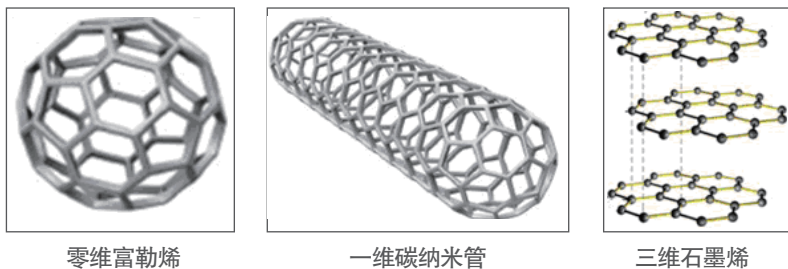


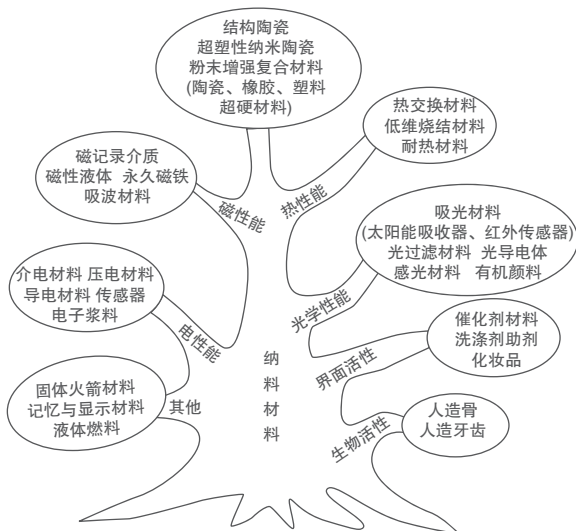
纳米材料及纳米电子器件测试综述

概述:

所谓纳米材料，指的是三维空间尺度至少有一维处于纳米量级(1-100nm)的材料，是由尺寸介于原子、分子和宏观体系之间的纳米粒子所组成的新一代材料。

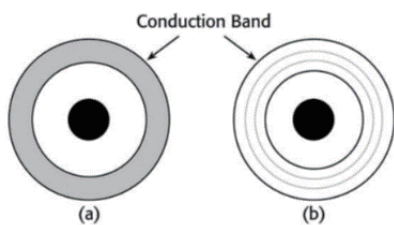


纳米材料可以按照多种尺度进行分类，按结构可以分为：零维材料 – 量子点，纳米粉末，纳米颗粒；一维材料 – 纳米线或碳纳米管；二维材料 – 纳米薄膜，石墨烯；三维测量 – 纳米固体材料。按组成可以分为：金属纳米材料，半导体纳米材料，有机高分子纳米材料，复合纳米材料。下图是将纳米材料按其物理性质进行分类并列出的纳米材料应用的示意图，由此可见，纳米材料已经在多领域得到广泛应用。



纳米材料的特性

由于纳米材料的某一维或多维尺寸为纳米量级，使得其具有许多异于宏尺寸材料的特性。纳米材料的基本特性包括：表面与界面效应，如熔点降低比热增大；小尺寸效应，如导体变得不能导电；绝缘体却开始导电以及超硬特性；量子尺寸效应和宏观量子隧道效应。纳米材料的理化性能为：高强度、高韧性；高比热和热膨胀系数；异常电导率和扩散率；高磁化率。



纳米材料电子器件

基于以上特性，纳米材料被广泛用于制作纳米电子器件。纳米电子器件指的是利用纳米级加工和制备技术，设计制备而成的具有纳米级尺度和特定功能的电子器件。纳米电子器件包括纳米CMOS器件，如绝缘层上硅MOSFET、硅-锗异质MOSFET、低温MOSFET、双极MOSFET、本征硅沟道隧道型MOSFET等；量子效应器件；量子干涉器件、量子点器件；谐振隧道器件如横向谐振隧道器件、谐振隧道晶体管，谐振隧道场效应晶体管(RTEET)、双极量子谐振隧道晶体管、谐振隧道热电子晶体管等；纵向谐振隧道器件如隧道势垒调制晶体管等；单电子器件如单电子箱、电容耦合和电阻耦合单电子晶体管、单电子神经网络晶体管、单电子结阵列、单电子泵浦、单电子陷阱和单电子旋转门等；单原子器件和单分子器件如单电子开关、单原子点接触器件、单分子开关、分子线、量子效应分子电子器件、电化学分子电子器件等。

纳米材料电学性能测试

纳米材料的表征包括成分分析，颗粒分析，结构分析，性能分析，分析方法以电镜分析为主，特别是扫描隧道电镜(SMT)，在导体和半导体纳米材料分析上具有优势。

纳米材料的电学性能测试是对其态密度(Density of State)进行分析。所谓态密度指的是单位能量范围内所允许的电子数，也就是说电子在某一能量范围的分布情况。态密度是微观量，适合解释纳米粒子尺寸变化引起的特性。

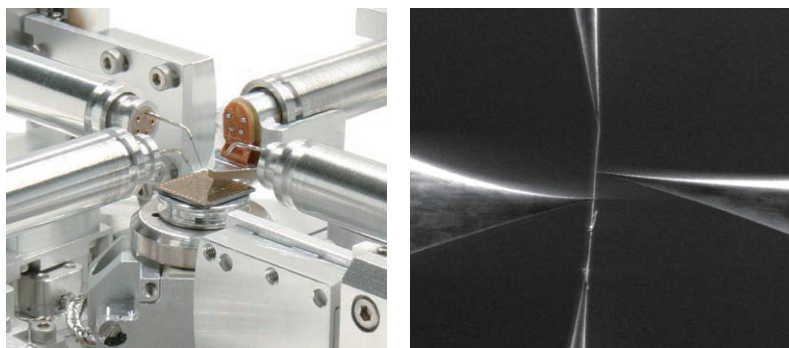
$$\rho(E) = \frac{dn_s}{dE} = \frac{4\pi(2m)^{3/2}}{h^3} \sqrt{E}$$

