

# 多功能磁学物性测量系统

## PPMS<sup>®</sup> VersaLab<sup>™</sup>



Quantum Design 中国子公司



图1 Quantum Design 全球新总部

美国 Quantum Design 公司是由世界上第一台 SQUID 磁强计的设计者创立，坐落于美国加州圣迭戈市。在公司成立的二十多年里，Quantum Design 公司专注于打造两种产品线——SQUID 磁学测量系统（MPMS）和综合物性测量系统（PPMS），它们已经成为实验数据可靠的标志，被广泛应用于物理、化学及材料科学等众多研究领域，遍布几乎所有世界一流相关实验室。2007 年美国 Quantum Design 公司郑重推出了第三种产品——带有振动样品磁强计（VSM）功能的多功能物性测量系统——VersaLab，可以全自动高精度的进行磁、电、热等多种物性测量。

### VersaLab 系统综述

VersaLab 系统是最新一代的振动样品磁强计，与传统的电磁铁振动样品磁强计不同，它采用了超导磁体和微型制冷机来提供高均匀的磁场环境和便利的低温测量环境。除了可以轻松提供更均匀的磁场、更便利的低温测量环境外，VersaLab 在提供传统电磁铁振动样品磁强计所提供的磁学测量功能(例如：磁滞回线、热磁曲线、高温磁学、初始磁化曲线、剩磁以及磁化数据的时间函数等)的基础上，还提供在这个变温变磁场的平台上进行的全自动电学、热学等其他各种高精度的物理参数的测量功能。电学测量包括交直流电阻率、磁电阻、微分电阻、霍尔系数、伏安特性等参数测量；热学测量包括比热、磁熵变测量等。

VersaLab 平台庞大的测量功能绝不局限于上述测量，仪器特有的可拓展性（预留了软件和硬件的接口），使得用户能够通过 VersaLab 系统

### Partners in Your Lab

控制第三方设备，利用系统的低温强场环境和测量功能进行用户自己设计的实验，如介电、铁电、光电、磁电耦合和磁致伸缩等拓展测量。VersaLab 摒弃了传统的 GPIB 接口模式，采用了最新的 CAN 模式设计，保证了 VersaLab 上的各种测量功能之间能够互不干扰，且能够快速简单地相互切换。

从某种意义上来说，VersaLab 也是一种经济型的 PPMS 系统（Quantum Design 公司一种广为认可的材料研究大平台），因为 VersaLab 上的测量选件如磁学、电输运、比热等是从 PPMS 上移植过来的，是非常成熟可靠的技术，经过了长时间的实验检验，这些测量方法的可靠性和便捷性在过去的十几年中已经得到世界科学界的认可。与 PPMS 相比，VersaLab 的测量功能和精度几乎完全相同，只不过磁场略低、温区略高，但产品的诸多新特点使得用户的购买成本和运行成本大大降低。总体来讲，它的特点如下：

1. 集合磁、电学、热等高精度测量 功能强大
2. 50-400K 测量全程无需液氦或液氮（微型制冷机冷却超导磁体以及样品室）
3. 专利技术提供更高温度控制精度
4. 超导磁体提供更均匀的背景磁场
5. 高低温下均可达到最大 3 特斯拉磁场
6. 无磁极间距调整及鞍区调整等复杂操作
7. 高磁场下长期运行也无需冷却水；
8. 单相电源供电(220V) 能耗小(1.5~2.4KW)
9. 体积小巧 便于移动(高 1.31m)；



图2 首席研发科学家 Dr. Jim O'Brien 和 VersaLab

### 1. VersaLab 系统主机

VersaLab 系统的主机包含以下几个部分：VSM 磁学测量功能、系统温度控制平台，磁场控制平台、VersaLab 系统操作控制软件系统、内置高真空系统等。基本系统的硬件包括磁学测量振动头、测量样品腔、超导磁体及电源组件、计算机和电子控制系统、高真空体系和变频压缩机等等。

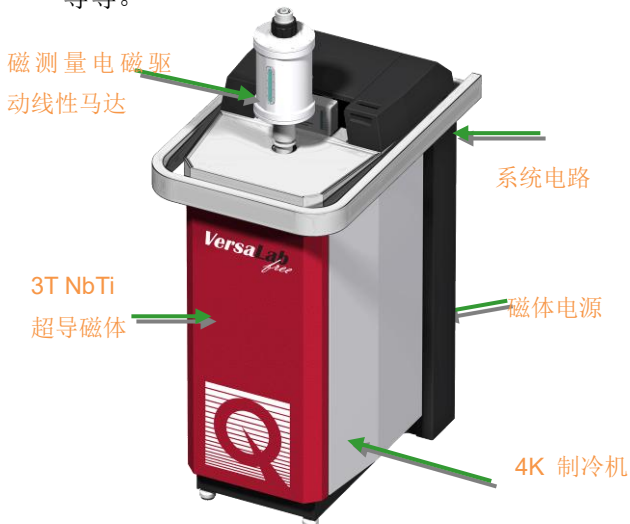


图3 VersaLab 的主机外部示意图

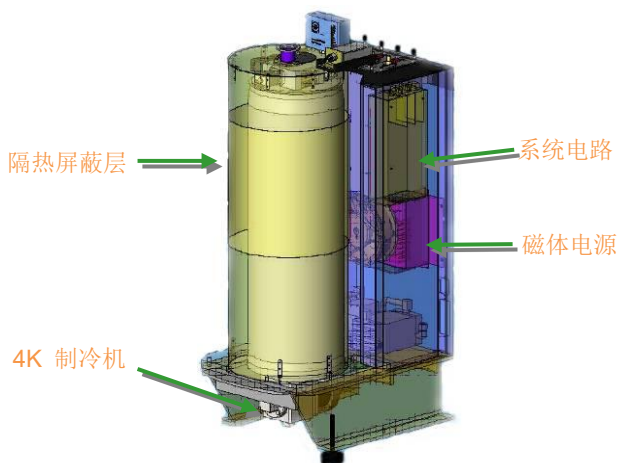


图4 VersaLab 的主机内部示意图

#### 1.1 测量样品室

VersaLab 样品室的内径是 25.4mm，底部带有 12 个电学针脚（如图 5 所示），用来读取样品上的信号以及系统当前温度等信息。VersaLab 样品安装采用了样品托（专利设计）来代替传统的样品杆设计，样品安装在样品托上，样品托底部的 12 针脚孔与样品室底部的 12 个针脚契合，

