

Keithley 在场发射技术中的应用

背景

随着科技的进步和认识的提高，人类探索宇宙空间的范围和深度大大拓展，例如 2015 年 9 月 14 日，人类首次探测到两个黑洞并合所产生的引力波，由 LIGO 科学团队与 VIRGO 团队共同合作。LIGO 激光干涉引力波天文台（laser interferometer gravitational wave observatory）为引力波探测的地面探测器之一。除此之外，引力波探测也有空间探测器，例如由美国国家航空航天局（NASA）和欧洲空间局（ESA）合作的引力波探测计划：激光干涉空间天线（Laser Interferometer Space Antenna, LISA），这是人类第一座太空中的引力波天文台。

引力波以光速传播，引力波的频率与波长相乘等于光速。最低频的引力波是宇宙暴胀时期的量子涨落留下的遗迹，波长与可见宇宙尺度相当，由于信号太弱非常难以直接观测。即使是最强的引力波，到达地球后的效应也是非常小的，因为这些源距离我们非常遥远。比如 GW150914 在最后的剧烈合并阶段所产生的引力波，在穿过 13 亿光年之后到达地球，仅仅将 LIGO 探测器的 4 公里臂长改变了一个质子直径的万分之一，也相当于将太阳系到我们最近恒星之间距离改变了一个头发丝的宽度。这种极其微小的变化，如果不借用异常精密的空间探测器，我们根本无法察觉。

空间探测器的结构中，推进器是重要的一部分，传统推进器使用化学能源，将化学能转换为电能。近几年来，逐渐有了电推进系统，代替传统推进器，电推进系统利用太阳能转化为电能。电推进系统中最常见的种类有霍尔推进系统和场发射电推进系统。

场发射电推进系统是一种具有比冲高、推力冲量分辨率高、推力噪声低、功耗及成本低、结构紧凑等优点的电推力器，能够大幅节省推进剂、增加有效载荷质量，从而增加空间探测器在轨寿命，提高空间探测器的整体性能与收益，特别适合用于空间探测器的姿态控制、轨道转移等任务。

什么是场发射？

场发射 Field Emission，金属中的自由电子在特定条件下可以发射出来，若用金属构成阴极并做成极细的针尖状，在超高真空中施以数千伏电压，金属中的电子即可从阴极冷金属中发射，这种发射电子的方法称为场发射，属于冷阴极发射。场发射可以产生高达 10^4 A/cm² 的高电流密度。其能在室温下工作，无需像热电子发射那样需要高温加热，且功耗很低。场发射的主要机理是在强电场作用下，电子能够通过量子隧穿效应克服表面势垒而逸出固体。这种发射过程与温度依赖性较弱，主要取决于电场强度。由于场发射电子具有较窄的能量分布，这有利于制造高性能电子器件。

场发射技术的应用

- **电推进技术领域**

场发射电推进技术是一种先进的电推进技术，推力最小可达微牛量级，且可在较大范围内实现精准调节，比冲高达 5000 秒-10000 秒，效率可达 90%以上，非常适用于重力场测量卫星的大气阻力、光压和重力补偿，微小卫星的高精度姿态控制以及微卫星编队相对位置的精确保持等。

- **显示技术领域**

场发射显示器（FED）是场发射技术在显示领域的重要应用。它由大量的场发射阴极阵列和阳极荧光屏组成。每个像素点对应一个或多个场发射阴极，当阴极发射的电子在电场作用下加速撞击阳极荧光屏上的荧光粉时，荧光粉会发光，从而实现图像显示。FED 具有响应速度快、视角宽、亮度高、功耗低等优点，被认为是下一代显示技术的有力竞争者。

- **电子显微镜领域**

场发射电子枪是现代高分辨率电子显微镜（如扫描电子显微镜 SEM 和透射电子显微镜 TEM）的关键部件。场发射电子枪能够提供高亮度、高相干性的电子束，使得电子显微镜能够实现更高的分辨率和更好的成像质量，可用于材料科学、生物学、纳米技术等领域的微观结构研究。

