



电子科技大学

University of Electronic Science and Technology of China

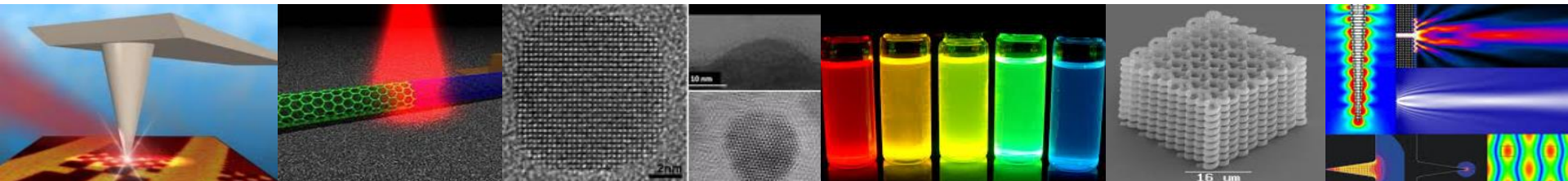
纳米光子学

Nanophotonics

第11讲：近场光学与近场光学显微术

兰长勇

光电科学与工程学院



纳米光子学内容

课程知识点

1. 研究内容

纳米光子学基础

电子与光子异同

纳米尺度下光与物质相互作用

2. 研究方法

特性描述：近场光学

制备方法：纳米表征与加工

计算方法：电磁场数值模拟

量子材料：电子的限域引起光学效应

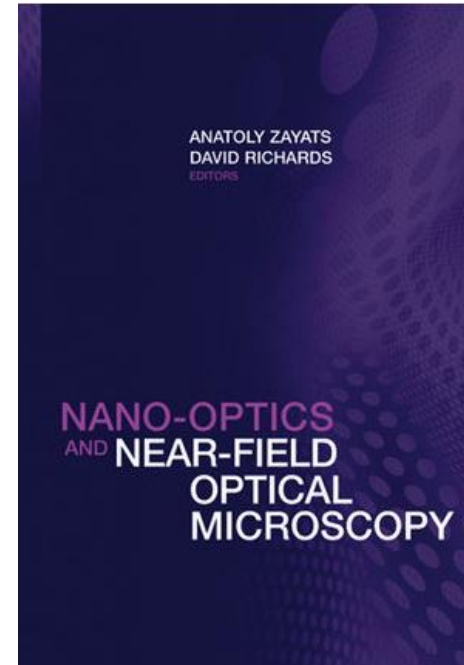
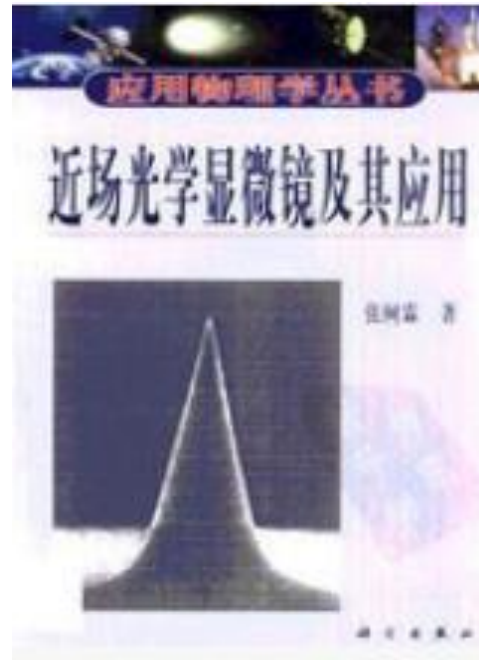
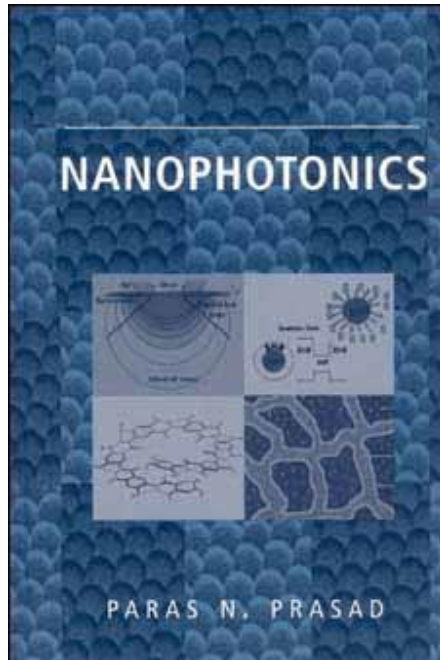
表面等离子体光学：金属光学

光子晶体：周期性介质光学

亚波长共振：在远场影响光传播和偏振的周期性光学结构

超材料：人工设计电磁材料

本讲参考书目



1. L. Novotny, *The History of Near-field Optics*, Progress in Optics 50, E. Wolf (ed.), chapter 5, p.137- 184 (Elsevier, Amsterdam, The Netherlands, 2007)
2. <http://www.olympusmicro.com/primer/techniques/nearfield/nearfieldhome.html>
3. D. Courjon and C. Bainier, *Near field microscopy and near field optics*, Rep. Prog. Phys. 57 (1994) 989.

本讲内容

1. 什么是近场光学？

2. 为什么用近场光学？

- 光学显微镜的历史
- 突破分辨率衍射极限
- 近场光学的特殊性

3. 如何探测近场光学？(怎么用)

- 牛顿实验
- 光与物质相互作用
- 关键问题及技术突破

4. 近场光学显微镜-SNOM

- 发展
- 框架和组件
- 探针
- 间距控制
- 工作模式
- 整个系统

本讲内容

1. 什么是近场光学？

2. 为什么用近场光学？

- 光学显微镜的历史
- 突破分辨率衍射极限
- 近场光学的特殊性

3. 如何探测近场光学？

- 牛顿实验
- 光与物质相互作用
- 关键问题及技术突破

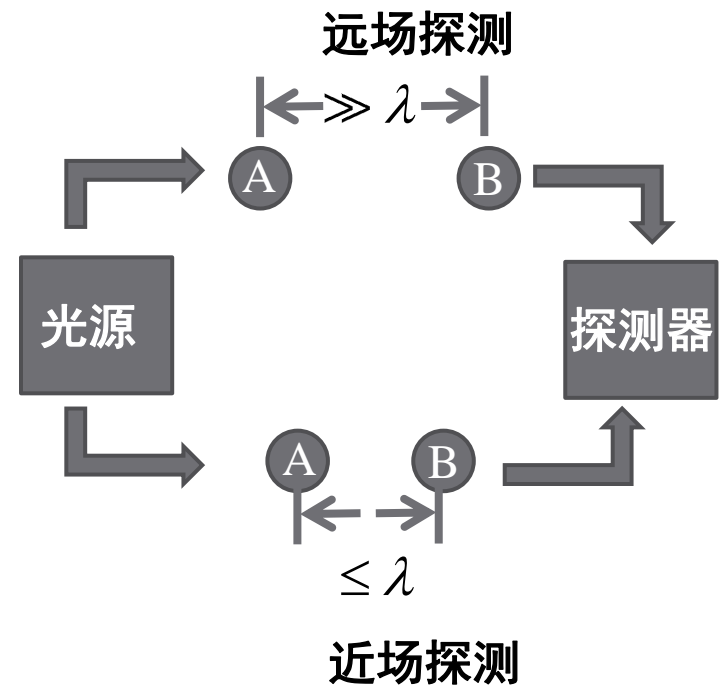
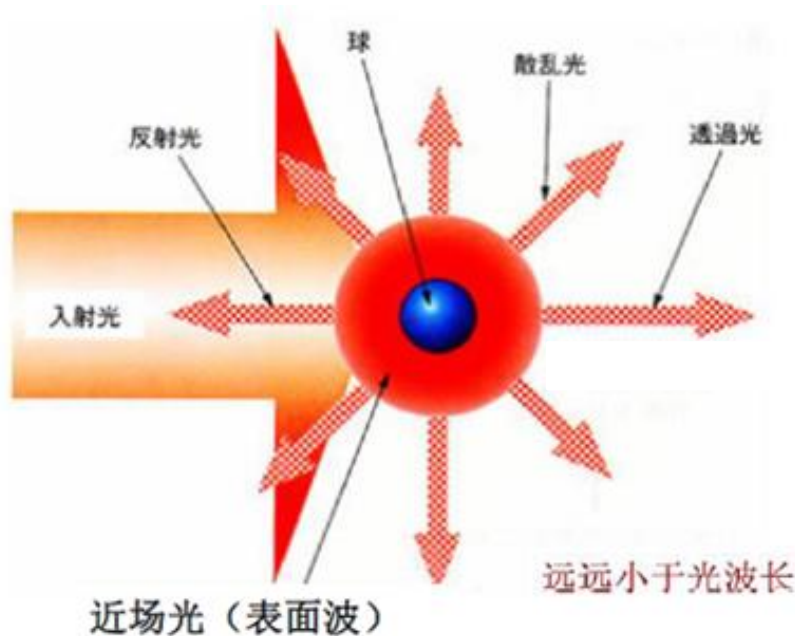
4. 近场光学显微镜-SNOM

