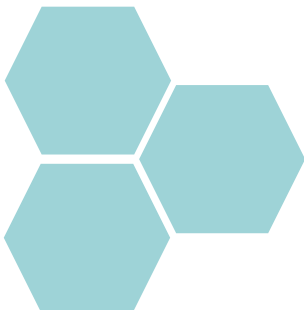


# 纳米材料制备与表征

湖南大学 物理与微电子科学学院

殷隆晶

2019年9月12日



# 摘要

- 任课教师简介
- 课程介绍（教学目的、方法、内容、考核）
- 概述纳米材料（定义、特性、应用）



# 任课教师简介

**殷隆晶 副教授** 湖南大学 物理与微电子科学学院 应用物理系  
电子邮件: [yinlj@hnu.edu.cn](mailto:yinlj@hnu.edu.cn)  
电 话: 18813111989  
办 公 室: 物电院 A303

**研究方向:** 凝聚态物理实验 表面物理 二维材料

- 不同堆垛石墨烯体系的结构与电学性质;
- 二维以及二维异质结构的制备与性能;
- 扫描探针显微镜 (SPM)。

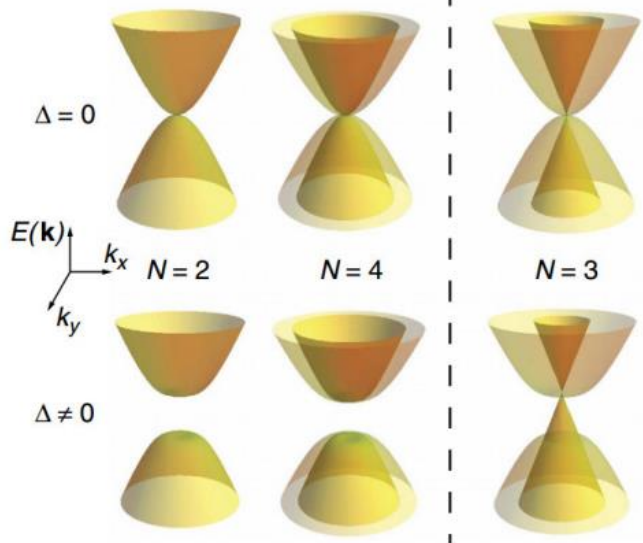
## 个人经历:

2017/07 - , 湖南大学, 物理与微电子科学学院, 副教授  
2011/09 - 2017/06, 北京师范大学, 物理学系, 博士



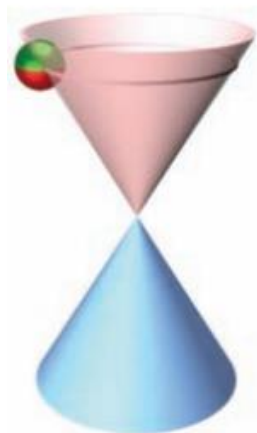
Even

Odd

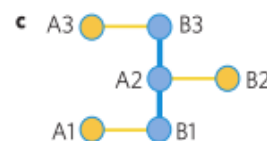
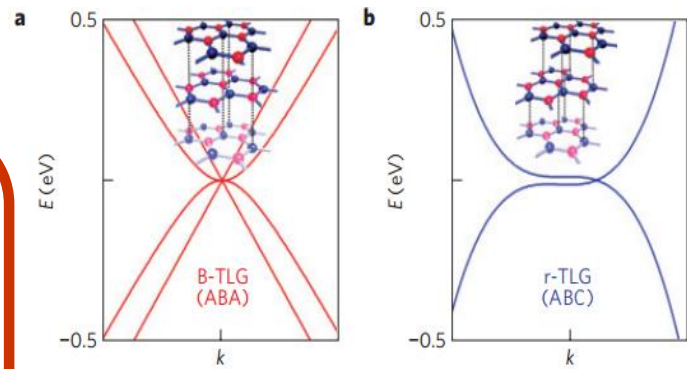
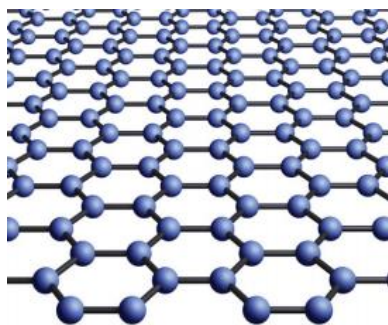


# 石墨烯

massless Dirac fermions



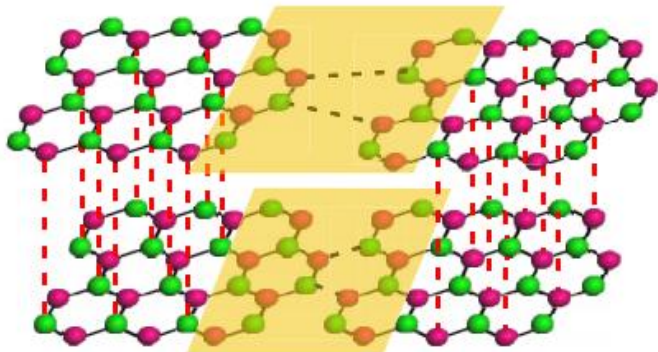
$$\hat{H} = v_F \vec{\sigma} \cdot \hat{p}$$



堆垛层数

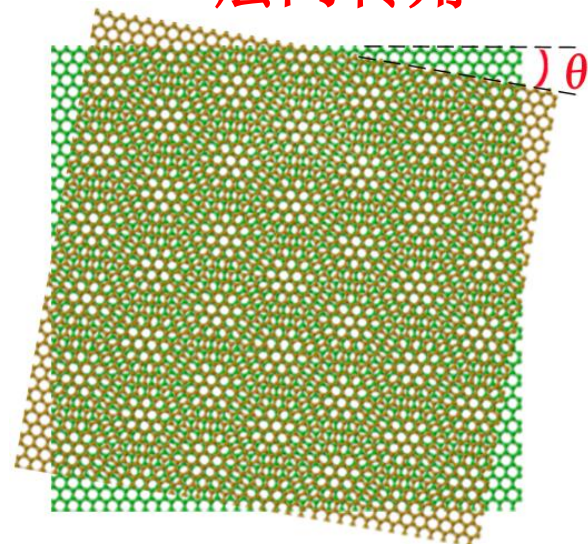
堆垛畴壁

AB Domain wall BA

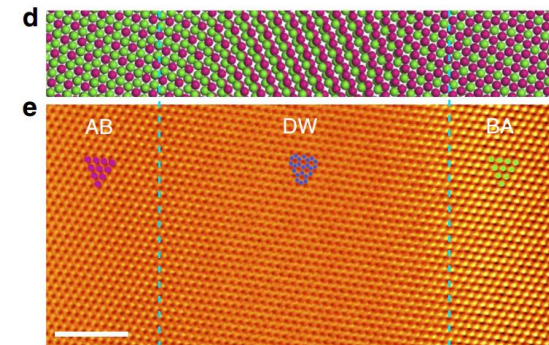
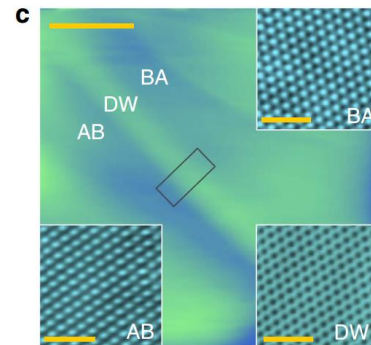
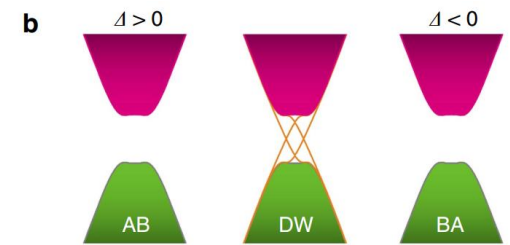
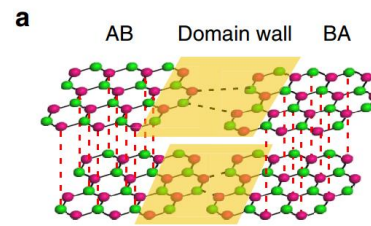
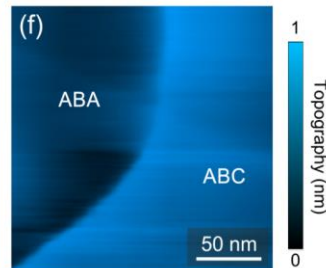
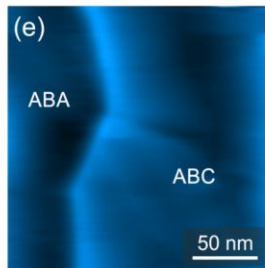
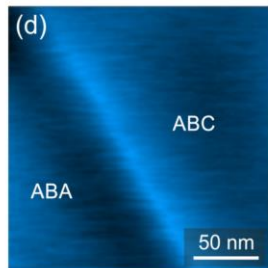
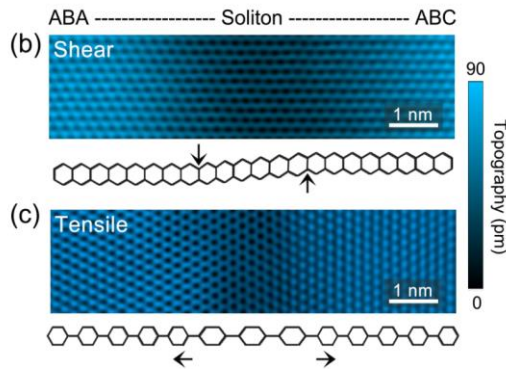
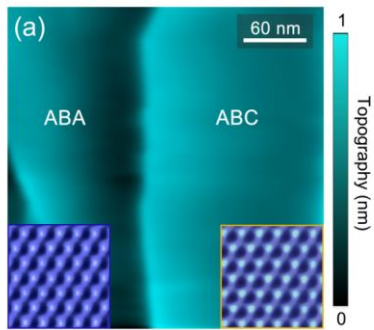
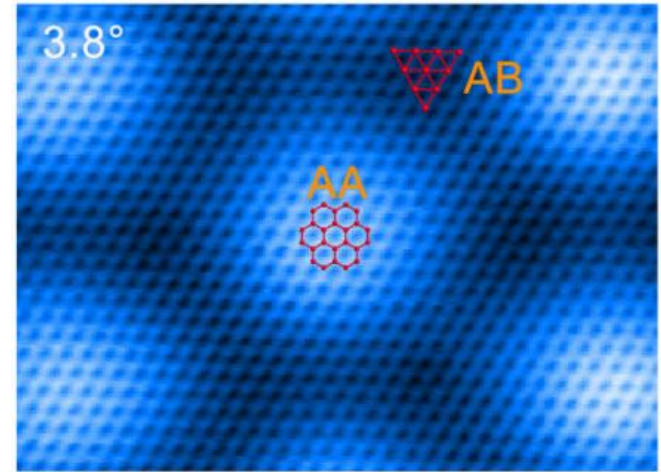
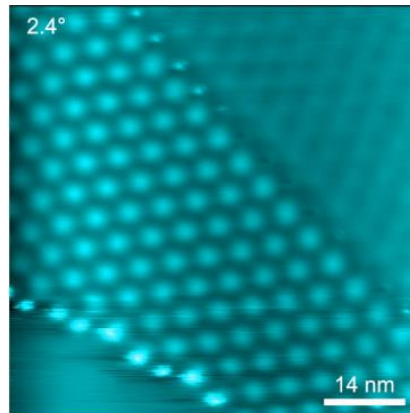
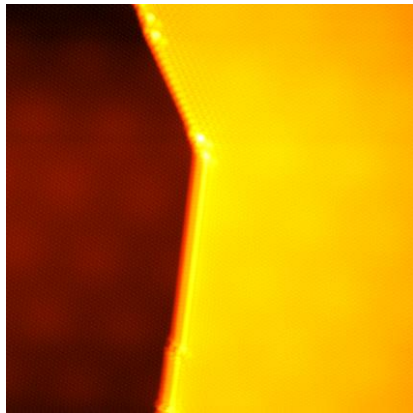


堆垛方式

层间转角



# 个人研究简介



# 纳米材料制备与表征 课程介绍

## 教学目的

- 知识的铺垫与视野的扩展
  - 纳米材料制备中的基本原理与主要方法
  - 纳米材料研究前沿
- 启发科研工作
  - 激发兴趣与灵感

## 教学性质与方法

- 概论性质的选修课（概念性强，专题变换快）
- 自主学习与思考
- 系统归纳



# 纳米材料制备与表征 课程介绍

## 主要涵盖的内容

- 具体讨论纳米材料制备所涉及到的基本原理；
- 具体介绍针对不同类型纳米材料的较成熟的主要制备方法；
- 简要介绍尺寸效应对物理性能的影响；
- 简要介绍纳米材料与结构的一些应用；
- 简要介绍纳米材料与结构的表征。

**基本原理； 主要方法**



# 具体内容

- 纳米材料概念、特性
- 固体表面物理化学（与表面能相关的基础知识；纳米材料与结构的稳定性）
- 零维纳米材料（纳米颗粒）：气相法、液相法、固相法 \*
- 一维纳米材料（管、线、带） \*
- 二维纳米材料（薄膜） \*
- 三维纳米材料（由纳米颗粒为主体形成的块体材料）
- 纳米材料与结构的表征



# 预定课程安排

序号	时间	授课内容	备注
1	Sept 12, 8:00am	课程介绍, 纳米材料概述	
2	Sept 19, 8:00am	固体表面的物理化学	
3	Sept 26, 8:00am	纳米薄膜的制备 (原理, 设备)	
4	Oct 3, 8:00am		国庆假期
5	Oct 10, 8:00am	纳米薄膜的制备 (蒸发镀膜)	
6	Oct 17, 8:00am	纳米薄膜的制备 (溅射镀膜)	
7	Oct 24, 8:00am	纳米薄膜的制备 (CVD)	
8	Oct 31, 8:00am	纳米颗粒的制备 (气相法)	
9	Nov 7, 8:00am	纳米颗粒的制备 (液相法)	
10	Nov 14, 8:00am	纳米颗粒的制备 (液相法)	
11	Nov 21, 8:00am	纳米颗粒的制备 (液相法)	
12	Nov 28, 8:00am	纳米颗粒的制备 (固相法)	
13	Dec 5, 8:00am	一维纳米材料的制备 (原理, 自发生长)	
14	Dec 12, 8:00am	一维纳米材料的制备 (模板法与自组装法)	
15	Dec 19, 8:00am	刻蚀法制备纳米结构 (自上而下)	
16	Dec 26, 8:00am	纳米材料与结构的表征	

# 主要参考资料

- 《纳米结构和纳米材料：合成、性能及应用》

曹国忠、王颖，高等教育出版社，2012年

- 《纳米材料制备技术》

王世敏编著，化学工业出版社，2002年

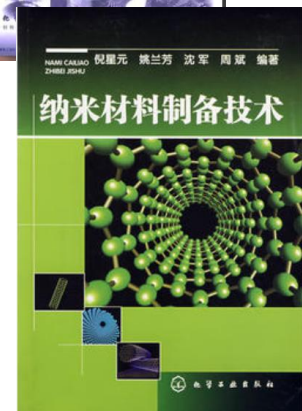
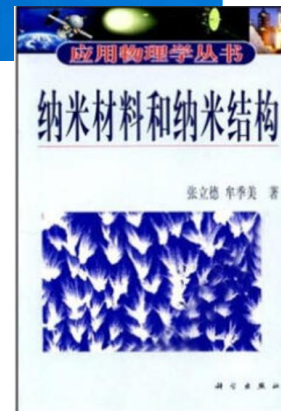
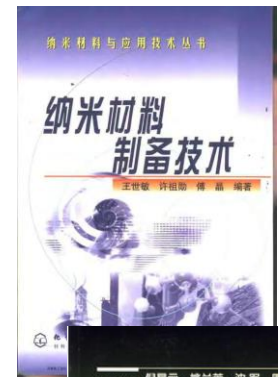
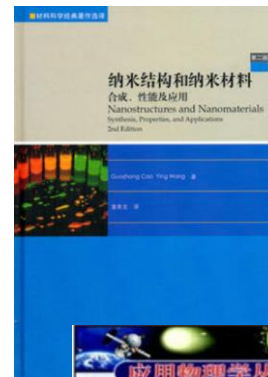
- 《纳米材料和纳米结构》

张立德、牟季美著，科学出版社，2000年

- 《纳米材料制备技术》

倪星元著，化学工业出版社，2008年

检索关键词：合成、纳米、纳米材料；  
**synthesis, nano,  
nanomaterials,  
nanocomposites,  
nano-structured materials**



# 考核形式： 考勤+书面报告

## 平时考勤 + 期中考查 + 期末考查

- (1) 平时考勤 (40%)**： 课堂考勤(30%)+课堂表现(10%)  
签到，每次占5%，到课即得分；  
课堂提问、投入度。
- (2) 期中考查 (20%)**： 文献研读翻译（第8-10周交）  
翻译（部分）任意一篇关于二维材料的英文文献；  
摘要+引言+结论。
- (3) 期末考查 (40%)**： 根据课程内容，提交课程报告  
任意关于纳米材料性能与制备的报告；  
3千字以上，最后一次课上交。