- **电子器件领域**

由于场发射的高电流密度、室温工作、窄能量分布和低功耗的特点，场发射器件还非常适合作为真空电子器件(VED)中的电子源，如行波管、X 射线管和纳米级真空沟道晶体管等。这些器件需要高电流密度和窄能量分布的电子源以实现最佳性能。

- **真空微电子学领域**

场发射技术在真空微电子器件中也有着广泛应用，如场发射三极管、行波管等。场发射三极管利用场发射阴极作为电子源，通过控制栅极电压来调节电子流的大小和方向，实现信号的放大和开关功能。行波管则利用场发射电子束与高频电磁波相互作用，实现微波信号的放大和传输，在雷达、通信等领域具有重要应用。

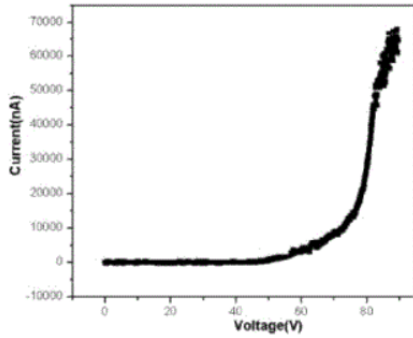
- **能源领域**

场发射技术在能源领域也有一定的应用探索。例如，在场发射辅助的热电子发射能量转换系统中，利用场发射降低电子发射的阈值温度，提高热电子发射的效率，从而实现更高效的热能 - 电能转换。此外，场发射技术还可以应用于燃料电池中，提高电极的电子发射性能，改善燃料电池的性能。

- **传感器领域**

基于场发射原理的传感器可以用于检测各种物理量和化学量。例如，通过检测场发射电流的变化来感知气体分子的吸附、压力的变化或温度的变化等。场发射传感器具有灵敏度高、响应速度快、检测限低等优点，在环境监测、生物医学检测等领域具有潜在的应用价值。

如何评估场发射特性



左图为某场发射材料的发射电流-真空电压曲线，当电压很低的时候，发射电流几乎为 0，逐渐增加外加电压，当外加电压大于某一阈值的时候，发射电流急剧升高，这个阈值电压（Threshold Voltage）就是指材料开始产生电子发射所需的最小电压。阈值电压的大小取决于材料的工作函数、表面形貌、结构等因素，这是表征场发射材料最重要的参数，较低的阈值电压意味着材料具有良好的场发射性能。降低阈值电压是提高场发射性能的重要目标之一。通过材料设计和制

备工艺的优化,可以有效降低阈值电压,从而提高材料的场发射性能。等效于阈值电压的另一个参数为开启电场，开启电场(Threshold Electric Field)是指使材料开始产生电子场发射所需的最小电场强度。

发射电流密度(Emission Current Density)是场发射材料另一个重要的参数。它是指场发射材料在一定电场作用下单位面积上发射出的电子电流。发射电流密度越高,表示材料的场发射性能越好。这是因为在相同的电场作用下,能够发射出更多的电子,说明材料具有更优异的场发射特性。发射电流密度的大小取决于材料的工作函数、表面形貌、结构等因素。通常情况下,工作函数较低、表面形貌有利于电子发射的材料,其发射电流密度较高。发射电流密度与阈值电压是相互关联的。一般来说,阈值电压越低,发射电流密度越高。

窄能量分布式场发射的一个突出特征，所以要了解场发射电子性质，也可以通过测量场发射电子能量分布。除此之外，发射电流稳定性、工作函数等这些都是可以用来评估和研究场发射特性的指标。发射斑点分布是指材料表面电子发射斑点的分布情况，均匀的发射斑点分布有利于提高场发射性能。发射电流稳定性是指材料在长时间工作条件下，观察发射电流的稳定性。良好的发射稳定性是场发射性能的重要指标。工作函数是指材料表面电子逸出所需的最小能量，较低的工作函数有利于降低阈值电压，提高发射性能。

测试原理

1928 年，英国科学家 Fowler 和 Nordheim 基于金属自由电子理论和量子力学中的隧穿理论，研究了场发射现象，推导出了 F-N 场发射公式：

$$J_0 = \frac{AE_x^2}{\phi} \exp \left[- \frac{B\phi^{3/2}}{E_x} \theta(\gamma) \right]$$

