发射探针的强发射要求, 并且对等离子体的干扰可以降到最小。

射频放电等离子体是一种高频等离子体体系<sup>[17]</sup>, 其独特的放电机理和等离子体特点使其成为现代等离子体物理学和工艺学的主要研究目标之一。许多射频探针技术获得了发展, 如用于射频自偏压测量的电容探针<sup>[18]</sup>, 自跟随双悬浮探针<sup>[19]</sup>, 射频隔离的单探针和自调谐的单探针<sup>[20]</sup>等。研究用于射频等离子体诊断的静电探针方法和分析技术是目前静电诊断学的主要研究方向之一。

## 1.4 等离子体光谱学的发展<sup>[21]</sup>

等离子体光谱学最早是用做化学分析的一种手段。光谱学用于等离子体诊断始于天体物理学, 应用于实验室等离子体最早是从高温聚变等离子体诊断开始的。等离子体发射光谱作为一种无干扰方法可用于多种等离子体物理特性的诊断, 如等离子体的电子温度、电子密度、激发温度甚至某些动力学过程。

等离子体发射光谱学在低温等离子体诊断中的应用早期主要有两个方面, 即刻蚀和沉积过程<sup>[22]</sup>的机理诊断以及非稳态等离子体发光过程的时间行为分析。随时间变化

的等离子体的光辐射过程携带了等离子体中的电场、电子密度和电子温度的变化信息。最初的时间分辨光谱主要用于射频等离子体的诊断,随着各种非稳态等离子体相差技术的产生和研究的深入,发射光谱广泛用于这些过程的诊断和瞬态状态参数的诊断。例如近年来已有大量发射光谱技术用于研究基于等离子体为工作介质的开关器件。在激光烧蚀等离子体中各种烧蚀产物的形成过程和空间分布可以通过空间分辨发射光谱测量并加以分析而得到。

除了发射光谱技术外,吸收光谱技术<sup>[23]</sup>,激光散射谱,激光诱导荧光<sup>[24]</sup>和激光光电流效应光谱技术也是用于等离子体诊断的常用光谱学方法。发射光谱虽然具有仪器简单的优点,但对于不发光物种的诊断却是间接的。吸收光谱技术目前用于不发光物种成份浓度的定量测量,这种技术定量分析灵敏度高。随着激光技术的发展,特别是半导体红外激光器<sup>[25]</sup>的发展,红外光源的强度得以极大提高,红外吸收技术的灵敏度低的问题得到了较好的解决,然而这种方法的缺点是激光器的调频范围小,不能进行多组份的同步探测。

激光的出现使许多弱光学过程也成为等离子体诊断的重要依据。激光的高功率密度使激光散射成为一种可用的诊断工具。汤姆逊散射的光谱线型提供了电子密度和能量分布的信息。等离子体中的中性成份的瑞利散射强度包含了中性成分密度的信息。更有意义的是拉曼散射谱也被用于等离子体诊断,然而由于散射强度太弱,这种诊断方式的应用仍处于起步阶段。激光的相干性使得等离子体相干现象成为可能,激光干涉图像成为实时反映等离子体密度起伏变化的最直观工具。这些技术的优点是使用方便,解析简便,但缺点是灵敏度低,主要用于稳态等离子体,对于低温等离子体和瞬态等离子体无能为力。激光对等离子体的作用看起来是非接触式和无干扰的,但实际上激光对某些成份的激发会干扰等离子体的电离过程,从而导致放电状态的改变,放电电流随之发生变化,这种效应可用来获得离子,中性粒子密度以及放电动力学的信息。

## 1.5 等离子体相关学科的发展提出了新的诊断领域

等离子体学科的迅速发展和深化需要发展新的等离子体诊断技术。等离子体中存在大量载能成分,比如自由基,激发态原子和分子等,这些成分虽不直接影响等离子

体电磁学性质,然而对于等离子体的微观过程却起着十分重要的作用,这些过程已成为新兴等离子体学科的发源地及等离子体物理学技术发展新的生长点。等离子体发光学、等离子体化学、等离子体生物学和等离子体光学等学科都提出了等离子体诊断的新问题。等离子体诊断的内容日益丰富,从带电粒子到中性粒子,从宏观特性到微观特性,从系统特性到过程规律,从微观成分到宏观成分,从气态属性到凝固态属性等,发展新的诊断方法已成为等离子体科学发展的迫切需要。

## 1.6 本文的研究内容和目标

虽然 Langmuir 探针尚存在某些弊端,但它仪器简单,操作简便,诊断能力强,适用范围广,获得信息丰富的优点还是非常明显的。因此 Langmuir 探针仍是低温等离子体诊断的重要工具。

随着信息时代的来临,等离子体技术已经广泛应用于各个领域,这也就使得等离子体环境越来越复杂。若要很好的应用等离子体技术,掌握等离子体参数是必不可少的前提,因此,设计具有抗干扰能力的 Langmuir 探针系统已经成为等离子体诊断中急需解决的首要问题。

本文提出了一种新型积分 Langmuir 探针采集数据的方法—积分网络。弥补了传统探针采集数据时的不足,增强了探针的抗干扰能力,提高了探针信噪比。

研究内容和目标:

### 1、新型积分 Langmuir 探针的设计:

针对对 Langmuir 探针造成干扰的不同因素,本文提出了不同的解决方案。分别从抗干扰原理、抗干扰装置和实验结果三方面予以说明。着重介绍了积分网络,对其工作原理、电路结构、提高探针信噪比做了详尽阐述。并以积分网络为基础设计出一套基于计算机的新型积分 Langmuir 探针系统,包括探针电源部分和数据采集部分。设计工作主要包括:电路原理图绘制、印刷电路板制作、电子元器件焊接、整体电路调试、软件 Visual C++程序开发、系统调试、完成 Langmuir 探针设计。

### 2、等离子体诊断实验:

将设计出的 Langmuir 探针用于具有干扰环境的等离子体进行诊断实验,获取等离子体参数,并与普通 Langmuir 探针诊断结果进行比较,验证其抗干扰效果。



## 2 Langmuir 探针系统及抗干扰方法

### 2.1 引言

等离子体的某些参数如电子温度, 电子密度等在等离子体技术应用中起着至关重要的作用, 而 Langmuir 探针就是对等离子体进行诊断获取这些参数的一种简便易行的装置<sup>[26-35]</sup>。从 Langmuir 探针得到的 I-V 特性曲线中, 可以获得电子温度, 电子密度等参数信息。Langmuir 探针已经广泛应用于各种等离子体环境中<sup>[36]</sup>。

### 2.2 Langmuir 探针<sup>[37]</sup>

#### 2.2.1 Langmuir 探针工作原理<sup>[38]</sup>

等离子体中插入一悬浮金属丝, 由于等离子体内电子质量远小于离子质量, 因而电子速度远远大于离子速度, 这将导致悬浮在等离子体中的金属丝表面在极短时间内积累相当数量的负电荷, 以致产生明显的负电位, 此负电位排斥电子而吸引离子, 过程平衡时, 金属丝的电位为  $V_F$ , 等离子体空间电位为  $V_{SP}$ , 则在  $V_{SP}-V_F$  的作用下, 电子电流等于离子电流, 即  $j_e=j_i$ 。  $V_F$  即为悬浮金属丝的悬浮电位。显然,  $V_F < V_{SP}$ ,

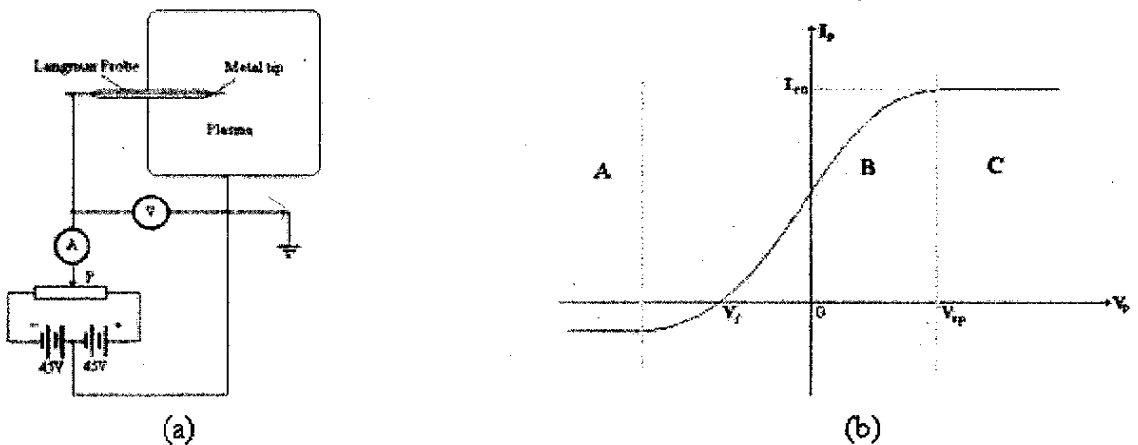


图 2.1 (a) Langmuir 探针电路图. (b) Langmuir 探针的 I-V 特性曲线

Fig. 2.1 (a) The schematic diagram of Langmuir probe. (b) The I-V characteristic curve of Langmuir probe.

亦即在金属丝与等离子体之间形成了一个电位差为  $V_{SP} - V_F$  的鞘层。如果我们在等离子体中的金属丝的末端连上简单的电路，便构成了 Langmuir 探针系统，如图 2.1(a) 所示。调节电位器可使探针（即金属丝）的电位由  $-45V$  变化到  $+45V$ 。假设在调节探针电位的过程中，等离子体的状态保持稳定，对应探针电位由负到正的每一个值，记录下电流表所指示的相应的每一个流过探针的电流值，据此可得探针 I-V 特性曲线，如图 2.1(b) 所示。

下面将单探针 I-V 特性曲线分为三个区域进行分析：

A 区：饱和离子电流区。在该区，探针电位 ( $V_P$ ) 远远小于等离子体空间电位 ( $V_{SP}$ )，此时全部电子都受鞘层拒斥场的作用不能到达探针表面，只有正离子能被探针收集，收集的离子数量由等离子体性质决定，而与鞘层电场的大小无关。探针所能收集的最大电流即为探针饱和离子电流。

C 区：饱和电子电流区。与 A 区的情形类似，在该区  $V_P$  大于等离子体空间电位  $V_{SP}$ ，此时全部正离子都受鞘层拒斥场的作用不能到达探针表面，只有电子能被探针收集。探针所能收集的最大电流即为探针饱和电子电流。

B 区：过渡区。该区的情形稍微复杂一点。在该区  $V_P < V_{SP}$ ，因此落在鞘层表面的正离子全部能到达探针表面，构成探针电流的一部分，不过由于它在数量上较电子电流小得多，为了方便起见，往往忽略它对探针电流的贡献，只考虑电子电流。假设电子具有 Maxwell 的速度分布，那么能够克服拒斥场的作用而到达探针表面的电子数是对 Maxwell 分布函数某一区间的积分，故在过渡区探针电流与探针电压间具有指数函数的关系。

### 2.2.2 由探针 I-V 特性曲线获取等离子体参数的步骤

1、观察 I-V 特性曲线可得等离子体空间电位  $V_{SP}$  与悬浮电位  $V_F$ ：

当  $V_P = V_{SP}$  时，探针电流达到电子饱和电流，而当  $V_P = V_{SP}$  时，探针电流呈指数形式衰减，因此在 I-V 特性曲线上会出现一个拐点，此拐点对应的横坐标即为等离子体空间电位  $V_{SP}$ ，I-V 特性曲线与横坐标的交点即为悬浮电位  $V_F$ ，此处流经探针的电子电流与离子电流大小相等而方向相反。

2、电子温度：

既然在过渡区探针电流  $I_p$  和鞘层电场 ( $V_p - V_{SP}$ ) 之间是指数函数关系, 即

$$I_p = I_e - I_i \approx I_e = I_{eo} \exp\left[\frac{e(V_p - V_{SP})}{kT_e}\right]$$

对上式取对数, 得

$$\frac{e(V_p - V_{SP})}{kT_e} = \ln I_p - \ln I_{eo}$$

$$kT_e = \frac{e(V_p - V_{SP})}{\ln I_p - \ln I_{eo}}$$

这就是说, 如果将实验测得的 I-V 特性曲线取半对数 (即纵坐标取对数, 变为  $\ln I_p$ , 而横坐标仍为 V), 得  $\ln I_p = f(V_p)$ , 则在过渡区内,  $\ln I_p$  与 V 应呈线性关系, 该直线的斜率即为等离子体的电子温度 ( $kT_e$ ) 的倒数。

### 3、电子密度和离子密度:

对应等离子体空间电位  $V_{SP}$  的纵坐标即为饱和电子电流  $I_{eo}$ , 它的表达式为:

$$I_{eo} = j_{eo} A_p = \frac{1}{4} e n_{eo} A_p \bar{v}_e = 2.7 \times 10^9 n_{eo} A_p \sqrt{kT_e}$$

$$n_{eo} = 3.7 \times 10^8 I_{eo} / A_p \sqrt{kT_e}$$

式中  $A_p$  为探针面积, 单位为  $\text{cm}^2$ ;  $I_{eo}$  的单位为 mA;  $kT_e$  的单位为 eV。由等离子体的电中性可知,  $n_i = n_{eo}$ , 故可求得离子密度  $n_i$ 。  $n_i$  和  $n_{eo}$  单位为  $\text{cm}^{-3}$ 。

### 4、电子能量分布函数:

在过渡区探针电流 (电子电流) 来自于对电子能量分布函数的积分, 因此, 对实验测得的 I-V 特性曲线的过渡区部分求二次微分即可得到电子的能量分布函数 (EEDF)。

## 2.3 Langmuir 探针在等离子体诊断中的抗干扰方法

### 2.3.1 Langmuir 探针在等离子体诊断中的干扰问题

由于 Langmuir 探针的工作环境中经常会存在电场、磁场、高压脉冲等因素, 这些因素都会对 Langmuir 探针产生一定程度的干扰<sup>[39]</sup>, 要想获得准确的等离子体参

数, 探针的抗干扰就成为首先要解决的问题, Braithwaite<sup>[40]</sup>, Sabadi<sup>[41]</sup>, Brown<sup>[42]</sup>, Sanmartin<sup>[43]</sup>等人已经从理论和实验方面做了很多工作试图解决这个问题。

### 2.3.2 Langmuir 探针的抗干扰方法

#### 2.3.2.1 滤波器

随着等离子体技术的发展, 射频等离子体起着越来越重要的作用, 而射频源对探针造成的干扰又非常大, 目前已有人提出一些抗射频干扰的方法<sup>[44-47]</sup>, 但都有不同程度的弊端。使用滤波器就可以起到很好的抗射频源干扰的效果<sup>[48]</sup>。

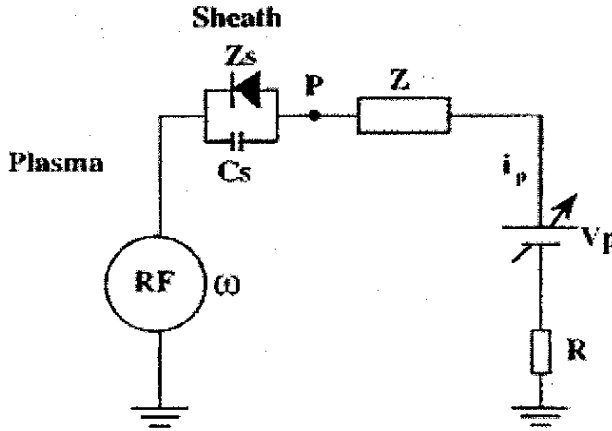


图 2.2 射频等离子体中的探针电路示意图

Fig. 2.2 Schematic diagram of the probe circuit in a rf plasma

图 2.2 是 Langmuir 探针在射频等离子体中的示意图, P 代表探针,  $Z_s$  代表鞘层阻抗, 其由鞘层电容  $C_s$  和一个与探针伏安特性有关的非线性电阻组成,  $\omega$  代表射频电压的角频率,  $V_p$  代表加于探针的电压,  $R$  是用于测量探针电流的电阻,  $Z$  代表由传输线组成的用于消除射频电压基波  $\omega$  及其谐波的滤波器。由传输线理论可知:

$$\begin{pmatrix} V_1 \\ I_1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cosh kx & Z_0 \sinh kx \\ \sinh kx / Z_0 & \cosh kx \end{pmatrix} \begin{pmatrix} V_2 \\ I_2 \end{pmatrix}$$

