

文章编号: 0253-2239(2005)08-1099-6

原子力与光子扫描隧道组合显微镜*

吴世法 章健 潘石 简国树 李银丽 孙伟 王晓秋 黄玉起 宋林峰 张毅

(大连理工大学物理系近场光学与纳米技术研究所, 大连 116024)

摘要: 介绍了超高分辨光子扫描隧道显微镜(PSTM)的研究历程,为解决第一代(单光束照明)光子扫描隧道显微镜中存在人为假象和样品光学图像与形貌图像难于分离两个难题,用 π 对称双光束照明方法消假象,用原子力与光子扫描隧道组合显微镜(AF/PSTM)图像分解方法分离样品光学透过率、折射率与形貌图像。研制成功新一代原子力与光子扫描隧道组合显微镜(AF/PSTM)样机。该样机在一次扫描中已获得两幅原子力显微镜图像(形貌与相位)和两幅光学图像(透过率和折射率),有效地减少了假象,分解了样品光学折射率、透过率与形貌图像。

关键词: 显微; 超分辨; 光子扫描隧道显微镜; 原子力显微镜; 扫描近场光学显微镜

中图分类号: TH742 文献标识码: A

Photon Scanning Tunneling Microscope Combined with Atomic Force Microscope

Wu Shifa Zhang Jian Pan Shi Jian Guoshu Li Yinli Sun Wei

Wang Xiaoqi Huang Yuqi Song Linfeng Zhang Yi

(*Institute of Near-Field Optics and Nano-Technology, Department of Physics,*

Dalian University of Technology, Dalian 116024)

Abstract: The development course of Photon Scanning Tunneling Microscopy (PSTM) is introduced. There are two difficult problems in first generation (with single beam) PSTM, which are the spurious image and the mixture of optical image with topography of sample in PSTM imaging. With the method of π symmetry two beams lighting to eliminate the optical spurious image, and the method of AF/PSTM separating image was used to separate the optical image from topography image of sample. The patent instrument named AF/PSTM (atomic force/photon scanning tunneling microscope) have been successfully developed, with which two AFM images (topography and phase images) and two PSTM images (transmissivity and refractive index images) of sample in once scanning are obtained. The AF/PSTM can limit the spurious effects due to non-isotropic illumination with single beam and can separate the refractive index image and transmissivity image from topography image.

Key words: microscopy; superresolution; photo scanning tunneling microscopy (PSTM); atomic force microscope (AFM); scanning near-field optical microscope (SNOM)

1 引言

常规(远场)光学显微成像分辨能力受衍射极限约 $\lambda/2$ 限制,为了在光学显微成像中突破衍射极限,1928年Synge^[1]和1956年O'keefe^[2]分别独立提出小孔径($\ll \lambda/2$)扫描近场光学显微镜(A-SNOM)的设想,但由于技术发展条件所限,直到Binning和Rohrer发明(电子)扫描隧道显微镜^[3]之后,Pohl^[4]首次演示

光学小孔径扫描近场光学显微镜实验取得成功,Betzig^[5]研制成功了用光纤尖在样品表面近场切向共振、以剪切力控制等间距扫描的小孔径扫描近场光学显微镜。1995年,国际市场上开始推出剪切力控制等间距的小孔径扫描近场光学显微镜商品,至今,超衍射极限分辨光学显微镜商品仍仅此一种。

1991年Ferrel等^[6]发明了另一种超衍射极限

* 国家自然科学基金(60007001)和科技部基金(NG-99-15)资助课题。

作者简介: 吴世法(1928~),男,浙江东阳人,大连理工大学物理系教授,博士生导师,主要从事近场光学、近场拉曼增强、纳米技术和近代成像技术及其在生物学中的应用。E-mail: wsf@dlut.edu.cn

收稿日期: 2004-09-14; 收到修改稿日期: 2004-12-20

分辨的光学显微镜。光子扫描隧道显微镜(Photon scanning tunneling microscope, PSTM)。该名称是仿照电子扫描隧道显微镜(ESTM)的名称提出来的,两者除了光子、电子区别之外,它们有相似的原理、结构。

