

图3 光在渐变型光纤中的传播

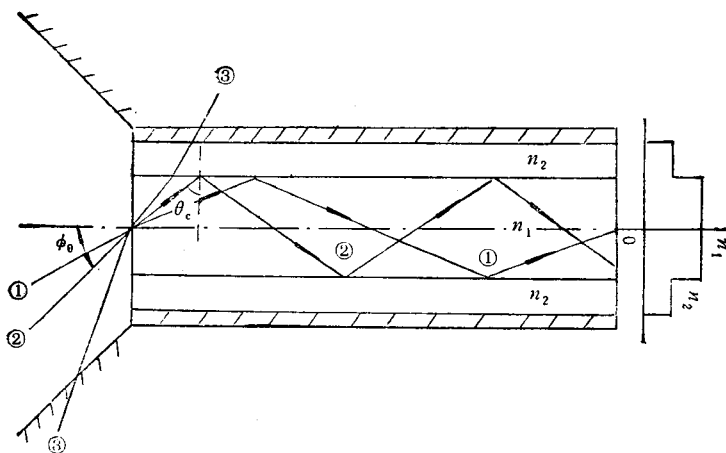


图4 光在阶跃型光纤中的入射和传播

具体实用的传输光纤的实际设计,制棒工艺所用的全套自动化和带计算机控制的设备,均是极其复杂而又昂贵的。

图3和图4分别为光在渐变型光纤和阶跃型光纤中的入射和传播。

在图4中,凡是入射到圆锥角 Φ_0 以内的光线都可满足全反射条件,将被束缚在纤芯中沿轴向传播。在光纤通信领域中, $\sin \Phi_0$ 称为光纤的数值孔径,它表示光纤的集光能力。且有

$$\sin \Phi_0 = n_1 \cos \theta_c = n_1 \sqrt{2\Delta}, \quad (4)$$

式中 $\Delta = \frac{n_1^2 - n_2^2}{2n_1^2} \approx \frac{n_1 - n_2}{n_1}$ 是光纤的相对折射率差。

还有检测光纤各类参数的仪器、仪表的原理,乃至光纤光缆的整个研究和制造过程,所有的原理,各类的成套设备,无不利用了物理学中的基本原理和基本思想。

搞物理教学的教师往往面临课题难订的困难,专业脱离实际较远,在当前商品经济浪潮的冲击下,更有一种困境之感。但是,只要勇敢地步入高新技术领域,物理学工作者是具有雄厚的潜力的。

超快扫描探针显微术¹⁾

王云才 陈国夫 王贤华

(中国科学院西安光学精密机械研究所,瞬态光学技术国家重点实验室,西安 710068)

摘要 将超短脉冲技术应用于扫描隧道显微镜、原子力显微镜等探测显微镜可以实现一种全新的

1) 1994年12月20日收到初稿,1995年2月27日收到修改稿。

测量实验技术。它同时具有超短脉冲的 ps 级的时间分辨率和扫描探针显微术的原子线度的空间分辨率。本文给出了其理论基础,概述了业已取得的实验进展,指出了其广阔的应用前景。

关键词 超快现象,扫描探测显微术,快速电脉冲测量,隧道效应

Abstract By combining ultrashort laser pulse techniques with scanning probe microscopy, some novel techniques have been proposed and demonstrated, which obtain simultaneously ps time resolution and submicron spatial resolution. The fundamental theory, recent experimental progress and future applications are presented.

Key words ultrafast phenomenon, ultrafast pulse technique, scanning probe microscopy