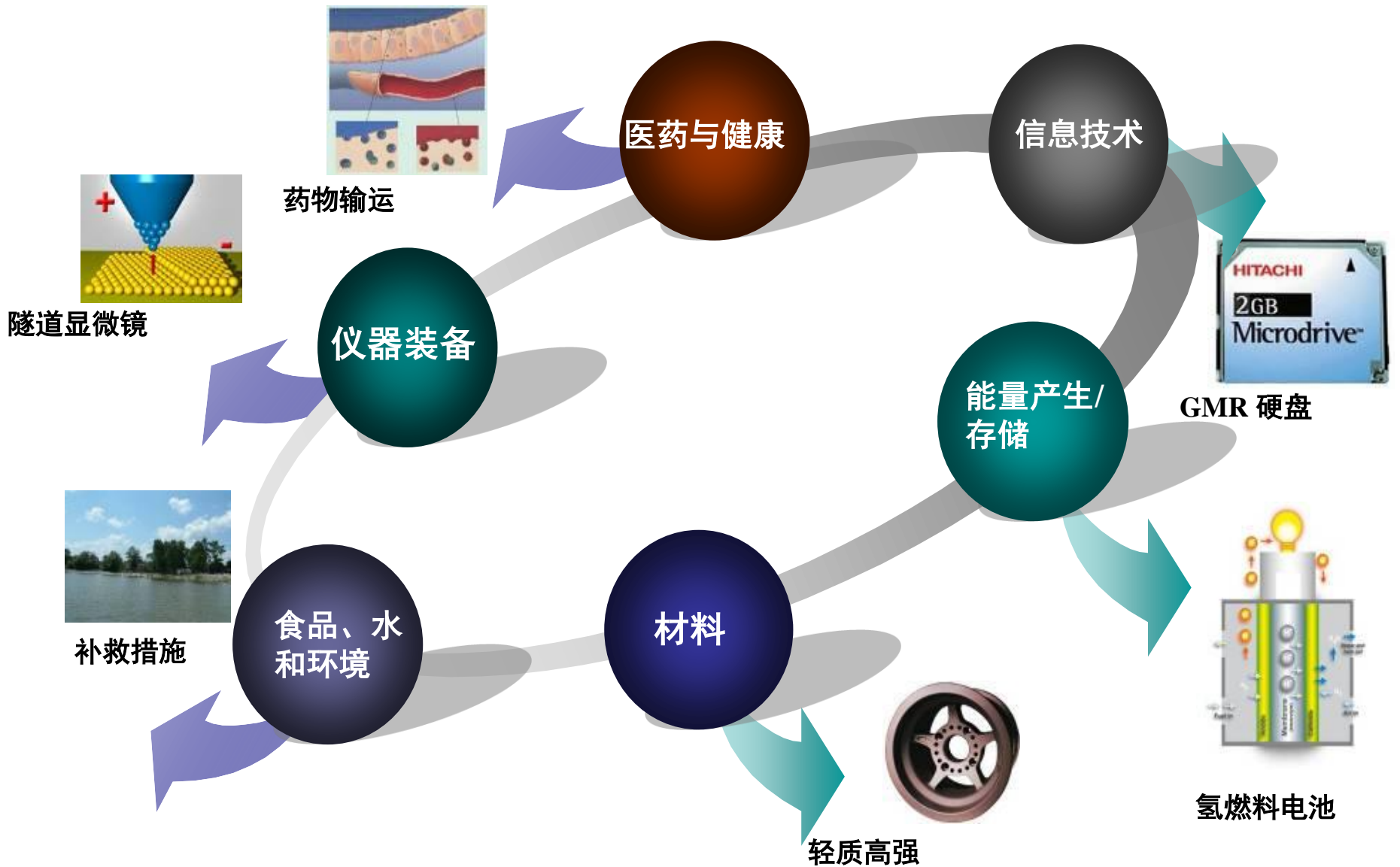


# 第一讲：纳米材料概述

1. “纳米材料”的概念（定义、分类）
2. 纳米技术的发展（自学）
3. 基本效应
4. 物理化学性质及应用

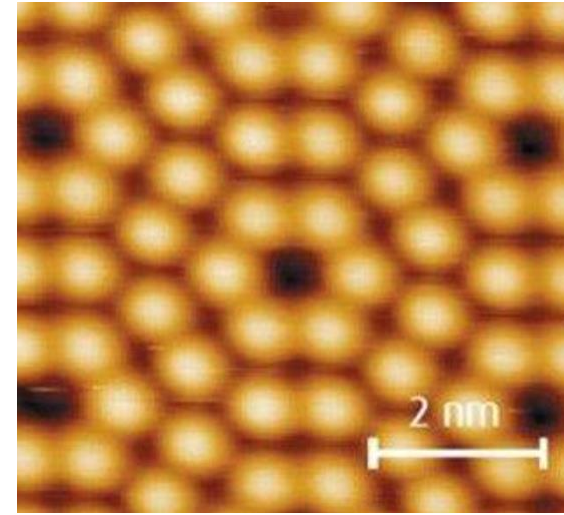


# 纳米技术——无所不在



# 1. 纳米材料的概念

- 什么是纳米 (nanometer)?
  - In Greek, “nano” means dwarf
  - 纳米(nm)是一个长度计量单位,  
 $1\text{nm} = 10^{-9}\text{m}$
  - Si原子的尺寸 $\sim 0.1\text{nm}$ 。
- 纳米尺度通常指  $1\sim 100\text{nm}$  的尺度范围
- 纳米技术通常指在纳米尺度上对物质进行研究处理的技术。



## 纳米材料的定义:

三维空间尺寸中至少有一维处于纳米尺度(1-100nm)范围内、或由此作为基本单元的材料。

# 单壁碳纳米管（纳米材料）

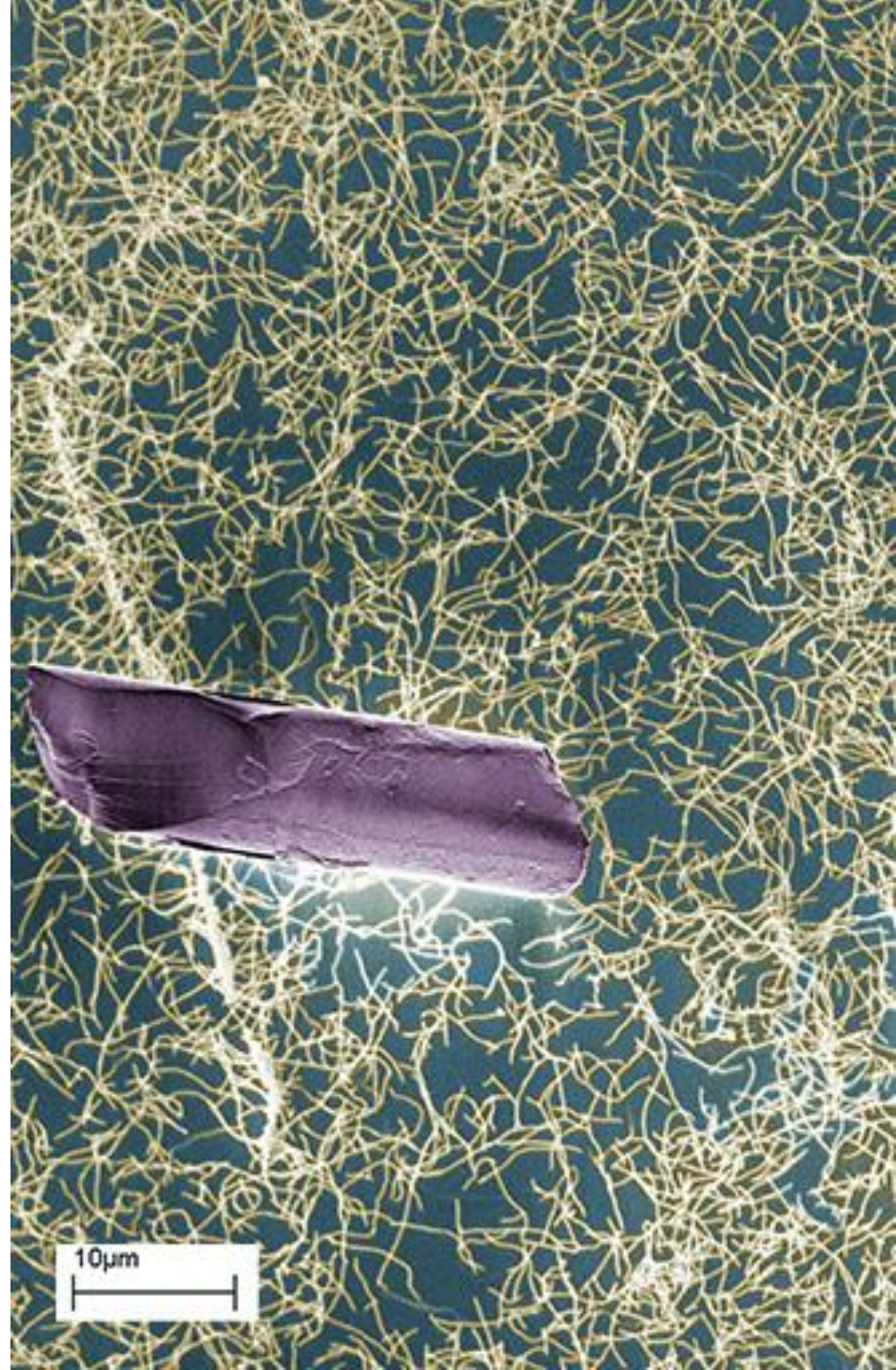
vs.

# 人的毛发（微米材料）

- Human hair ~ 10 $\mu$ m in diameter;
- Carbon nanotubes have diameter approximately 1-2 nm.

Prepared by CVD using Co nanoparticles as a catalyst, and Alcohol as a Carbon Source.

*Human hair fragment and a network of single-walled carbon nanotubes  
(Image: Jirka Cech)*



# 从空间尺度上看纳米材料

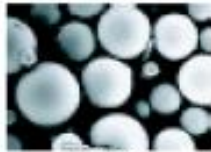
## Things Natural



Dust mite  
~500  $\mu\text{m}$



Ant  
~5 mm



Fly ash  
~10-20  $\mu\text{m}$  dia.



Human hair  
10-50  $\mu\text{m}$  dia.



Red blood cells  
with white cell  
2-5  $\mu\text{m}$  dia.



~10 nm dia.



ATP synthesis



DNA  
2.5 nm dia.



Atoms in silicon  
0.2 nm spacing

## Things Man-made

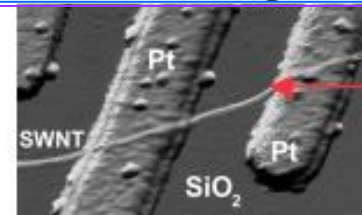


Head of a pin  
1-2 mm

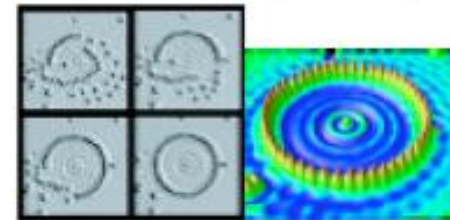
Microelectromechanical devices  
10-100  $\mu\text{m}$  wide



Red blood cells  
Pollen grain

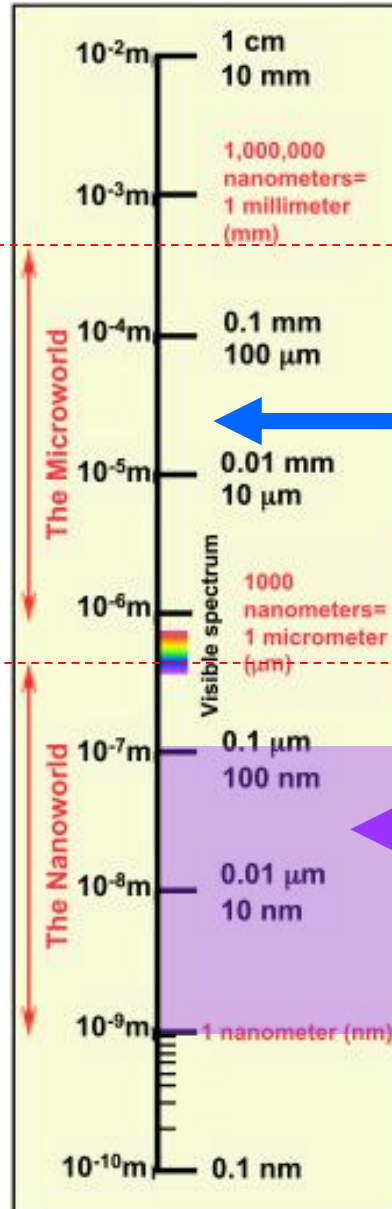


Nanotube devices (C. Dekker)

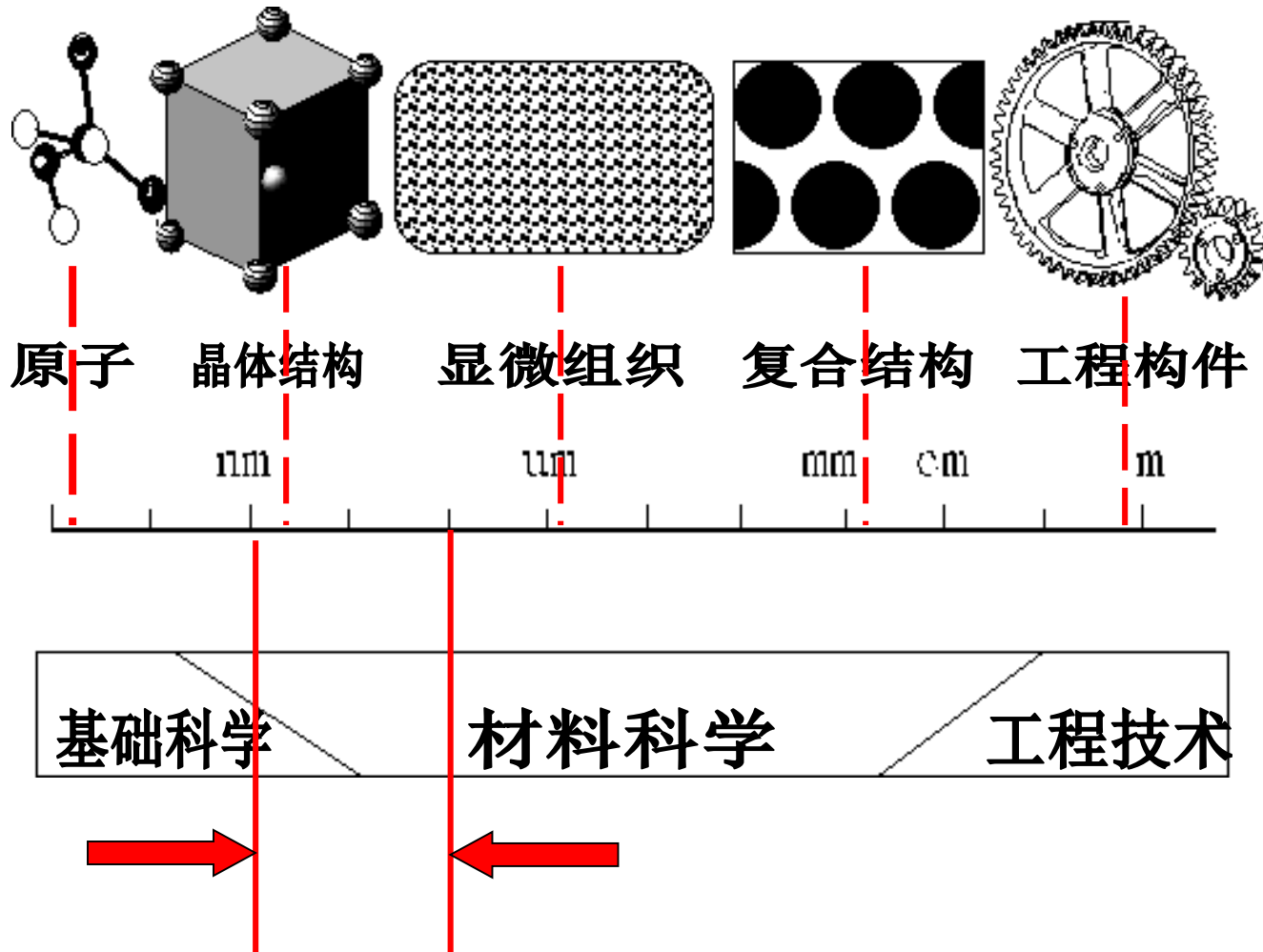


Quantum corral of 48 iron atoms on  
copper surface positioned one at a time  
with an STM tip - Corral diameter 14 nm

Carbon nanotube  
~2 nm diameter



# 纳米材料与其它学科的关系



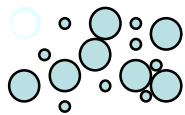
# 人工纳米材料的分类

- 按材料学科体系：

纳米金属材料、纳米陶瓷材料、纳米高分子材料、  
纳米复合材料；

- 按应用：纳米电子材料、纳米磁性材料、纳米生物材料、纳米隐身材料、纳米催化剂材料.....

- 按几何形貌特征：



零维



一维

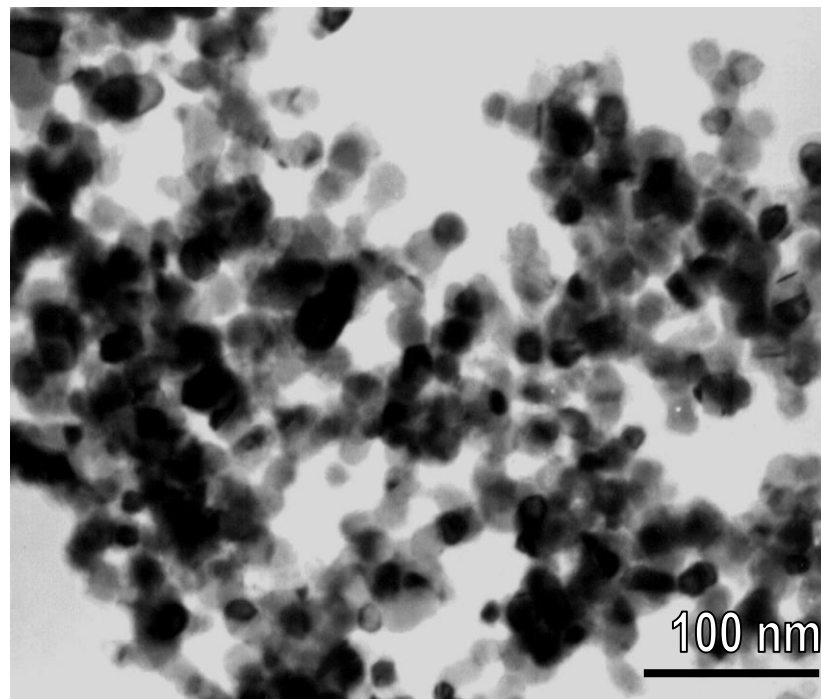
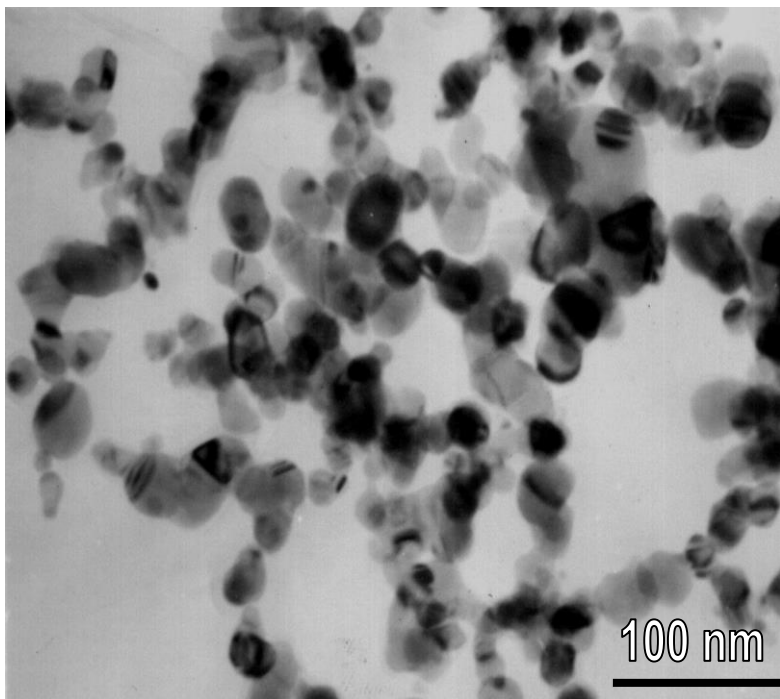