$V_1$  和  $I_1$  是输入电压和输入电流,  $V_2$  和  $I_2$  是距离输入端为  $x$  处的电压和电流,  $Z_0$  是传输线的特征阻抗,  $k$  为波矢量, 其定义为:

$$k = \beta + i\alpha$$

$\beta$  称为相位常数,  $\alpha$  称为衰减常数<sup>[49]</sup>, 则对于  $x = l$  时的输入阻抗为<sup>[50]</sup>:

$$Z_{in} = \frac{V_1}{I_1} = Z_0 \frac{Z_l + Z_0 \tanh kl}{Z_0 + Z_l \tanh kl}$$

$Z_l = \frac{V_2}{I_2}$  是负载阻抗。

一般来说, 如果同轴电缆用于传输频率高于 10MHz 的信号时, 波矢量主要取决于衰减常数, 相位常数可忽略, 这样  $k \approx i\alpha$ , 而

$$Z_0 = (L/C)^{1/2} \quad \alpha = 2\pi f(LC)^{1/2}$$

$L$ ,  $C$  分别为传输线单位长度的电感与电容,  $f$  为信号频率。

考虑两种极限情况: 如果负载短路 ( $Z_l = 0$ ), 则

$$Z_{in} = iZ_0 \tan\left(\frac{\pi f}{2 f_0}\right)$$

$f_0$  为固有频率, 定义为:

$$f_0 = \frac{1}{4l(LC)^{1/2}}$$

当信号频率  $f$  等于我们想要消除的射频干扰频率  $f_c$  时,  $f_c$  定义为:

$$f_c = (2n+1)f_0; \quad n=0, 1, 2, 3, \dots$$

$$Z_{in} = \infty$$

如果负载开路 ( $Z_l = \infty$ )

$$Z_{in} = -iZ_0 \cot\left(\frac{\pi f}{2 f_0}\right)$$

当  $f = f_c$  时

$$Z_{in} = 0$$

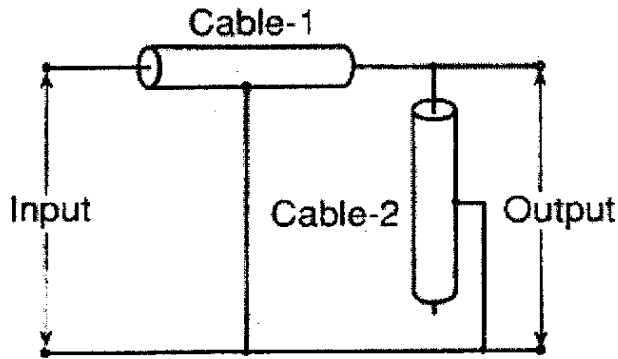


图 2.3 滤波器的基本组成

Fig. 2.3 Basic constitution of the filter

这样，只需调节传输线的长度，就可以使输入阻抗为无穷大或零。

基于上述理论，设计滤波器如图 2.3 所示，传输线（同轴电缆）Cable-1，Cable-2 具有相同的固有频率  $f_0$  和其他物理参数。Cable-2 末端悬空，即相当于负载开路 ( $Z_l = \infty$ )，则 Cable-2 的输入阻抗  $Z_{in} = 0$ ，Cable-1 的负载即为 Cable-2 的输入阻抗  $Z_{in} = 0$ ，即相当于 Cable-1 末端负载短路 ( $Z_l = 0$ )，则 Cable-1 的输入阻抗  $Z_{in} = \infty$ 。换句话说，Cable-1 和 Cable-2 对于我们想要消除的射频干扰频率  $f_c$  所起的作用就像一个断开的开关和一个闭合的开关，如图 2.4 所示：

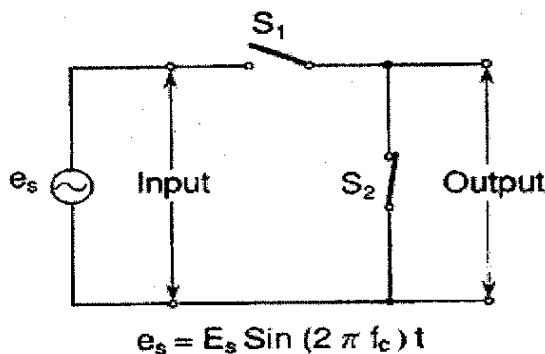


图 2.4 滤波器的开关特性示意图

Fig. 2.4 Schematic diagram of the switching property of the filter

有这两个开关的存在，射频干扰频率  $f_c$  就很难从输入端传到输出端，得到了很好的抑制。而对探针信号频率影响不大。

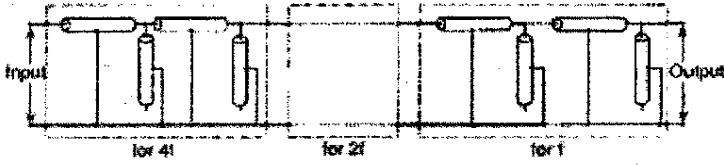


图 2.5 用于射频等离子体的滤波器网络

Fig. 2.5 Prototype of the filter for rf plasmas.

图 2.5 是设计的滤波器网络，它由 8 个级联的倒 L 形子网络组成：其中 4 个用于消除射频源基频  $f$  (13.56MHz) 干扰，2 个用于消除谐波  $2f$  干扰，2 个用于消除谐波  $4f$  干扰。

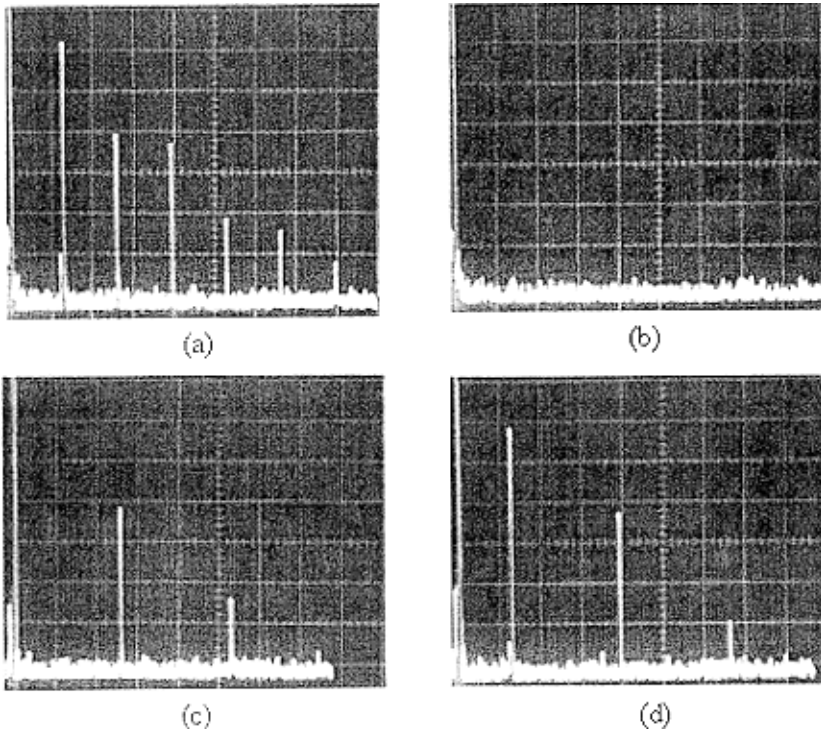


图 2.6 (a) 探针信号在射频等离子体中的频谱图。(b) 经过整个滤波器的频谱图。(c) 经过用于消除基频  $f$  滤波器的频谱图。(d) 经过用于消除谐波  $2f$  和  $4f$  滤波器的频谱图。

Fig. 2.6 (a) Frequency spectrum of the probe-detected rf wave voltage. (b) Frequency spectrum after passing the filter. (c) Frequency spectrum after passing the filter for  $f$ . (d) Frequency spectrum after passing the filters for  $2f$  and  $4f$ .

图 2.6 (a)是未通过滤波器网络的 Langmuir 探针信号在射频等离子体中的频谱, 它由零频率标志, 基频  $f$ , 谐频  $2f$ 、 $3f$ 、 $4f$ 、 $5f$ ,  $6f$  构成。底部的波动是由于频谱分析仪的内部噪音引起的。(b)是通过整个滤波器网络的 Langmuir 探针信号的频谱, 除了零频率外, 没有其它频率出现, 证明了从基频直到 6 次谐频的射频噪音均被消除。(c)是通过 4 个用于消除基频  $f$  的滤波器子网络的 Langmuir 探针信号的频谱, 基频  $f$  及高奇次谐频  $3f$ ,  $5f$  被消除。(d)是通过 2 个用于消除谐频  $2f$  和 2 个用于消除谐频  $4f$  的滤波器子网络的 Langmuir 探针信号的频谱, 谐频  $2f$ 、 $4f$ 、 $6f$  被消除。

### 2.3.2.2 差分放大器

由于同轴电缆所具有的 RC 特性, 当把一个锯齿波加到 Langmuir 探针上时, 经常会出现一个近似方波的诱导噪音波形, 而且噪音能量会随着锯齿波扫描频率的提高而增大, 可以采用两条同轴电缆和一个差分放大器配合使用来消除这个噪音<sup>[51,52]</sup>, 原理图如图 2.7 所示:

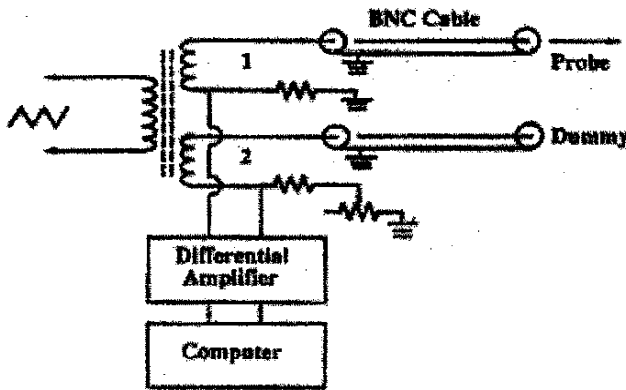


图 2.7 双同轴电缆 Langmuir 探针电路

Fig. 2.7 A dual-cable Langmuir probe circuit

锯齿波由锯齿波发生器产生并经过放大后接到变压器的初级线圈上, 变压器的次级线圈由两组相同的绕组构成。绕组 1 经过一个固定电阻和同轴电缆把电压加到探针上, 其中电阻用于测量探针电流; 绕组 2 接地端连接一个滑动变阻器和一个固定电阻, 另一端与一根同轴电缆相连, 同轴电缆末端悬空。两根同轴电缆具有相同的型号和长



度，这样它们就具有近乎相同的 RC 特性。其实两根同轴电缆的 RC 特性不会完成相同，这主要是因为绕组 1 和绕组 2 上接入的电阻不同，进而会影响同轴电缆的 RC 特性，因此电路需要补偿，调节滑动变阻器，直到两路信号在示波器上的波形完全重合，这样两根同轴电缆上产生的诱导噪音就几乎相同，把经过补偿的信号连接到差分放大器的输入端，则作为共模信号的诱导噪音就得到很好的抑制，而作为差模信号的探针信号就得到了有效的放大。

图 2.8 (a)是与探针相连的同轴电缆上产生的诱导噪音波形。(b)是末端悬空的同轴电缆上产生的诱导噪音波形。

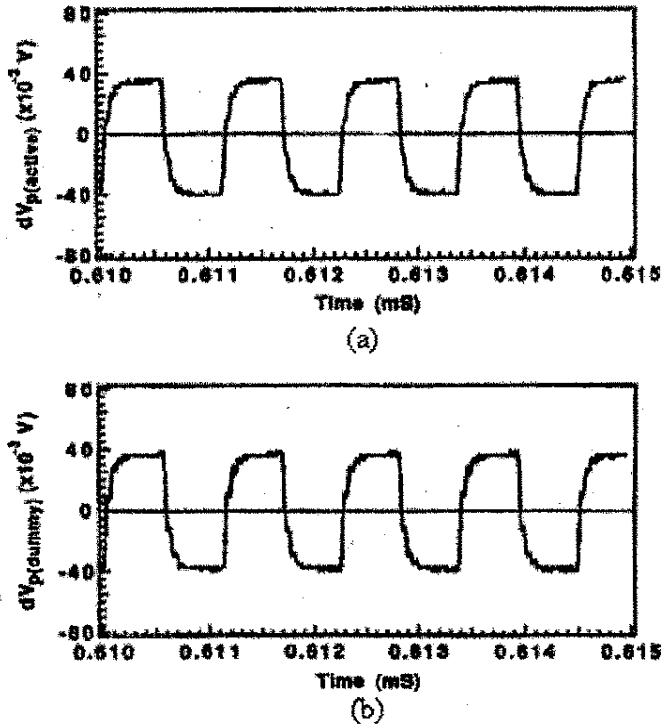


图 2.8 (a) 诱导噪音在连接探针的同轴电缆上的波形。(b) 诱导噪音在末端悬空的同轴电缆上的波形

Fig. 2.8 (a) The induced noise wave form from the active cable. (b) The induced noise wave form from the dummy cable.

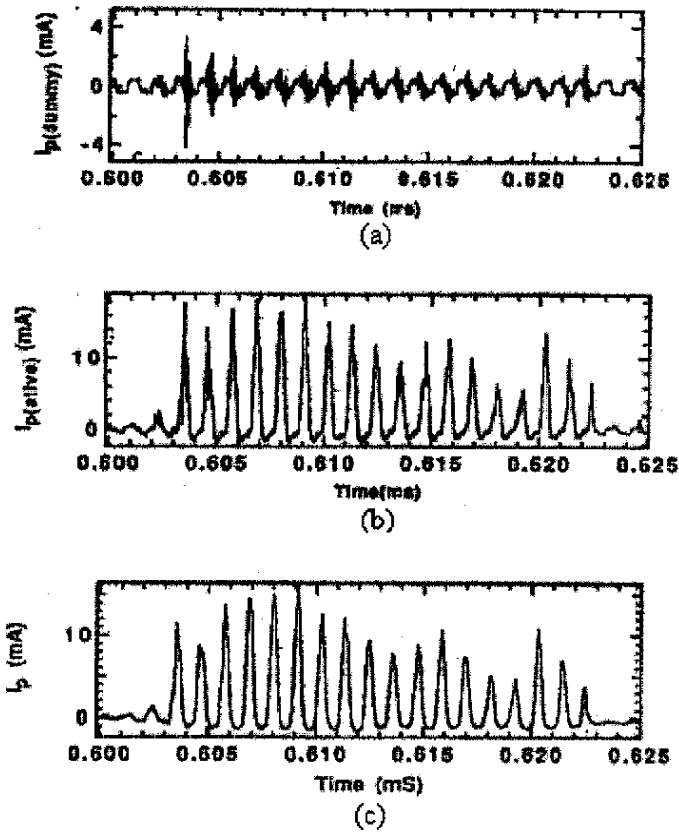


图 2.9 (a) 诱导噪音和高频干扰在末端悬空同轴电缆上的波形. (b) 信号差分前探针电子电流. (c) 信号差分后探针电子电流

Fig. 2.9 (a) The induced noise and high-frequency pickups from the dummy cable. (b) The total electron current from the active probe before differentiation. (c) The electron current after the noise and pickups have been eliminated by a differential amplifier.