- 发展
- 框架和组件
- 探针
- 间距控制
- 工作模式
- 整个系统

1.什么是近场光学？

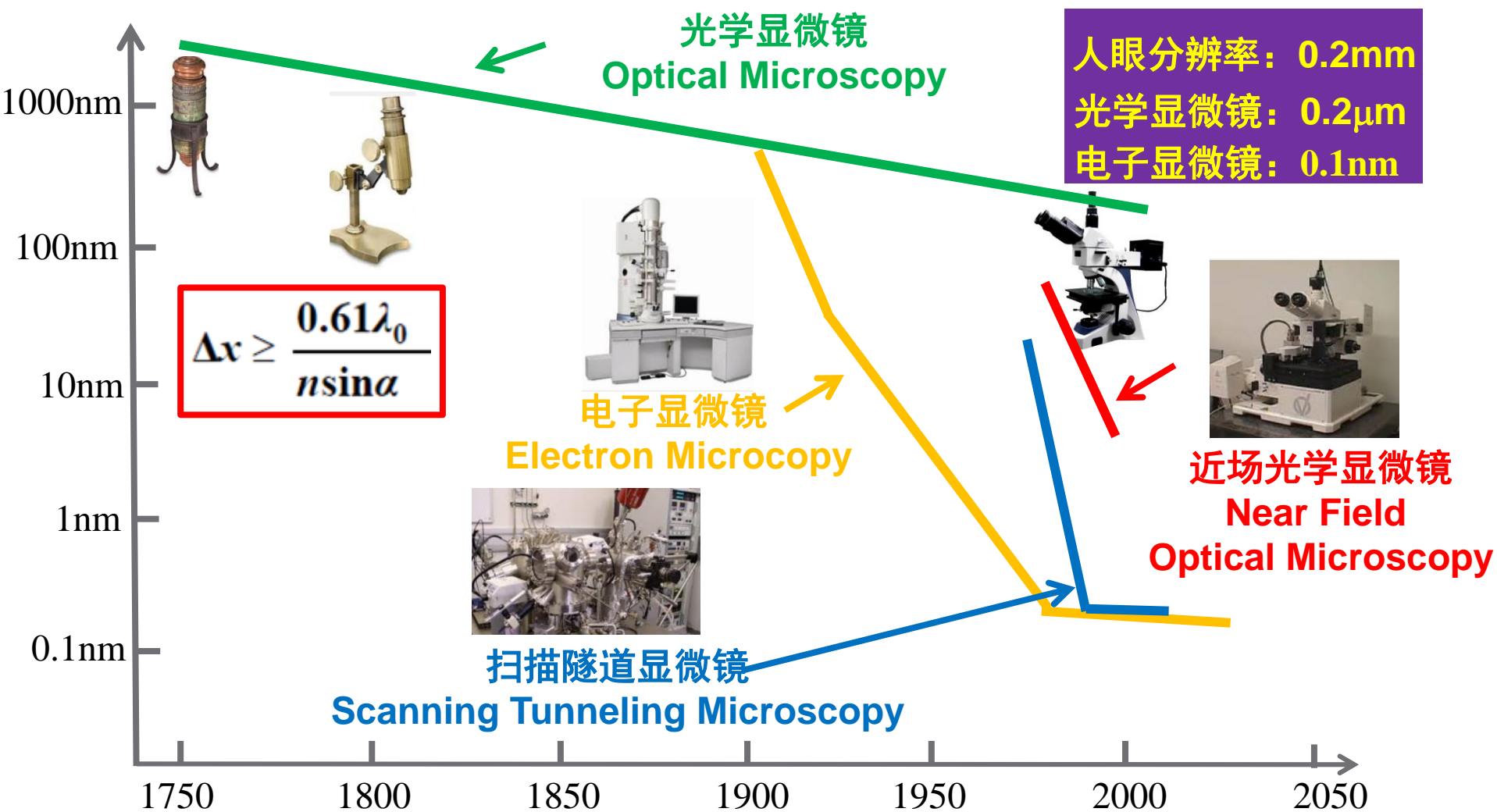
近场：从物体表面到一个波长以内距离的电磁场

远场：从近场以外一直延伸到无穷远区域的电磁场



近场光学是研究距离物体表面一个波长以内的光学现象

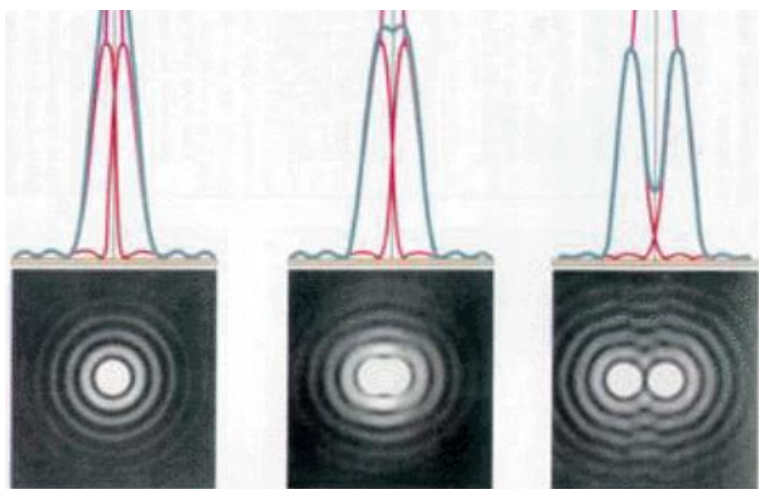
2.为什么用近场光学—显微镜的历史



2. 为什么用近场光学—突破分辨率极限

➤ 衍射效应及其对分辨率的限制

- 像平面上每个像点是一个艾里斑
- 瑞利给出的判据：
当两个艾里斑靠近时，其中一个艾里斑的主极大位于另一个艾里斑的最靠近主极大极小处为恰可分辨



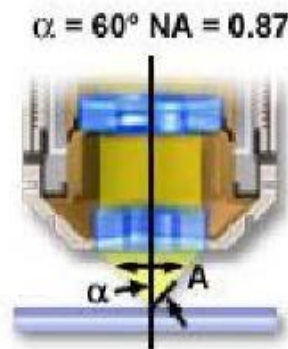
不可分辨

恰可分辨

完全可分辨

瑞利判据：

$$\Delta x \geq \frac{0.61\lambda_0}{n \sin \alpha}$$



λ_0 : 入射光在真空中的波长

n : 物方折射率

α : 显微镜在物方的半孔径角

$n \sin \alpha$: 数值孔径 (一般 <1.2)

$$\Delta x_{\min} \geq \lambda / 2$$

分辨率：最小可分辨大于半波长

2. 为什么用近场光学—突破分辨率极限

➤ 测不准原理与瑞利判据

坐标 x 和动量 p_x 不能同时确定

德布罗意关系

$$\mathbf{p} = \hbar \mathbf{k}$$

$$\Delta x \cdot \Delta p_x \geq h \quad \xrightarrow{h = 2\pi\hbar} \quad \Delta x \Delta p_x \geq 2\pi\hbar \quad \xrightarrow{\mathbf{p} = \hbar \mathbf{k}} \quad \Delta x \Delta k_x \geq 2\pi$$

海森伯测不准关系

$$|\Delta \mathbf{k}| = |\mathbf{k}_1 - \mathbf{k}_2| \quad \xrightarrow{\quad} \quad \Delta k_x = 2k_x = 2k \sin \alpha$$

当 $\alpha = \pi/2$ 时

$$\Delta k_{x,\max} = 2k$$

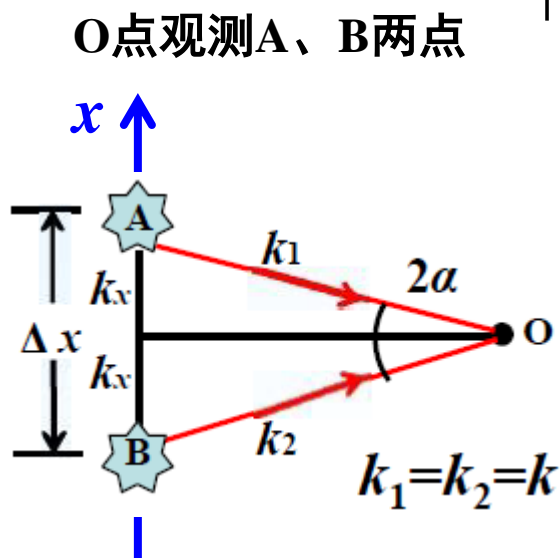
$$\Delta x_{\min} 2k \geq 2\pi$$

$$|\mathbf{k}| = \frac{2\pi}{\lambda}$$

$$\Delta x_{\min} \geq \lambda/2$$

分辨率极限的瑞利判据：

测不准原理是更基本的“瑞利判据”



2. 为什么用近场光学—突破分辨率极限

➤ 如何突破

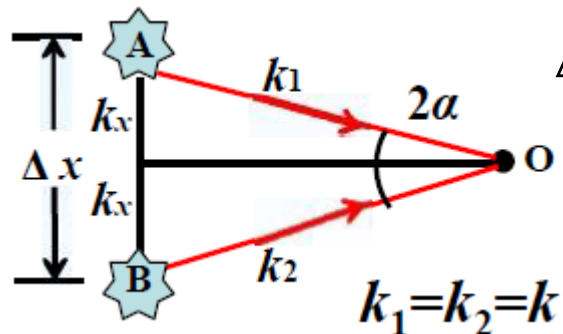
测不准原理

$$\Delta k_x \rightarrow \infty, \Delta x \rightarrow 0$$

?

瑞利判据

$$\Delta x_{\min} \geq \lambda / 2$$



$$\Delta k_x = k_1 - k_2 = 2k_x = 2k \sin \alpha$$

因为 $k_x = k \sin \alpha \leq |\mathbf{k}|$

所以 $(k_x)_{\max} = k$

分辨率极限: $\Delta x_{\min} \geq \lambda / 2$

如果: $k_x > |\mathbf{k}| = k \longrightarrow$ 能不能? $\Delta x_{\min} < \lambda / 2$

2. 为什么用近场光学—突破分辨率极限

➤ 如何突破

如果: $k_x > |\mathbf{k}| = k$

$$\Delta k_x = 2k_x > 2k$$

$$\Delta k_x > \Delta k_{x,\max}$$

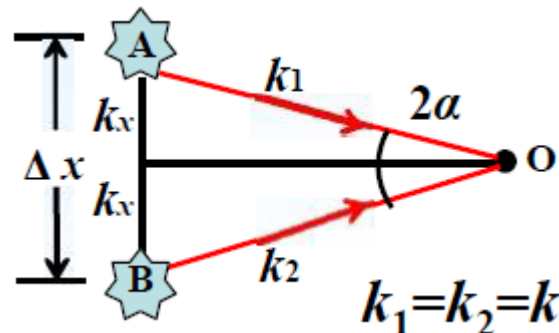
$$\Delta x \Delta k_x \geq 2\pi$$

$$\Delta x < \lambda / 2$$

突破了分辨率极限!

波矢分量大于其模量即可突破衍射极限

波矢分量 $k_x > |\mathbf{k}| = k$?



2. 为什么用近场光学—突破分辨率极限

► 如何突破

$$|\mathbf{k}| = \sqrt{k_x^2 + k_y^2 + k_z^2}$$

$$k_x > |\mathbf{k}| = k$$

$$k_x = \sqrt{|\mathbf{k}|^2 - k_y^2 - k_z^2}$$

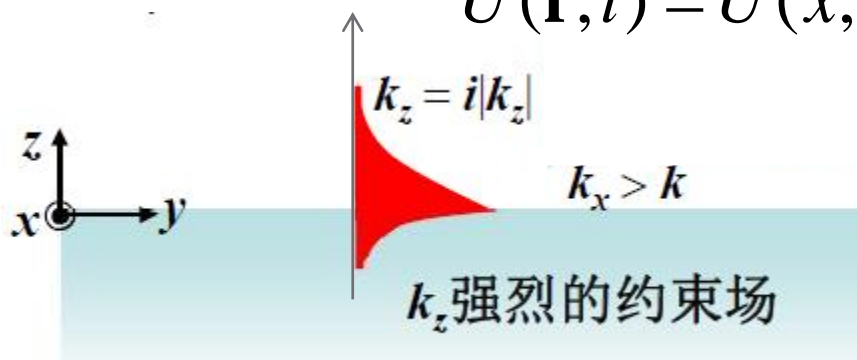
k_z 或 k_y 必须为虚数时,
可突破衍射极限

例如: $k_z = ik_j$

代入 $k_z = ik_j$

$$U(\mathbf{r}, t) = U(x, y, z) \exp[i(k_x x + k_y y + k_z z) - i\omega t]$$

$$U(\mathbf{r}, t) = U(x, y, z) \exp[i(k_x x + k_y y - \omega t) - k_j z]$$



(x, y) 方向传播
z 方向指数衰减

倏逝场 (隐失场)

突破衍射极限的超分辨必须以电磁场的高度局域为条件

2.为什么用近场光学—物体表面精细结构产生近场

- 假定物体表面为 x - y 平面 ($z=0$), 考察位于 z 处的光场
- 位于 (x, y) 处的光场可以表示为: $E(x, y, 0) = \frac{1}{2\pi} \iint U_0(k_x, k_y) e^{i(k_x x + k_y y)} dk_x dk_y$
- 傅里叶变换: 把光场分解为不同方向传播的平面波, U_0 对应 (k_x, k_y) 方向平面波的振幅, $U_0(k_x, k_y)$ 称为角谱
- 由霍姆霍兹方程: $\nabla^2 E + k^2 E = 0$ 得到在 (x, y, z) 处的角谱为:

傅里叶光学

$$U(k_x, k_y, z) = U_0(k_x, k_y) \exp\left(iz\sqrt{k^2 - k_x^2 - k_y^2}\right) = U_0(k_x, k_y) e^{ik_z z}$$

如果: $k_x^2 + k_y^2 < k^2$ $U(k_x, k_y, z) = U_0(k_x, k_y) e^{ik_z z}$ 传播场, 可以传播到远处

如果: $k_x^2 + k_y^2 > k^2$, $k_z = i\kappa$ $U(k_x, k_y, z) = U_0(k_x, k_y) e^{-\kappa z}$ 隐失场, 局限于物体表面 (也称为近场), 是非辐射场

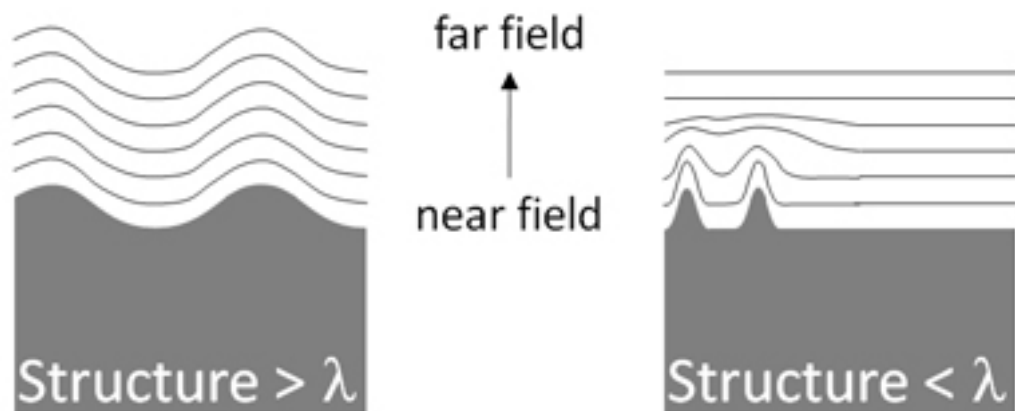
- k_x, k_y 很大, 对应物体表面的精细结构
- 假定物体表面为一系列不同周期光栅的叠加 (傅里叶思想)
- 衍射光波矢分量 (a, b 为可能的 x, y 方向的光栅周期)

$$k_x = \frac{2n\pi}{a}, k_y = \frac{2m\pi}{b}, n, m = 1, 2, 3, \dots$$

如果 $a, b < \lambda$, 则 $k_x, k_y > k$ 对应隐失场

小于波长的精细结构对应隐失场, 不能传播到远处

2. 为什么用近场光学—近场光学的特殊性



但可通过相互作用传递能量

远场 (Far field)	近场 (Near field)
远场辐射 (传播场)	局域在近场 (局域场)
更大的空间尺度	较小的空间尺度
真空中无损失辐射能量	不向外辐射能量
较小的波矢分量 $k_x < k$	更大的波矢分量 $k_x > k$
粗略的结构信息	精细的结构信息

