

AF/PSTM 图像分解方法及其数值模拟结果

吴世法, 潘石, 章健, 刘伟, 王景芝, 黄玉起

(大连理工大学物理系, 辽宁大连 116023)

[摘要] 介绍1996年申请的一项发明专利——光纤尖“共振原子力/光子扫描隧道显微镜 (AF/PSTM)”图像分解方法。该方法用入射角以光纤尖轴线为 π 对称的光束照明样品消假像, 在AF/PSTM双功能弯光纤尖共振频率条件下, 采用等尖至样品平均间距(即等振幅)扫描或等光子隧道信息平均强度扫描两种模式成像, 分解样品光学图像和形貌图像。用最简单的PSTM两介质模型推导了近似的图像分解的解析表达式, 最后用PSTM四介质模型数值模拟结果说明了该方法是可行的和有效的。

[关键词] AF/PSTM; PSTM消假像; PSTM图像分解; PSTM数值模拟

1 弯光纤尖共振“原子力/光子扫描隧道显微镜”图像分解方法

“原子力/光子扫描隧道显微镜 (AF/PSTM)”图像分解方法属于扫描光学显微镜领域, 特别涉及光子扫描隧道显微镜。1990年美国发明超衍射极限分辨的光子扫描隧道显微镜 (PSTM)^[1]。1991—1993年, 我国也研制了这种第一代PSTM^[2]。它对样品平整度要求很苛刻, 对不平整的样品表面不仅存在假像, 且与样品形貌图像、光学图像混合在一起, 图像解释困难, 难于推广, 不能商品化^[3]。1993年作者申请第一个专利“光子隧道扫描图像分解方法”(ZL93 1 0411.2), 于1999年7月获得中国专利局授予的发明专利权, 它用入射角以光纤尖轴线为 π 对称光束照明样品解决了消假像问题^[4-7]。本文介绍第二个发明专利(申请号: 96 1 11979.9)是在前一个专利的基础上提出的, 可较方便地消除假像和分解样品的光学与形貌图像。

该方法的特征是用弯光纤尖在样品表面近场垂

直于样品表面纵向共振颤动, π 对称光束全内反射均匀照明样品, 等光子隧道信息平均强度扫描或等尖至样品平均间距(即等振幅)扫描, 在同一像点同时采集近场相距两倍振幅光子隧道信息及其差值图像和原子力样品形貌图像, 用其消除假像和分解样品光学图像。

AF/PSTM弯光纤尖(见图1)扫描时作振幅(A)为常量的共振, 于样品表面近场共振颤动, 扫描过程中在尖所指样品上同一采样点, 同时采集尖至样品间距Z为 $(\bar{Z} - A)$ 和 $(\bar{Z} + A)$ 两个光子隧道信息 $I(\bar{Z} - A)$ 和 $I(\bar{Z} + A)$ 的平均信息 $\bar{I}(x, y)$ 图像, 及其差值 $\Delta I(x, y)$ 图像, \bar{Z} 为尖与样品表面平均间距, 光子隧道信息平均强度为

$$\bar{I} = [I(\bar{Z} - A) + I(\bar{Z} + A)]/2, \quad (1)$$

透明样品在 π 对称双光束(或 π 对称多光束)全内反射照明下, 要求扫描全视场为均匀, 根据全内反射定律, 光子隧道信息用隐失波(evanescent wave, 也称倏逝波)的电场振幅表示时可近似为

[收稿日期] 2001-04-24; 修回日期 2001-06-12

[基金项目] 国家自然科学基金资助项目(6000701); 科学技术部和中国分析测试协会仪器功能开发基金资助项目(GN-99-15)

[作者简介] 吴世法(1928-), 男, 浙江东阳县人, 大连理工大学教授, 博士生导师

$$E(Z, n_1, \theta) = E(Z = 0, n_1, \theta) \cdot \exp\left[-Z \frac{2\pi}{\lambda} (n_1^2 \sin^2 \theta - 1)^{1/2}\right], \quad (2)$$

