Vol. 44 No. 10 Oct. , 2024

文章编号:1005-4642(2024)10-0001-012



近场微波显微镜的应用

王美迪,张海洋,周子晗,吴 喆

(电子科技大学物理学院,四川成都 611731)

摘 要:近场扫描微波显微镜因具有强大的穿透能力和无损检测优势,已成为微纳尺度下表征材料电磁特性的重要 工具.本文首先介绍了近场扫描微波显微镜的结构原理、探头仿真优化以及图像倾斜修正方法.然后,阐述了近场扫描 微波显微镜测量样品局域高频电导率和介电常量的方法.最后,重点探讨了近场扫描微波显微镜在材料和生物等领域 的应用,详细分析了所获取的点扫描图、线扫描图和面扫描图.本文旨在帮助读者更深入地了解近场扫描微波显微镜的 现状及其未来应用前景.

近年来,在微纳尺度上表征材料结构和性能 的需求日益增长.近场扫描微波显微镜(Near field scanning microwave microscope, NSMM)被 认为是定量测定材料在微波范围内电动力学特性 的重要方法之一[1-3]. 与传统的光学显微镜和电 子显微镜相比,微波显微镜具有穿透能力强和无 损检测的优点[4-6],可以突破阿贝尔衍射极限,可 用于分析从样品表面和内部反射回的电磁波 析[7-10]. 近几年,NSMM 获得飞快发展,例如,Farina 团队组装了新的倒置近场扫描微波显微镜 (iSMM),将其应用于 Jurkat 细胞成像和氧化石 墨烯基环氧纳米复合材料电导研究[11-12].开发更 高性能的扫描探针也是迫切需求之一[13-14]; Joseph 等人利用动态化学蚀刻技术制造了半径接 近于1 µm 的超锐尖端[13]; Wang 等人设计了用 于微纳结构微波扫描成像的振荡金属探针[14],提 高了 NSMM 检测样品电磁特性的灵敏度和分辨 率,等等.

与此同时,NSMM 技术已在多个领域得到广 泛应用,包括材料科学、半导体研究、生物医学成 像以及纳米技术等.

1)在材料检测方面,Berweger 等人利用扫描

DOI:10.19655/j. cnki.1005-4642.2024.10.001

微波显微镜(SMM)对钙钛矿薄膜的电子特性和 相关形貌的空间变化进行了研究,揭示了样品电 导率的空间变化以及样品耐劣化的形态差异^[15]. 此外,该团队还利用基于原子力显微镜的 NSMM 对图案钇铁石榴石(YIG)薄膜进行研究,实现了 高达50 nm 的空间分辨率成像^[16].2024年,Peng 等人利用微扰理论成功实现了非接触条件下对低 介电常量样品的精确测量,这项技术对高集成电 路的制造具有重要意义^[17]. Ruan 等人采用新型 的无损 NSMM 技术,成功实现了铁电薄膜对施 加直流电场响应的可视化^[18].

2) 在生物成像方面, Oh 等人获得了单核细胞白血病细胞(THP1) 表面的亚微米空间地形图像, 发现共振频率随 THP1 细胞膜介电特性和环境的变化而发生复杂变化^[19]. Farina 团队介绍了原子力显微镜-扫描微波显微镜(AFM-SMM)组合系统,展示了在多壁碳纳米管束存在下生长的 C₂C1₂ 肌肉细胞的成像^[20].此外,该团队还设计了一种时间门控宽带近场扫描微波显微镜来检测乳腺癌细胞内富勒烯的含量^[21].

3)在磁场测量方面,NSMM因其高灵敏度和 精确的空间分辨率,成为磁场分布和磁性材料特

收稿日期:2024-07-05;修改日期:2024-08-27 基金项目:四川省科学技术厅项目(No. 2020YJ0266);教育部高等学校大学物理课程教学指导委员会高等学校教学研

^{違项目:四川省科学技术厅项目(No. 2020 YJ0266);教育部高等学校大学物理课程教学指导委员会高等学校教学研究项目(No. DJZW202335xn);四川省高等教育人才培养质量和教学改革项目(No. JG2021-848);大学生创新创业训练项目(No. 202210614261X)}

作者简介:王美迪(2001-),女,山东临沂人,电子科技大学物理学院 2023 级硕士研究生,研究方向为微波能应用. Email:13545928330@163.com

通信作者:吴 喆(1981-),女,江苏南京人,电子科技大学物理学院教授,博士,研究方向为微波能应用. E-mail: zhewu@uestc.edu.cn

性研究中不可或缺的工具[22-23].

综上所述,NSMM 技术在多个应用领域中已 展现出显著的潜力,高分辨率和灵敏度使其在材 料科学、生物医学、磁场测量等方面取得了重要突 破.随着技术的不断发展,NSMM 有望在未来的 研究和工业应用中发挥更加关键的作用,进一步 推动这些领域的创新与进步.