进行无干扰的数据传递，从而达到高精度测量的要求(如图 5 所示)。不同测量使用不同的样品托，即方便了样品的安装，同时也减少了外界环境对样品的影响（漏热更少），让样品的温度更稳定。

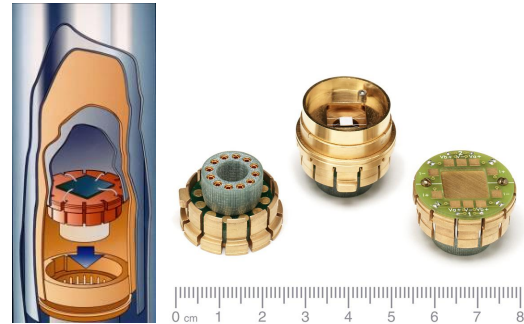


图5 左图：样品托放入样品室，通过 12 针脚契合  
右图：不同测量功能选件使用的样品托

#### 1.2 温度控制平台

VersaLab 系统采用闭循环制冷方式，无需灌装液氦或液氮，利用微型制冷机实现样品升降温控制的，并整合了多项专利技术使得控温非常稳定并且精准。

测量时，样品室处于密封的粗真空或者高真空状态(高温测量和热学测量情况下)，样品变温是通过制冷机直接传导冷却样品室的铜壁，进而冷却样品室内的热交换气体来传导冷却样品的。

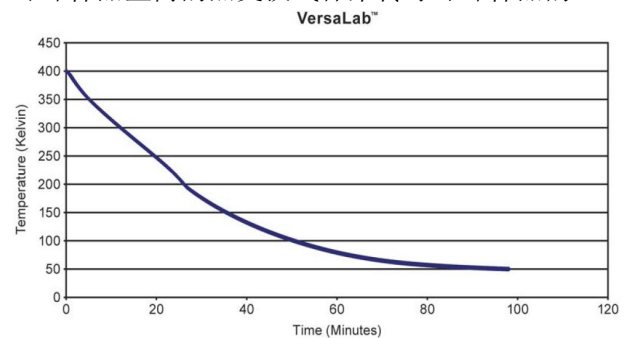


图6、VersaLab 温度扫描曲线

独特的专利设计使得系统能够快速精确地控制样品所在区域内的温度变化，并能实现样品温度无限长时间的稳定。

#### ● 温度控制参数：

闭循环制冷，无需灌装液氦液氮等制冷剂

温度范围：50-400 K 连续变温

降温时间：从 300K 降至稳定在 50K ≤140 分钟

温度稳定性：≤±0.02%

控温模式：连续低温控制和温度扫描模式

### 1.3 磁场控制平台

VersaLab 采用了高均匀度的 3T 铌钛线超导磁体来提供背景磁场，励磁的双极性电源具有极低的噪声，可以平滑过零。并且多种磁场控制模式可以供用户根据测量选用。

- 磁场控制系统技术参数：

磁场范围： ±3T  
 场均匀度： 0.1% over 2.5 cm  
 扫场速率： 0.1 - 300 Oe/sec  
 初始启动时间： 10~12 小时

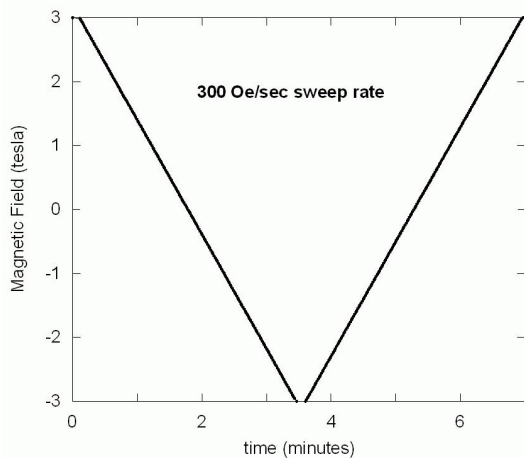


图 7 快速扫磁场 扫 12T 只需不到 7 分钟

### 1.4 全新的高真空体系和压缩机系统

VersaLab 主机里已经内置了高真空用于热学以及高温磁学测量时使用，真空度优于  $1 \times 10^{-4}$  Torr，因此购买或升级高温炉以及比热选件时，无需再像 PPMS 一样需要先升级高真空选件，极大的降低了购买成本。

图 8 右边红色小控制柜是 Quantum Design 最近推出的 VersaLab 专用压缩机，取代了以前采用的商用压缩机。该压缩机是 Quantum Design 特别研发设计，具有变频功能，重新设计了压缩机过滤器，使其效率提高 50% 以上，设计了压缩机变频系统，系统能够智能调节其制冷功率，损耗电功率大大降低；噪音降低至原来的 10%，振动极大降低，提升了系统的整体性能。