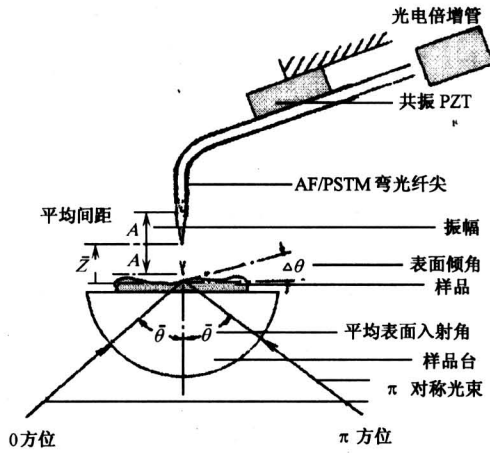


图1 AF/PSTM 图像分解原理图

Fig.1 The schematic of image separated of AF/PSTM

式中 Z 为尖至样品间距, n_1 为样品折射率, θ 为入射角 (大于临界角), λ 为单色光波长, 光束为近似平行的偏振光。式 (2) 说明在单光束系统中光子隧道信息与样品折射率、表面倾角 ($\Delta\theta$) 致使入射角 θ 的变化有关。折射率、形貌混合信息中存在因 $\Delta\theta$ 引入的假像信息^[3]。

在样品表面某一像元点, 设相对于 0 方位入射光束的入射角为 $\theta^0 = \bar{\theta} + \Delta\theta$ (见图 1), $\Delta\theta$ 为该点样品表面倾角, $\bar{\theta}$ 为相对于平均表面的光束入射角。在 π 方位设置与 0 方位呈 π 对称的另一入射光束, 其入射角为 $\theta^\pi = \bar{\theta} - \Delta\theta$ 。

对 0 方位光束: 式 (2) 用微分式表示, 设 Z 的微分量为 $\Delta Z = 2A$, 则微分表达式为

$$\Delta E^0 = E^0(\bar{Z} - A) - E^0(\bar{Z} + A) = -\bar{E} \frac{4\pi}{\lambda} A (n_1^2 \sin^2 \theta^0 - 1)^{1/2}, \quad (3)$$

其中 $\bar{E} = [E^0(\bar{Z} - A) + E^0(\bar{Z} + A)]/2$, 式 (3) 又可写成 (设 $\Delta\theta$ 为小量)

$$\sin \theta^0 = \frac{1}{n_1} \left[1 + \left[\frac{\lambda}{4\pi A} \frac{\Delta E^0}{\bar{E}} \right]^2 \right]^{1/2} = \sin(\bar{\theta} + \Delta\theta) \approx \sin \bar{\theta} + \Delta\theta \cos \bar{\theta}, \quad (4)$$

对 π 方位光束: 有与 0 方位完全相同的光束照明样品, 因此存在与式 (4) 完全相似的下述表达式

$$\sin \theta^\pi = \frac{1}{n_1} \left[1 + \left[\frac{\lambda}{4\pi A} \frac{\Delta E^\pi}{\bar{E}} \right]^2 \right]^{1/2} =$$

$$\sin(\bar{\theta} - \Delta\theta) \approx \sin \bar{\theta} - \Delta\theta \cos \bar{\theta}, \quad (5)$$

式 (4) 与式 (5) 相加得

$$n_1 = \frac{1}{2 \sin \bar{\theta}} \left[1 + \left[\frac{\lambda}{4\pi A} \frac{\Delta E^0}{\bar{E}} \right]^2 \right]^{1/2} + \left[1 + \left[\frac{\lambda}{4\pi A} \frac{\Delta E^\pi}{\bar{E}} \right]^2 \right]^{1/2}, \quad (6)$$

振幅与光强存在平方关系, 其中

$\bar{E}^2 \equiv \bar{I}, \Delta I^0 = 2\bar{E}\Delta E^0, (\Delta E^0/\bar{E})^2 = (\Delta I^0/2\bar{I})^2$, 又 $\Delta I^\pi = 2\bar{E}\Delta E^\pi, (\Delta E^\pi/\bar{E})^2 = (\Delta I^\pi/2\bar{I})^2$ 将其代入式 (6) 展开近似, 可得

$$n_1 \approx \frac{1}{2 \sin \bar{\theta}} \left\{ 2 + \frac{1}{2} \left[\left(\frac{\lambda}{4\pi A} \right)^2 \left[\left(\frac{\Delta I^0}{2\bar{I}} \right)^2 + \left(\frac{\Delta I^\pi}{2\bar{I}} \right)^2 \right] \right\}, \quad (7)$$

