



半导体材料与器件科学云讲堂

——二维材料/石墨烯及其电子器件IV和CV测试

主讲人：王瑞恒——半导体领域测试专家

2020/5/18

半导体材料与器件科学云讲堂

- ✓ 专业测试平台
- ✓ 六大类测试流程
- ✓ 剖析、解决半导体新问题



关注“泰克科技”公众号



每月2期专题直播，等您解锁！

直播日程

第一季 直播课程 (4~6月)

纳米材料及纳米电子器件IV和CV测试 4月29日

二维材料/石墨烯及其电子器件IV和CV测试 5月15日

量子材料及超导材料电输运物性表征测试 5月29日

超快脉冲在先进的NVM测试中的应用及神经网络测试前瞻 6月

番外篇一

测试技巧：半导体参数测试仪使用技巧及案例集锦 6月

第二季 直播课程 (7~9月)

宽禁带半导体(GaN/SiC)材料及器件测试 •

功率IGBT器件测试系统及自动化简介 •

微机电系统MEMS测试概述 •

MOSFET的准静态CV/超低频CV测试 •

半导体器件可靠性HCI/NBTI测试 •

番外篇二

测试技巧：快速上手自动化半导体参数测试系统 •



13: 30 - 14: 00	二维材料/石墨烯测试方法 <ul style="list-style-type: none">• 二维/石墨烯材料四探针测试• 二维/石墨烯材料霍尔效应测试 二维MOSFET器件电性能测试 <ul style="list-style-type: none">• 二维MOSFET器件IV测试方法• 二维MOSFET器件CV测试方法 二维材料/石墨烯及电子器件电性能测试挑战 <ul style="list-style-type: none">• 高性价比测试方案• 高性能测试方案
14: 00 - 14: 30	互动答疑
14: 30 - 14: 45	抢答有奖

抢答有奖思考题:

1.要消除线缆电阻对测试的影响，需要设备具备什么接口？

2. Delta模式的作用是什么？

3.哪个测试需要用到磁场？



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

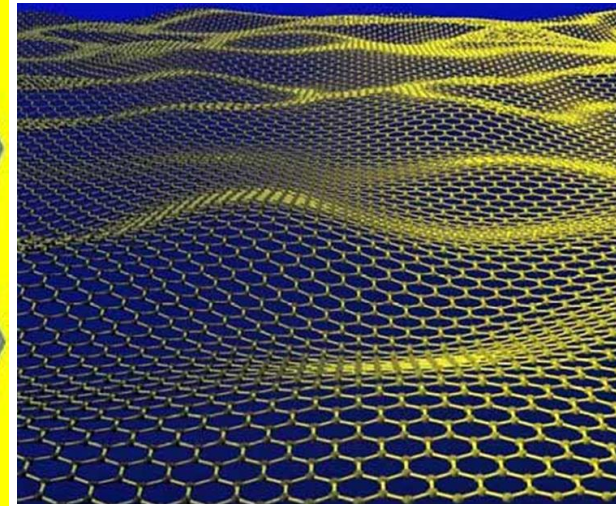
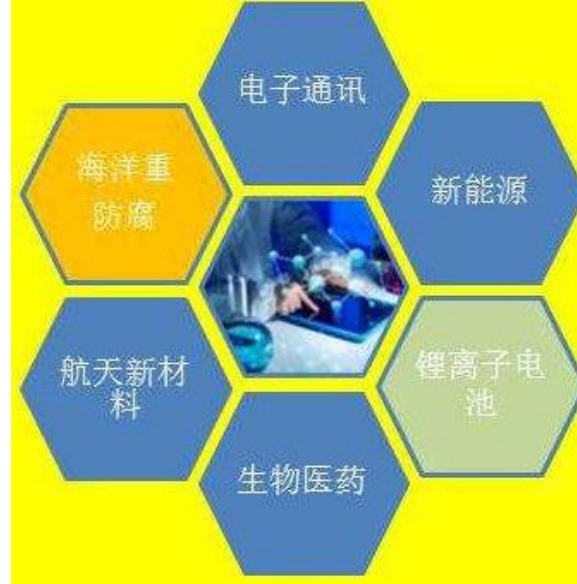
图 1-4 纳米材料的分类