1 近场扫描微波显微镜的介绍

1.1 装置设计

Wu课题组设计的 NSMM 测试装置如图 1 所示^[24],该装置极限分辨约为 1 μm.该平台融合 了先进的硬件设备和定制的软件程序,构成了非 接触式、小型化、集成化的测试系统.核心硬件包 括高品质因数的 1/4 波长同轴谐振腔、矢量网络 分析仪(VNA)、三轴电动位移台、CCD 光学相 机、液晶显示屏及笔记本电脑.其中 1/4 波长谐 振腔直接与 VNA 连接.为降低环境噪声和机械 振动对测试结果的干扰,整套设备被放置在双层 标准机箱中.



(a)NSMM 的实物图



图 1 NSMM 装置

采用 LabVIEW 软件,通过图形化编程语言 编写一体化控制程序. LabVIEW 与电动位移台 和 VNA 通过接口相连接,同时控制位移台和记 录 VNA 中的参量. 该装置主要运用电磁谐振微 扰理论,1/4 波长谐振腔和探针装置作为探测装 置,探针在样品表面进行逐点扫描,由于样品的局 部电磁特性不同,即使微小的变化也会对针尖-样 品相互作用造成显著的干扰,导致从样品表面或 内部反射回来的电磁波发生变化,这些变化通过 VNA 检测到的反射参量 *S*、谐振频率 *f*_r 以及品 质因数 *Q* 的变化展示.

谐振系统可以用等效集总串联谐振电路进行 分析, f_r 可通过下式得到:

$$f_{\rm r} = \frac{1}{2\pi \sqrt{LC}},\tag{1}$$

其中,L 为等效电路的有效电感;C 为有效电容, 其值取决于针尖的几何形状、样品特性和针尖-样 品距离. 当针尖与样品间的距离增大时,系统的 C 减少,从而导致 f_r 上升.Q 直接关系到 1/4 波 长同轴谐振腔的性能.

整套仪器设备之间协同工作,不仅提高了信 号传输和分析的准确性,也提高了测试样品的位 置控制和实时监控能力.该测试平台支持多种扫 描模式,按照针尖-样品的距离划分,包括接触模 式、软接触模式、等高扫描模式和定点逼近模式. 按照扫描区域划分,可以分为点扫描、线扫描和面 扫描,不同扫描模式满足不同测试需求.通过精 密设计,该平台的操作系统单位步进值达到了 0.047 6 μm,展现了其在微观尺度上的操作精度.

1.2 优化设计

分辨率和灵敏度的高低反映装置的检测精度 水平.

1)分辨率决定了 NSMM 能够观察和测量的 最小特征尺寸.由于 NSMM 能够在微纳尺度对 样品进行成像,可以揭示和分析样品表面和结构 的微小细节,这对于理解材料的微观结构、表面形 貌以及微纳尺度上的变化至关重要.2019年,鞠 量等人探究了针尖-样品距离对 NSMM 的空间分 辨率的影响^[25],在不同针尖-样品距离下,测试了 宽度分别为 260 μm 和 470 μm 的 NiFe 薄膜的线 宽,发现针尖-样品距离越小,线宽越接近薄膜的 实际线宽,表明测试的样品空间分辨率越大.

2)灵敏度指 NSMM 对样品信号的探测能力,特别是对微小信号的检测和量化能力.高灵 敏度使 NSMM 能够准确测量样品在不同条件下 的电磁响应或物理性质.NSMM 装置灵敏度的

高低可以用探针附近的电场强度 E 评估.

Wu 课题组通过 COMSOL 仿真软件对探针 尖端进行仿真^[24].图 2 展示了探针伸出腔体的长 度 L_1 、探针与样品的距离 M 及探针直径 D 对探 针附近 E 分布的影响.图 $2(a) \sim 2(c)$ 是保持D=100 μ m 和 $M=50 \mu$ m 等因素不变的前提下,模拟 分析了 L_1 在 $3\sim7$ mm 内探针附近 E 的分布.实 验结果表明:随着 L_1 减小,尖端与样品的相互作 用越强,样品对系统参量变化的敏感性越高.图 2 (d) ~ 2(f)是保持 $D=100 \mu$ m 和 $L_1=3.5$ mm 等 因素不变,模拟了 M在 25~100 μ m 内探针尖端 附近 E 的分布.可以发现:随着 M 减小,针尖附 近的最大 E 增大,样品上的 E 也增大.图 $2(g) \sim 2(i)$ 是保持 $M=50 \mu m$ 和 $L_1=3.5 mm$ 等因素不 变的前提下,模拟了 D 在 $2\sim 200 \mu m$ 内 E 的分 布.发现随着 D 值越小,针尖附近 E 越大,且分 布越集中.

以上仿真说明当针尖越细,探头越短, M 越 小,针尖附近的 E 越大,可以提高系统的检测灵 敏度,提高图像的空间分辨率.在实验测试时,应 该综合考虑分辨率和灵敏度等多个因素, 根据不 同的测试需求, 确定针尖伸出腔体的最佳距离 L₁,针尖半径 D, 以及针尖与样品之间的最佳距 离 M.