1991年10月我国获得突破衍射极限的第一幅光子扫描隧道显微镜光学图像:1 klp/mm 透射型全息光栅光子扫描隧道显微镜图像^[7~9]。1993年研制成功我国第一台光子扫描隧道显微镜系统。该系统对十余种样品取得了超衍射极限分辨的光子扫描隧道显微镜图像^[8~11],系统成像分辨能力横向达到10 nm($\lambda/60$),纵向优于1 nm。但是,这种以单光束不对称照明的第一代光子扫描隧道显微镜仅适用于已知表面足够平整的样品,因为光子隧道信息是照明光束入射角的函数,样品表面不平的倾角相当于光束入射角变化,它将引入人为的假象,而且样品形貌信息与光学信息(折射率与透过率)混在一起不能分解,给图像解释带来很大困难^[12]。因此第一代光子扫描隧道显微镜推广应用受到局限,不能商品化。

1993年4月和1996年9月我们申请的三项国内外发明专利^[13,14],解决了光子扫描隧道显微镜中消假像和分解样品形貌与光学图像两大难题。根据发明专利研制的专利样机已经完成。并于2002年9月通过专家组鉴定。本文着重介绍研制原子力与光子扫描隧道组合显微镜样机的情况与结果。

2 原子力与光子扫描隧道组合显微镜分解光学图像方法

原子力与光子扫描隧道组合显微镜的核心是设置一个具有原子力显微镜与光子扫描隧道显微镜双功能共振的弯光纤尖系统(图1)。一般透射样品有透过率与折射率二个光学特性参量。将透射样品放在对称光束照明的全内反射样品台上,通过对称光束照明样品可消除因样品表面起伏(倾角)而引入的人为假象信息^[13~15],数值模拟研究^[16,17]和实验研究^[18]均已证实了这种消假像方法是正确的、有效的。

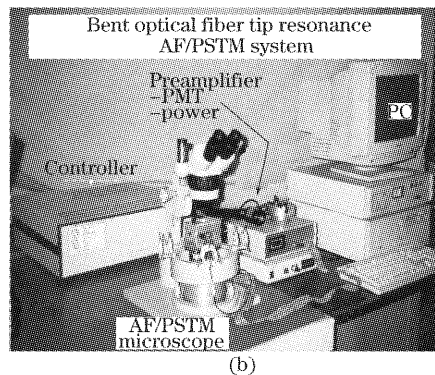
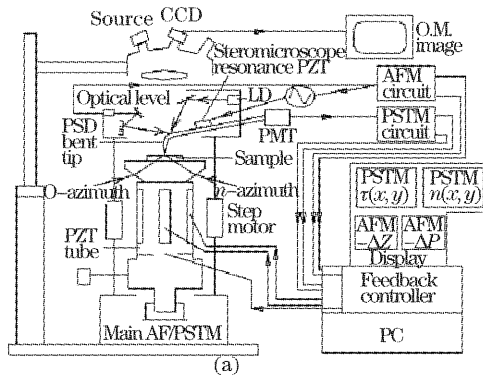


图1 (a) 原子力与光子扫描隧道组合显微镜结构图, (b) 原子力与光子扫描隧道组合显微镜样机照片

Fig. 1 (a) AF/PSTM block diagram, (b) photograph of AF/PSTM

用最简化二层光子扫描隧道显微镜模型,可推导出近似的样品光学性质光子扫描隧道显微镜图像表达式。设透明样品的折射率为 n_1 , 在单色、平行的全内反射光束照明下,离样品表面 Z 处的隐失波光强可近似用下式表示:

$$I(Z) = I(0) \exp \left[-Z \frac{4\pi}{\lambda} (n_1^2 \sin^2 \bar{\theta} - 1)^{1/2} \right], \quad (1)$$

将上式微分,设 $\Delta Z = 2A$, A 为尖的振幅,则

$$\Delta I = I(\bar{Z} - A) - I(\bar{Z} + A) =$$

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

式中 $I(\bar{Z} - A)$ 与 $I(\bar{Z} + A)$ 分别为 $Z = (\bar{Z} - A)$ 和 $Z = (\bar{Z} + A)$ 处的隐失波光强, ΔI 为弯光纤尖在纵向共振过程中采集到隐失场光强信息交流成份中