扫描隧道显微镜 (STM) 的实现,使人们第一次能够对单个原子在物质表面的排列状态进行实时观察。同时带动了原子力显微镜 (AFM)、磁力显微镜 (MFM)、激光力显微镜 (LFM) 及近场扫描光学显微镜 (NSOM) 等一系列扫描探针显微术 (SPM) 的发展^[1]。这些 SPM 具有极高的空间分辨率,在表面科学、材料科学、生命科学等领域有着广阔的应用前景。但是受数据采集电路及扫描速率的限制,它们的时间分辨率局限在毫秒量级。在半导体或金属中电子的运动速度约为几十 Å/fs,快速传输线上电信号的传输速度约为 1000 Å/fs。因而时间分辨率为 ms 量级的 SPM 不能度量原子线度的动力学过程。微电子学和生命科学的发展需要一种新的实验技术,能够同时提供飞秒的时间分辨率和原子级的空间分辨率。1992 年贝尔实验室的 E. Betzig^[2] 和斯坦福大学的 A. S. Hou^[3] 几乎同时分别将超短脉冲技术引入 STM 和 NSOM,获得了微微秒 (ps) 级的时间分辨率,将 SPM 的时间分辨率提高了九个数量级。这一技术立即引起各国科学家的关注,日本、德国的科学家也相继报道了他们的实验结果^[4,5]。目前,已在 STM、AFM 及 NSOM 上实现了 ps 甚至亚 ps 的时间分辨率。本文分析了这一技术的基本原理,并总结了目前世界上在这一领域的研究进展。

近年来,基于超短脉冲和取样原理的光电导取样,电光取样等测量系统已实现了对亚 ps 快速电脉冲的测量,这些系统的时间分辨率主要取决于探测脉冲的宽度^[6,7]。超快扫描探针

显微术将超短脉冲引入 SPM,利用扫描探测显微镜探针-样品作用区隧道电流与电压变化的本征 $I-V$ 特性,将被测的快速电压信号转化为慢变化的隧道电流进行测量。日本的 Koichiro 等人利用 STM 探针-样品作用区加低偏压时 $I-V$ 的线性变化性质,在 STM 上实现了对快速电脉冲的测量,获得了 30ps 的时间分辨率。图 1 为其系统原理示意图。STM 的铂铱探针粘在光电导开关的一端,增益开关半导体激光器的超短激光脉冲触发光电导开关,实现取样门的导通。被测信号为肖特基掩埋二极管 (SBD) 所产生的快速电脉冲,探针作为取样门在光电导开关导通时将传输线上的瞬态电脉冲转化为隧道电流。由于开关脉冲信号与被测信号的频率相干,反馈回路对隧道电流在时间轴上积分,将快信号转换为慢信号测量。时域轴上的延长取决于两信号的相位延迟或差频,其倍数为: $m = NT/\Delta t$ 。式中: N 为被测信号与探测信号的频率之比, T 为探测脉冲周期, Δt 为两信号间净延迟。取样原理如图 2 所示。这一系统的时间分辨率(或测量频率带宽)取决于光脉冲宽度,光电导开关响应时间及载流子寿命。改进这些条件,系统的时间分辨率仍可进一步提高。

利用这种 $I-V$ 的线性效应可以获得与被测信号完全相似的测量信号,其数据处理也极为简单。但是,当探针-样品之间所加的偏压较大时(大于 50mV), $I-V$ 关系是非线性的指数规律^[8],因而大部分超快扫描探针显微术均是利用探针-样品作用区之间的非线性性质来

