

光子扫描隧道显微镜的进展*

吴世法 姚骏恩 简国树 郭 宁
(大连理工大学物理系, 大连 116023)

摘 要 介绍我国第一台光子扫描隧道显微镜的研制情况, 论述图像分解光子扫描隧道显微镜的原理和光子扫描隧道显微镜的光存储技术的初步设想。

关键词 光子隧道, 超高分辨光学显微镜, 超高密度光存储, 近场光学。

1 引 言

1989~1990 年, 雷迪克(Reddick)^[1]、康里乔恩(Conrijon)^[2]、福纳尔(de Fornel)^[3]、维古库克斯(Vigourcux)^[4]和帕格尼亚(Pagnia)^[5]等先后报道了早期的光子扫描隧道显微镜实验研究结果。1991 年 5 月 28 日美国专利局公布了弗雷尔(Ferrell), 沃卖克(Warmack), 雷迪克等人发明的第一个光子扫描隧道显微镜专利^[6]。

1990 年作者开始研究光子扫描隧道显微镜, 1991 年 10 月成功地获得了全息光栅的光子扫描隧道显微镜图像, 其分辨能力达到 100 nm。这是国内首次利用光子扫描隧道显微镜的近场光学成像技术, 突破常规光学衍射极限的初步进展。继而推导了光子扫描隧道显微镜的成像公式^[7]。1993 年 6 月 6 日研制成功的我国第一台光子扫描隧道显微镜系统**通过了专家组鉴定^[8], 该鉴定意见如下:

研制成功的光子扫描隧道显微镜实验装置具有图像分辨率高(横向优于 10 nm, 纵向 1 nm), 扫描范围大(10 μ m \times 10 μ m), 并具有微机自控、图像采集与处理功能, 其主要技术性能已达到国际先进水平, 填补了国内本技术领域的空白。光子扫描隧道显微镜是扫描隧道显微镜系列中的一个重要分支, 也是当前国际上光学显微镜重要发展方向。它突破了常规光学显微镜的衍射极限(半波极限), 其分辨本领达到纳米级水平。研制组利用该光子扫描隧道显微镜成像系统对全息光栅、正交光栅、聚苯乙烯小球、精加

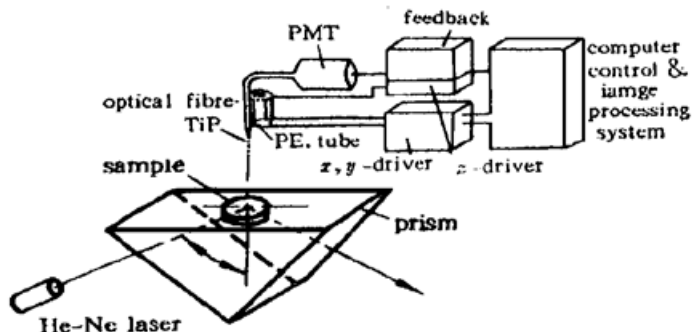


Fig. 1 Schematic of the PSTM system

* 国家自然科学基金资助(No. 69677011)。

** 注: 参加该项工作人员: 姚骏恩¹, 吴世法², 高崧³, 郭宁⁴, 商广义⁵, 初世超⁶, 贺节⁷, 夏德宽⁸, 李成基⁹, 徐绍华¹⁰, 张连生¹²。单数为中国科学院北京电子显微镜实验室, 偶数为大连理工大学物理系。

收稿日期: 1997-02-23; 收到修改稿日期: 1997-06-23

工光学材料表面、硼硅酸盐掺杂玻璃、氟玻璃、白云母、铈酸锂晶体、生物病毒等样品表面进行了观察和研究，取得了很好的结果，观察到一些新的结构和现象。”该成果曾获得中国科学院和国家教育委员会 1995 年科技进步三等奖，光子扫描隧道显微镜系统的原理见图 1，部分样品的图像见图 2~ 图 9^[9, 10]。

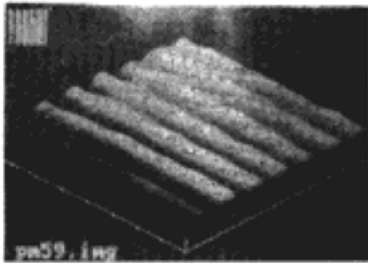


Fig. 2 PSTM image of holography diffraction grating (1 kpl/mm, with good planeness and different refractive index, 7 μm×7 μm size)

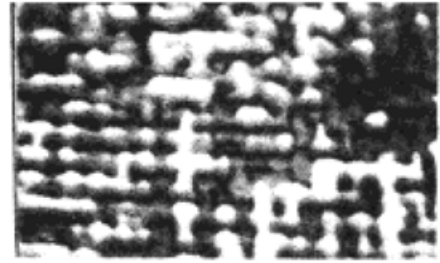


Fig. 3 PSTM image of replicated cross grating (original grating is engraved with 600 pl/mm, but PSTM image apperaes as 1200 pl/mm, it is formed by lateral extruding, 6 μm×6 μm size)