设置 π 对称双光束 (偏振、强度、 $\bar{\theta}$ 完全相同, 互不相干) 同时照射样品, 在同一像元, $\Delta I = (\Delta I^0 + \Delta I^\pi)$, $(\Delta I)^2 = (\Delta I^0 + \Delta I^\pi)^2$, 因 $\Delta I^0 \approx \Delta I^\pi$, $(\Delta I)^2 \approx 2 [(\Delta I^0)^2 + (\Delta I^\pi)^2]$, $A, \bar{\theta}, \lambda$ 为常量, 式 (7) 可用下式表示

$$n_1 \approx K_1 + K_2 \left[\frac{\Delta I}{\bar{I}} \right]^2, K_1, K_2 \text{ 为常量}, \quad (8)$$

即 $n_1(x, y)$ 与 $(\Delta I/\bar{I})^2$ 有近似正比的关系。

1) 对完全透明样品, 设置 π 对称光束全内反射均匀照明, 等光子隧道信息平均强度扫描。设置 \bar{I} 为常量近场反馈, 采集因光纤尖共振产生的光子隧道信息差值图像, 即信号交流成分中的峰-峰值图像 $\Delta I_{Cl}(x, y)$, 可获得样品的折射率图像 $n_1(x, y)$, 根据式 (8) 因 \bar{I} 为常量,

$$n_1(x, y) \propto [\Delta I_{Cl}(x, y)]^2, \quad (9)$$

$[\Delta I_{Cl}(x, y)]^2$ 图像与 $n_1(x, y)$ 图像存在近似正比关系, 它可正确表示样品折射率图像 $n_1(x, y)$ 。

2) 对不完全透明样品, 设置 π 对称光束均匀照明, 等尖与样品平均间距 (等振幅) 扫描, 且平均间距接近光纤尖的共振振幅 ($\bar{Z} \rightarrow A$), 可同时采集 3 幅图像: 光纤尖共振光子隧道信息平均图像 $\bar{I}_{CD}(x, y)$; 光子隧道信息差值图像 $\Delta I_{CD}(x, y)$; 以及样品厚度变化的原子力形貌图像 $\Delta Z_0(x, y)$ 。设样品透过率图像为 $T(x, y)$, 由于 $I_{CD}(z=0, x, y) = I_0 T(x, y)$, 其中 I_0 为照明样品的初始均匀光强 (常量), 透过率图像为

$$T(x, y) = I_{CD}(z=0, x, y)/I_0 \propto$$

$$I_{CD}(z=0, x, y) = \bar{I}_{CD}(x, y) + \Delta I_{CD}(x, y)/2 \quad (10)$$

即样品透过率图像 $T(x, y)$ 正比于 $I_{CD}(z=0, x, y)$ 图像。

$\Delta I_{CD}(x, y) = I_{CD}(z=0, x, y) - I_{CD}(z=2A, x, y)$, 式 (8) 同样适用于等平均间距 (等振幅) 扫描情况, 仅式中 \bar{I} 不是常量, 据此

$$n_1(x, y) \propto [\Delta I_{CD}(x, y) / \bar{I}_{CD}(x, y)]^2 \quad (11)$$

通过实验获得 $\bar{I}_{CD}(x, y)$ 和 $\Delta I_{CD}(x, y)$ 两幅图像后, 用式 (10) 和式 (11), 通过图像处理方法, 即可获得 $T(x, y)$ 和 $n_1(x, y)$ 近似的图像。

