



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	<b>二维材料/石墨烯测试方法</b> <ul style="list-style-type: none"><li>• 二维/石墨烯材料四探针测试</li><li>• 二维/石墨烯材料霍尔效应测试</li></ul> <b>二维MOSFET器件电性能测试</b> <ul style="list-style-type: none"><li>• 二维MOSFET器件IV测试方法</li><li>• 二维MOSFET器件CV测试方法</li></ul> <b>二维材料/石墨烯及电子器件电性能测试挑战</b> <ul style="list-style-type: none"><li>• 高性价比测试方案</li><li>• 高性能测试方案</li></ul>
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

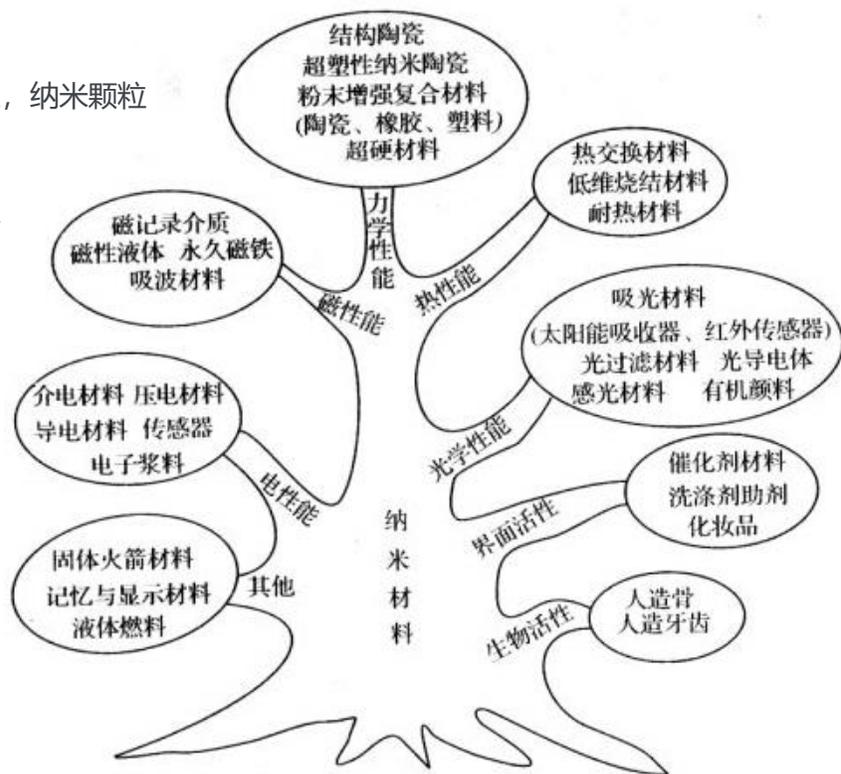
- 零维材料 – 量子点, 纳米粉末, 纳米颗粒
- 一维材料 – 纳米线或纳米管
- 二维材料 – 纳米薄膜, 石墨烯
- 三维测量 - 纳米固体材料

### ◦ 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



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				

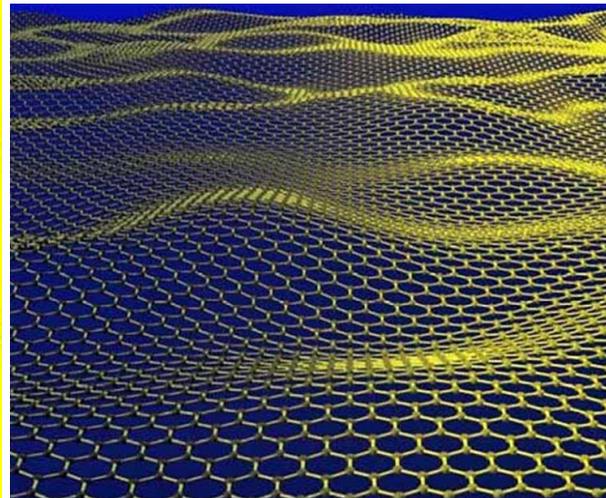
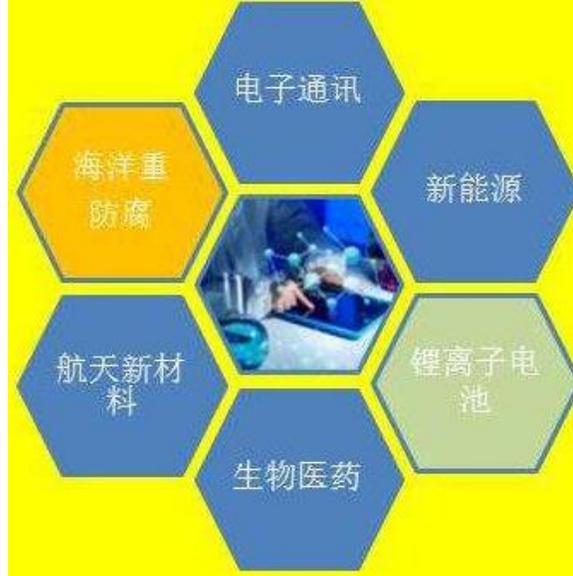
图 1-4 纳米材料的分类

