

Tektronix®

泰克云上
大讲堂

薄膜材料电阻率 与霍尔迁移率测试

讲师介绍

刘建章 泰克应用工程师

▶▶▶ 12月22日 (周五) 14:30-15:45

泰克云上大讲堂 & 高速接口发展与技术论坛



关注“泰克科技”服务号
查看产品资料&往期回放~



直播回放&讲义下载

往期主题回顾

PCIe链路问题分析和实际仿真

如何测试纳米材料及纳米电子器件的IV和CV性能?

深度解析IC/CV参数测试难题

零基础学仪器编程

轻松上手你的KEITHLEY源表

电源环路响应测试方案详解

深入浅出剖析高速信号的抖动和眼图

忆阻器的发展及测试方案

深度解析高速信号均衡技术

1/f噪声测试详解

半导体可靠性热载流子效应测试详解

车载以太网中MII接口的测试应用

车载传感器MIPI D-PHY信号分析

源表自动化测量编程详解

基于FET的生物传感器测试详解

PCIe测试面面观...



加入“泰克半导体测试交流群”

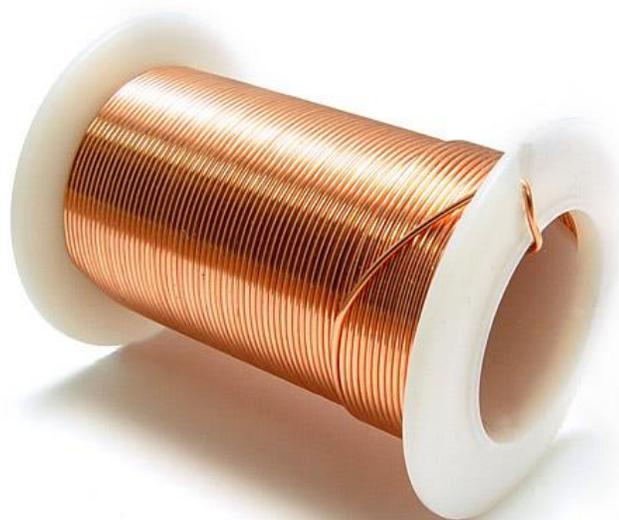
只要你问，只要我有



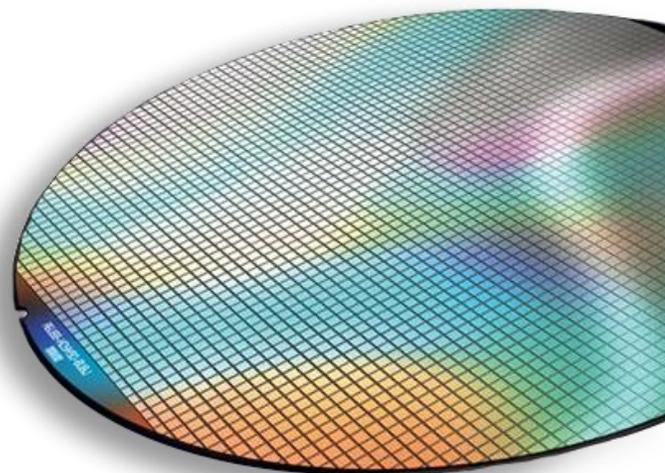
由泰克工程师小助手邀请入群~

(将于本场直播结束后统一邀请)

以下不同材料的本质区别是？



导体



半导体



绝缘体

→ 电阻率不同

纳米材料

- 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。



零维富勒烯

一维碳纳米管

三维石墨烯

• 纳米材料的分类

◦ 按结构

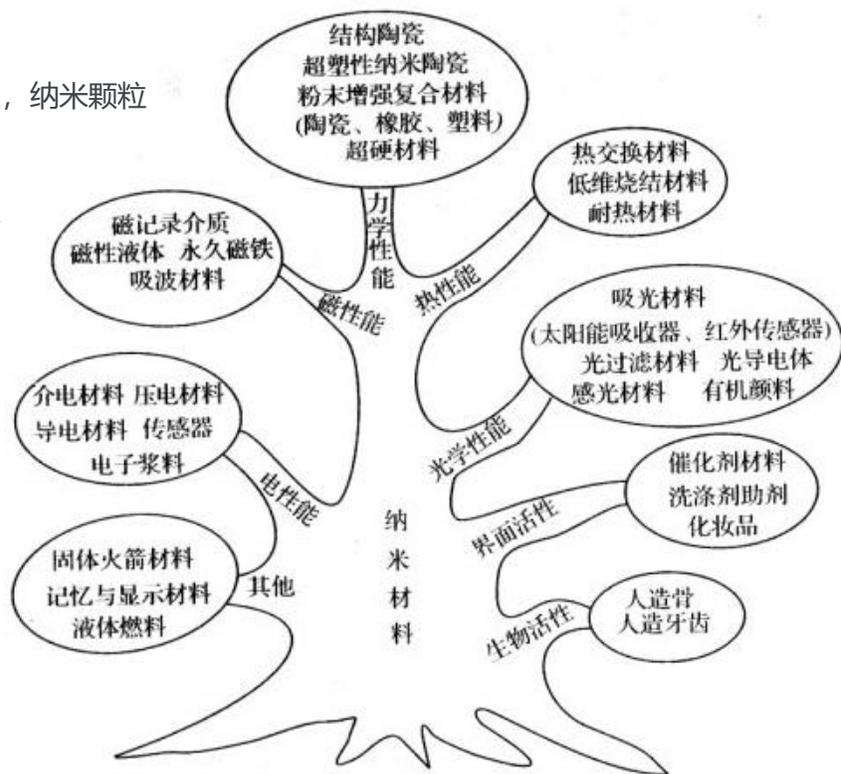
- 零维材料 – 量子点, 纳米粉末, 纳米颗粒
- 一维材料 – 纳米线或纳米管
- 二维材料 – 纳米薄膜, 石墨烯
- 三维测量 - 纳米固体材料