2 数值模拟结果

上述 AF/PSTM 图像分解表达式是在最简单的 PSTM 二介质模型条件下解析推导出来的近似表达式。样品折射率的近似表达式说明, 在一定范围内, 该方法不仅可消除假像, 且可用实测的 ΔI 和 \bar{I} 图像分解出样品折射率图像。下一步, 将采用较复杂的 PSTM 四介质模型, 通过数值模拟来论证该方法的有效性。较复杂的四介质 (样品台—样品—空气—探测尖) 模型见图 2, 利用多层平面介质数值模拟方法^[6,7]给出结果见图 3 和图 4。图 3 为 (Z→A) 等平均间距 (等振幅) 扫描, 光纤尖共振光子隧道信息相对差值平方 $[\Delta I_{CD}/\bar{I}]^2$ 的 (n_1, z_0) 三维分布图。图 4 为等强度扫描光纤尖共振光子隧道信息差值平方 $(\Delta I_{CI})^2$ 的 (n_1, z_0) 三维分布图。在样品厚度 (z_0) 变化不大和厚度不超过 150 nm 的条件下有近似比例关系, 见图中几条粗线, 均接近直线。

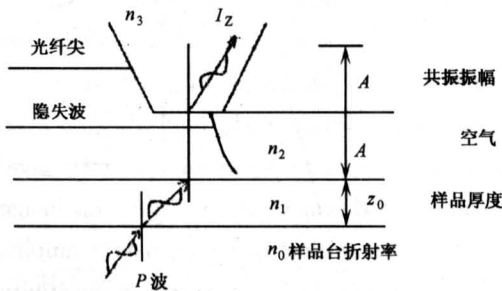


图 2 PSTM 四介质模型

Fig.2 PSTM mode with 4 mediums

数值模拟结果说明: 对复杂模型此方法仍是可信和有效的, 由纵座标相对数值说明, 图 3 反映 n_1 变化灵敏度比图 4 高一个数量级, 因此前者更

具实用价值。等平均间距 (即等振幅) 扫描模式比等平均强度扫描模式更好, 有更多优越性, 它不仅反映样品折射率灵敏度好些, 而且还同时可获得 3

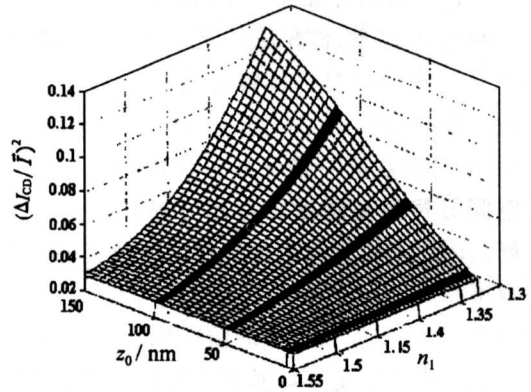


图 3 等间距相对差值平方的三维图

Fig.3 $(\Delta I_{CD}/\bar{I})^2$ vs (n_1, z_0) .

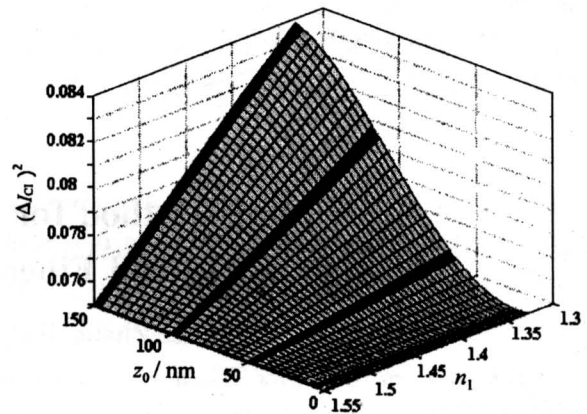


图 4 等强度差值平方的三维图

Fig.4 $(\Delta I_{CI})^2$ vs (n_1, z_0)

幅图像: 样品折射率图像 (用式 11), 样品透射率图像 (用式 10) 和样品形貌原子力图像。样品最佳厚度应选择在 100~50 nm。当样品形貌原子力图像显示样品厚度相差很大的地方, 可作适当校正, 提供较准确的 n_1 图像。如何获得 $\Delta I_{CD}(x, y)$ 和 $\bar{I}_{CD}(x, y)$ 图像信息将另有文论述。

3 小结

AF/PSTM 等平均间距 (等振幅) 扫描方法的优点:

- 1) 消除 PSTM 假像, 同时可给出样品透过率图像、折射率图像和 AFM 形貌图像。

2) 实现光学超衍射极限分辨最关键的问题是获取样品近场隐失光信息, 同时设法摒弃传输光产生的背景, 以提高图像的对比度。根据隐失光存在指数衰减, 而传输光在小于 $\lambda/10$ 的近场不存在指数衰减特点, 因此本方法中光信息的交流成分 ΔI_{CD} 仅含隐失光信息, 传输光信息均可在直流成分中被隔离。

3) 光纤尖在同一像元共振获取隐失光信息能保证空间分辨的高精度, 它比“提升模式扫描方法”好, 因后者需两次重复扫描, 高精度的位置重复性很难保证。

4) 可改善隐失光信号的信噪比。由于 ΔI_{CD} 信号很微弱, 光电倍增管、光源等随机噪声干扰很严重, 并可能湮没它。但它有已知的选定频率, 可设计降噪电路, 以较大地提高信噪比。

5) 适用于生物样品。弯光纤尖的共振动作类同于轻敲模式 (tapping mode), 不易损坏生物等软样品的表面。

6) 弯光纤尖有不易损坏探测尖的好处, 因弯光纤尖有弹力臂可起到缓冲的作用, 而直光纤尖

PSTM 系统的探测尖无此缓冲, 易损坏。

参考文献

- [1] Redick R C, Warmack D W, Ferrel T L, et al. Photon scanning tunneling microscopy [J]. Rev Sci Instrum, 1990, 61(12): 3669~3677
- [2] 吴世法, 姚骏恩, 简国树, 等. 光子扫描隧道显微镜的进展 [J]. 光学学报, 1998, 18(2): 191~198
- [3] Wu Shifa. Photon scanning tunneling microscopy now and in the future [J], Scanning, 1995, 17(1): 18~22
- [4] 吴世法. 近代成像技术与图像处理 [M]. 北京: 国防工业出版社, 1997. 294~339
- [5] Wu Shifa, Jian Guoshu, Pan Shi. How to explain the image of photon scanning tunneling microscope [J]. SPIE, 1998, 3467: 34~39
- [6] 简国树, 潘石, 王玉光. PSTM 等强度扫描方式下减小假像的数值模拟 [J]. 电子显微学报, 1999, 18(1): 13~18
- [7] 王晓秋, 简国树, 吴世法, 等. 多层系统周期样品 PSTM 消假像微扰近似 [R]. 第六届全国扫描隧道显微学学术会议 (STM '96), 厦门, 2000

The Method for Separating Image of the Bent Optical Fiber Tip Resonated AF/PSTM

Wu Shifa, Pan Shi, Zhang Jian, Liu Wei, Wang Jingzhi, Huang Yuqi

(Department of physics, Dalian University of Technology, Dalian, Liaoning 116023, China)

[Abstract] An invented patent about the method for separating image of Atom Force/Photon Scanning Tunneling Microscope (AF/PSTM) and its numerical simulation results are introduced. In AF/PSTM π -symmetry lighting beams were used for eliminating false image. The AF/PSTM bi-functional tip is made of bent optical fiber and works on constant amplitude resonance. ΔI_{CD} and ΔI_{CI} are AC information of photon tunnel of AF/PSTM under constant average distance ($\bar{Z} \rightarrow A$) scanning mode (constant amplitude mode) and constant average intensity scanning mode respectively. Both $(\Delta I_{CD}/\bar{I}_{CD})^2$ and $(\Delta I_{CI})^2$ are approximately linear with refractive index (n_1) of the sample. Results of the numerical simulation illustrate that the method for separating image of AF/PSTM is efficient. AF/PSTM constant average distance ($\bar{Z} \rightarrow A$) scanning mode (constant amplitude mode) has more advantages than that of constant average intensity one, such as the better response sensitivity of refractive index of the sample, and ability of getting three images of transmissivity, refractive index and morphology of sample simultaneously. Some excellencies of this method are listed at last.

[Key words] AF/PSTM; PSTM false image eliminated; PSTM image separated; PSTM numerical simulation