(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

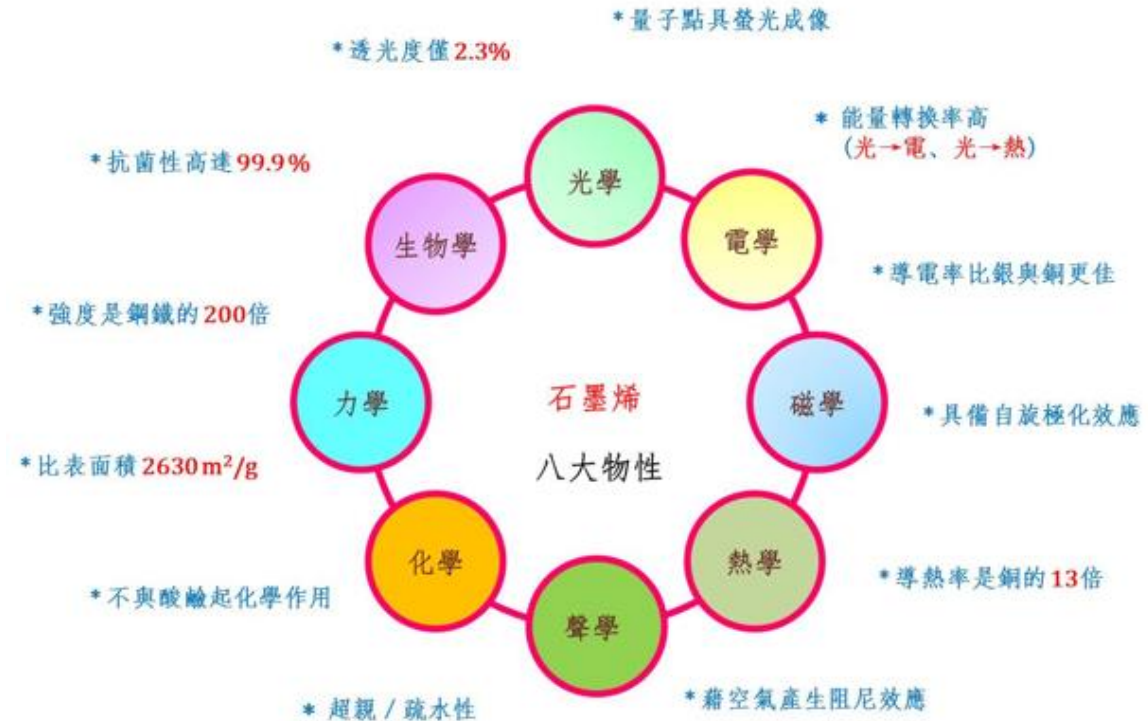
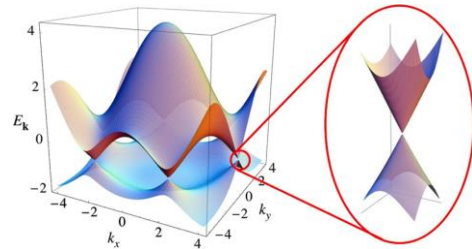
• 二维材料 (Two dimensional material)