◦ 按组成

- 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

◦ 按物理性质

- 见右图



类别 \ 系列	第1系列	第2系列	第3系列	第4系列
多层状				
杆状				
等轴晶状				

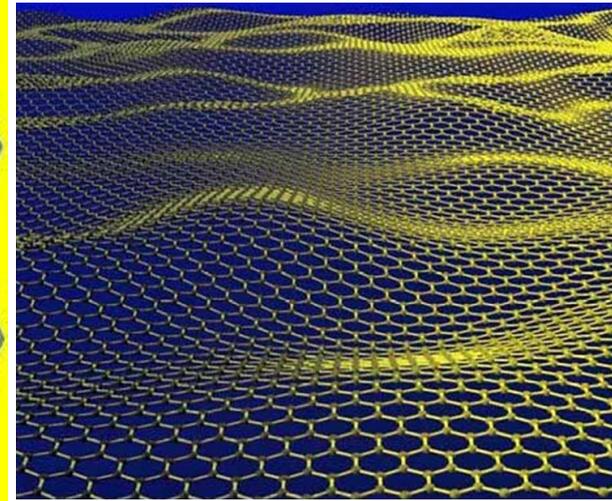
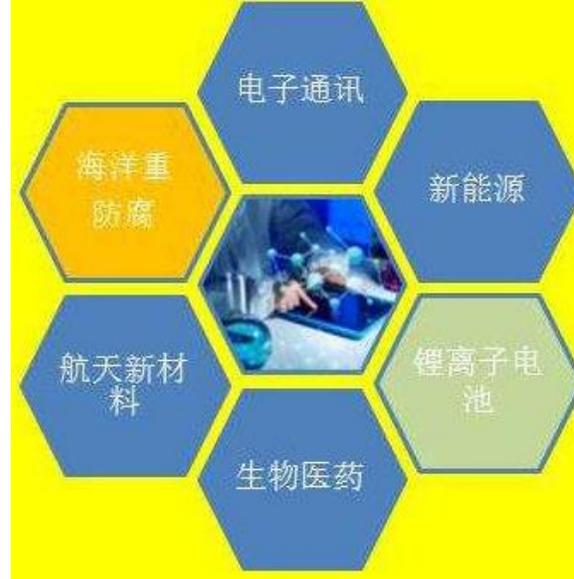
图 1-4 纳米材料的分类

(图中第1系列和第2系列较薄的层状和黑色部分表明晶界; 第3系列的黑点表明晶界的不同成分; 第4系列较黑线组成部分表明分散在基体中不同成分的晶体)

二维材料

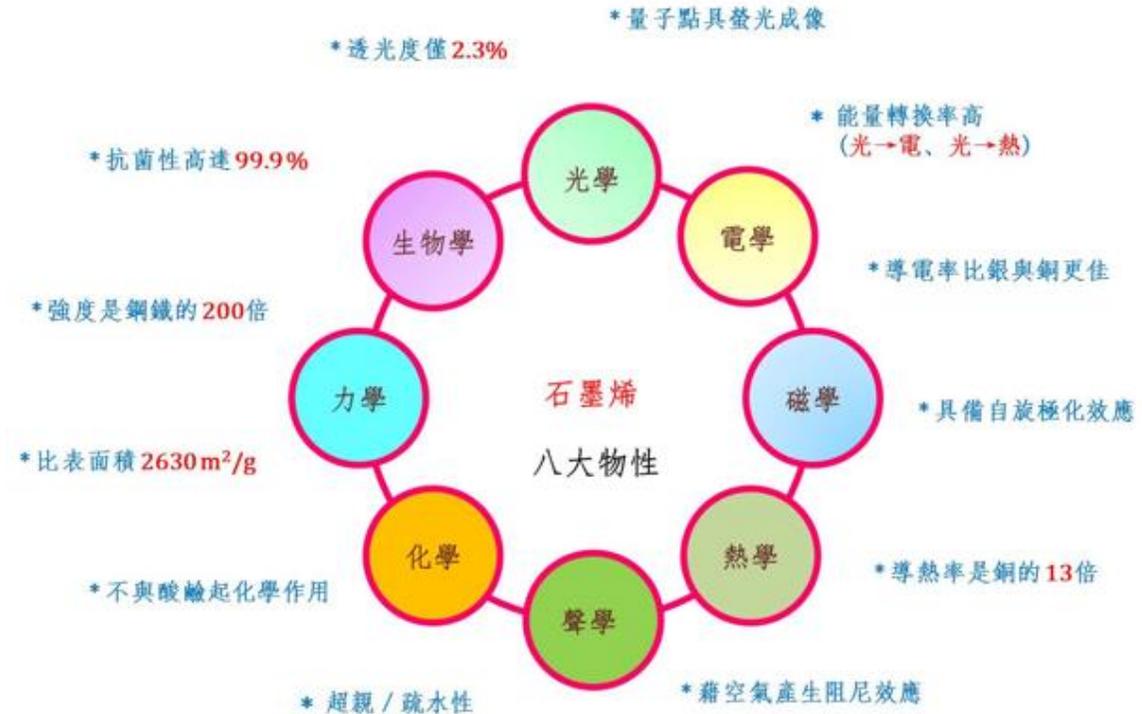
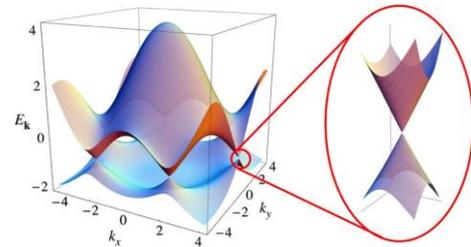
• 二维材料 (Two dimensional material)