突破分辨率极限



倏逝场



近场光学检测

本讲内容

1. 什么是近场光学？

2. 为什么用近场光学？

- 光学显微镜的历史
- 突破分辨率衍射极限
- 近场光学的特殊性

3. 如何探测近场光学？

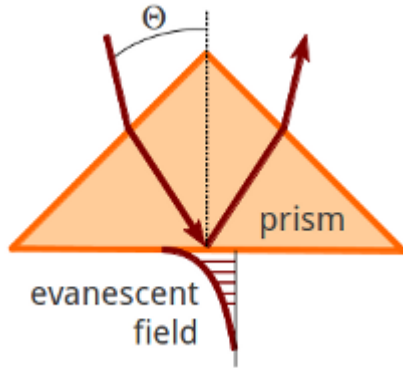
- 牛顿实验
- 光与物质相互作用
- 关键问题及技术突破

4. 近场光学显微镜-SNOM

- 发展
- 框架和组件
- 探针
- 间距控制
- 工作模式
- 整个系统

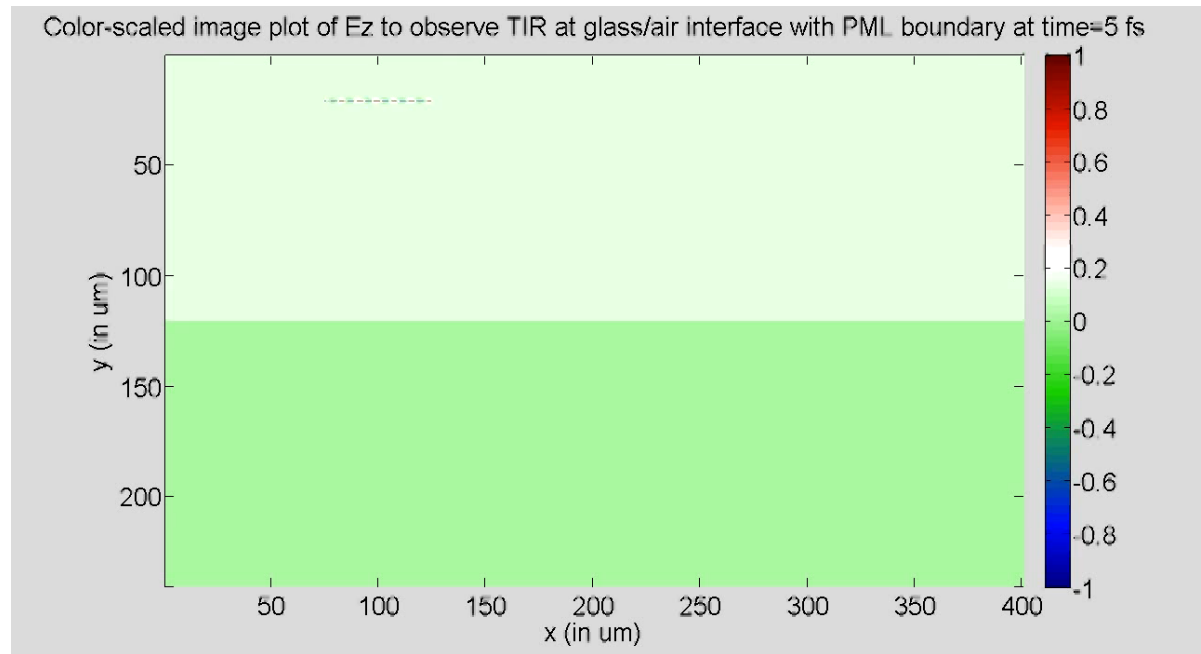
3. 如何进行光学近场检测？

➤ 牛顿实验-全反射棱镜-倏逝场

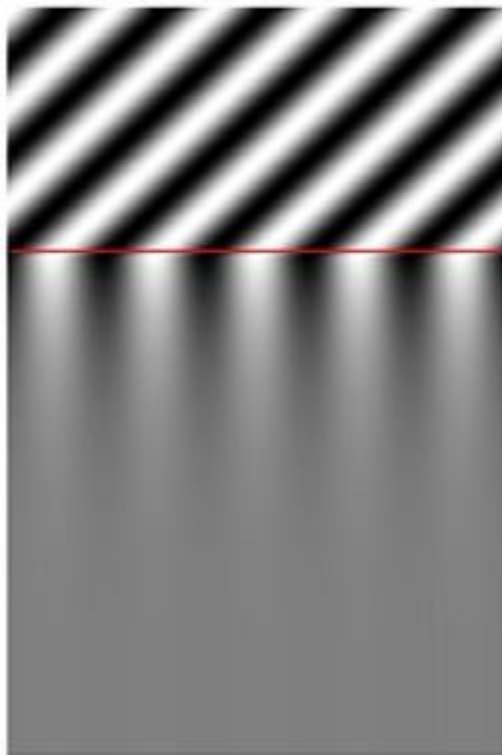


$$\theta_c = \sin^{-1} \left(n_2 / n_1 \right)$$

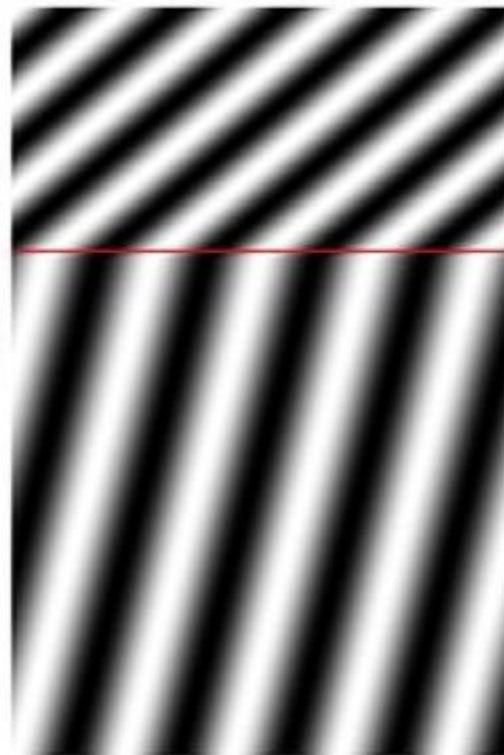
Electric and magnetic fields cannot be discontinuous at a boundary



3. 如何进行光学近场检测？



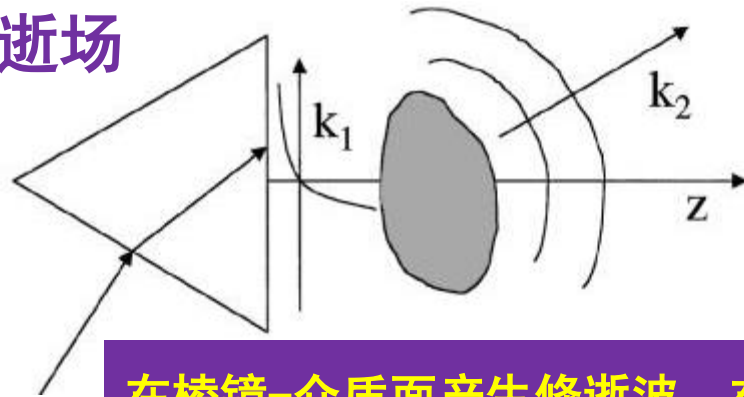
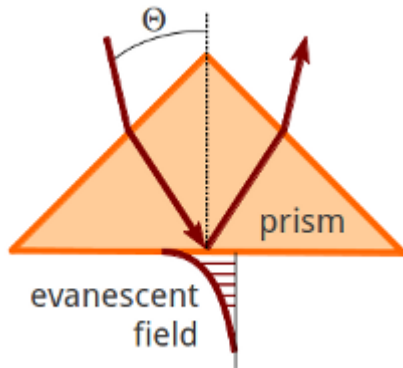
全反射时表面倏逝波



通常折射现象

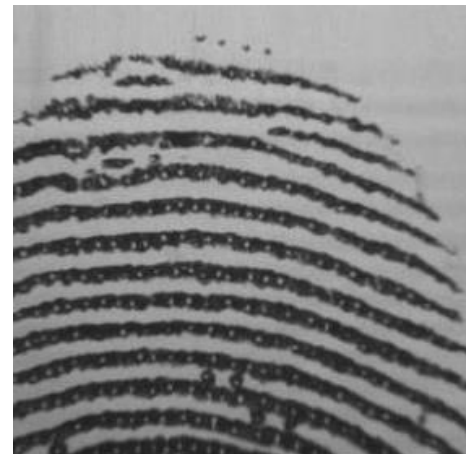
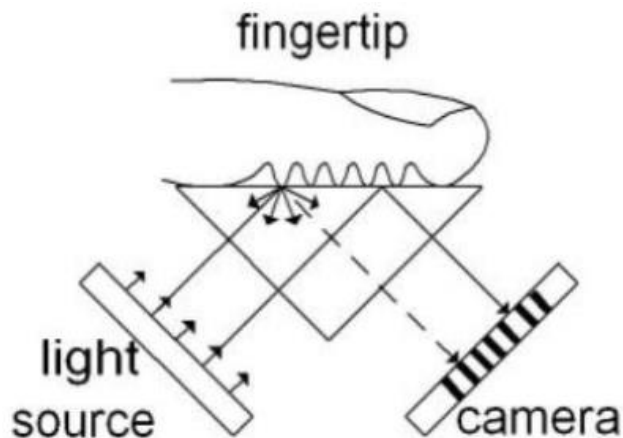
3. 如何进行光学近场检测？

➤ 牛顿实验-全反射棱镜-倏逝场



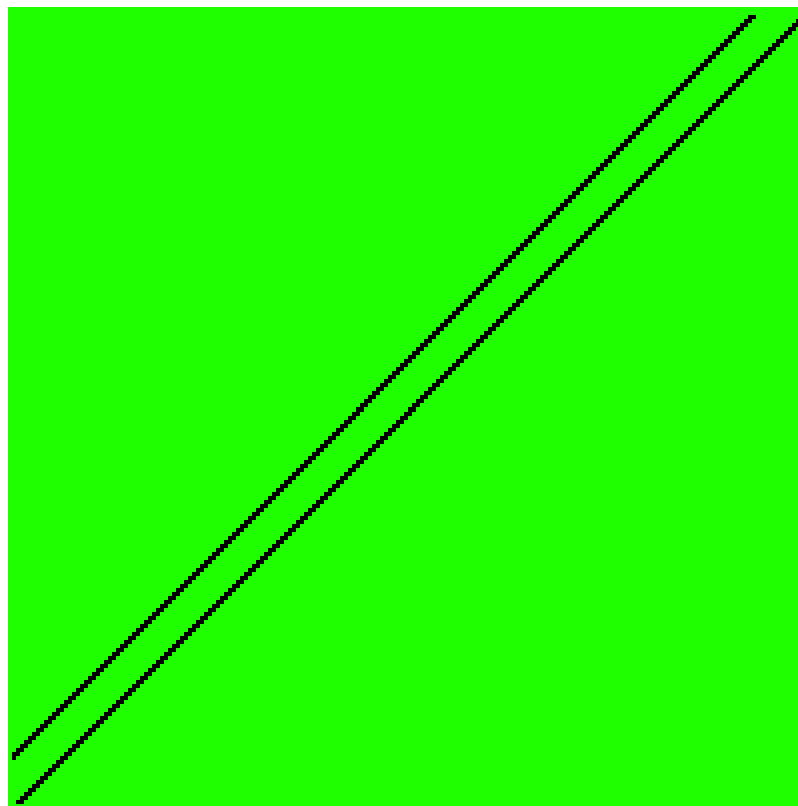
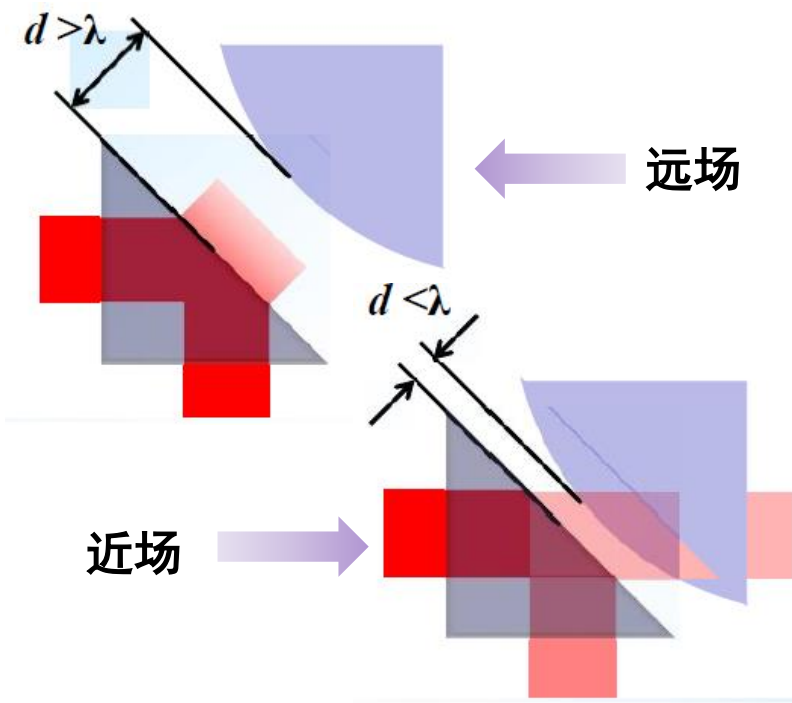
在棱镜-介质面产生倏逝波，在近场内的物体破坏全反射，产生散射，使倏逝场转变为远场传播。