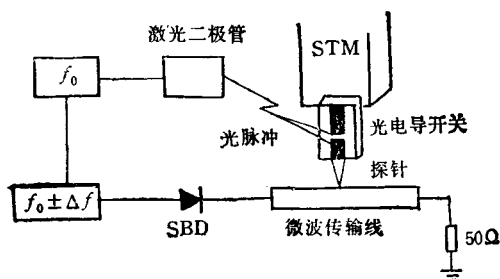


图1 Koichivo 等人的实验系统示意图

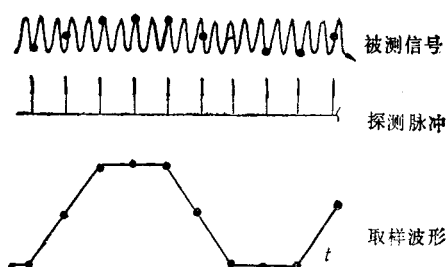


图2 取样原理示意图

实现的。以 STM 为例，其隧道电流与样品和探针的材料有关，对铂铱探针和金样品，其隧道电流密度由下式给出^[9]。

$$J \approx \beta(V + \gamma V^3),$$

其中 β 、 γ 与平均势垒高度和作用区的间隔有关， V 为偏压。如图 3 所示。当幅度分别为 V_1 、 V_2 的被测及探测脉冲同时作用于作用区时，所产生的电流 $I(V_1 + V_2)$ 大于 $I(V_1) + I(V_2)$ ，增加的电流 $\Delta I = I(V_1 + V_2) - I(V_1) - I(V_2)$ 可通过锁相技术检出，由于隧道电流通过探针-样品作用区的本征时间小于 10fs，所以可获得非常高的时间分辨率。当 V_1 与 V_2 两脉冲存在一延迟 τ_0 时，有：

$$\Delta I = 3\beta\gamma \int_{\tau_0}^{\infty} \{V_1^2(t)V_2(t - \tau_0) + V_1(t)V_2^2(t - \tau_0)\} dt.$$

若已知延迟时间 τ_0 及探测脉冲 V_2 的性质，由 ΔI 的积分值便能得出被测信号 V_1 的瞬时特征。对于其他材料，也可得到类似的结果。国际商用机器公司沃森研究中心的 G. Nunes Jr 和 M. R. Freeman^[10] 将一对光电导开关产生的电脉冲送至微波传输线，如图 4 所示。快速

电脉冲产生的隧道电流通过前置放大被积分成一低频信号，改变光学延迟，实现了对整个被测信号波形的扫描。而加利福尼亚大学伯克利分校的 S. Weiss 等人^[11,12] 则在 STM 探针上产生探测脉冲，测量了两脉冲的自相关函数，获得了 2ps 的时间分辨率和优于 50 Å 的空间分辨率。

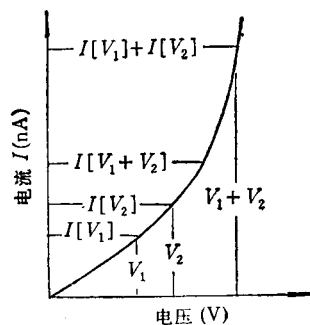


图3 STM 铂铱探针与金样品之间的 I-V 特性^[9]

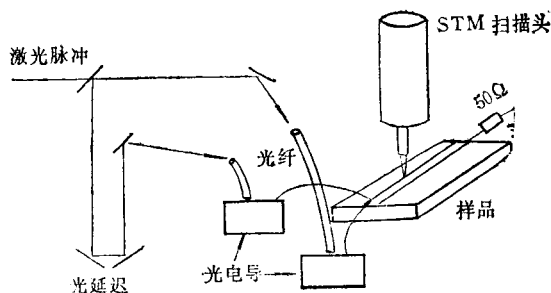


图4 G. Nunes 等人的实验系统示意图

图 5 给出了用 STM 所测得隧道电流的自相关曲线，脉冲宽度为 2ps，对应的平均隧道电流为 5nA，信噪比约为 10%。密芝根大学超快科学实验室的 J. A. Nees 等人^[13] 通过在探针上构造以分子束外延低温生长 GaAs 为衬底的光电导开关，在 AFM 上获得了 25ps 的时间分辨率，并取得了 100mV/Hz 的电压灵敏度。

在这些实验中，一个共同的缺点是利用光电导开关产生探测电脉冲，这会带来开关制做的困难和连线的干扰等不利影响。当探针距样品表面很近时，我们可以通过电容耦合将样品上传播的电信号直接耦合至探针上，探针的高阻抗使它可以近乎无扰地对快速电信号进行探测。德国的 G. Gerber 等人^[14] 直接用 40fs 的

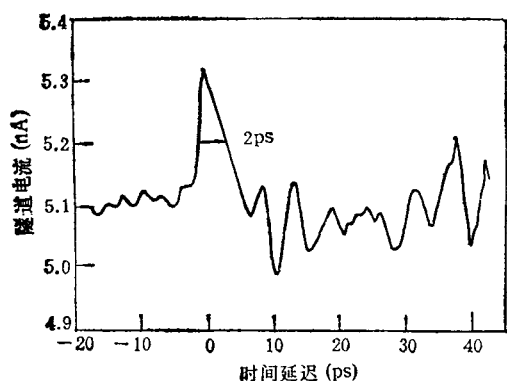


图5 S. Weiss 所测的脉冲曲线^[11]