- 指电子仅可在两个维度的非纳米尺度 (1-100nm) 上自由运动 (平面运动) 的材料
 - 纳米薄膜、超晶格、量子阱
 - 属于纳米材料的范畴

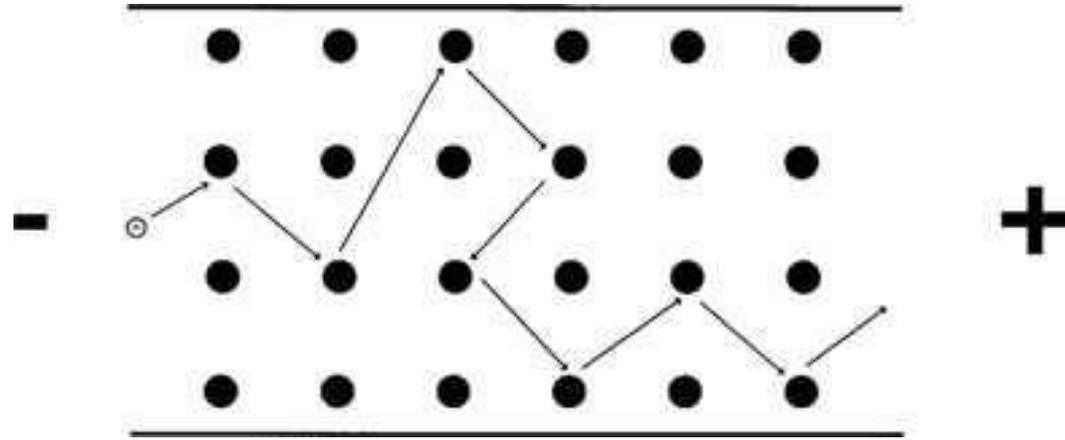


• 石墨烯 (Graphene)

- 由碳原子以sp²杂化轨道组成六角型呈蜂巢晶格的平面薄膜，只有一个碳原子厚度的二维材料。
 - 厚度仅有0.335纳米，是构建其他维数碳质材料的基本单元
 - 特点1：柔性，适合做可穿戴柔性电子设备；
 - 特点2：导电性强，载流子迁移率为Si的10倍，工作速度快，功耗低
 -
 - ※ 特点n：易改性



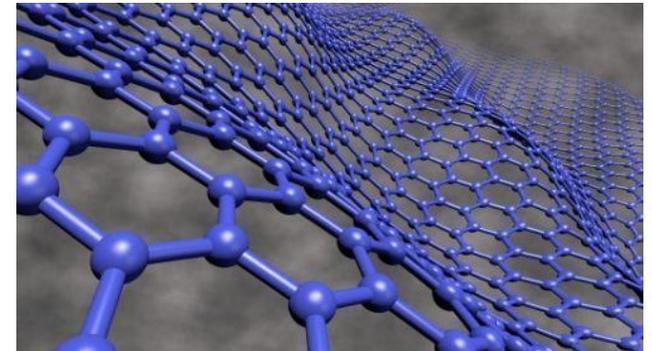
什么是电阻率？



- 一种材料的电阻率表征的是阻碍电流流过的能力的大小。其单位为 $\Omega \cdot \text{m} / \Omega \cdot \text{cm}$
- 如果电流很容易在某种材料中流过，那么该材料有较低的电阻率；如果电流很难流过某种材料，那么该材料有较高的电阻率
- 电阻率为材料的本质物理属性，与大小和形状无关

常见材料电阻率

Material	Resistivity at 23 °C Ohms - meter	Material	Resistivity at 23 °C ohms - meter
Silver	1.59×10^{-8}	Nichrome	1.50×10^{-6}
Copper	1.68×10^{-8}	Coal	3.5×10^{-5}
Gold	2.20×10^{-8}	Germanium	4.6×10^{-4}
Aluminum	2.65×10^{-8}	Silicon	6.40×10^2
Tungsten	5.6×10^{-8}	Human Skin	5.0×10^5 approx.
Iron	9.71×10^{-8}	Glass	10^{10} to 10^{14}
Steel	7.2×10^{-7}	Rubber	10^{13} approx.
Platinum	1.1×10^{-7}	Sulfur	10^{15}
Lead	2.2×10^{-7}	Quartz	7.5×10^{17}



