

激光具有能量密度大,单色性好等优点.在激光的照射下,食醋中的有机分子吸收光子能量后,分子中的化学键发生断裂,形成其他分子,其中有的被离解成自由基而重新组合成新分子,这样周期性地缔合——分离——再缔合,在静电场及外界因素作用下,分子群再一次被打碎,分解成小分子,然后又重新组成分子群,这种周期作用过程加速了氧化反应、酯化反应、缩合反应和迈拉德反应的进程.食醋是一种液体,液体中的分子碰撞与扩散过程十分迅速,激发态分子氧是相当小的分子,扩散的速度非常快,在激光与静电场催陈时,细激光束射入醋体的特定空间,造成的激发足以在极短的时间内

扩散到整个醋体,并促进反应的完成.

高压静电场和激光同时催陈食醋,符合传统食醋陈酿的理论和规律.从实验数据分析可以看出,静电场和激光同时催陈食醋的效果在许多方面均优于单纯用静电催陈的效果.该技术缩短了食醋陈酿周期,为食醋生产的人工陈酿开辟了又一条新途径.

本实验仅用了波长为 6328 Å 的激光处理食醋,对其他波长的激光和其他类型激光器的激光催陈食醋的处理尚待试验.

[1] 叶建安,李小明,中国调味, No. 12(1987), 3.

[2] 蒋耀庭,孙英等,中国酿造 No. 6(1991), 21.

## 光子扫描隧道显微镜的研制与样品的显微成像技术<sup>1)</sup>

郭宁 夏德宽 吴世法 初世超

(大连理工大学物理系,大连 116023)

高崧 姚骏恩 商广义 李成基

(中国科学院北京电子显微镜实验室,北京 100086)

采用自行研制的光子扫描隧道显微镜(PSTM)的显微实验系统对多种样品进行了表面显微成像研究,获得了关于样品表面三维立体图像信息.通过多种图像处理手段对原始图像进行后期处理,得到了更具视觉效果、更为逼真的样品表面图像,为光子扫描隧道显微镜(PSTM)的广泛应用奠定了技术基础.

### Abstract

This paper makes a systematic study of the imaging experiment on various sample surfaces with a photon scanning tunneling microscope system developed in Beijing Laboratory of Electron Microscopy. The Photon Scanning Tunneling Microscope (PSTM) images are treated by our image processing system by means of different methods. Interpretation of PSTM images, as well as the applicability of PSTM to other forms of surface analysis are discussed. The results obtained can serve as the technical foundation for the PSTM.

### 一、光子扫描隧道显微镜的研究与应用

光子扫描隧道显微镜(PSTM)是继 1986 年诺贝尔物理奖获奖成果——扫描隧道显微镜

(STM)诞生以来,又一在世界上令人瞩目的显微科学成果,其机理与实验手段与 STM 极为相似,可以看作是 STM 的延伸和发展,但两者

1) 本课题于 1993 年 6 月 6 日在北京通过了国家级技术成果鉴定.

又有本质的不同. 其理论基础源于近场光学<sup>[1]</sup>. 近场光学的概念虽然提出的比较早, 但定量的研究到 80 年代才见国外报道, 光子扫描隧道显微成像技术在国外是于 1989 年提出的, 至今已有美国、法国、日本先后发表了实验研究结果, 并已申报了几项专利. 国内尚未见到与本项目有关的成果报道.

根据 Abbe 公式, 传统的光学显微镜的极限分辨本领为  $d = \frac{0.61\lambda}{\alpha}$ , 式中  $\lambda$  为照明光的波长,  $\alpha$  为照明孔径角. 当用可见光作照明源时, 其极限分辨本领也只能达到光波波长的 1/2, 即  $0.2\mu\text{m}$  左右. 而 PSTM 的放大倍率可达万倍, 分辨极限可好于  $\lambda/20$ . 像法国 SPIRAL 公司推出的商品化的光子扫描隧道显微镜, 其横向分辨率可达 10nm, 纵向可达 1nm. 因此, 可以说, 光子扫描隧道显微镜(PSTM)在光学显微学发展中是一个划时代的突破.