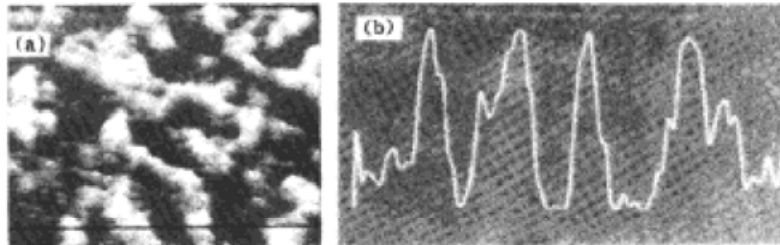


Fig. 4 PSTM image of supersmooth surface of glass (a) and its profile (b) (3 μm×3 μm size, 20 nm vertical maximum, 1 nm longitudinal resolution)



Fig. 5 PSTM image of surface of silicon-boride glass (1 μm×1 μm size, graininess 10~ 50 nm)

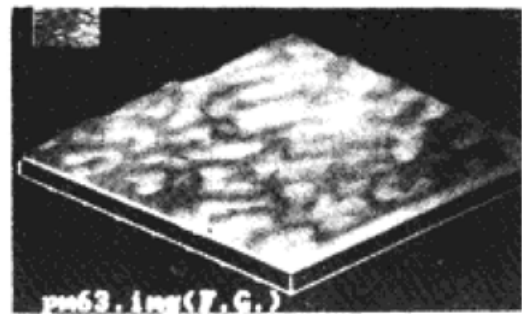


Fig. 6 PSTM image of surface of fluoride glass (3.5 μm×3.5 μm size, efflorescent dent 0.2~ 0.5 μm by air)



Fig. 7 PSTM image of HDPE (Polythene film, 0.8 μm×0.8 μm size), attached map is TEM image (60 k×, 30 nm crystalline, 10 nm amorphous)

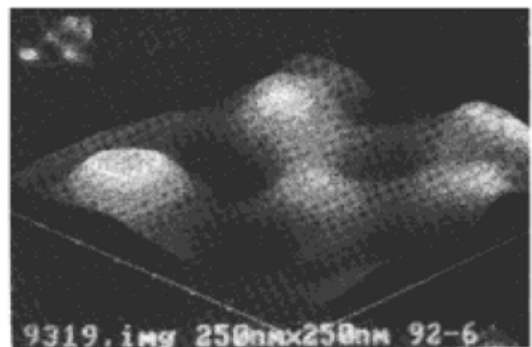


Fig. 8 PSTM image of polystyrene beads with diameter 110 nm (250 nm×250 nm size, longitudinal resolution 1 nm)

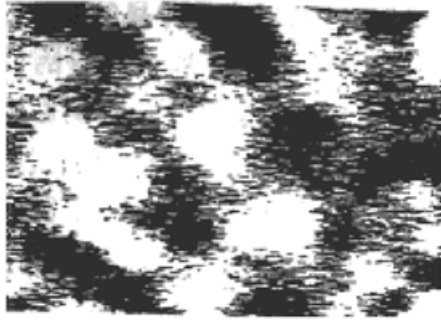


Fig. 9 PSTM image of EB virus in living ($1 \mu\text{m} \times 1 \mu\text{m}$ size, diameter of EB virus about 200 nm)

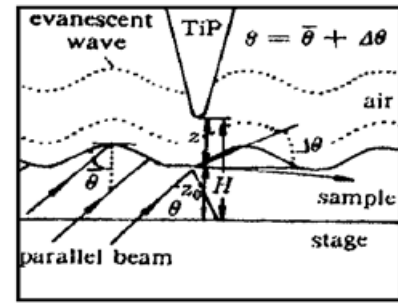


Fig. 10 Schematic of photon tunneling principle

2 图像分解光子扫描隧道显微镜(IS-PSTM)

所谓光子隧道现象是一个广义的隧道概念,它是指入射光频电磁波和全内反射界面隐失波(evanescent wave)电磁场“垒”之间发生的一种“局域隐失场受抑”现象。入射光子在隐失场“垒”上是通不过的;但当探测隐失场的光纤尖进入隐失场时,光纤尖将使隐失场局域“受抑”(frustrated),光纤尖端头界面外隐失波电磁场通过界面耦合(即全内反射逆过程)可使隐失波光子变换为传输波光子在光纤尖内传输至光纤另一端远场,光电探测器记录下光子隧道信息。光子扫描隧道显微镜图像一般指光纤尖在样品表面作等光子隧道信息扫描时所采集的光纤尖高度变化图像 $\Delta H(x, y)$ 。设光纤尖高度为 $H(x, y)$ 见图10,它是样品厚度 $Z_0(x, y)$ 与光子隧道间距 $Z(x, y)$ (即光纤尖至样品表面距离)的和。因此,

$$\Delta H(x, y) = \Delta z_0(x, y) + \Delta Z(x, y) \quad (1)$$

光子隧道信息可近似表示为^[7]

$$I(x, y) = K(p, n_1, \theta) \exp[-(4\pi/\lambda)Z(n_1^2 \sin^2 \theta - 1)^{1/2}] \quad (2)$$