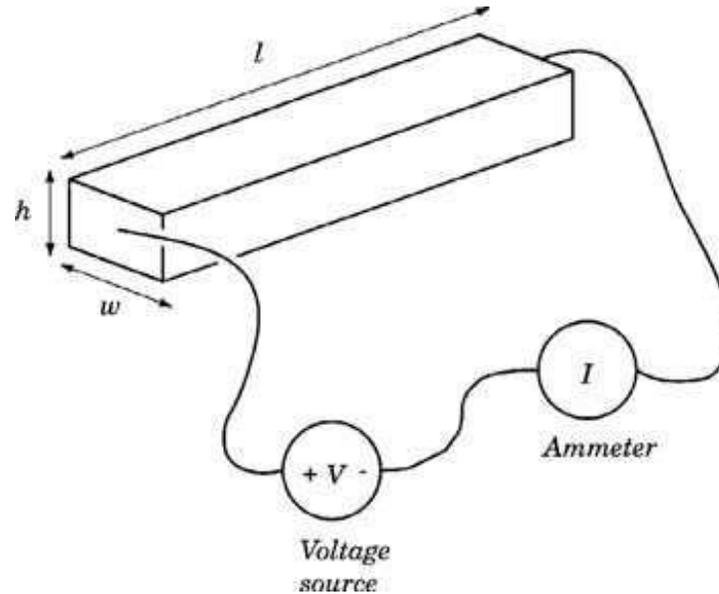
石墨烯: $1E-8\Omega m$

两探针法测试块状材料电阻率

• Two-Point Technique

$$\rho = \frac{Vwh}{Il}$$

ρ : 单位 $\Omega \cdot m$
 V : 测得的电压
 I : 测得的电流
 W : 宽
 H : 高
 L : 长



误差

- 引线误差
- 触点误差
- 仪器本身误差

四线法测试块状材料电阻率

• Four-Point Technique

$$\rho = \frac{Vwh}{Il'}$$

ρ : 单位 $\Omega \cdot m$

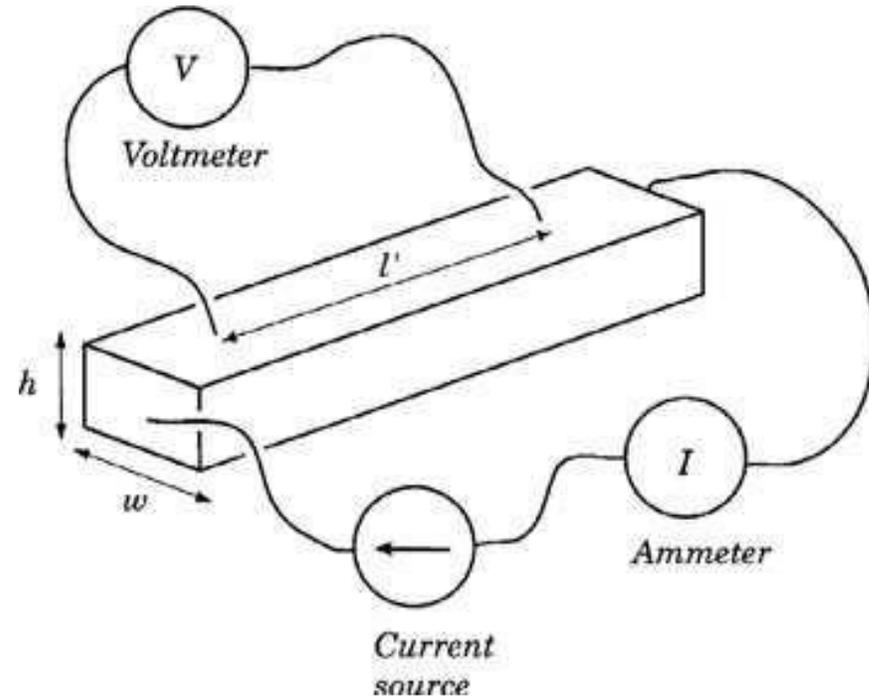
V : 测得的电压

I : 测得的电流

W : 宽

H : 高

l' : 电压表两根针间的距离



薄膜材料电阻率测试—方块电阻

• Sheet Resistance Measurements

ρ : 单位 $\Omega \cdot m$
V: 测得的电压
I: 测得的电流
W: 宽
H: 高
L: 长

$$\rho = \frac{Vwh}{Il} \xrightarrow{w=l}$$

$$\rho(\text{ of square film}) = \frac{Vh}{I}$$

$$R_s = R(\text{ of square film}) = \frac{V}{I}$$

- 通常需要测各种材料的薄膜或薄片电阻，如果材料可以做成长方形，那么就可以像测量条状样品一样测量电阻率；
- 有一种特殊情况，当W宽度和L长度相等时，此时材料为正方形，电阻值被称为方块电阻 R_s ，单位为欧姆/ \square ，即表面电阻率