图 8 VersaLab 的主机与新式压缩机系统

### 1.5 VersaLab 软件系统——MultiVu 控制软件

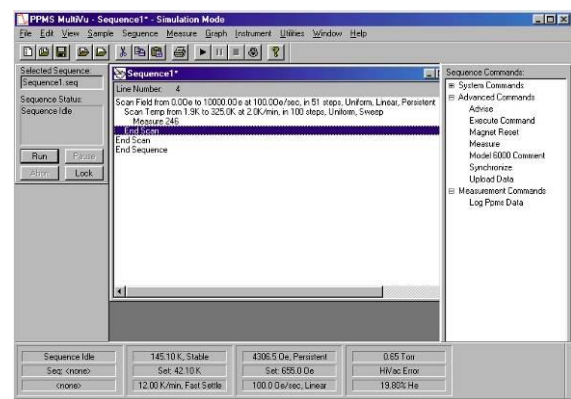


图 9 MultiVu 控制软件的测量程序界面

MultiVu 是 VersaLab 系统的专用控制软件，基于微软 windows 操作系统，使用 windows 的通用协议，具有友好的用户界面。主要特征如下：

- ◆ 可以控制系统所有的硬件设备，实时监测并记录系统所有设备的运行状况。
- ◆ 测量程序命令由软件系统提供，用户只需要填写测量时使用的参数。
- ◆ 新增加的选件对应的软件模块可以很容易的集成到整个控制软件中来。
- ◆ 当系统连接到互联网上，可以实现远程仪器的控制和维修服务。
- ◆ 提供软件接口，使得 MultiVu 可以轻松控制所有基于 IEEE488 总线的设备

### 1.6 新型 VSM 振动样品磁强计磁学测量功能

振动样品磁强计磁学测量为 VersaLab 主机包含的功能，可全自动进行各种高精度磁学测量如磁滞回线、热磁曲线、高温磁学、初始磁化曲线、剩磁以及磁化数据的时间函数等。

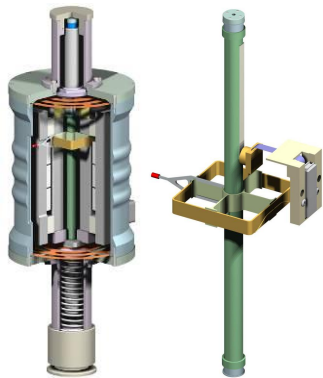


图 10 VersaLab 的电磁力驱动振动头剖面示意图

与传统的振动样品磁强计所用的测量方法相比，VersaLab 上的磁学测量在很多方面都作了改进。由于系统的磁场是垂直于地面方向的，所以其样品振动方向和磁场方向是平行的。而传统的电磁铁 VSM 样品振动方向与磁场是垂直的，而这样从原理上就比传统的电磁铁 VSM 精度要高。具体来讲：

- ◆ 背景磁场由 VersaLab 主机的超导磁体提供，最高可达 3T。而传统的电磁铁 VSM 最高磁场小于 3T，并且在进行变温测量时由于需要加变温腔而拉开磁极间距，而使得最大可加磁场比大大降低，磁场均匀性也受到影响。
- ◆ 由于 VersaLab 的超导磁体均匀度高达 0.01%，样品在振动时几乎感受不到磁场的变化，磁场的噪音非常小；更大的均匀区允许样品的振幅更大以获得更好的测量精度。这都是使用电磁铁的传统振动样品磁强计无法比拟的。
- ◆ VersaLab 上的振动样品磁强计采用电磁场驱动振动杆，没有任何机械传动，没有振动扰动并且没有磨损；同时采用光学编码器定位技术，样品位置和信号对应精度远非传统的电磁铁振动样品磁强计可比。
- ◆ 因为 Versalab 磁体是螺线管结构的超导磁体，因此无需体调整磁极间距、调整鞍区等复杂操作即可以任意调整磁场大小，每次测量之前系统自动定中心。

- ◆ 从室温到高低温测量均无需更换任何变温腔，直接软件操作即可实现。
- ◆ 因为高低温下均无需添加任何变温腔到信号测量线圈中间，因此不会有任何干扰信号，而传统的使用电磁铁的系统，如需变温则在信号测量线圈中间引入了变温腔，测量准确性大受影响。
- ◆ 得益于主机专利的温度控制技术，VersaLab 上磁学测量的温控精度要远远高于传统的电磁铁的振动样品磁强计。
- ◆ 最大可测量样品尺寸 12mm (即便是在满场及变温下的情况下该尺寸也不受任何影响)
- ◆ 可进行变温、变磁场的高压磁学测量

所有的这些特点使得 VersaLab 上的 VSM 有极高的测量灵敏度，是目前世界上测量精度最高的 VSM。

#### ● 磁学测量技术参数

测试灵敏度 (10 秒数据平均):  $\leq 1 \times 10^{-6}$  emu

噪音基 (RMS):  $\leq 1 \times 10^{-6}$  emu @300K

最大磁矩量程: 40emu/振动峰值

线圈内径: 6mm (大线圈选件可升级至 12mm)