二维



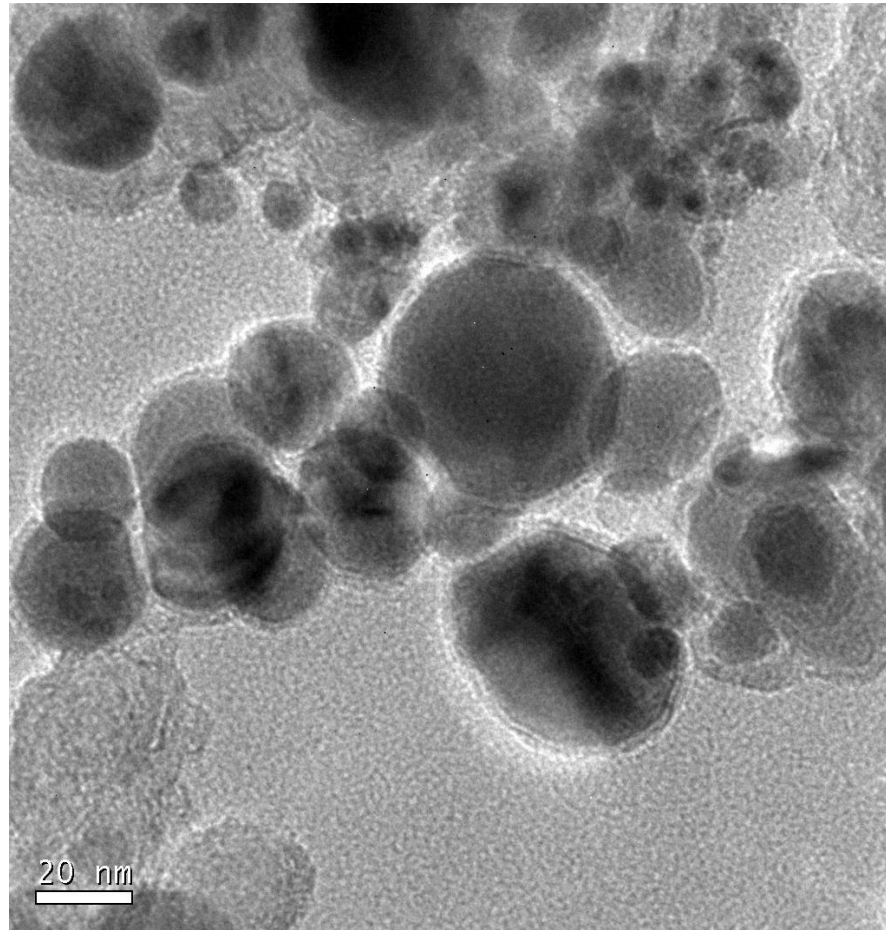
三维

**零维纳米材料：**指空间三维尺度均在纳米尺度，如纳米微粒或团簇（量子点）。

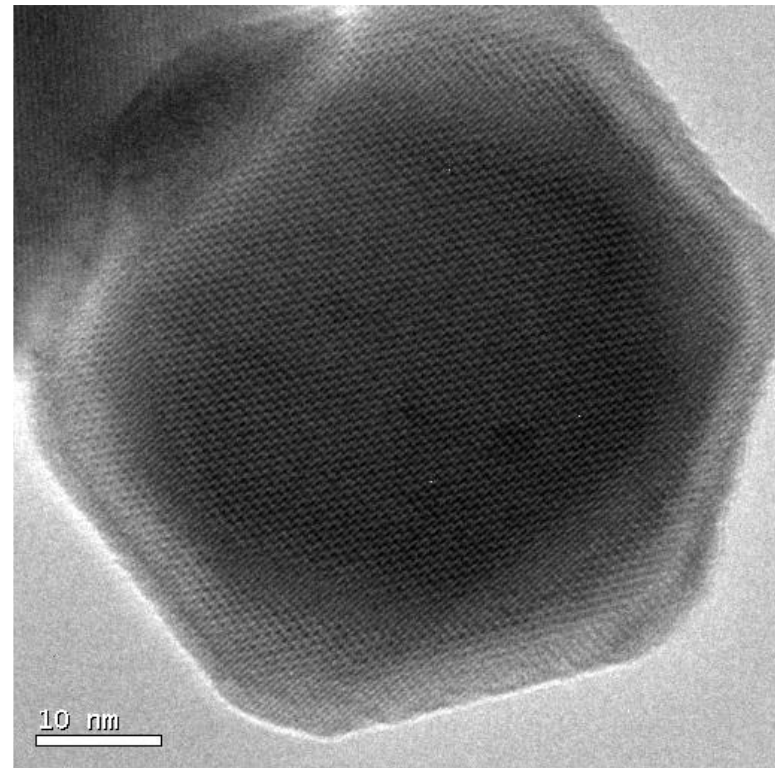
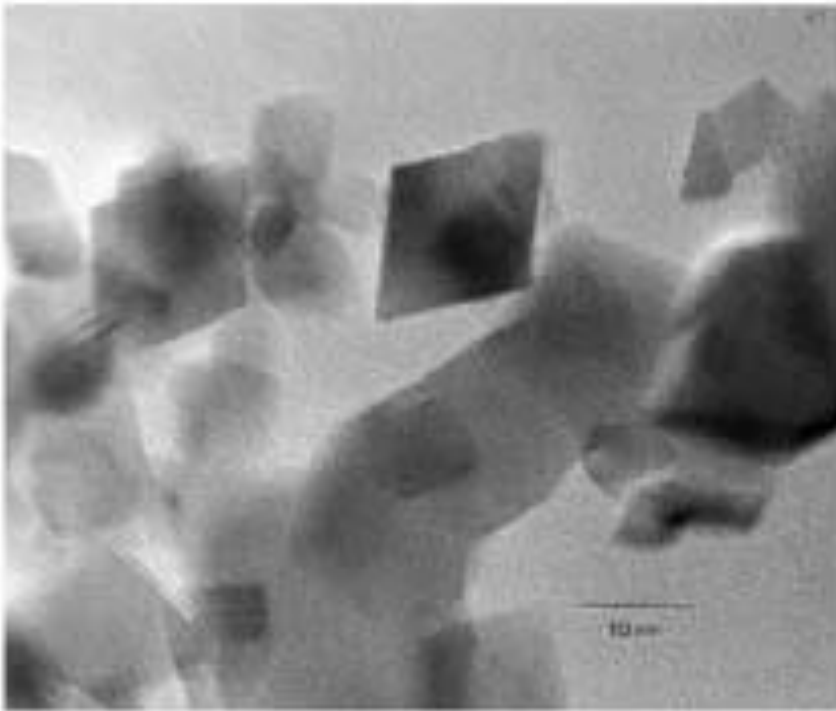


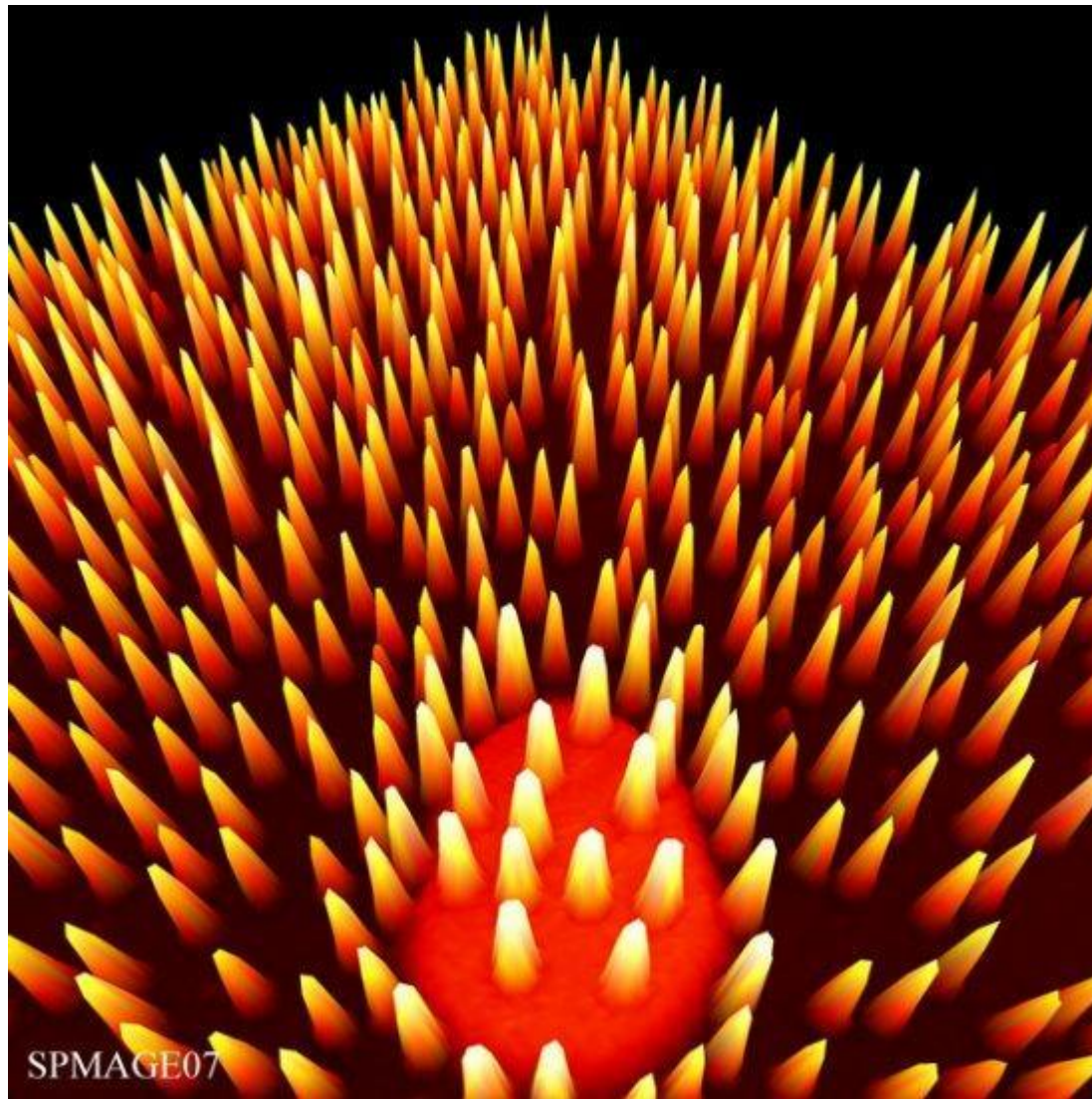
**Ni, Cu**纳米粒子

# 纳米金属镍

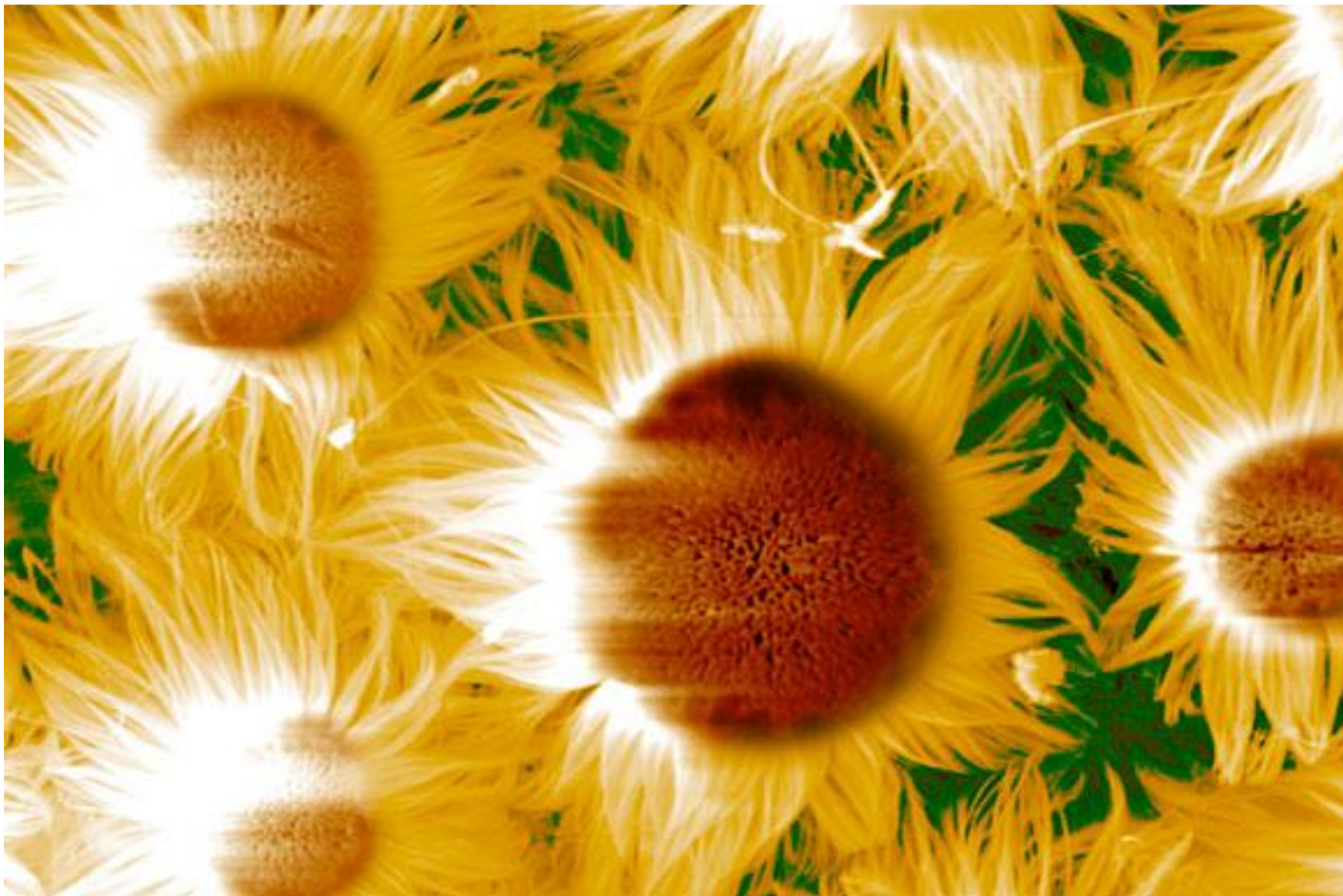


# 氧化物纳米颗粒





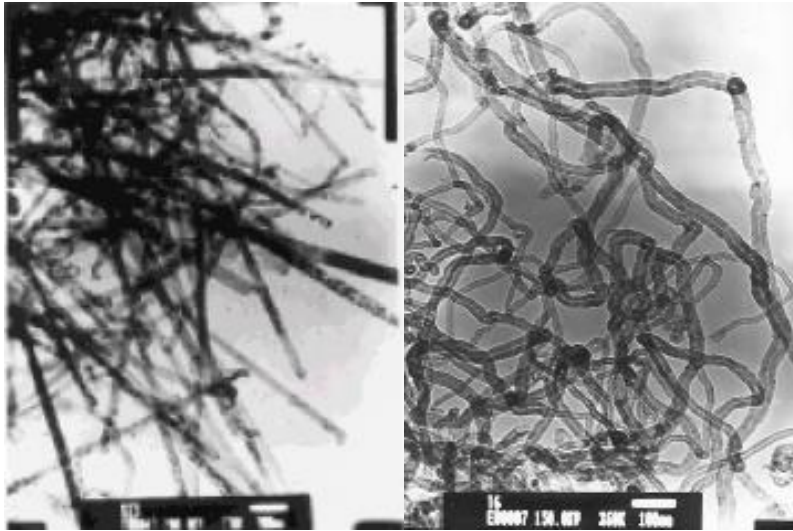
2007年最佳纳米级显微图像揭晓：**量子森林**  
托斯藤-兹欧姆巴在德国实验室中捕获，它展示了锗硅量子点（SiGe quantum dot）：**高15nm，直径70nm。**



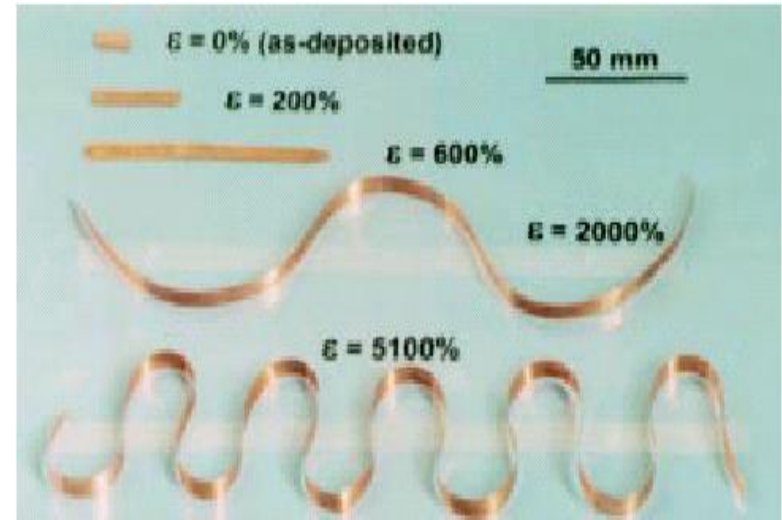
- **SiO<sub>2</sub> nanowires are several microns in length while maintaining a roughly 10-nanometer diameter;**
- **CVD方法制得SiO<sub>2</sub> 纳米线，借助于Au 颗粒的催化**

Image by Prof. S.K. Hark  
University of Hong Kong

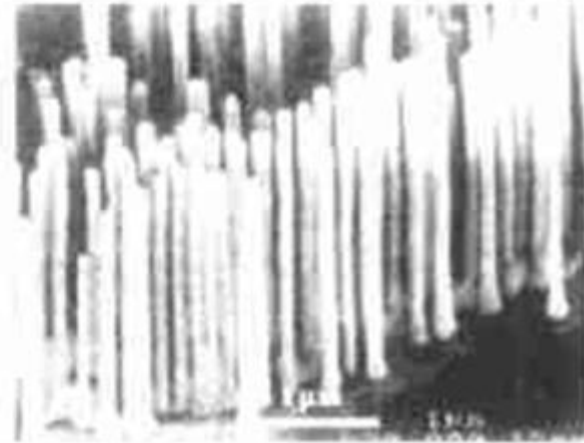
**一维纳米材料：**指空间二维处于纳米尺度，如纳米量子线、丝、棒、管（量子线）。



