

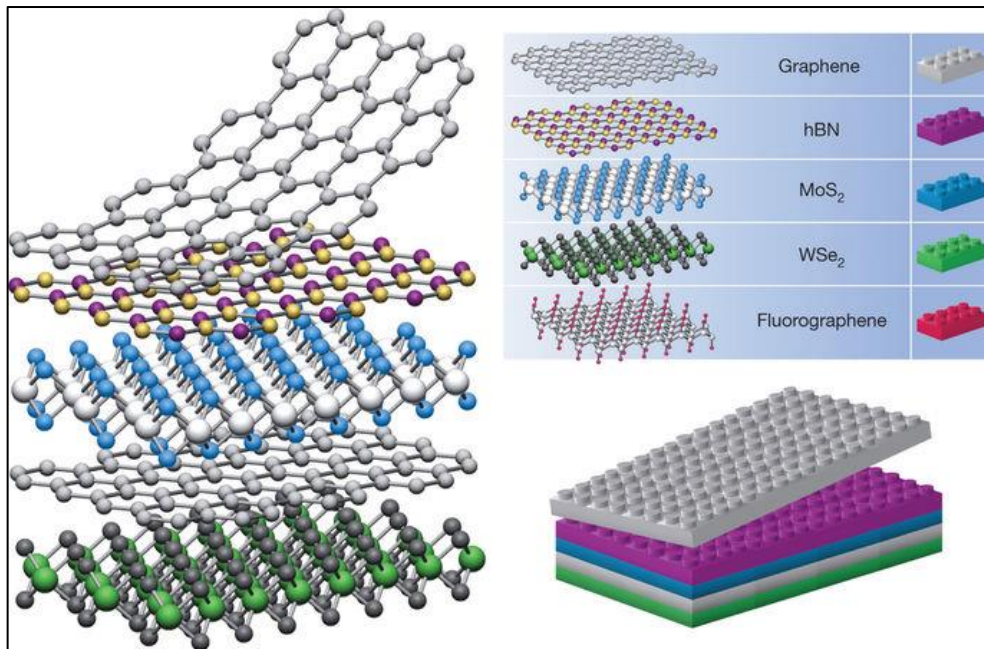
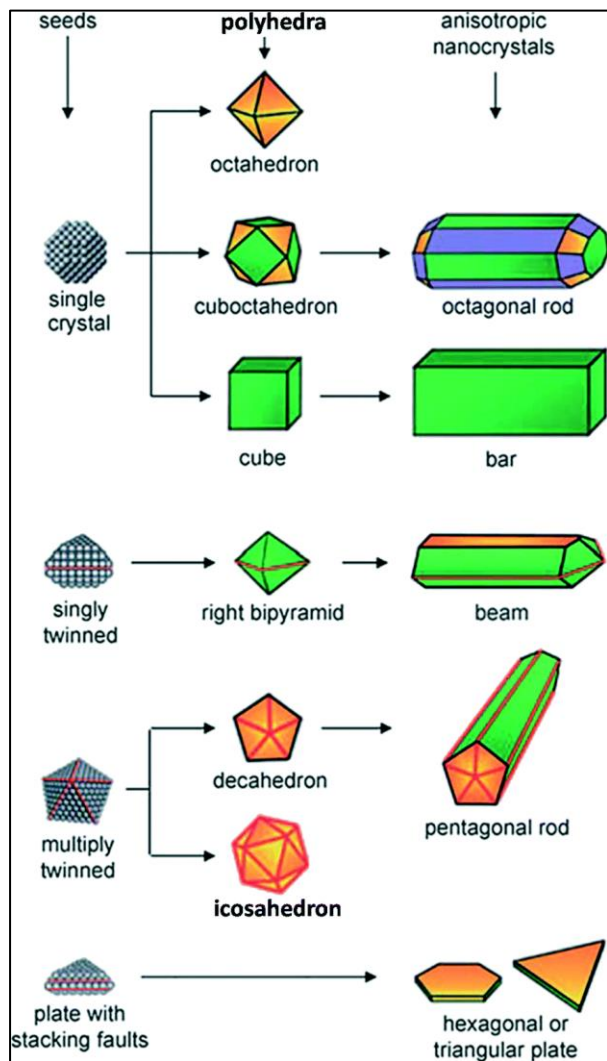
# 几何光学 与 光学仪器