X射线光谱(X-Ray Spectroscopy)是进行态密度测试的常规方法，但通过对纳米材料电性能直接测试，也可以推到出态密度。用扫描隧道电镜测试用微分电导(di/dv)随电压的曲线即可推到出态密度。这种方法利用低电平AC信号调制于静态电流进行测试，电镜电极与被测样品间为高阻接触。

由于X射线光谱和扫描隧道电镜都是昂贵的设备，如果不是制备并表征纳米材料，仅仅是对纳米材料进行应用性研究，源表(SMU)+纳米探针台不失为一种高性价比的替代方案。与扫描隧道电镜

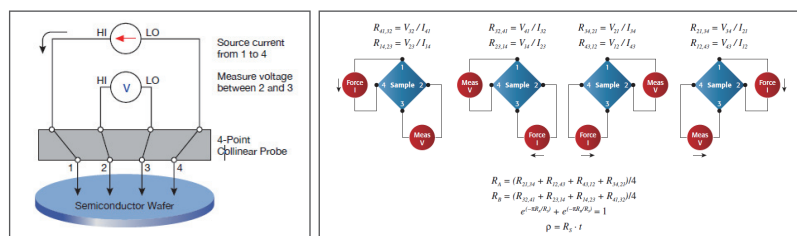
纳米材料及纳米电子器件测试综述

法不同，纳米探针台和被测样品间为低阻接触，这就要求SMU必须具备低电平测试能力，并根据被测样品的阻抗改变SMU工作模式。这种方法主要测试被测样品的电阻，电阻率及霍尔效应，更适合纳米电子器件的测试。



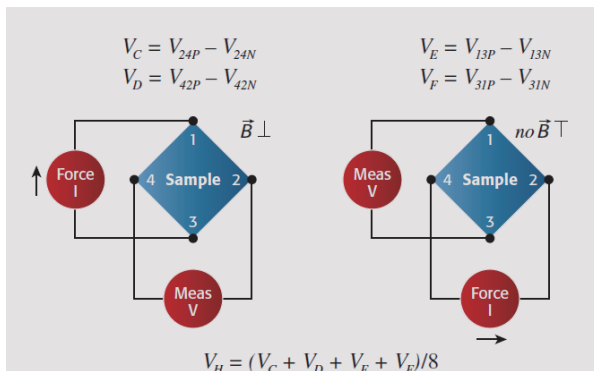
二维纳米材料电阻率测试

对二维纳米材料(如石墨烯)，电阻率测试是重要的测试项目，测试方法主要为四探针法(The Four-Point Collinear Probe Method)与范德堡法(The van der Pauw method)下两图为出两种方法的示意图，具体理论此处不再赘述。



二维纳米材料霍尔效应测试

当电流垂直于外磁场通过半导体时，载流子发生偏转，垂直于电流和磁场的方向会产生一附加电场，从而在半导体的两端产生电势差，这一现象就是霍尔效应，这个电势差也被称为霍尔电势差。通过对电势差测试，可以得到被测材料的载流子浓度与载流子迁移率等参数。二维纳米材料霍尔效应测试，依然用范德堡法，但电极接线与范德堡法测试电阻率有所不同，并且在测试霍尔效应时，通常要加磁场。下图为霍尔效应测试示意图，其理论不再赘述。



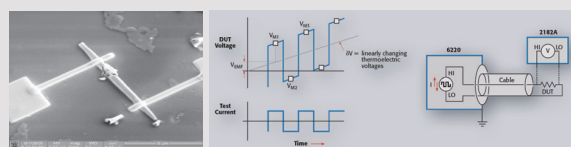
$$V_H = (V_C + V_D + V_E + V_F)/8$$

纳米材料及电子器件电学测试面临的挑战

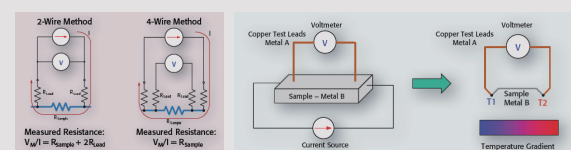
- 纳米级尺寸，性能异于宏尺寸材料与器件，状态变化快，对测试仪器响应速度有要求。
- 需配合纳米探针台
- 必须防自热,否则极易烧毁被测样品，需选择带有脉冲模式的 SMU

$$\rho = \frac{\pi}{\ln 2} \times \frac{V}{I} \times t \times k$$

$$\sigma = \frac{\pi}{\ln 2} \frac{V}{I} k = 4.532 \frac{V}{I} k$$



- 纳米材料承受及测试电流超小(达fA级)，承受及测试电压超低(达nV级)，不同种类的材料，电阻范围超宽，从 $\mu\Omega \sim T\Omega$,需选择与被测纳米材料和器件电性能相适应的SMU，需多种降低误差与噪声的手段，如加流测压或加压测流，四线法连接，屏蔽与滤波，降低热噪声等。



纳米材料及电子器件电学测试方案

有关纳米材料电学测试方案将分别在《纳米线/碳纳米管测试方案》及《二维/石墨烯材料测试方案》中详述。下页给出了纳米材料电学测试SMU应用场景，测试特点及选型原则的示意图，通过该图，结合被测纳米材料或纳米电子器件的类型及测试要点，选择最适合的SMU。从该图还可以看出，4200-SCS几乎适用于全部种类的纳米材料的测试，当然，某些特殊的源更合适一些特殊的应用。