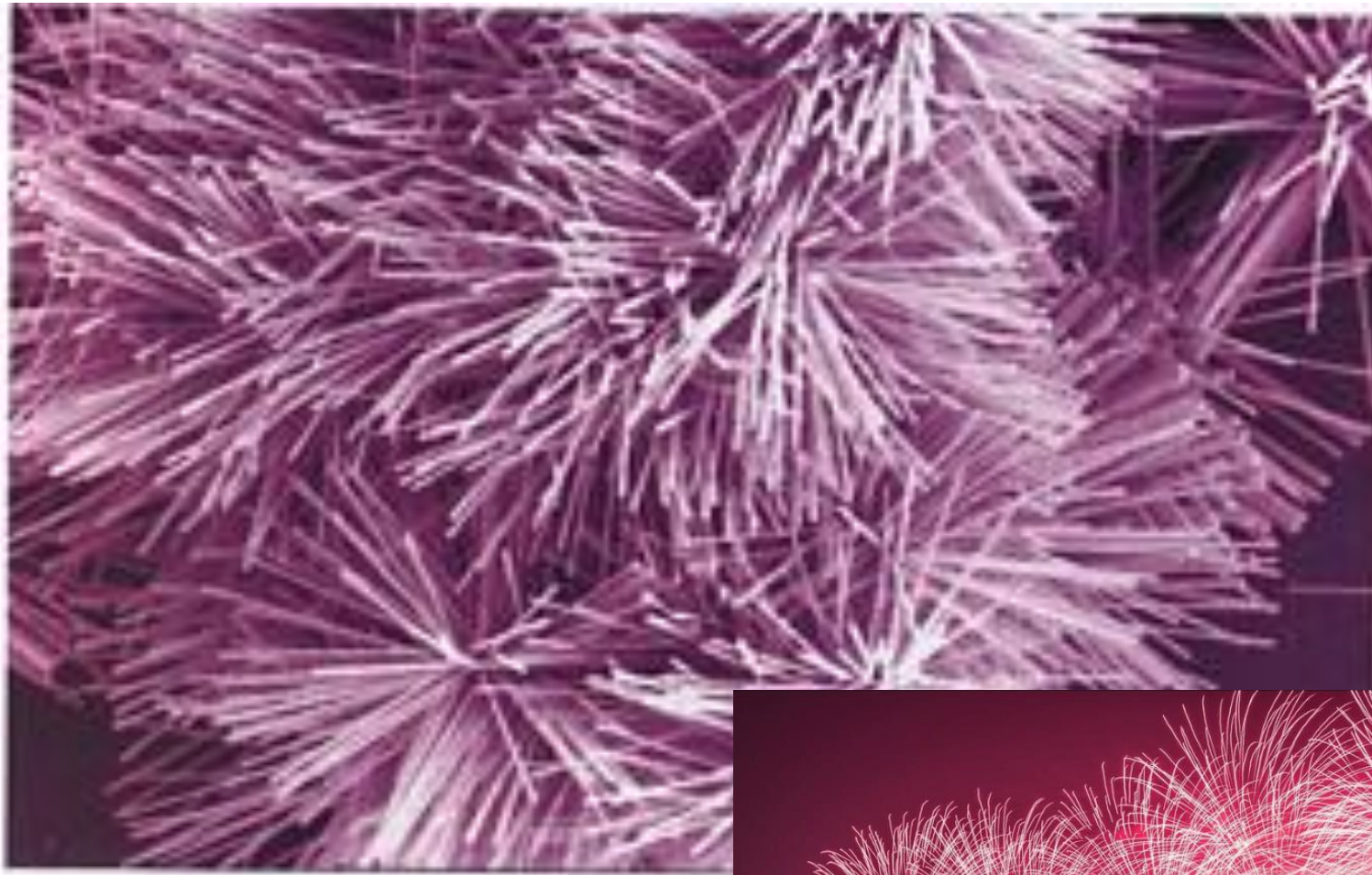
纳米线



具有超延展能力的纳米晶铜带



纳米阵列

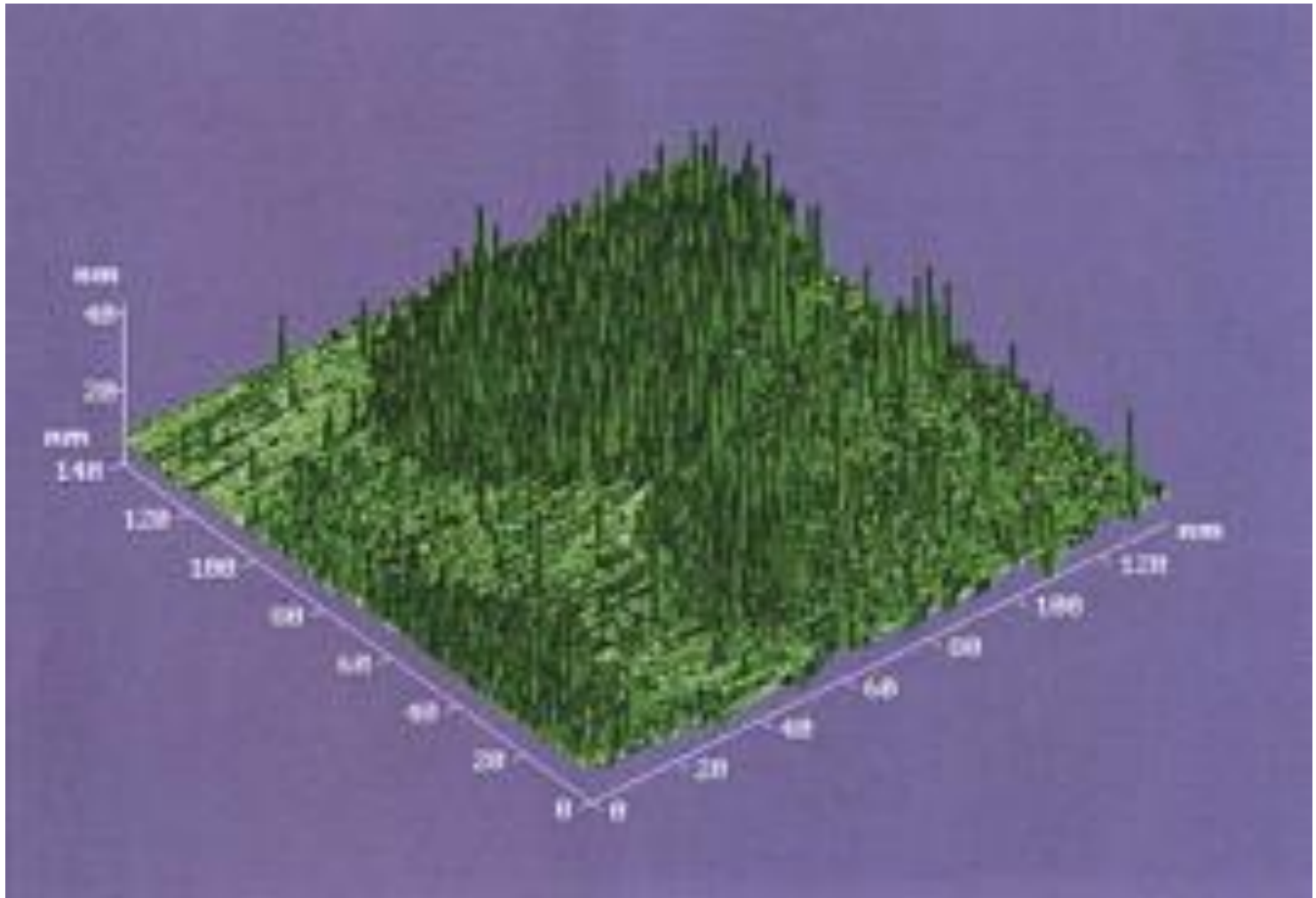


## ZnO纳米棒

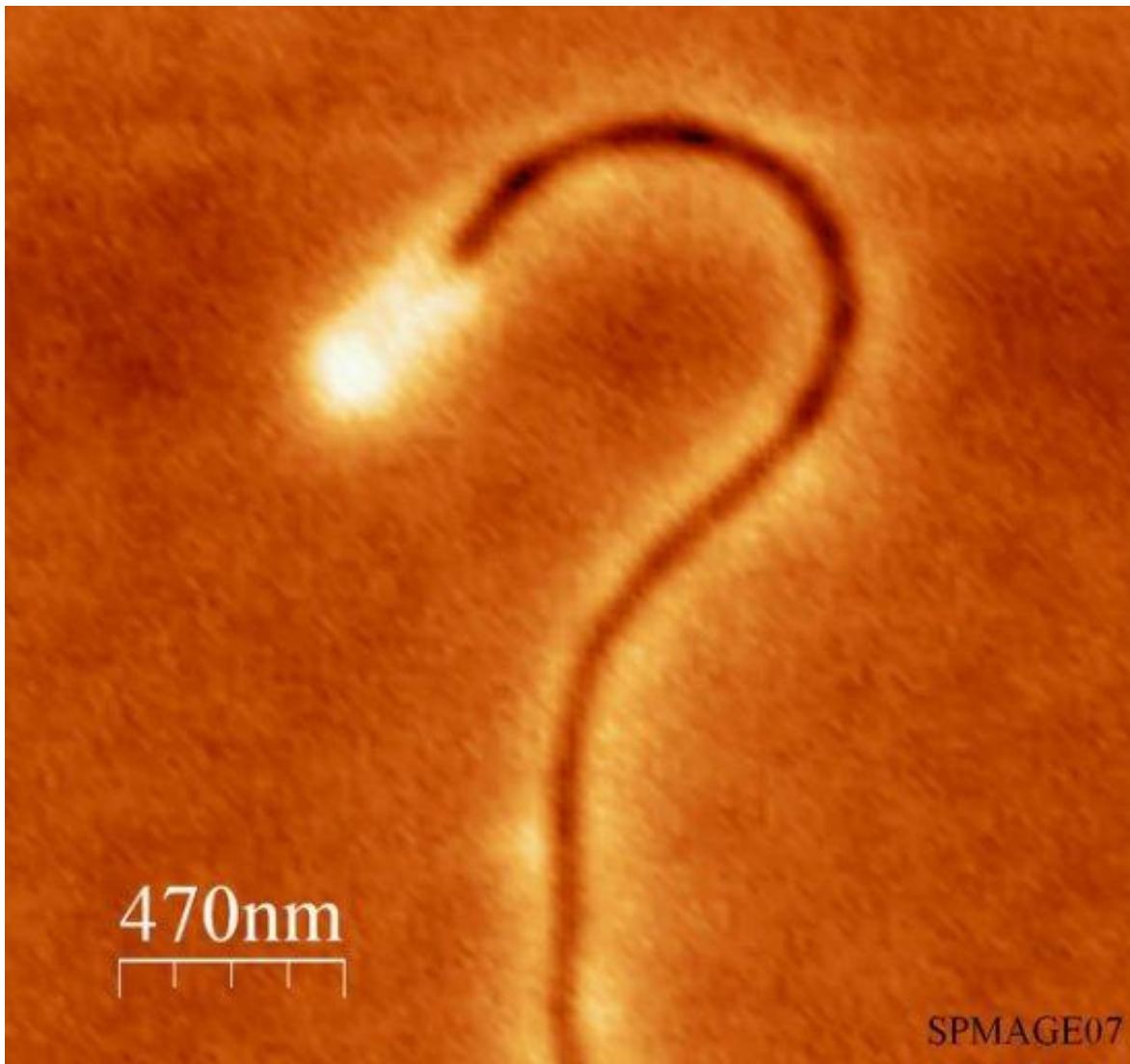
庆典礼花——用物理气相沉积（PVD）法制备的ZnO纳米棒的SEM图象



# 碳纳米管

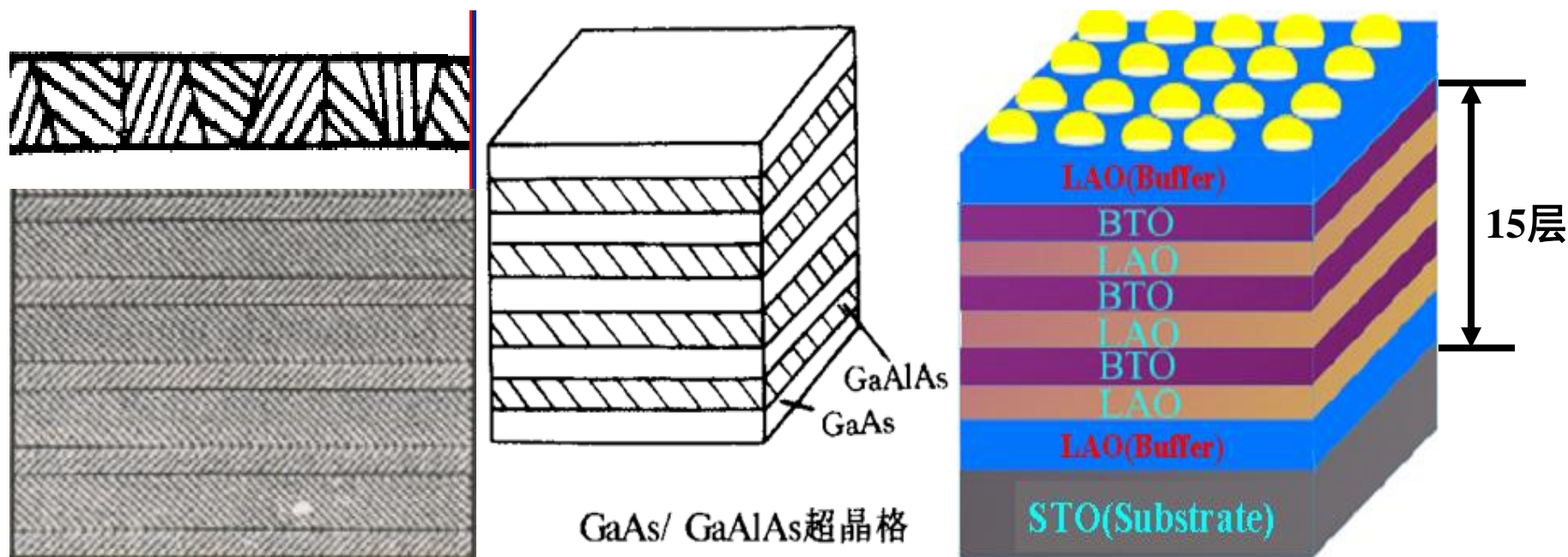


森林——直立在Au薄膜上的单壁碳纳米管的STM图像



使用静电力显微镜获取直径为18nm的碳纳米管发出的电荷。图中明亮的光晕是由纳米管帽发射出的电荷所产生的，放电时，纳米管则变暗。

**二维纳米材料：**指空间一维处于纳米尺度，如超薄膜、多层膜、超晶格（量子阱）。

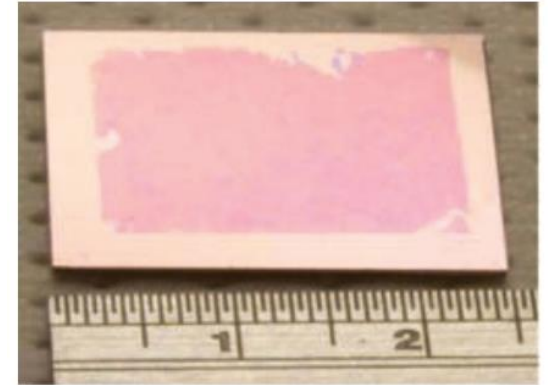
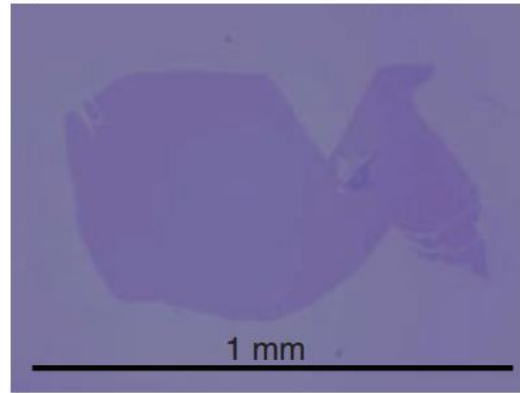
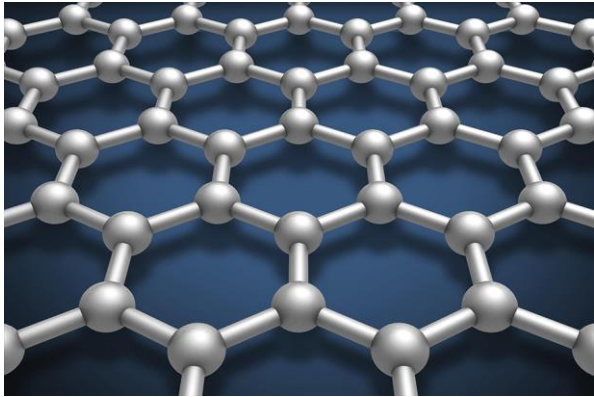


纳米单层与多层薄膜

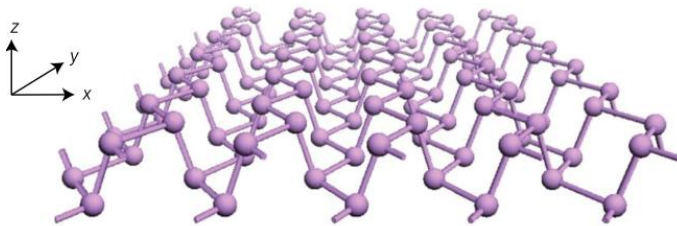
超晶格

# 二维原子晶体（二维材料）

## Graphene（石墨烯）

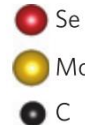
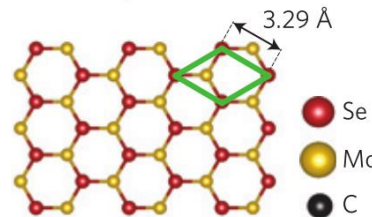


