

什么是近场光学 P4
 显微镜分辨率 P5
 突破分辨率极限 P6-P9
 近场和远场的区别 P12
 如何进行光学近场检测 P16
 近场光学显微镜技术要点 P19
 (重点)小结近场光学基本原理 P20 前
 扫描近场光学显微镜 SNOM P22
 两项技术使得SNOM走向实际应用 P25
 SNOM框架及其组成 P26
 SNOM工作模式 P34

01

本讲内容

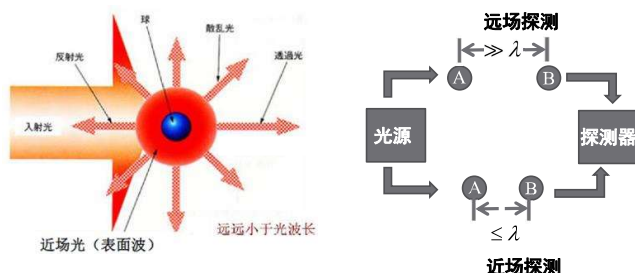
1. 什么是近场光学?
2. 为什么用近场光学?
 - 光学显微镜的历史
 - 突破分辨率衍射极限
 - 近场光的特殊性
3. 如何探测近场光学? (怎么用)
 - 牛顿实验 -光与物质相互作用 -关键问题及技术突破
4. 近场光学显微镜-SNOM
 - 发展 -框架和组件 -探针
 - 间距控制 -工作模式 -整个系统

Outline

03

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

Near field definition

04

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处为恰可分辨

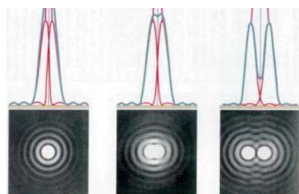
瑞利判据:

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

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



不可分辨 恰可分辨 完全可分辨

Rayleigh Criterion

06

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

Summary

43

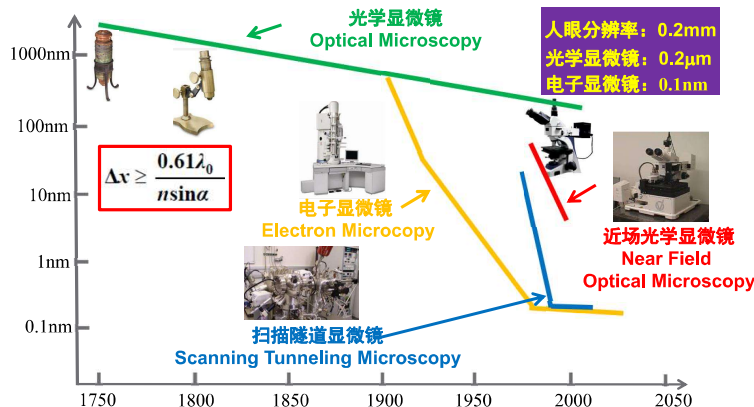
小结: 近场光学基本原理

- (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。

Principle of near field optics

20

2.为什么用近场光学—显微镜的历史



History of microscopy

05

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

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

海森伯测不准关系

$$|\Delta k| = |k_1 - k_2| \quad \xrightarrow{\alpha = \pi/2} \quad \Delta k_x = 2k_x = 2k \sin \alpha$$

O点观测A、B两点

$$\Delta x_{\min} 2k \geq 2\pi \quad \xrightarrow{|k| = \frac{2\pi}{\lambda}} \quad \Delta x_{\min} \geq \lambda / 2$$

分辨率极限的瑞利判据: $\Delta x_{\min} \geq \lambda / 2$

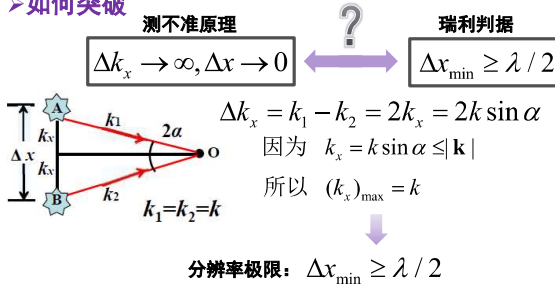
测不准原理是更基本的“瑞利判据”

Heisenberg's Uncertainty Principle

07

2. 为什么用近场光学—突破分辨率极限

如何突破



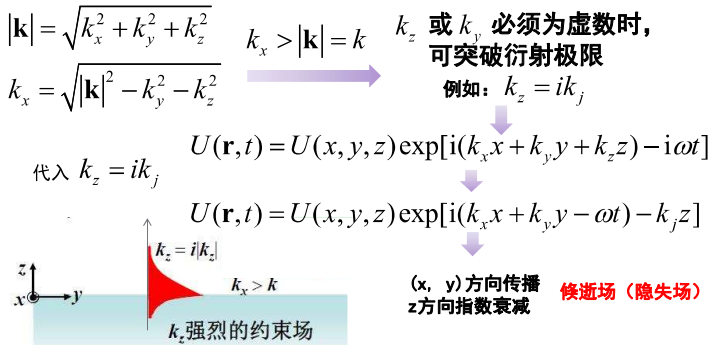
如果: $k_x > |k| = k \rightarrow$ 能不能? $\Delta x_{\min} < \lambda/2$