- 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



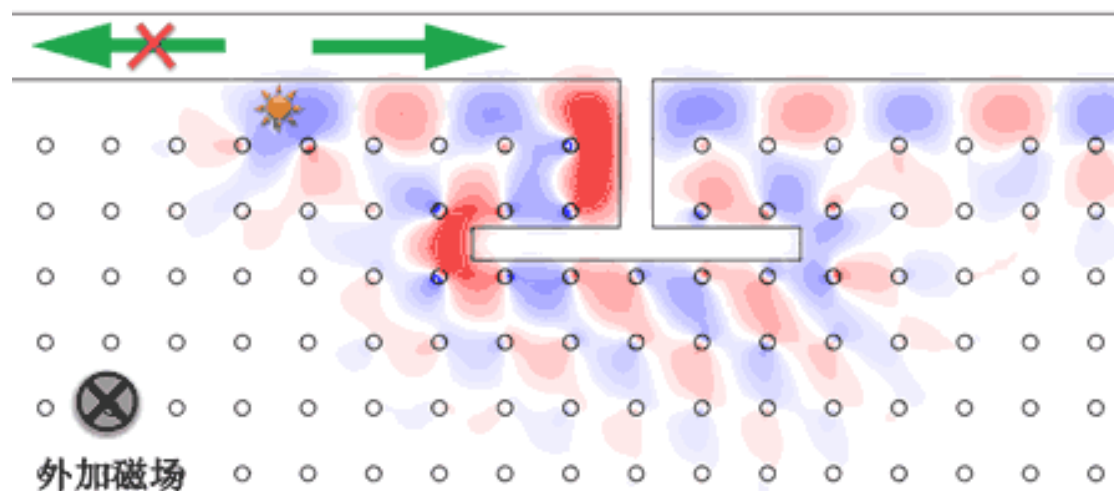
二维石墨烯材料电性能测试

- 测试项目

- 方块电阻, 表面电阻率
- 载流子浓度
- 载流子迁移率

- 测试方法

- 电阻率
 - 四探针法, 范德堡法
- 载流子浓度与载流子迁移率
 - 霍尔效应



$$I = \frac{V}{R} = \frac{V}{\frac{\rho L}{A}} = \frac{VA}{\rho L} = \frac{q n \mu V A}{L} \quad \mu_H = \frac{|V_H t|}{B I \rho}$$

I = Current (A)

V = Voltage (V)

R = Resistance of sample (Ω)

ρ = Resistivity of sample (Ω -cm)

L = Length of sample (cm)

A = Cross sectional area of sample (cm^2)

For a doped semiconductor:

$$\rho = \frac{1}{q n \mu}$$

q = Electron charge (C/cm^2)

n = Carrier concentration (cm^{-3})

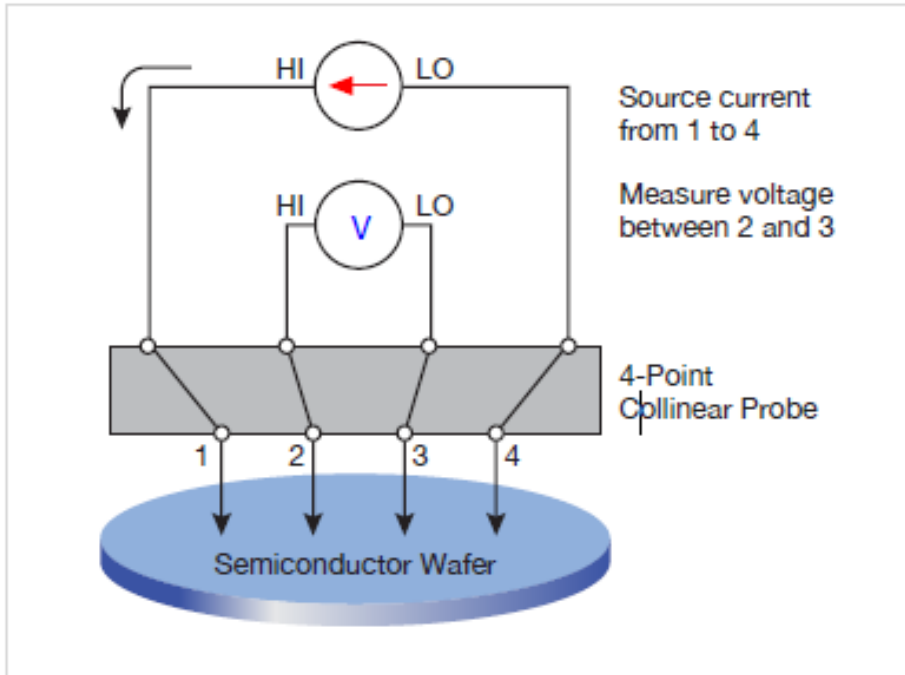
μ = Carrier mobility (cm^2/Vs)