## 微纳加工简介

高宇南

物理学院 现代光学研究所

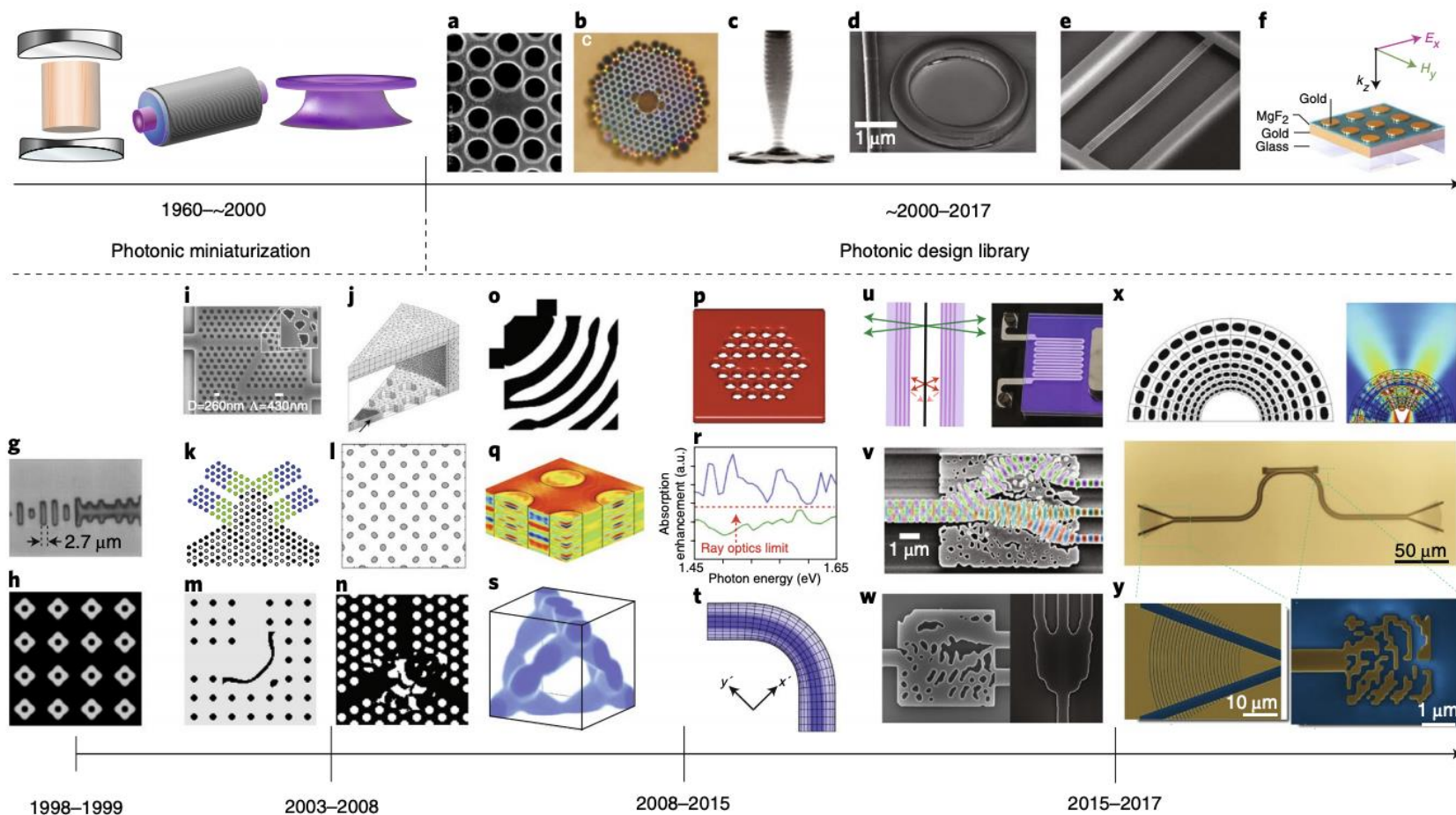
# 微纳米尺度材料和技术



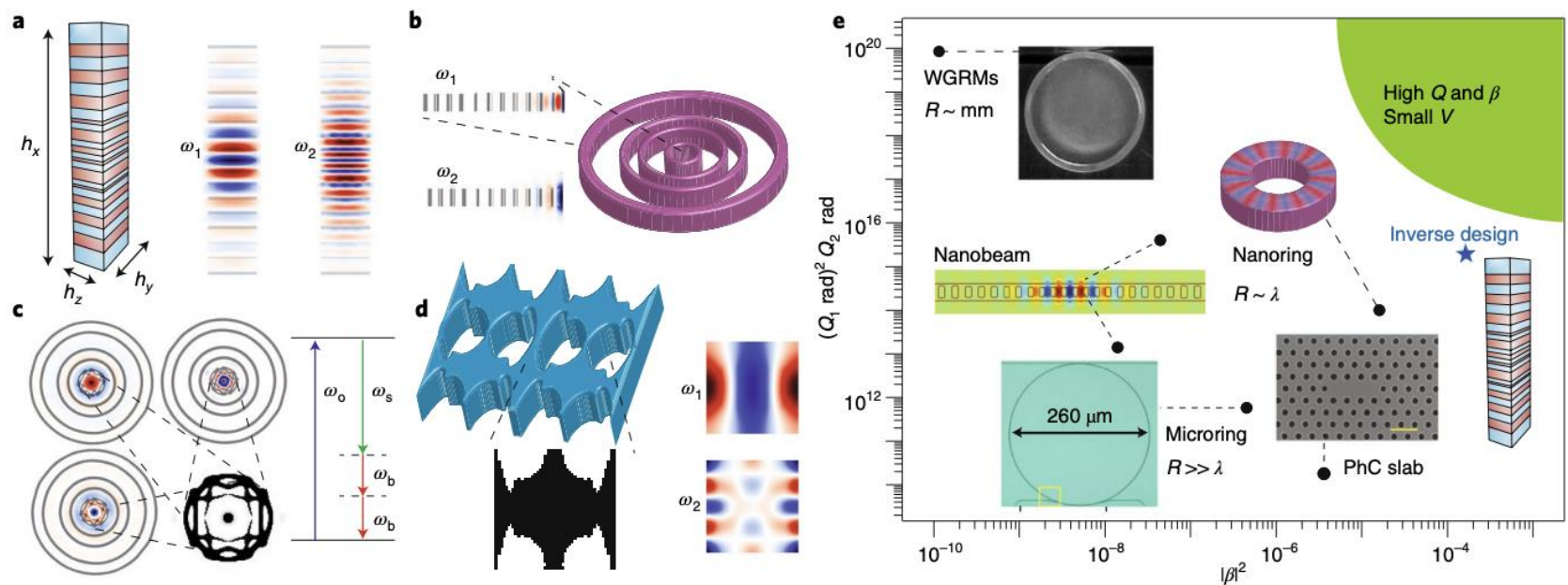
二维材料

# 微纳米尺度材料和技术

## 各种微纳光学微腔

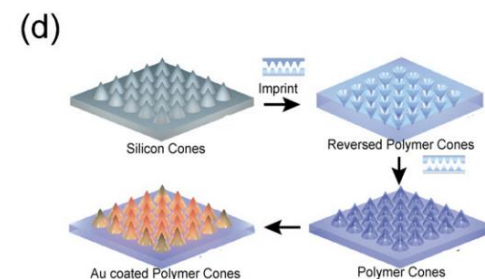
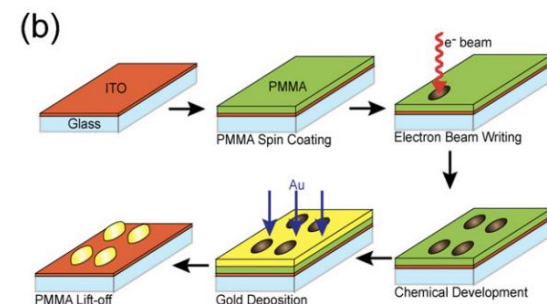
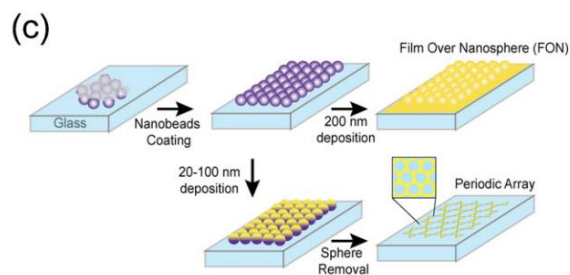
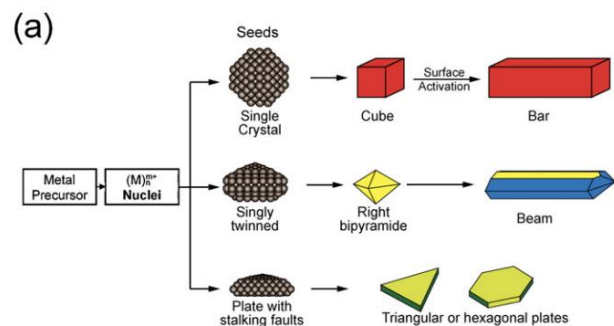
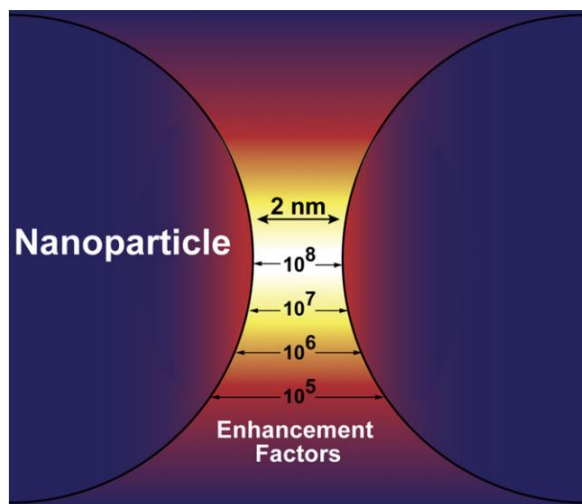


# 微纳米尺度材料和技术



# 微纳米尺度材料和技术

## 金属微纳结构，表面等离子激元





# 微纳加工技术

## 自上而下的制备加工技术

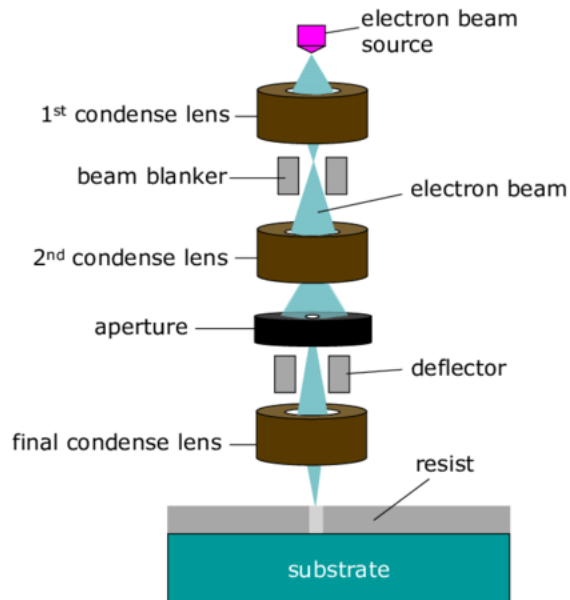
技术	精度	应用
电子束 Electron Beam Lithography (EBL)	1 nm	<ul style="list-style-type: none"><li>● 实验室</li><li>● 产业 (掩模板)</li></ul>
聚焦离子束 Focus Ion Beam (FIB)	10 nm	<ul style="list-style-type: none"><li>● 实验室</li></ul>
飞秒激光直写	300 nm	<ul style="list-style-type: none"><li>● 实验室</li></ul>

技术	精度	应用
极紫外光刻 Extreme UV Lithography (EUVL)	<10 nm	<ul style="list-style-type: none"><li>● 产业 (电子集成芯片)</li></ul>
紫外光刻 UV Lithography (UVL)	100 nm	<ul style="list-style-type: none"><li>● 实验室</li><li>● 产业</li></ul>
纳米压印 Nano Imprint	10 nm	<ul style="list-style-type: none"><li>● 实验室</li></ul>
全息光刻	500 nm	<ul style="list-style-type: none"><li>● 实验室</li></ul>

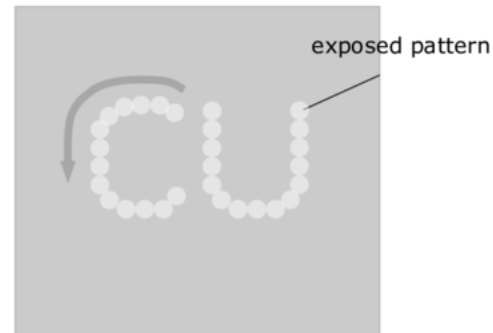
# 1. 电子束直写 (EBL)

## 自上而下的制备加工技术

电子束光刻是利用某些高分子聚合物对电子敏感而形成曝光图形的。



(a) Side view

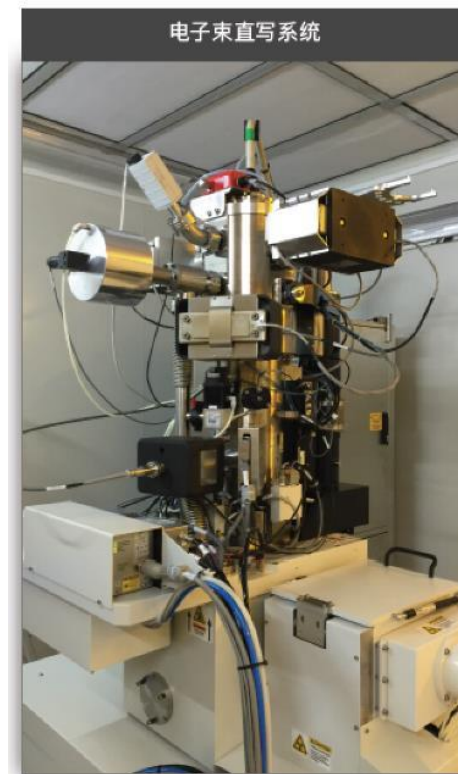
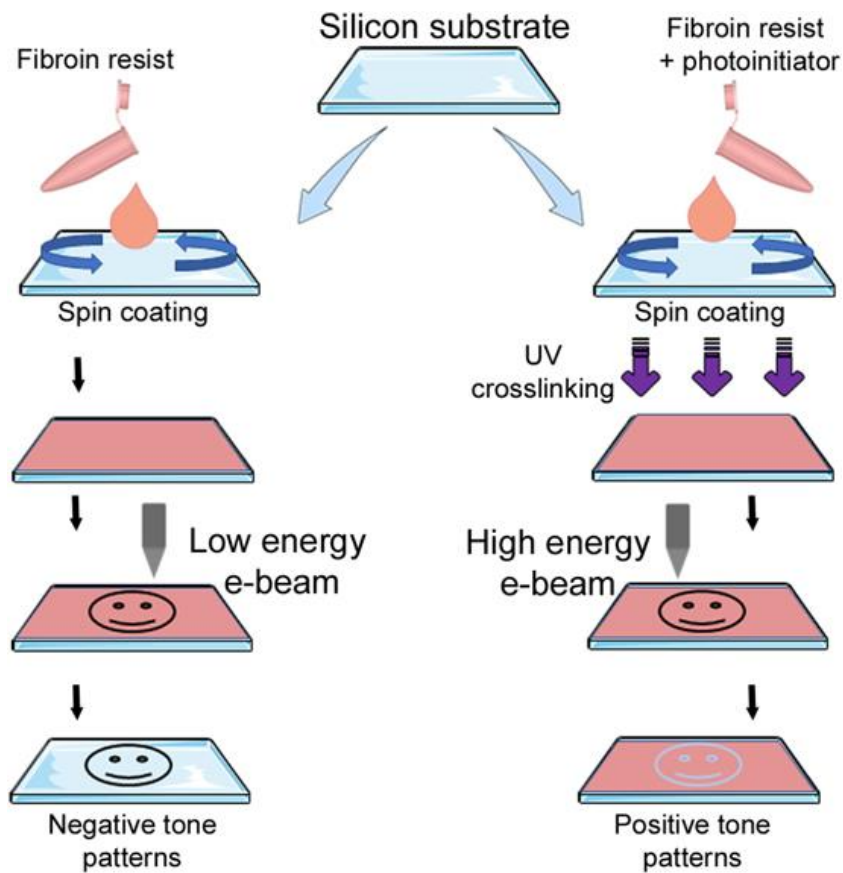


(b) Top view

# 1. 电子束直写 (EBL)

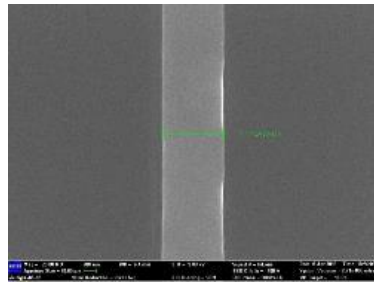
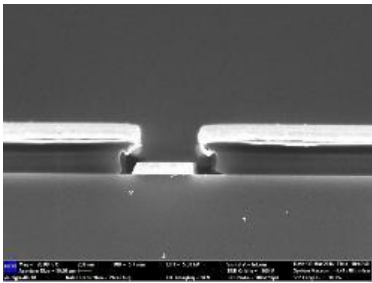
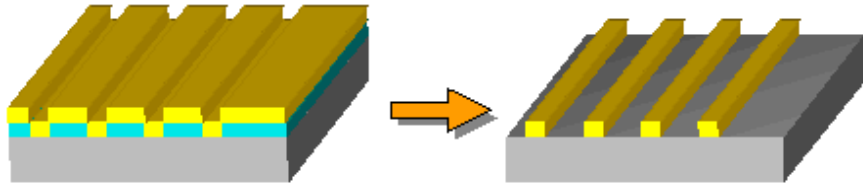
## 自上而下的制备加工技术