图 2.9 (a)是悬空同轴电缆上产生的噪音信号, 可以看到在方波噪音波形上叠加了很大的高频干扰信号, 这些诱导噪音和高频干扰使探针信号产生的很大的失真, 如图 (b)所示, 图(c)是两路信号经过差分后得到的探针信号波形, 可以看出, 其波形变的很清晰, 甚至高频干扰也被消除, 这是因为高频干扰对于两根同轴电缆来说, 也是一种共模模式。这些噪音及高频干扰信号对 I-V 特性曲线的影响可以从图 2.10 中看到, 图 2.10 (a)、(b)分别是对图 2.9(b)、(c)的第 5 个峰的上升部分的放大。噪音信号使图 2.10 (a)图中的 I-V 特性曲线产生很大的失真, 而(b)图中的 I-V 特性曲线在消除噪音后

就变得非常平滑。

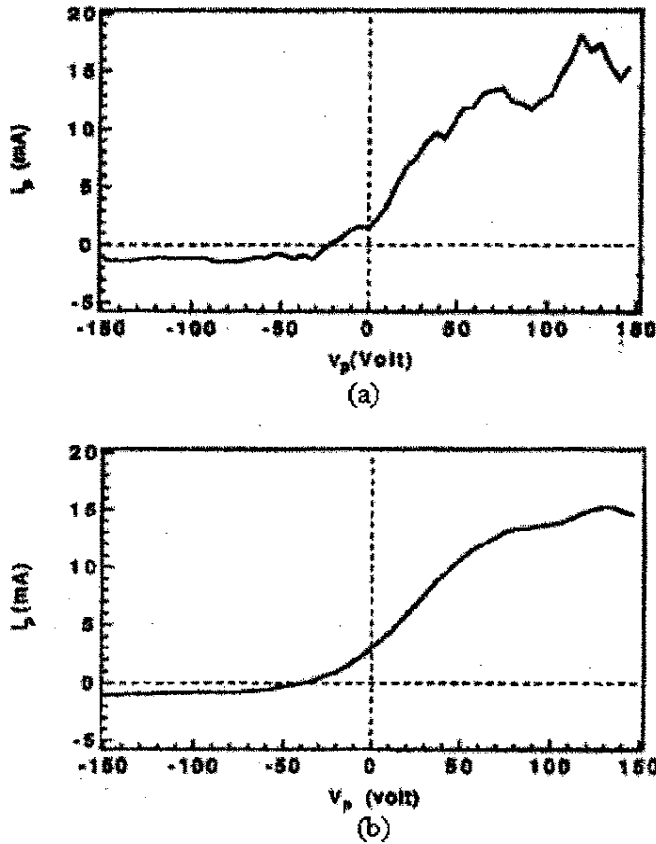


图 2.10 (a) 对图 2.9 (b) 的 I-V 特性曲线上第 5 个峰的上升部分的放大. (b) 对图 2.9 (c) 的 I-V 特性曲线上第 5 个峰的上升部分的放大

Fig. 2.10 The expanded plots of the I-V characteristics on the rising side of peak 5 in (a) Fig.2.9 (b) and (b) Fig.2.9 (c).

## 2.4 本章小结

本章介绍了 Langmuir 探针的工作原理及获取等离子体参数的方法, 指出了 Langmuir 探针在等离子体诊断中存在的干扰问题, 并提出了解决方案. 解决方案虽然均具有抗干扰能力, 但只是针对某一特定干扰有效, 而 Langmuir 探针的工作环境是相当复杂的, 干扰因素也有很多, 因此, 我们有必要将以上几种方法结合起来使用,

以进一步提高探针的抗干扰能力。

### 3 新型积分 Langmuir 探针系统

#### 3.1 积分 Langmuir 探针系统结构

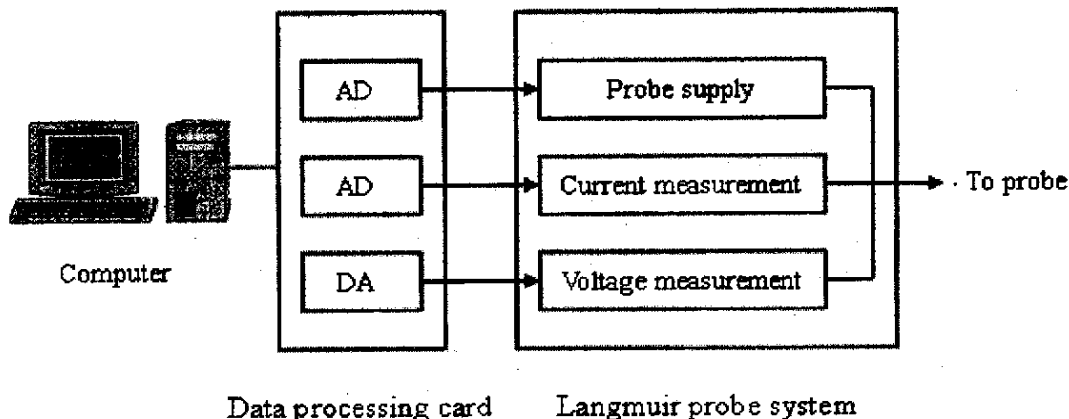


图 3.1 探针系统图

Fig. 3.1 Schematic diagram of Langmuir probe.

图 3.1 是探针系统的示意图，探针系统以数据采集卡为桥梁与计算机连接。探针系统有三个主要的模块组成：探针电压测量部分，使用积分网络，检测探针电压；探针电流测量部分，使用积分网络，检测流经电流传感电阻的探针电流形成的电压，通过 A/D 转换，将数据值返回到数据采集卡；探针电压设定部分，接受控制电压（由数据采集卡上 DAC 提供），用来设定加于探针上的扫描电压。探针系统三模块示意图如图 3.2 所示。

#### 3.2 积分网络

对于积分网络，如图 3.3 所示，图中 Integrate and dump 为一积分电路。Comparator 是一设定了参考电压  $V_{ref}$  的比较器，Optical isolation 是光电耦合器，IEND 端连接到数据采集卡。To current resistors 端连接的即为被采集的探针电压  $V_i$ 。电压采集开始前，电容 C 上方的开关闭合，释放其中存储的电荷，然后断开，在开关断开的同时，数据采集卡内的计数器开始计数，电压采集开始。探针电压  $V_i$  开始对电容 C 充电，进

行积分，积分电路的输出电压  $V_o$  随时间线性增加，其关系为：

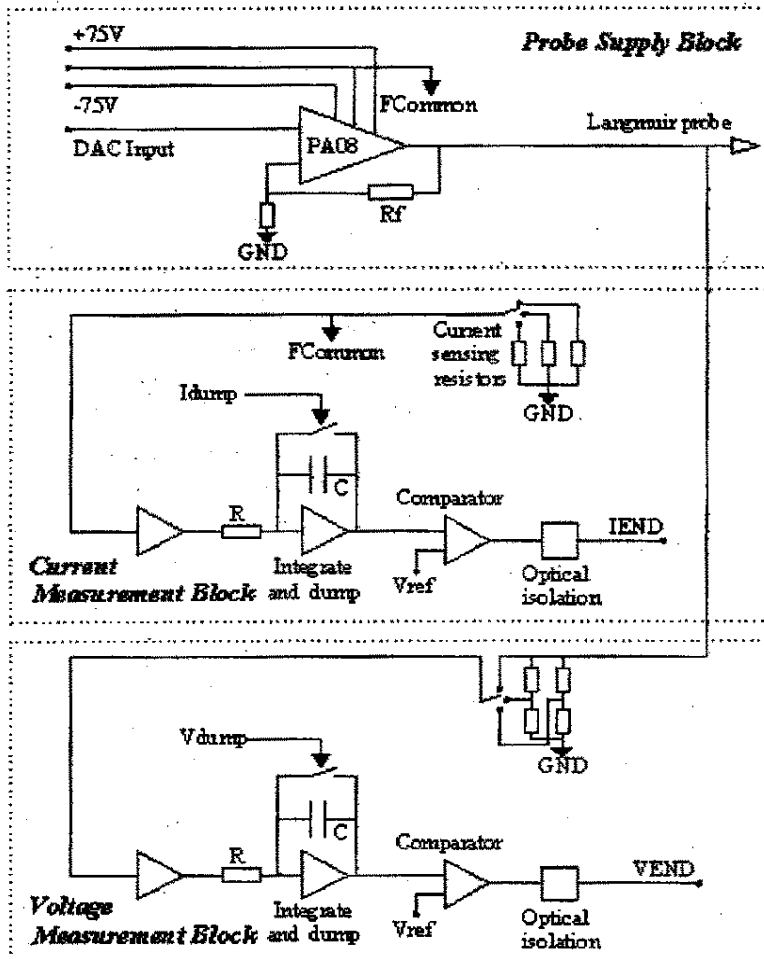


图 3.2 积分 Langmuir 探针系统示意图

Fig. 3.2 Schematic diagram of the Langmuir probe driver.

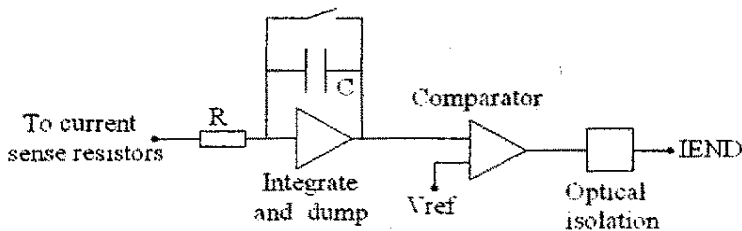


图 3.3 积分网络电路

Fig. 3.3 Integrate-and-dump circuit

$$V_0 = V_i t / \tau$$

$\tau = RC$  为时间常数, 图 3.4 为积分电压输出与积分时间的线性关系波形图:

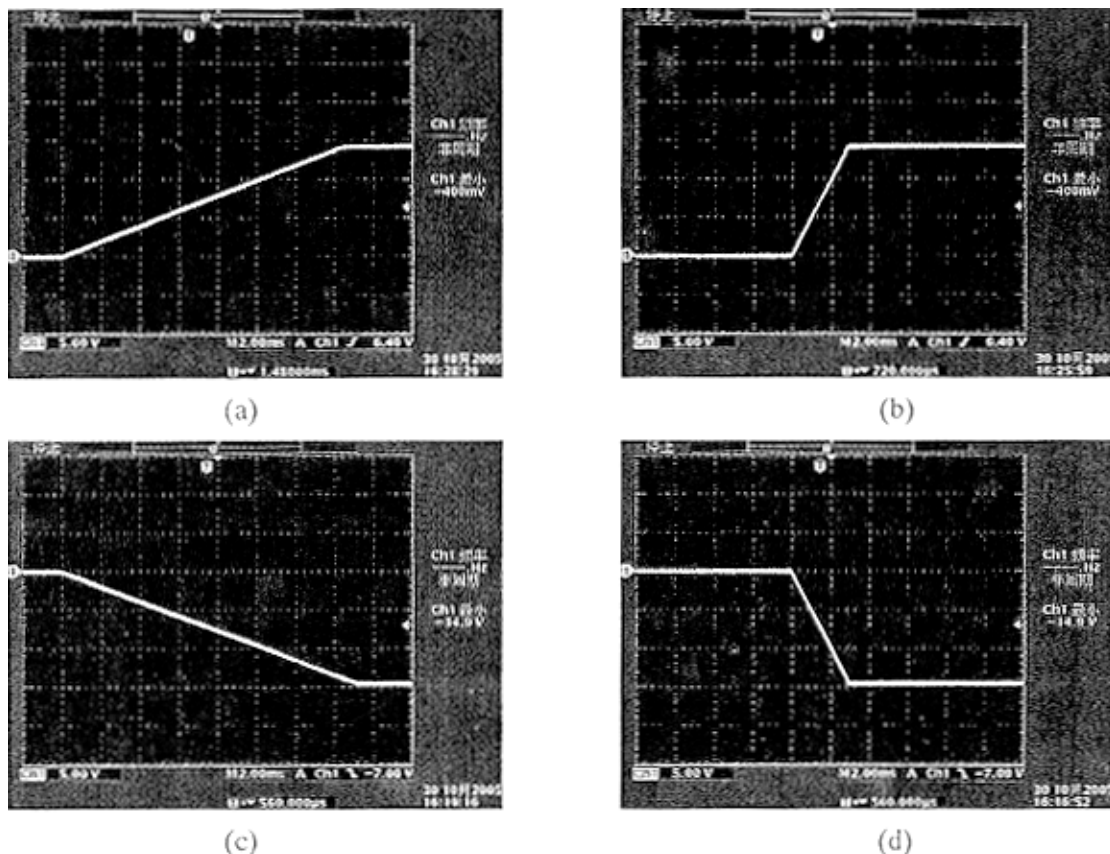


图 3.4  $\tau = 10^{-3}s$  时的积分器输出波形. (a) 输入电压为-1V. (b) 输入电压为-5V. (c) 输入电压为+1V. (d) 输入电压为+5V

Fig. 3.4 Integrator output wave form when  $\tau = 10^{-3}s$ . (a) Input voltage is -1V. (b) Input voltage is -5V. (c) Input voltage is +1V. (d) Input voltage is +5V

经过时间  $T$  后, 输出电压  $V_0$  达到比较器预先设定好的参考电压  $V_{ref}$ , 比较器输出状态跳变, 此信号经过光电耦合器到达数据采集卡, 停止计数器的计数。计数值与积分时间  $T$  成正比,  $T$  同时与输入电压  $V_i$  存在关系:

$$V_i = V_{ref} \tau / T$$

从而计数器中的数值就可以表示探针电压  $V_i$  的大小。积分的过程实际上就是信号

对时间的一个平均过程，即当电压加于探针上时，这个电压并不马上被记录下来，而是经过  $T$  时间的积分，相当于对干扰探针信号取平均，把经过平均后的数值作为最后的电压记录值，这个平均过程对叠加于探针的噪音干扰信号起到很好的抑制作用。电流的采集与此同理。

### 3.3 积分探针系统主要特点

相对于基于 ADC 采集数据的传统探针系统，此探针系统具有如下特点：

#### 3.3.1 提高探针信噪比

Langmuir 探针传统抗干扰(叠加于探针的噪音干扰)的方法是在探针的每一组电压、电流值上采集多次数据取平均，把平均值作为探针 I-V 特性曲线的一组电压、电流值<sup>[53-55]</sup>。采用这种方法尽管可以改善探针信噪比，但它是牺牲采集时间与转换为代价的，而采用积分网络我们就可以在积分的同时完成数据转换，节省了转换时间，因而在相同的工作周期内可以得到较高的探针信噪比<sup>[56]</sup>。

传统抗干扰方法采集一个电压或电流样点时，噪音能量为<sup>[57]</sup>：

$$N_1 = \pi f_c \eta / 2$$

$\eta$  为单边噪音能谱密度， $f_c$  为单极低通滤波器的角频率。

则对于  $n$  个样点，噪音能量变为：

$$N = nN_1 = n\pi f_c \eta / 2$$

采集一个电压或电流样点时，信号能量为：

$$S_1 = V^2$$

$V$  为信号的振幅。

对于  $n$  个样点，信号能量变为：

$$S = n^2 S_1 = n^2 V^2$$

则对于  $n$  个样点，其信噪比为：

$$S/N = 2V^2 n / \pi f_c \eta$$



而对于积分网络:

噪音能量为:

$$N = \eta T / 2\tau^2$$

$T$  为积分时间。

信号能量为:

$$S = (VT/\tau)^2$$

则其信噪比为<sup>[58]</sup>:

$$S/N = 2V^2T/\eta$$

对于传统抗干扰方法, 假设一次电压扫描时间为  $T_0$ , 而在一次扫描时间内要采集  $N_0$  个电压值, 则采集每个电压的时间为  $t_0 = T_0/N_0$ , 电压值是由数模转换器 DAC 设定的, DAC 有一个写入时间  $t_w$ , 系统还有一个反映时间  $t_d (=1/f_c)$ , 如图 3.5 所示:

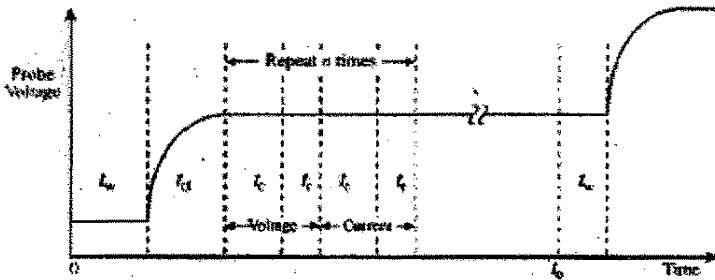


图 3.5 特定电压下采集  $n$  个样点的时间表

Fig. 3.5 Timing diagram for  $n$  samples at a given voltage level

第一组  $t_c$ 、 $t_r$  分别为模数转换器 ADC 把探针模拟电压转换为数字电压的转换时间和把数字电压读入存储器的读入时间; 第二组  $t_c$ 、 $t_r$  分别为模数转换器 ADC 把探针模拟电流转换为数字电流的转换时间和把数字电流读入存储器的读入时间, 这两个过程在同一电压与电流值上重复  $n$  次, 就得到  $n$  组电压与电流值, 把这  $n$  组电压与电流值取平均, 即可以得到一组探针电压与电流值。由图 3.5 可以得到:

$$t_0 = t_w + t_d + 2n(t_c + t_r)$$

则样点:

$$n = \frac{t_0 - t_w - t_d}{2(t_c + t_r)}$$

对于积分网络采集数据过程，如图 3.6 所示：

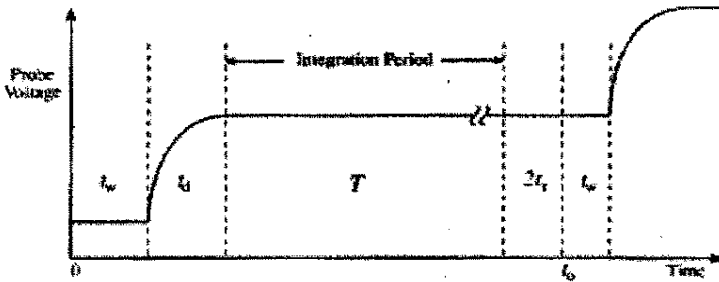


图 3.6 特定电压下积分网络采集数据的时间表

Fig. 3.6 Timing diagram for an integrate-and-dump network at a given voltage level

上图中用积分时间  $T$  取代了图 3.5 中的  $n$  次电压、电流的转化与读入时间，并采用了两个积分器分别对电流和电压积分平均，由图可知：

$$t_0 = t_w + t_d + T + 2t_r$$

则积分时间：

$$T = t_0 - t_w - t_d - 2t_r$$

基于目前电子产品的一些典型时间：

$$t_0 : 1ms, t_w : 5\mu s, t_r : 7.5\mu s, t_c : 10\mu s, t_d : 10\mu s$$

可得到样点：

$$n = 28$$

积分时间：

$$T = 0.97ms$$

将其分别代入采用传统方法和积分网络采集数据的信噪比公式，我们可以发现采用积分网络的信噪比要比传统抗干扰方法的信噪比高出 10.3db。

若令两种方法的信噪比相同，可以得到：

$$n = \pi T f_c = 300$$

即传统抗干扰方法的样点从 28 个取平均提高到 300 个取平均，才能达到和积分

网络相同的信噪比，换句话说，积分网络的信噪比相当于传统抗干扰方法的 300 个样点取平均的信噪比，从而，积分网络的信噪比远远高于传统抗干扰方法的信噪比。

### 3.3.2 数字信号传输

传统探针采集到的数据是通过同轴电缆传送到数据采集卡的，即传输的是模拟信号，由于模拟信号自身具有的易受干扰，传输过程中容易发生衰减等弊端，这就会增大采集数据的误差。采用积分网络从比较器到数据采集卡之间同轴电缆上传的信号只是光隔发出的高低电平，也就是数字信号，如图 3.7 所示，数字信号的一个最显著特点就是具有很强的抗干扰能力，从而避免了传统方法这段线路上传输易受干扰的模拟信号的弊端，进一步增强了抗干扰能力，提高了信噪比。

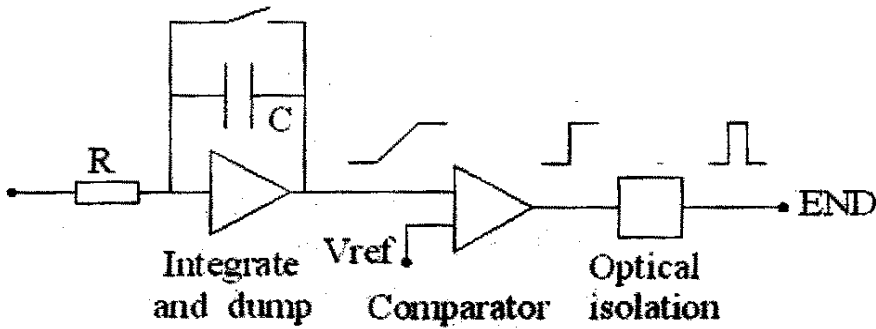


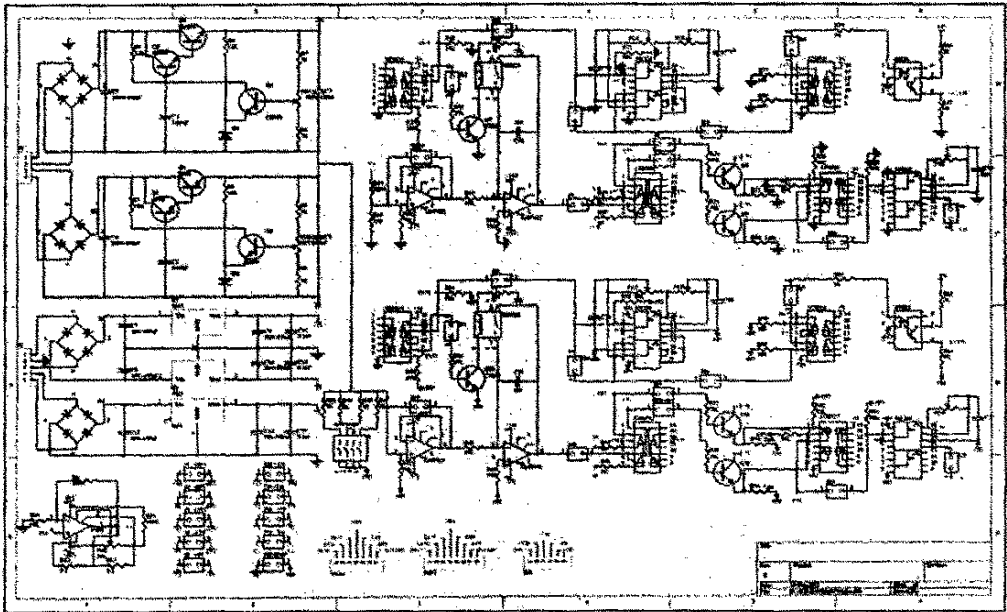
图 3.7 数字信号传输示意图

Fig. 3.7 Schematic diagram of digital signal transmission.

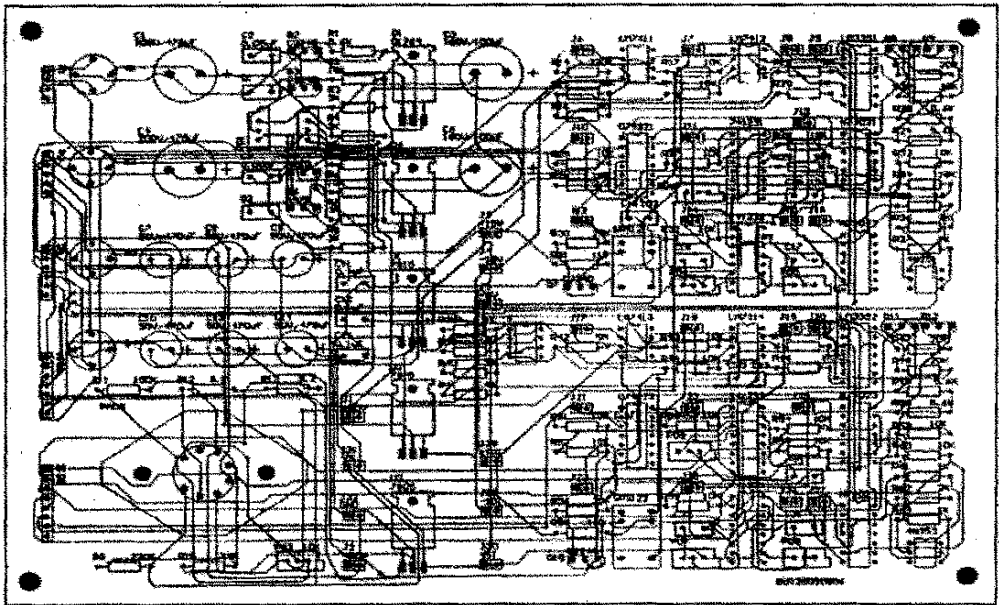
### 3.3.3 采集过程自动完成 A/D 转换

传统探针采集到的电压需要通过数据采集卡上的一个独立的 A/D 转换器把模拟电压转换成数字电压，然后进行存储。此探针系统由于采用积分网络，在对一个电压进行采集的同时，会同步启动一个计数器对积分的时间进行计数，计数器中的数值和积分时间成正比，积分电压大小和积分时间成反比，从而，积分电压和计数器中的计数值建立了联系，计数器中的数值就可以表示积分电压的大小。对一个电压采集结束时，也同时完成了模拟电压到数字电压（计数器中的计数值）的转换。

### 3.4 积分探针系统电路设计



(a)



(b)

图 3.8 (a) 探针系统电路原理图. (b) 探针系统印刷电路板图

Fig. 3.8 (a) SCH of Langmuir probe. (b) PCB of Langmuir probe.

图 3.8 (a)是探针系统电路原理图，原理图左方为电源部分，负责为集成运算放大器 PA08 和各集成电路供电；右上方为电压采集部分，右下方为电流采集部分。图(b)是探针系统印刷电路板图，表示的是实际电路板中电子元件封装和布线方式。

### 3.5 程序流程图

硬件电路的正确动作是靠软件程序来驱动的，采用 Visual C++编写了采集数据的程序，图 3.9 是程序的流程图。程序分为两个分支：电压采集部分和电流采集部分，

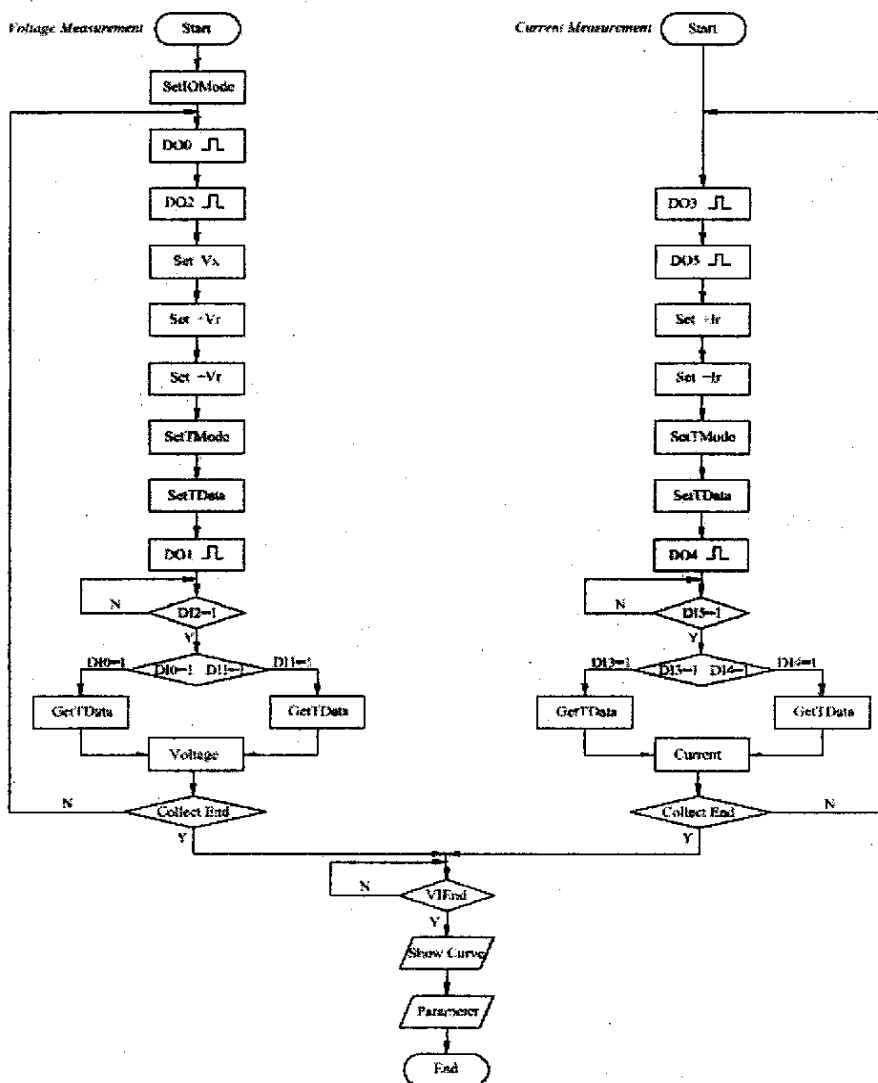


图 3.9 程序流程图

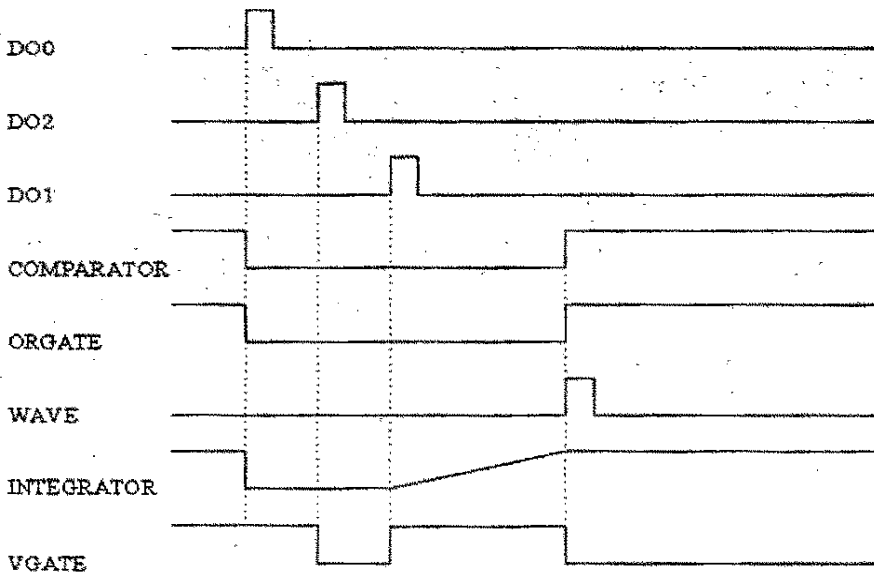
Fig. 3.9 Flow chart of the program.