二维/石墨烯材料电学性能测试

电阻率测试

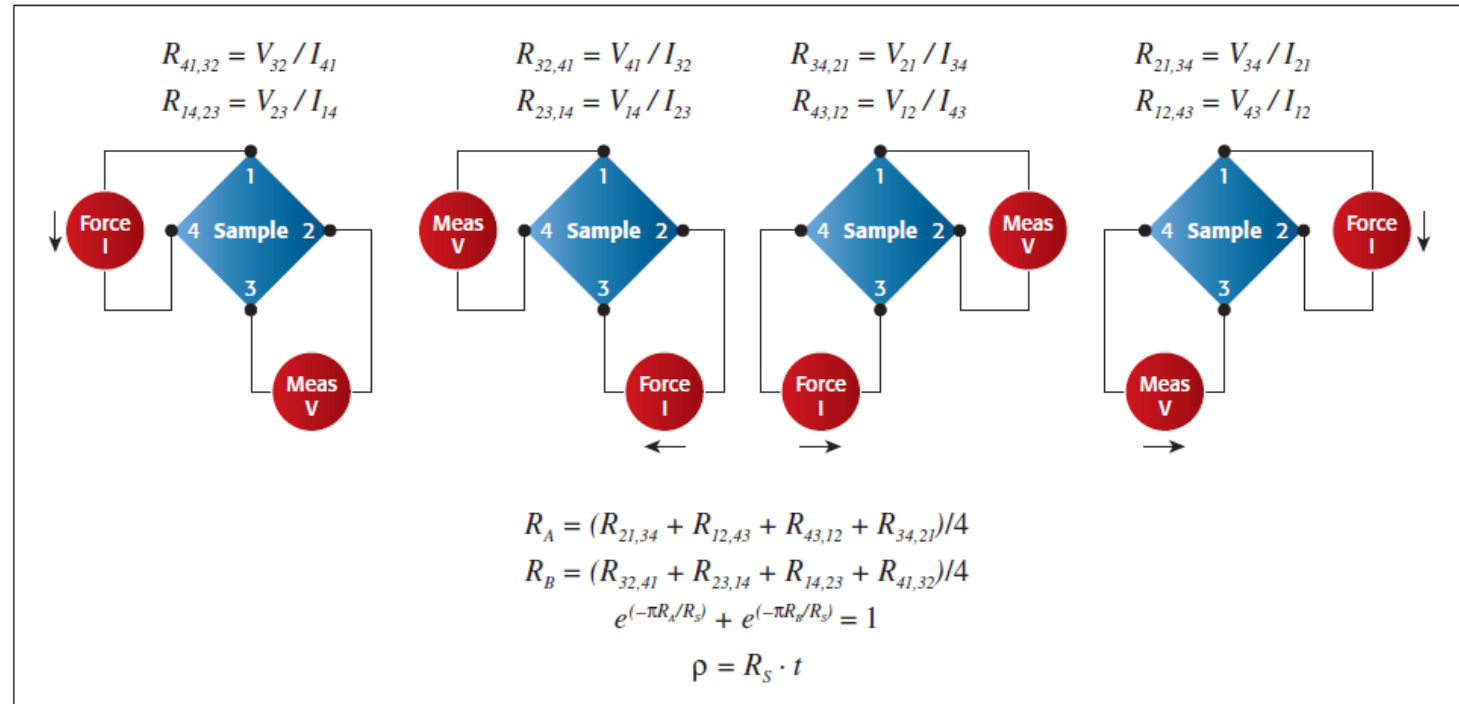
- 四探针法

- The Four-Point Collinear Probe Method



- 范德堡法

- The van der Pauw method



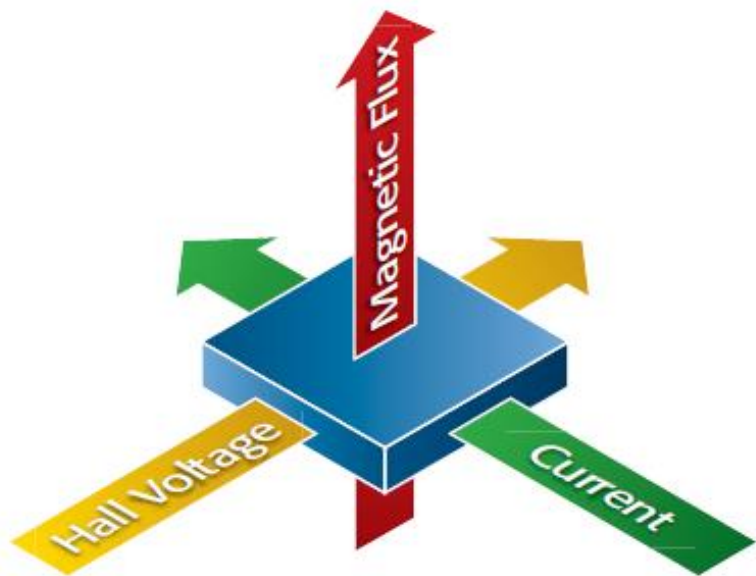
$$\rho = \frac{\pi}{\ln 2} \times \frac{V}{I} \times t \times k \quad \sigma = \frac{\pi}{\ln 2} \frac{V}{I} k = 4.532 \frac{V}{I} k$$

二维/石墨烯材料电学性能测试

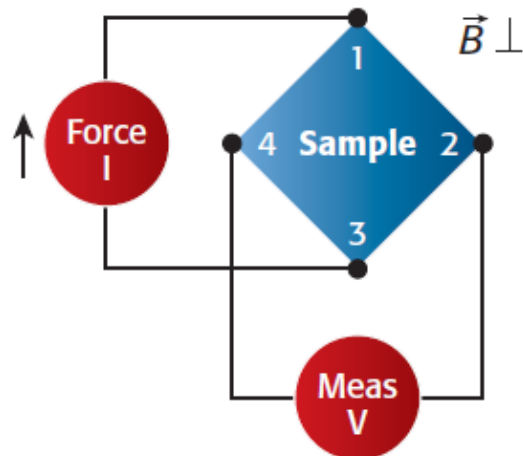
霍尔电压测试

- 霍尔效应

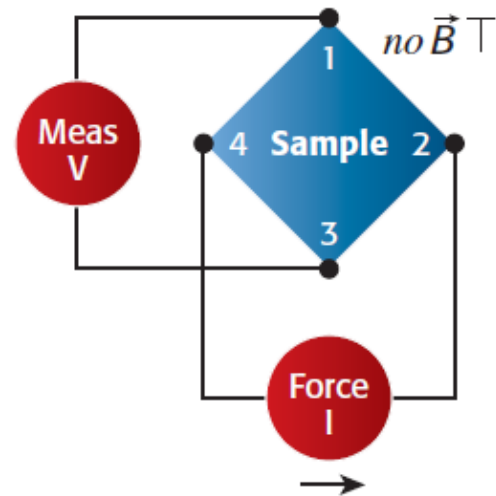
- 当电流垂直于外磁场通过半导体时，载流子发生偏转，垂直于电流和磁场的方向会产生一附加电场，从而在半导体两端产生电势差，这一现象就是霍尔效应，这个电势差也被称为霍尔电势差。