FTIR 指纹识别：



3. 如何进行光学近场检测？

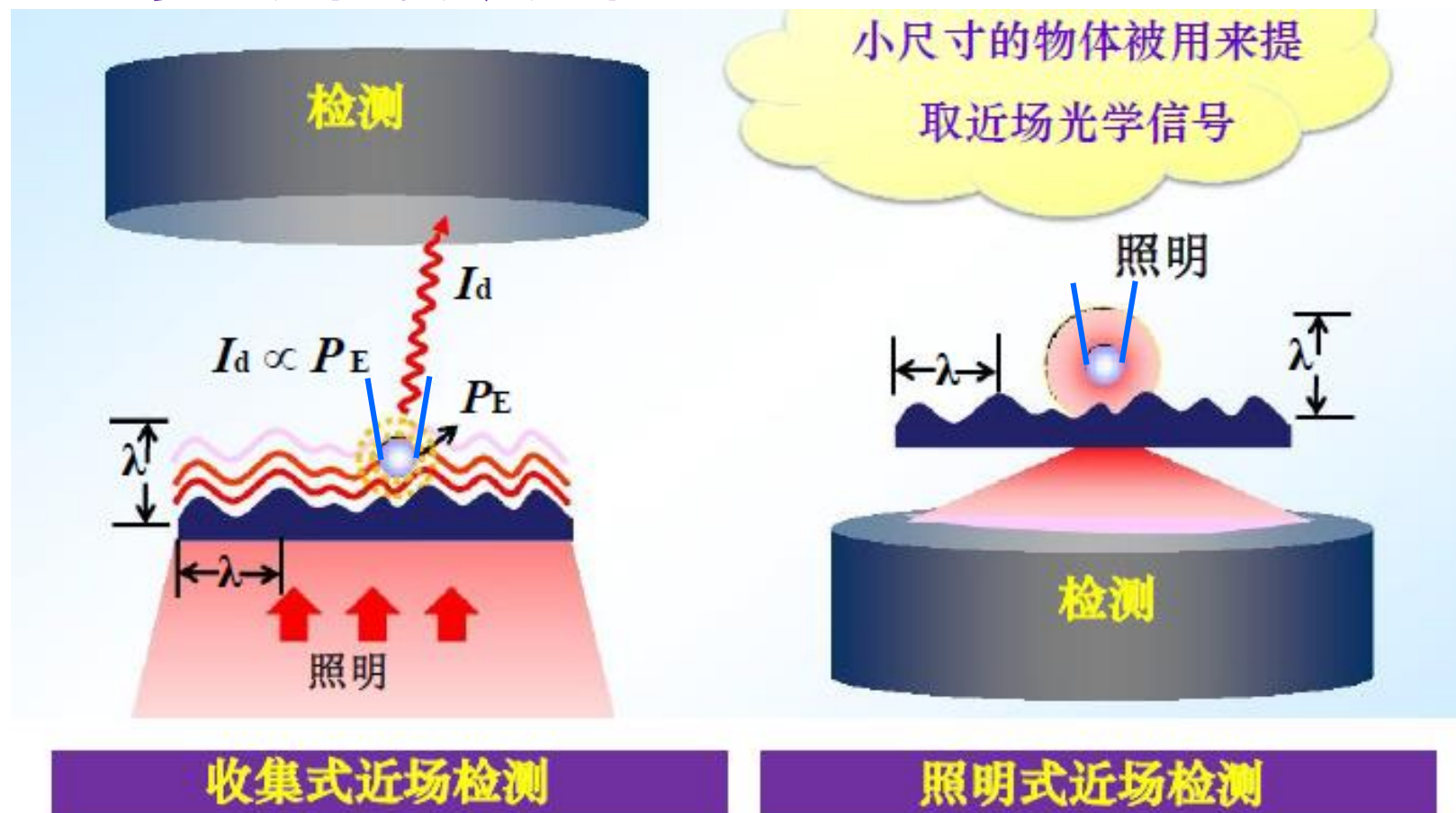
➤ 全反射棱镜-倏逝场耦合



- 适当的物体浸在光学近场中可以将倏逝场转换成传播场
- 倏逝场可被检测到但无法分辨，需要具有超分辨的物体

3. 如何进行光学近场检测？

➤ 光学近场中的小尺寸物体



E.H. Synge, 22, April, 1928

Small object, collection, illumination

3. 如何进行光学近场检测？

➤ 关键问题

- 使用尺寸很小的物体提取局限在近场区的超分辨信息，然后将它忠实地传递到远场检测
- 小尺寸物体通常为探针



探测系统改变近场，捕捉探针与样品相互作用的信息，而不是样品本身的信息。”

L. Novotny. Phys. Today, 64, 47 (2011)

近场光学显微镜技术要点

- (1) 探针尺寸越小越好，小于波长
- (2) 探针与样品间距离越小越好
- (3) 小区域成像，需要扫描

小结：近场光学基本原理



- ▶ (1) 具有**小于波长**的突变边缘，无论它被传播波照明还是被倏逝波照射，都会产生倏逝波；
- ▶ (2) 产生的**倏逝场不服从瑞利判据**，它在小于一个波长距离范围内呈现强烈的局域振荡
- ▶ (3) 根据**互易性原理**，借助于**小尺寸的物体**，可将倏逝场转换成新的传播场并传播；
- ▶ (4) **新的传播场被远处的探测器所探测**；
- ▶ (5) 倏逝场-传播场的**转换是线性的**，新的传播场如实地再现倏逝场局域的距离振荡特性；
- ▶ (6) 为产生**二维图像即成像**，我们需要用一个小尺寸的物体（通常用锥形光纤的针尖）在样品表面上方**扫描**。

本讲内容

1. 什么是近场光学？

2. 为什么用近场光学？

- 光学显微镜的历史
- 突破分辨率衍射极限
- 近场光学的特殊性

3. 如何探测近场光学？

- 牛顿实验
- 光与物质相互作用
- 关键问题及技术突破

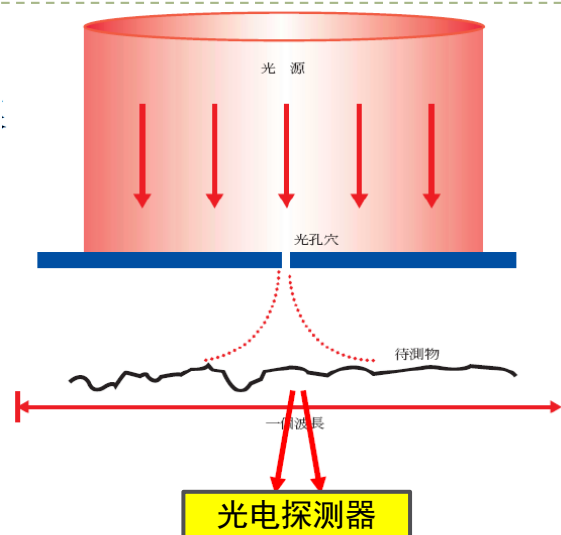
4. 近场光学显微镜-SNOM

- 发展
- 框架和组件
- 探针
- 间距控制
- 工作模式
- 整个系统

4.扫描近场光学显微镜-SNOM

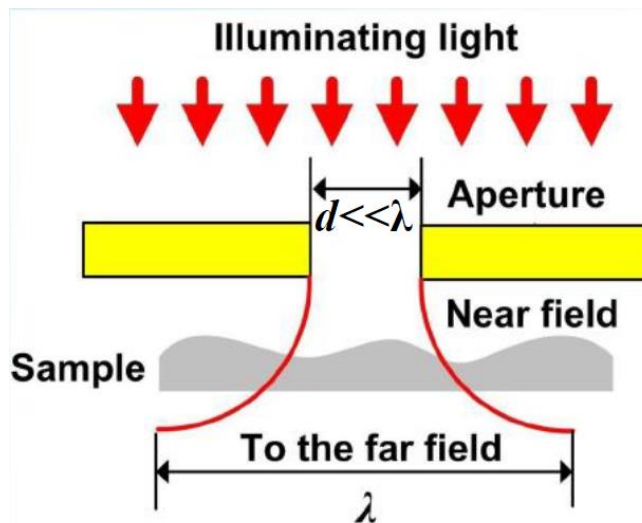
➤发展历史

- 1928年E. H. Synge (申奇)提出第一个突破分辨率极限的构想。
 - (1) 强光源
 - (2) 纳米量级微调系统
 - (3) 纳米量级小孔
- 1973年E.A. Ash & G. Nichols在微波波段，制作出突破分辨率极限的显微镜。(3cm波长微波，记录0.5mm光栅线宽)
- 1982年G. Binning & H. Rohrer第一部扫描隧道显微镜(STM)诞生。
- 1984年D.W. Phol等人把近场光学技术与STM技术结合，制成了第一台扫描近场光学显微镜SNOM(Scanning-near field optical microscopy)。可见光波段，25nm分辨率。



4.扫描近场光学显微镜-SNOM

➤发展过程



E. H. Synge, Phil. Mag. 6, 356 (1928)

1、需要一个亚波长孔径

2、在近场范围控制该孔径

3、照明光穿过该孔径

4、扫描样品成像

4.扫描近场光学显微镜-SNOM

➤发展过程

1. 纳米级探针的加工

1. 需要一个亚波长孔径.

2. 纳米尺度的精确控制

2. 在近场范围控制该孔径.

3. 光功率密度足够大的照明

3. 照明光穿过该孔径.

4. 纳米尺度的扫描步骤

4. 扫描样品成像.