相对于扫描电镜, PSTM 具有以下几方面的优势: (1)可用于不导电样品的观测; (2)可进行表面三维立体成像; (3)更适于光谱学等方面的应用; (4)图像由数字数据流组成, 便于远距离观察、储存及处理; (5)由于 PSTM 不需要真空条件, 使用成本和维修费用均很低. 其应用范围也较为广泛, 目前国际上已经开展了以下几个方面的具体应用: (1)对生物样品、聚合物、光学材料等多种样品进行表面形状观测; (2)表面轮廓和粗糙度观测; (3)对薄胶片的研究; (4)光波导的研究; (5)观测衍射光栅的表面像, 以确定和评价光栅的闪耀角和顶角, 因此有助于衍射光栅的标准化; (6)无损检测半导体晶片等. 此外, 还应用于毫微结构分析、化学成分分析与光谱分析等诸多领域中. 因此, 预计这项新技术可以在医学、生物工程、光波导和光电集成电路检测、材料科学和表面科学等一些高技术学科和产业中将有着广阔的应用前景.

## 二、光子扫描隧道显微镜的显微成像机理

虽然 PSTM 在结构上与 STM 有诸多相近物理

之处, 但二者的成像机理具有本质性差别, 由此二者的显微成像功能也有相当的差异<sup>[2-7]</sup>.

PSTM 的成像机理如图 1 所示, 由激光产生的单色平面光波, 打在由棱镜工作台与样品形成的全反射面上, 在无光探头进入的前提下, 即可形成全内反射条件下的消逝场, 消逝场是近场光学中一个极为重要的概念. 它是一个非均匀场, 沿着入射面上的媒质边界传播, 而振幅、场强随离界面的距离的增大呈指数衰减, 样品表面的形状起伏不同, 其形成的消逝场就发生相应的变化, 即消逝场的场分布状态包含有样品的表面特征信息.

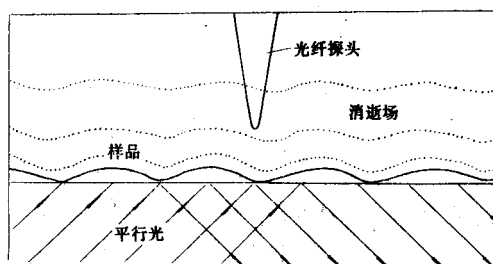


图 1 PSTM 成像机理

由求解消逝场波场方程可知, 消逝场为一非均匀波, 等幅面是  $z$  为常数(平行于界面)的平面, 而等相面则是  $x$  为常数(垂直于界面)的平面. 消逝场的分布见图 2.

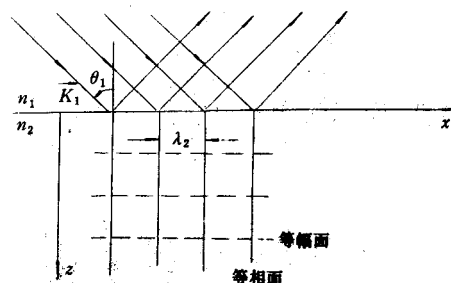


图 2 消逝场分布示意图

用光探头对消逝场进行探测, 即形成了受抑全反射条件下的探测场, 即最终提供图像信息的光场分布. 有关受抑全反射条件下的波场理论, 即为受抑全反射(FTR)理论. 而 PSTM 则是 FTR 理论在显微成像学领域的具体应用. 利用由光导纤维加工而成的光探头, 在电子扫描控制机箱的控制下, 在由激光打在样品表面形成的消逝场内作等场强扫描, 使样品表面的

全反射受到抑制,提取样品图像的探测信号,形成图像数据,送往图像处理系统,最终完成样品的显微成像.

### 三、光子扫描隧道显微镜 显微成像实验系统

#### 1. 光纤探头的制备工艺

光纤探头是 PSTM 区别于 STM 和其他显微仪器的重要标志,也是 PSTM 本身极为重要的一个部分. 光纤探头的质量好坏,直接影响后序放大电路的调整和扫描各控制参数的确定,以致影响最终成像质量的好坏. 光纤探头可以说是决定整个系统分辨率的根本因素,尤其是横向分辨率<sup>[8-10]</sup>.

我们自行研制的光纤探头加工工艺是采用化学腐蚀法,可以进行高质量、大批量的商品化生产. 具体的制作是采用单模或多模石英光纤为原料,以一定浓度的 HF 酸为腐蚀液,在相应的环境温度下,由单板机来控制完成腐蚀加工. 其作用原理如下: $4\text{HF} + \text{SiO}_2 = \text{SiF}_4 \uparrow + 2\text{H}_2\text{O}$ . 图 3 为得到的电镜下的光探头照片.