两部分并行执行。

程序中使用两块数据采集卡对硬件电路进行操作，分别是 AC6651 卡和 AC6302 卡。AC6651 卡是一款通用 I/O、脉冲卡，由 32 路（4 个 8 位端口）可编程开关量及 3 路脉冲、计数器（8254 一片）构成。采用 PCI 总线支持即插即用、无需地址跳线。运用大规模可编程门阵列设计，提高可靠性；AC6302 卡是一款 8 路电压输出通用 D/A 卡，采用 PCI 总线支持即插即用、无需地址跳线。D/A 输出量程采用软件控制，避免跳线开关带来的接触、设置问题。

以电压分支为例，系统加电，程序开始执行，加载板卡的动态链接库 DLL，加载板卡驱动程序，判定 AC 板卡存在，进入用户应用程序部分。调用 AC6651 卡的 API 函数 `long AC6651_SetIOMode(HANDLE hHandle, long iomode)`（参看附录板卡接口函数说明），设置 PORT0 为输出控制字，PORT1 为输入控制字。调用函数 `long AC6651_DO(HANDLE hHandle, long ionum, long iodata)`，使 PORT0 端口的 0 号位 DO0 产生一个方波脉冲，此脉冲加于由或非门 N74021 组成的双稳态的输入端 8 号引脚，输出端 13 号引脚即维持高电平，使三极管 Q7 导通，继电器闭合，积分器电容短路，输出电位置零。再次调用函数 `long AC6651_DO(HANDLE hHandle, long ionum, long iodata)`，使 PORT0 端口的 2 号位 DO2 产生一个方波脉冲，此脉冲加于由或非门 N74022 组成的另一个双稳态的输入端 2 号引脚，输出端 1 号引脚即维持低电平，光电耦合器中的三极管截止，门控端 VGATE 通过下拉电阻接地，保持低电平，禁止计数器计数，至此完成系统上电复位过程。调用函数 `int AC_6302_DA(HANDLE port, unsigned long cardid, unsigned da_data)`，设定加于集成运放 PA08 的输入电压  $V_x$  及比较器 LM3391 的参考电压  $+V_r$ ， $-V_r$ 。调用函数 `long AC6651_SetTMode(HANDLE hHandle, long tch, long tmode)`，设定计数器 8254 工作在方式 0，即计数结束中断方式。调用函数 `long AC6651_SetTData(HANDLE hHandle, long tch, long tdata)`，设定计数值。调用函数 `long AC6651_DO(HANDLE hHandle, long ionum, long iodata)`，使 PORT0 端口的 1 号位 DO1 产生一个方波脉冲，此脉冲加于由 N74021 组成的双稳态电路的输入端 12 号引脚，输出端 13 号引脚即变为低电平，三极管 Q7 截止，继电器断开，积分器开始对加于探针的电压开始积分。与此同时，DO1 产生的方波脉冲同时加于由 N74022 组成的双稳态电路的输入端 7 号引脚，使输出端 1 号引脚变成高电平，此

高电平使光电耦合器内的三极管导通, VGATE 门控端通过上拉电阻处于高电平状态, 计数器计数开始。积分器的输出则随时间线性增加, 积分器的输出连接到设定好参考电压的比较器 LM3391 的比较端, 当输出电压达到参考电压时, 比较器 LM3391 的输出电位即由低电平跳变到高电平, 这个高电平被传输到或门 OR74321 的一个输入端 (或门 OR74321 的两个输入端连接到设定了正参考电压  $+V_r$  与负参考电压  $-V_r$  的比较器输出端), OR74321 的输出也会产生一个由低电平跳变到高电平, 这个电平跳变的上升沿会触发成形电路 74LS123 产生一个方波脉冲, 方波脉冲加到由 N74022 组成的双稳态电路的输入端 2 号引脚, 输出端 1 号引脚变成低电平, 光电耦合器中的三极管截止, 门控端 VGATE 通过下拉电阻接地, 保持低电平, 计数器计数中止, 完成一个电压采集过程。当积分开始时, 循环调用函数 `long AC6651_DI (HANDLE hHandle, long ionum)`, 读取和或门 OR74321 输出端相连的 PORT1 端口的 2 号口, 直到 2 号口为高电平 (意味着积分结束)。循环中止, 调用函数 `long AC6651_GetTData(HANDLE hHandle, long tch)`, 读取计数器中的计数值, 计算得到加于探针的实际电压值, 然后重复此过程, 进行下一个电压的采集过程。电流采集过程与此类似。当电压与电流全部采集完成时, 显示得到的 I-V 特性曲线, 计算出等离子体基本参数, 程序结束。电压与电流量程序时序图如图 3.10 所示:



(a)

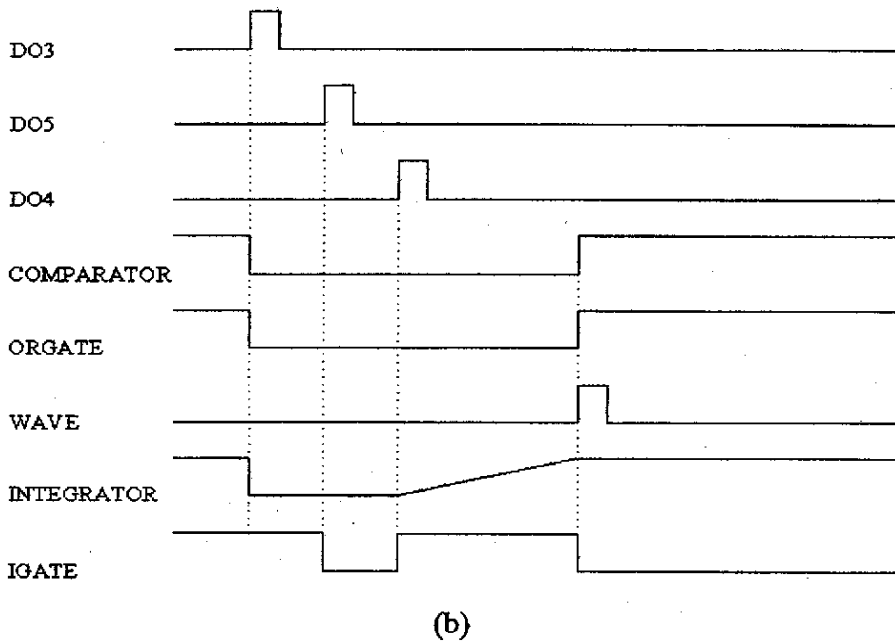


图 3.10 (a) 电压程序时序图. (b) 电程序时序图

Fig. 3.10 (a) Timing diagram of the voltage program. (b) Timing diagram of the current program.

### 3.6 本章小结

本章着重介绍了积分网络，对其电路结构，工作原理等做了详尽阐述。以积分网络为基础设计的新型积分 Langmuir 探针系统具有众多优点：大幅度提高探针信噪比；数字信号传输，进一步提高探针抗干扰能力；采集数据过程同步完成模/数转换。对驱动硬件电路工作的程序流程也做了相应介绍。



## 4 积分 Langmuir 探针诊断实验

### 4.1 积分探针系统模拟诊断

将焊接好的硬件电路进行了系统调试，以一个  $10\text{k}\Omega$  电阻替代等离子体进行了模拟诊断。扫描电压从  $-30\text{V}$  变化到  $+30\text{V}$ ，步长  $0.6\text{V}$ ，实验得到的  $I-V$  曲线异常分散，近乎指数规律变化，进行实验分析后，发现电磁继电器具有迟滞效应，即当积分开始脉冲 DO1 (DO4) 发出后，电磁继电器并不会同时断开，而是有一定时间的迟滞，进而导致积分开始时刻滞后于积分开始脉冲 DO1 (DO4) 发出时刻，如图 4.1 所示：

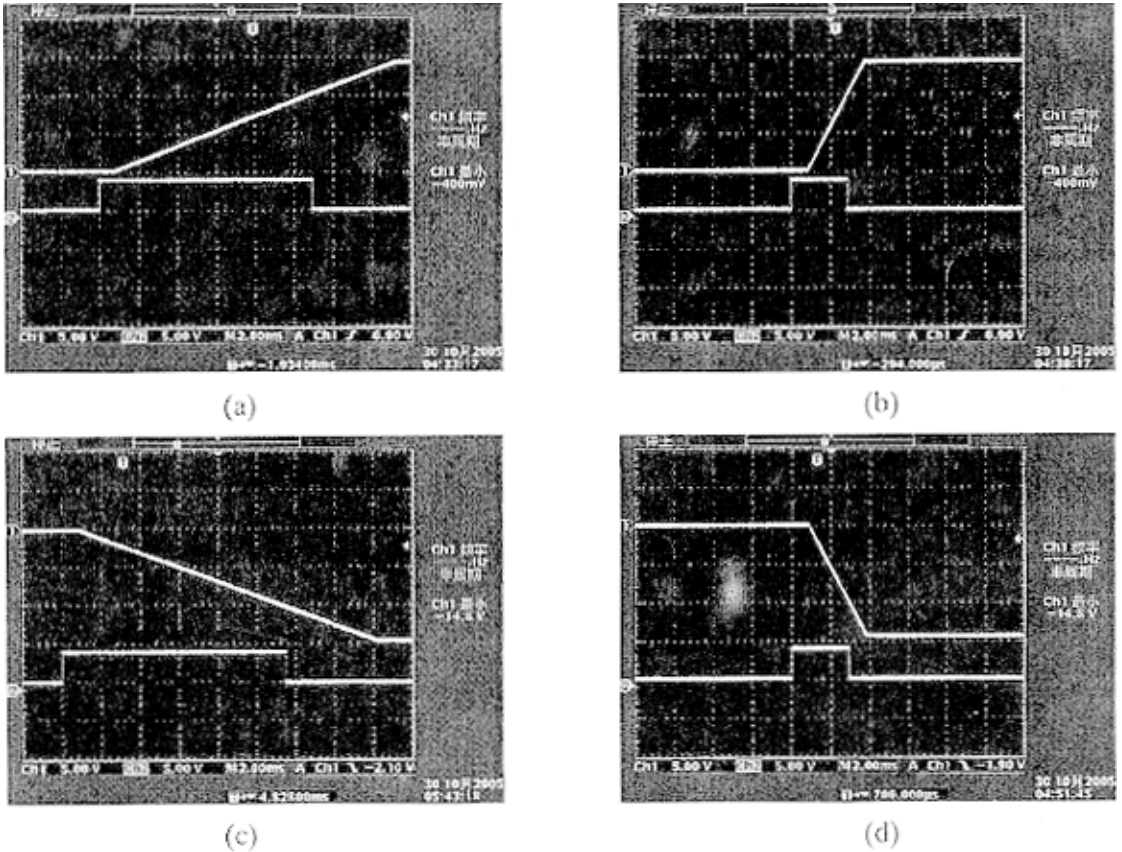


图 4.1  $\tau = 10^{-3}\text{s}$  时的积分器输出滞后波形和门控波形。(a) 输入电压为  $-1\text{V}$ 。(b) 输入电压为  $-5\text{V}$ 。(c) 输入电压为  $+1\text{V}$ 。(d) 输入电压为  $+5\text{V}$

Fig. 4.1 Integrator delayed output and gate wave form when  $\tau = 10^{-3}\text{s}$ . (a) Input voltage is  $-1\text{V}$ . (b) Input voltage is  $-5\text{V}$ . (c) Input voltage is  $+1\text{V}$ . (d) Input voltage is  $+5\text{V}$ .

每幅图中上面的波形是积分输出波形，下面的波形是门控波形（处于高电平时，允许计数器计数），从图中可以发现，当门控脉冲（VGATE, IGATE）开启时，积分器并没有同步积分，原因是当积分开始脉冲 DO1（DO4）发出后，门控脉冲同时开启，但由于电磁开关的迟滞效应，断开时间滞后，导致积分器电容断开时间滞后，最终导致积分开始时刻滞后，由图可知，滞后时间为 1ms。为解决这个问题，采用了由 74LS123 组成的延时电路，其封装和功能表如图 4.2 所示：

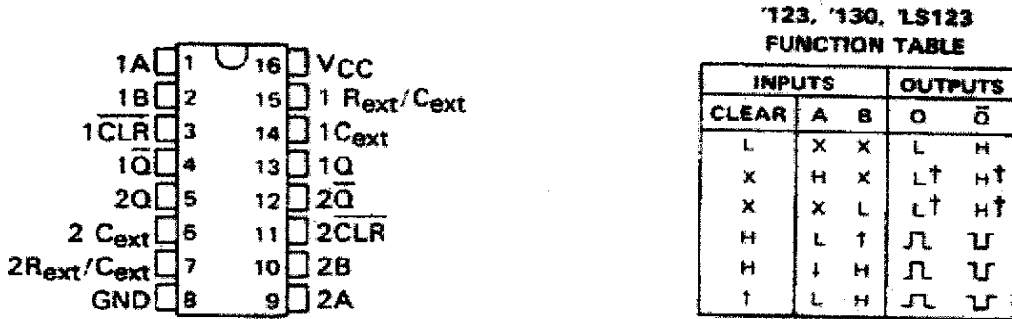


图 4.2 (a) 74LS123 封装. (b) 74LS123 功能表

Fig. 4.2 (a) 74LS123 package. (b) 74LS123 function table.

74LS123 是一款双可再触发单稳态多谐振荡器，具有下降沿触发（A 引脚）和上升沿触发（B 引脚）两种触发形式，输出（Q）脉冲宽度可以通过外接电阻与电容控制，其连接方式如图 4.3 所示：

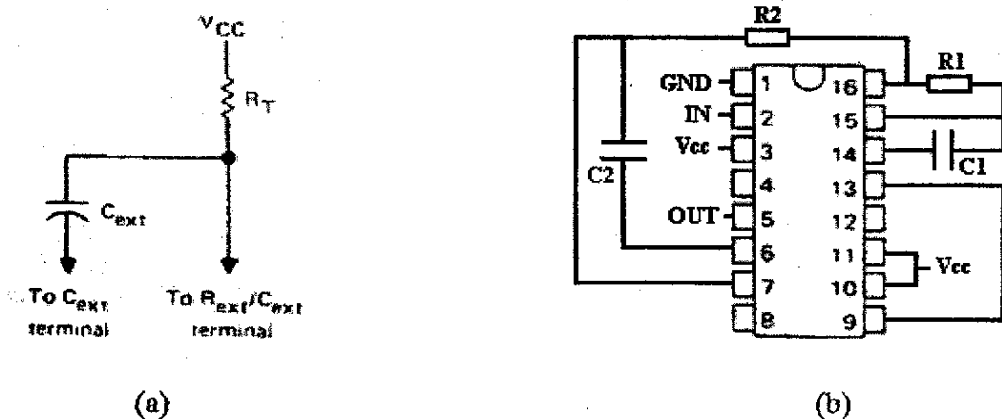


图 4.3 (a) 74LS123 时间因子连接方式. (b) 74LS123 电路连线方式

Fig. 4.3 (a) Timing component connections of 74LS123. (b) Circuit connections of 74LS123.