Breaking diffraction limit

08

2. 为什么用近场光学—突破分辨率极限

如何突破

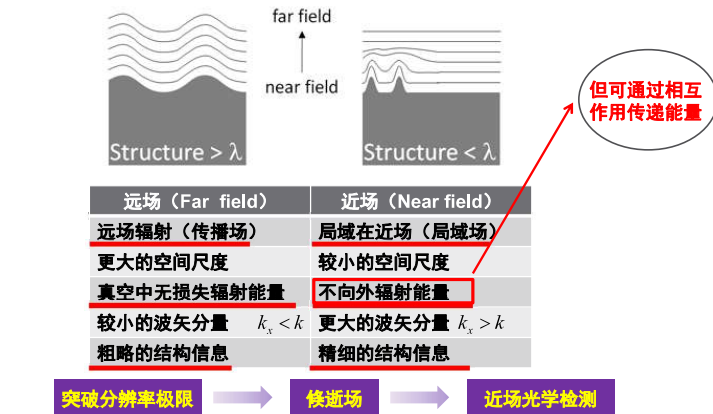


突破衍射极限的超分辨必须以电磁场的高度局域为条件

Imaginary wave vector component, Evanescent field

10

2. 为什么用近场光学—近场光学的特殊性

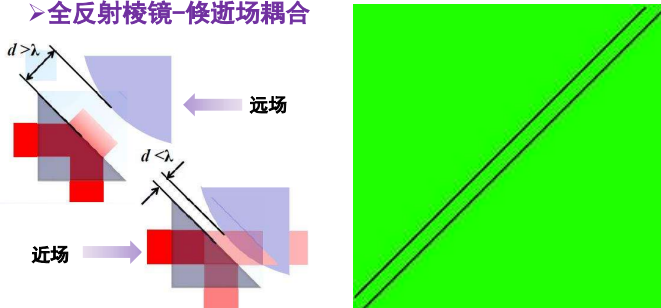


Near field, Evanescent field

12

3. 如何进行光学近场检测?

全反射棱镜-倏逝场耦合



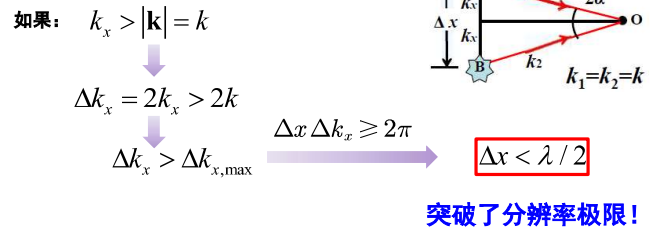
适当的物体浸在光学近场中可以将倏逝场转换成传播场
 倏逝场可被检测到但无法分辨, 需要具有超分辨的物体

Evanescent wave coupling

17

2. 为什么用近场光学—突破分辨率极限

如何突破



波矢分量大于其模量即可突破衍射极限

波矢分量 $k_x > |k| = k$?

Breaking diffraction limit

09

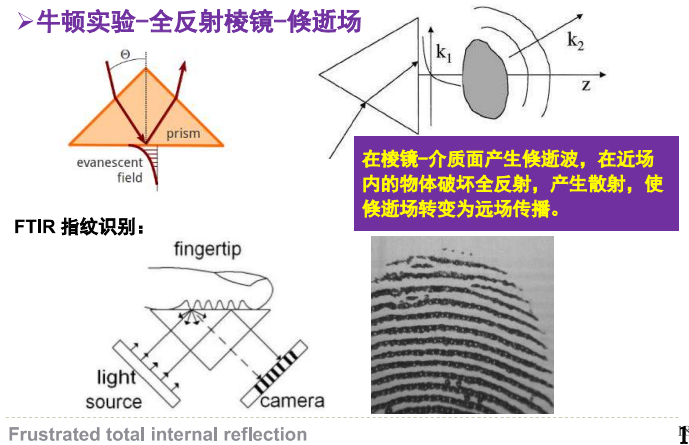
2. 为什么用近场光学—物体表面精细结构产生近场

- 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, $U_0(k_x, k_y)$ 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:
 $U(k_x, k_y, z) = U_0(k_x, k_y) \exp(i z \sqrt{k^2 - k_x^2 - k_y^2}) = U_0(k_x, k_y) e^{i k_z z}$
- 如果: $k_x^2 + k_y^2 < k^2$ $U(k_x, k_y, z) = U_0(k_x, k_y) e^{i k_z z}$ 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) 非辐射场
- 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

11

3. 如何进行光学近场检测?