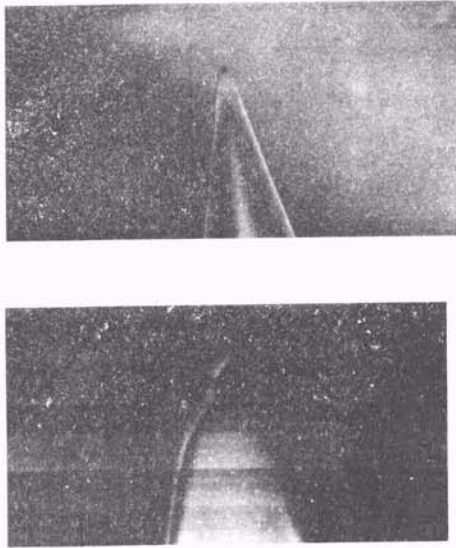


图 3 电镜下的 PSTM 光探头

图 3(a)和图 3(b)分别为同一光探头电镜下不同倍率的照片,其中图 3(a)的倍率为 1560,图中标尺为  $2.3\mu\text{m}$ ;图 3(b)的倍率为

9550,图中标尺为  $0.4\mu\text{m}$ . 由图 3 可估测此尖端的尺寸小于  $0.1\mu\text{m}$ . 图 3(a),(b)两图展现了成品光探头远、近影的不同分布形态.

#### 2. PSTM 的扫描成像系统

PSTM 扫描成像系统见图 4. 由 He-Ne 激光器输出波长为  $632.8\text{nm}$  的激光,以满足全反射的条件入射,在样品表面形成光斑,产生消逝场. 光纤探头固定在压电陶瓷管上,通过附加纵向电压,陶瓷管可作纵向伸缩,即可电动调整光探头与样品之间的距离. 陶瓷管、棱镜工作台、样品均固定在工作头上,上面配置了两个超精细螺杆,并配合杠杆减距原理来手动调整针尖与样品之间的距离. 整个工作头又固定在双目显微镜的观察台上,由可变焦的光学显微镜来监视整个实验成像操作. 由光探头接收的信号经光纤传输至光电倍增管,再输至放大(衰减)电路,然后接入扫描控制机箱,根据所定的阈值电流,控制尖端作等幅扫描. 横向的扫描动作是由陶瓷管的横向加压机来完成,纵向为保持等幅扫描而作的反馈调节增量便作为图像数据由微机控制采集,可在高分辨图像终端上以灰度像或线扫描像实时显示或存储在计算机磁盘内. 由于光纤探头探测信号的离散性较大,而扫描控制机箱的接收信号限制较高,因此,必须将光电倍增管的输出信号进行放大或衰减,前置放大(衰减)电路正是应此要求而设置. 其放大(衰减)倍率  $V_i = |R_i/R|$ ,改变  $R$  与  $R_i$  的相对关系,即可起到放大或衰减的作用<sup>[11-13]</sup>.

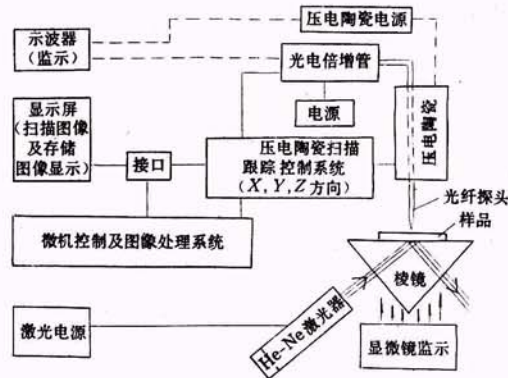


图 4 PSTM 扫描成像系统框图

#### 3. PSTM 的图像处理系统

图像处理程序以 FORTRON 为主,综合汇编语言,图像接口程序用 8088 汇编写成,图像处理功能程序用 TMS32020 和 8088 汇编混合编程。

图像接口程序包括图像系统的初始化,图像的输入、输出、存储、显示、伪彩色、帧存储器的读写和图像的打印。

图像处理功能程序有图像的放大、旋转、多种滤波、多种增强、多种边缘检测法、中值滤波、灰度变换、图像三维显示以及伪彩色处理等。软件的运行环境为:(1)512K 以上的系统内存;(2)DOS 操作系统,版本大于等于 2.0。