电子束光刻是利用某些高分子聚合物对电子敏感而形成曝光图形的。

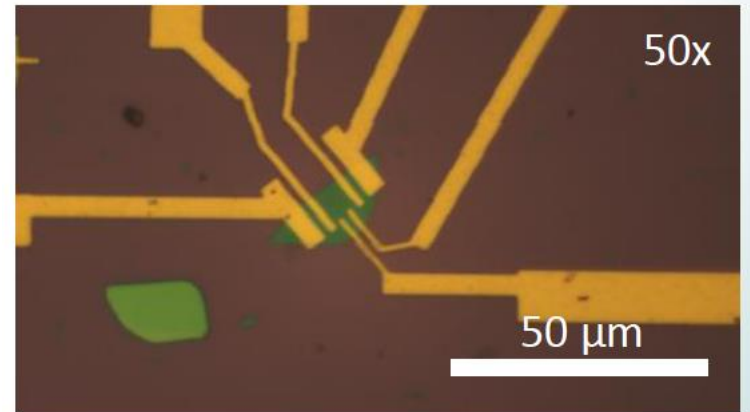
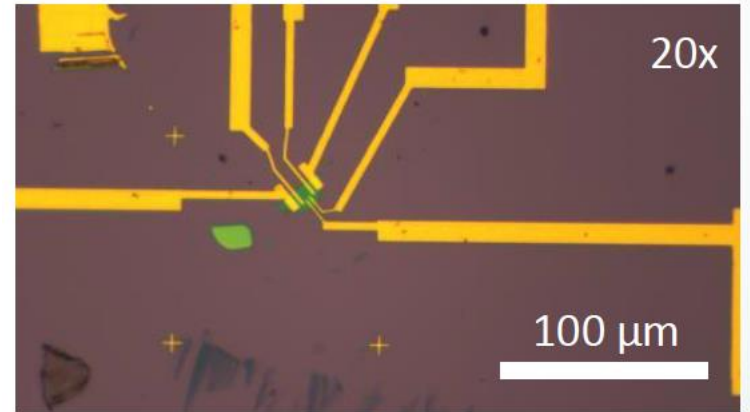




# 1. 电子束直写（EBL）+镀膜

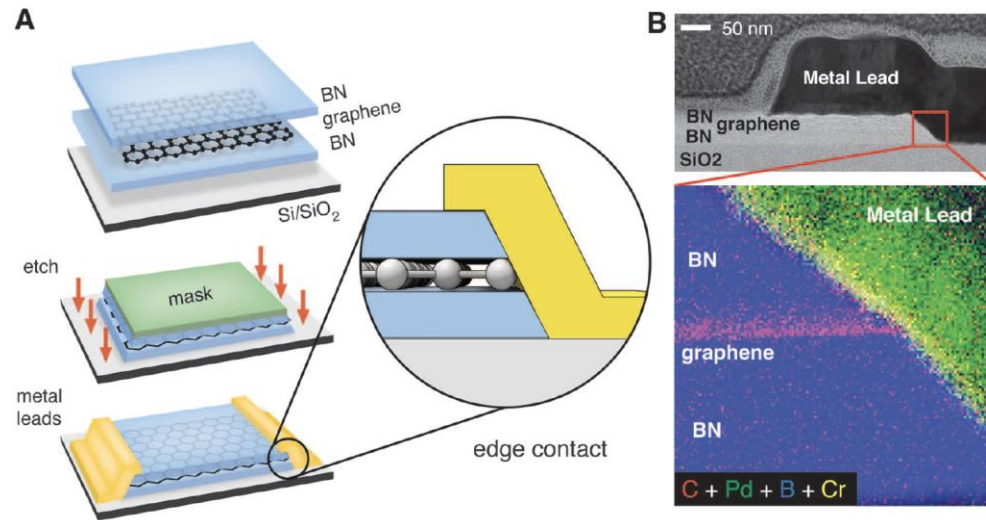


二维材料里电极的添加最常用的方法，施加对样品的电场调控



# 1. 电子束直写（EBL）+刻蚀+镀膜

The edge-contact fabrication process is illustrated in Fig. 1A. Beginning with a BN-G-BN heterostructure, a hard mask is defined on the top BN surface by electron-beam lithography (EBL) of a hydrogen-silsesquioxane (HSQ) resist. The regions of the heterostructure outside of the mask are then plasma-etched (see supplementary materials section 1.2) to expose the graphene edge. Finally, metal leads (1 nm Cr/15 nm Pd/60 nm Au) are deposited by electron beam evaporation to make electrical contact along this edge (other metal combinations showed inferior performance) (table S1). In Fig. 1B, a cross section scanning



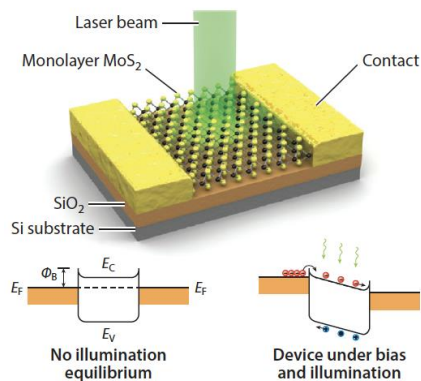
- 写图案
- 刻蚀
- 镀电极

*Science* 01 Nov 2013:

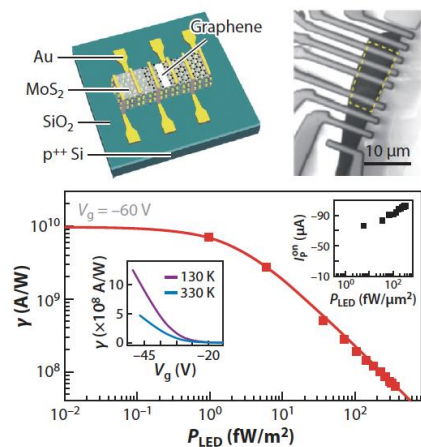
Vol. 342, Issue 6158, pp. 614-617

DOI: 10.1126/science.1244358

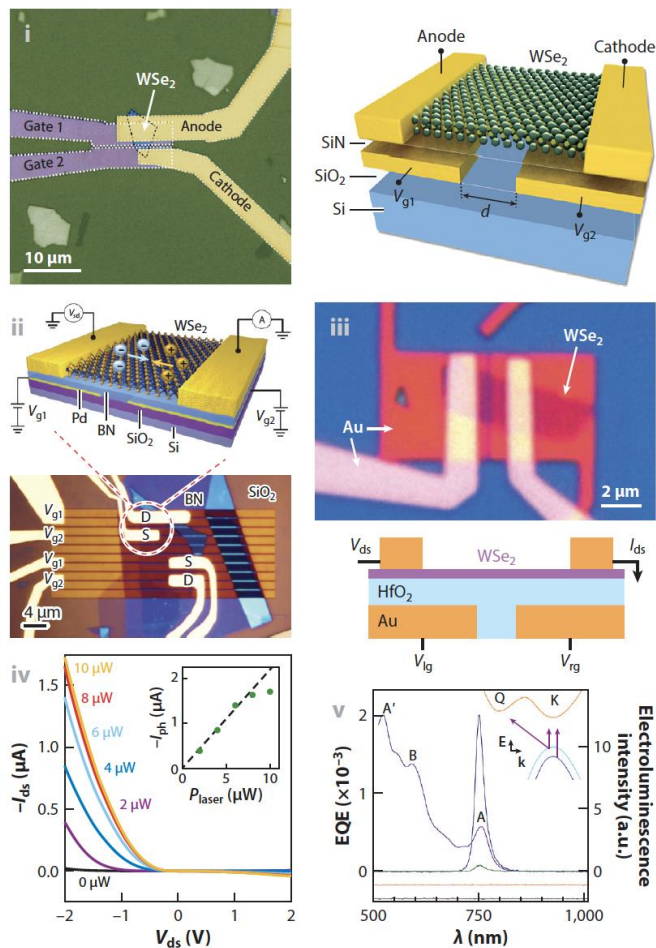
**a** Phototransistor based on monolayer MoS<sub>2</sub>



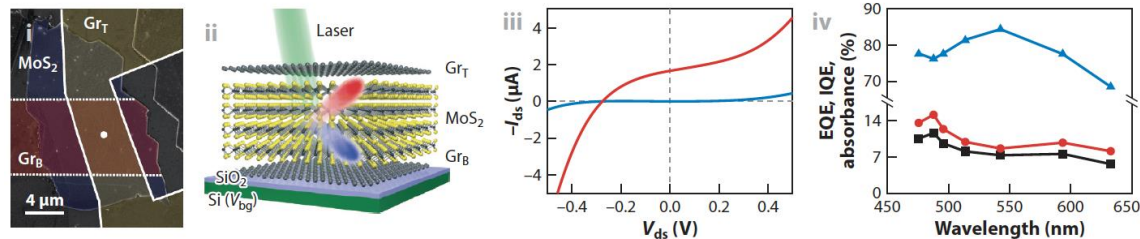
**b** Graphene-MoS<sub>2</sub> heterojunction phototransistor



**c** Electrostatically doped WSe<sub>2</sub> *p-n* diodes



**d** Graphene-MoS<sub>2</sub>-graphene heterojunction photodiode



## 2. 镀膜方法

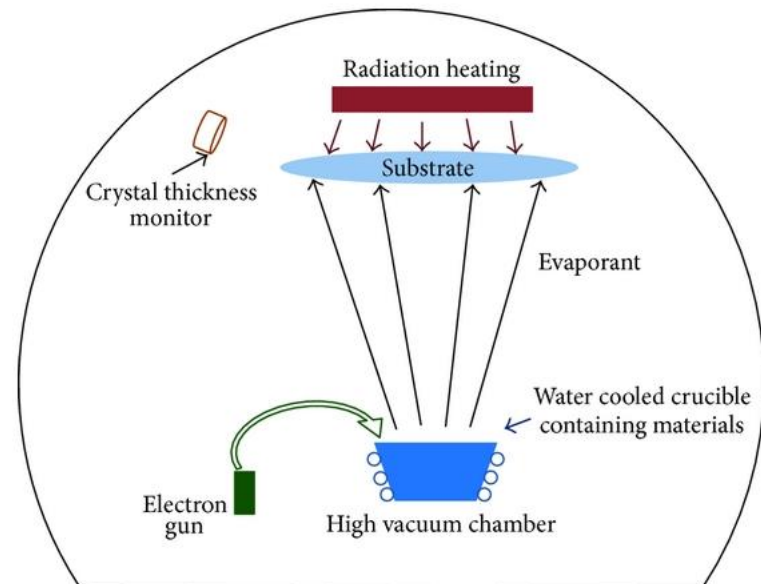
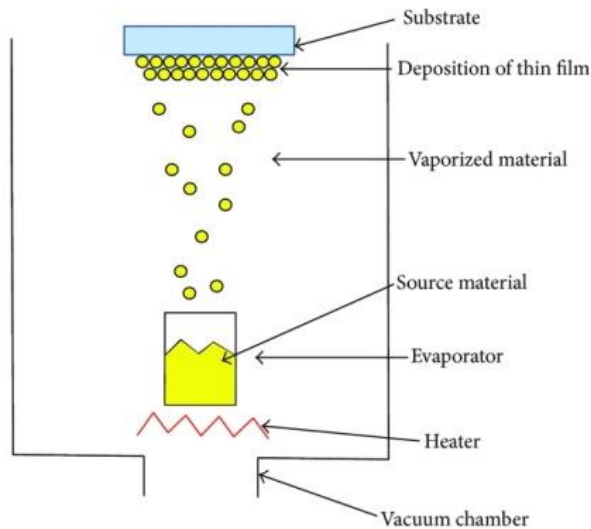
---