(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

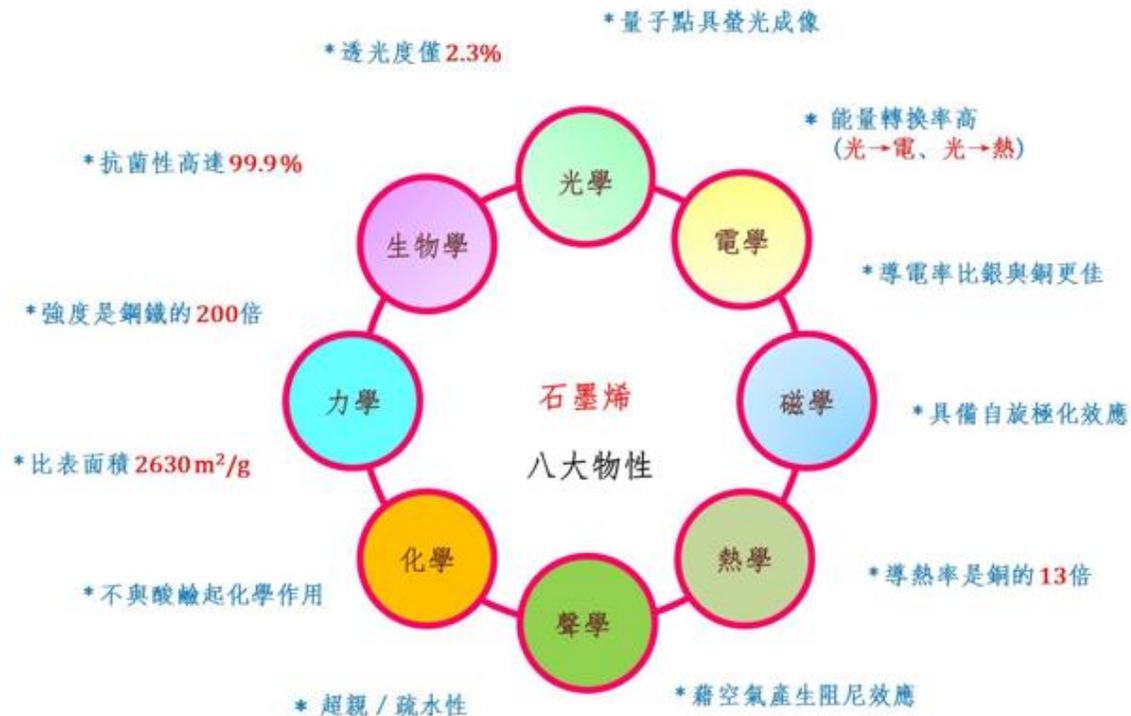
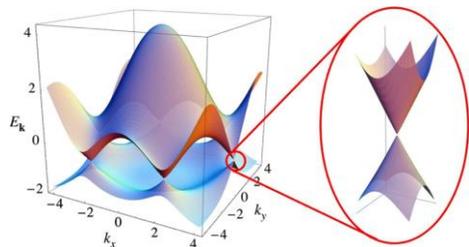
## • 二维材料 (Two dimensional material)

- 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sp<sup>2</sup>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