## Phosphorene（磷烯）

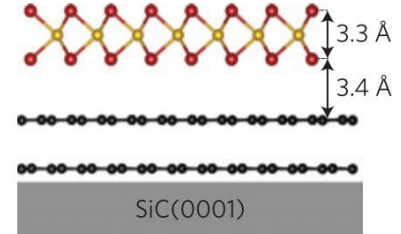


## TMD（过渡金属硫族化合物）

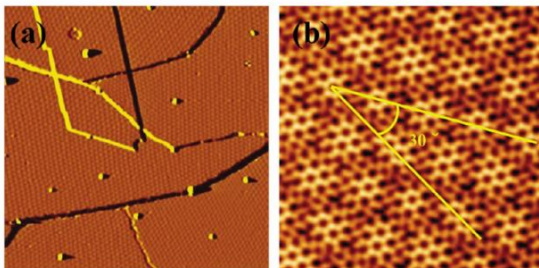
Top view



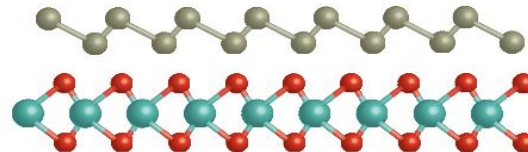
Side view



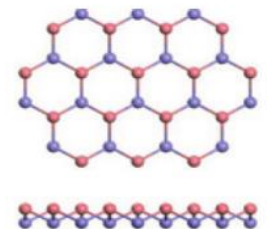
## Silicene（硅烯）



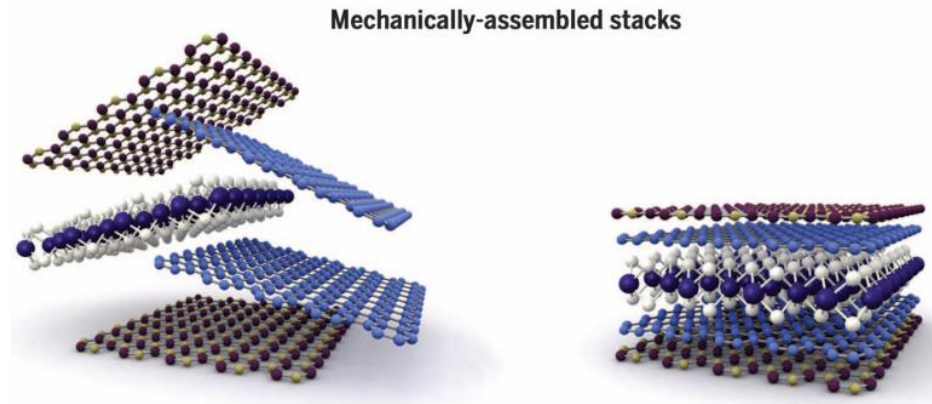
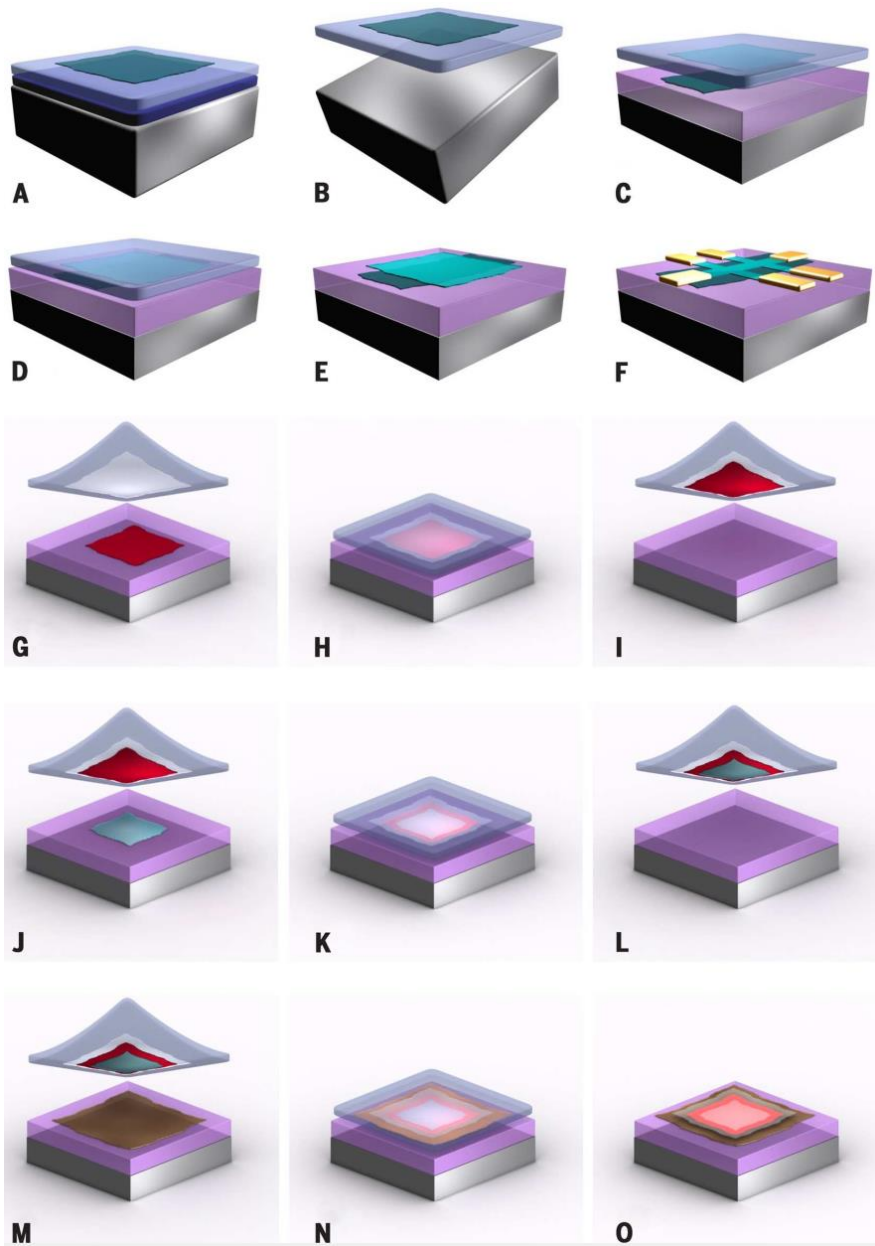
## Germanene（锗烯）



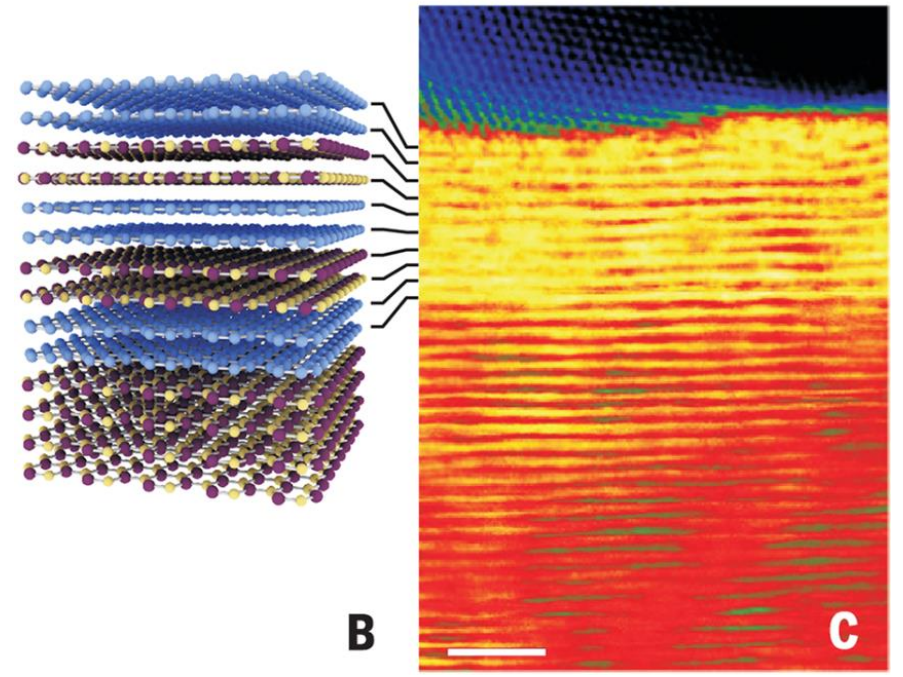
## Stanene（锡烯）



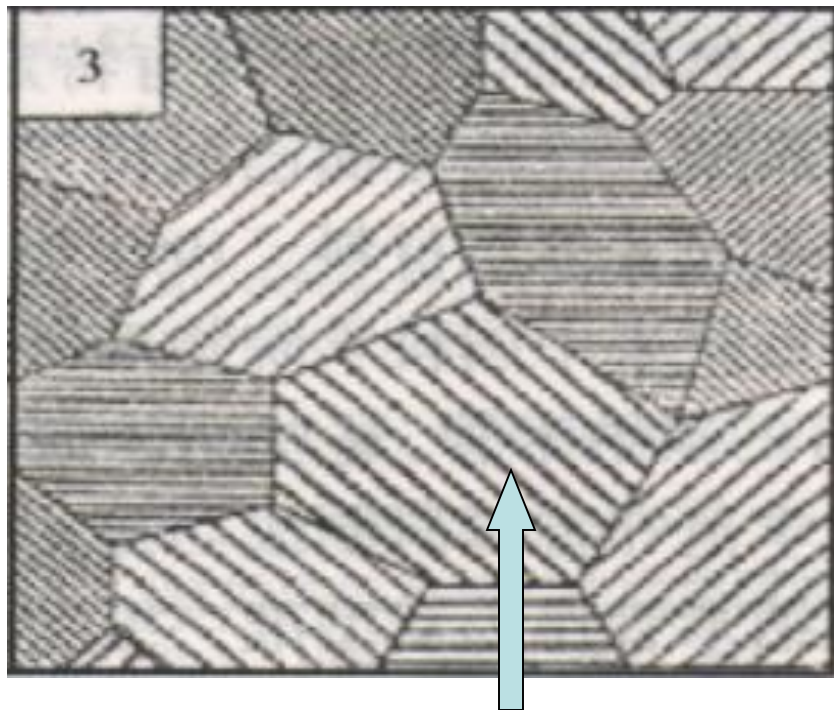
# 二维原子晶体（二维材料）



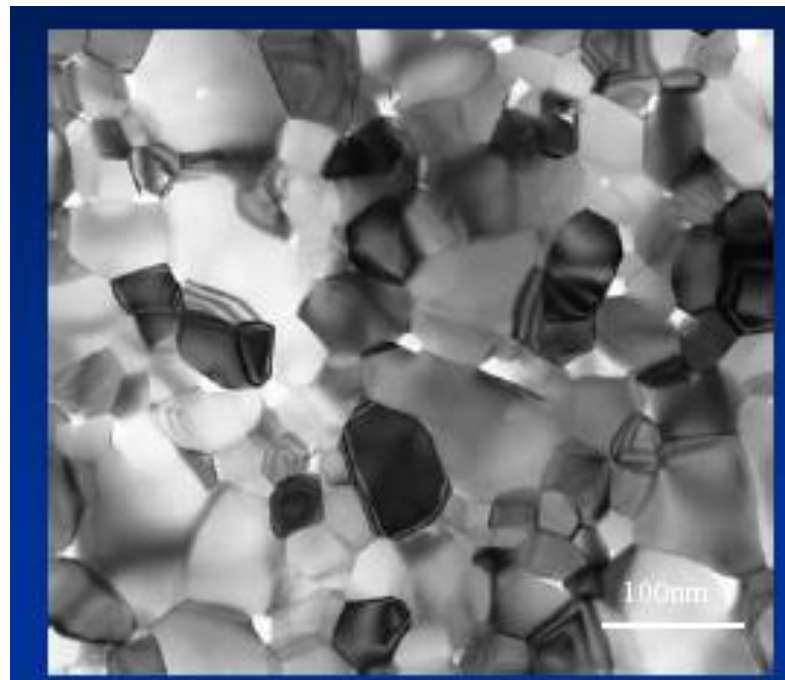
van der Waals heterostructures



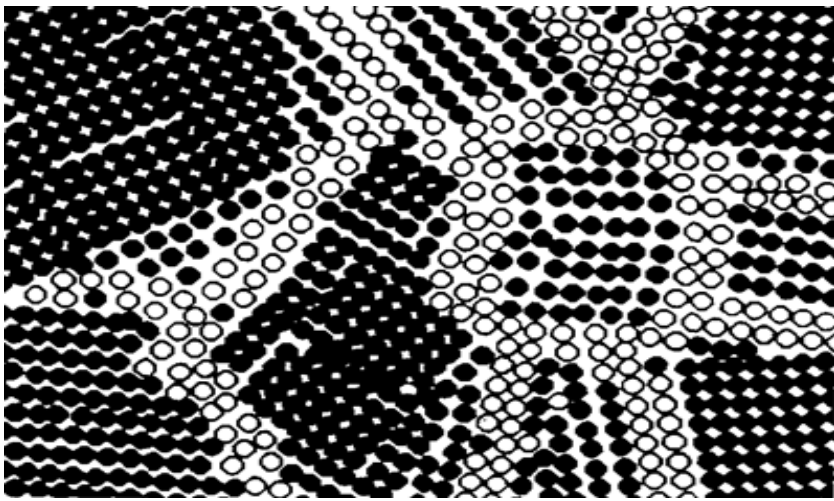
**三维纳米固体材料：**指由纳米基本单元构成的块体材料，  
如纳米晶块体材料（纳米陶瓷、纳米结构材料）、纳米  
复合材料、纳米多孔材料（多孔碳，分子筛）……



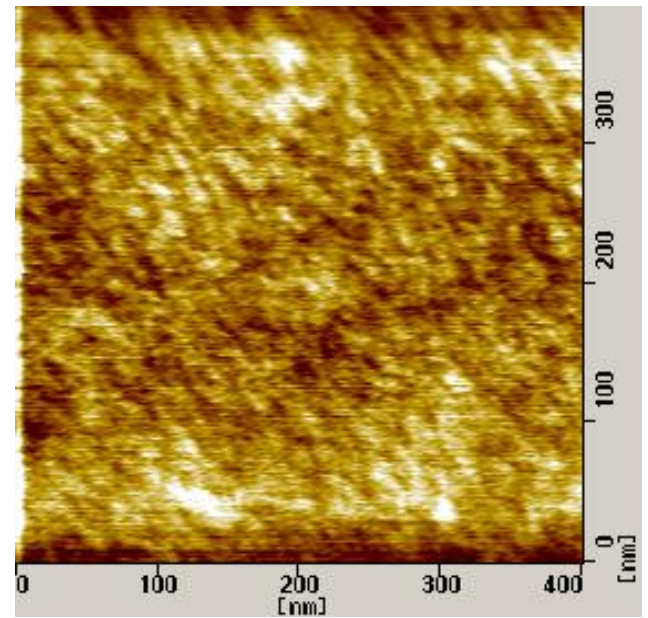
纳米固体单元



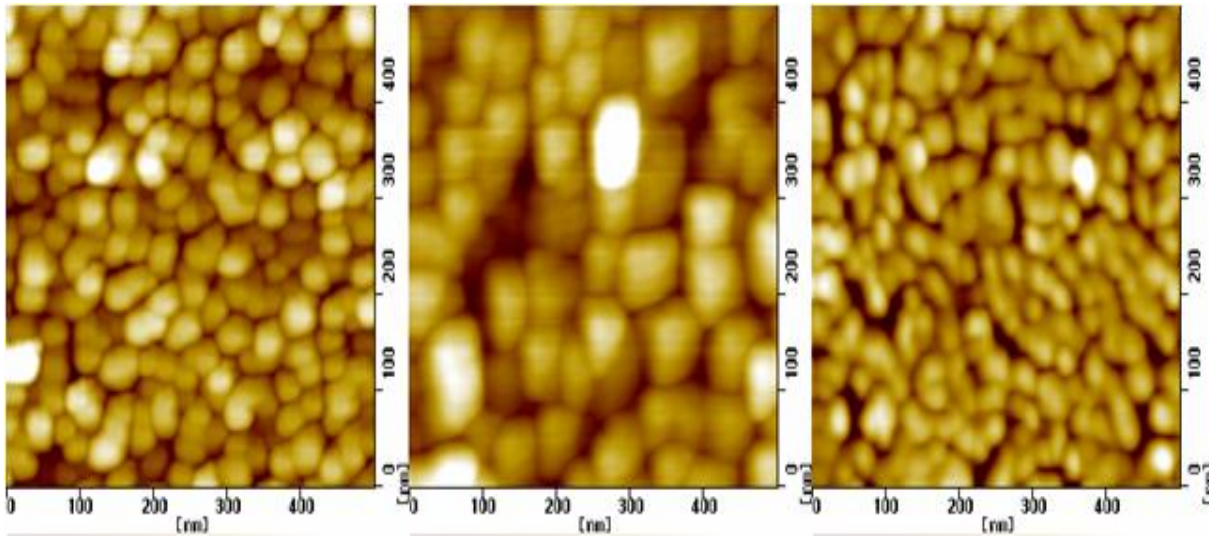
纳米陶瓷



纳米晶结构材料的剖面示意图  
(实心球表示体相原子, 空心球表示界面原子)



晶化前



650°C

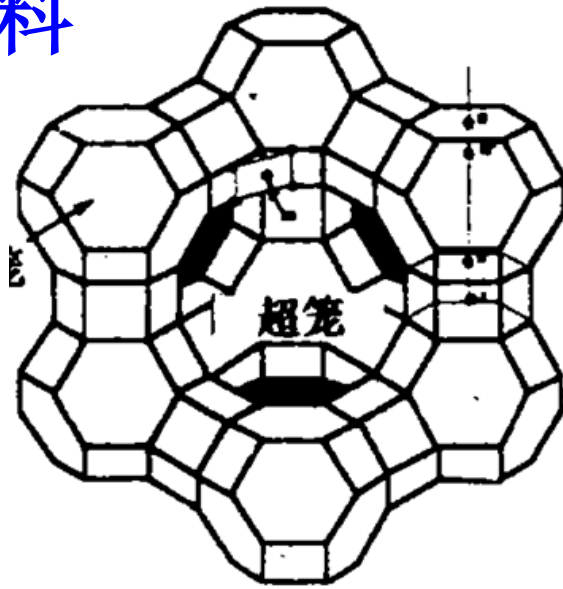
750°C

800°C

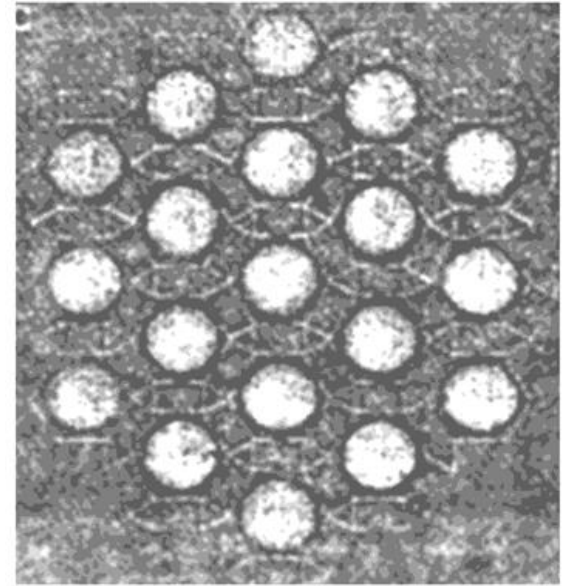
晶化后

纳米晶结构材料

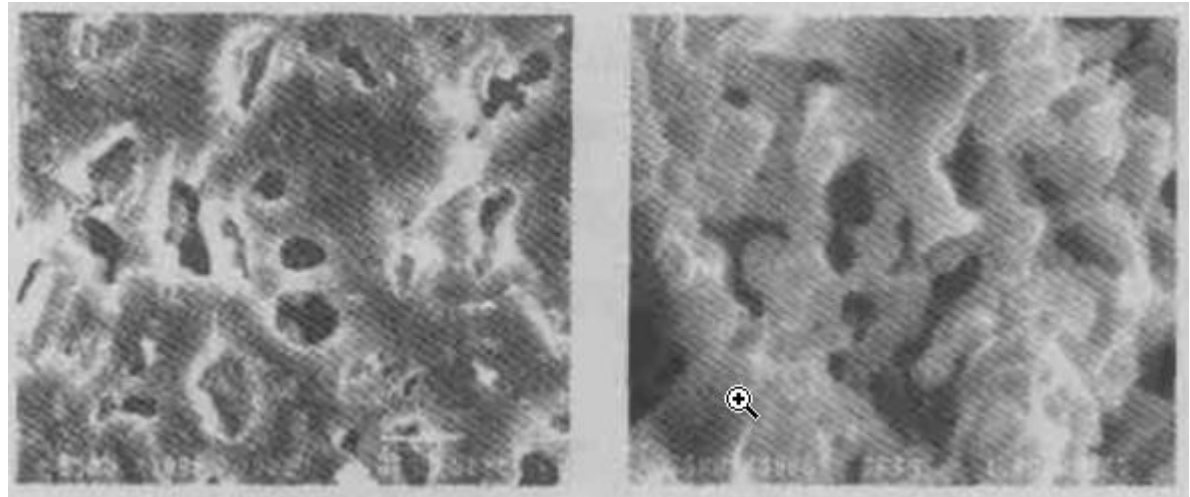
# 纳米多孔材料



沸石的笼结构



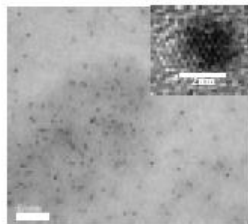
沸石的笼中相嵌成多纳米孔结构



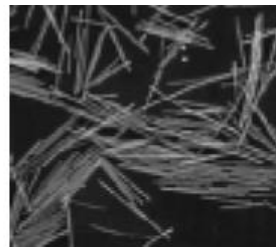
SiO<sub>2</sub>纳米多孔材料

# “纳米材料”概念的总结

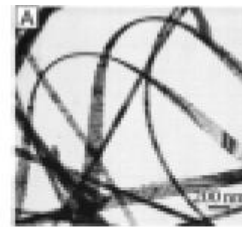
- 纳米材料是指微观结构至少在一维方向上受纳米尺度（1~100nm）调制的各种固体材料。
- 它的存在形式包括**零维**的原子团簇和纳米微粒，**一维**调制的纳米多层膜；**二维**调制的纳米颗粒膜（涂层）；以及**三维**调制的纳米块体材料。