- 物理气相沉积 Physical Vapor Deposition  
靶材或者靶料上的物质在热或者轰击作用下，表面的原子飞向样品表面；
- 化学气相沉积 Chemical Vapor Deposition  
利用(气相、液相等)化学反应，在样品表面生成薄膜。
- 原子层沉积 Atomic Layer Deposition  
通过反应气体与样品表面之间的单层化学反应，来实现薄膜材料的逐层沉积

## 2. 镀膜方法 – 物理气相沉积

---

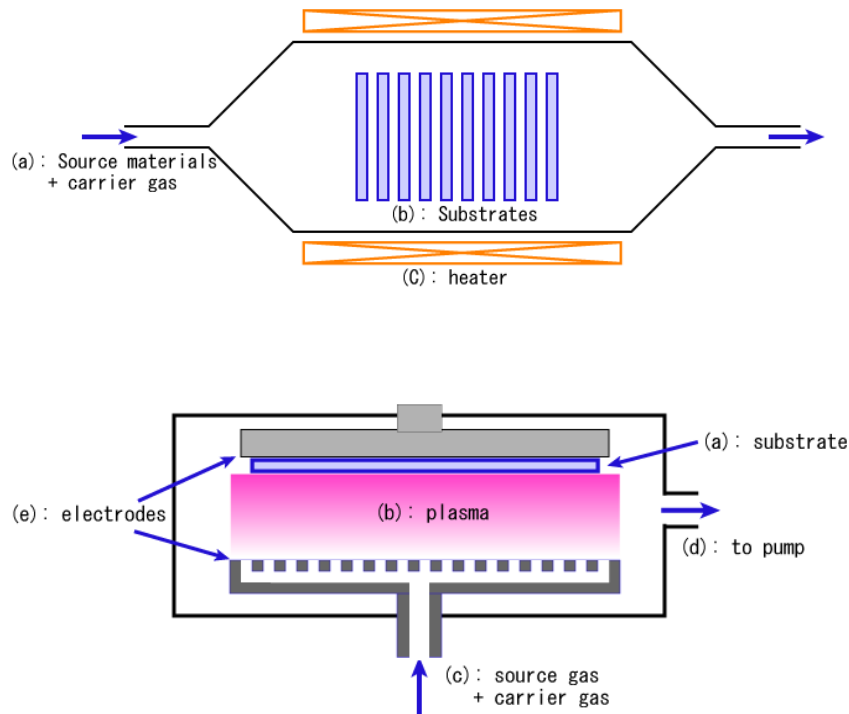
- 沉积方法：热蒸发、电子束蒸发、溅射(直流、射频、脉冲直流)、离子束溅射镀膜等
- 薄膜材料种类多：金属、非金属等



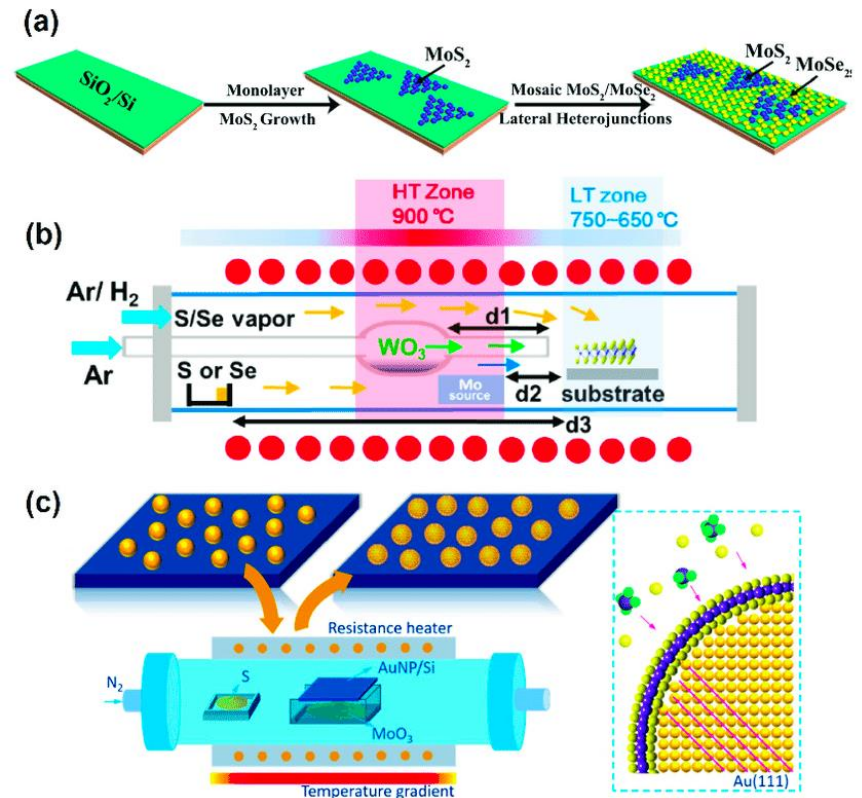


## 2. 镀膜方法 – 化学气相沉积

- 薄膜材料：二氧化硅，多晶硅，氮化硅等
- 沉积薄膜为多层多晶材料



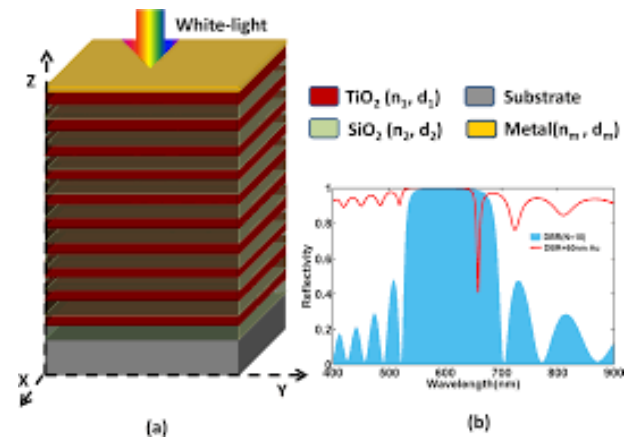
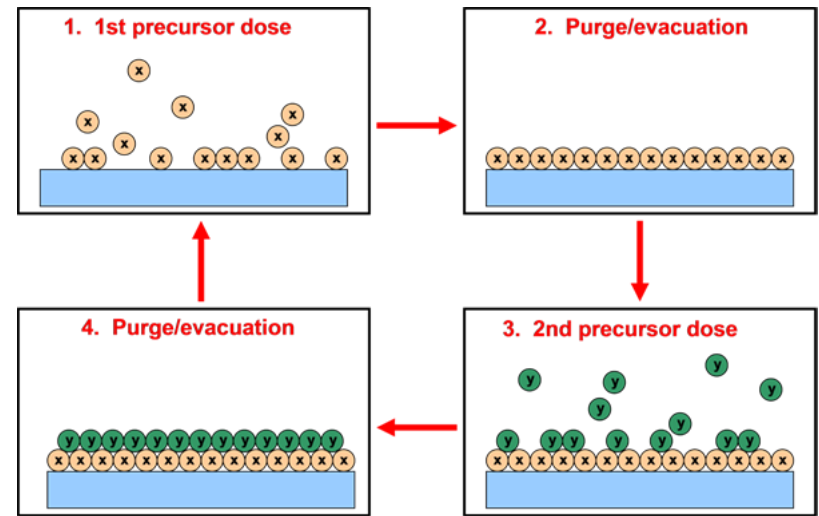
*plasma enhanced CVD*