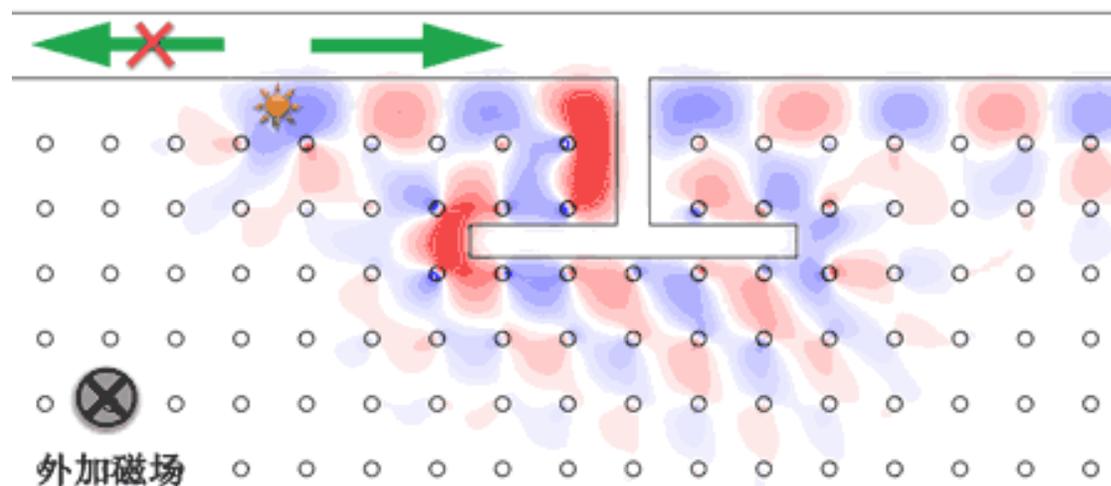
# 二维石墨烯材料电性能测试

- 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 ( $\Omega$ )

$\rho$  = Resistivity of sample ( $\Omega\text{-cm}$ )

L = Length of sample (cm)

A = Cross sectional area of sample ( $\text{cm}^2$ )

For a doped semiconductor:

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

q = Electron charge ( $\text{C}/\text{cm}^2$ )

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

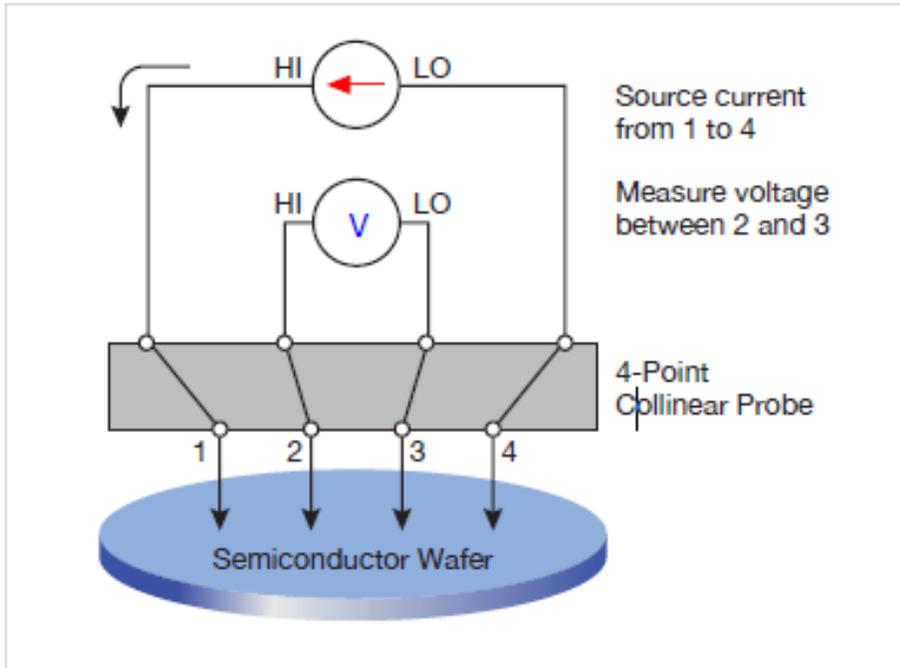
$\mu$  = Carrier mobility ( $\text{cm}^2/\text{Vs}$ )