其中 J 表示电流密度，E 表示所加电场，A 和 B 是与发射体的功函数有关的常数， β 是场增强因子， ϕ 为功函数。所有的 FE 曲线都符合 Fowler-Nordheim (F-N) 关系式。

在场发射测量（FE 曲线）过程中，所有的发射电流密度与外加电场(J-E)图都显示出了，

开启电场(ETO)呈指数变化，ETO 被定义为获得 $1 \mu\text{A cm}^{-2}$ 电流密度所需的电场。

对 F-N 公式做变换，可以得到 $\ln(I/V^2)$ 与 $1/V$ 的关系式：

$$\ln\left(\frac{I}{V^2}\right) = \ln a - b\left(\frac{1}{V}\right)$$

$\ln(I/V^2)$ 与 $1/V$ 之间呈线性关系，这是判断是否产生场发射的一个基本依据，所有的测量点都应该在一条直线上，其斜率 -b 与功函数及场增强因子有关，一般称为有效功函数，所以当我们测试的 F-N 曲线开始变为一条直线时所加电场定义为样品的开启电场，将阈值电场定义为场发射电流密度达到 1 mA/cm^2 时所加的场强大小。

测试方案

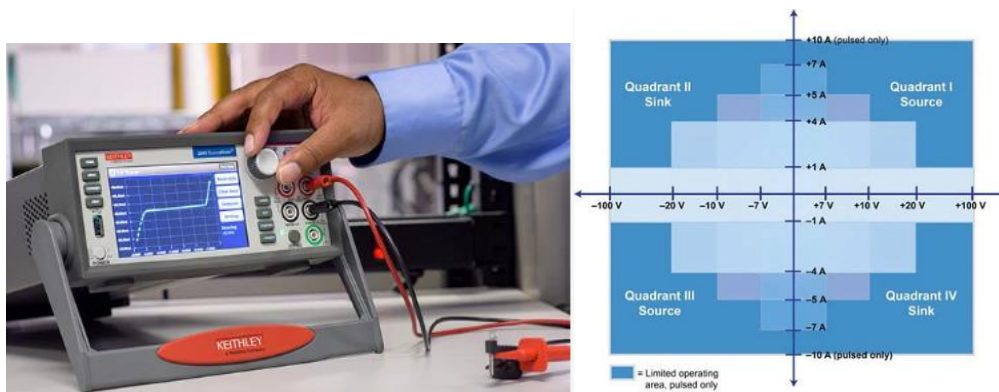
场发射电流的测量需要用到小信号测量仪器，一般其量级为 μA 级别，这就需要高精度的电流表对其进行测试，与此同时还需要一起检测对其外加电压的大小。

Tektronix 吉时利作为小信号领域的测试专家，提供丰富的产品助力场发射技术的研究。

Keithley 6400 系列皮安表可以测量 10fA 至 20mA 的电流，速度高达每秒 1000 个读数。6487 型皮安表/电压提供比 6485 更高的精度和更快的上升时间、一个 500V 源以及一种与电容设备配合使用的阻尼功能。6482 型双通道皮安表/电压源提供比 6485 型或 6487 型更高的测量分辨率和双独立 30V 电压偏置源。



SMU 源表系列从 2400 到 2600 系列具有高精度 10nV 电压 0.1fA 电流测试，具备分析仪、曲线追踪仪和 I-V 系统功能，成本更低。它提供高度灵活的 4 象限电压和电流源/载荷，以及精密的电压和电流仪器。这个一体化仪器可以用作：精密电源，具有电压和电流回读功能；真正电流源；数字多用表、测量直流电压、电流、电阻和功率，分辨率 $6\frac{1}{2}$ 数位；精密电子载荷；触发控制器。



为了现场发射，需要在材料表面施加很强的电场（一般电场强度达到 10^7 - 10^8 V/m 量级）才能使电子逸出。高电压源能够提供高达数千伏的稳定电压，以满足场发射研究中对强电场的需求，用于调节和控制施加在样品上的电场强度，从而研究不同电场条件下的场发射行为。