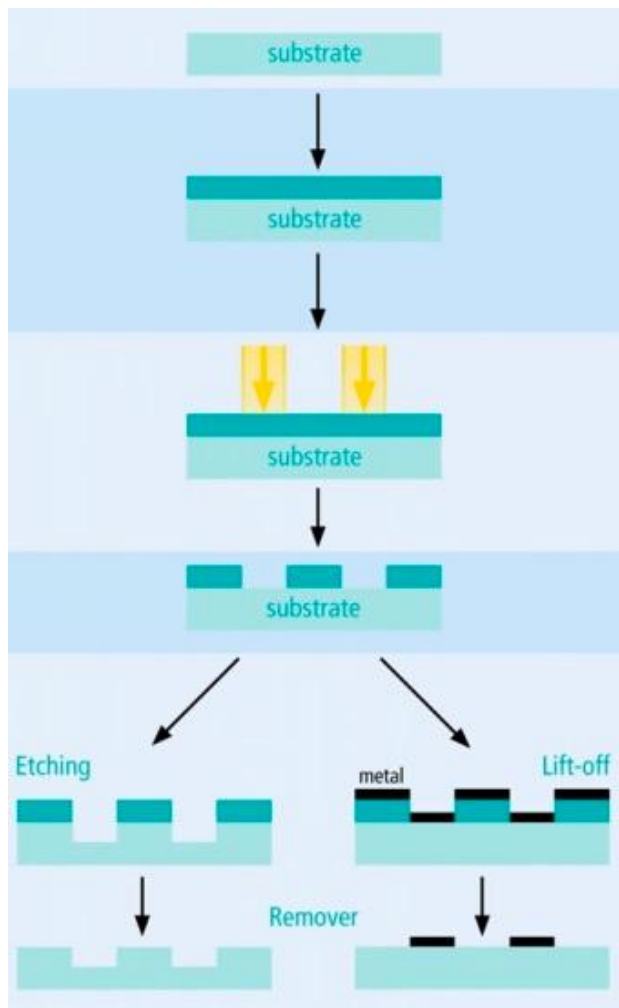
## 2. 镀膜方法 – 原子层沉积

- 可沉积多种非金属薄膜材料
- 沉积薄膜为单晶
- 可精确控制厚度到原子层精度



### 3. 刻蚀方法

---



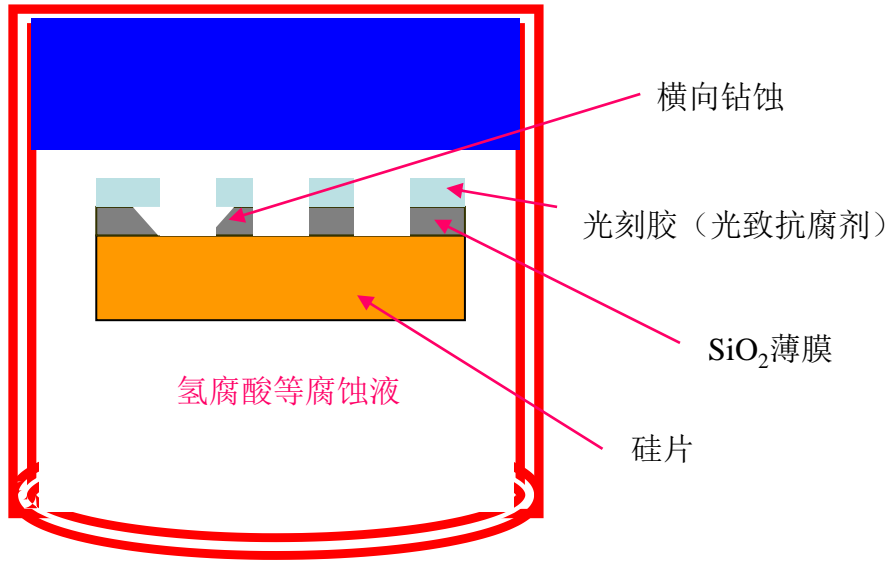
- **湿法刻蚀**

将样品浸入到化学刻蚀液中，通过控制反应条件来调控刻蚀过程。一般来讲设备和工艺较为简单，但是可控性和可重复性较差。

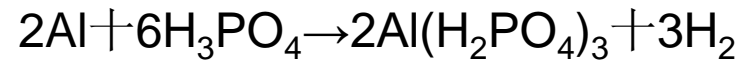
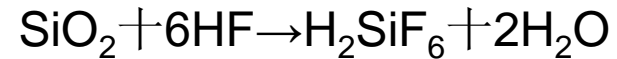
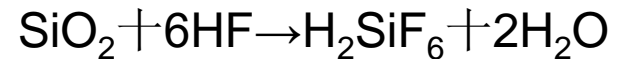
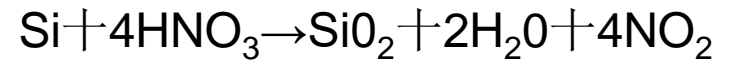
- **干法刻蚀**

工艺气体和样品表面发生物理或者化学过程，使得样品表面的材料生成易挥发物，并被真空泵带走。刻蚀材料范围广。

### 3. 刻蚀方法 – 湿法刻蚀

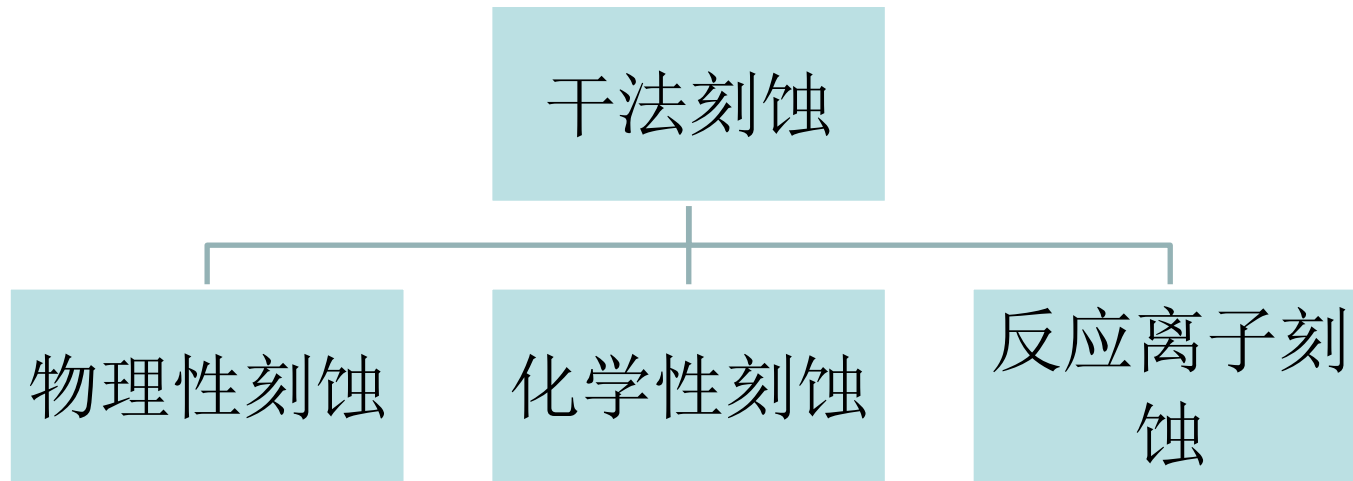


各向同性刻蚀性太强，容易出现横向钻蚀现象



### 3. 刻蚀方法 – 干法刻蚀

---



### 3. 刻蚀方法 – 干法刻蚀

---

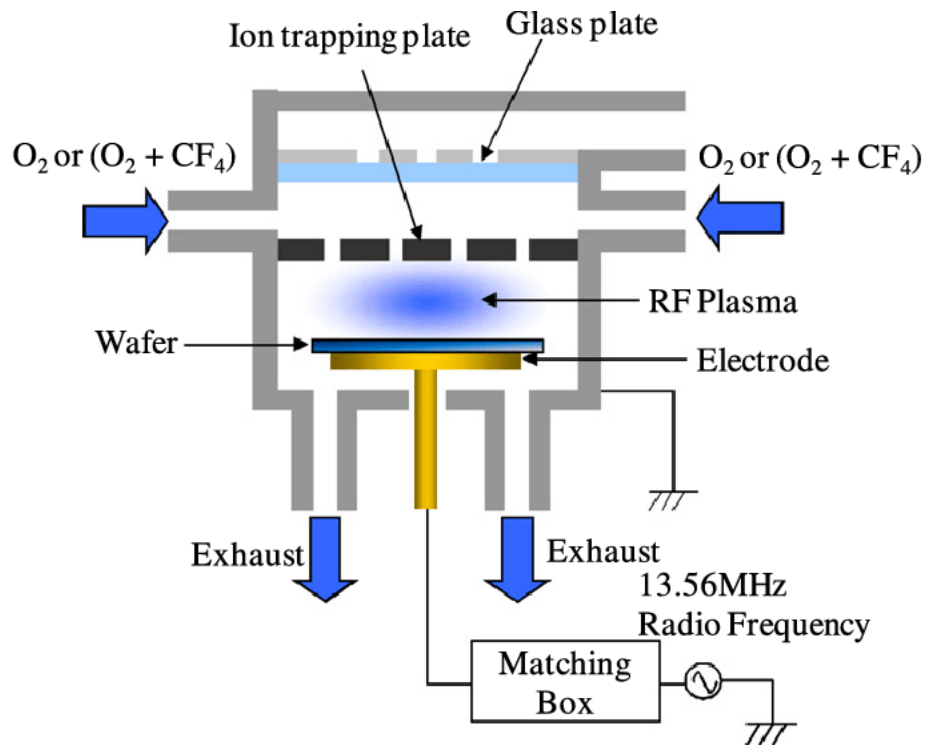
物理性刻蚀是利用辉光放电将气体(如Ar气)电离成带正电的离子，再利用偏压将离子加速，溅击在被刻蚀物的表面而将被刻蚀物的原子击出，该过程完全是物理上的能量转移，故称为物理性刻蚀。

化学刻蚀：又称等离子体刻蚀，是利用等离子体将刻蚀气体电离并形成带电离子、分子及反应性很强的原子团，它们扩散到被刻蚀薄膜表面后与被刻蚀薄膜的表面原子反应生成具有挥发性的反应产物，并被真空设备抽离反应腔。因这种反应完全利用化学反应，故称为化学性刻蚀。

反应离子刻蚀（RIE），结合物理性的离子轰击与化学反应。

### 3. 刻蚀方法 – 干法刻蚀

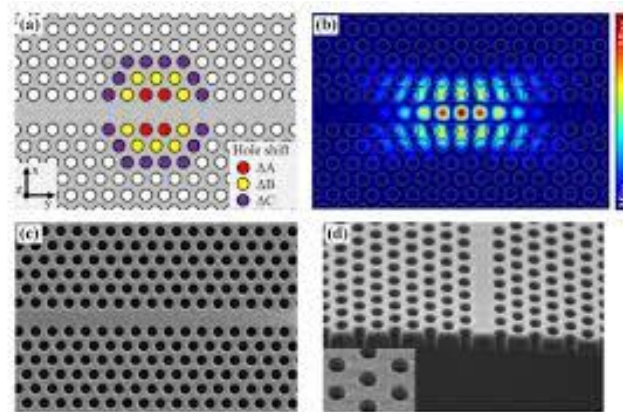
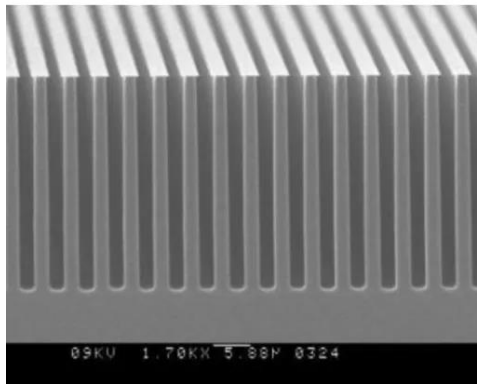
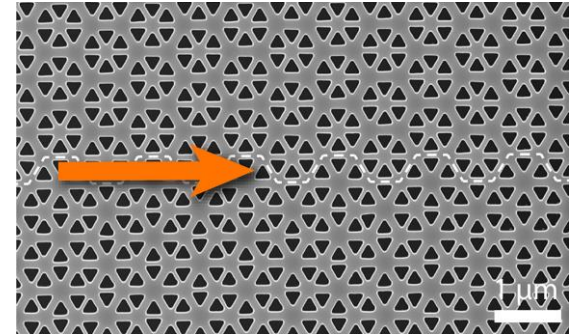
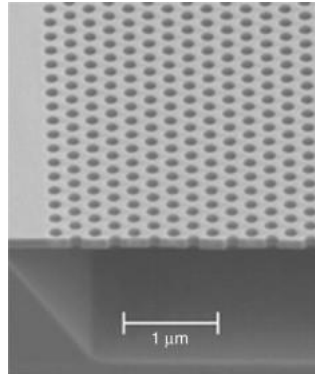
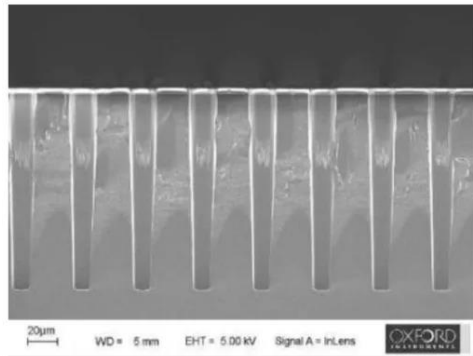
等离子体刻蚀      Reactive-ion etching



Inductively coupled plasma (ICP) RIE. In this type of system, the plasma is generated with a radio frequency (RF) powered magnetic field. Very high plasma densities can be achieved, though etch profiles tend to be more isotropic.