按图 4.3 (b)的连接方式连接一片 74LS123 内的两个振荡器,  $R_1$ 、 $R_2$  是  $10\text{k}\Omega$  电位器,  $C_1$ 、 $C_2$  是  $0.4\mu\text{F}$  的电容器, 积分开始脉冲 DO1 (DO4) 加于 IN 引脚 (上升沿触发), 利用积分开始脉冲上升沿在 1Q 引脚 (13 号引脚) 触发产生脉冲 A, 触发脉冲 A 的宽度由外接电阻  $R_1$  和电容  $C_1$  决定, 其关系为  $t_w = 0.28R_1C_1(1 + \frac{0.7}{R_1})$ , 将触发脉冲 A 加于片内另一振荡器的 9 号引脚 (下降沿触发), 利用触发脉冲 A 的下降沿在 OUT 引脚 (5 号引脚) 再次触发一个脉冲 B, 此时, OUT 引脚产生的脉冲 B 相对于积分开始脉冲 DO1 (DO4) 来说, 已经延时了脉冲 A 的脉冲宽度, 以脉冲 B 取代积分开始脉冲 DO1 (DO4) 去控制门控 VGATE (IGATE) 的开启, 其开启时刻就会比积分开始脉冲 DO1 (DO4) 滞后脉冲 A 的脉宽时间, 调节电位器  $R_1$  的阻值, 进而改变脉冲 A 的脉宽, 使其脉宽等于电磁继电器的滞后时间, 这样积分器开始积分时刻与门控 VGATE (IGATE) 开启时刻均滞后积分开始脉冲 DO1 (DO4) 上升沿相同的时间, 即脉冲 A 的脉宽 (电磁继电器的滞后时间), 从而补偿了继电器的迟滞效应, 保证了积分开始时刻与门控开启时刻的同步性。时序图如图 4.4 所示:

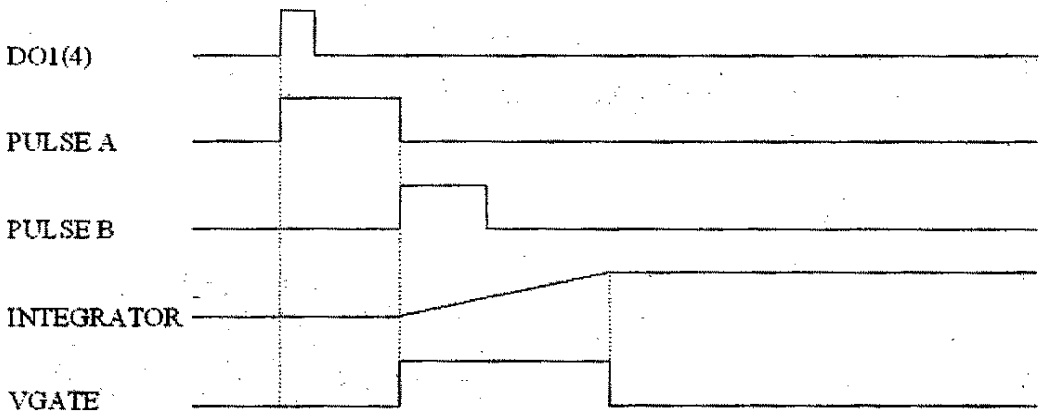


图 4.4 补偿电路时序图

Fig. 4.4 Timing diagram of the compensatory circuit.

图 4.5 为积分开始脉冲 DO1 与门控 VGATE 的波形图:

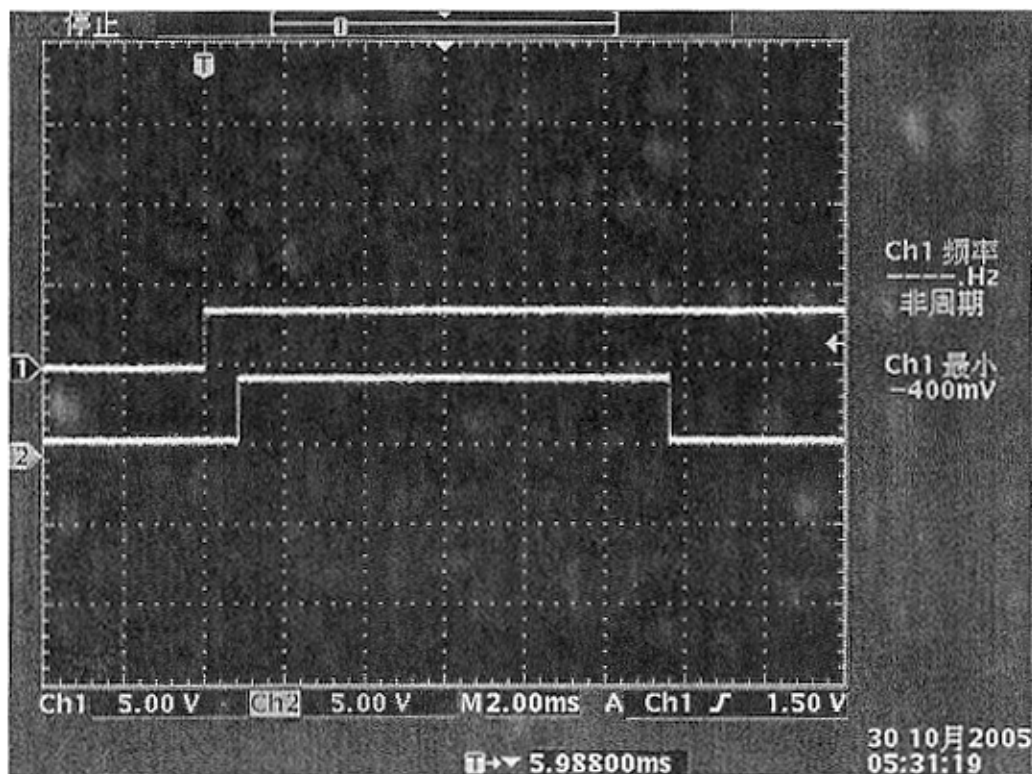
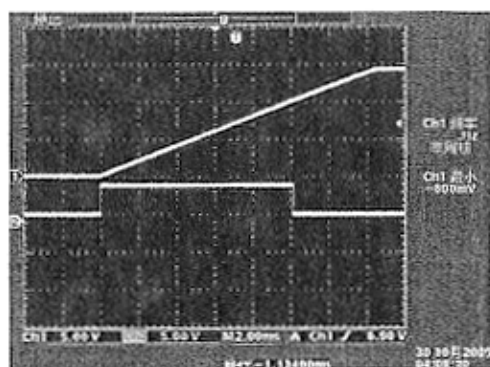


图 4.5 DO1 与 VGATE 的波形

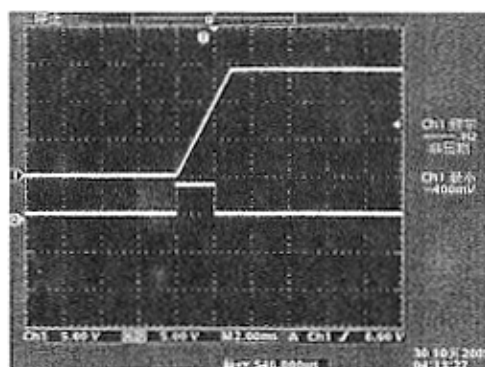
Fig. 4.5 Wave forms of DO1 and VGATE.

图 4.5 中波形 1 为积分开始脉冲 DO1 波形，波形 2 为门控 VGATE 波形，可以看出，2 相对于 1 已经滞后 1ms。

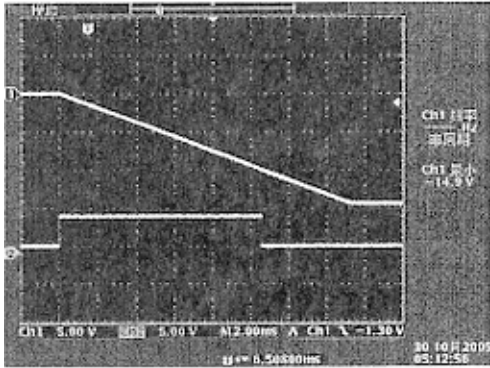
经过延时电路后，积分与门控开启时刻波形如图 4.6 所示：



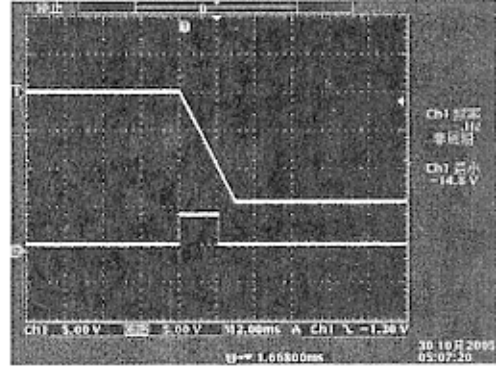
(a)



(b)



(c)



(d)

图 4.6  $\tau = 10^{-3}s$  时经过补偿后的积分器输出波形和门控波形. (a) 输入电压为-1V. (b) 输入电压为-5V. (c) 输入电压为+1V. (d) 输入电压为+5V

Fig. 4.6 Integrator output wave form and gate wave form after compensation when  $\tau = 10^{-3}s$ . (a) Input voltage is -1V. (b) Input voltage is -5V. (c) Input voltage is +1V. (d) Input voltage is +5V.

从上图可以看出, 经过延时电路以后, 电路积分开始时刻便与门控开启时刻保持了同步, 保证了采集数据的准确性, 得到一条线性非常好的 I-V 曲线, 如图 4.7 所示:

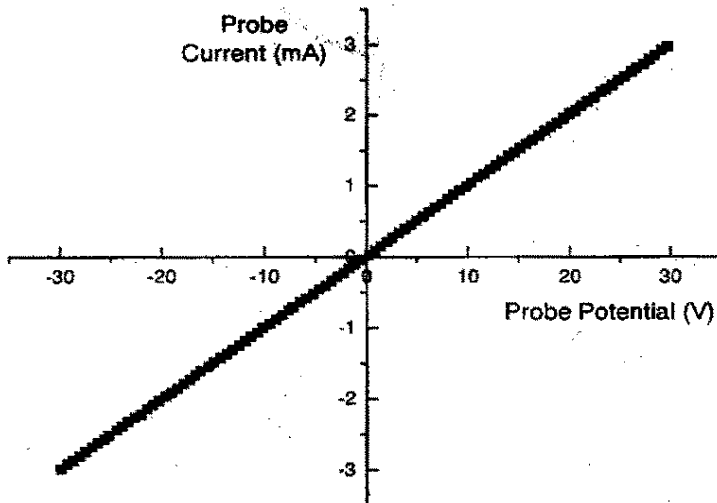


图 4.7 以  $10k\Omega$  电阻作为负载系统获得的 I-V 特性曲线

Fig. 4.7 Current-voltage characteristic obtained by the system using a  $10k\Omega$  resistor as the load.

## 4.2 积分探针系统等离子体诊断

### 4.2.1 实验装置

诊断实验在双谐振腔微波 ECR 多功能等离子体源离子注入 PSII 系统中进行，如图 4.8 所示，该系统由大连理工大学三束实验室研制，可进行等离子体源离子注入 (PSII)，磁控溅射<sup>[59]</sup>、等离子体增强物理气相沉积 (PVD)<sup>[60]</sup>、等离子体增强化学气相沉积 (PECVD)<sup>[61]</sup>以及等离子体源离子氮化 (PSIN) 等多种工艺。通过调整该设备的两个 ECR 磁场线圈的电流方向，在真空室内可以分别得到会切场和磁镜场两种磁场位形，这两种磁场位形均能约束等离子体<sup>[62,63]</sup>，从而得到高密度的等离子体。

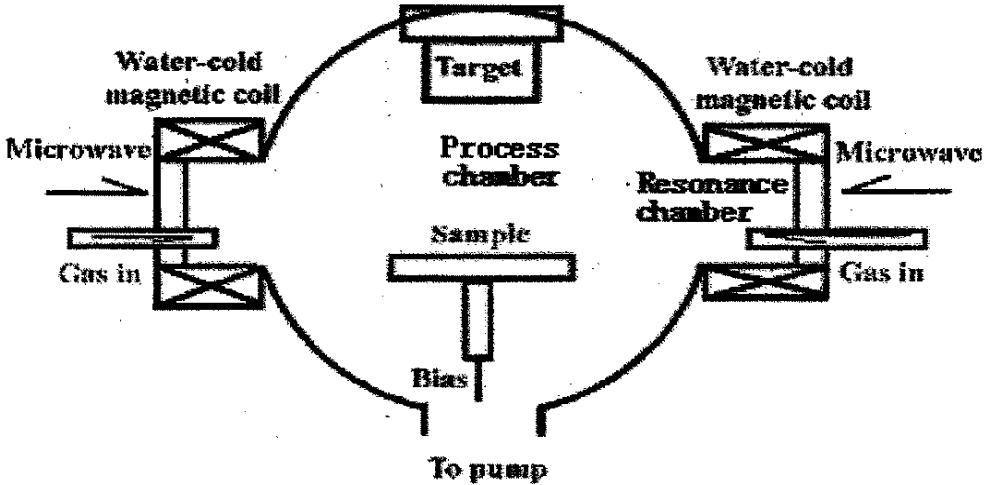


图 4.8 多功能 PSII 系统溅射沉积装置图

Fig. 4.8 The diagrammatic sketch of multifunction PSII system's deposition system

系统主要由微波系统、真空系统、配气系统、水冷系统以及控制电路组成。微波系统是由频率为 2.45GHz 的微波发生器、环形器、双向耦合器、三销钉调配器以及波导管所组成。微波功率从 100-1000W 连续可调。主真空室为 F 600 mm×800 mm 的圆柱形不锈钢腔体，腔体两侧相对放置着两个由圆柱形水冷线圈包围的 F 150mm×180 mm 的 ECR 谐振腔，真空系统由机械泵和涡轮分子泵级联组成，涡轮分子泵的抽速为 1200l/s，真空极限可达  $10^{-5}$ Pa。水冷的磁控溅射靶和样品台分别位于真空室中心的上下两侧，改变样品台的高度，可以调整靶基距。我们采用直径为 0.3mm，长度为

7mm 的钨丝作为朗缪尔探针的探头。探针杆采用动密封方式，从真空室的后方接入，可前后移动。在 ECR 系统中，当两个线圈中的电流方向相反时，便产生一个轴向对称的会切磁场<sup>[64]</sup>。引入微波并调节两个线圈电流的大小就能在两个谐振腔中发生 ECR 过程而产生等离子体，并通过会切场的输运而充满整个真空室。

#### 4.2.2 积分探针获取的 I-V 特性曲线

系统调试完成后，将探针系统在上述实验设备中进行了诊断，等离子体源通过功率为 850W 射频源激发，工作频率 13.56MHz，真空室本底真空达到  $3.0 \times 10^{-3}$  Pa，通入 Ar 气，产生 Ar 等离子体，放电气压  $1.4 \times 10^{-1}$  Pa，在 Ar 流量为 30sccm 时，测得其 I-V 特性曲线如图 4.9 所示：

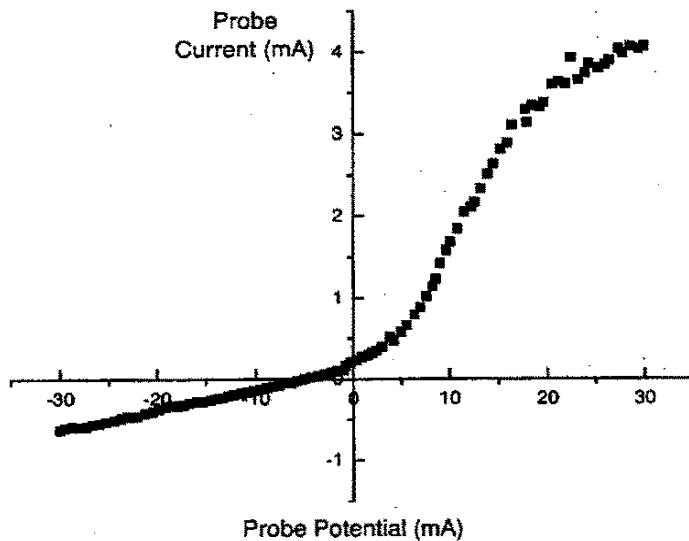


图 4.9 新型积分 Langmuir 探针系统在 ECR 等离子体源中获得的 I-V 特性曲线

Fig. 4.9 Current-voltage characteristics curve obtained by the new Langmuir probe inserted in a ECR plasma source.