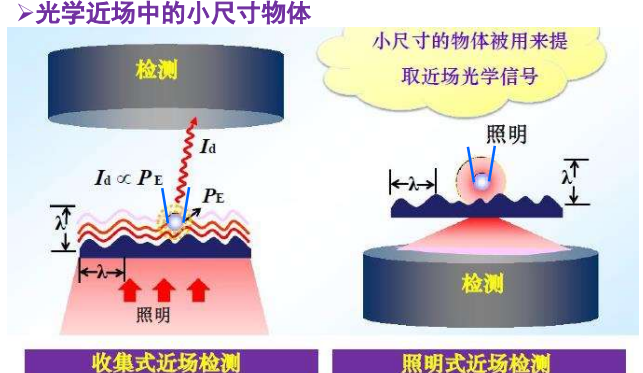
牛顿实验-全反射棱镜-倏逝场



16

3. 如何进行光学近场检测?

光学近场中的小尺寸物体



E.H. Syng, 22, April, 1928

Small object, collection, illumination

18

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

Major interaction

19

4. 扫描近场光学显微镜-SNOM

➤ 发展过程

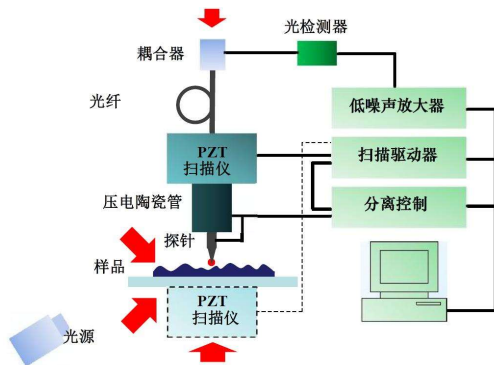


Sub-wavelength aperture, near field control, strong light source, 2D scan

24

4. 扫描近场光学显微镜-SNOM

➤ 框架与组成

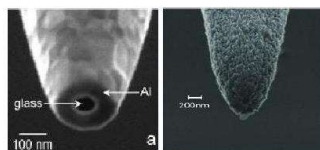
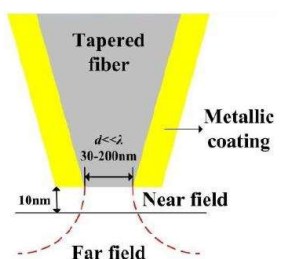


Frame, component

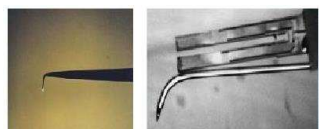
26

4. 扫描近场光学显微镜-SNOM

➤ 孔径探针-光纤探针



直孔径光纤探针
by NT-MDT corp.



弯曲孔径光纤探针

分辨率与灵敏度的折衷：通光孔/针尖尺寸不能太小

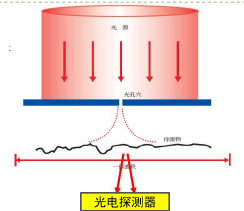
Optical fiber probe

28

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. Binnig & H. Rohrer第一部扫描隧道显微镜(STM)诞生。
- 1984年D.W. Pohl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。