的峰谷值。(2)式展开近似得

$$n_1 = K_1 - K_2 \left[\frac{\Delta I}{I(0)} \right]^2, \quad (3)$$

式中 $K_1 = 1/\sin \bar{\theta}$, $K_2 = (\lambda/8A\pi)^2/\sin \bar{\theta}$, $\bar{\theta}$ 为样品平均表面的光束入射角, A 和 λ 均为常量,因此 $[\Delta I/I(0)]^2$ 与 n_1 有近似线性关系。即 $[\Delta I/I(0)]^2$ 图像可近似表示 n_1 图像:

$$\Delta n_1(x, y) \propto -[\Delta I(x, y)/I(0)]^2, \quad (4)$$

较复杂的四层平面(样品台-样品-空气-探测介质)光子扫描隧道显微镜模型只能用数值模拟计算,在样品厚度差别不太大的情况下,(4)式线性关系也能近似成立,见文献[19]。

一般透光样品不能保证各处透过率 $T(x, y)$ 都相同,因此(2)式中 $I(0)$ 值不是一个常量,设照明样品的

均匀入射光强 I_0 为常量, 则 $I(0) = T(x, y)I_0$, 因此

$$T(x, y) = I(0, x, y)/I_0, \quad (5)$$

$$\Delta T(x, y) \propto I(0, x, y), \quad (6)$$

根据(4)式和(6)式, 只要原子力与光子扫描隧道组合显微镜在扫描过程中从光子隧道信息分离出 $\Delta I(x, y)$ 和 $I(0, x, y)$, 就可实时给出样品的折射率变化图像和透过率变化图像。为此在系统中设计了一个光子扫描隧道显微镜信号前置电路, 将光电倍增管输出的光子隧道信息分离出 ΔI 与 $I(0)$ 信号, 通过实时运算显示 $\Delta n_1(x, y)$ 和 $\Delta T(x, y)$ 。

3 原子力与光子扫描隧道组合显微镜样机的结构图与实物

原子力与光子扫描隧道组合显微镜样机由双目立体显微镜下面的主机, 控制系统, 光子扫描隧道显微镜的光电倍增管、前置放大器和计算机组成。双目立体显微镜的放大倍率 7~270 倍, 光子扫描隧道显微镜的放大倍率数千至数万倍(分辨力 10~5 nm), 单独使用原子力显微镜的放大倍率可超过十万倍。图 1(a)是系统的结构, 图 1(b)是系统的外形照片。双功能原子力与光子扫描隧道组合显微镜弯光纤尖是系统的核心部分, 用于采集原子力显微镜和光子扫描隧道组合显微镜信号。光子扫描隧道显微镜有 π 对称双光束照明, 用于消假象。原子力与光子扫描隧道组合显微镜工作在等振幅共振轻敲模式下, 当样品有起伏时, 探针尖与样品的作用力发生变化, 导致光杠杆平衡位置偏转, 检测平衡位置偏转可给出样品的形貌图像 $\Delta Z_0(x, y)$ 。采集光杠杆

振动信号的相位与弹力臂驱动信号的相位之差, 给出样品相位图像 $\Delta P(x, y)$ 。

4 原子力与光子扫描隧道组合显微镜考机与实验结果

为了检验原子力与光子扫描隧道组合显微镜样机的功能, 需要找到有已知形貌变化和已知折射率变化的考核样品。我们请中国科学院长春光学精密机械与物理研究所研制了两种样品: (1)光栅刻划实验室制作的一块 2.4 klp/mm 刻划光栅的复制透光衍射光栅, 它有已知的周期起伏形貌和均一折射率的树脂薄膜结构; (2)应用光学国家重点开放实验室制作的有两种不同介质与阵列孔的样品, 即在玻璃基片上镀氟化镁(MgF_2)薄膜后, 在膜上用微束激光烧出二维周期排列的小孔。孔底的表面为玻璃, 折射率为 1.55; MgF_2 膜折射率为 1.38, 它有周期起伏形貌并有两种不同折射率的结构。