# 二维/石墨烯材料电学性能测试

## 电阻率测试

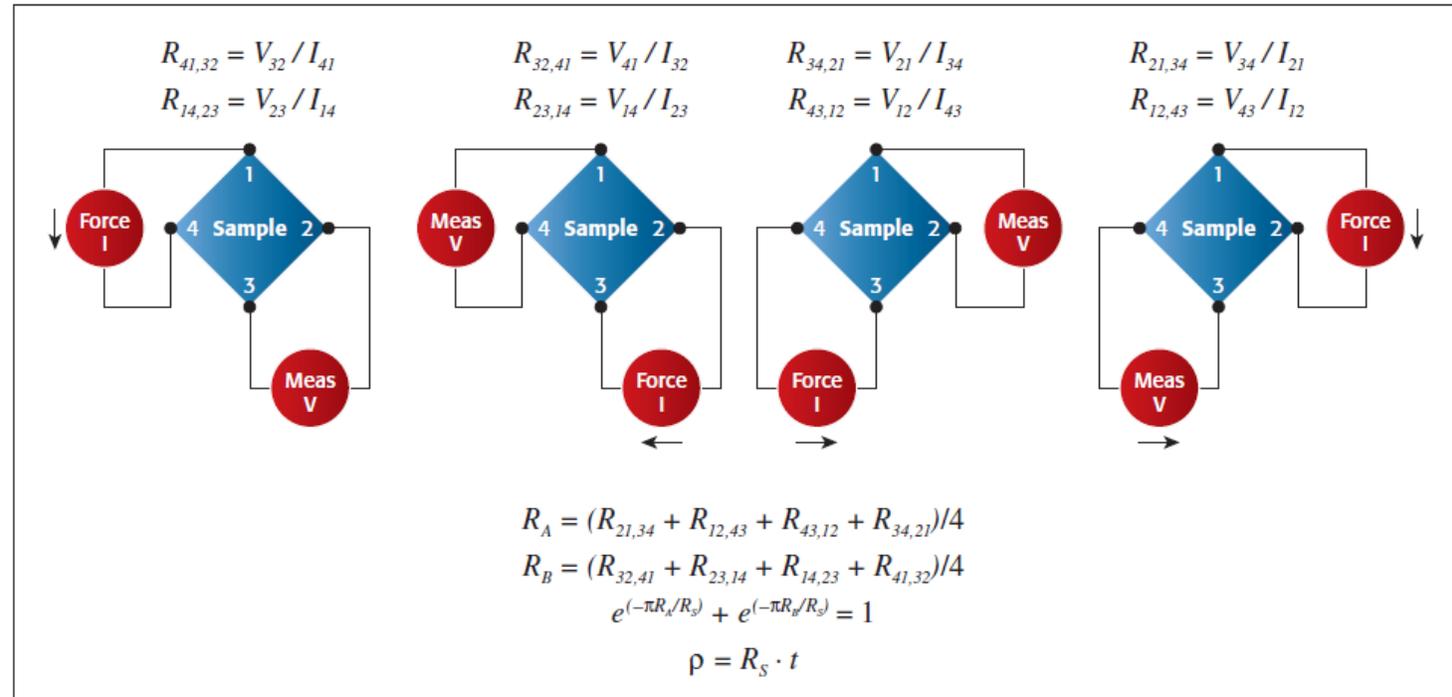
- 四探针法

- The Four-Point Collinear Probe Method



- 范德堡法

- The van der Pauw method



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

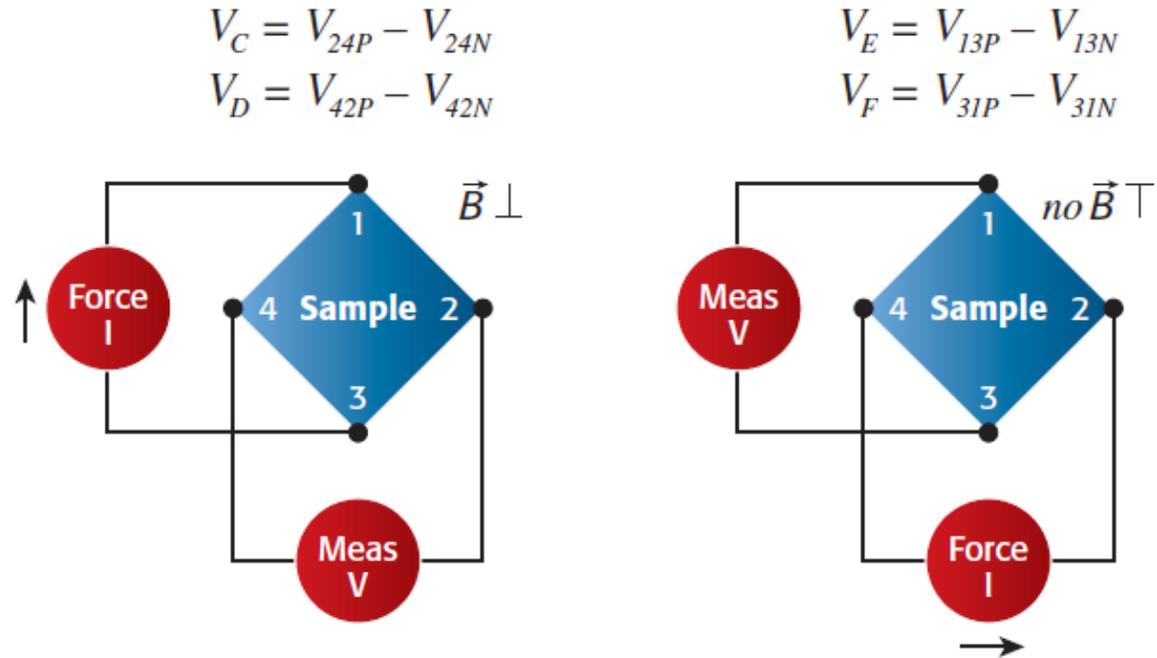
$$\sigma = \frac{\pi}{\ln 2} \frac{V}{I} k = 4.532 \frac{V}{I} k$$

# 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。

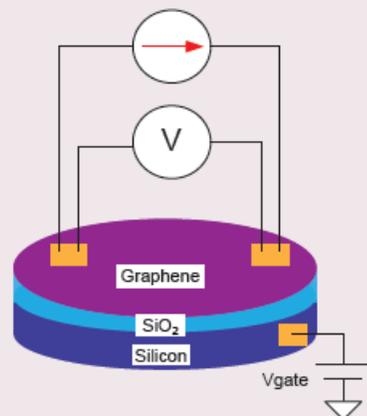