纳米粒子



纳米线



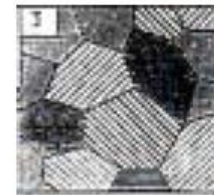
纳米带



纳米管



纳米膜



纳米固体材料

- 所有这些材料具有三个共同的结构特点：**即纳米尺度结构单元、大量的界面或自由表面，以及各纳米结构单元之间存在着或强或弱的交互作用。**这三个结构特点主要决定了纳米材料的性能。

## 2. 纳米体系的基本效应、物理化学性质与应用

- 表面效应
- 小尺寸效应
- 量子尺寸效应
- 量子隧道效应

适用于所有纳米结构体系（纳米微粒与纳米固体）



# 表面效应

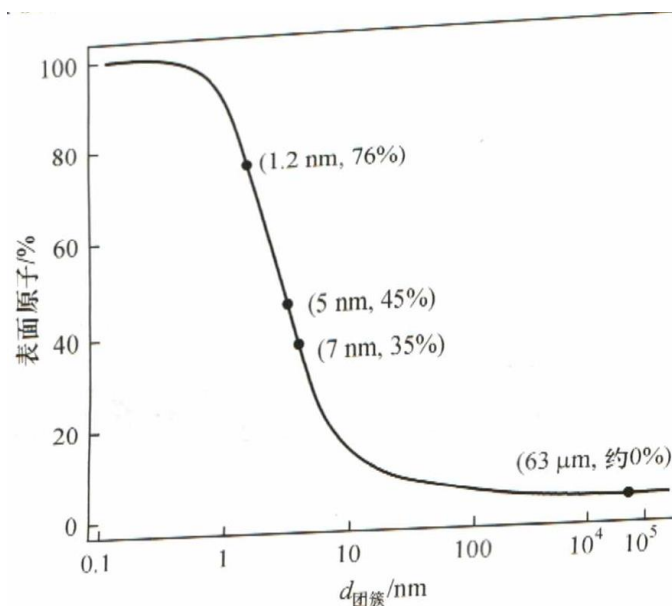
伴随着颗粒尺寸的减小，颗粒表面原子比率的增加；  
表面原子的活性使得颗粒表现出特殊的物理与化学特性。

随着颗粒尺寸减小(尤其是10nm以下)：

- 比表面积（单位质量所具有的总面积）显著地增加；
- 表面原子数相对增多（占总原子数的比率提高）。

粒径大小 (nm)	粒子中的原子数	表面原子比例 (%)
20	$2.5 \times 10^5$	10
10	$3.5 \times 10^4$	20
5	$4.0 \times 10^3$	40
2	$2.5 \times 10^2$	80
1	$3.0 \times 10^1$	90

表面原子数比率随Pd团簇直径的变化关系



[Eur. Phys. J. D8, 245(2000)]

固体表面原子特点（与内部原子相比）：

- 周围缺少相邻的原子，原子配位不满，多悬空键，处于更高的能量状态（表面能）；
- 表现出更高的化学活性，不稳定，易与其他原子相结合。

随着纳米微粒粒径减小，比表面积增大，表面原子数增多及表面原子配位不饱和性，导致大量的**悬挂键**和**不饱和键**等，这就使得**纳米微粒具有高的表面活性**。

**案例1：表面吸附。** 无机的纳米颗粒暴露在空气中会吸附气体，并与气体进行反应（金属纳米颗粒易迅速氧化而燃烧、甚至爆炸）。可通过采用表面包覆改性，或使其缓慢氧化生成一层极薄而致密的氧化层。

**案例2：颗粒间团聚。** 这样可以减小总的表面积、使能量降低。但同时也降低了其在催化等方面的活性。

# 表面效应

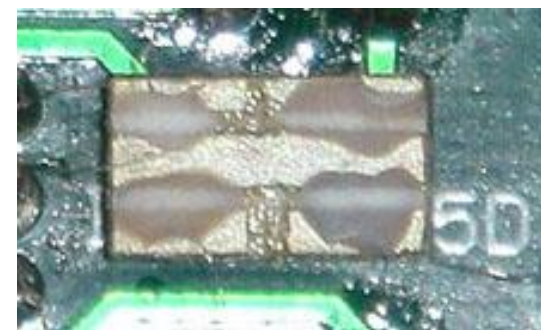
## 表面活性的应用：气敏传感器

- 纳米微粒具有大的比表面积；
- 高的表面活性使得气体在颗粒表面吸附增强。

### 传感器阵列



### SnO<sub>2</sub> 气敏元件



# 表面效应

## 表面活性的应用：光催化

不同晶粒尺寸TiO<sub>2</sub>的光催化降解苯酚。  
苯酚的剩余百分率（左边标尺）vs.TiO<sub>2</sub>晶粒尺寸

### TiO<sub>2</sub>的光催化降解苯酚

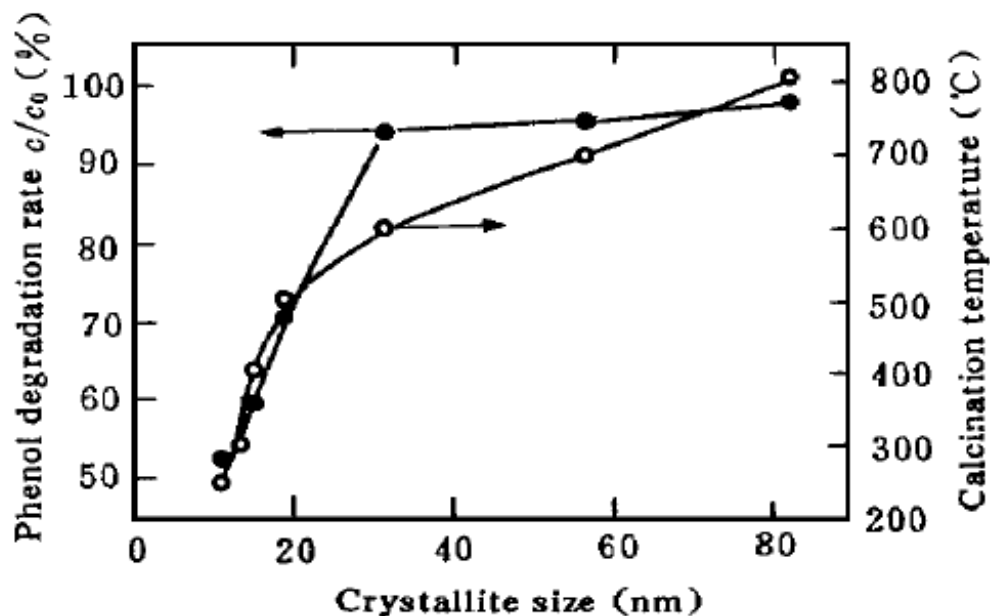


图 6 TiO<sub>2</sub> 的晶粒尺寸与焙烧温度和光催化活性的关系

随粒径减小，光催化活性增高。

- 苯酚降解率的陡峭变化发生在粒径小于30 nm的范围；
- 晶粒尺寸从30 nm 减小到10 nm，TiO<sub>2</sub>光催化降解苯酚的活性提高了近45%。

# 小尺寸效应

由于颗粒尺寸变小所引起的宏观物理性质的变化。

- 当纳米颗粒的尺寸与光波波长、德布罗意波长等物理特征量相当或更小时，物质内部周期性的边界条件将被破坏，从而引起宏观光学（透光率）与电学性质（超导电性、介电性能）的质变。
- 颗粒比表面积的增加导致表面能增高（正比于比表面积），从而引起热学性质的改变。
- 纳米颗粒之间具有大的界面，界面的原子排列是相当混乱的，从而导致特殊的宏观力学性质。

# 小尺寸效应

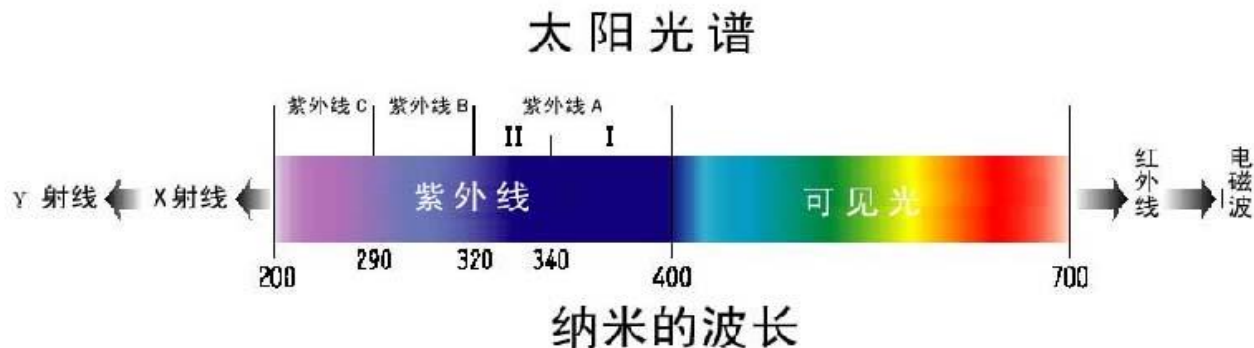
## 特殊的光学性质

### 金属超微颗粒对太阳光的宽频带强吸收：

- 所有的金属在超微颗粒状态都呈现为**黑色**。尺寸越小，颜色愈黑，金属超微颗粒对光的反射率通常低于1%，大约几微米的厚度就能完全消光，对太阳光谱几乎具有全吸收性质；
- 可以制备出“太阳黑体”物质，作为高效率的光热、光电等转换材料，可以高效率地将太阳能转变为热能、电能。

### 非金属纳米颗粒（氮化硅、碳化硅及氧化铝）对红外光的宽频带强吸收：

- 纳米粒子大的比表面导致了平均配位数下降，不饱和键和悬挂键增多。
- 没有一个单一的、择优的键振动模式，而存在一个较宽的键振动模式的分布，对红外吸收的频率存在一个较宽的分布。



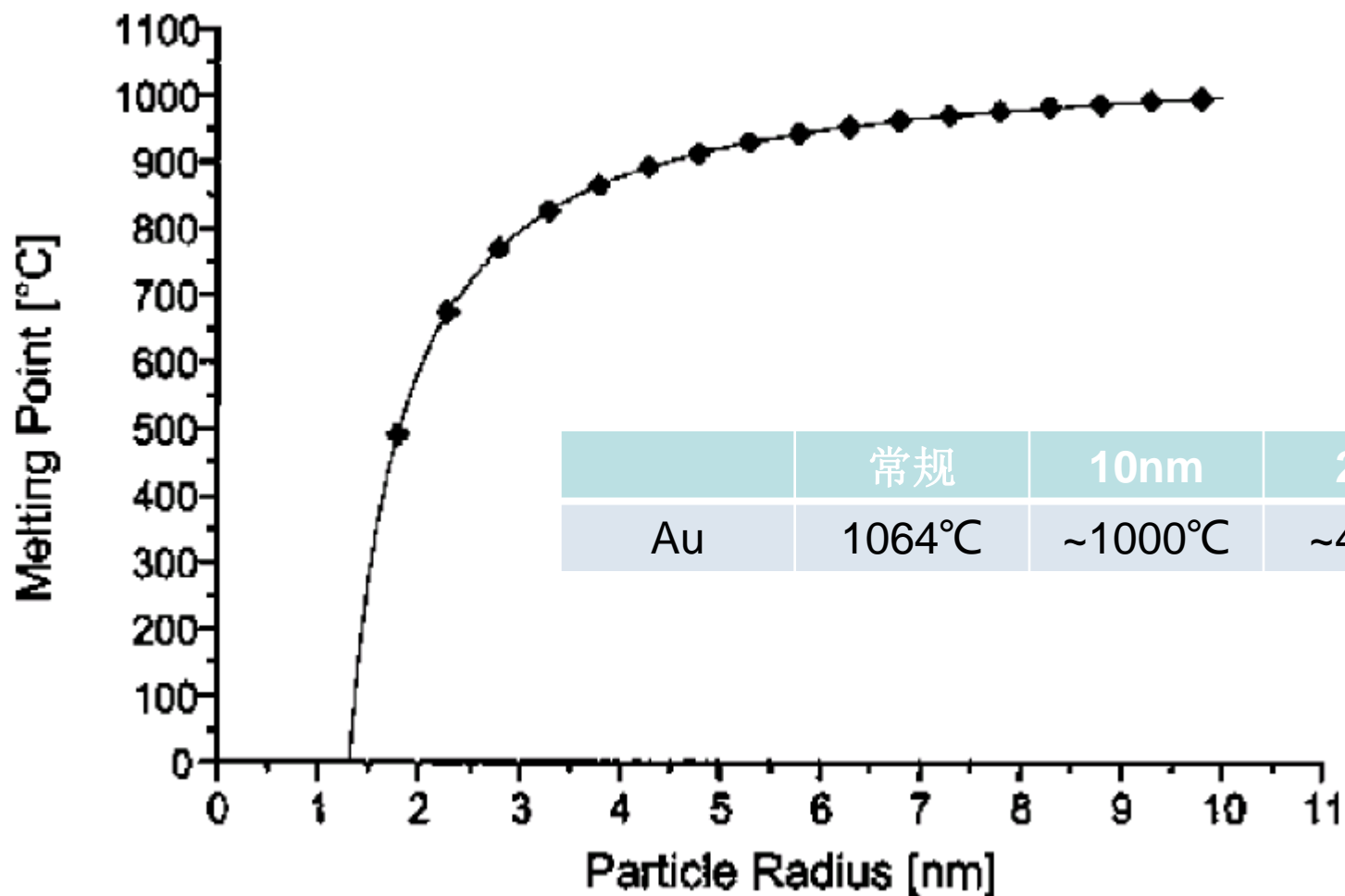
### 纳米颗粒熔点下降（Melting Point Depression）

- 固态物质为大尺寸时，其熔点是固定的，超细微化后却发现其熔点将显著降低；当颗粒小于10nm量级时变化尤为显著；
- 这主要归根于大量界面原子所具有的较高的界面能，颗粒融化时所需增加的内能比块体材料融化时所需增加的内能要小很多，从而使纳米固体的熔点降低。

# 小尺寸效应

## 特殊的热学性质

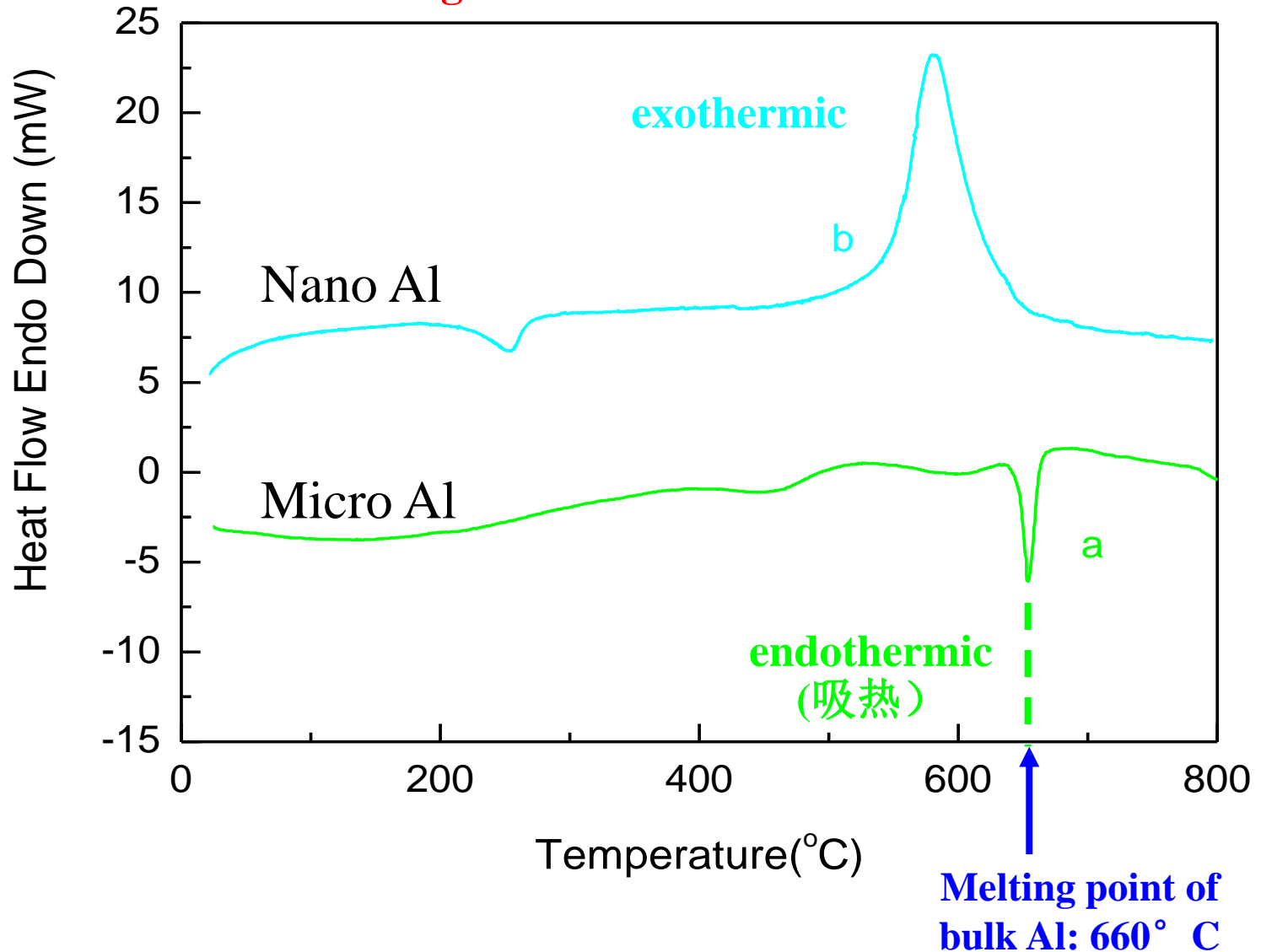
Melting point of Gold nanoparticles



# 小尺寸效应

## 特殊的热学性质

### Melting of Aluminum: Nano vs. Micro



# 小尺寸效应

## 纳米颗粒熔点下降的应用：低温烧结

- 粉末冶金领域：
- 烧结温度：是指把粉末先用高压压制成形，然后在低于熔点的温度下使这些粉末互相结合成块(密度接近常规材料)的最低加热温度。

纳米颗粒能使烧结温度降低的原因：

- 纳米微粒尺寸小，表面能高；
- 压制成块材后的界面具有高能量，在烧结中高的界面能成为原子运动的驱动力，有利于界面中的孔洞收缩，空位团的湮没。

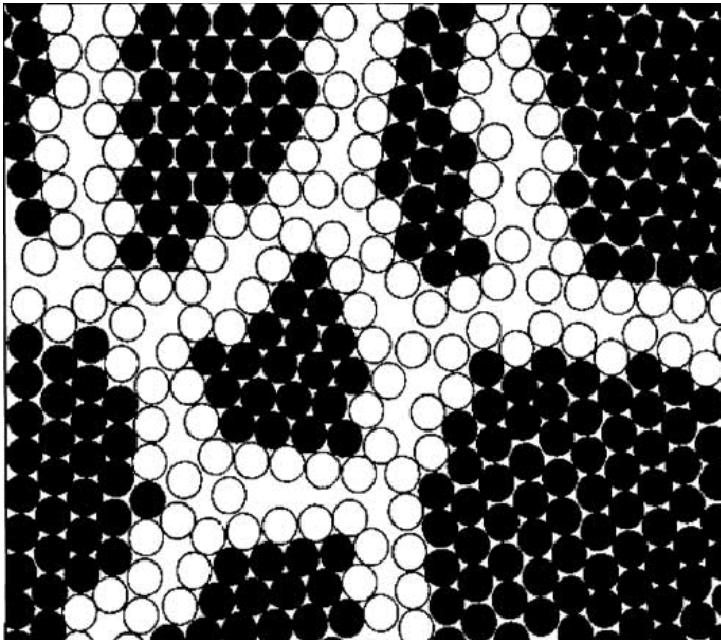
案例1：常规  $\text{Al}_2\text{O}_3$  陶瓷的烧结温度在1800-1900C，在一定条件下 纳米 $\text{Al}_2\text{O}_3$ 颗粒可在1150-1500C烧结，致密度可达99.7%。