可测量样品: 适合各种形态类的样品测量, 如薄膜、块材、单晶、粉末甚至液体等, 并且针对不同类型的样品采用不同的样品固定板, 和粉末样品胶囊等。



图 11 不同样品磁测量采用的石英和黄铜样品固定板

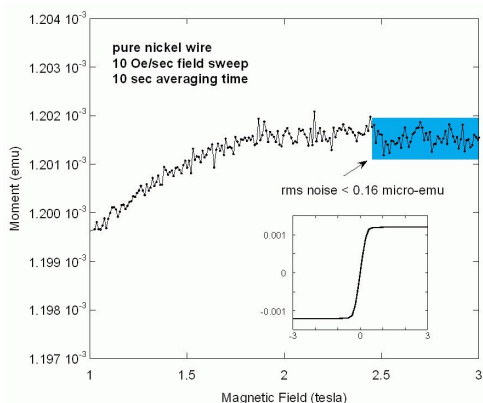


图 12 噪声基水平可达  $10^{-7}$  emu，精度可达  $10^{-6}$  emu



图 14 磁学高温测量样品杆

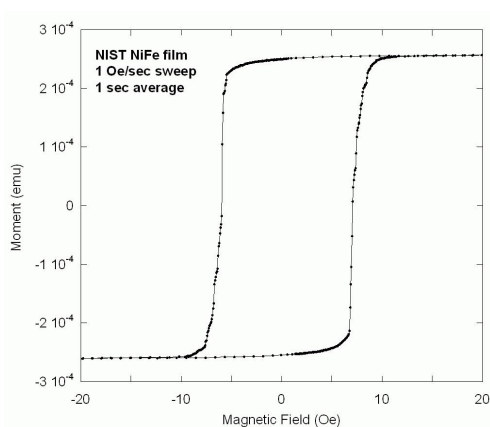


图 13 对矫顽力很小的样品也可进行高精度的测量



图 15 磁学高温测量样品安装组件

## 2. VSM 磁学测量高温炉选件

VersaLab 上 VSM 的高温炉选件用于扩展磁学测量的温度区间，最高可以达到 1000K。采用专利的样品腔真空绝热技术而没有采用任何加热炉腔，既没有引入噪声源保证了高温磁测量精度而且操作非常简单易行。

### 主要特点

- ◆ 采用碳纤维制作样品杆，用良好绝热的氧化锆制造加热杆
- ◆ 专用安装组件使得样品安装方便快捷
- ◆  $10^{-4}$  托的高真空环境使得漏热极少
- ◆ 加热器和热电偶直接集成在加热杆上

### ● 高温磁学测量技术参数

温度范围：315-1000K

温度稳定性： $\pm 1$ K

测试灵敏度： $\leq 1 \times 10^{-5}$  emu

噪音基 (RMS)： $\leq 1 \times 10^{-5}$  emu

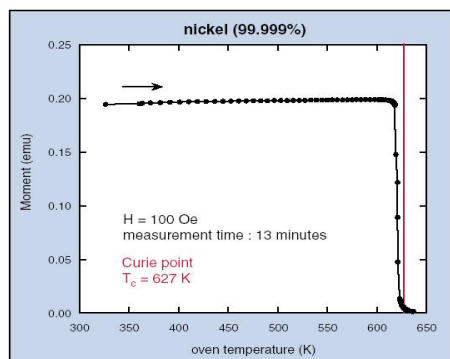


图 16 用标样 Ni 验证磁测量高温区控温精度

## 3. 新型交流磁学性质测量选件 (ACMS II)

新型交流磁学性质测量选件 (ACMS II) 采用独特的探测线圈和 VSM 线性磁力驱动马达 (图 10)，可以一次测量就获得样品的交流磁化率 (实虚部分开) 和直流磁化强度信号。交流磁化率的测量采用了锁相放大技术，以及五点测量模式能有效地消除温度漂移对测量的影响。

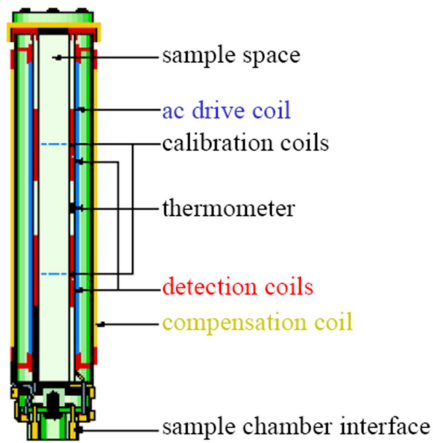


图 17 测量线圈组结构示意图

图 17 是测量线圈组的结构示意图。从图中可以看出，测量线圈有独特的设计：

- ◆ 特有的校准线圈组逐点测量并消除了背景相漂移。使得系统能够精确地确定测量时的绝对相位。
- ◆ 交流补偿线圈组抵消了测量区域以外的交流磁场，消除了对周围环境所产生的噪音影响。
- ◆ 集成在线圈内部的温度计，精确、实时地测量了样品的温度。

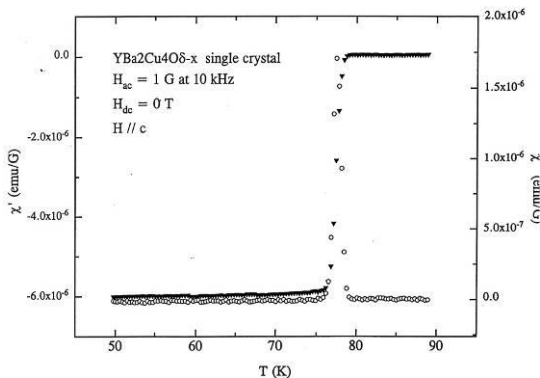


图 10 超导样品的交流磁化率实部和虚部

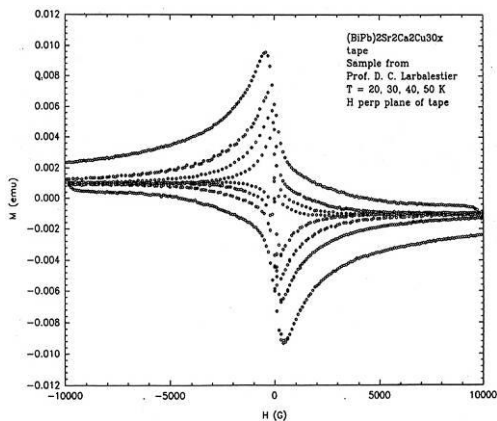


图 11 超导样品的磁滞回线

● 技术参数

温度范围： 50K - 400K  
 AC 频率： 10Hz - 10kHz  
 AC 幅值： 0.05Oe - 15 Oe  
 测量灵敏度 AC：  $1 \times 10^{-8}$  emu@10kHz  
 DC：  $5 \times 10^{-6}$  emu