图 2 为 2.4 klp/mm 刻划光栅复制的树脂薄膜透光衍射光栅的原子力与光子扫描隧道组合显微镜图像, 光学透过率变化图像和形貌图像显示明显的光栅图案, 折射率变化图像没有明显的光栅图案, 因为它是均一的树脂材料, 相位差图像可能显示树脂膜中有应力存在。透过率纵向变化图像显示光栅刻划过程中刻刀存在某一特定的振动频率, 这对分析刻划工艺过程有参考意义, 在刻划过程中存在这个刻刀的扰动现象过去从未见过。这说明原子力与光子扫描隧道组合显微镜可用于纳米工艺检测。

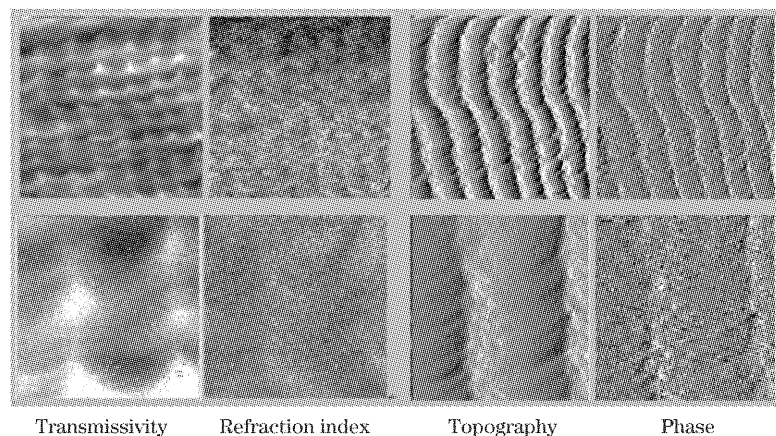


图 2 2.4 klp/mm 复制光栅的原子力与光子扫描隧道组合显微镜图像扫描范围

Fig. 2 AF/PSTM images of 2.4 klp/mm copy grating (up $2.75 \mu\text{m} \times 2.75 \mu\text{m}$, lower $0.82 \mu\text{m} \times 0.82 \mu\text{m}$)

图 3 为在玻璃基片上真空镀 MgF_2 膜经激光烧出阵列孔($3.5 \mu\text{m} \times 3.5 \mu\text{m}$)样品的原子力与光子

扫描隧道组合显微镜图像, 不仅原子力显微镜的形貌和光子扫描隧道显微镜的透过率变化图像有很明

显的方孔光栅图案,光子扫描隧道显微镜的折射率图像也很好,也有很明显的方孔光栅图案,孔底(基板)处的透过率比 MgF_2 高,玻璃折射率 n_1 为 1.55,

MgF_2 折射率 n_2 为 1.38,前者比后者暗,它与(4)式的负号和数值模拟结果相符合。

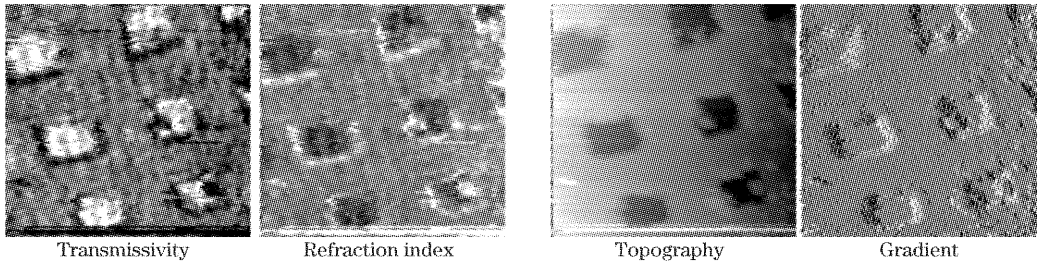


图 3 MgF_2 膜(玻璃基板)激光烧孔原子力与光子扫描隧道组合显微镜图像

Fig. 3 AF/PSTM images of holes of MgF_2 film on glass $16 \mu m \times 16 \mu m$

图 4 为一块 1 klp/mm 全息透射光栅原子力与光子扫描隧道组合显微镜四幅图像,用它可以说明原子力与光子扫描隧道组合显微镜仪器具有独特功能,原子力与光子扫描隧道组合显微镜的四幅图像各不相同,它比单独用原子力显微镜或光子扫描隧道显微镜显微镜具有更强大的功能。原子力显微镜只能提供样品表面特性图像,图 4 形貌图像上有一块凸起,表面相位差图像可说明凸起部位与其他部位相同(无相位差),原已知道都是感光乳胶,仅有原