式中 $K(p, n_1, \theta)$ 是与光的偏振态 p 、样品折射率 $n_1(x, y)$ 和光束入射角 $\theta(x, y)$ 有关的常量。保持 $I(x, y)$ 为预置常量扫描时,有

$$\Delta I(x, y) = (\partial I/\partial Z)\Delta Z(x, y) + (\partial I/\partial n_1)\Delta n_1(x, y) + (\partial I/\partial \theta)\Delta \theta(x, y) = 0 \quad (3)$$

由(1)式和(3)式可得光子扫描隧道显微镜的成像公式为

$$\Delta H(x, y) = \Delta Z_0(x, y) - (\partial Z/\partial n_1)\Delta n_1(x, y) - (\partial Z/\partial \theta)\Delta \theta(x, y) \quad (4)$$

设入射光束在平行于载物台面的样品表面处的入射角为 $\bar{\theta}$,则表面 (x, y) 点的入射角 $\theta(x, y)$ 与样品该点表面在入射面内的倾角 $\Delta \theta(x, y)$ 有如下关系(见图10): $\theta(x, y) = \bar{\theta} + \Delta \theta(x, y)$,因此,由(4)式说明在光子扫描隧道显微镜图像中包含三个子图像: $\Delta Z_0(x, y)$ 为样品表面形貌图像; $(\partial Z/\partial n_1)\Delta n_1(x, y)$ 为与折射率变化分布图像 $\Delta n_1(x, y)$ 呈非线性的图像,其中 $(\partial Z/\partial n_1)$ 一般不是常量(但与 n_1 呈单调变化); $(\partial Z/\partial \theta)\Delta \theta(x, y)$ 是假像,当入射面取的方位不同时 $\Delta \theta(x, y)$ 也不同。这个假像是第一代光子扫描隧道显微镜成像中图像难于解释的根本原因。

雷迪克等人的第一代光子扫描隧道显微镜仅适用于两种特殊样品:1)已知样品是平面样品(如平行切片样品,已知表面不平度可以忽略的样品等),可观察折射率变化的图像,由(4)式可知,当 $\Delta Z_0(x, y) \approx 0$ 、 $\Delta \theta(x, y) \approx 0$ 时,光子扫描隧道显微镜图像 $\Delta H(x, y) \approx -(\partial Z/\partial n_1)\Delta n_1(x, y)$;2)已知折射率是均匀的且表面起伏变化不大的样品,可观察表面微小起伏的形貌图像,由(4)式可知,在 $\Delta n_1(x, y) \approx 0$ 和 $(\partial Z/\partial \theta)\Delta \theta(x, y)$ 相对于 $\Delta Z_0(x, y)$ 是一个小量时, $\Delta H(x, y) \approx \Delta Z_0(x, y)$ 。此外,还适用于已知表面起伏为一维的样品,如一维

刻划光栅, 光盘引导槽的局部等。只要将一维形貌母线放在光束入射面以内, 样品的表面有较大起伏也不会引入假像, 其原因是 $\Delta\theta(x, y) \approx 0$ 。但是, 一般样品常常没有那么严格的已知条件, 尤其是处于自然状态或准自然状态下的生物样品, 第一代光子扫描隧道显微镜显然不适用。吴世法提出了一种光子隧道扫描图像分解方法^[11], 推导了图像分解公式, 给出了公式求解方法和仪器结构设计框图, 解决了第一代光子扫描隧道显微镜图像中存在假像与形貌图像、折射率变化分布图像混在一起不能分辨问题。该仪器称为图像分解光子扫描隧道显微镜(IS-PSTM), 它可消除假像并可分别给出样品表面形貌图像和折射率变化分布图像。