$$V_C = V_{24P} - V_{24N}$$
$$V_D = V_{42P} - V_{42N}$$



$$V_E = V_{13P} - V_{13N}$$
$$V_F = V_{31P} - V_{31N}$$

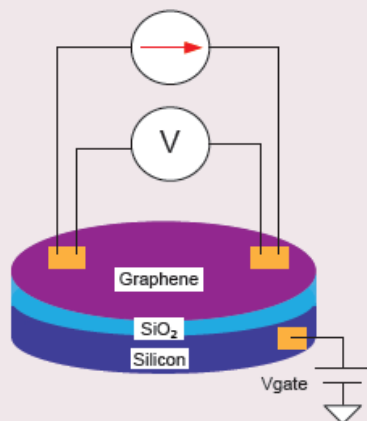


$$V_H = (V_C + V_D + V_E + V_F)/8$$

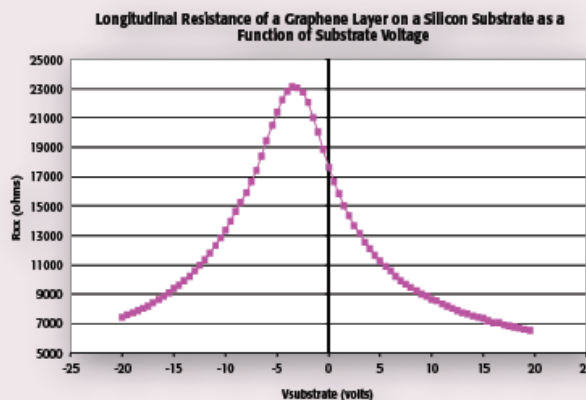
二维材料电学性能测试挑战

- 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大的测试设备

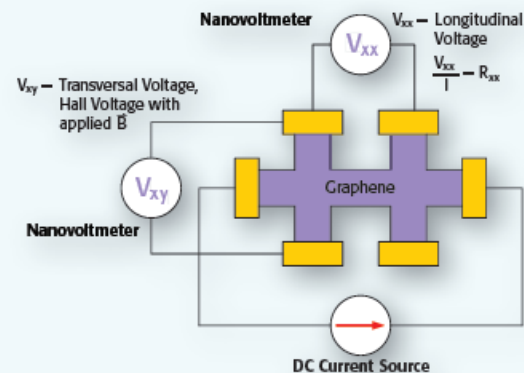
Technique for Measuring Resistance as a Function of Gate Voltage



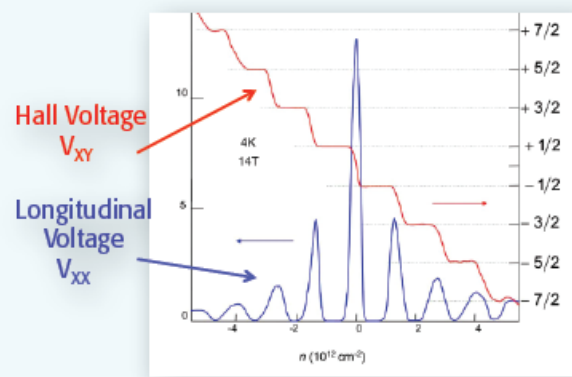
Resistance vs. Gate Voltage of Graphene Device



Measurement Technique for Hall Voltage and Resistivity Measurements



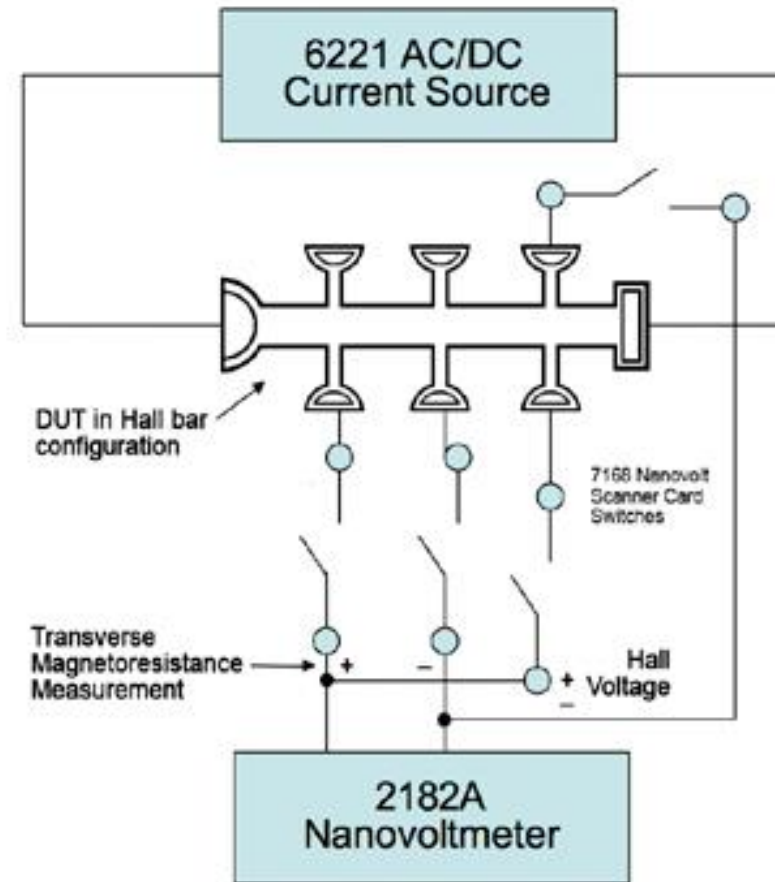
Quantum Hall Effect Measurements on Graphene