薄膜材料电阻率测试—四探针法

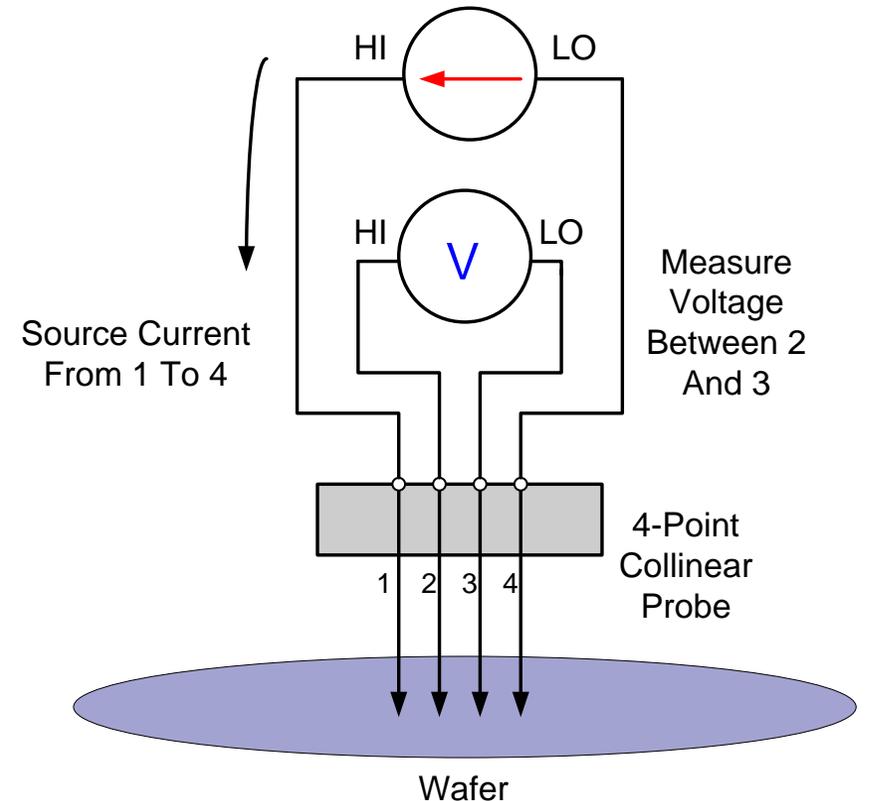
• Four-Point Resistivity Measurements

• 对于任意形状和任意大小的薄膜材料，比较方便的方法是四探针法

• 要求

- 四点共线
- 四根针等间距
- 材料长度和宽度远大于探针间距

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



薄膜材料电阻率测试—四探针法

• 仪器选择



4-pt-collinear#1

Key Parameters All Parameters

2 SMU2

Operation Mode: Current Bias

Bias: 0 A

Compliance: 20 V

Measure Current Measure Voltage

3 SMU3

Operation Mode: Current Bias

Bias: 0 A

Compliance: 20 V

Measure Current Measure Voltage

1 SMU1

Operation Mode: Current Bias

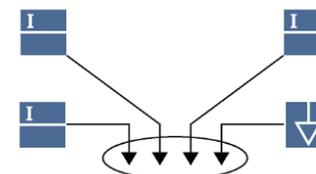
Bias: 0.001 A

Compliance: 20 V

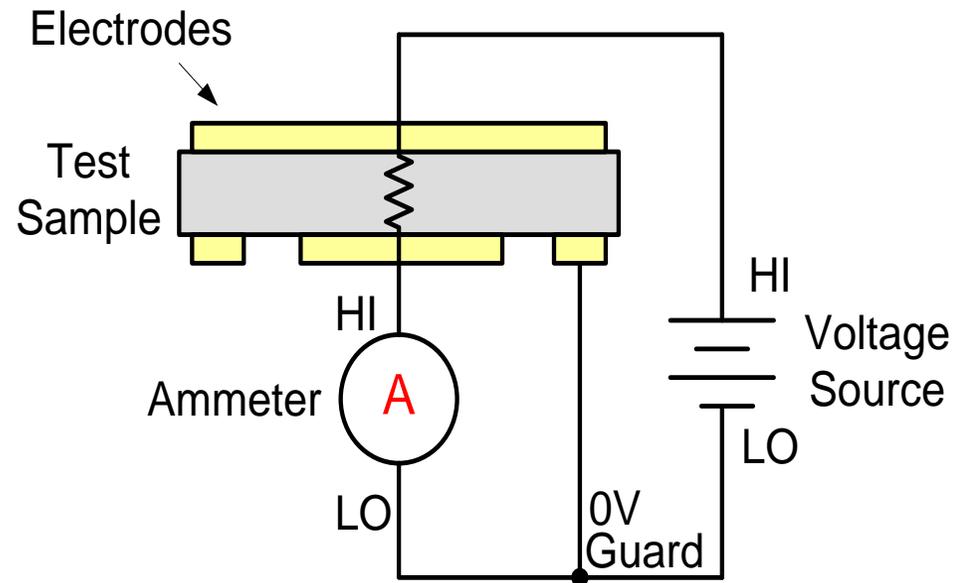
Measure Current Measure Voltage

4 GNDU

Operation Mode: Ground Unit



薄膜材料电阻率测试—绝缘电阻率测试

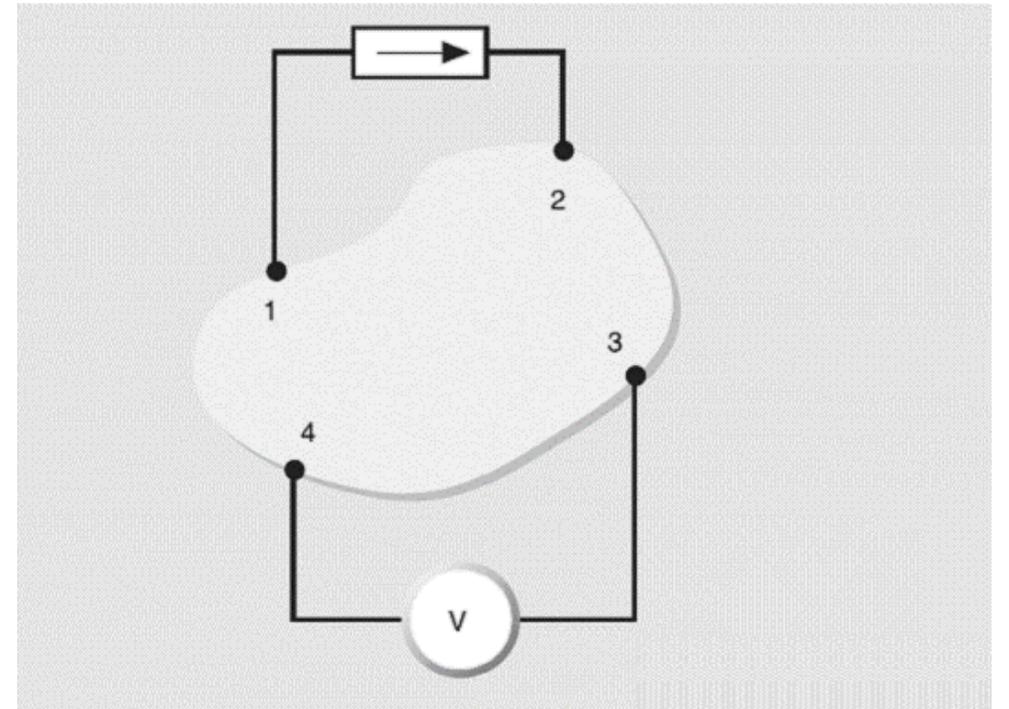


为什么进行绝缘电阻电阻率测量?

- 确保绝缘体提供足够的电气隔离
- 测量直流介电击穿特性
- 评估绝缘物的含水量

Van der Pauw电阻率测试

- 四探针技术要求样品为薄膜样品或块状，范德堡法为更通用的四探针测量技术，对样品形状没有要求，且不需要测量样品所有尺寸，但需满足以下四个条件
 - 1.样品必须具有均匀厚度的扁平形状。
 - 2.样品不能有任何隔离的孔。
 - 3.样品必须是均质和各向同性的。
 - 4.所有四个触点必须位于样品的边缘。