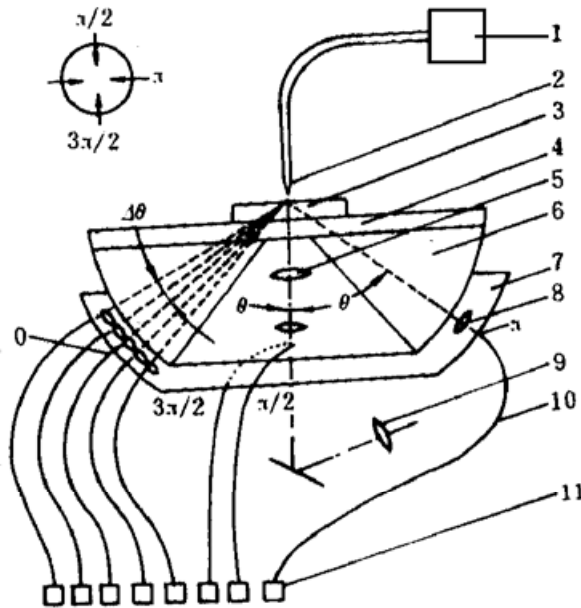


Fig. 11 Schematic IS-PSTM principle (1-detector; 2-optical fiber tip; 3-sample; 4-substrate glass; 5-objective of upside down microscope; 6-the shaped prism; 7-lighting beam supporter; 8-lens; 9-eye-piece; 10-lighting optical fiber; 11-diode laser, The attached map is a bottom view of 4 crossed azimuths of lighting beams)

消除光子扫描隧道显微镜中假像的方法需采用 π 对称方位的全内反射照明光束, 见图 11(图像分解光子扫描隧道显微镜原理图)。0 方位与 π 方位的光束入射面重合, 方位差 180° 。这组 π 对称方位的两光束具有相同的波长, 相同的束强度, 且在与样品载物台面平行的样品表面处有相同的入射角(用 $\bar{\theta}$ 表示)。设在该入射面内样品的 (x, y) 点上, 0 方位照明光束的入射角为 $\theta^0(x, y) = \bar{\theta} + \Delta\theta(x, y)$, 即设 (x, y) 点在入射面内的表面倾角为 $\Delta\theta(x, y)$, 同一 (x, y) 点的 π 方位照明光束入射角则可表示为 $\theta^\pi(x, y) = \bar{\theta} - \Delta\theta(x, y)$ 。根据第一代光子扫描隧道显微镜成像公式(4)式, 0 方位和 π 方位照明光束条件下的光子扫描隧道显微镜图像分别可由以下两式表示

$$\Delta H^0(x, y) = \Delta Z_0(x, y) - (\partial Z/\partial n_1) \Delta n_1(x, y) - (\partial Z/\partial \theta) \Delta\theta(x, y) \quad (5)$$

$$\Delta H^\pi(x, y) = \Delta Z_0(x, y) - (\partial Z/\partial n_1) \Delta n_1(x, y) + (\partial Z/\partial \theta) \Delta\theta(x, y) \quad (6)$$

(5) 式与(6) 式相加可得到消除假像的光子扫描隧道显微镜图像

$$\Delta H^{0\pi}(x, y) = \Delta H^0(x, y) + \Delta H^\pi(x, y) = 2[\Delta Z_0(x, y) - (\partial Z/\partial n_1) \Delta n_1(x, y)] \quad (7)$$

$\Delta H^{0\pi}(x, y)$ 图像反映样品表面形貌和折射率变化两因素混合图像。这种图像在生物样品显微成像中有一定意义。为了节省扫描时间和图像处理时间, 可将 0 方位和 π 方位的照明光束同时加上, 一次扫描即可获得消除假像的 $\Delta H^{0\pi}(x, y)$ 图像。

图像分解光子扫描隧道显微镜不仅要求消除假像, 而且还要求从光子扫描隧道显微镜混合图像中分解出 $\Delta Z_0(x, y)$ 和 $\Delta n_1(x, y)$ 。设 $\Delta\theta^x(x, y)$ 为 x 扫描方向样品表面倾角变化, 且 0 方位与 π 方位照明光束的入射面与 x 扫描方向平行, 由(6) 式减(5) 式可得

$$\Delta\theta^x(x, y) = [\Delta H^\pi(x, y) - \Delta H^0(x, y)]/2(\partial Z/\partial \theta) \quad (8)$$

设 Δx 为 x 方向扫描步长, $(i\Delta x, y)$ 点相对于 $(0, y)$ 点的表面形貌(偏) 差分可由该两点连线上各像元表面倾角 $\Delta\theta^x(x, y)$ 的线积分值给出, 即

$$\Delta z_0^x(x, y) = \left[\sum_{i=0}^x \Delta\theta^x(i\Delta x, y) \right] \Delta x, \quad x = i\Delta x, i = 0, 1, 2, \dots, (N - 1) \quad (9)$$