与传统方法得到的特性曲线相比，此曲线平滑，无显著偏差点，在离子电流区无一偏差，等离子体空间电位  $V_{SP}$  明显，具有很好的抗干扰效果。

### 4.2.3 气体流量对等离子体参量的影响

调整对等离子体参数影响较大的工作气体流量,用此积分探针系统诊断了气体流量对等离子体参量的影响。

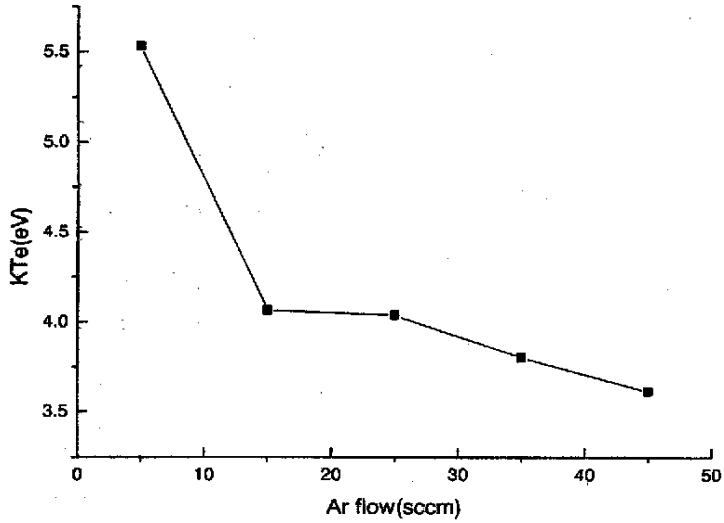


图 4.10 Ar 流量与电子温度的关系

Fig. 4.10 Electronic temperature at different Ar flow

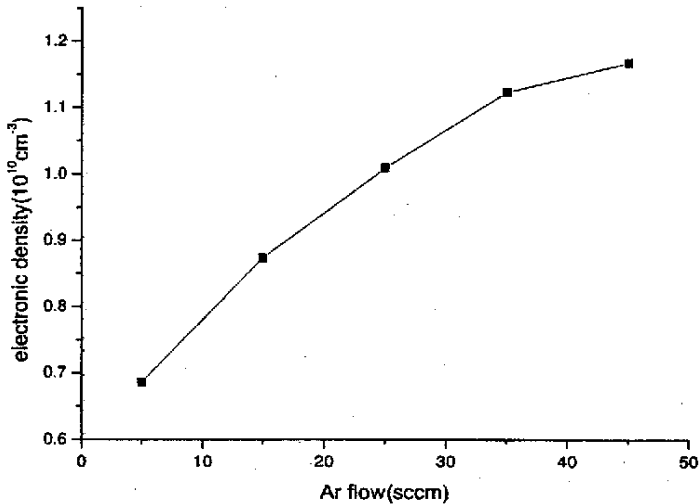


图 4.11 Ar 流量与电子密度的关系

Fig. 4.11 Electronic density at different Ar flow



微波功率保持 850W 不变, 改变工作气体的流量, 从 5sccm 变化到 45sccm。由图 4.10 可以看出: 随着工作气体流量的增加, 电子温度减小, 这是因为随着 Ar 流量的增加, 气体密度变大, 导致粒子间平均自由程减小, 电子在多次碰撞中损失了大量的能量, 从而温度降低。电子密度随气体流量增加呈上升趋势, 如图 4.11 所示。这是因为随着工作气体流量的增加, 气压升高, 粒子间碰撞几率提高, 电离气体数量随之增加, 从而使等离子体密度明显增加, 电子密度数量级由流量为 5sccm 时的  $10^9 \text{cm}^{-3}$  上升到 45sccm 时的  $10^{10} \text{cm}^{-3}$ 。

#### 4.2.4 微波功率对等离子体参量的影响

改变激发等离子体的微波功率, 用此积分探针系统诊断了微波功率对等离子体参量的影响。

工作气体 Ar 流量保持在 30sccm, 由图 4.12 可以看出: 随着微波功率增长阶段的不同, 等离子体温度的变化趋势也是不同的: 功率范围在 450W-650W 时, 电子充分吸收微波能量, 电子温度随微波功率的增加而线性增加; 功率范围在 650W-850W 时, 电子吸收微波能量的能力近于饱和, 电子温度增速缓慢。而且在实际观测当中发现, 微波功率在 750W 时, 纹波现象严重, 这说明等离子体放电很不稳定, 进而造成了实

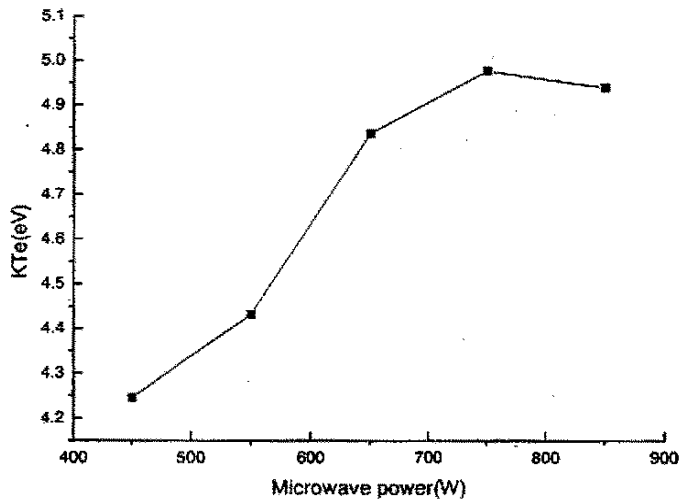


图 4.12 微波功率与电子温度的关系

Fig. 4.12 Electronic temperature at different microwave power

验结果一定程度上的误差。电子温度随微波功率的增加也呈现出这种阶段变化趋势，随着电子吸收微波能量的加大，电离程度增强，因此电子密度会随微波能量的增加而增大。在微波功率为 750W 时电子密度的降低也是由于等离子体放电的不稳定引起的误差，如图 4.13 所示。

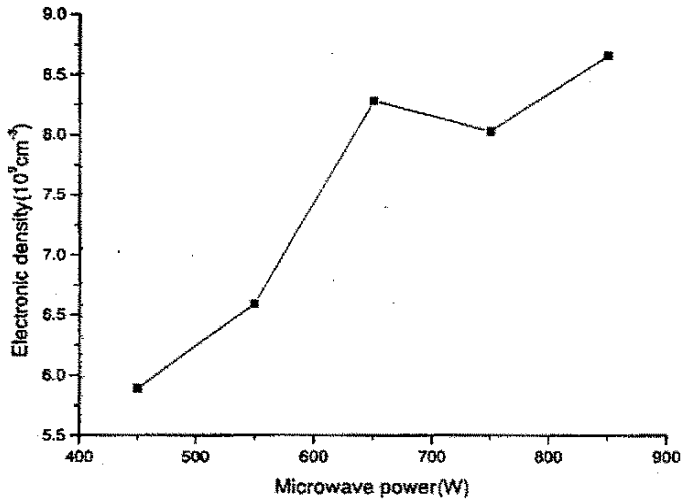


图 4.13 微波功率与电子密度的关系

Fig. 4.13 Electronic density at different microwave power

### 4.3 本章小结

通过对双谐振腔的多功能 PSII 系统会切场中的微波 ECR 等离子体进行诊断，我们得到了工作气体流量，微波功率对系统等离子体参数的关系。总结起来有以下几点：(1) 反应腔内电子温度变化范围在 3.5eV-6.0eV 之间，电子密度维持在  $10^9 \text{ cm}^{-3}$ - $10^{10} \text{ cm}^{-3}$  的量级上。(2) 随着工作气体流量的增加，电子温度减小，电子密度增大。(3) 随着微波功率的增加，电子温度和电子密度增加，且其变化呈现阶段性特征。

## 5 总结与展望

### 5.1 总结

本文介绍了等离子体诊断学的发展历程, 诊断方法分类, Langmuir 探针的演变历程、适用范围、工作原理。Langmuir 探针以其仪器简单, 操作简便, 诊断能力强, 适用范围广, 获得的信息丰富的优点, 在低温等离子体诊断中占据着重要地位, 但同时它也存在易受干扰等弊端。

随着等离子体技术的不断发展, 对 Langmuir 探针诊断提出了越来越高的要求, 设计具有抗干扰能力的 Langmuir 探针系统已经成为等离子体诊断中急需解决的问题。针对不同的干扰因素, 本文提出了不同的解决方案: 对于射频干扰, 使用滤波器网络消除; 对于同轴电缆上的诱导噪音, 使用差分放大器消除; 对于等离子体环境中的噪音干扰, 使用积分网络消除。

本文着重介绍了积分网络, 对其工作原理, 电路结构, 提高探针信噪比做了详尽阐述, 并采用积分网络设计出一套完整的 Langmuir 探针系统。此系统与传统探针系统相比具有众多优点: 大幅度提高探针信噪比、数字信号传输, 提高抗干扰能力、采集过程自动完成 A/D 数据转换, 降低设计成本。将此探针系统在具有噪音干扰的 ECR 等离子体源中进行了诊断实验, 得到了一条无明显偏差点, 平滑的 I-V 特性曲线, 具有良好的抗干扰效果。

### 5.2 展望

等离子体中的干扰因素很多, 如电场、磁场、微波、射频、诱导噪音等, 每种干扰因素都会影响数据采集的精确度。本文设计的积分 Langmuir 探针系统只是针对其中的噪音干扰取得了较好的效果。

由于时间仓促和个人能力有限, 本课题还留有很多可以提高以及进一步深入的空间, 比如可采用场效应管的开关特性取代电磁继电器, 即可以消除电磁继电器的迟滞效应, 简化电路, 并且消除采集数据过程中由于继电器不断的开关闭合产生的噪音; 对于不同的电压扫描范围选择合适的积分时间常数和参考电压, 就可以在保证数据采

集精度的条件下，缩短一次数据采集的时间；给探针系统加入某些机械传动装置，使其能在三维空间内自由调节，就可以全面获取各处的等离子体参数。总之，不断提高采集数据的准确性，得到准确的等离子体参数，指导实验有效进行，是我们的出发点和最终目标。

## 参 考 文 献

- [1] 马腾才, 胡希伟, 陈银华. 《等离子体物理原理》. 中国科技大学出版社, 安徽合肥, 1988
- [2] 朱士尧. 《等离子体物理基础》. 科学出版社, 北京, 1983, 79
- [3] 徐学基, 诸定昌. 《气体放电物理》. 复旦大学出版社, 上海, 1999, 236
- [4] Orlando. A and Daniel. L. F. 《Plasma diagnostics》. Academic, Press. Inc, New York, 1989
- [5] G. S. Selwyn, J. E. Heidenreich, Haller. K. L. Appl. phys. Lett. Vol57, 1990, 1876
- [6] Tsuji. K, sato, T. Wagatsuma. Spectrochim. Acta, VolB53, 1998, 417
- [7] Sato. E, Kimura. S, Isobe. H. Rev. Sci. Instrum, Vol61(9),1990, 2343
- [8] Eliasson. B, Kogelschatz. U. IEEE Trans Plasma, Vol19, 1991, 309
- [9] Raul. M. C, Patrick. V et al. IEEE Trans Plasma, Vol28(3), 2000, 1043
- [10] Jorge. J. R, Mario. C. M et al. IEEE J. Quan. Elec, Vol29, 1993, 182
- [11] Pealat. M, Taran. J. P. E, Taillet. J. Appl. Phys, Vol52(4), 1981,2687
- [12] Langmuir. I, Motf-smith. H. M. Phys. Rev, Vol28, 1926, 727
- [13] Godyak. V. A, Herry. R. S. IEEE Trans. Plasma, Vol23, 1995, 728
- [14] Godyak. V. A, Ivanov. A. I. Sov. Phys. Tech. Phys, Vol12, 1967, 766
- [15] Kemp. R. E, Sellen. J. M. Rev. Sci. Instrum, Vol37, 1966, 455
- [16] Wang. E. Y, Hershkowitz. N, Intrator. T. Rev. Sci. Instrum, Vol56, 1985, 519
- [17] Cho. M. H, Chan. C, hershkowitz. N. Rev. Sci. Instrum, Vol55, 1984, 631
- [18] Hershkowitz. N, Nelson. B. Rev. Sci. Instrum, Vol54, 1983, 29
- [19] Eser. E, Ogilvie. R. E, Taylor. K. A. J. Vac. Sci. Tech, Vol15, 1978, 199
- [20] Ajit. P. P, James. P. M, Sidneg. A. S. J. Appel. Phys, Vol67, 1990, 6718
- [21] 张家良. 低温等离子体发射光谱学研究. 大连理工大学博士学位论文, 2002, 5-6
- [22] Richard. A. D, Allen. K. D. J. Appl. Phys. Vol62, 1987, 792
- [23] Dagostin. R, Gramarossa. F, Plasma. Chem. Plasma. Proc, Vol4, 1984, 163
- [24] Muraoka. K, Uchino. K, Tanaka. K, Rev. Sci. Instrum, Vol63, 1992, 4113
- [25] Andrew. C. R, Robert. E. H. K, Rev. Sci. Instrum, Vol68, 1997, 2978

- [26] L. S. Pilling, E. L. Bydder, and D. A. Carnegie, *Rev. Sci. Instrum.* Vol. 74, No. 7, July 2003, 3341~3347
- [27] L. Kenez, S. Biri, J. Karacsony *et al.* *Rev. Sci. Instrum.* Vol. 73, No. 2, February 2003, 617~620
- [28] Tsv. K. Popov, M. Dimitrova, F. M. Dias, *Vacuum* 76, 2004, 417~420
- [29] Zoltan Sternovsky, Scott Robertson, *Appl. Phys. Lett.*, Vol. 81, No. 11, 9 September 2002, 1961~1964
- [30] 菅井秀郎, 等离子体电子工程学(日), 科学出版社 OHM 社, 59
- [31] E. V. Shun'ko, *J. Appl. Phys.* Vol. 93, No. 7, April 2003, 3729~3747
- [32] A. Rousseau, E. Teboul, N. Lang *et al.* *J. Appl. Phys.* Vol. 92, No. 7, 1 October 2002, 3463~3472
- [33] S. J. Jeon, G. S. Eom, J. H. Kim *et al.* Vol. 73, No. 2, February 2002, 277~283
- [34] A. E. Wendt, *Rev. Sci. Instrum.* Vol. 74, No. 7, July 2001, 2026~2031
- [35] Francis F. Chen, *Phys. Plasma.* Vol.8 No. 6 June 2001, 3023~2036
- [36] N. Hershkowitz, in *Plasma Diagnostics*, Vol. 1, Discharge Parameters and Chemistry, edited by O. Aucciello and D. Flamm (Academic, New York, 1989), 113~181
- [37] 项志遴, 余昌旋. 《高温等离子体诊断技术》上册. 上海科学技术出版社, 上海, 1982
- [38] 邓新绿. Langmuir 探针实验, 大连理工大学研究生讲义
- [39] N. S. J. Braithwaite, N. M. P. Benjamin, and J. E. Allen, *J. Phys. E* 20, 1987, 1046
- [40] H. Sabadil, S. Klagge, and M. Kammeyer, *Plasma Chem. Plasma Process* 8, 1988, 425
- [41] I. G. Brown, A. B. Compher, and W. B. Kunkel, *Phys. Fluids* 14, 1971, 1377
- [42] J. R. Sanmaritin, *Phys. Fluids* 13, 1970, 103
- [43] B. Duffey, A. D. Cheetaam, and J. P. Rayner, *J. Electric. Electron. Eng.* 16, 1996, 91
- [44] N. Braithwaite, M. P. Benjamin, and J. E. Allen, *J. Phys. D* 20, 1987, 1046
- [45] B. M. Annaratone and N. St. Braithwaite, *Meas. Sci. Technol.* 2, 1991, 795
- [46] V. A. Godyak, R. B. Piejk, and B. M. Alexandrovich, *Plasma Sources Sci. Technol.* 1, 1992, 36