$$V_H = (V_C + V_D + V_E + V_F)/8$$

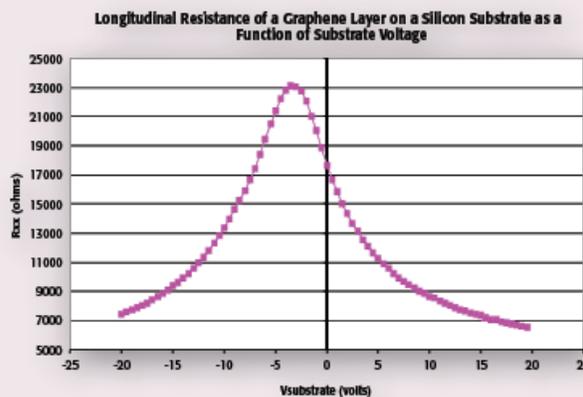
# 二维材料电学性能测试挑战

- 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

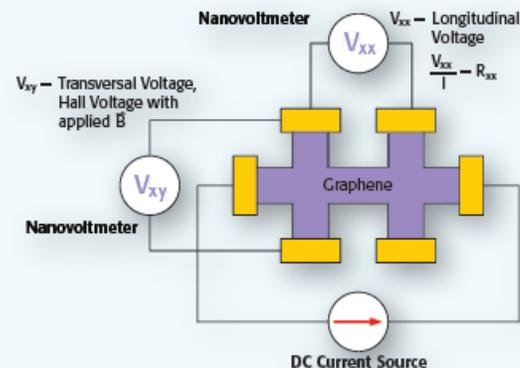
## Technique for Measuring Resistance as a Function of Gate Voltage



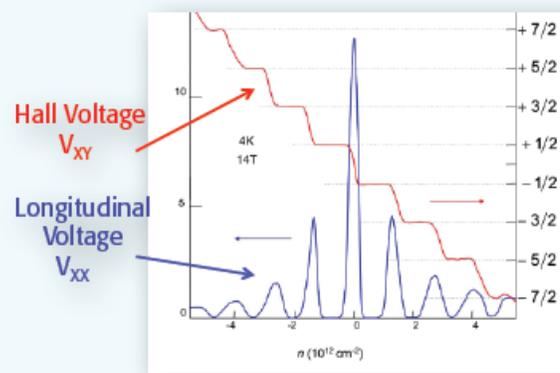
Resistance vs. Gate Voltage of Graphene Device