Tektronix EA Elektro-Automatik 扩展了泰克的大功率测试和测量解决方案。Elektro-Automatik (EA) 提供各种大功率电子直流电源和负载，功率从几百瓦到 3.8 兆瓦不等。其中包括双向再生电源，可减少对环境的影响，降低测试成本，并允许工程师将电压提升到 2,000 V 或将电流提升到 64,000 A。



在某些场发射研究中，比如场发射显示器、场发射电子枪、场发射纳米材料等研究中，需要实时观察和记录场发射电流或电压的瞬态变化过程。示波器能够快速捕捉和显示电信号的波形，帮助研究人员分析场发射过程中的动态特性，如发射电流的上升时间、下降时间、脉冲宽度等，对于研究场发射的开关特性和响应速度非常有用。

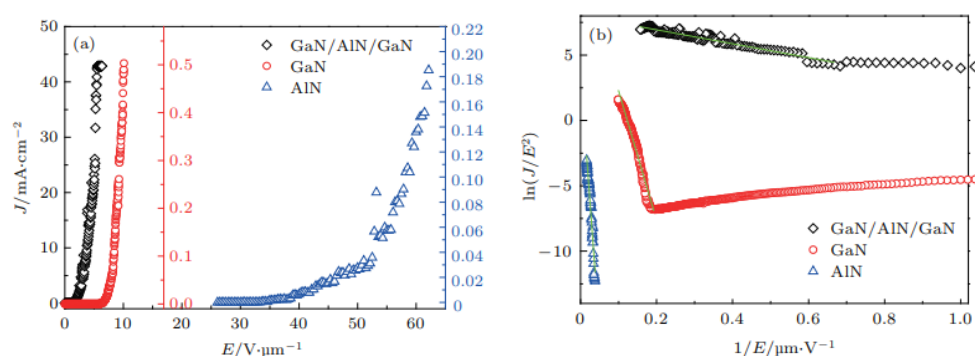
泰克的 TBS 以及 MSO 系列示波器满足从 50MHz-10GHz 带宽的需求，并且拥有 8-16bit 的垂直分辨率，提高测试精度。多通道的配置能够提高测试效率，以及多信号的同时监测以及对比。



案例一：多层纳米 AlGaIn 薄膜制备及其场发射性能

本文报告了多层 AlGaIn 纳米薄膜的制备和场发射特性。研究人员使用脉冲激光沉积在 SiC 基板上制备了 GaN/AlN/GaN 多层纳米结构薄膜。X 射线衍射和扫描电子显微镜结果表明,多层纳米薄膜具有清晰的界面和良好的结晶性。场发射测试结果表明,多层纳米薄膜结构相比单层 GaN 和 AlN 纳米薄膜显著提高了场发射性能。起始电场低至 $0.93 \text{ V}/\mu\text{m}$,在 $5.5 \text{ V}/\mu\text{m}$ 时电流密度达到 $30 \text{ mA}/\text{cm}^2$ 。增强的场发射归因于多层纳米薄膜中的量子阱结构,它降低了表面势垒,并通过共振隧穿效应增加了电子隧穿概率。

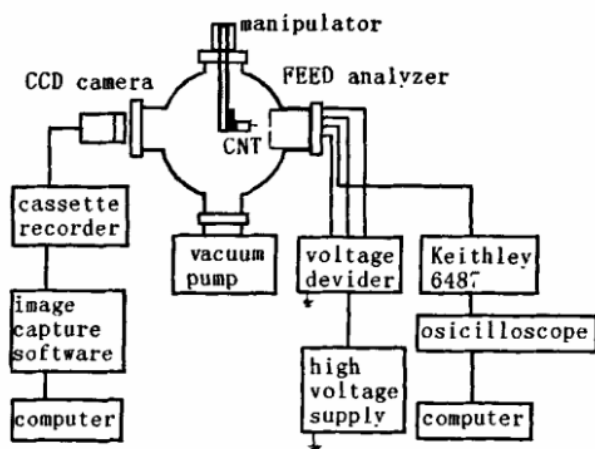
本文使用 Keithley 2410 源表接入场发射测试回路中,用于提供直流电压和测量其场发射电流,并重复多次测量消除误差并保证测试可靠性。