3. 水平旋转样品杆选件(电学、磁扭矩测量用)

VersaLab 上的样品水平旋转杆选件是用于测量与角度相关联的电和磁性质，例如电阻率、霍尔效应、临界电流、伏安特性以及磁各向异性等。如图 18 所示。样品安装在能够轻易拆装的带有镀金引线的样品板上，仅需要将特定功能的样品板插入到旋转台上就能进行角度相关测量，在测量的过程中转杆由步进马达控制按照输入的转动精度进行全自动转动。

● 技术参数

转角范围：  $-10^\circ$  to  $370^\circ$   
 转动步长：  $\leq 0.05^\circ$ (标准型)或  $0.01^\circ$ (高精度型)  
 转动回差：  $\leq 5.0^\circ$  (典型值：  $3.0^\circ$ )  
 最大转动速度：  $10^\circ/s$ (标准型)或  $1^\circ/s$ (高精度)

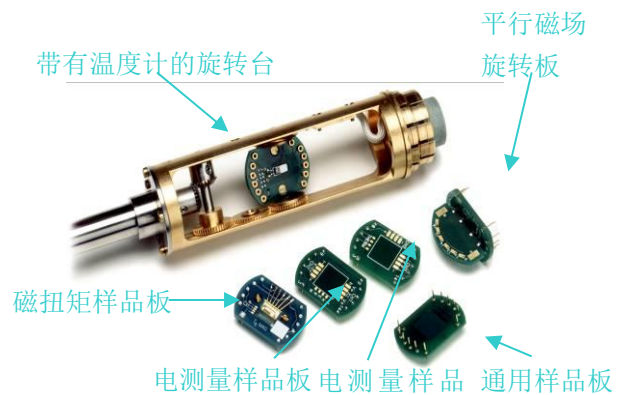


图 18 样品水平旋转杆及各种样品板

4. 磁扭矩测量选件 (Torque Magnetometer)

扭矩磁强计选件是 Quantum Design 公司和 IBM 公司共同开发的，专门为精密测量具有各向异性的小样品(单晶、薄膜)的磁各向异性而设计，其测量精度可以与 SQUID 磁强计相媲美。其测量原理是：当样品安装到扭矩测量芯片上后，具有各向异性的样品在磁场中转动时受到扭矩力，通过芯片上集成的惠斯通电桥来测量扭矩力引起的压电传感器上电阻的变化，从而得到磁场对样品产生的扭矩，进而得知样品在磁场中的磁化强度，如图 19 所示。

最大样品质量: 10 mg

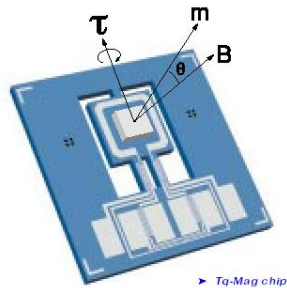


图 19、扭矩磁强计选件测量原理

该选件的设计和应用具有如下特征:

- ◆ 样品必须具有磁各向异性。
- ◆ 配合转动样品杆使用, 可进行全自动的角度相关的磁矩测量, 如图 18 所示。
- ◆ 在扭矩测量的过程中可以进行温度扫描。
- ◆ 采用压电传感器来测量扭矩。
- ◆ 在扭矩测量芯片内集成有精密惠斯通电桥以测量压电传感器的电阻。
- ◆ 集成在扭矩测量芯片上的电流环, 产生严格大小的磁矩, 用来自动校准扭矩的大小。这样不仅完全消除重力作用对测量结果的影响, 而且使得温度对测量结果的影响最小化。

### 5. 直流电阻测量选件及高级电输运测量选件

磁、电测量往往密不可分, VersaLab 系统最新推出的 VersaLab 电测量选件, 允许用户在 50-400K,  $\pm 3T$  的系统环境下全自动的进行诸如电阻、微分电阻 (非线性电阻)、磁电阻、伏安特性和霍尔效应等各种电学测量。用户既可以选择使用 4 线法、2 线法也可以选用范德堡方法测量不规则形状的样品。每次最多可以测量 2 个样品, 采用了两套独立的测量仪表, 可在不同量程间自动切换, 可以兼顾微弱的小信号测量和诸如半导体材料的大电阻测量, 有效的拓展了电阻测量量程, 可测量电阻值为  $10n\Omega$ - $5G\Omega$ 。结合全自动样品转杆, 还可以进行电各向异性测量。

#### ● 电学测量技术参数

△直流电阻测量

输出电流量程:  $10nA$  -  $8mA$

最大电压:  $4V$

灵敏度:  $20nV$

测量精度:  $0.01\%$ (典型值)

最大测量电阻:  $4M\Omega$

△高级电输运测量

输出电压范围:  $\pm 4.0V$  (一倍增益时)

电流范围:  $10nA$ - $100mA$  持续操作

频率范围:  $0.1Hz$ - $200Hz$

电阻测量精度典型值:  $0.1\%$  ( $R < 200k\Omega$ );  $0.2\%$  ( $R \sim 1M\Omega$ );  $2.0\%$  ( $R < 1G\Omega$ );  $5\%$  ( $R = 5G\Omega$ )