子力显微镜时将无法判别乳胶中是否有光栅图案存在;样品光子扫描隧道显微镜透过率变化图像说明凸起部位有一影响透过率的异物,但不能知道异物是在乳胶膜的上、中、下哪个部位,从光子扫描隧道显微镜表面折射率变化图像有完整的(不受异物影响的)光栅图案,能够说明异物在乳胶膜与玻璃基板之间,因为光栅图案是由银粒子在乳胶膜中感光堆积形成的,光子扫描隧道显微镜折射率变化图像没有受异物影响说明了异物不在乳胶膜中。

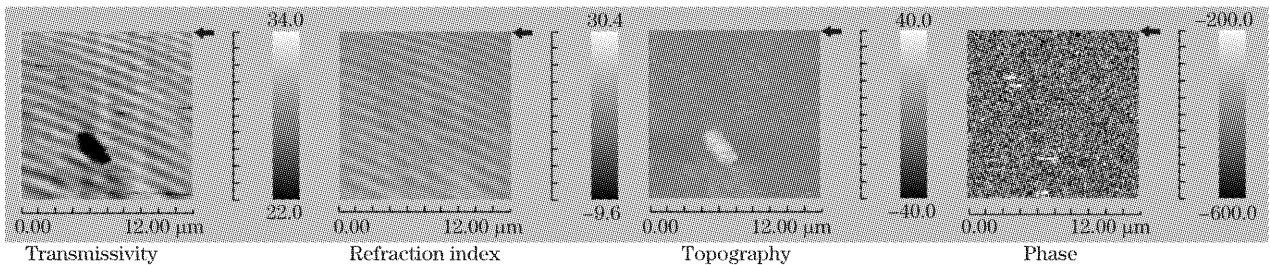


图 4 1 klp/mm 全息透射光栅的原子力与光子扫描隧道组合显微镜扫描图像

Fig. 4 AF/PSTM images of holograph grating (1 klp/mm)

图 5 是利用原子力与光子扫描隧道组合显微镜研究红细胞膜样品制备方法过程中获得的图像:用低渗缓冲液处理血红细胞,吸出红细胞中的血红蛋白,利用反渗透将细胞膜涨破获得红细胞膜碎片。