## Measurement Technique for Hall Voltage and Resistivity Measurements



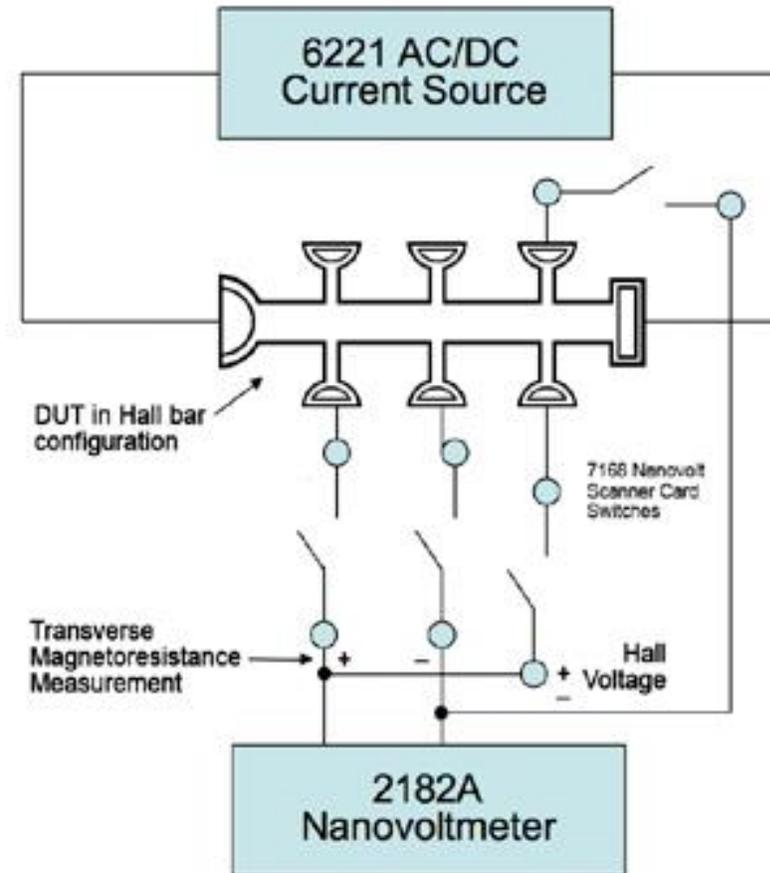
Quantum Hall Effect Measurements on Graphene