案例二：单根碳纳米管场致发射电子能谱特性及相关物理机制研究

本文主要研究了单根碳纳米管场致发射电子能谱特性及相关物理机制,研究了“躺平”在平台上和“站立”在钨针尖上的单根多壁碳纳米管的场发射显微镜,获得了清晰稳定的条纹状发射像、环状发射像。并测量了单根单壁碳管的场致电子发射能量分布,得到了典型的金属性和半导体性的碳管的电子能量分布。

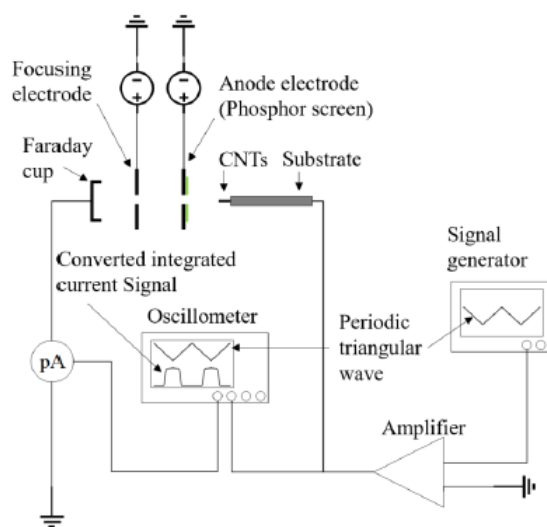
本文使用 Keithley 6517 或者 Keithley 6487 皮安表接作为阴极的样品,来测试场量场发射电流,做 IV 测试。还使用了 Keithley 6487 皮安表和泰克 TDS 系列示波器,以及能量分析器、扫描电压发生器、计算机来做场发射能量谱测量。



案例三：大电流下碳纳米管薄膜和单管场发射能量分布

该文件提出了一项关于高电流条件下碳纳米管(CNT)薄膜和单个 CNT 的场发射能量分布的研究。该研究旨在研究 CNT 发射体的能量分布谱随发射电流和样品面积变化的情况。使用阻抗电位法测量了单个 CNT 和 CNT 薄膜的能量分布谱。在低电流发射下,CNT 薄膜表现出与单个 CNT 类似的窄电子能量分布。然而,随着电流和电压的增加,能量分布变宽,峰值位置发生移动。讨论了与电场、焦耳加热、库仑相互作用和大面积发射点相关的影响因素,以解释其中的机理。这些结果为冷阴极器件中纳米材料电子源的应用提供了指导。

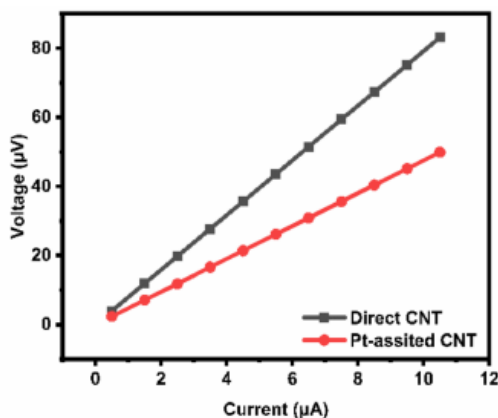
本文使用 Keithley 6485 皮安表和示波器测试通过空穴的电子,转换成电压信号,通过同时记录和分析输出电压信号,可以推导出相应的电子能量分布。



案例四：Pt 辅助化学气相沉积多壁碳纳米管的场发射研究

本文总结了一项关于使用 Pt 辅助化学气相沉积(CVD)方法生长的多壁碳纳米管(MWNTs)的场发射性能研究,并与直接生长在金属基板上的 MWNTs 进行了比较。Pt 辅助的 CVD 生长产生了更长、直径更大、结构质量更好的 MWNTs。Pt 辅助的 MWNTs 显示出更优异的场发射性能和稳定性。该研究展示了一种有前景的方法来开发高性能的 MWNT 场发射器。