电阻率计算

- Van der Pauw法

$$R_{14,23} = V_{23} / I_{14} \quad R_{23,14} = V_{14} / I_{23}$$

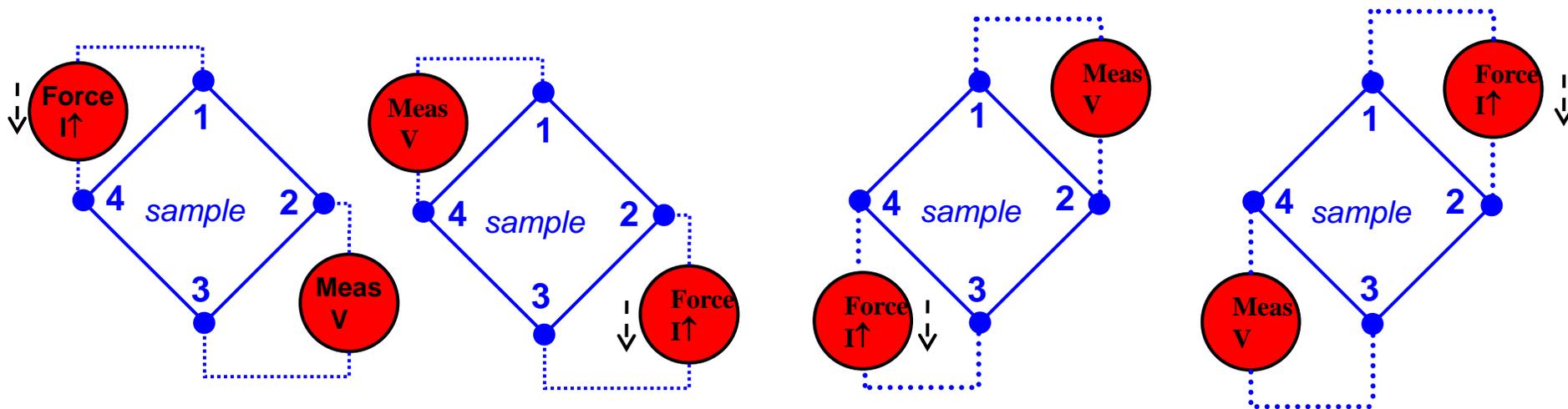
$$R_{41,32} = V_{32} / I_{41} \quad R_{32,41} = V_{41} / I_{32}$$

$$R_{43,12} = V_{12} / I_{43}$$

$$R_{34,21} = V_{21} / I_{34}$$

$$R_{12,43} = V_{43} / I_{12}$$

$$R_{21,43} = V_{34} / I_{21}$$



$$R_A = (R_{21,34} + R_{12,43} + R_{43,12} + R_{34,21}) / 4$$

$$R_B = (R_{32,41} + R_{23,14} + R_{14,23} + R_{41,32}) / 4$$

$$e^{(-\pi R_A / R_S)} + e^{(-\pi R_B / R_S)} = 1$$

$$\rho = R_S \cdot t$$

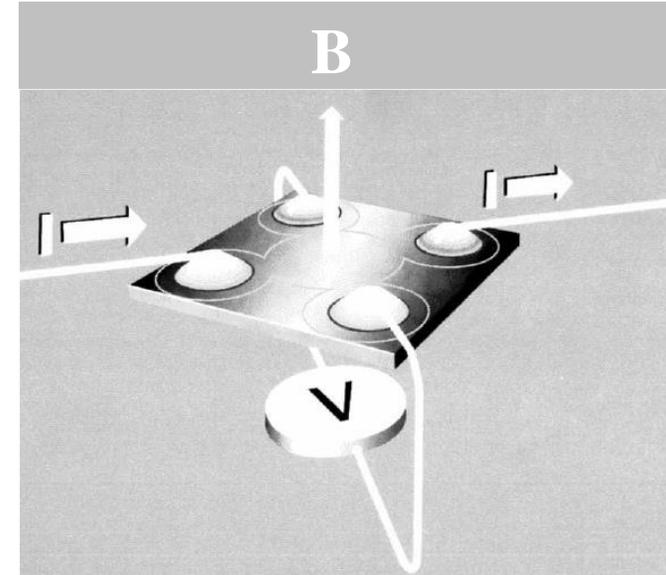
$$R_A = R_B = R$$

$$R_S = \frac{\pi}{\ln 2} R$$

霍尔效应测试

- 霍尔迁移率
- 首先测量霍尔电压 V_H
 - 施加磁场 B
 - 提供电流 I
 - 测量 V_H
 - t 是样本厚度
- 然后测量电阻率 ρ
 - 使用范德堡技术
- 然后计算霍尔迁移率 μ_H :