二维材料电学性能测试方案

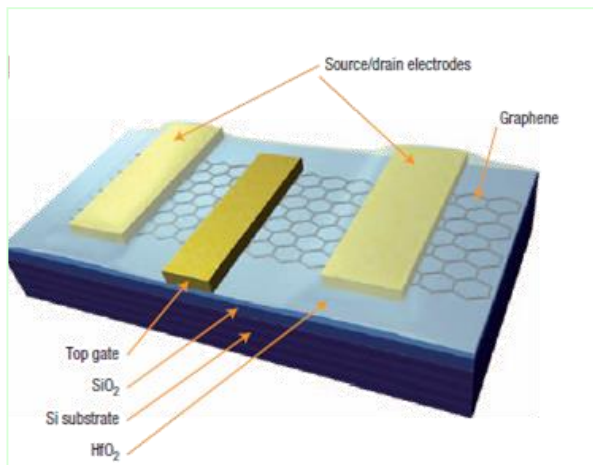
材料测试---电流源+纳伏表+开关卡方案

- 6221/2182A + 7168 开关卡
- 高精度电流源和纳伏表
- 纳伏开关卡不影响测试精度
- Delta 模式
- 成本相对低

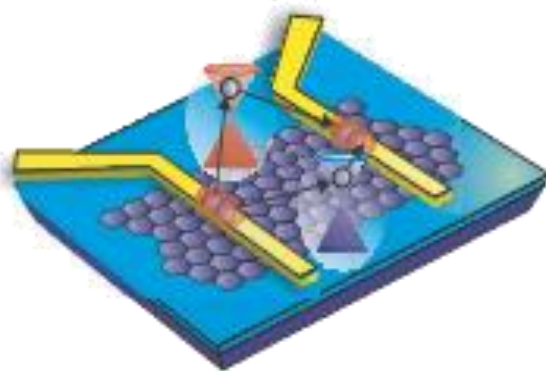


石墨烯电子器件

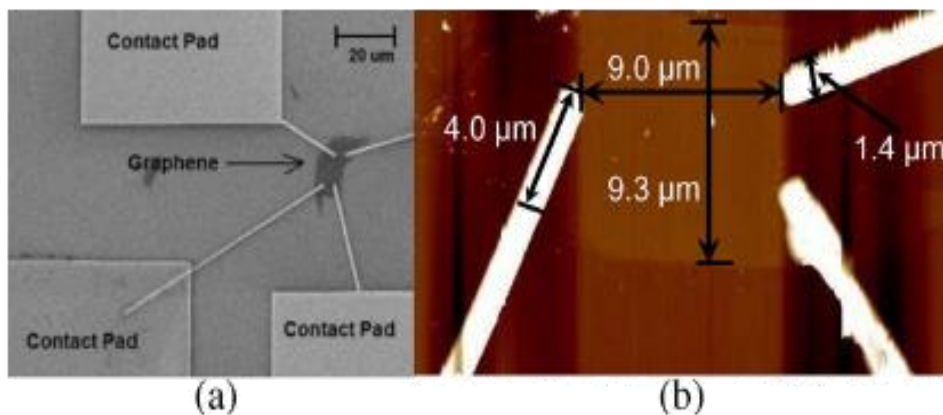
- 零带隙、顶栅石墨烯场效应管



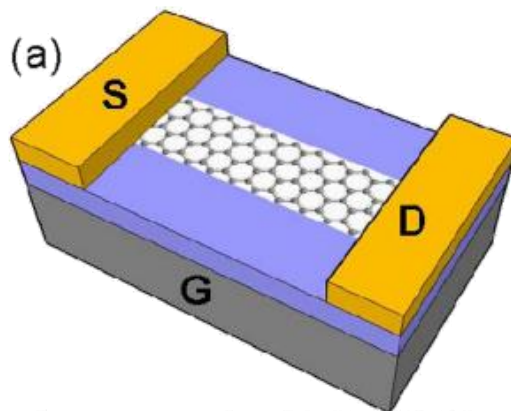
- 双极超导石墨烯晶体管



- 双层石墨烯晶体管



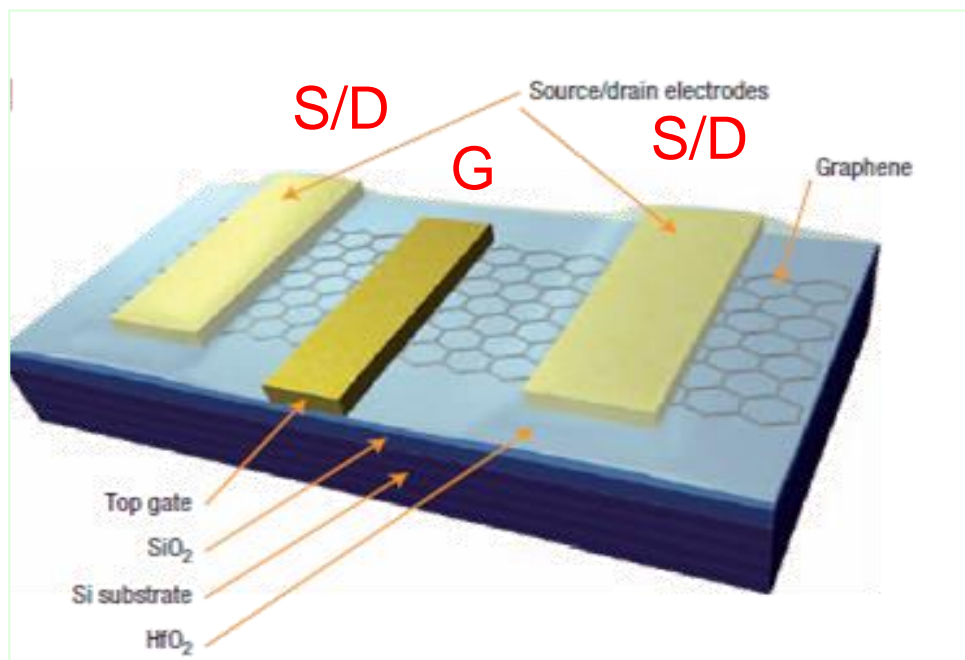
- 石墨烯纳米带场效应管



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;

石墨烯材料及石墨烯电子器件电学性能测试方案

4200 – SCS 方案

- 集成化的测试系统SMU/CVU/PMU任意组合；
- SMU模块四表合一，电压源/电流源，电压表/电流表；
- SMU均配有开尔文接口，消除线缆电阻的影响；
- 电流输出精度40fA；**电流测试精度10fA**；电压测试精度80 μ V；
- 带有pulse工作模式，可以消除自加热效应；
- CVU进行电容测试，1kHz-10MHz频率范围；
- PMU脉冲测试，pulse I-V, waveform capture, Arb seg
- 丰富的测试库可以直接调用；