(9) 式仅表示 x 扫描方向(偏)差分关系。与其正交的在 y 扫描方向上的(偏)差分起伏 $\Delta Z_0^y(x, y)$ 则与样品表面 y 方向上的表面倾角 $\Delta\theta^y(x, y)$ 有关。如在图像分解光子扫描隧道显微镜系统中设置正交的四方位(0, π 和 $\pi/2, 3\pi/2$) 的照明光束, 见图 11 中左上角示意附图, 还可获得 $\Delta H^{\pi/2}(x, y)$ 和 $\Delta H^{3\pi/2}(x, y)$ 图像, 并可给出如下两式

$$\Delta\theta^y(x, y) = [\Delta H^{3\pi/2}(x, y) - \Delta H^{\pi/2}(x, y)]/2(\partial Z/\partial\theta) \quad (10)$$

$$\Delta Z_0^y(x, y) = [\sum_{j=0}^j \Delta\theta^y(x, j\Delta y)]\Delta y, \quad y = j\Delta y, j = 0, 1, 2, \dots, (N-1) \quad (11)$$

于是, 样品表面完整的形貌图像可由下式给出

$$\Delta Z_0(x, y) = \Delta Z_0^x(x, y) + \Delta Z_0^y(x, y) = [\sum_{i=0}^i \Delta\theta^x(i\Delta x, y)]\Delta x + [\sum_{j=0}^j \Delta\theta^y(x, j\Delta y)]\Delta y \quad (12)$$

从 0、 $\pi/2$ 、 π 、 $3\pi/2$ 四个正交方位获得 $\Delta H^0(x, y)$ 、 $\Delta H^\pi(x, y)$ 、 $\Delta H^{\pi/2}(x, y)$ 、 $\Delta H^{3\pi/2}(x, y)$ 四幅光子扫描隧道显微镜图像后, 即可给出下式

$$\Delta n_1(x, y) = \{\Delta Z_0(x, y) - [\Delta H^0(x, y) + \Delta H^\pi(x, y) + \Delta H^{\pi/2}(x, y) + \Delta H^{3\pi/2}(x, y)]/4\}/(\partial Z/\partial n_1) \quad (13)$$

由(12)式求出 $\Delta Z_0(x, y)$ 后便可从(14)式求出样品折射率变化分布图像 $\Delta n_1(x, y)$ 。

求解 $\Delta Z_0(x, y)$ 和 $\Delta n_1(x, y)$ 过程全部采用图像处理方法, 通过软件完成。其中 $(\partial Z/\partial\theta)$ 需要结合给定样品和成像条件通过实验给出较精确的数据。其方法是(见图 11) 在 0 方位设置多个不同入射角的照明光束, 选择样品表面平行于载物台面的局域(该处 $\Delta H^0(x, y)$ 、 $\Delta H^\pi(x, y)$ 、 $\Delta H^{\pi/2}(x, y)$ 、 $\Delta H^{3\pi/2}(x, y)$ 有相等的值), 变换 0 方位入射角, 由数个不同 $\Delta\theta$ (改变入射角值) 获得相同光子隧道信息所需调正的 ΔZ 值, 可给出 $\Delta Z \sim \Delta\theta$ 标准曲线。利用 $\Delta Z \sim \Delta\theta$ 标准曲线和分段线性图像变换程序, 从(8)式和(10)式即可给出 $\Delta\theta^x(x, y)$ 和 $\Delta\theta^y(x, y)$ 两幅图像。用这两幅图像和(9)、(11)式变换程序给出 $\Delta Z_0^x(x, y)$ 和 $\Delta Z_0^y(x, y)$ 。由该两图像相加程序给出样品表面形貌图像 $\Delta Z_0(x, y)$ 。有了 $\Delta Z_0(x, y)$ 再通过(13)式图像处理程序可得出 $(\partial Z/\partial n_1)\Delta n_1(x, y)$ 图像。该图像是 $\Delta n_1(x, y)$ 的非线性图像。如果通过数值模拟与实验结果核对给出 $\Delta Z \sim \Delta n_1$ 标准曲线数据, 则可通过分段线性图像变换程序, 由 $(\partial Z/\partial n_1)\Delta n_1(x, y)$ 图像得到 $\Delta n_1(x, y)$ 图像。详细的求解方法可参阅参考文献[11~13]。

3 光子扫描隧道显微镜光存储技术

近场光学技术是突破光学衍射极限的根本途径, 当前近场光学显微术有两类: 扫描近场光学显微术(SNOM)和光子扫描隧道显微术。1992年IBM的贝齐格(Betzig)等人^[14]发明剪切力扫描近场光学显微术(SF-SNOM)并用它演示成功记录斑小到 60 nm 的超高密度磁光存储实验系统, 磁光记录材料用离子溅射镀的 Co/Pt 多层磁光膜, 写、读分别用氩离子激光两个波长的激光束, 共用一个光纤尖。用光纤尖近场的激光斑加热 Co/Pt 膜局域达到居理温度时, 在外加线圈磁场条件下冷却写入记录斑。用偏振光偏振面通过记录斑(磁畴)时偏转检测(克尔效应)读出信息。写录光束功率 6 mW, 最大记录位密度约 7 GB/cm²(45 GB/in²), 写录信息位速率 10 kB/s(受编码声光调制器限制)。虽然这比常规(1 μ m 记录斑)光盘高 100 倍。按初步实用要求来考虑, 有下列几个主要问题: 1) 写读位速率太慢, 初步实用要求应达 10 MB/s。上述演示记录位速率尚差三个量级, 如采用半导体激光器虽可甩开声光调制器的限制; 但又受光纤尖共振频率和压电陶瓷扫描响应速率制约, 估计仅允许提高一个数量级。从根本上解决这个问题只能依靠光纤尖阵列化, 多道平行、综合编码写读; 2) 信息记录总容量