电阻测量范围:  $10\mu\Omega$  -  $5G\Omega$

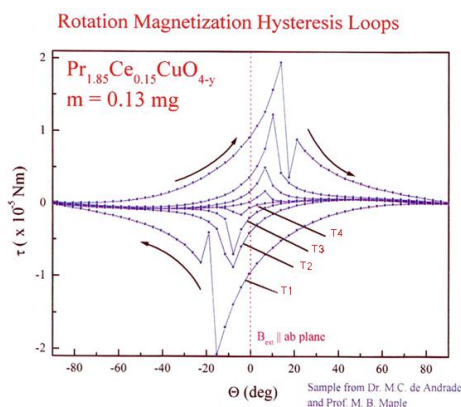


图 20 不同温度下扭矩与角度的关系

#### ● 扭矩磁强计选件技术参数

测量灵敏度

均方根扭矩背景噪音:  $1 \times 10^{-9} Nm$  (40s)

均方根磁矩灵敏度:  $3 \times 10^{-7} emu$  @  $3T$  (40s)

扭矩测量范围:  $\pm 10^{-5} Nm$

芯片尺寸:  $6 \times 6 \times 1 mm^3$

安装样品区域:  $2 \times 2 mm^2$

最大样品尺寸:  $1.5 \times 1.5 \times 0.5 mm^3$



图 21 电测量专用的样品托



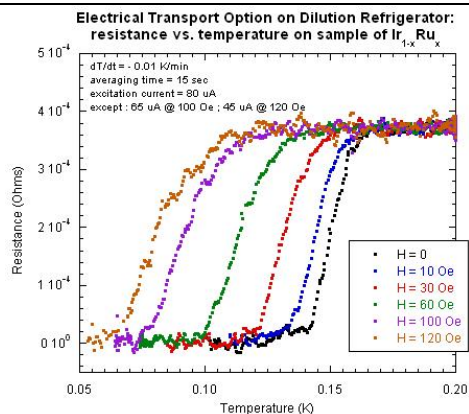


图 22 电阻测量 研究样品的超导转变

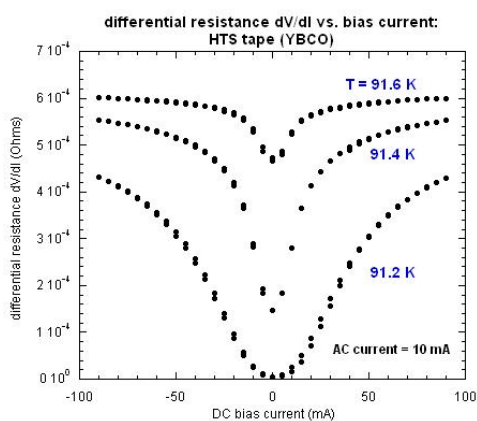


图 23 对高温超导样品进行微分电阻测量

## 6. 比热测量选件

比热是非常重要的物理量，但是实验上很难获得高品质的比热测量数据。Quantum Design 公司采用了热弛豫法，使用世界领先的双 $\tau$ 模型专利技术对弛豫曲线进行拟合，全自动快速精确地获得变温和变场下的高质量比热数据，该项技术曾获得 1998 年世界“R&D100”大奖。

比热的测量也采用了样品托，并且配有专用的样品安装工具，如图 20 所示。



图 24 比热样品托和专用样品安装工具

VersaLab 上的比热选件的主要特征有：

- ◆ 高精度、高自动化程度的设计使得初次使用者也能进行精确的测量。
- ◆ 采用出色的双 $\tau$ 模型（two-tau model™）专利技术精确拟合并计算样品的比热。
- ◆ 专用样品安装工具极大简化了样品的安装。
- ◆ 比热样品托专利技术极大提高了测量精度。
- ◆ 具有完备的数据采集和数据分析软件。
- ◆ 通过两个定性参数（样品热耦合参数和曲线拟合参数）可以保证测量数据的可靠性。
- ◆ 对每一个测量数据点系统自动计算和记录德拜温度 $\Theta_D$ 。
- ◆ 测量样品时背景的比热能够自动扣除。
- ◆ 主机系统内置高真空选件，无需另外配置。

## ● 比热测量技术参数

测量温度范围：50-400K

磁场范围：±3T

测量灵敏度：10  $\mu$ J/K @ 50 K

测量精度：≤5% @50K - 300K（典型值 2%）

## 7 热输运选件

热输运选件可以同时测量样品的热传导系数、Seebeck 系数（热电势）和交流电阻率，并根据这三个数据计算出热电材料的品质因子。样品测量采用样品托的方式，并配套有专用的样品安装工具，如图 25 和 26 所示。



图 25 安装了标准样品的热输运样品托



图 26 热输运样品安装平台

主要特点:

- ◆ 能够同时测量热导率、电阻率、Seebeck 系数（热电势）、品质因数。
- ◆ 四端头引线法消除接触电阻和热阻的影响。
- ◆ 在温度不断变化的情况下进行连续测量,能够得到高密度的数据。
- ◆ 特有的系统自适应测量方案非常适合研究陌生材料。
- ◆ 软件可以精确的动态建立热流量模型,补偿各种可能的系统误差。
- ◆ 全自动的测量过程,操作简单。
- ◆ 利用专用样品安装工具能够安全、方便、快速的把样品到安装到样品托上。

技术参数

热传导测量精度

- ± 5 %或± 20  $\mu$ W/K, 50 K < T < 200 K
- ± 5 %或± 0.5 mW/K, 200 K < T < 300 K
- ± 5 %或± 1 mW/K, T > 300 K