案例2：超细银粉制成的导电浆料可以进行低温烧结，此时元件的基片不必采用耐高温的陶瓷材料，甚至可用塑料。

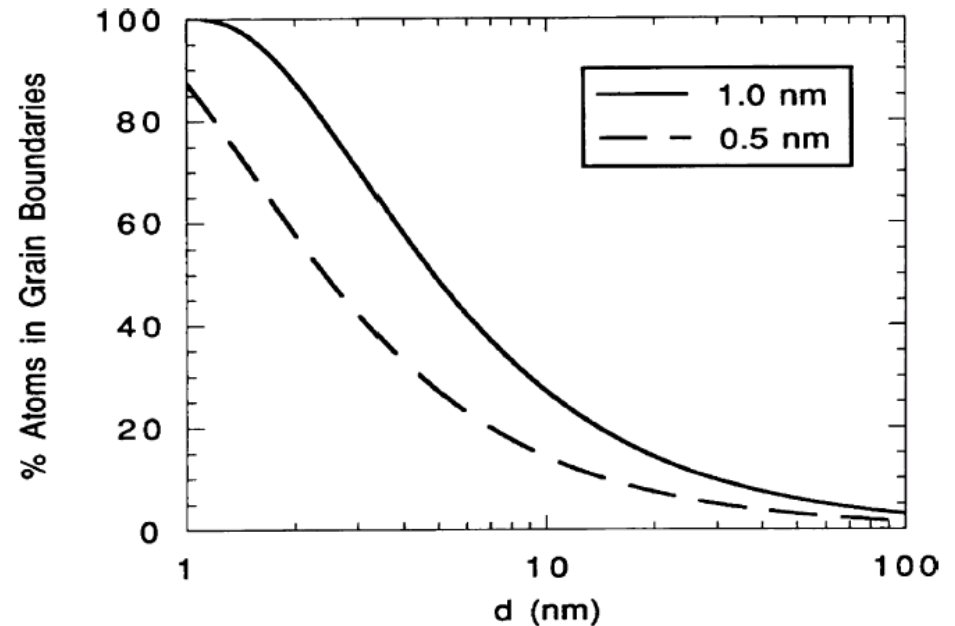
# 小尺寸效应

## 特殊的力学性质

纳米材料具有大的界面，界面的原子排列是相当混乱的，原子在外力变形的条件下很容易迁移，因此表现出甚佳的韧性与一定的延展性。



Two-dimensional model of a nano-crystalline solid.



Range of percentage of atoms in grain boundaries of a nanocrystalline solid as function of grain diameter, assuming that the average grain boundary thickness ranges from 0.5 to 1.0 nm

[Materials Science and Engineering R 45 (2004) 1–88]

陶瓷材料在通常情况下呈脆性，然而由纳米超微颗粒压制成的纳米陶瓷材料却具有良好的韧性。

实例1：德国萨尔大学格莱德和美国阿贡国家实验室席格先后研究成功纳米陶瓷氟化钙和二氧化钛，在室温显示良好的韧性，在180度经受弯曲并不产生裂纹。

实例2：人的牙齿之所以具有很高的强度，是因为由纳米磷酸钙构成的牙釉具有高强度和高硬度，其硬度仅次于金刚石。

# 量子尺寸效应

微粒尺寸下降到一定值时，费米能级附近的电子能级由准连续能级变为离散能级，从而导致物理性质的变化。

电子能级分布的区别导致宏观物理性质的区别：

- 在大块晶体中，电子能级准连续分布，形成一个个的晶体能带。
- 在纳米材料中，由于至少存在一个维度为纳米尺寸，在这一维度中，电子相当于被限制在一个无限深的势阱中，电子能级由准连续分布能级转变为分立的束缚态能级。
- 当分立能级的间距大于热能、光能、电磁能的变化时，纳米微粒的磁、光、声、热、电及超导特性会与常规材料有显著的不同。

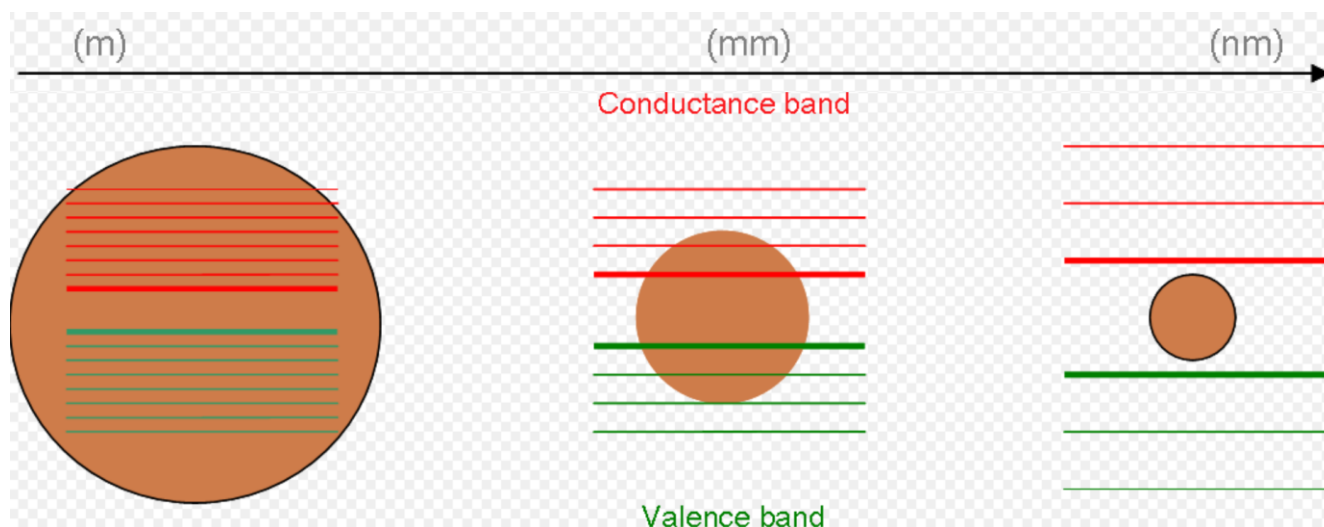
# 量子尺寸效应 电子能级的不连续性 - kubo理论

## 为什么纳米颗粒会产生能级分立?

- 久保(Kubo)理论是关于金属粒子电子性质的理论。它是由久保及其合作者提出的，以后久保和其他研究者进一步发展了这个理论。
- 久保采用一电子模型求得金属纳米晶粒的能级间距 $\delta$ 为：

$$\delta = \frac{4E_F}{3N}$$

公式中： $E_F$ 为费米势能， $N$ 为粒子中的总电子数。



# 量子尺寸效应

## 导电性能的变化

由于其电子能级 $\delta$ 变大，低温下的热扰动不足以使电子克服能隙的阻隔而移动，电阻率增大，从而使金属良导体变为绝缘体。

案例1：宏观状态下的金属Ag是导电率最高的导体，但10~15nm的银微粒电阻会陡然升高，失去金属良导体的特征，变成了绝缘体；

案例2：典型的共价键结构的氮化硅、二氧化硅等，当尺寸达到15~20nm时电阻却大大下降，用扫描隧道显微镜观察时不需要在其表面镀上导电材料就能观察到其表面的形貌；

半导体纳米材料的特殊光电性质：在尺寸小于100nm的纳米尺度范围内，半导体纳米微粒随着其粒径的减小也会呈现量子化效应，显现出与常规块体不同的光学和电学性质。

### 硅纳米颗粒的发光现象：

- 普通的硅有良好半导体特性，但不能发光。
- 当硅纳米晶粒的直径低于5 nm时，可在室温下光致发光；当硅晶粒的直径超过3 nm时发红光，直径为2~3 nm时发绿光，直径在2 nm以下时发蓝光；
- 因此只要控制纳米晶粒的大小，则在硅衬底上通过电致发光获得发红、绿、蓝色的LED（发光二极管）。

### 硅纳米微粒发光原因的解释：

- Tabagi 认为是载流子的量子限域效应引起的；
- Brus则认为是硅粒径小到某一程度时，结构的平移对称性消失，导致发光。

# 量子尺寸效应

## 纳米颗粒光吸收频率的变化 (蓝移和红移现象)

与非纳米材料相比，纳米微粒的吸收带普遍存在“蓝移现象”（吸收带向短波方向偏移）和“红移”现象（吸收带向长波方向偏移）。

蓝移的案例：纳米SiC颗粒和普通SiC固体的红外吸收频率峰值分别是 $814\text{cm}^{-1}$ 和 $794\text{cm}^{-1}$ 。

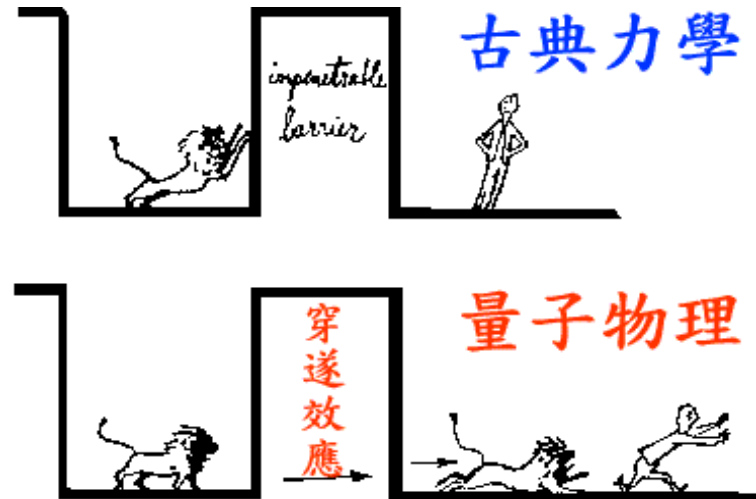
### 解释：

- 根据量子尺寸效应，由于颗粒尺寸下降**能隙变宽**，这就导致光吸收带移向短波方向（蓝移）。
- 根据表面效应，由于纳米微粒颗粒小，大的**表面张力使晶格畸变**，晶格常数变小。键长的缩短导致纳米微粒的本征振动频率增大，结果使光吸收带移向了长波方向（红移）。
- 光吸收带的位置是由影响峰位的蓝移因素和红移因素共同作用的结果，如果前者的影响大于后者，吸收带蓝移，反之红移。

**应用：设计和制备波段可控的新型纳米光吸收材料。**

# 量子隧穿效应

- 根据量子力学的基本理论，当微观粒子被高度和厚度均为有限的势垒所限域时，即使该微观粒子所具有的能量低于势垒高度，微观粒子仍有一定的概率出现在势垒限域区之外。就像是微观粒子在势垒壁上打了个洞而跑出，这种现象就称为微观粒子的隧穿效应。
- 量子力学的观点来看，电子具有波动性，其运动用波函数描述，而波函数遵循薛定谔方程，从薛定谔方程的解就可以知道电子在各个区域出现的概率密度，从而能进一步得出电子穿过势垒的概率。

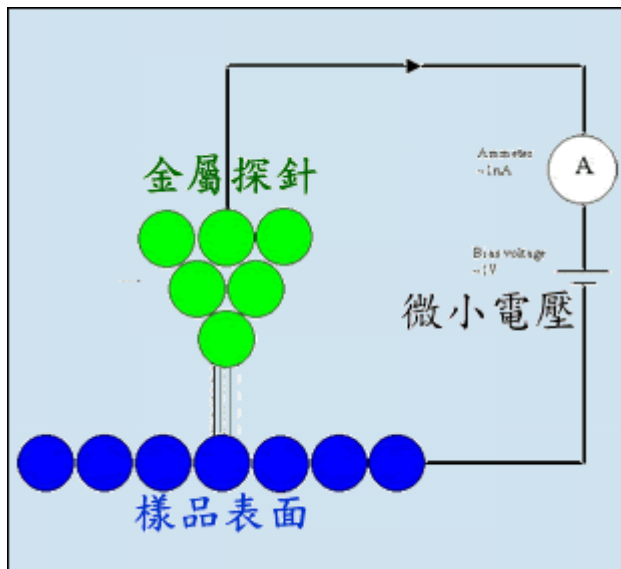


The difference between classical theory and quantum theory, illustrating tunneling through potential barrier. This illustration was used by Van Vleck in his last publication, the Julian E. Mack Lecture at his Alma Mater, the University of Wisconsin, in 1979. (After B. Bleaney, Contemp. Phys. 25 (1984) 320.)

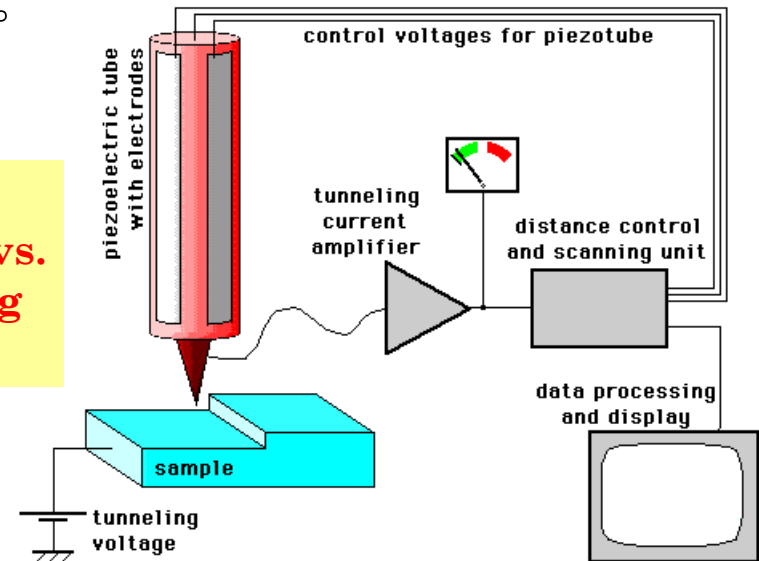
# 量子隧穿效应

## 仪器设备领域应用：扫描隧道显微镜（STM）

- 利用电子隧穿效应，如果两电极相距很近，并在其间加上微小电压，则探针所在的位置便有隧穿电流产生。
- 利用探针与样品表面的间距和隧穿电流有十分灵敏的关系，当探针以设定的高度扫描样品表面时，样品表面的形貌导致探针和样品表面的间距变化，隧穿电流值也随之改变。
- 借探针在样品表面上来回扫描，并记录在每个位置点上的隧穿电流值，便可得知样品表面原子排列情况。