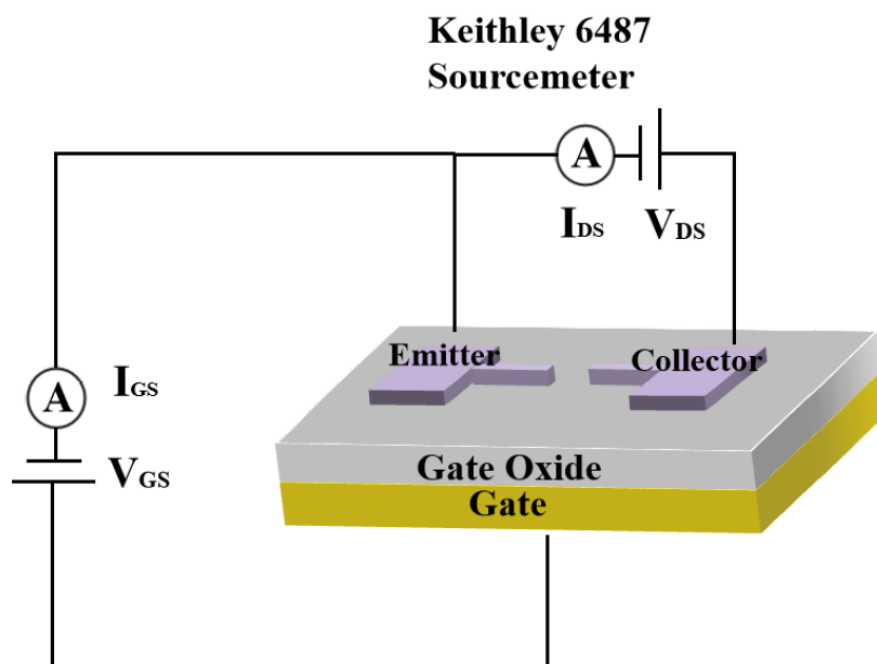
本文使用了 Keithley 2440 源表,采用双点动力四探针法测试 MWNT 膜相对于衬底的接触电阻。



案例五：pt 辅助化学气相沉积多壁碳纳米管的场发射研究

本文聚焦平面型纳米级真空沟道晶体管 (NVCTs)，通过 CST Studio Suite 软件模拟其结构参数，分析发射极尖端形态等对发射性能的影响，基于此利用高精度电子束光刻等工艺成功制备背栅和侧栅 NVCTs，并采用 FEI Quanta 200 扫描电子显微镜等对器件进行表征，研究其电学性能。结果显示优化发射极形貌和栅极结构可改善器件性能，如降低开启电压、增加发射电流，但测试中存在金电极易损坏问题，不过 NVCTs 在实现真空晶体管高集成化方面仍具很大潜力，有望满足超快响应和高频应用需求。

本文使用 Keithley 6487 皮安表，用来提供发射极集电极电压 V_D 并记录发射电流。



- [1] Shen Zhen, Chen Cheng-Cheng, Wang Ru-Zhi, Wang Bo Yan; HuiPreparations and field emission properties of multilayer AlGa_N nanofilm; 236803 (2016)
- [2] Ping Wu, Ningsheng Xu; The study of field emission electron energy distribution and correlative physical mechanism of an individual carbon nanotube;2007,6
- [3] Lizhou Wang, Yiting Wu, Jun Jiang, Shuai Tang, Yanlin Ke, Yu Zhang and Shaozhi Deng; Field-Emission Energy Distribution of Carbon Nanotube Film and Single Tube under High Current; 2024, 14, 888. <https://doi.org/10.3390/nano14100888>
- [4] Hongbin Tang, Ruizi Liu, Weijun Huang, Wei Zhu, Weijin Qian and Changkun Dong; Field Emission of Multi-Walled Carbon Nanotubes from Pt-Assisted Chemical Vapor Deposition; 2022, 12, 575. <https://doi.org/10.3390/nano12030575>
- [5] Ji Xu, Congyuan Lin, Yu Li, Xueliang Zhao, Yongjiao Shi and Xiaobing Zhang; Structure Optimization of Planar Nanoscale Vacuum Channel Transistor; <https://doi.org/10.3390/mi14020488>