Seebeck 系数

- 测量精度: ± 5 %或± 0.5 $\mu$ V/K 或± 2  $\mu$ V
- 测量范围: 1  $\mu$ V/K - 1 V/K

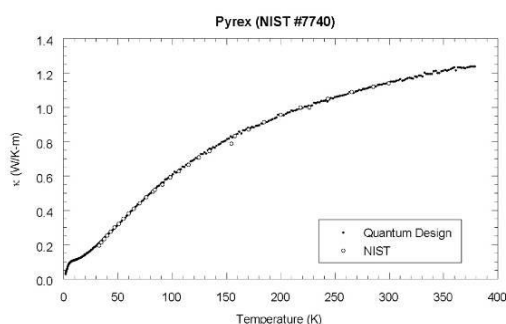


图 28 PPMS 上热输运数据与美国国家标准局数据对比

## 8. 多功能样品杆选件

为方便有些用户利用 VersaLab 系统提供的低温和磁场平台进行自己设计的实验, Quantum Design 特别推出了多功能样品杆,如图 27 所示。

多功能样品杆能够方便用户将外接仪表的电源引线、信号采集线、光纤、微波导管等引入 VersaLab 系统的样品室内,从而可以进行例如铁电、介电、激光或微波辐照下的电输运等测量。



图 27 多功能样品杆

主要特点:

- ◆ 样品杆上留有足够的空间让较大尺寸的电缆穿过,可以传输较大的电流或者多路信号线。
- ◆ 通过三个轴向端口可以安装光纤、微波导管等测量设备。
- ◆ 测量杆上集成了温度计。

成功实现铁电、介电、以及激光或微波辐照条件下的电输运等测量功能。

## 9 高压腔选件 (Pressure Cell, Pcell \ Mcell)

高压腔选件是由日本 ElectroLab 和 HMD 公司专门为 PPMS DynaCool 系统设计和制造的。灵巧的硬件设计结合 PPMS DynaCool 全自动测量程序把传统复杂的高压实验变得简单易行,从而用户就可以在 PPMS DynaCool 上实现变温、变场、变压的三相测量环境下的电学、磁学测量。

### 电测量高压腔 (Pcell):

PPMS 电输运测量专用,可实现变温、变场、变压环境下的电输运测量。该选件内部集成了温度计,并预留 10 根电测量引线 (5 对双绞线)。

● 技术参数:

最大压强 (理论): 3.0GPa 或更高

样品空间尺寸:  $\Phi$ 4.4mm

样品空间长度: 4mm



图 28 已安装好的电测量高压腔腔体

### 磁测量高压腔 (Mcell):

可配合 VSM 选件使用(需选用大尺寸线圈), 也可用于 MPMS 上, 可实现变温、变场、变压环境下的磁学测量, 采用了全 BeCu 材料设计, 磁背景更均匀。

#### ● 技术参数:

最大压强 (理论): 1.3GPa 或更高

样品空间尺寸:  $\Phi 2.1\text{mm}$  或  $2.6\text{mm}$

样品空间长度: 7mm

腔体直径: 8.5mm

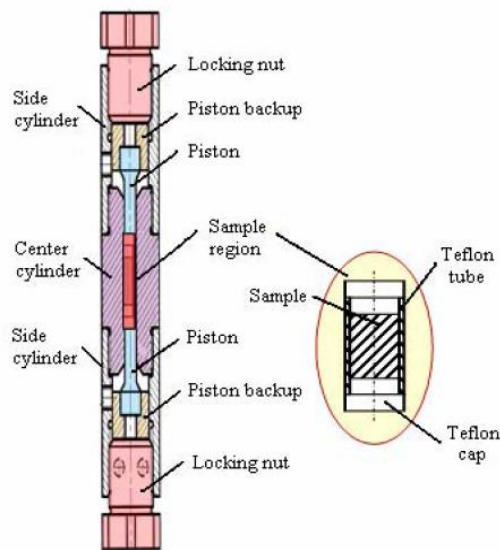


图 30 磁测量高压腔详细结构示意图

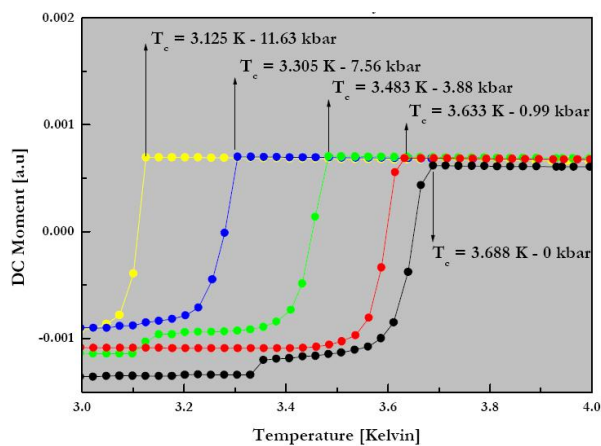


图 31 不同压力下超导样品的超导转变曲线



图 29 磁测量高压腔的专用工具箱

### 10 高精度铁磁共振测量选件 (FMR)

由瑞士 NanOsc 公司开发的高精度铁磁共振仪 (FMR), 能够对纳米级别的磁性薄膜进行高精度的铁磁共振测量。该仪器可以在不同的磁场下测量铁磁共振, 并且通过自带的分析软件可得到以下参数: 饱和磁化强度 ( $M_s$ ); 本征阻尼 ( $\alpha$ ); 非均匀展宽 ( $\Delta H$ ); 回磁比 ( $\gamma/2\pi$ )

该系统采用高精度波导探测芯片, 并提供了整套硬件和全自动测量分析软件。也可根据用户已有的磁体进行定制性改造。同时, 该设备也可配合全系列 PPMS 以及 Montana 超低振动光学恒温器和进行极低温强磁场下的铁磁共振测试。

#### ● 主要特点和技术参数:

- ◆ 2-8GHz 或 2-17GHz 或 2-40GHz 三款可选
- ◆ 可分辨 1.4nm CoFeB 薄膜
- ◆  $\text{SNR} \geq 10 @ 10\text{ nm NiFe}$