History

22

4. 扫描近场光学显微镜-SNOM

➤ 发展过程

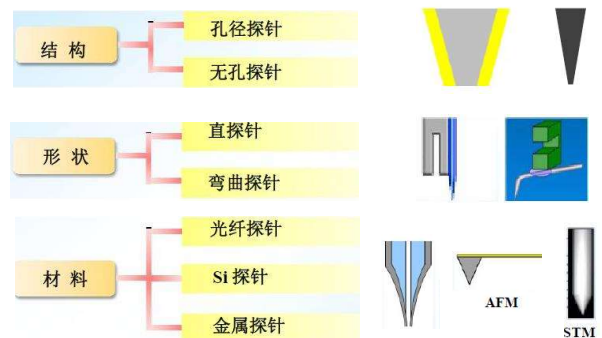


Key implementation

25

4. 扫描近场光学显微镜-SNOM

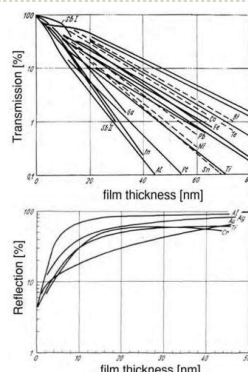
➤ 探针



Probe

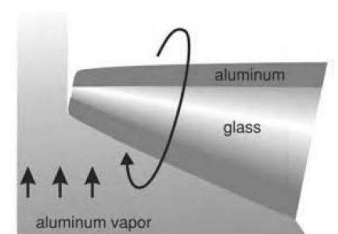
27

4. 扫描近场光学显微镜-SNOM



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

- 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

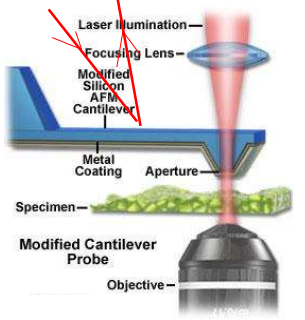


通光孔制作工艺

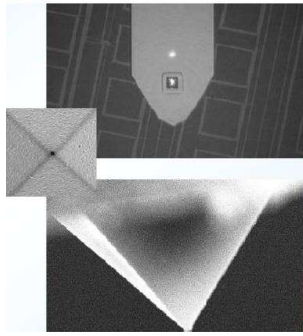
29

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



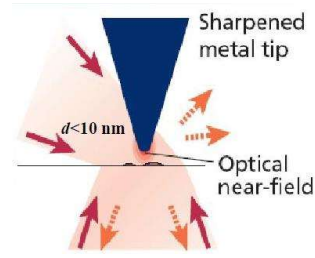
孔径Si探针
by WITEC corp.

AFM tip

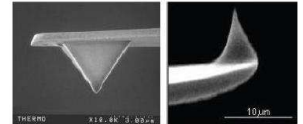
31

4.扫描近场光学显微镜-SNOM

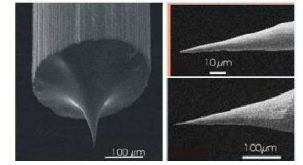
➤无孔探针-金属针尖



散射模式
Scattering mode SNOM



AFM上的Si探针



STM的钨探针

Metal probe

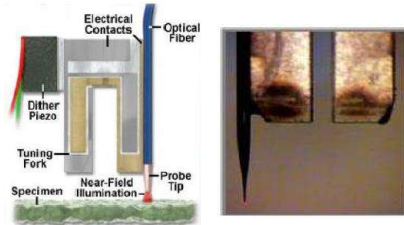
32

4.扫描近场光学显微镜-SNOM

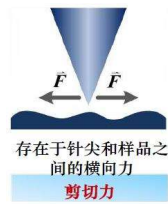
➤间距控制

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

Feedback mechanisms

33

4.扫描近场光学显微镜-SNOM

➤工作模式

	孔径探针			无孔探针 (~E _{sp} , E _{sp} s)
	收集模式 (~E _{sp})	照明模式 (~E _{ps})	收集+照明模式 (~E _{sp})	
透射模式				
反射模式				
全反射模式				
	PSTM	STOM		

Aperture modes of operation

34

4.扫描近场光学显微镜-SNOM

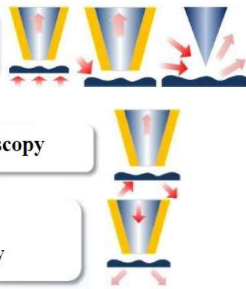
➤缩写简介

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

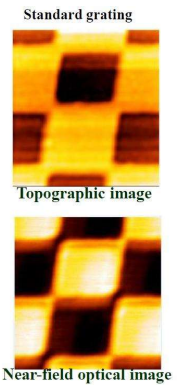
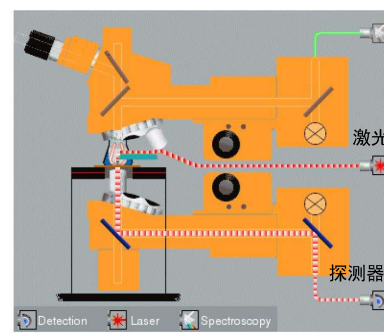


SNOM

35

4.扫描近场光学显微镜-SNOM

➤透射模式

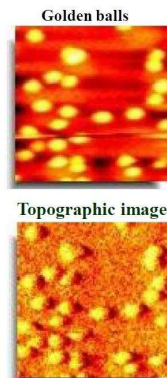
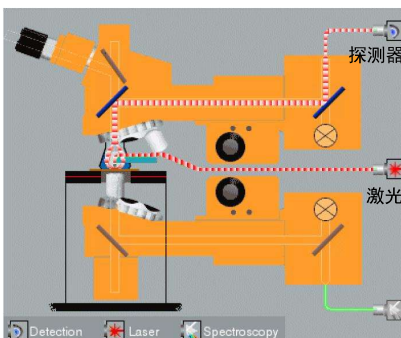


SNOM

36

4.扫描近场光学显微镜-SNOM

➤反射模式



Near-field optical image

SNOM

37

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

应用

- 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
- ...

- 超分辨率成像
- 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
- ...

SNOM Application

42