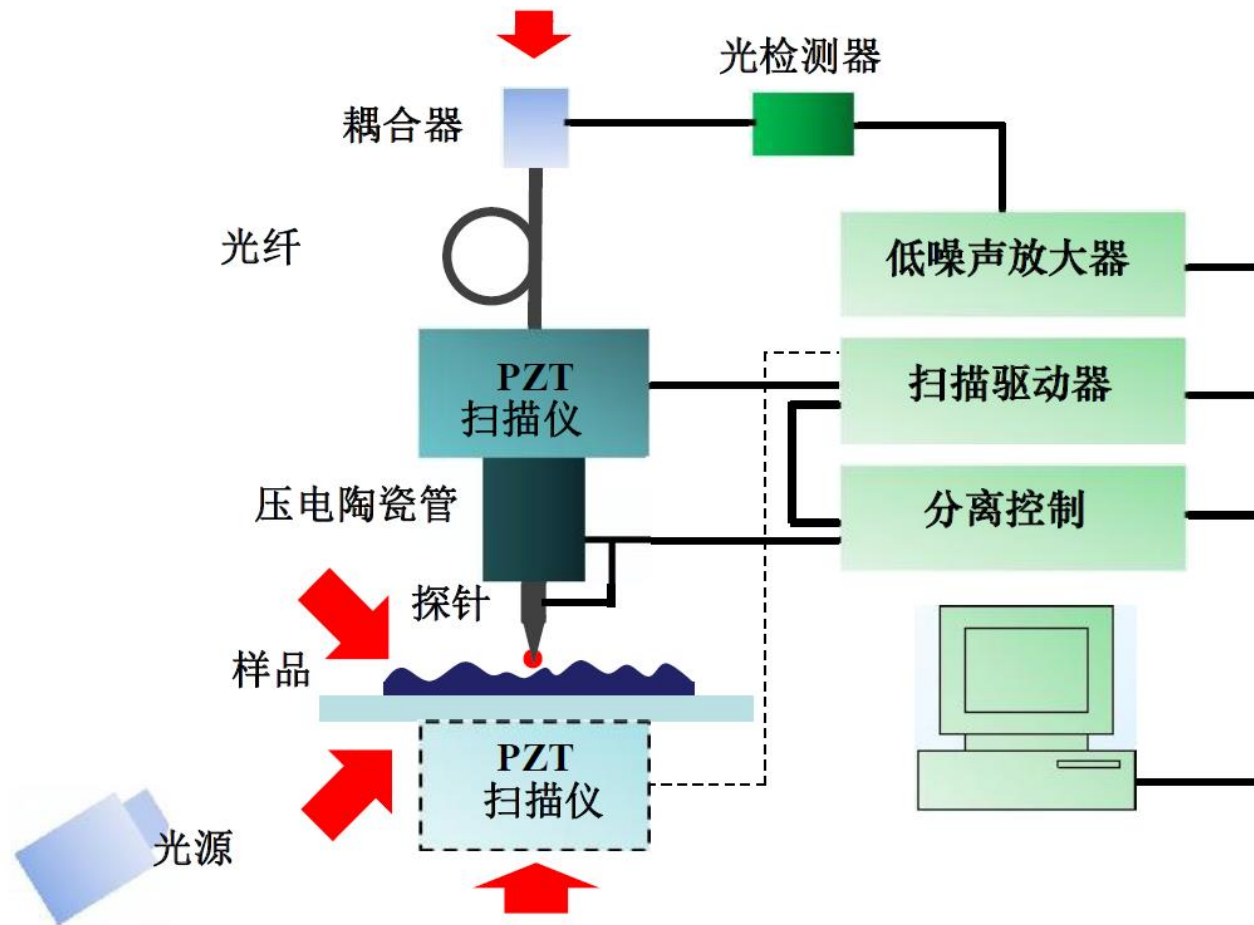
4.扫描近场光学显微镜-SNOM

➤发展过程



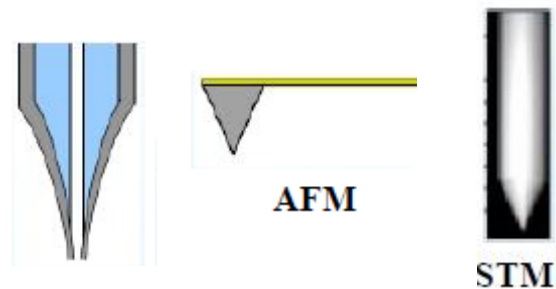
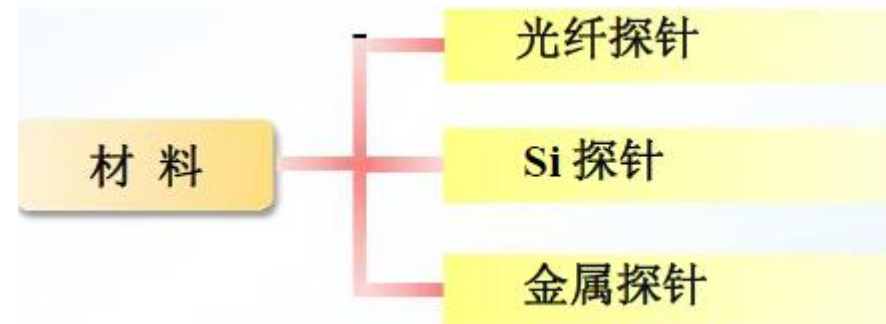
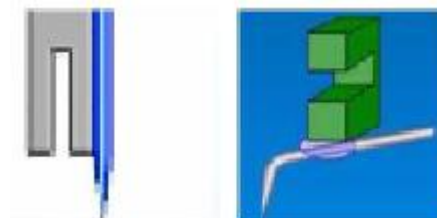
4.扫描近场光学显微镜-SNOM

➤框架与组成



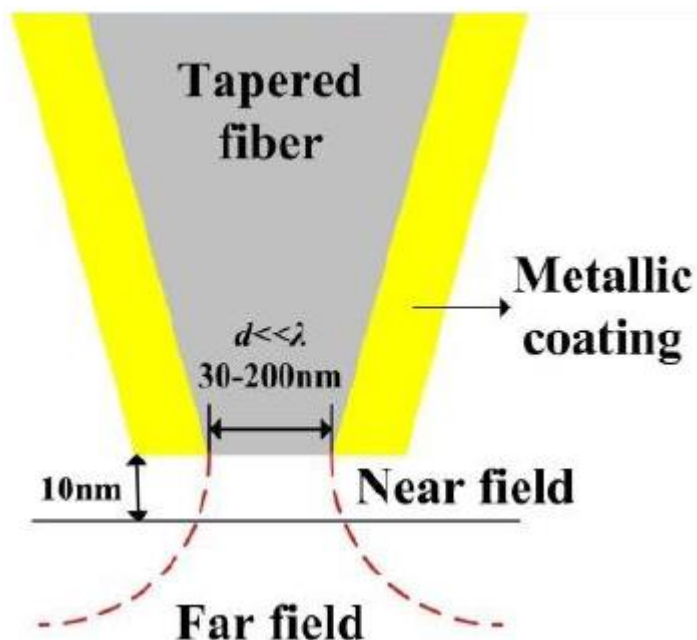
4.扫描近场光学显微镜-SNOM

➤ 探针

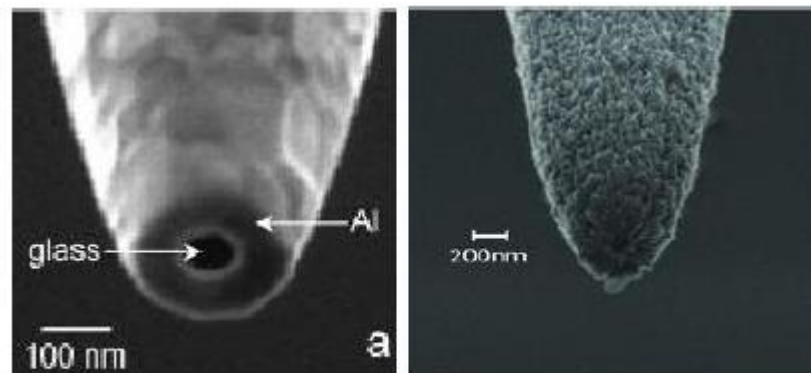


4.扫描近场光学显微镜-SNOM

➤孔径探针-光纤探针



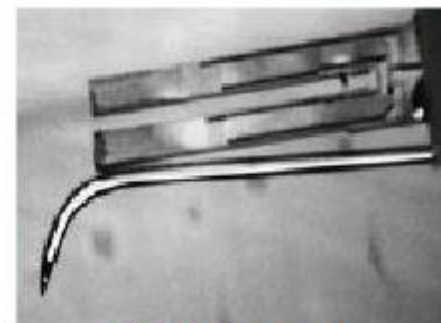
分辨率与灵敏度的折衷：通光孔/针尖尺寸不能太小



直孔径光纤探针
by NT-MDT corp.



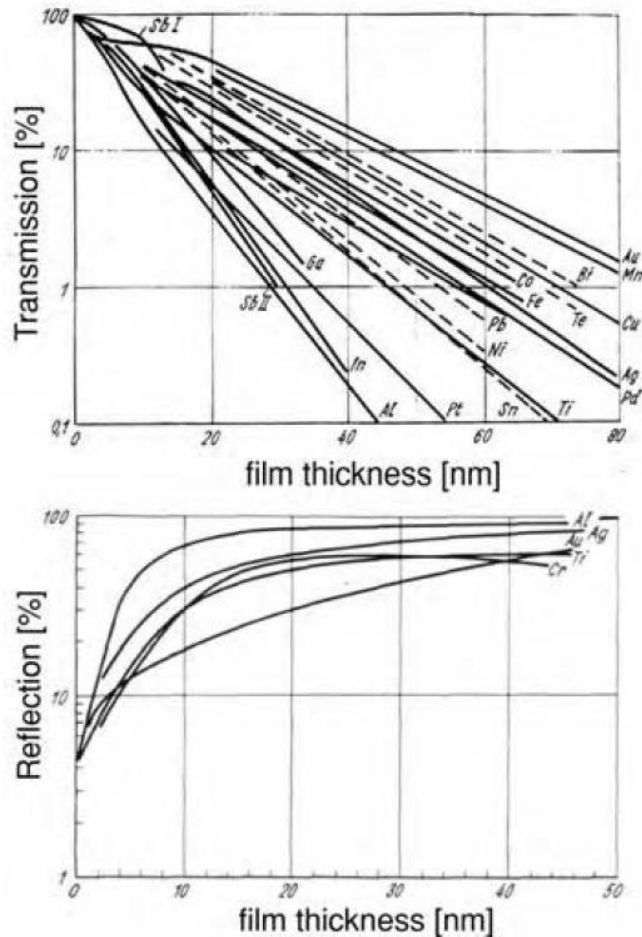
by Nanonics corp.



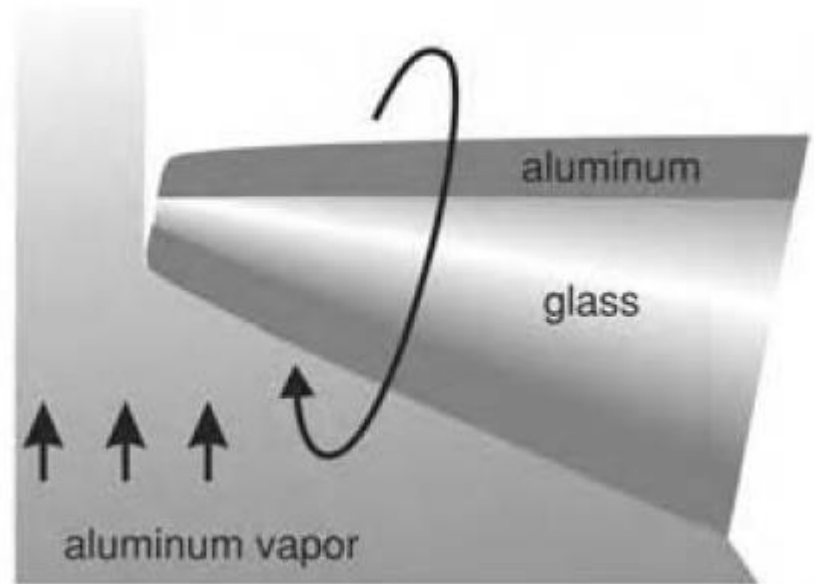
by Seiko corp.