$$\mu_H = \frac{|V_H t|}{BI\rho}$$

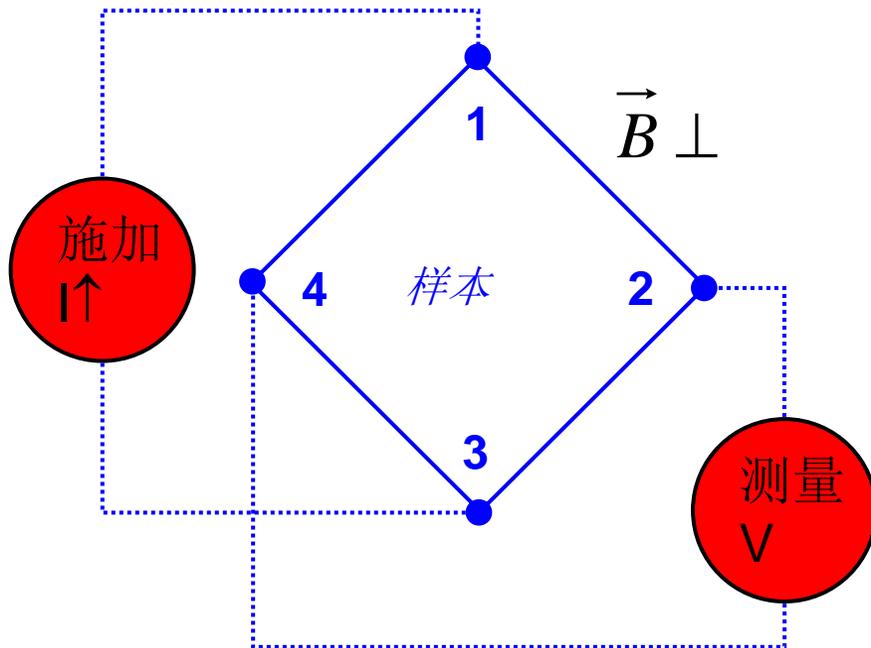


霍尔效应测试

- 霍尔迁移率

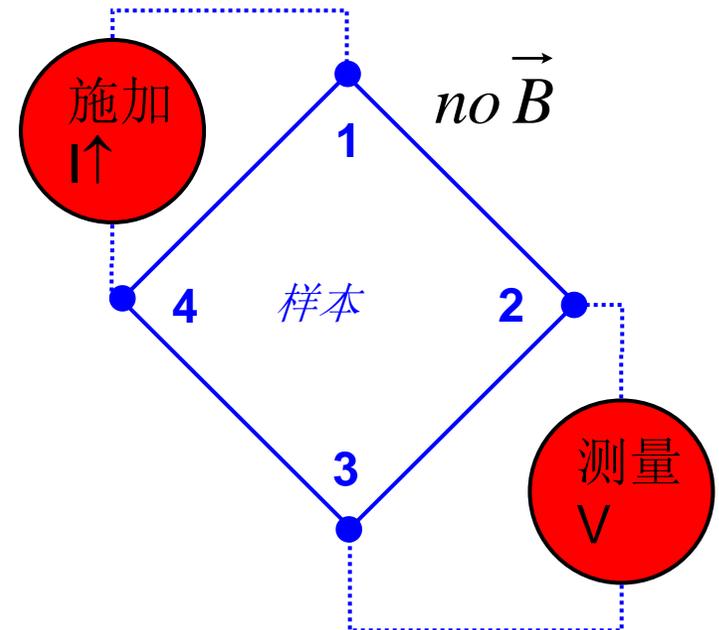
霍尔效应:

- 在**相反**节点上施加电流
- 在相反一端节点上测量电压
 - $V \sim \text{nV} - \text{V}$ (一般 $\mu\text{V} - \text{mV}$)



范德堡电阻率:

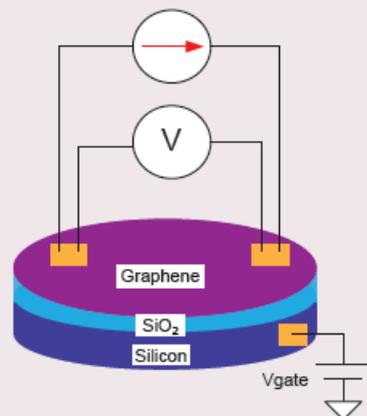
- 在**相邻**节点上施加电流
- 在相反的相邻节点上测量电压
 - 电压应该 $< 5\text{V}$, 一般 mV
- 给出 ρ , 从而可以计算 μ



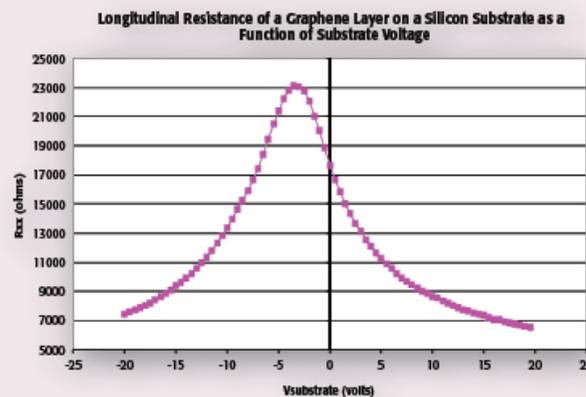
薄膜电性能测试挑战

- 加低流测弱压
 - 电流源和电压表精度要高
 - 开尔文接口
- 四探针或范德堡法测试电阻率
 - 需与探针台配合
 - 测试设备需方便连接
 - 需易用的软件
- 霍尔效应测试
 - 石墨烯材料制备成霍尔条 (Hall Bar)
 - 需要电流电压范围都很广的测试设备

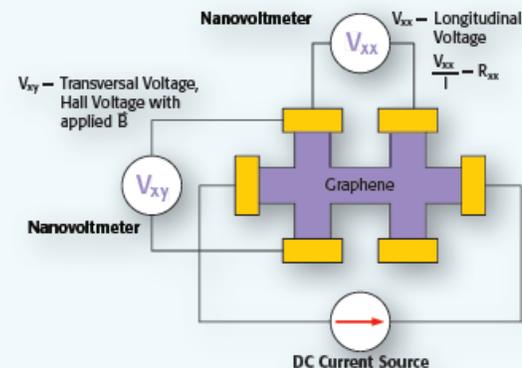
Technique for Measuring Resistance as a Function of Gate Voltage



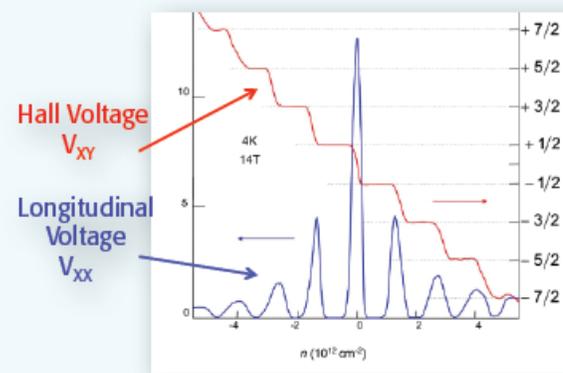
Resistance vs. Gate Voltage of Graphene Device