钛宝石激光脉冲照射金表面,实现非接触测量,用 STM 测得了 200fs 的触发电脉冲.斯坦福大学的 A. S. Hou 等人运用非接触方式在扫描力显微镜 (scanning force microscope) 上实现了 ps 级的时间分辨率^[4].扫描力显微镜是将一微小探针固定于对微弱力极敏感的微悬臂上,通过检测微悬臂的移动来获得表面的形貌信息.当探针与样品间存在电压 V 时,可近似认为探针与样品构成为平板电容器,二者之间存在吸引力 F

$$F = \frac{\epsilon_0 AV^2}{2Z^2}$$

式中 A 为有效面积, Z 为有效距离.利用这种

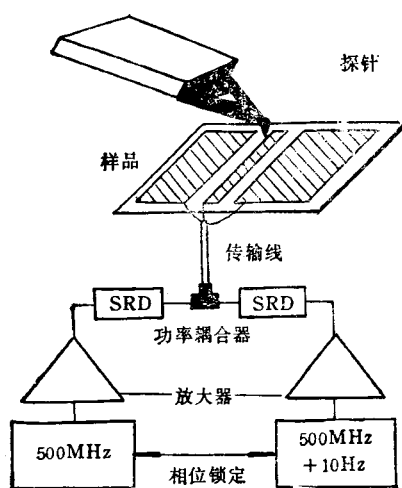


图6 SFM 超快探测技术^[14]

F 与偏压 V 的平方关系,将探针作为一个外部的高速信号取样器,从位置灵敏探测中获得等效时间信号,他们测量了 20GHz 的正弦信号.图 6 给出了其实验原理图.

贝尔实验室的 E. Betzig 等人^[13]则在近场扫描光学显微镜 (NSOM) 上获得了 ps 级时间分辨率,用钛宝石激光脉冲研究了 GaAs 微片的载流子的空间和动态分布,并获得了直径为 $10\mu\text{m}$ 的 GaAs 微片载流子的非线性传输图像.

以上的实验显示了我们可以利用扫描探测显微镜在 ps 级的时间域内探测材料表面上具有重复性的电子状态的变化过程.超快扫描探测显微镜的实现将为超快现象的研究提供一划时代的工具.当 SPM 的时间分辨率及电压灵敏度得到进一步提高后,即可实现在四维空间里研究物质原子线度的动力学过程.

参 考 文 献

- [1] H. Kumar et al., *Science American*, **138-2** (1990), 47.
- [2] E. Betzig et al., *Science*, No. 257(1992), 189.
- [3] A. S. Hou, F. Ho, D. M. Bloom, *Electro. Lett.*, **28-25**(1992), 2302.
- [4] Koichiro Takeuchi et al., *Appl. Phys. Lett.*, **63-26**(1993), 3548.
- [5] G. Gerber et al., *Ultrafast Phenomenon OSA*, (1994), 234.
- [6] D. H. Auston, *Ultrafast Laser Pulses and Application*, Springer, Berlin Heidelberg, (1988).
- [7] J. A. Vadmanis and G. A. Mourou, *IEEE, QE-20*(1986), 69.
- [8] 白春礼, *扫描隧道显微术及其应用*, 上海科学出版社, (1992).
- [9] G. Nunes Jr, M. R. Freeman, *Science*, **262-12** (1993), 1029.
- [10] G. Nunes Jr, M. R. Freeman, *Laser Focus World*, April (1994), 121.
- [11] S. Weiss et al., *Appl. Phys. Lett.*, **63-18**(1993), 2567.
- [12] S. Weiss, *International Quantum Electron Conference*, (1994), 204.
- [13] A. S. Hou et al., *Ultrafast Phenomenon OSA*, (1994), WA5-2.
- [14] J. A. Nees et al., *Ultrafast Phenomenon OSA*, (1994) WA4-1.
- [15] J. B. Stark et al., *Ultrafast Phenomenon OSA*, (1994) WA5-1.