弯曲孔径光纤探针

4.扫描近场光学显微镜-SNOM

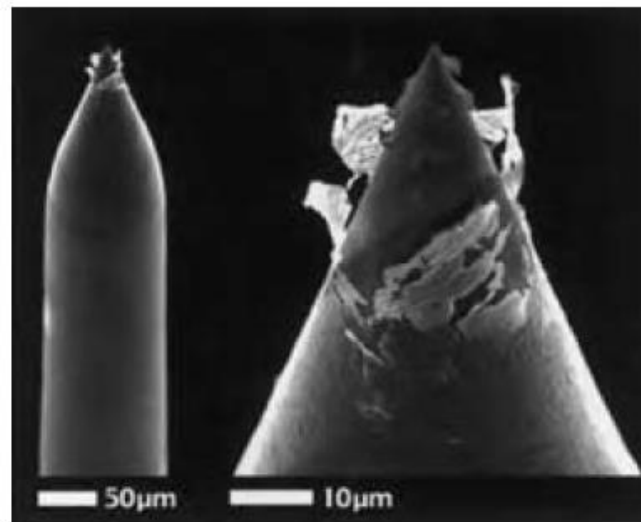
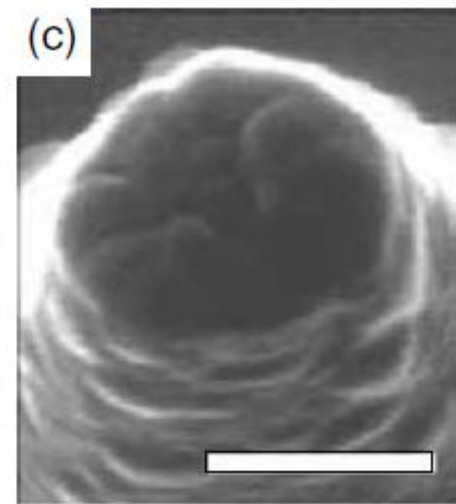
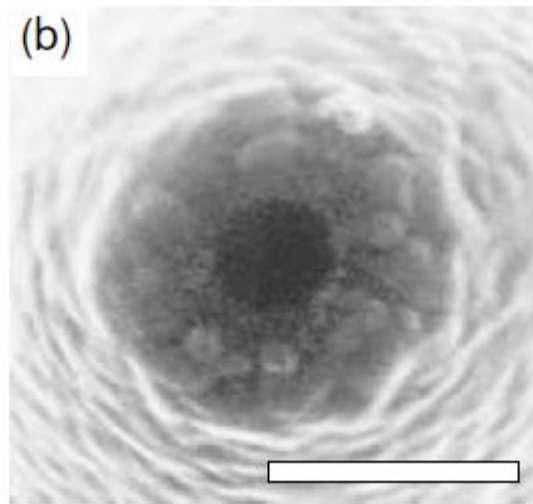
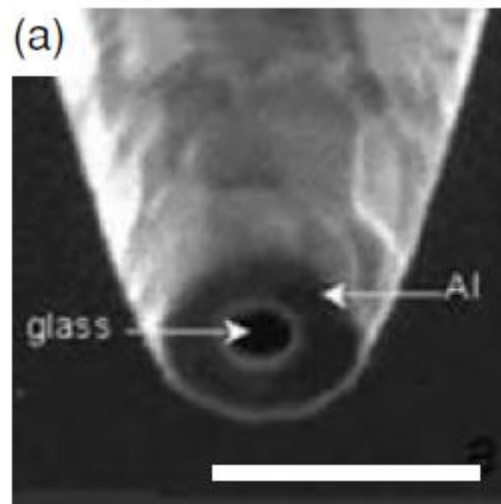


- 同一厚度，不同金属透光率不一样
- 同一金属，随厚度增加，透光率下降
- 常用金属为铝



不同金属镀层对应光纤探针的透过率和反射率
与厚度的关系

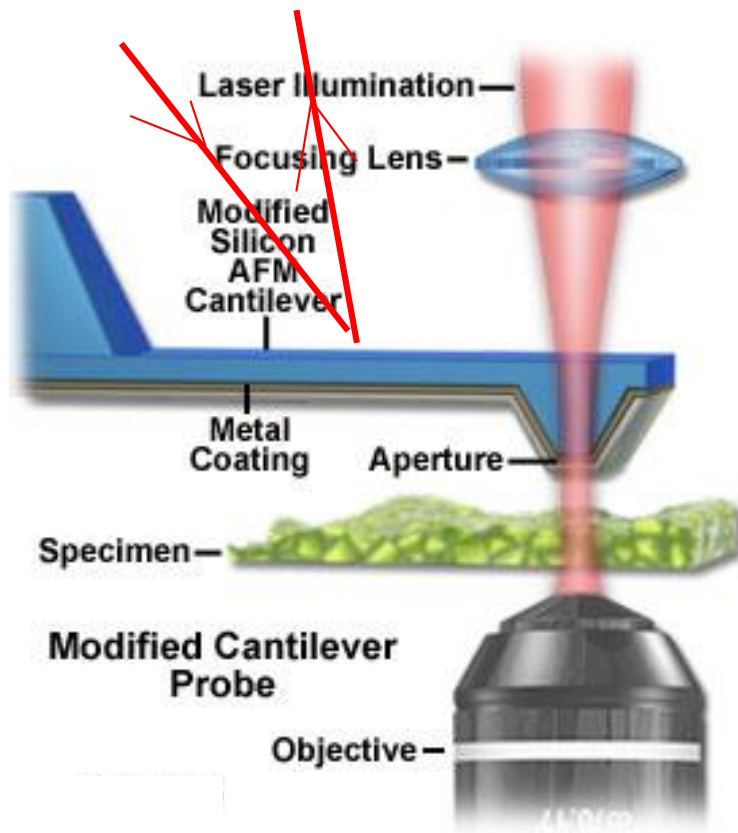
通光孔制作工艺



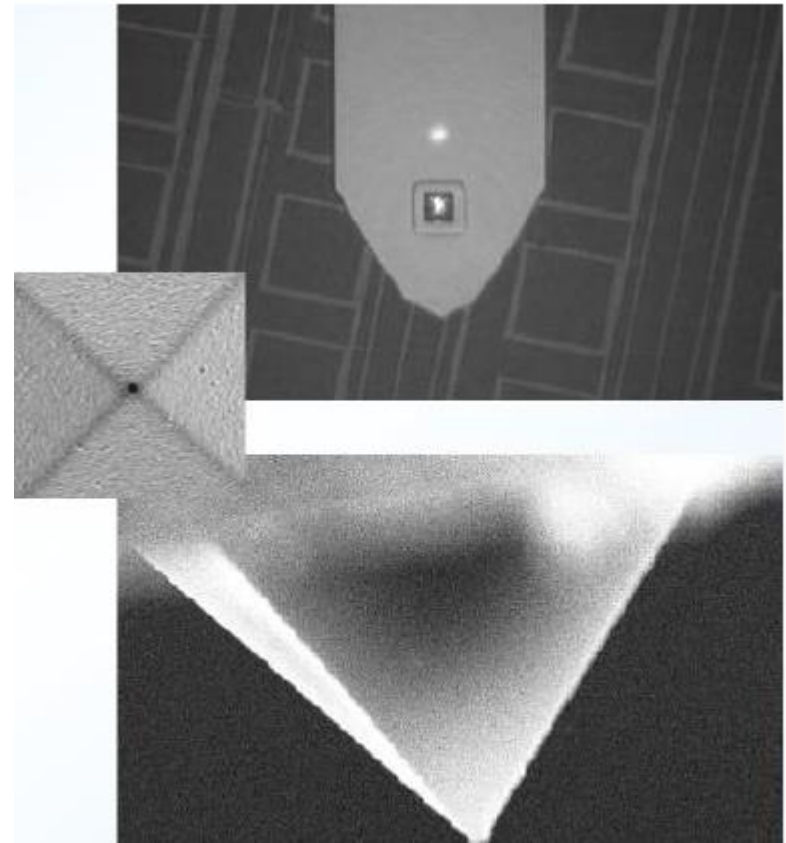
Destruction of an aperture probe by excessive input of light.

4.扫描近场光学显微镜-SNOM

➤孔径探针-AFM探针



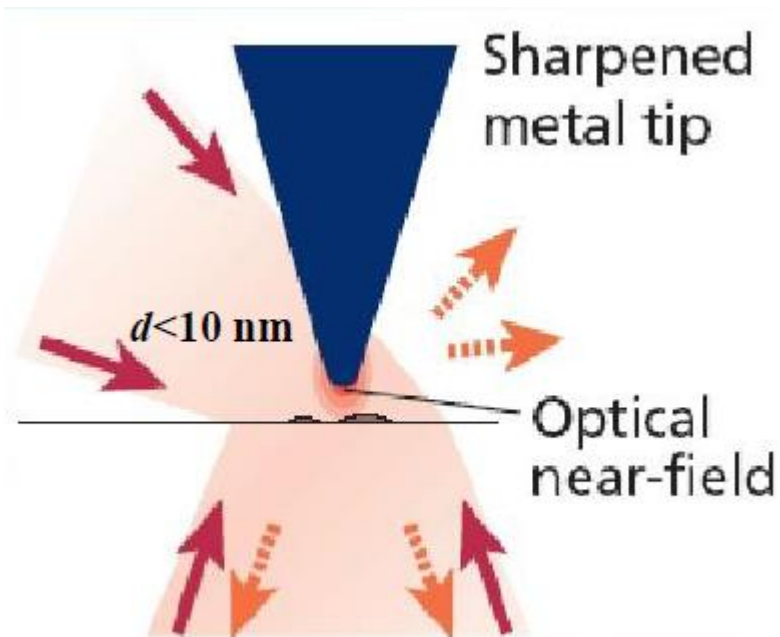
同时获得形貌像和近场像



孔径Si探针
by WITEC corp.

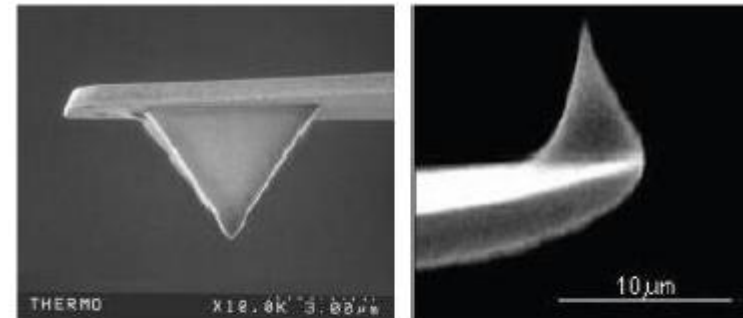
4.扫描近场光学显微镜-SNOM

➤无孔探针-金属针尖

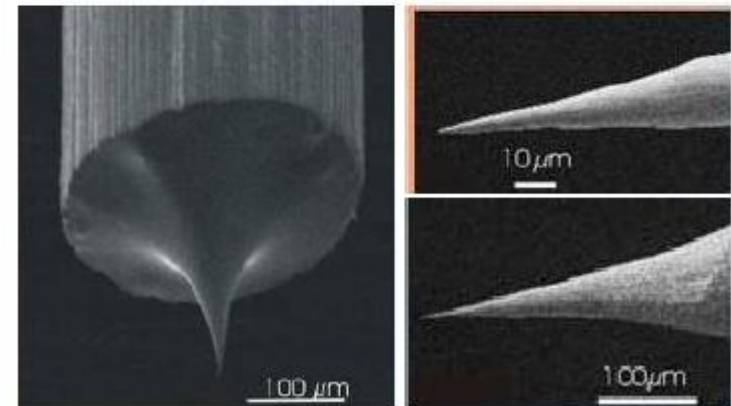


散射模式

Scattering mode SNOM



AFM上的Si探针



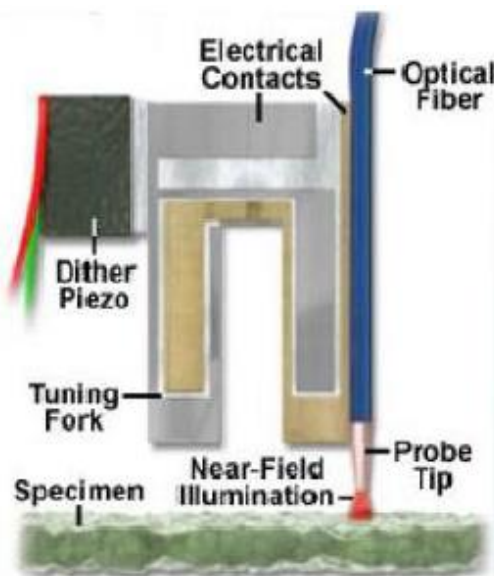
STM的钨探针

4.扫描近场光学显微镜-SNOM

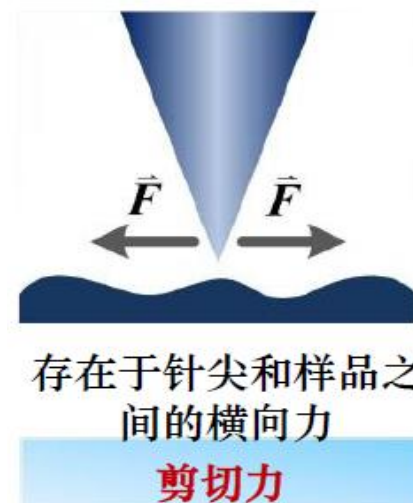
➤间距控制

技术要求:

1. 不能损坏样品和探针;
2. 距离控制在2~20nm;
3. 确保稳定, 重复性和可控性。



同时获得形貌像和近场像



- 以机械共振频率颤动并接近表面
- 针尖受切变力的阻尼而减小
- 颤动幅度反映了针尖与样品间距
- 利用反馈方法维持针尖颤动振幅

锁相放大 + 高精度压电陶瓷

4.扫描近场光学显微镜-SNOM

►工作模式

	孔径探针			无孔探针 (~ESP, ESPs)
	收集模式 (~ESP)	照明模式 (~EPS)	收集+照明模式 (~EPSP)	
透射模式			—	
反射模式				
全反射模式	 PSTM	 STOM	—	

4.扫描近场光学显微镜-SNOM

➤缩写简介

SNOM: Scanning Near-field Optical Microscopy

NSOM: Near-field Scanning Optical Microscopy



PSTM: Photon Scanning Tunnelling Microscopy

STOM / TSOM / TSNOM:

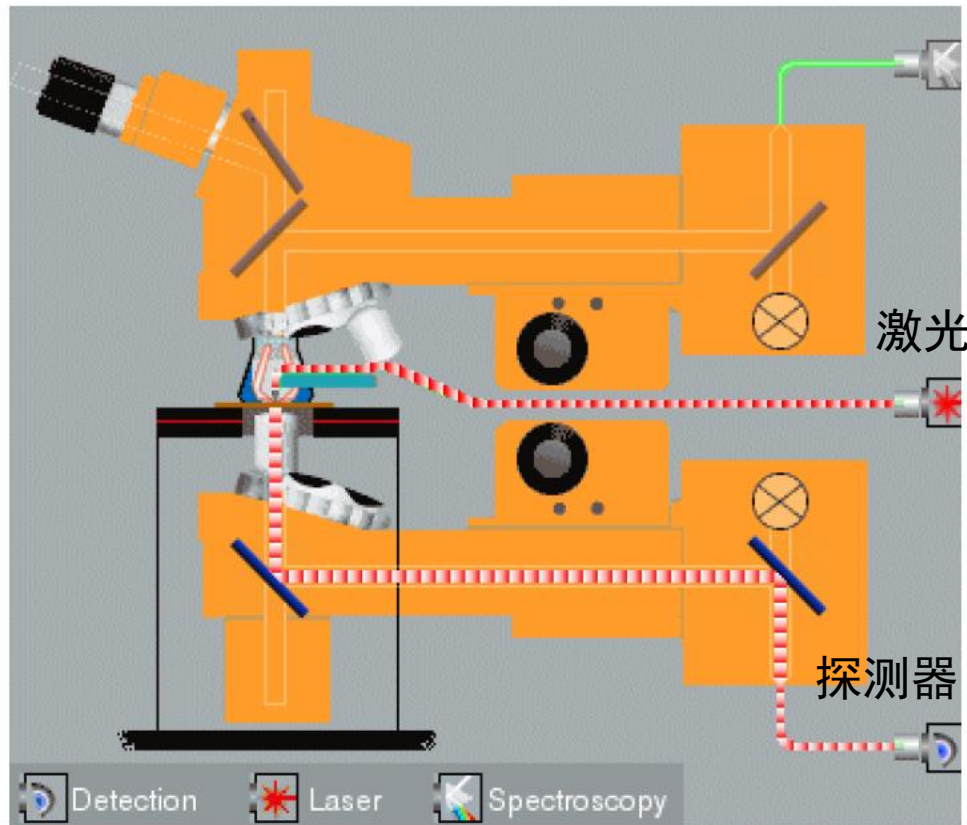
Scanning Tunnelling Optical Microscopy



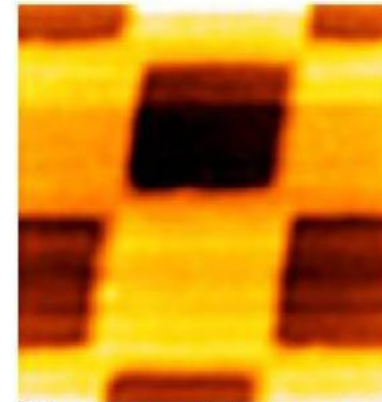
我们统称：SNOM

4.扫描近场光学显微镜-SNOM

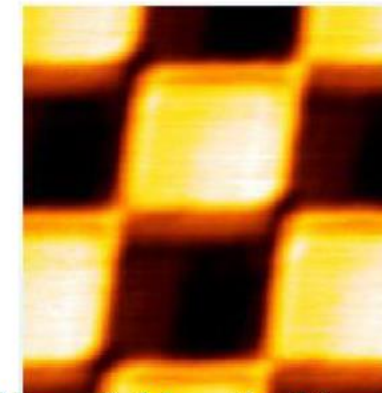
➤透射模式



Standard grating



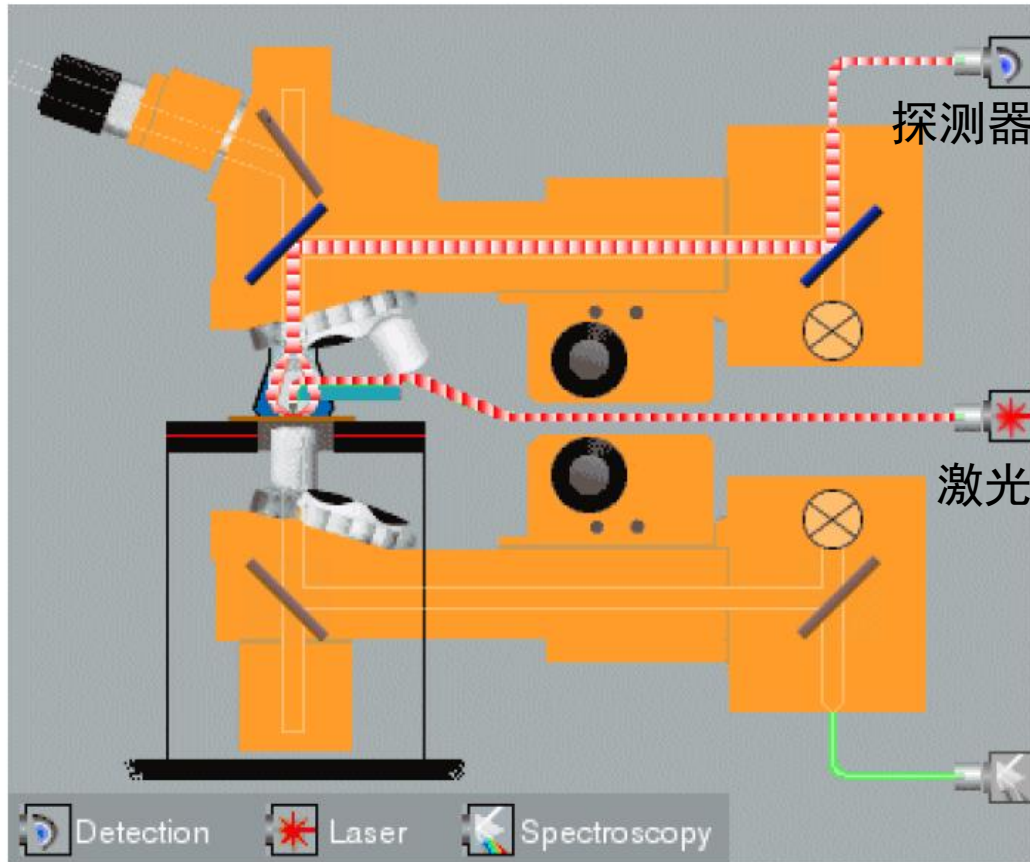
Topographic image



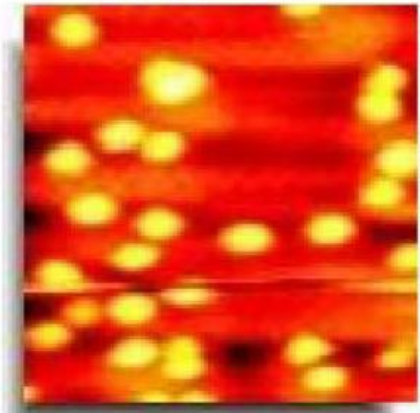
Near-field optical image

4.扫描近场光学显微镜-SNOM

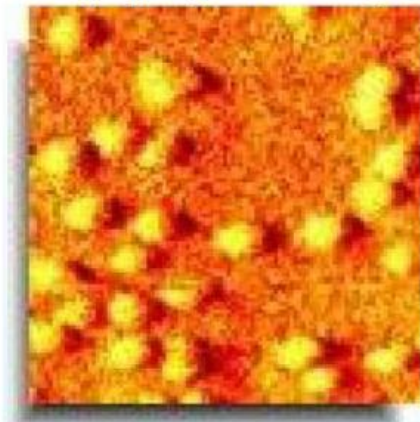