Measurement Technique for Hall Voltage and Resistivity Measurements

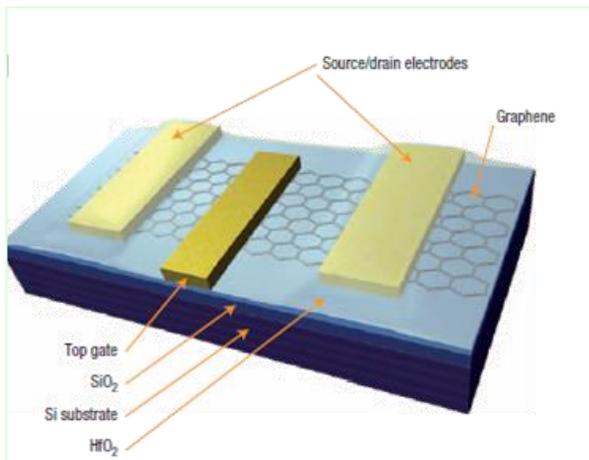


Quantum Hall Effect Measurements on Graphene

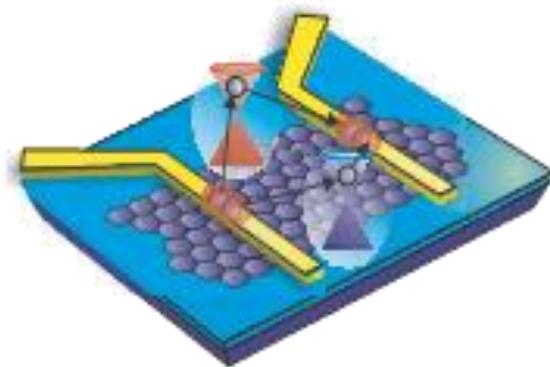


石墨烯电子器件

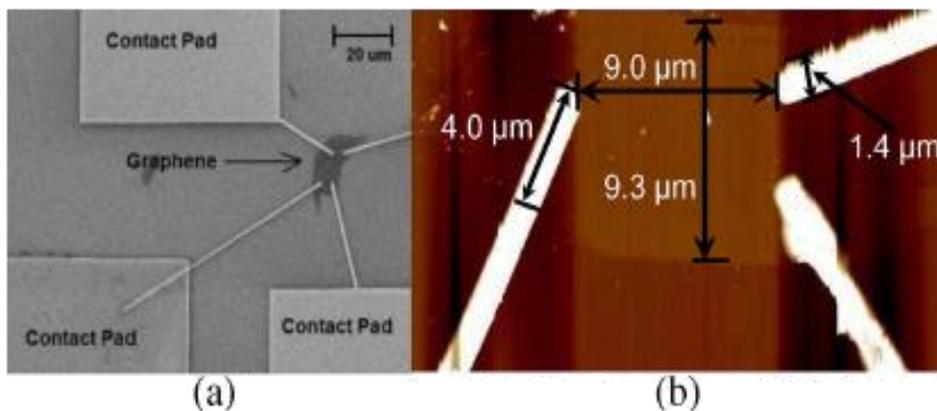
- 零带隙、顶栅石墨烯场效应管



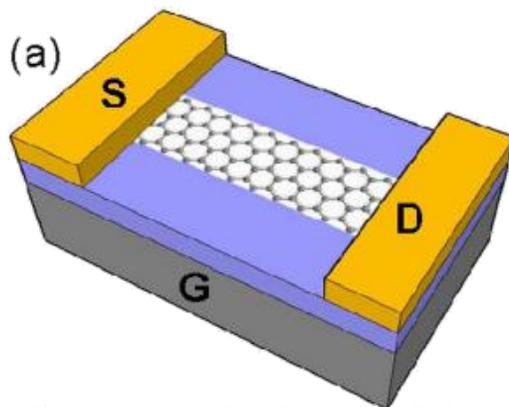
- 双极超导石墨烯晶体管



- 双层石墨烯晶体管



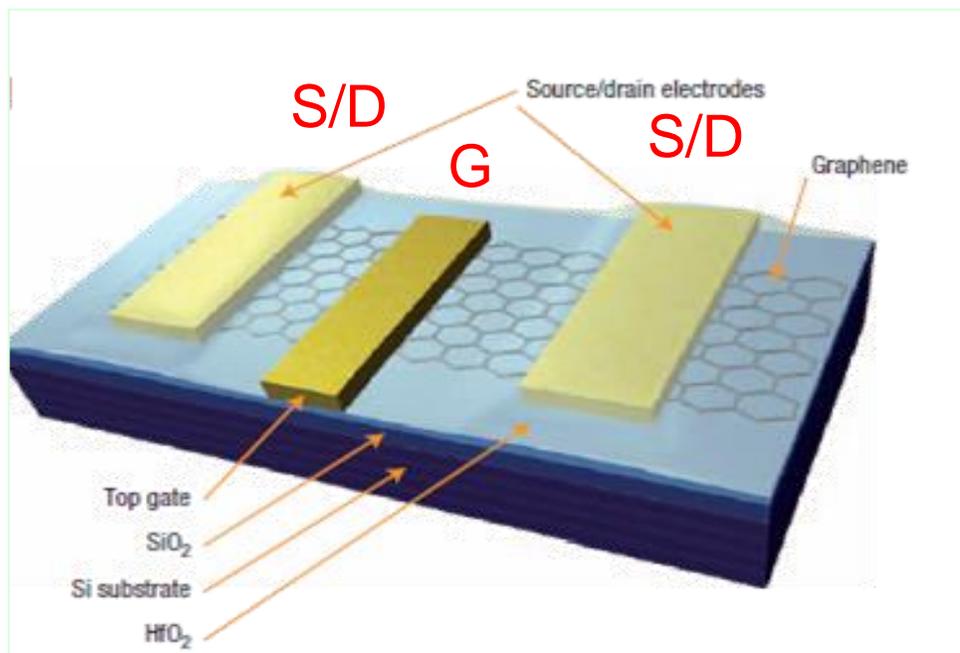
- 石墨烯纳米带场效应管



薄膜器件特点及应用:

1. 柔软, 可穿戴器件;
2. 制备工艺少;
3. 光/电特性更好;
4. 印刷制备, 方便快捷;

石墨烯电子器件测试—MOSFET为例



测试挑战:

- 1.多端口器件, 需要多通路同时测试;
- 2.测试项多, V_{th} , I_{dsat} , CV特性等;
- 3.电压电流范围广;
- 4.漏电流测试高, 要求设备精度高;

泰克云上大讲堂 & 高速接口发展与技术论坛



关注“泰克科技”服务号
查看产品资料&往期回放~



资料齐全，墙裂推荐！

泰克科技小程序

工程师身边的实用小助手

直播回放&讲义下载

往期主题回顾

PCIe链路问题分析和实际仿真

如何测试纳米材料及纳米电子器件的IV和CV性能?

深度解析IC/CV参数测试难题

零基础学仪器编程

轻松上手你的KEITHLEY源表

电源环路响应测试方案详解

深入浅出剖析高速信号的抖动和眼图

忆阻器的发展及测试方案

深度解析高速信号均衡技术

1/f噪声测试详解

半导体可靠性热载流子效应测试详解

车载以太网中MII接口的测试应用

车载传感器MIPI D-PHY信号分析

源表自动化测量编程详解

基于FET的生物传感器测试详解

PCIe测试面面观...