太小,靠压电陶瓷驱动的扫描范围一般仅 $10\ \mu\text{m}\sim 100\ \mu\text{m}$ 量级,虽然可想一些办法但根本上解决这个问题也得依靠光纤尖的阵列化;3) 写读光纤尖的阵列化与集成化问题很重要,信息位速率和总容量的困难最终必须依赖光纤尖的阵列化。降低系统成本,将来商品化的必由之路是采用微加工光刻的集成化工艺。写读光纤尖、光源、探测器、电路等将来均需要集成才能打开产业化之路;4) 存储机理是核心问题,所有纳米尺度的存储都有阵列化问题,阵列化的难易,存储系统性能,如信噪比(误码率),信息位密度,位速率,总容量,商品的性能价格比等,诸多关键中的核心问题是光存储系统的写读机理。上述剪切力扫描近场光学显微术磁光存储系统太复杂较难实现写读光纤尖的阵列化,其演示实验的信噪比也不够好。作者于1996年9月第四届国际纳米科学与技术会议(北京)上提出的光子扫描隧道显微镜光存储机理将有较好的发展前景。

光子扫描隧道显微镜光存储机理要点:在光子扫描隧道显微镜系统中,采用光纤尖激光输出近场光斑加热光存储膜,写录光折变(光致折射率变化)记录斑;读出时利用光子扫描隧道显微镜原理测量折射率改变的记录斑(用同一光纤尖写读)。当前,记录斑稳定性好并可以擦除重复使用的光记录材料为磁光膜,写录时在近场光斑加热磁光膜局域至居里温度时用线圈加偏磁场,擦除记录斑时不加偏磁场。

根据 $n = \sqrt{\epsilon\mu}/c$, 其中 ϵ , μ 分别为记录介质介电常数和磁导率, c 为光速。光子扫描隧道显微镜磁光存储利用 n 变化。

1993年,在研制成功的我国第一台光子扫描隧道显微镜的考核实验中,有一幅白云母解理面样品的光子扫描隧道显微镜图像(见图12),可非常有效地



Fig. 12 PSTM image of surface of white mica ($0.6\ \mu\text{m}\times 0.6\ \mu\text{m}$, size)

说明:光子扫描隧道显微镜技术具有开发超高密度光存储的可能性和巨大潜力。图12是一张光子扫描隧道显微镜原始扫描图像。云母解理面表面不平度是可以忽略的,类似竹叶状黑白相间的图案只可能显示折射率不同。据分析,它是微晶镶嵌结构。云母是双折射晶体,其不同方向的最大折射率差 $N_g - N_p$ 约 $0.036\sim 0.043$,而光子扫描隧道显微镜系统响应折射率差的极小值可以达到 0.003 。磁光材料的记录斑折射率差估计可接近 0.3 ,据此,光子扫描隧道显微镜磁光记录的原始信噪比可接近两个数量级。由图12类竹叶图案尖端判读,可分辨 $10\ \text{nm}$ 。该图像可视为利用自然界的记录考核光子扫描隧道显微镜用作光存储系统读出能力的探索实验的结果。当前,近场光存储技术开发中主要有扫描近场光学显微术存储和光子扫描隧道显微镜存储两类,该图说明光子扫描隧道显微镜比扫描近场光学显微术的竞争优势明显。剪切力扫描近场光学显微术磁光存储采用偏振光,亚波长小孔径光纤尖的保偏度很难达到要求,影响信噪比不能提高。利用光子扫描隧道显微镜磁光存储测量折射率变化,可避免这个难点。

大面积光盘表面的不平度显然不可能很平,采用第一代光子扫描隧道显微镜系统将不可避免引进假像,从而将使信噪比变得很坏,这是迄今为止很少有人去开发光子扫描隧道显微镜存储技术的原因。我国消除光子扫描隧道显微镜中假像的专利^[11]为开拓光子扫描隧道显微镜存储技术打开了大门。当采用消除光子扫描隧道显微镜中假像的方法时,在 π 对称方位两束全内反射光束照明样品条件下,等强度一维扫描光子扫描隧道显微镜的信息由(8)式可表