把血红蛋白洗净后,有很好的细胞膜破裂碎片的透过率图像和折射率图像,且与原子力显微镜形貌图像一致。

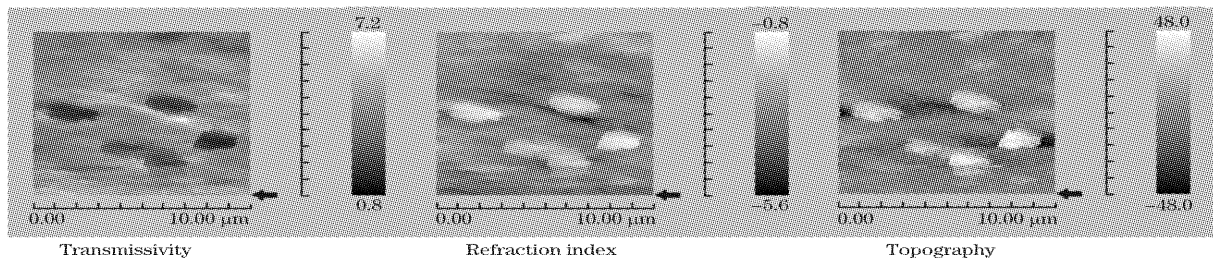


图 5 红细胞膜碎片的原子力与光子扫描隧道组合显微镜图像

Fig. 5 AF/PSTM images of erythrocyte membrane

5 数值模拟

时域有限差分法(FDTD)应用于一般电磁场的理论数值模拟是已经比较成熟的方法,但在光子扫描隧道显微镜中,边界条件复杂和要求纳米尺度分辨条件下,作数值模拟尚不成熟。我们提出了全内反射等效入射波法和三波法解决了入射场的设置困难问题,独立建立了光子扫描隧道显微镜-FDTD 软件,成功地演示了光子扫描隧道显微镜光子隧穿现象^[20]。用光子扫描隧道显微镜-FDTD 数值模拟证实了原子力与光子扫描隧道组合显微镜折射率图像公式的正确性^[21],如图 6 所示,光子隧道信息差值相对值之平方 $[\Delta I/I(0)]^2$ 与样品折射率 n 在 1.2~2.8 范围内存在相当好的直线关系(样品 $200\text{ nm}\times 100\text{ nm}\times h$,样品厚度 $h=50\text{ nm}$, Δz 为光纤尖振幅的两倍)。

我们还验证了数值模拟与原子力与光子扫描隧道组合显微镜折射率实验图像的相符性^[21],FDTD 数值模拟条件与图 3 MgF_2 膜(玻璃基板上)激光烧孔原子力与光子扫描隧道组合显微镜图像的实验条件相同(图 7)。图 7 中剖面线与图 3 折射率图像相符。

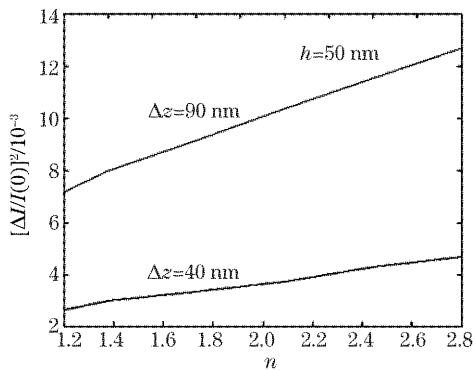


图 6 $n\sim[\Delta I/I(0)]^2$ 光子扫描隧道显微镜-FDTD 软件结果
Fig. 6 $n\sim[\Delta I/I(0)]^2$ results with software PSTM-FDTD

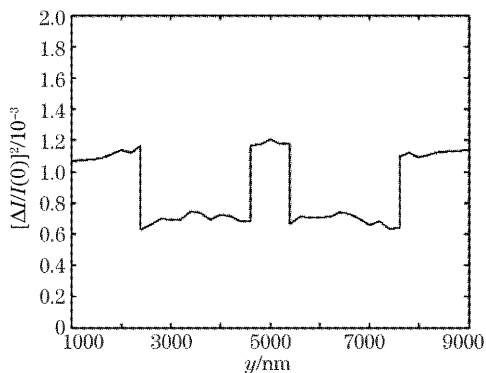


图 7 MgF_2 膜(玻璃基板)激光烧孔样品图像的数值模拟
Fig. 7 Simulated image of sample as same as in Fig. 6
(MgF_2 film)

6 光子扫描隧道显微镜与小孔径扫描近场光学显微镜比较及原子力与光子扫描隧道组合显微镜产业化前景

关于光子扫描隧道显微镜与小孔径扫描近场光学显微镜比较,光子扫描隧道显微镜系统的成像分辨能力、图像衬比度和系统的光效率(即系统透过率),比小孔径扫描近场光学显微镜约好 1~2 个数量级^[21]。近场光学显微镜的分辨能力见文献^[22]。光子扫描隧道显微镜的最好实验结果,曾达到线扩展函数半峰全宽 2.8 nm ^[23]。

在光子扫描隧道显微镜中分辨能力主要由裸光纤尖端头中央点面积(可以很小)决定,小孔径扫描近场光学显微镜的极限分辨能力主要由光纤尖金属小孔环尺度决定,小孔径扫描近场光学显微镜中金属小孔不能太小,受系统灵敏度制约,环壁用于挡光,又不能太薄,一般小孔径扫描近场光学显微镜的极限分辨仅达到 $60\sim 100\text{ nm}$ 。