➤ 反射模式



Golden balls



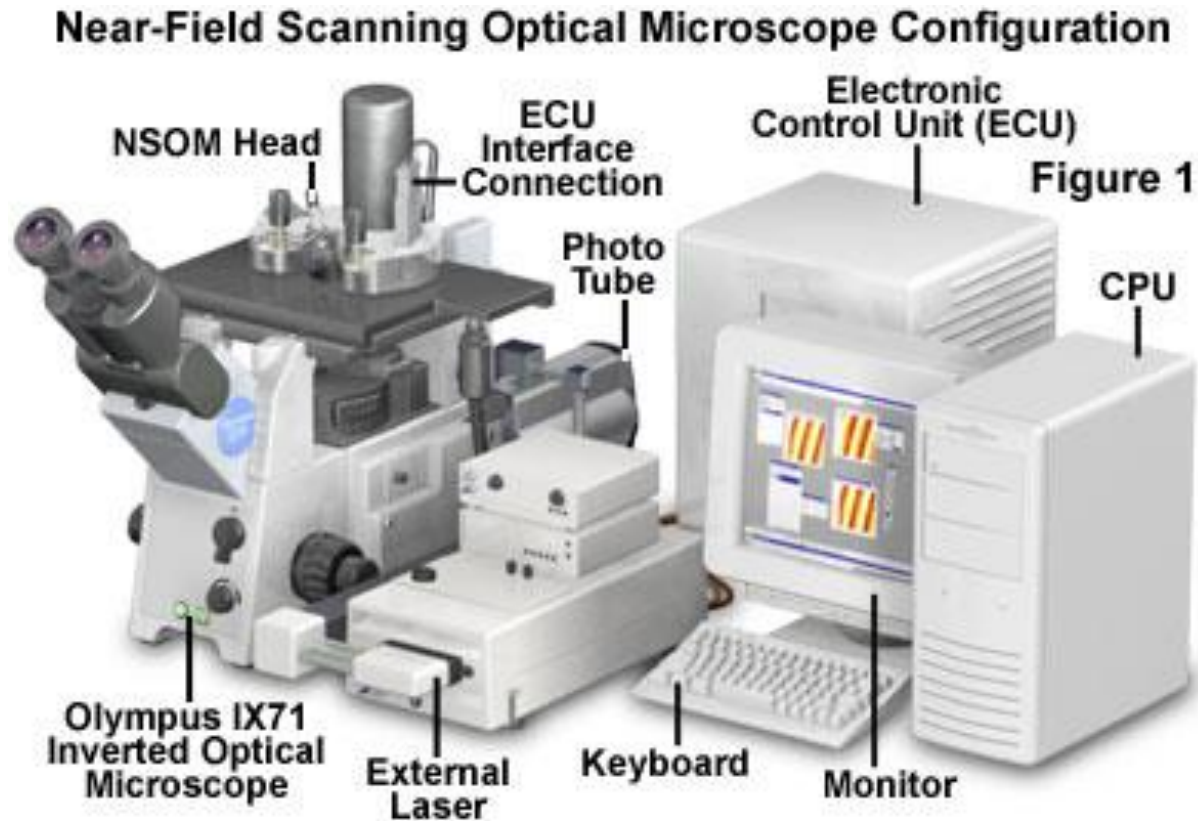
Topographic image



Near-field optical image

4.扫描近场光学显微镜-SNOM

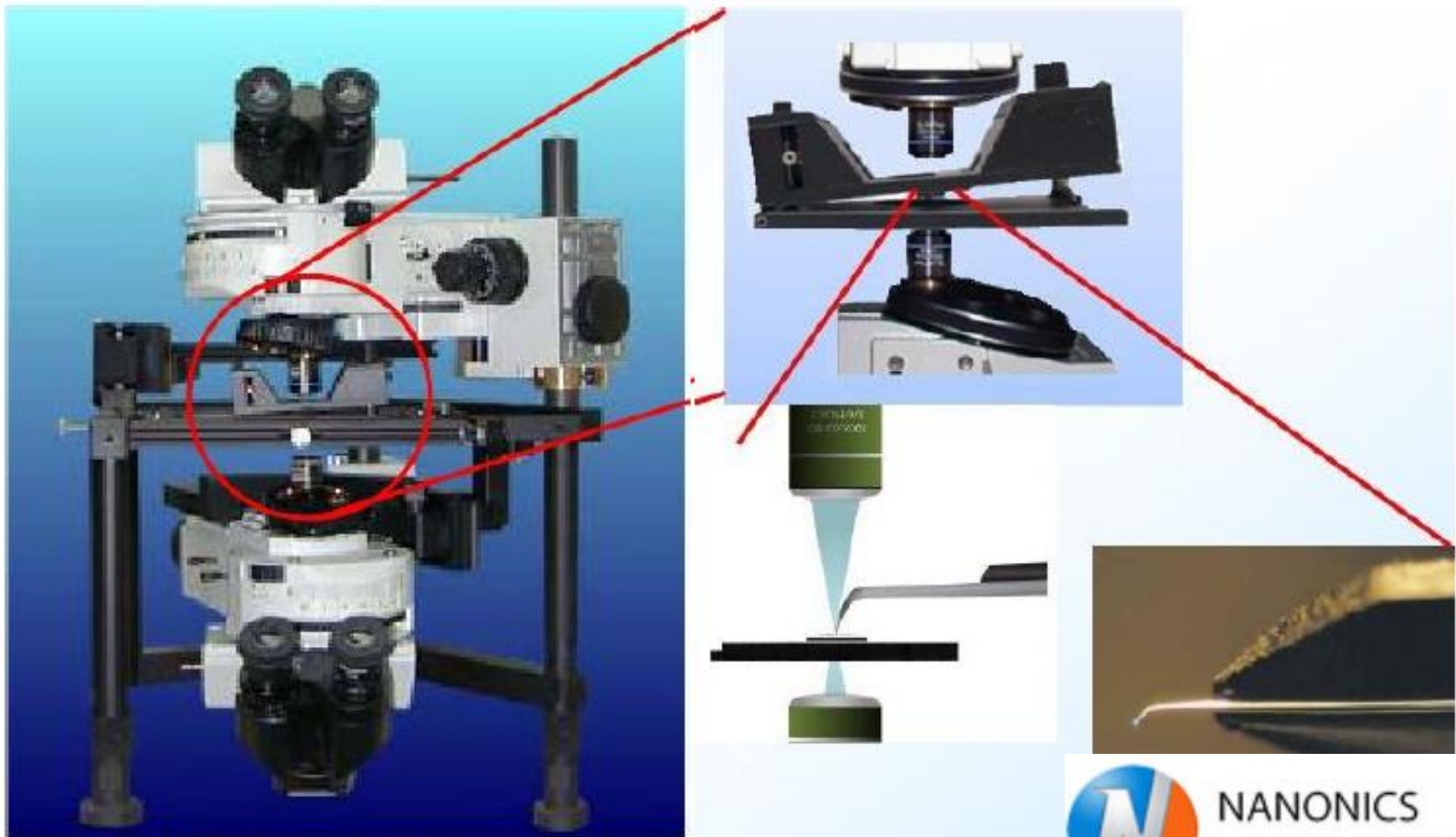
➤仪器介绍



<http://www.olympusmicro.com/primer/techniques/nearfield/nearfieldhome.html>

4.扫描近场光学显微镜-SNOM

➤ Nanonics corp. (Israel)



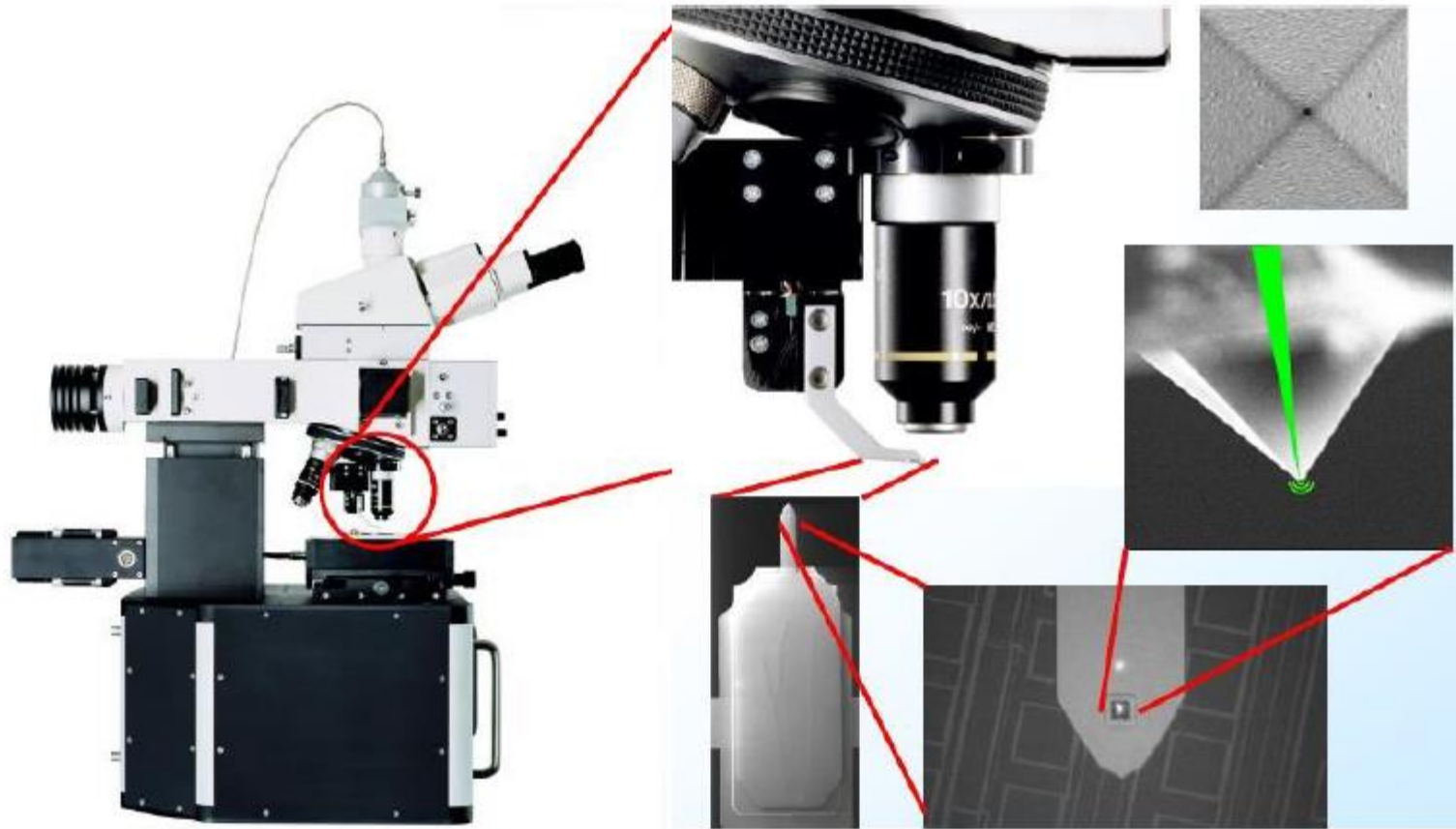
MultiView 1000™



NANONICS
IMAGING Ltd.

4.扫描近场光学显微镜-SNOM

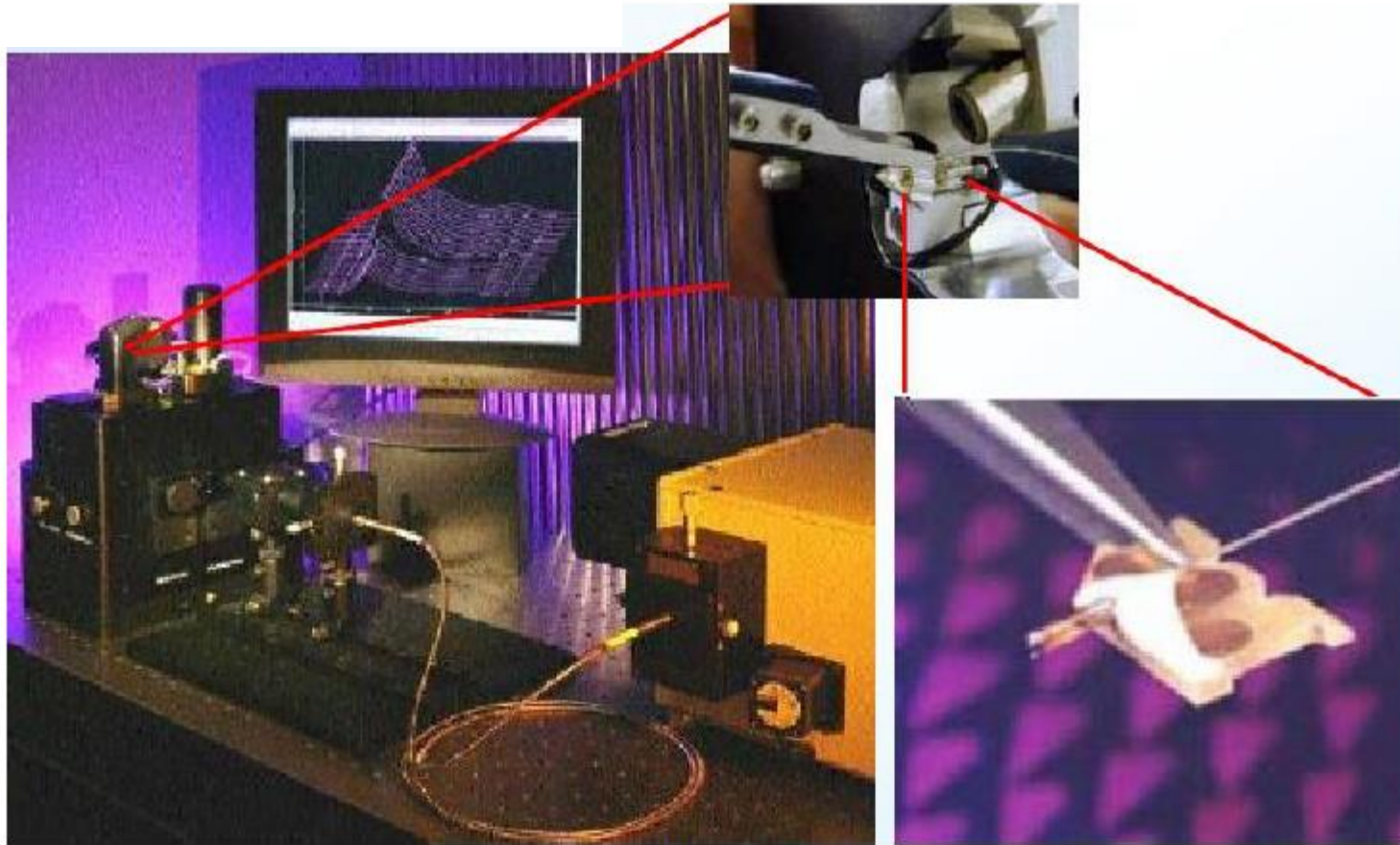
➤ Witec corp. (Germany)



Alpha300

4.扫描近场光学显微镜-SNOM

➤ Veeco corp. (America)



VeecoAurora3

4.扫描近场光学显微镜-SNOM

➤应用

特定用途的近场光学显微镜

- 生物近场光学显微镜
- 低温近场光学显微镜
- 偏光近场光学显微镜
- 红外光近场光学显微镜
- 时间分辨近场光学显微镜
- ...

应用

- 超分辨成像
- 近场光谱学
- 近场光电导
- 近场光刻/光直写
- 近场光存储
- 表面等离子体成像
- 激光烧蚀-纳米取样分析
- ...

总结

1. 近场光学

复波矢的出现突破了衍射极限，产生了倏逝场

2. 近场探测

基本原理：倏逝场----传播场

关键问题：有限大小的物体&近场探测

3. 扫描近场光学显微镜-SNOM

结构及工作原理

探头：孔径与无孔径

间距控制：剪切力反馈

工作模式：收集，照明