大面积光盘表面的不平度显然不可能很平,采用第一代光子扫描隧道显微镜系统将不可避免引进假像,从而将使信噪比变得很坏,这是迄今为止很少有人去开发光子扫描隧道显微镜存储技术的原因。我国消除光子扫描隧道显微镜中假像的专利^[11]为开拓光子扫描隧道显微镜存储技术打开了大门。当采用消除光子扫描隧道显微镜中假像的方法时,在 π 对称方位两束全内反射光束照明样品条件下,等强度一维扫描光子扫描隧道显微镜的信息由(8)式可表

示如下

$$\Delta H^{0m}(y) = 2[\Delta Z_0(y) - (\partial Z/\partial n_1) \Delta n_1(y)] \quad (14)$$

对磁光盘理想要求 $\Delta Z_0(y) \approx 0$, 实际上大范围中做不到, 小范围中可接近。因而应采用变折射率记录斑的边缘编码(利用 $\Delta H^{0m}(y)$ 扫描信息正、负差分值)。当磁光盘的表面为超高精度抛光和磁光膜表面颗粒度尺度很小(记录斑的 $1/5 \sim 1/10$) 条件下(即 $\Delta Z_0(y)$ 扫描信息的差分值, 可以忽略时), $\Delta H^{0m}(y)$ 的扫描信息差分值直接反映 $\Delta n_1(y)$ 扫描信息差分值 ($\partial Z/\partial n$), 在 $\Delta n_1(y)$ 为二值信息条件下它可近似为常数值, 可有好的信噪比。如果采用等间距扫描反馈控制系统, 将直接记录折射率有关信息。

光子扫描隧道显微镜磁光存储系统见图 13。它采用光纤尖线阵列在磁光盘上螺旋式转动扫描和消除假像的光子扫描隧道显微镜基本结构。光纤尖镀金属膜(端头开小孔)。光纤尖另一端接“Y”型分束器, 其一支路耦合输入 $L(\lambda_1)$ 激光束, 该激光束用于磁光信息写入。另一支路将光子隧道信息光束耦合到光电探测器 D 上。压电陶瓷 PZT 为光纤尖纵向微调的压电器件。 $L(\lambda_2)$ 为两个半导体激光器由其提供 0 方位和 π 方位的两路对称的全内反射平行光束, 照明磁光膜(MOF)。MOF/G 是以玻璃为基板表面镀磁光膜的磁光盘。 $L(\lambda_2)$ 光束在玻璃基板内可经历多次全内反射, 精心设计后每个全内反射局域可比较均匀地连成一片。MC 是产生偏磁场的线圈。信息写入时用等光子隧道信息扫描来控制尖与磁光盘表面的间距。PE 是光纤尖阵列螺旋式扫描压电器件。

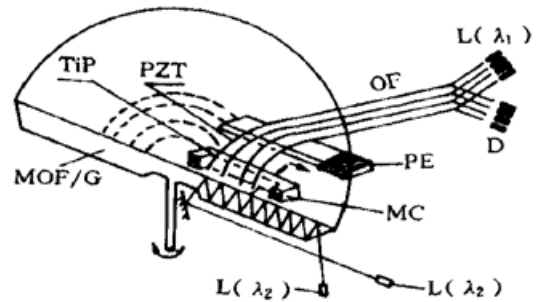


Fig. 13 Schematic of PSTM data storage system ($L(\lambda_1)$ -writing laser; $L(\lambda_2)$ -lighting laser; OF-optical fiber; D-detector; Tip-metal coated fiber tip; PZT-vertical gap controller; PE-diametral scannign actuator; MOF/G-magnetic optical film/glass disc; MC-magnetic coil)

用超高精度转动磁光盘来解决存储大容量和读写位速率问题是可行的较好的方案, 其根据是美国 IBM 梅明(Mamin)^[16]的一个 AFM 超高密度存储信息的读出演示实验, 可作借鉴。该实验用 AFM 尖通过脉冲激光加温, 热灼转动式聚碳酸脂光盘, 热灼坑记录位密度 5 GB/cm^2 (相当 CD-ROM 50 倍), 读出时线速度达到 50 mm/s , 读出位速率达到 1.2 MB/s 。如果线阵列尖的数目增加有 10 个, 通过多路平行综合编码, 串联记录的位速率就可超过 10 MB/s , 达到可以初步实用的水平。