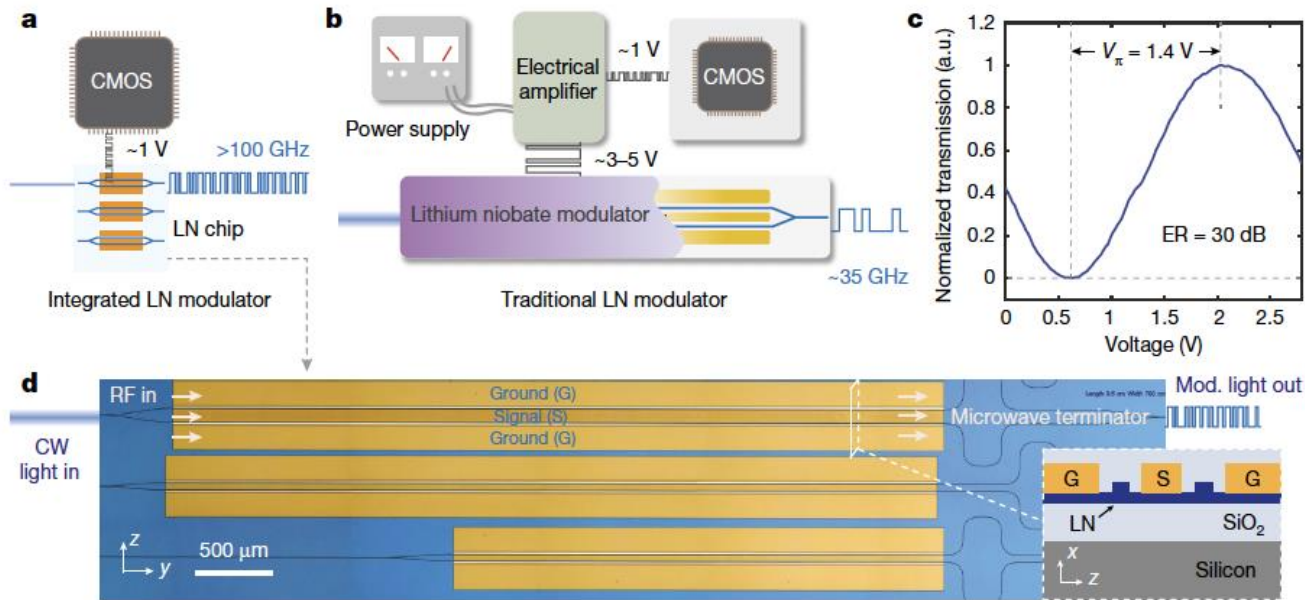


### 3. 刻蚀方法—干法刻蚀



光子晶体

### 3. 刻蚀方法 – 干法刻蚀

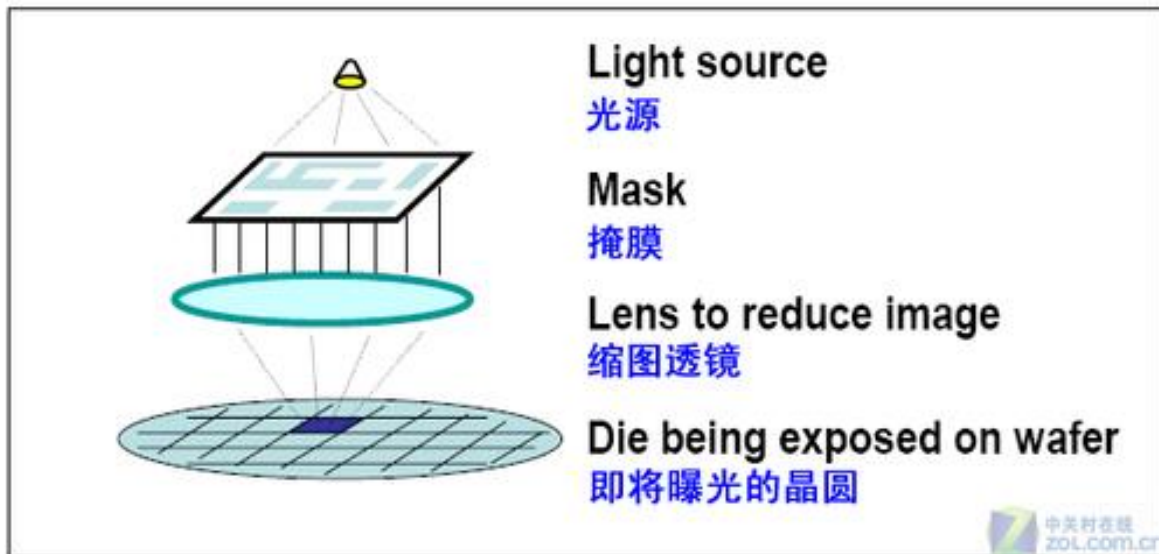


- 结构设计
- 刻蚀
- 镀膜

基于铌酸锂的光调制器

## 4. 光学曝光

---



## 4. 光学曝光

---

- **IC制造中最重要的工艺：**①决定着芯片的最小特征尺寸②占芯片制造时间的40-50%③占制造成本的30%
- **光刻：**通过光化学反应，将光刻版（mask）上的图形转移到光刻胶上。
- **刻蚀：**通过腐蚀，将光刻胶上图形完整地转移到Si片上
- **光刻三要素：**①光刻机②光刻版（掩膜版）③光刻胶
- **对光刻的要求：**高分辨率；高灵敏的光刻胶；  
低缺陷；精密的套刻对准；

与电子束曝光的重要区别是，需要光刻板，光刻板一般通过电子束曝光写出，适合大规模制造，灵活性差

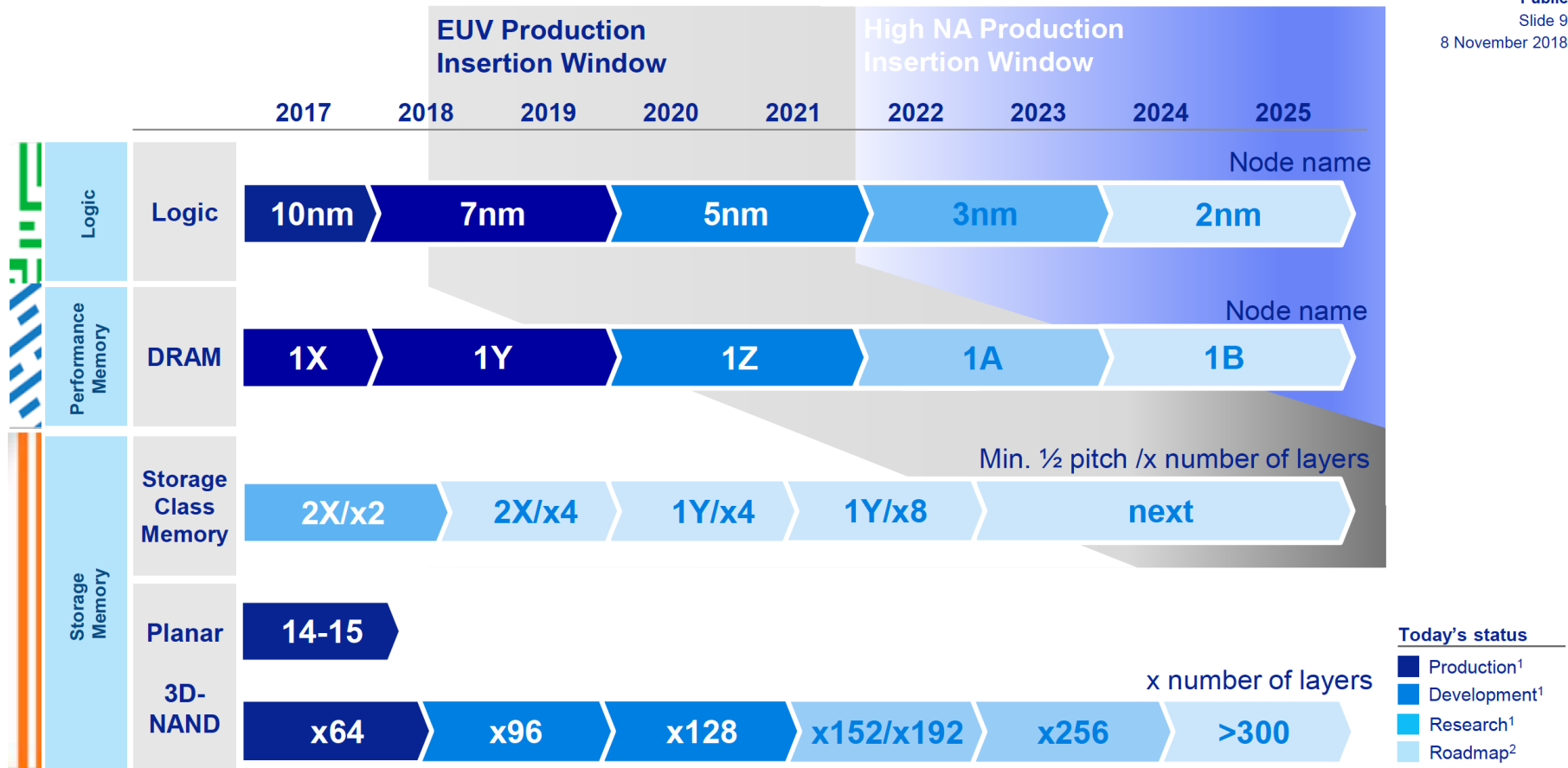
# Customers' scaling roadmaps continue

**ASML**

Public

Slide 9

8 November 2018



Source: <sup>1</sup> Customers public statements, IC Knowledge LLC; <sup>2</sup> ASML extrapolations

不是超高精度的下，曝光机可以做um尺度的图案化

## 光刻机/紫外曝光机

## 技术规格

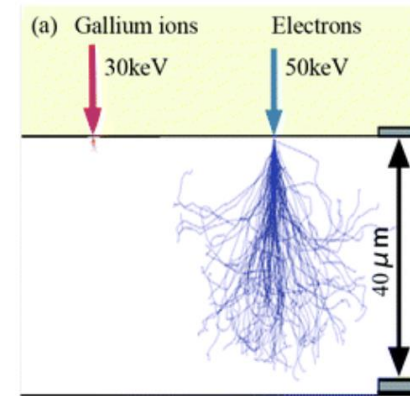
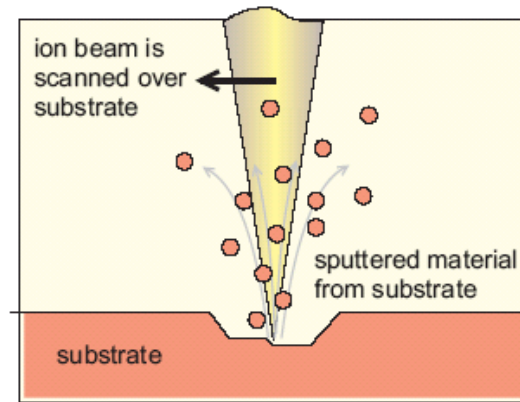
项目 \ 模型	MDA-400M	MDA-400S	MDA-60MS	MDA-80SA/12SA
基底	Up to 4" Substrate	Up to 6" Substrate	Up to 6 / 8" Substrate	Up to 8 / 12" Substrate
光源功率	350W	350W	1 kW / 2 kW	2kW / 5kW
分辨率	1um (Thin PR@Si Wafer)	1um (Thin PR@Si Wafer)	1um (Thin PR@Si Wafer)	1um ( Thin PR@Si Wafer )
对准精度	1um	1um	1um	1um
光束均匀性	±3%	±3%	±5%	±5%
最大光束尺寸	4.25×4.25 inch	6.25×6.25 inch	8.25×8.25 inch	10.25×10.25 inch 14.25×14.25 inch
光束强度	Max. 30mW/cm <sup>2</sup> (365nm)	Max. 30mW/cm <sup>2</sup> (365nm)	Max. 25mW/cm <sup>2</sup> (365nm)	Max. 25mW/cm <sup>2</sup> (365nm)