◆ 样品最大尺寸：17×13mm



图 32 室温用 40GHz 的 FMR 控制器（上）  
和低温用 17GHz 的 FMR 的控制器（下）

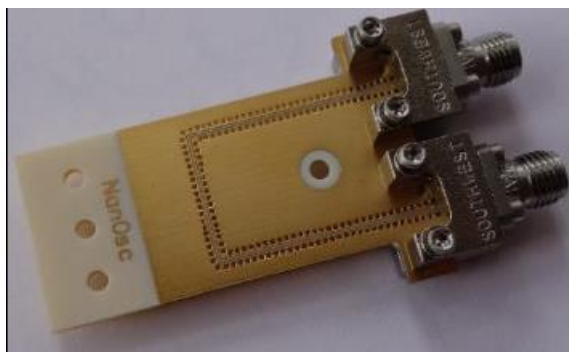


图 33 高精度波导探测芯片



图 34 在 PPMS 上进行低温强磁场下的 FMR

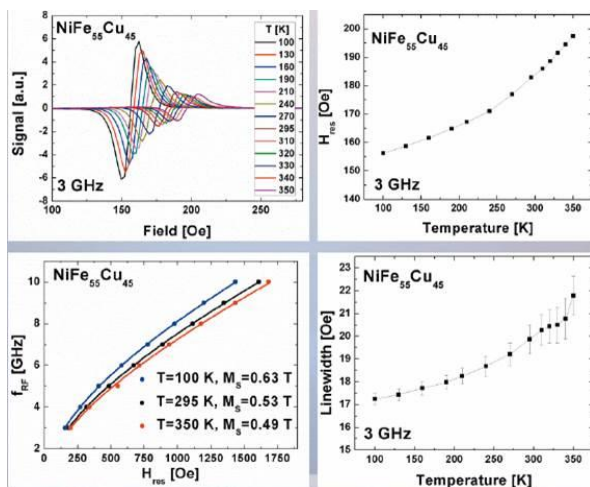


图 44 NiFeCu 合金在不同磁场温度下的铁磁共振特性

## VersaLab 基系统与传统电磁铁 VSM 系统的主要参数对比表

	<i>VersaLab</i>	传统电磁铁 VSM
磁场控制	NbTi 超导磁体	铜线圈电磁铁
	均匀区大(2.4cm)	均匀区窄(约 0.5cm)
	高场下均匀度不变(0.1%)	高场均匀区大幅下降，磁噪声大
	全自动化控制，操作方便 无需水冷	手动调节磁极间距和鞍区等复杂操作 需水冷
	一体化机身屏蔽罩	无磁屏蔽，高场对周边人体与设备危害
温度控制	低温无需任何温度插件 高温使用自加热样品杆	低温、高温均需要外部插件 (使得磁极间距必须扩大，从而降低磁场强度和测量精度，并有巨大背景信号)
	内置微型制冷机 低温无需液氦或液氮	低温需要液氦或液氮
VSM 马达	长程电磁力驱动马达 (无任何机械噪声和磨损，无需维护)	机械马达 (机械噪声对磁测量产生影响)
	振动方向与磁场平行 (提高磁信号探测灵敏度)	振动方向与磁场垂直
VSM 测量	0-3T 灵敏度均达到 $\leq 1 \times 10^{-6}$ emu 数据平均时间 10 秒	高场下由于电磁铁噪声对测量精度产生影响，数据测量时间长
	内置 $<10^{-4}$ Torr 高真空 (无机械振动和噪声)	配备机械真空泵，约 $10^{-3}$ Torr 或大气环境
拓展功能	电输运、比热、热输运、铁电、介电、光电、磁电等	手动电测量、无其他功能
能耗	总功率 2.4kW	磁场能耗 5~8 kW 水冷机功率 5~8 kW
	变频压缩机，自动调节制冷功率， 效率提高 50%，噪音下降 10%	
仪器尺寸	重 86 kg，高 1.31m 底部滑轮，可随意移动	重达上千公斤，无法移动



# Quantum Design

**By Scientist For Scientist**

**Quantum Design 中国子公司提醒您:**

如需获得更详细的产品资料以及最新推出的系统选件介绍, 请登录 Quantum Design 中国子公司的网站直接查询 <http://www.qd-china.com>, 或致电中国子公司北京、上海和广州办公室, 欢迎垂询!



微信关注我们获取更多最新资讯



**PHAROS** Digital Library  
Quantum Design

Quantum Design 数字图书馆: <https://www.qdusa.com/pharos/>

**Quantum Design 中国子公司**  
北京办公室

北京市朝阳区酒仙桥 10 号  
恒通商务园 B22 座 501 室 100015  
电话: 86-10-85120277/78/79/80  
传真: 86-10-85120276  
邮箱: [info@qd-china.com](mailto:info@qd-china.com)  
网站: [www.qd-china.com](http://www.qd-china.com)

**Quantum Design 中国子公司**  
上海办公室

上海市静安区威海路 511 号  
上海国际集团大厦 1703A 室 200041  
电话: 86-21-52280980  
传真: 86-21-52282156  
邮箱: [info@qd-china.com](mailto:info@qd-china.com)  
网站: [www.qd-china.com](http://www.qd-china.com)

**Quantum Design 中国子公司**  
广州办公室

广州市天河区珠江新城华强路 2 号  
富力盈丰大厦 1216 室 510623  
电话: 86-20-89202739  
传真: 86-20-89202750  
邮箱: [info@qd-china.com](mailto:info@qd-china.com)  
网站: [www.qd-china.com](http://www.qd-china.com)