- [47] M. Mizumura, S. Uotsu, S. Matsumura, and S. Teii, *J. Phys. D* 25, 1992, 1744
- [48] K. Shimizu, A. Hallil, and H. Amemiya, *Rev. Sci. Instrum.* 68 (4), April 1997, 1730~1734
- [49] 郭硕鸿, 电动力学, 高等教育出版社, 153
- [50] 梁昆淼, 数学物理方法, 高等教育出版社, 7
- [51] T. F. Yang, Q. X. Zu, and Ping Liu, *Rev. Sci. Instrum.* 66 (7), July 1995, 3379~3383
- [52] K. shimizu and H. Amemiya, *J. Phys. E* 10, 1977, 389
- [53] B. Duffey, A. D. Cheetaam, and J. P. Rayner, *J. Electric. Electron. Eng.* 16, 1996, 91
- [54] M. B. Hopkins, W. G. Graham, and T. J. Griffins, *Rev. Sci. Instrum.* 58, 1987, 475
- [55] P. Spatenka, R. Studeny, and H. Suhr, *Meas. Sci. Technol.* 3, 1992, 704
- [56] A. D. Cheetham, L. Davidson, J. Jakobsen *et al.* *Rev. Sci. Instrum.* 68 (9), September 1997, 3405~3412
- [57] H. Taub and D. L. Schilling, *Principles of Communications Systems*, 2nd ed. (McGraw Hill, New York, 1986), 329
- [58] H. Taub and D. L. Schilling, *Principles of Communications Systems*, 2nd ed. (McGraw Hill, New York, 1986), 444
- [59] 徐军, 邓新绿, 张家良, 陆文琪, 马腾才, 双放电腔微波-ECR 等离子体源增强磁控溅射沉积技术, *大连理工大学学报* Vol.41, No.3 2001(5)
- [60] 李新, 唐祯安, 马国佳, 邓新绿. 电子回旋共振-微波等离子体化学气相沉积法制备 a-C:H(N)薄膜, *真空*, 2003, 5, 28-30
- [61] LI Xin, TANG Zhen-An, MA Guo-Ja, WU Zhi-Meng, Deng Xin-Lu, Preparation of Diamond-Like Carbon Films in Methane by Electron Cyclotron Resonance Microwave Plasma Source Ion Implantation, *Chinese Physics Letters*, 2003, v20, 5, 692-695
- [62] J.R.Roth, *Industrial Plasma Engineering*, Vol. 1, Principles, Institute of Physics Publishing, Philadelphia, USA, 1995
- [63] Ian Spalding, *Cusp Confinement*, *Advances in Plasma Physics*, Vol. 4, John Wiley & Sons, USA, 1971
- [64] Xu Jun, Deng Xinlu, et al. *J. Dalian University of Technology*, 41(3) (2001) 425

## 附 录

### 板卡 AC6651 接口函数说明

#### 设备函数

- 打开一个 AC6651 设备

函数: HANDLE AC6651\_OpenDevice(long DeviceNum)

◇ DeviceNum: 入口参数, AC6651 设备号, =0、1、2..., 表示第一个、第二个 AC6651 插卡。设备号的定义参考驱动安装部分。

◇ 函数返回值: 卡的操作句柄。

注: VC 中如果句柄不等于 INVALID\_HANDLE\_VALUE, 表示正确。VB 中如果句柄不等于 &HFFFFFFF, 正确。

- 关闭一个 AC6651 设备

函数: long AC6651\_CloseDevice(HANDLE hHandle)

功能: 关闭以 hHandle 打开的 AC6651 卡。

◇ hHandle: 入口参数, 卡的操作句柄。

◇ 函数返回数值: 0: 成功 / -1: 失败。

#### 开关量函数

AC6651 具有 32 路可编程输入、输出分为: PORT0-PORT3 4 个 8 位接口。

PORT0 对应输入通道 0-7

PORT1 对应输入通道 8-15

PORT2 对应输入通道 16-23

PORT3 对应输入通道 24-31

每一组 IO 口可以利用函数 AC6651\_SetIOMode 设置为输入或输出状态, 同时也可以利用函数 AC6651\_GetIOMode 读入设置的状态数据。对应读、写数据与 8 位口的对应关系如表 3.1 所示:

表 1 读、写数据与 8 位口的对应关系



数据	D7	D6	D5	D4	D3	D2	D1	D0
Port0	IO7	IO6	IO5	IO4	IO3	IO2	IO1	IO0
Port1	IO15	IO14	IO13	IO12	IO11	IO10	IO9	IO8
Port2	IO23	IO22	IO21	IO20	IO19	IO18	IO17	IO16
Port3	IO31	IO30	IO29	IO28	IO27	IO26	IO25	IO24

注:

1. D7-D0 为读入 8 位数据, D0 为最低位。
2. IO31-IO0 对应输入、输出通道的 31-0 号。

#### □ 开关量输入

功能: 读入 0-31 号口中一个 8 位口输入数据。

函数: long AC6651\_DI (HANDLE hHandle, long ionum)

- ◇ hHandle: 入口参数, 卡的操作句柄。
- ◇ ionum: 入口参数, =0、1、2、3 分别选择读入 PORT0-PORT3。
- ◇ 函数返回: 出口参数, 返回读入的数据, 低 8 位有效。8 位数据 (D7-D0) 分别对应端口的 8 个 IO 线。

#### □ 开关量输出

功能: 设置 PORT0-PORT3, 4 个 8 位口中的 一个口的输出数据。

注: 32 路输出分为 PORT0-PORT3 共 4 个 8 位输出口, 对应关系可以参考上面输入部分的说明

函数: long AC6651\_DO (HANDLE hHandle, long ionum, long iodata)

- ◇ hHandle: 入口参数, 卡的操作句柄。
- ◇ ionum: 入口参数, =0-3 分别选择输出口 PORT0-PORT3。
- ◇ iodata: 入口参数, 要对 ionum 号口输出的数据。低 8 位有效。8 位数据 (D7-D0) 分别对应端口的 8 个 IO 线 7-0 号
- ◇ 函数返回: 出口参数, =0 操作成功, 其他失败。

#### □ 设置开关量输入输出状态

功能: 设置输入、输出控制字。

函数: long AC6651\_SetIOMode (HANDLE hHandle, long iomode)

- ◇ **hHandle**: 入口参数, 卡的操作句柄。
- ◇ **iomode**: 入口数据, 低 4 位数据 (D3-D0) 有效, 分别对应控制 IO 通道 3-0 组, 对应关系如表 3.2 所示:

表 2 数据与 IO 通道对应关系

D7	D6	D5	D4	D3	D2	D1	D0
X	X	X	X	M3	M2	M1	M0

- M3: =1: 设置 PORT3 为输出模式/=0: 设置为输入模式。
- M2: =1: 设置 PORT2 为输出模式/=0: 设置为输入模式。
- M1: =1: 设置 PORT1 为输出模式/=0: 设置为输入模式。
- M0: =1: 设置 PORT0 为输出模式/=0: 设置为输入模式。
- ◇ **函数返回**: 出口参数, =0 操作成功, 其他失败。

□ 读入设置的开关量输入输出状态

功能: 读入输入、输出控制字。

函数: long AC6651\_GetIOMode (HANDLE hHandle)

- ◇ **hHandle**: 入口参数, 卡的操作句柄。
- ◇ **函数返回**: 低 4 位数据 (D3-D0) 有效, 为输入、输出控制字。

**定时器计数器 8254 控制函数**

有关 8254 设置函数的约定如下:

1. IO 操作为: 先写入低 8 位数据后写入高 8 位数据。
2. 16 计数器永远设置为二进制计数器模式。
3. 数据读出采用锁存+读出模式。

用户在应用时必须注意, 8254 的操作必须按先写入控制字然后写入数据的顺序操作。

□ 设置 8254 工作模式

功能: 读入输入、输出控制字。

函数: long AC6651\_SetTMode(HANDLE hHandle, long tch, long tmode)

- ◇ **hHandle**: 入口参数, 卡的操作句柄。
- ◇ **tch**: 入口参数, 需要设置的通道号, 0-2 对应 8254 通道 0-2 号。

◇ tmode: 入口参数, 8254 的工作模式, 0-4 对应 8254 的模式 0-4。

◇ 函数返回: =0 操作成功。

□ 设置 8254 计数器数据

功能: 设置对应通道的 16 位数据, 范围: 1-65535。

函数: long AC6651\_SetTData(HANDLE hHandle, long tch, long tdata)

◇ hHandle: 入口参数, 卡的操作句柄。

◇ tch: 入口参数, 需要设置的通道号, 0-2 对应 8254 通道 0-2 号。

◇ tdata: 入口参数, 对应通道 8254 的 16 位定时器、计数器数据。

◇ 函数返回: =0 操作成功。

□ 读入 8254 计数器数据

功能: 读入对应通道的 16 位数据, 范围: 1-65535。

函数: long AC6651\_GetTData(HANDLE hHandle, long tch)

◇ hHandle: 入口参数, 卡的操作句柄。

◇ tch: 入口参数, 需要设置的通道号, 0-2 对应 8254 通道 0-2 号。

◇ 函数返回: 16 位计数器数据。

□ 读入 8254 输出状态

功能: 读入 8254 三个输出通道输出状态。

函数: long AC6651\_GetTST(HANDLE hHandle)

◇ hHandle: 入口参数, 卡的操作句柄。

◇ 函数返回: 低 3 位数据有效, 对应关系如表 3.3 所示:

表 3 函数返回与 8254 输出通道对应关系

D7	D6	D5	D4	D3	D2	D1	D0
X	X	X	X	X	Tout2	Tout1	Tout0

Tout0-tout2: 对应 8254 的输出通道 0-2 号。

### 板卡 AC6302 接口函数说明

功能: 打开驱动, 获得驱动句柄。

函数: HANDLE AC\_OpenDriver(void)

◇ void: 无参数。

◇ 函数返回: 无。

功能: 关闭驱动, 释放驱动句柄。

函数: int AC\_CloseDriver (HANDLE portio)

◇ portio: 要释放的驱动句柄。

◇ 函数返回: 无。

功能: 初始化 AC6302 插卡, 获得插卡的数量和识别 ID。

函数: int AC\_6302\_INIT(HANDLE port, unsigned long \*cardid)

◇ port: 驱动句柄。

◇ \*cardid: AC6302 插卡识别 ID 通过此指针返回

◇ 函数返回: AC6302 插卡的数量。

功能: 设置 AC6302 D/A 数值。

函数: int AC\_6302\_DA(HANDLE port, unsigned long cardid, unsigned da\_data)

◇ port: 驱动句柄。

◇ cardid: 要操作的 AC6302 插卡 ID。

◇ da\_data: 要 DA 输出的数值 (0-4095)。

◇ 函数返回: 无。

功能: 设置 AC6302 D/A 输出极性。

函数: int AC\_6302\_PS(HANDLE port, unsigned long cardid, unsigned PS\_data)

◇ port: 驱动句柄。

◇ cardid: 要操作的 AC6302 插卡 ID。

◇ PS\_Data: 要输出的 8 位数据 (第 8 位有效, 范围: 0-0XFF), 每位分别表示每路的极性 (0-单极性, 1-双极性), 输出数据 7-0 位对应控制输出通道 7-0。

◇ 函数返回: 无。

功能: 设置 AC6302 DA 输出增益。

函数: int AC\_6302\_GAIN(HANDLE port, unsigned long cardid, unsigned long GAIN\_data)

◇ port: 驱动句柄。

◇ cardid: 要操作的 AC6302 插卡 ID。

◇ GAIN\_data: 增益设置数据 0-0xFF, 低 8 位数据 7-0 位对应控制输出通道 7-0 号,  
定义: 数据=0 对应 5V 输出/数据=1 对应 10V 输出。

◇ 函数返回: 无。

功能: 允许 AC6302 D/A 输出。

函数: unsigned int AC\_6302\_EN(HANDLE port, unsigned long cardid)

◇ port: 驱动句柄。

◇ cardid: 要操作的 AC6302 插卡 ID。

◇ 函数返回: 无。

## 攻读硕士学位期间发表学术论文情况

- [1] 李亚磊 邓新绿 徐军 “Langmuir 探针在等离子体诊断中的抗干扰方法” 发表于《真空科学与技术学报》 2005 年第五期
- [2] 李亚磊 邓新绿 徐军 “计算机控制的高信噪比 Langmuir 探针系统” 发表于《第十二届全国等离子体科学技术会议论文集》 2005 年 8 月 上海
- [3] 李亚磊 邓新绿 徐军 “基于计算机的高信噪比 Langmuir 探针系统” 已投稿于《核聚变与等离子体物理》

## 致 谢

本论文是在导师邓新绿教授的悉心指导下完成的。在攻读硕士研究生期间，邓老师在学习上和生活上给了我巨大的帮助和无微不至的关怀，邓老师和蔼可亲、平易近人的性格和踏实勤勉的工作作风深深地感染了我，这些在我以后工作生活中将会产生深远的影响，在此表示衷心地感谢！

撰写论文过程中，得到了许多老师和同学的帮助。徐军副教授、陆文琪博士渊博的学识，钻研的精神，勤奋的态度是我永远学习的榜样。感谢电信学院杨淑芬老师在电路设计中给予的帮助；感谢刘同波、梁殿亮同学在程序设计中给予的帮助；感谢齐冰、王坤、孙景超同学在电路调试及等离子体诊断实验中给予的帮助；感谢网络及BBS上至今不知姓名的各位朋友及同学的热心帮助；感谢苗壮、李鹏飞同学在学习和生活上给予的帮助。

两年半的学习和工作中，同一课题组的丁万昱、高鹏、刘成龙、张治国、王立达、李艳琴、朴勇、苏元军等同学给了我极大的支持和帮助，在此表示由衷地谢意！

特别要感谢我的父母和家人给予的大力支持和无微不至的关怀，他们给了我太多的理解和太多无私伟大的爱，也给了我不懈前进的动力，能够顺利完成学业，他们是我坚强的后盾。

时间荏苒，研究生生活即将结束，学生生涯也即将画上一个句号，在这段时间里，有太多的收获和欢笑值得回忆，有太多的人值得怀念和感激。仅在此，表达我对学校、老师、同学的深深眷恋！衷心感谢和祝福指导、关心、鼓励、支持和帮助过我的所有人！

## 大连理工大学学位论文授权使用授权书

本学位论文作者及指导教师完全了解“大连理工大学硕士、博士学位论文授权使用规定”，同意大连理工大学保留并向国家有关部门或机构送交学位论文的复印件和电子版，允许论文被查阅和借阅。本人授权大连理工大学可以将本学位论文的全部或部分内容编入有关数据库进行检索，也可采用影印、缩印或扫描等复制手段保存和汇编学位论文。

作者签名： 李亚磊

导师签名： 邓彩保

2006年1月11日