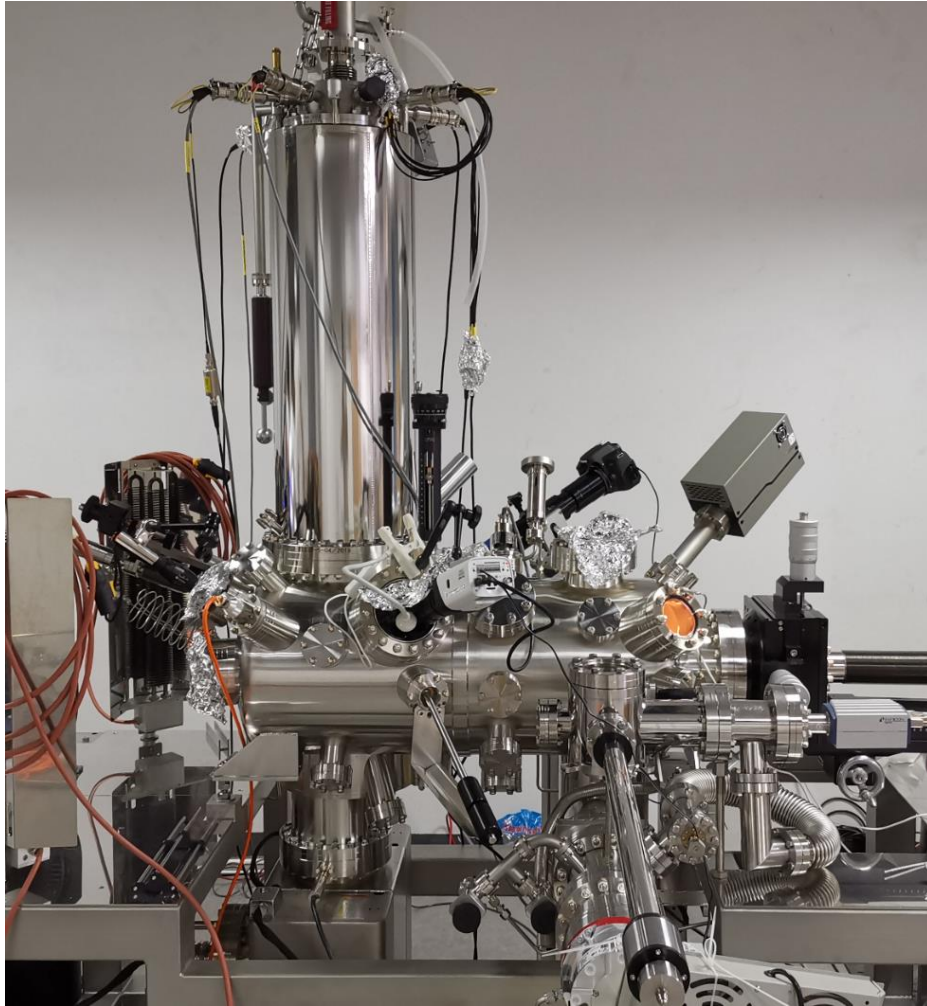


**Tunneling current vs. tunneling distance**



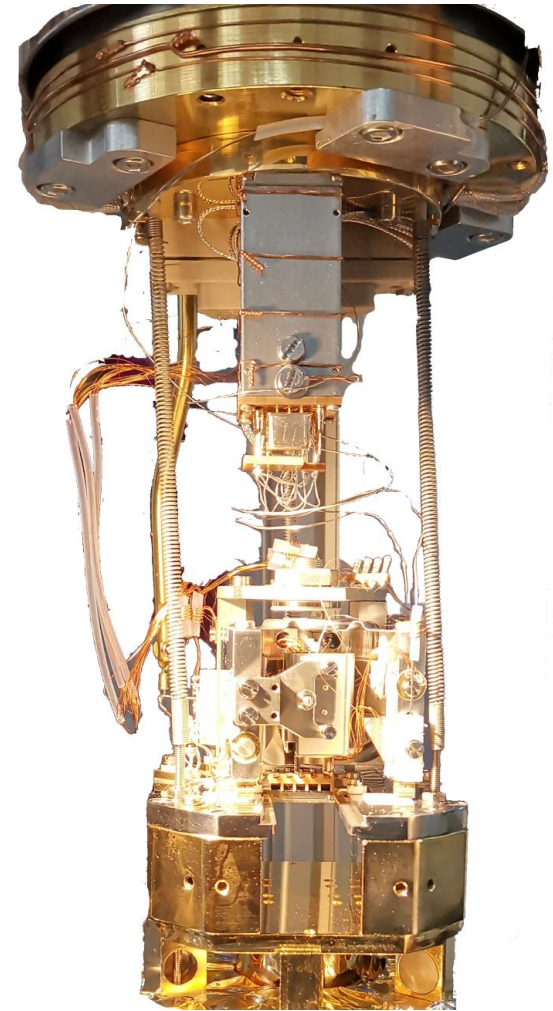
**How an STM works ...**

# Scanning Tunneling Microscopy

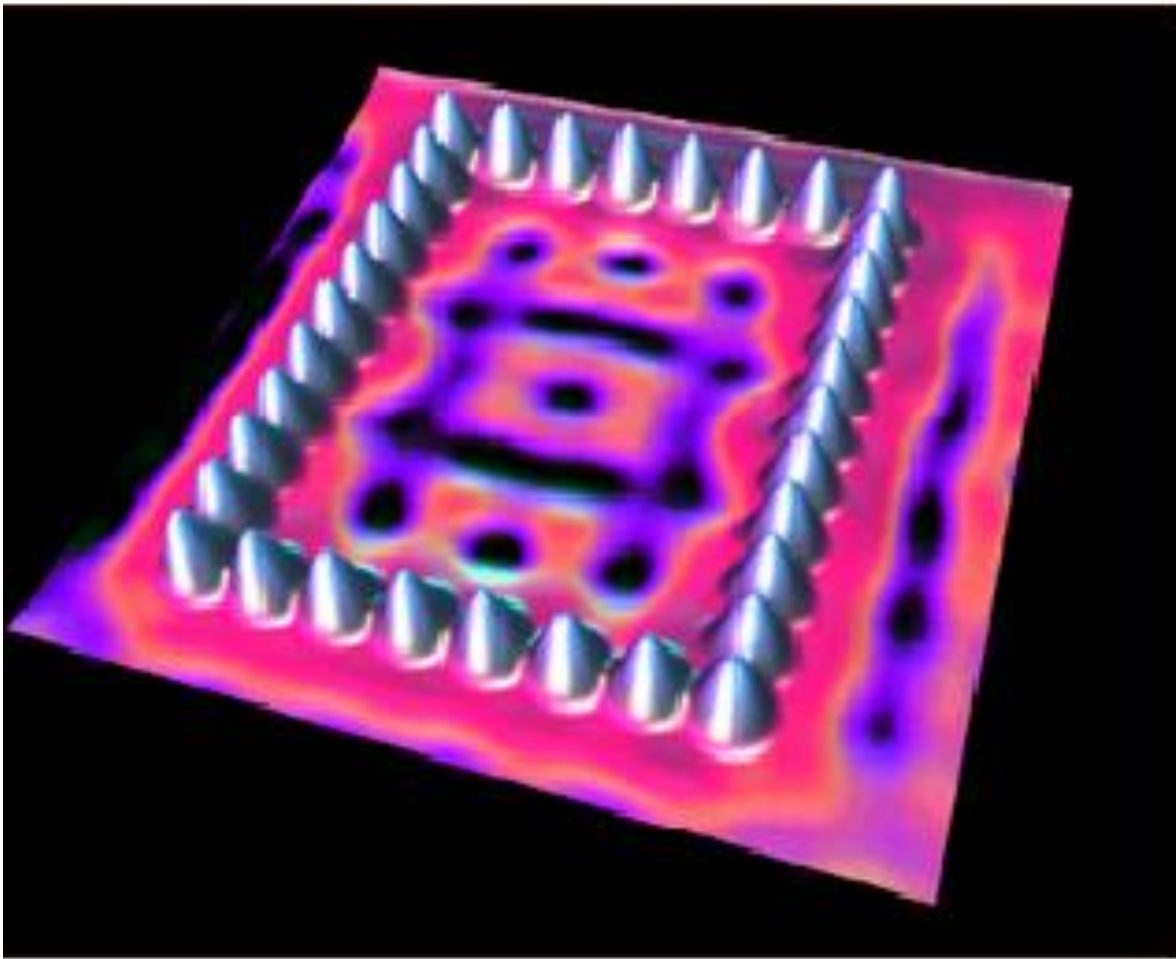


@ 物电院A栋

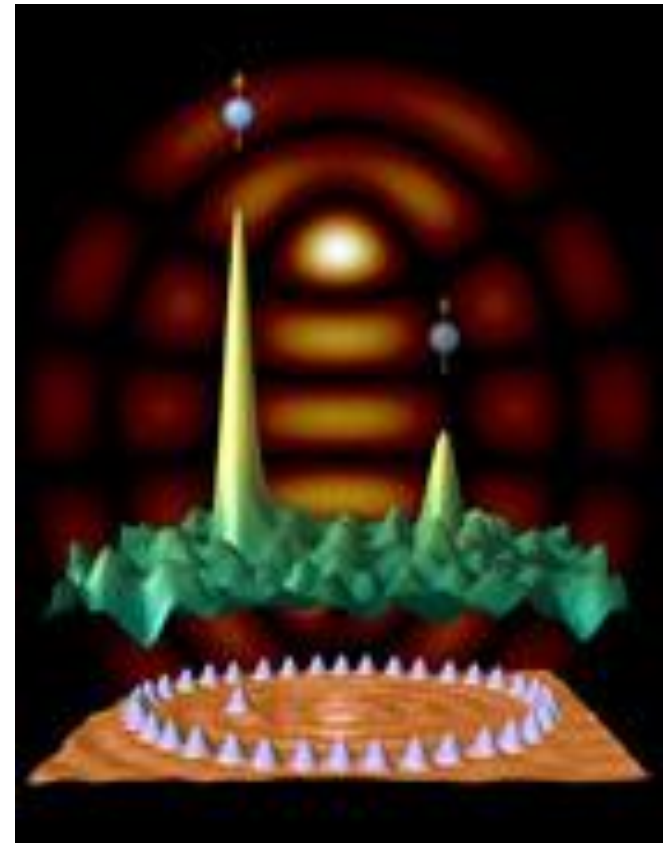
- $T \sim 5\text{ K}$
- $+AFM$

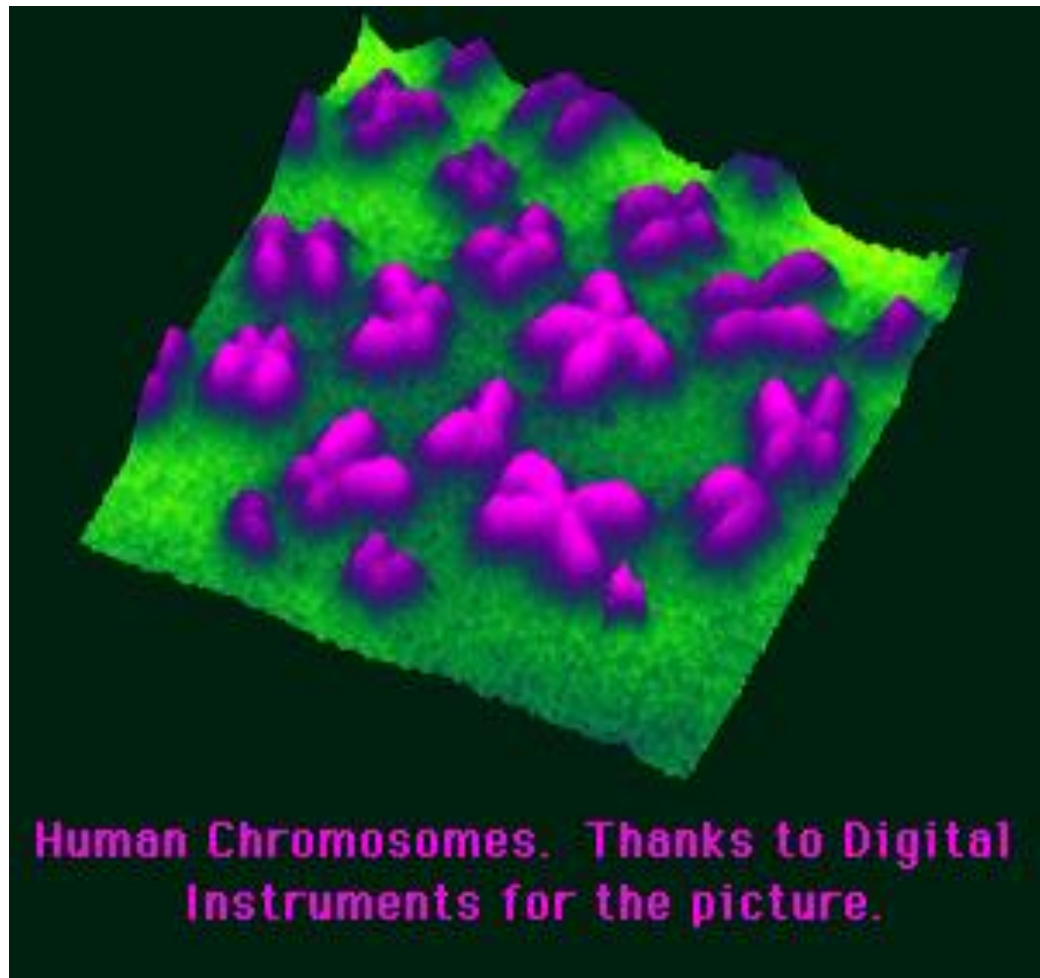


STM&AFM From CreaTec

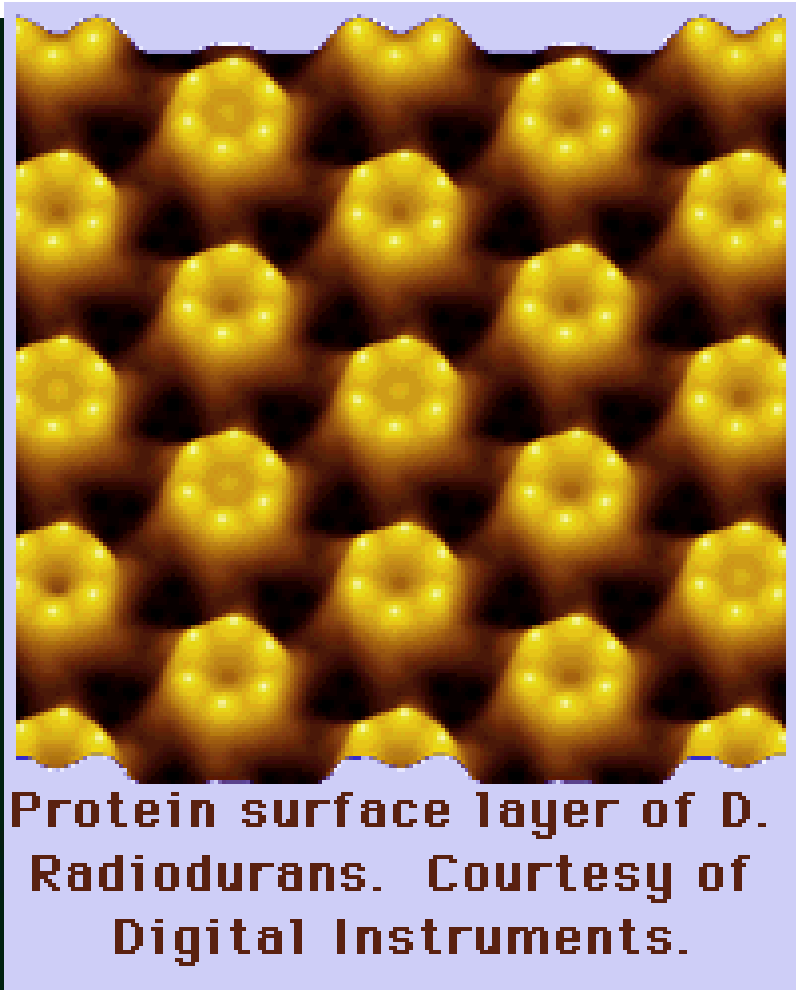


Scanning tunneling micrograph of a square Fe atom corral on a Cu substrate.



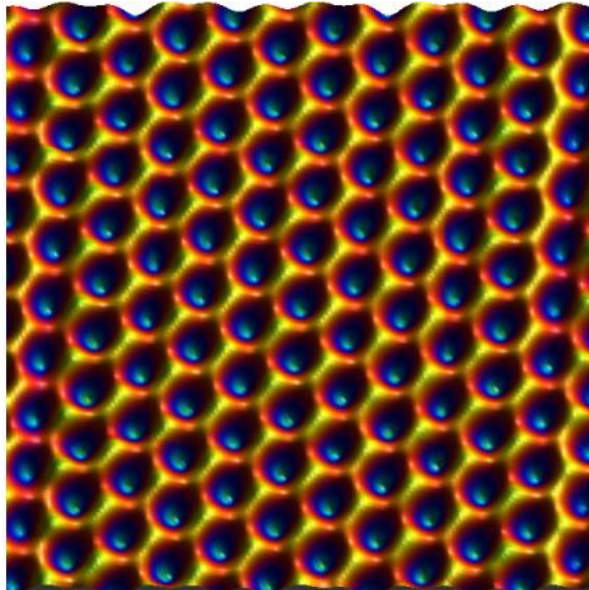


染色体

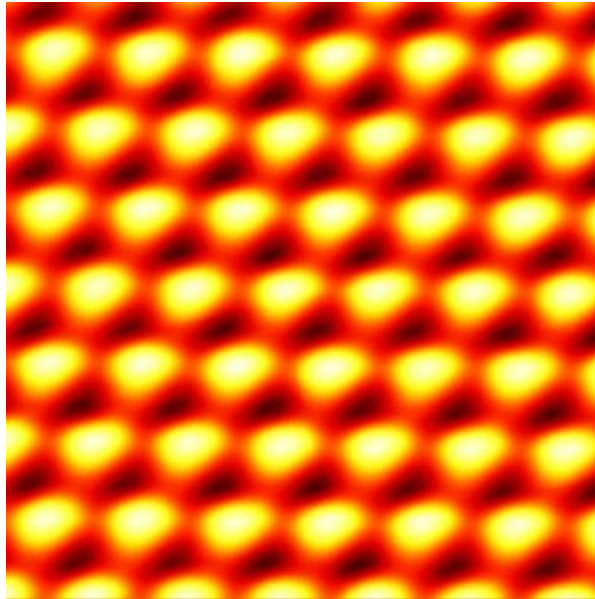


蛋白质

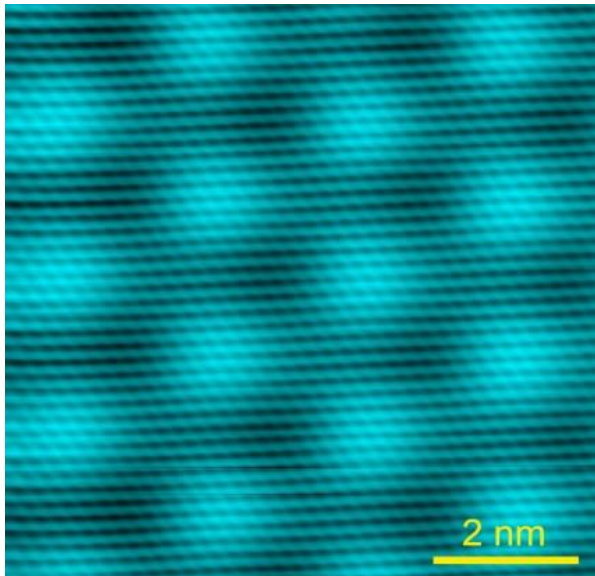
**Graphene**



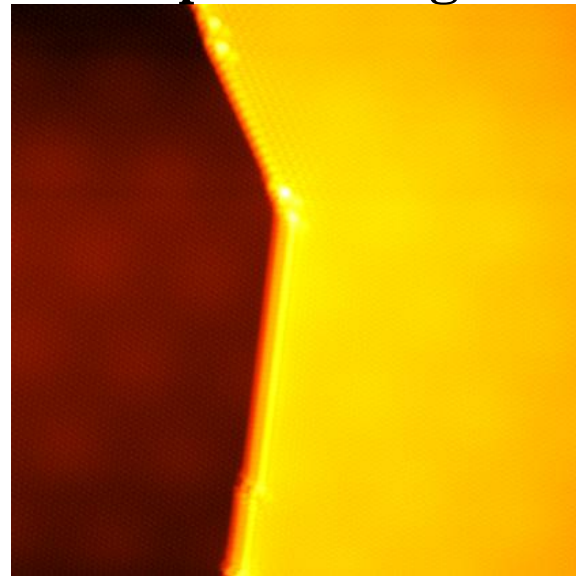
**Bilayer Graphene**



**Twisted Graphene**



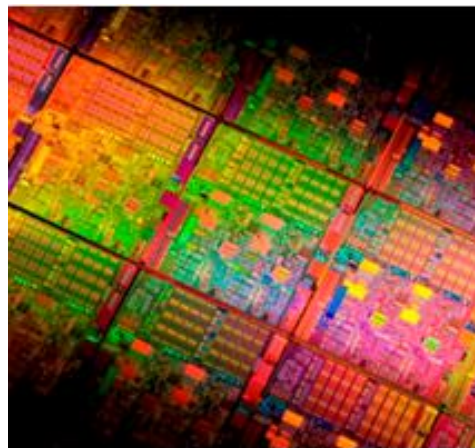
**Graphene edge**



# 量子隧穿效应

给微电子学科和电子器件带来的变革

在制造半导体集成电路时，当电路的尺寸接近电子波长时，电子就通过隧道效应而溢出器件，使器件无法正常工作，经典电路的极限尺寸大概在 $0.25\mu\text{m}$ 。



**单电子晶体管：**用一个或者少量电子就能记录信号的晶体管。目前一般的存储器每个存储元包含了20万个电子，而单电子晶体管每个存储元只包含了一个或少量电子，因此它将大大降低功耗，提高集成电路的集成度。

# 总结：纳米体系基本效应所导致的性能与应用

	热学	光学	力学	化学	电学
表面效应				表面活性光催化	
小尺寸效应	低温烧结，低温晶化	宽频强吸收的太阳黑体	陶瓷增韧		
量子尺寸效应		蓝移红移，半导体光致发光			金属与陶瓷的电阻特性
量子隧道效应					微电子器件，STM