# 二维材料电学性能测试方案

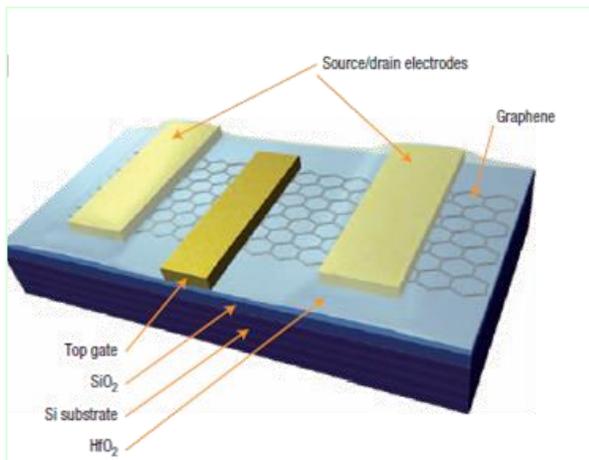
## 材料测试---电流源+纳伏表+开关卡方案

- 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

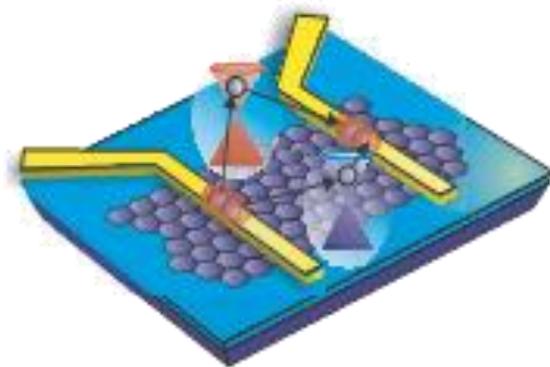


# 石墨烯电子器件

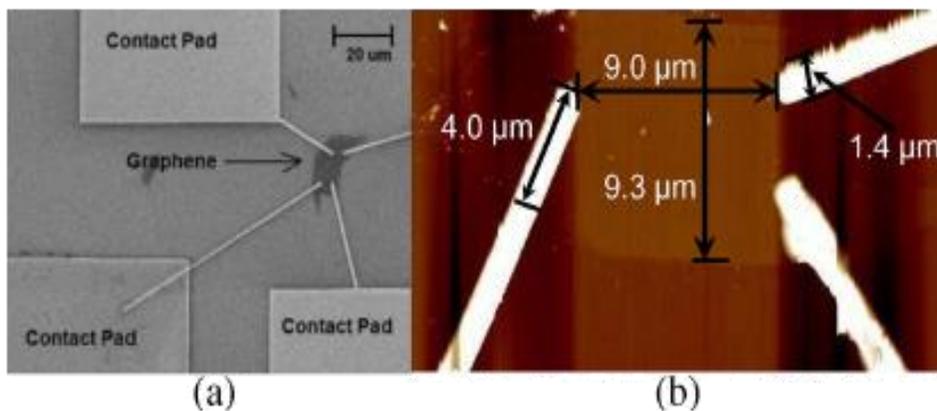
- 零带隙、顶栅石墨烯场效应管



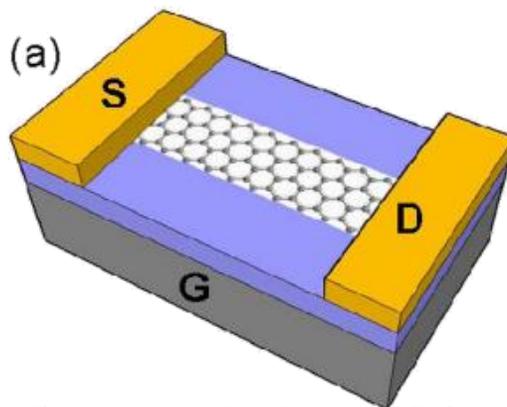
- 双极超导石墨烯晶体管



- 双层石墨烯晶体管



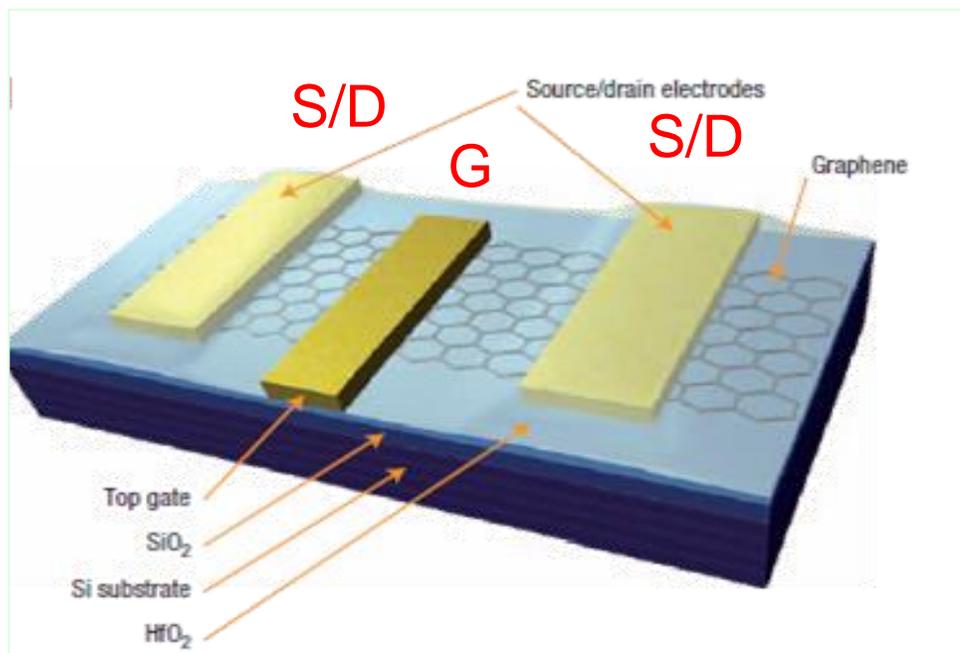
- 石墨烯纳米带场效应管



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 $\mu$ 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;