小孔径扫描近场光学显微镜的设想已经提出半个多世纪,但存在的缺点和围绕隐失光讨论其成像的物理过程还不够深入。超分辨能力只能靠隐失光提供^[7,22,24]。在全内反射照明样品表面的隐失场中,光子扫描隧道显微镜可让近 100% 的照明光功率转换为样品发射的隐失光。小孔径扫描近场光学显微镜中小孔发射隐失光较少,且绝大部分隐失光在样品台中以禁戒光(forbidden light)形式被泄漏了^[21,25],没有用于成像,透过样品成像的光大多为传输光。只有经样品表面散射发射的很小一部分隐失光,经由近场光纤尖端头小孔金属环壁的强散射转换为传输光(探测光)才能携带样品超衍射极限分辨信息。小孔径扫描近场光学显微镜因为大部分成像光为传输光,与光子扫描隧道显微镜比较成像衬比度也有数量级之差。系统光效率用隐失光比较,它们将差 2 个多数量级^[22]。Hecht 和 Pohl 等^[26] 的实验结果,说明上述分析是正确的。

小孔径扫描近场光学显微镜产业在国际市场中约有 5 个厂家,年产值估计达到 1~3 千万美元。当前,小孔径扫描近场光学显微镜缺点逐渐被使用单位发现,应用有局限,市场已在缩小。原子力与光子扫描隧道组合显微镜比小孔径扫描近场光学显微镜有许多明显优点,将来原子力与光子扫描隧道组合显微镜市场肯定比小孔径扫描近场光学显微镜大。预计,在分子生物学、医药学、农牧学、新材料学、集成光学、纳米科技等许多领域将有广泛的应用前景。