近两年来原子力显微镜探测尖的阵列集成化研究工作进展很快, 其推动力是微电子芯片检测、纳米分辨光刻和超高密度信息存储的需要。前年, 美国斯坦福大学明内等人^[16]最早研制成功 2×1 阵列, 并成功地演示同时平行产生两幅 AFM 图像。1996 年 10 月在北京第四届国际纳米科学与技术会议上美、日两国报道了巨大的进展。美国 IBM 特里斯(Terris B)和明内等介绍在 10 mm 宽度内已集成制造出 50 个 AFM 尖的线阵列; 日本东京大学尖端科技中心伊藤(Itoh T)、李(Lee C)和褚家如(Chw J)等介绍在约 0.7 mm 宽度内已集成制造出 10 个 AFM 尖的线阵列。他们都用其中两路独立平行运转演示给出了两幅 AFM 图像。这种 AFM 集成尖阵列利用接触式热机械原理, 热灼记录坑写入, 热常数仅达 $20 \mu\text{s}$, 单个探测尖位速率 0.05 MB/s 太低, 而且只能实现一次写入多次读出方式(CD-ROM), 不能实现可擦除的存储。光子扫描隧道显微镜磁光存储系统中光纤尖阵列要求光子电子集成化, 其集成难度比上

述原子力探测尖阵列的集成难度大。但集成的密度要求并不高,在 50 mm 宽度范围内集成 10 个(或 20 个)光子扫描隧道显微镜光纤尖(阵元),信息位速率已可达到初步实用要求水平。如此较低的密集度可以通过部分安装完成(如压电陶瓷与光纤尖可通过组装,还方便于更换光纤尖)。光纤尖较低密集度引出的另一个困难是径向(x)方向扫描的范围需要大些。50 mm/10 个尖时,要求扫描范围 5 mm,这也是需要解决的另一个难题。提高光纤尖的密集度可适当缓解 x 方向压电器件大扫描范围的要求,根据现有技术,选一个折中数据,可以解决这个难题。

参 考 文 献

- [1] R. C. Reddick, R. J. Warmack, D. W. Chilcott *et al.*, Photon scanning tunneling microscopy. *Rev Scient Instrum*, 1990, **61**(12) : 3669~ 3677
- [2] D. Conrijon, K. Sarayedine, M. Spajer, Scanning tunneling optical microscopy. *Opt. Commun.*, 1989, **71**(1, 2) : 23~ 28
- [3] F. De. Fornel, J. P. Goudonnet, L. Salomon, An evanescent field optical microscope, In: T. Wilson *et al.*, Optical Storage and Scanning Technology, *Proc. Soc. Photo-Opt. Instrum. Eng.*, 1989, **1139** : 77~ 84
- [4] J. M. Vigourcux, C. Girard, D. Courjon, General principles of scanning tunneling optical microscopy. *Opt. Lett.*, 1989, **14**(19) : 1039~ 1041
- [5] H. Pagnia, J. Radojewski, N. Stotnik, Operation conditions of an optical STM. *Optik*, 1990, **86**(3) : 87~ 90
- [6] T. L. Ferrel, R. J. Warmack, R. C. Reddick, Photon scanning tunneling microscopy. Int. Cl⁵·Gol B11/24. united States, Patent No: 5, 018, 865. 1991, 05. 28
- [7] Shifa Wu, Photon scanning tunneling microscope, Now and in the Future. *Scanning*, 1995, **17**(1) : 18~ 22
- [8] 光子扫描隧道显微镜研制成功报导. 人民日报, 1993-06-10, 第一版
- [9] 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. 电子显微学报, 1997, **16**(3) : 223~ 228
- [10] Ning Guo, Song Gao, Shifa Wu *et al.*, Studies of imaging experiment for PSTM. *Chinese J. Laser*, 1994, **B3**(2) : 159~ 165
- [11] 吴世法, 光子隧道扫描图像分解方法及仪器. 中国发明专利公报, 1995, **11**(35) : 100
- [12] 吴世法, 近代成像技术和图像处理. 北京: 国防工业出版社, 1996 : 494
- [13] Shifa Wu, Photon tunneling scanning image seperated method and instrument. reported on the first Asia-Pacific Workshop on Near Field Optics, Seoul, Korea, 17~ 18, 1996. *Opt. Rev.*, 1996, **3**(6B) : 468~ 469
- [14] E. Betzig, P. L. Finn, J. S. Weiner *et al.*, Near-field magneto-optics and high density storage. *Appl. Phys. Lett.*, 1992, **61**(2) : 142~ 144
- [15] H. J. Mamin, H. Birk, P. Wimmer *et al.*, Tip-based data storage using micromechanical cantilevers. *J. Appl. Phys.*, 1994, **75**(1) : 161~ 168

The Progress in PSTM

Wu Shifa¹ Yao Junien² Jian Guoshu¹ Guo Ning¹

[1, Department of Physics, Dalian University of Technology, Dalian 116023
2, Beijing Laboratory of Electron Microscopy, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080]

(Received 23 February 1996; revised 23 June 1997)

Abstract The development of the first photo scanning tunneling microscope (PSTM) in China is presented. The PSTM image separation method is discussed and the superdensity PSTM optical storage is proposed.

Key words photon tunneling, superresolution microscope, superdensity optical storage, near field optics.