## 4. 聚焦离子束刻蚀

### 聚焦离子束刻蚀 (FIB)

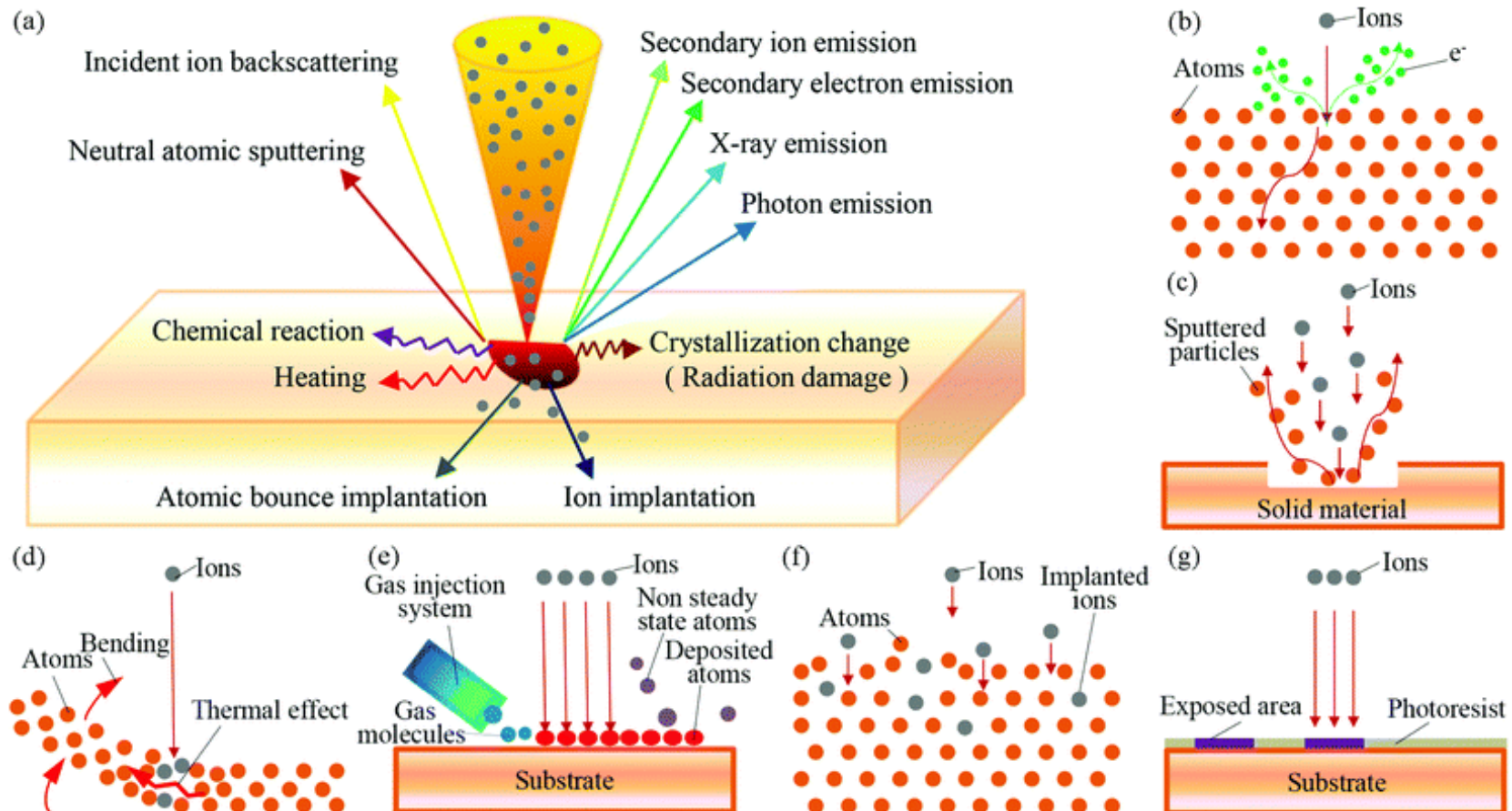
和电子束刻蚀非常类似，只不过聚焦离子束使用的是离子源而不是电子



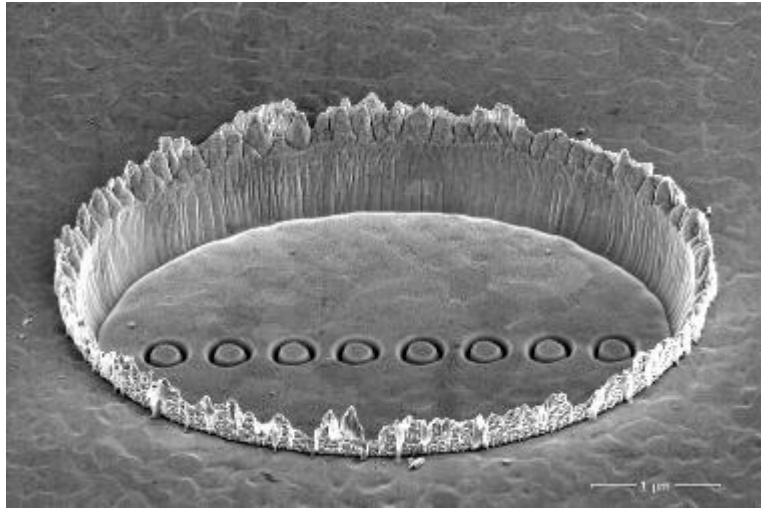
- 具有更大的能量，可以直接轰击样品进行刻蚀，而不需要先制作掩膜和用其他方法进行二次加工，所以聚焦离子束刻蚀简化了样品制备的步骤
- 可以实现某些电子束曝光无法完成的加工，
- 分辨率低于电子束直写
- 刻蚀过程中由于离子源轰击样品表面，因此会产生溅射现象，使颗粒粘附在刻蚀结构的表面或者内壁上

# 4. 聚焦离子束刻蚀

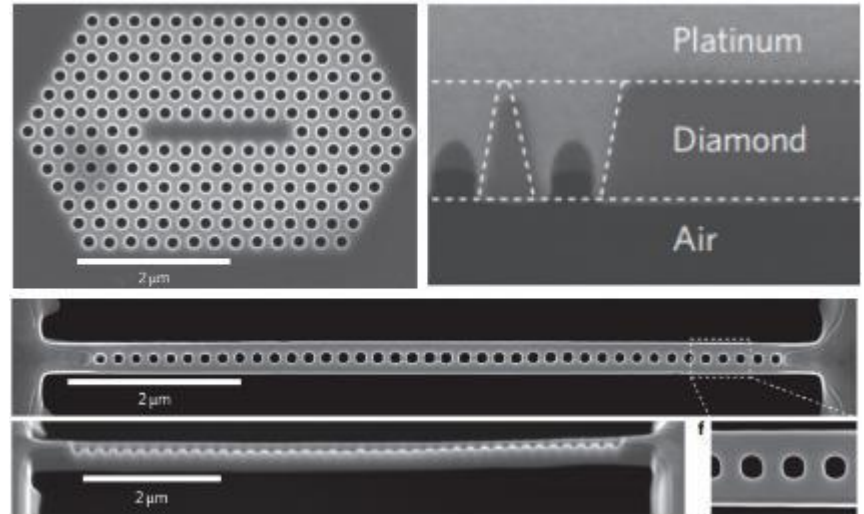
## 聚焦离子束刻蚀 (FIB)



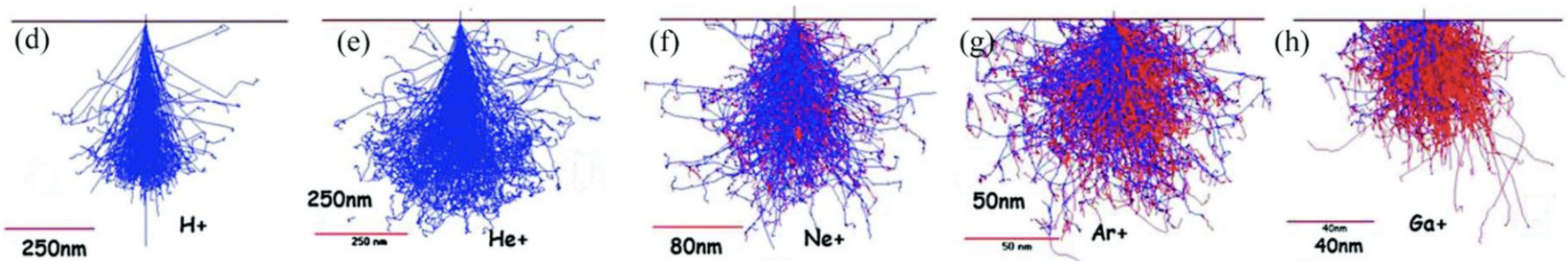
## 4. 聚焦离子束刻蚀



纳米金属环



金刚石光子晶体

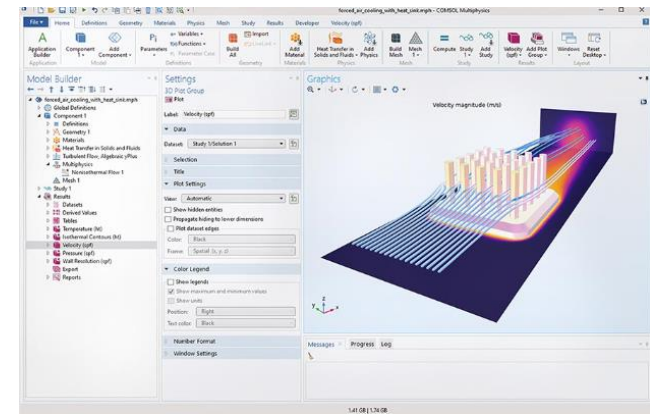


不同的离子类型，具有不同的加工强度和精度

# 5. 结构模拟

COMSOL:用于多物理场 建模与仿真

1. COMSOL Multiphysics是以有限元法（FEM）为基础，通过求解偏微分方程（单场）或偏微分方程组（多场）来实现真实物理现象的仿真。有限元法就是用来计算出这些近似解的。
2. 多物理场的本质就是偏微分方程组（PDEs）。所以只要是可以用偏微分方程组描述的物理现象，COMSOL Multiphysics都能够很好的计算、模拟、仿真。例如，各类守恒定律（如能量守恒定律、质量守恒定律和动量守恒定律等）都可以用偏微分方程（PDE）来表达。
3. 中文官网<http://cn.comsol.com/>
4. 涵盖力学、电磁场、流体、传热、化工、MEMS、声学等