参 考 文 献

- 1 Synge E H. A suggested method for extending microscopic resolution into ultra-microscopic resolution [J]. *Phil. Mag.*, 1926, **6**: 356~362
- 2 O'keefe J A. Resolving power of visible light [J]. *J. Opt. Soc. Am.*, 1956, **46**(5): 359
- 3 Binning G, Rohrer H. Scanning tunneling microscopy [J]. *Helv. Phys. Acta*, 1982, **55**: 726~735
- 4 Phol D W, Denk W, Lanz M. Optical stethoscopy image recording with resolution $\lambda/20$ [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1984, **44**: 651~653
- 5 Betzig E, Isaacson M, Lewis A. Collection mode near-field scanning optical microscopy [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1987, **51**: 2088~2090
- 6 Ferrel T M, Warmack R J, Reddick R C. Photon Scanning Tunneling Microscopy. Int. Cl5: G01 B11/24 [P]. *United States*, 1991, 5,018,865
- 7 Shifa Wu. *Morden Imaging Technology and Image Processing* [M]. Beijing: National Defence Industry Press, 1997. 494 (in Chinese)
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. 494
- 8 Junen Yao, Ning Gao, Shifa Wu *et al.*. Photon scanning tunneling microscope and its application [J]. *J. Trance Micro-Probe Technol.*, 1997, **15**(4): 621~628;
- 9 Guo Ning, Xia Dekuan, Wu Shifa *et al.*. The development of photon scanning tunneling microscopy (PSTM) and the microscopical imaging technology of samples [J]. *Physics*, 1993, **22**(12): 679~683 (in Chinese)
郭 宁, 夏德宽, 吴世法 等. 光子扫描隧道显微镜(PSTM)的研制与样品显微成像技术 [J]. 物理, 1993, **22**(12): 679~683
- 10 Wu Shifa, Yao Junen, Jian Guoshu *et al.*. The progress in PSTM [J]. *Acta Optica Sinica*, 1998, **18**(2): 191~198 (in Chinese)
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
- 11 Yao Junen, Wu Shifa, Gao Song *et al.*. A near-field optical microscope—Photo scanning tunneling microscope with nanometer resolution [J]. *J. Chin. Electron. Microscopy Society*, 1998, **18**(2): 191~198 (in Chinese)
姚骏恩, 吴世法, 高 崧 等. 一种纳米分辨率近场光学显微镜——光子扫描隧道显微镜 [J]. 电子显微学报, 1997, **16**(3): 222~228
- 12 Shifa Wu. Photon Scanning Tunneling Microscope, Now and in the future [J]. *Scanning*, 1995, **17**(1): 16~22
- 13 Shifa Wu. Photo tunneling scanning imaging separating method and instrument [P]. *Chinese Patent* No. ZL93 1 04111. 2 (in Chinese)
吴世法. 光子隧道扫描图像分解方法 [P]. 中国发明专利, ZL93 1 04111. 2
- 14 Shifa Wu. Images separating method with AF/PSTM [P]. *Chinese Patent* No. ZL96 1 11979. 9 (in Chinese)
吴世法. 原子力与光子扫描隧道组合显微镜图像分解方法 [P]. 中国发明专利, ZL96 1 11979. 9
- 15 Shifa Wu. Photon tunneling scanning image separated method and instrument [J]. *Opt. Rev.*, 1996, **3**(613): 468~469
- 16 Jian Guoshu, Pan Shi, Wang Yuguang. Numerical study of PSTM eliminating pseudo-image in constant intensity scanning imaging mode [J]. *J. Chinese Electron Microscopy Society*, 1998, **18**(1): 13~18 (in Chinese)
简国树, 潘 石, 王玉光. PSTM 等强度扫描方式下减少假象的数值模拟 [J]. 电子显微学报, 1998, **18**(1): 13~18
- 17 Wang Xiaoqiu, Jian Guoshu, Wu Shifa *et al.*. A perturbation approach of a multilayer system to the periodic sample for eliminating false image of PSTM [J]. *J. Chinese Electron Microscopy Society*, 2001, **20**(5): 654~657 (in Chinese)
王晓秋, 简国树, 吴世法 等. 多层系统周期样品 PSTM 消伪像微扰近似 [J]. 电子显微学报, 2001, **20**(5): 654~657
- 18 Shifa Wu, Guoshu Jian, Shi Pan. How to explain the image of PSTM [C]. *Proc. SPIE*, 1998, **3467**: 34~39
- 19 Wu Shifa, Pan Shi, Liu Wei *et al.*. The image separated method with AF/PSTM and its simulated results [J]. *Engineering Science*, 2001, **3**(8): 33~36 (in Chinese)
吴世法, 潘 石, 章 健 等. AF/PSTM 图像分解方法及其数值模拟结果 [J]. 中国工程科学, 2001, **3**(8): 33~36
- 20 Wang Xiaoqiu, Wu Shifa, Jian Guoshu *et al.*. Numerical study the imaging principle of photon scanning tunneling microscope [J]. *J. of Laser*, 2003, **24**(5): 55~59 (in Chinese)
王晓秋, 吴世法, 简国树 等. 光子扫描隧道显微镜成像原理的数值研究 [J]. 激光杂志, 2003, **24**(5): 55~59
- 21 Xiaoqiu Wang. *The Numerical Simulations Research for Near-Field Opticl Micro-Imaging* [D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2004 (in Chinese)
王晓秋. 近场光学显微成像数值模拟研究 [D]. 大连: 大连理工大学, 2004
- 22 Shifa Wu, Shi Pan, Guoshu Jian. A comparison between PSTM and A-SNOM [C]. *Proc. SPIE*, 2000, **4098**: 125~127
- 23 Shifa Wu. A review of super-resolution of near-field optical imaging [J]. *Acta Photonica Sinica*, 1998, **27**(Z1): 52~54 (in Chinese)
- 24 Shifa Wu, Guoshu Jian, Shi Pan *et al.*. A measurement of LSF of PSTM imaging with the image of step spread [C]. *Proc. The Second Asia Pacific Near-field Optics Conference*, Beijing, 1999
- 25 Courjon D, Bainier C. Near-field microscopy and near-field optics [J]. *Rep. Prog. Phys.*, 1994, **57**: 989~1028
- 26 Hecht B, Pohl D W, Heinzelmann H. Tunnel near-field Optical microscopy [C]: TNOM-2, In, *Photons and Local Probes*. NATO ASI SERIES E: *Appl. Sci.*, **300**: 93~103