#### 四、光子扫描隧道显微镜的样品显微成像及讨论

##### 1. 棱镜表面显微成像及讨论

采用多模光纤探头,对棱镜表面扫描成像。工作条件为:(1)扫描频率 32Hz;(2)扫描范围  $1\mu\text{m} \times 1\mu\text{m}$ ;(3)阈值电流为 7nA。得到的棱镜

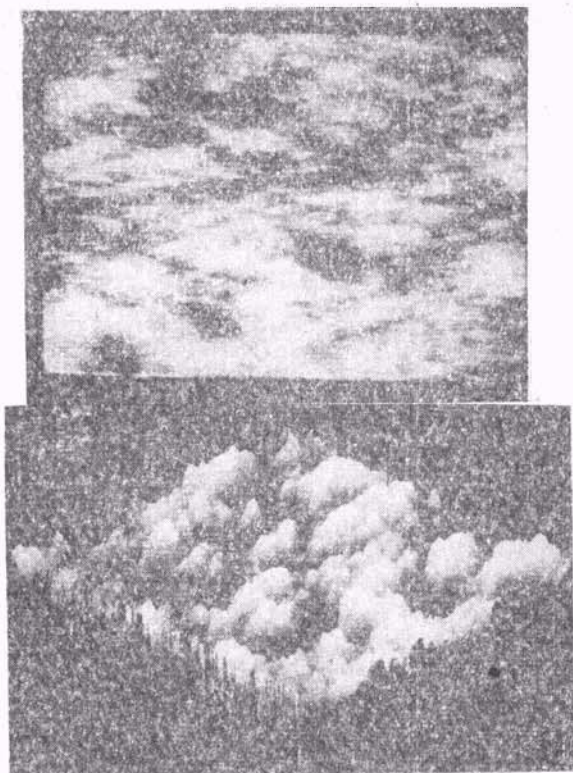


图5 棱镜表面的显微成像  
(a)棱镜表面的 PSTM 像;(b)棱镜表面立体像

表面平面像见图 5(a),相应的立体处理像如图 5(b)所示。由图可见,棱镜表面显微结构的不规则,表面“沟谷”状分布较多,这些“沟谷”主要来源于棱镜表面的精加工过程,即抛光、打磨等加工工艺。“沟谷”的宽度在 100—200nm 范围,长度在几百纳米量级。由此表面粗糙度的显微分析,可以有助于表面精加工工艺的进一步改善。

##### 2. 聚苯乙烯小球样品的显微成像及讨论

样品为聚苯乙烯小球,直径约为 110nm,采用多模光探头,扫描条件为:(1)扫描频率为 47Hz;(2)扫描范围为  $600\text{nm} \times 600\text{nm}$ ;(3)阈值电流为 9.46nA。得到的立体处理像见图 6(a)。图 6(b)为小球样品的小范围成像,其扫描条件为:(1)扫描频率为 43Hz;(2)扫描范围为  $250\text{nm} \times 250\text{nm}$ ,其他工作条件不变。图 6(a), (b)分别反映了样品整体的分布规律和孤立小球的分布形态。由图 6 可见,小球整体排列规则,球体分辨清晰、分明,有的小球球体分辨较为完整,有的则由于随机噪声干扰较大,只是球