# 5. 结构模拟

---

Finite-difference time-domain method

FDTD

有限元时域差分法

1966年, **Kane S. Yee** 首次提出电磁场数值计算的新方法——时域有限差分法(FiniteDifference—TimeDomain,简称FDTD)。经历了二十年的发展FDTD法才逐渐走向成熟。上世纪80年代后期以来FDTD法进入了一个新的发展阶段,即由成熟转为被广泛接受和应用的阶段。FDTD法是解决复杂问题的有效方法之一,是一种直接基于时域电磁场微分方程的数值算法,它直接在时域将Maxwell旋度方程用二阶精度的中心差分近似,从而将时域微分方程的求解转换为差分方程的迭代求解。是电磁场和电磁波运动规律和运动过程的计算机模拟。



# 5. 结构模拟

Finite-difference time-domain method

FDTD

有限元时域差分法

- 直接从时域求解麦克斯维方程
- 把几何结构划分成网格空间
- 网格尺寸远小于波长
- 网格尺寸远小于物体轮廓
- 随时间逐步迭代

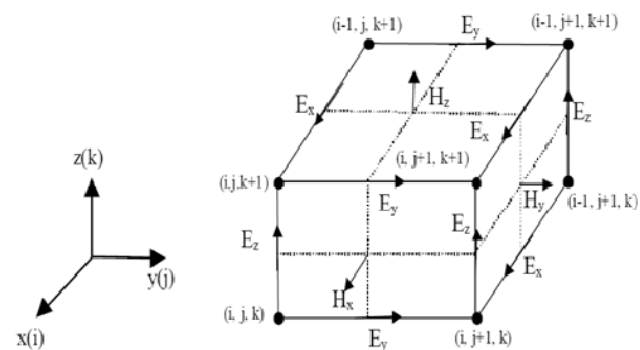
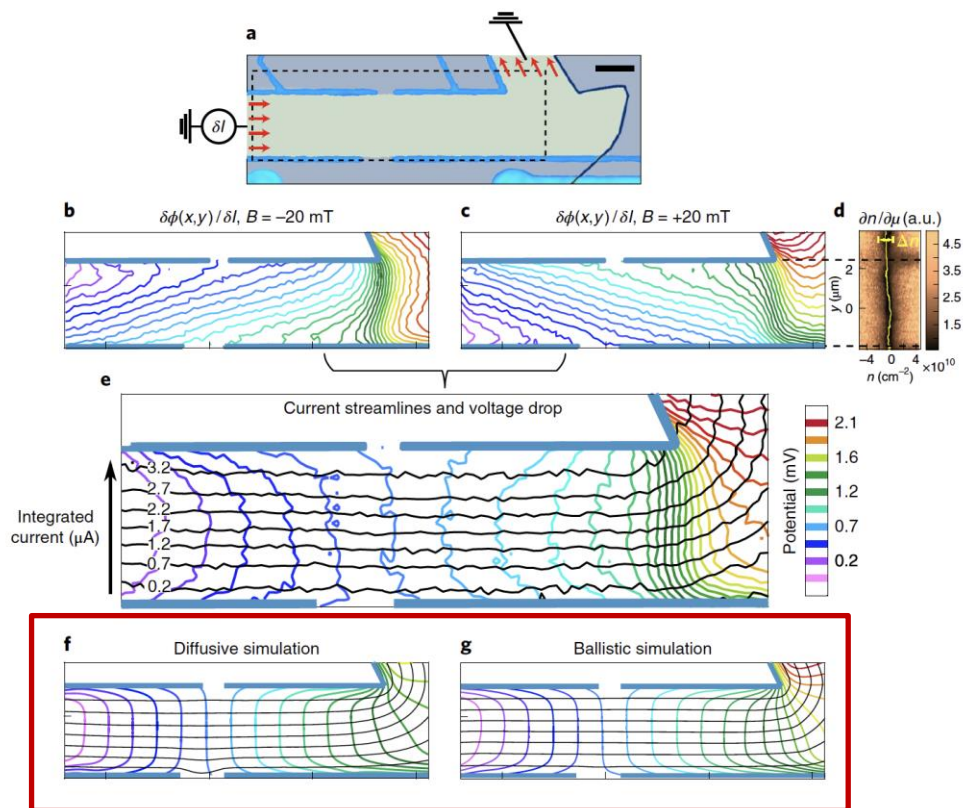
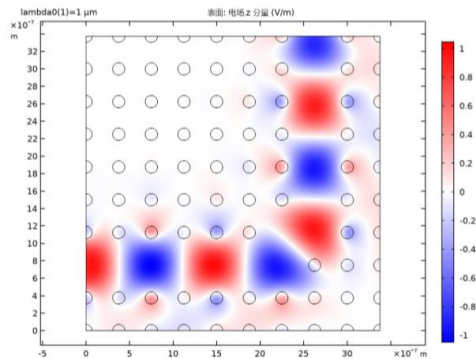
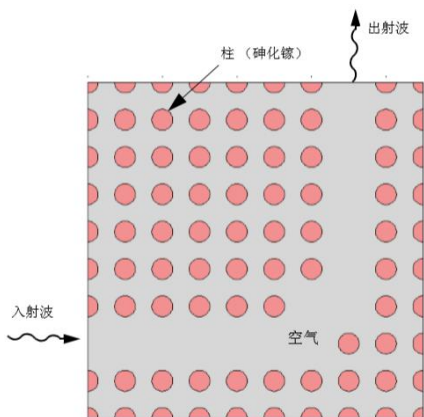


图 2.2 Yee 网格



# 5. 结构模拟



COMSOL计算光子晶体

Simultaneous voltage and current density imaging of flowing electrons in two dimensions, Nat ure Nanotechnology | VOL 480 14 | MAY 2019 | 480–487

重视计算机模拟的能力，通过计算模拟“抽丝剥茧”更好地理解实验数据。

# 5. 结构模拟



北京大学  
PEKING UNIVERSITY

高性能计算平台

平台概况

资源环境

使用指南

成果展示

常用下载

运行情况

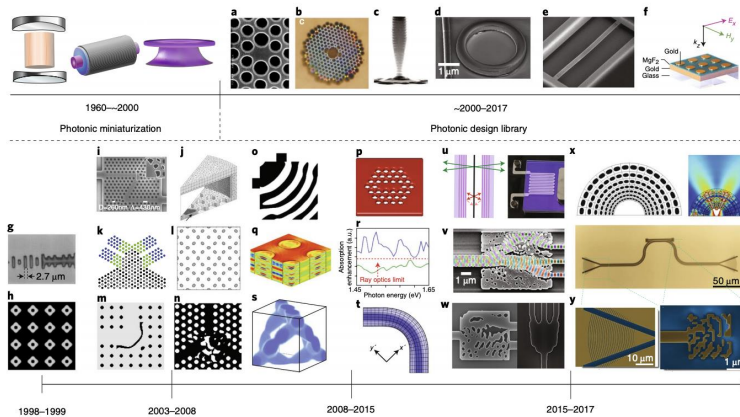
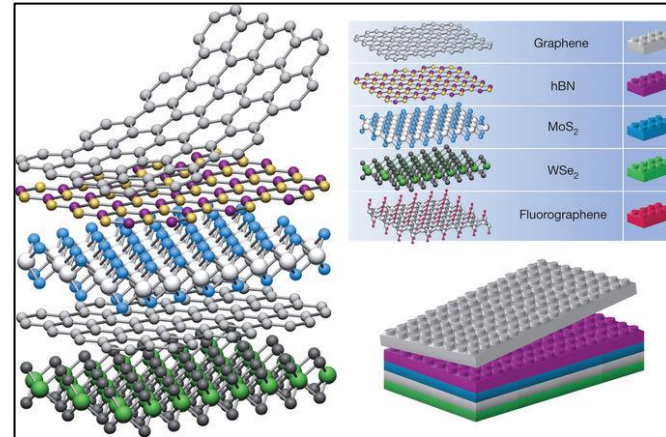
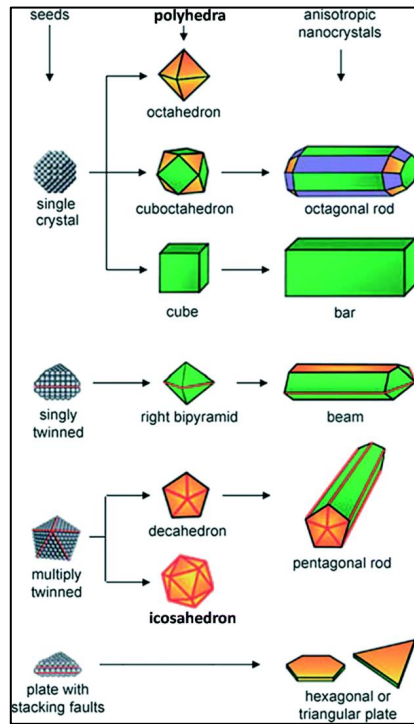


平台简介 机构设置 管理办法

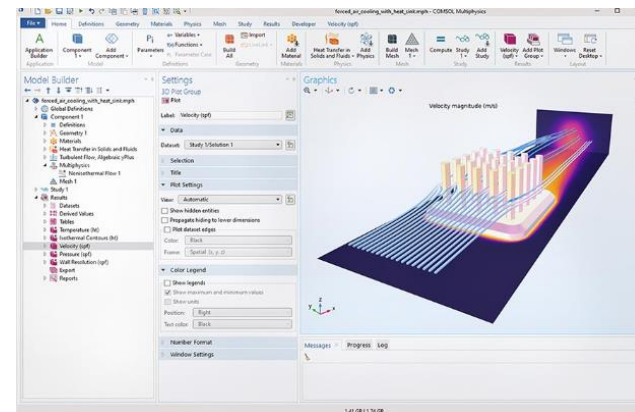


重视计算机模拟的能力，通过计算模拟“抽丝剥茧”更好地理解实验数据。

## 微纳米材料



## 微纳米结构

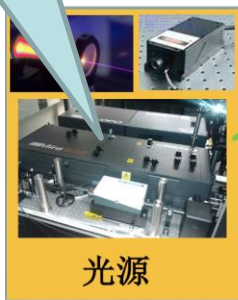


## 数值计算和模拟

八、九：  
激光器，不同波长不同的能量，脉冲激光时间分辨的能力

九、十：  
泵浦探测技术  
空间扫描技术，时间空间动力学研究

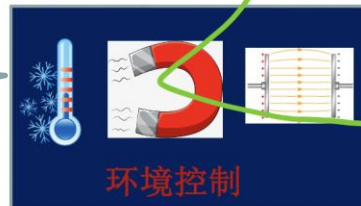
十一，十二  
**SPM (STM, AFM, SNOM)**，  
电子显微镜



光源



光调制和控制  
样品控制



环境控制



信号提取



光探测

十四：集成控制

十四节课内容  
考试不涉及

十三：环  
境控制  
低温，真  
空，磁场



主题是：

1. 多维度、2. 光学、3. 测量方法、和 4. 技术

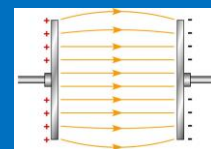
稳态荧光和瞬态荧光，能量，时间

泵浦探测，能量，时间

微区光谱，空间

- 显微镜
- 空间扫描技术
- 物面的空间分辨
- 相面的空间分辨

衍射极限一下的空间分辨



祝大家假期愉快，未来取得优异的科研成果！