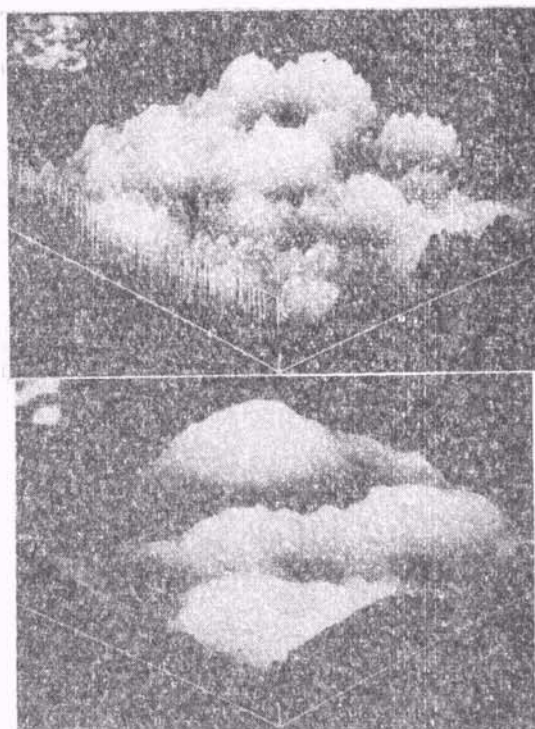


图6 聚苯乙烯小球的 PSTM 像  
(a)聚苯乙烯小球样品的立体像;(b)聚苯乙烯小球样品的小范围成像

体的部分显示,图 6(a)的立体像的前剖面正好反映了一对并列小球的剖面形态分布.图 6(b)的中间上部的小球分辨较为完整,由扫描范围可估测其直径为 100nm 左右.聚苯乙烯小球样品的显微成像是 PSTM 在聚合物观测上的具体应用.

应用本 PSTM 实验系统,还完成了一维光栅、正交光栅、HDPE 取向膜( $H_1$ )、多种光学玻璃以及云母等多种样品的 PSTM 像,这些结果将另文发表.

- [ 1 ] R. C. Reddick and T. L. Ferrell, *Rev. Sci. Instrum.*, **61**-12(1990),3669.  
 [ 2 ] 姚骏恩主编,扫描电子显微术,中国科学院,(1979),1—8.  
 [ 3 ] M. 玻恩,E. 沃耳夫著,黄乐天等译,光学原理(上册),

科学出版社,(1978),61.

- [ 4 ] 于美文等,光学全息及信息处理,科学出版社,(1981),1.  
 [ 5 ] 姚骏恩等,物理,**18**(1990),486.  
 [ 6 ] 黄桂珍、白春礼等,物理,**18**(1990),361.  
 [ 7 ] 周炳琨等,激光原理,国防工业出版社,(1987),1—19.  
 [ 8 ] L. Salomon, *J. Opt. Soc. Am. A*, **18**-12(1991),2009.  
 [ 9 ] T. L. Ferrell and J. P. Goundonnet, *J. Vac. Sci. Technol.*, **B9**(1991),525.  
 [ 10 ] Winfried Denk and D. W. Pohl, *J. Vac. Sci. Technol.*, **B9**(1991),510.  
 [ 11 ] Y. Kuk and P. J. Silverman, *Rev. Sci. Instrum.*, **60**(1989),165.  
 [ 12 ] R. C. Reddick et al., *Physical Review*, **B39**(1989),767.  
 [ 13 ] H. Pagnia and N. Sotnik, *Optik*, **86**-3(1990),87.

## 彼得·塞曼和塞曼效应

宋世榕

(武汉工学院物理教研室,武汉 430070)

### 一、塞曼的生平

彼得·塞曼是杰出的荷兰物理学家.他和卓越的荷兰物理学家、经典电子论的主要创立者亨德利克·安东·洛伦兹同是 1902 年诺贝尔物理学奖的获得者.

1865 年 5 月 25 日彼得·塞曼生于荷兰泽兰省斯科威岛的小村庄宗内迈尔-名路德教<sup>1)</sup>教长的家里.

塞曼很早就表现出对自然科学的研究才能.

在塞曼的家乡宗内迈尔,可以清楚地看到极光.这是靠近北纬地区发生的景观,是太阳发出的高速带电粒子受地球磁场的作用而折向地磁极使高层空气中的分子或原子受到激发,从而在高纬高空中出现绚丽彩色的发光现象.

1883 年,还在本乡齐里克泽中学念书的塞曼,便对极光作了细心的观测和切实的描述.他的文章被刊登在著名的《自然》杂志上.

1883 年塞曼在中学毕业后,到德尔夫特接受古典语言教育,为期两年.他住在学校校长莱利(J. W. Lely)博士家中,这给他创造了一个研究科学的良好环境.当时学术界刮起了“麦克斯韦热”,塞曼给予高度的重视.他熟读了有关的著作,并对科学实验表现出极大的热情.在这里,他结识了著名的实验物理学家海克·卡末林-昂尼斯(Heike Kamerlingh-Onnes).昂尼斯对这名年轻人的进取精神赞叹不已.

1885 年,塞曼进入莱顿大学.他的主要导师正是昂尼斯(讲授力学)以及洛伦兹(讲授实

<sup>1)</sup> 路德教是 16 世纪欧洲宗教改革运动时期产生于德国的基督教派,由马丁·路德(1483—1546)倡导,强调“因信称义”的教义.