1.3 NSMM 图像修正

在实验过程中经常出现采样台或者样本发生 微小倾斜的现象,虽然倾斜角度很小,但是会导致 测试数据产生偏差、图像出现倾斜的现象,降低 NSMM 图像的空间分辨率.

Wu等人提出了对测试数据进行校正优化的

(4)

方法^[24].首先利用斜面与斜面之间的差值得到 校正后的平面,然后进行相应的差值补偿,从而得 到水平面,如图 3(a)~3(c)所示.图中存在倾角 较大的表面 *S*₀,选择在同一水平面上的 3 个坐标 点,利用这 3 个坐标点模拟与 *S*₀ 有相同倾斜趋势 的斜面 *S*₁.然后通过以下步骤对斜面进行校正:

4

1)按照 $S_1(1,1) = S_1(i,j)_{\text{max}}$ 进行处理,其中 $i,j=1,2,3,\dots,n,n$ 为扫描点的数量.

2)按照式(2)~(4)将斜面修正为水平面,
$$S_2(i,j)=S_1(i,1),$$
 (2)

$$S_{3}(i,j) = S_{2}(1,j), \qquad (3)$$
$$S_{4}(i,j) = S_{3}(i,j) - \frac{S_{1}(1,1)_{\max} - S_{1}(i,j)_{\min}}{2}.$$

3)根 $S_5(i,j) = S_4(i,j) + S_0(i,j) - S_1(i,j)$ 进行处理,即可得到修正后的图像 S_5 .

4) 将该图像倾斜修正算法应用于叶脉面扫描 中,如图 3(d) 和图 3(f) 所示.可以发现:修正后 f, 的 NSMM 图像变得更加清晰,分辨率更高,说 明图像倾斜修正算法具有良好的实用性.



图 3 图像倾斜修正原理及修正示例图^[24]

2 NSMM 测试研究分析

2.1 材料领域的 NSMM 检测

2.1.1 电导率和介电常量的测量原理

NSMM 装置对于测量薄膜等介电材料的局 域电导率具有显著优势,样品电导率的不同会显 著影响样品以电阻加热形式产生的能量损失,由 于样品以电阻形式加热产生的损失会进一步影响 VNA 检测到的 Q 值,故可以利用 COMSOL 仿真 软件模拟 Q 随电导率σ 的变化曲线,再通过实验 过程中 VNA 检测到的 Q 进行反推,即可得到样 品的局域电导率. Wu课题组通过溅射方法在玻璃衬底上制备 了 Ag,Au,Cu,Fe,Cr 和 Ti 等金属薄膜样品^[26], 每个薄膜厚度约为 200 nm. 对这几种金属薄膜 进行点扫描,得到 Q 与 M 的关系,如图 4(a)所 示.发现在一定的 M下,不同金属样品间 Q 存在 明显的差别,这是因为 Q 在物理上可以定义为谐 振器中存储的能量与每周期耗散的能量之比,表 示为

$$Q=2\pi f_{\rm r}\,\frac{E_{\rm tolal}}{P_{\rm loss}},\qquad(5)$$

其中, E_{total} 为存储在腔内的平均能量, P_{loss} 为每秒 损失的能量. Q主要取决于能量损失,特别是金

属薄膜上的电阻加热形式的能量损失,所以不同 金属样品间Q的变化比f,的变化更敏感,故可 以从Q的明显变化中得到各种金属薄膜的高频 电导率.接着利用COMSOL软件进行有限元分 析得到Q与各部分能量损失之间的关系:

$$Q_{\rm cav} =_{\omega} \frac{E_{\rm total}}{P_{\rm cavloss}}, \qquad (6)$$

$$Q_{\rm tip} = \omega \, \frac{E_{\rm total}}{P_{\rm tiploss}},\tag{7}$$

$$Q_{\text{resist. heat}} = \omega \frac{E_{\text{total}}}{P_{\text{resist. heat}}},$$
 (8)

其中,ω为谐振角频率; P_{cavloss}为每秒腔壁产生的 能量损失, P_{tiploss}为每秒尖端辐射产生的能量损 失, P_{resist. heat}为每秒以电阻加热形式产生的能量损 失; Q_{cav}, Q_{tip}和 Q_{tesist. heat}分别为腔壁、尖端和电阻加 热对 Q 的贡献.

在尖端下加样品时的实测 Q 为

$$Q_{\text{sample}} = \omega_{\text{sample}} \frac{E_{\text{total}}}{P_{\text{cavloss}} + P_{\text{tiploss-sample}} + P_{\text{resist, heat-sample}}},$$

其中, $\omega_{sample} = 2\pi f_{r-sample}$, $f_{r-sample}$ 为样品存在时的谐振频率. $P_{tiploss-sample}$ 为每秒尖端-样品辐射产生的能量损失, $P_{resist, heat-sample}$ 为每秒样品以电阻加热形式产生的能量损失.

因为谐振腔中的 E_{total} 和腔壁产生的能量损 失 $P_{cavloss}$ 与样品性质无关,故可以视为常量.利用 200 nm 厚的 Cu(σ =5.88×10⁷ S/m)薄膜为标准 样品可以测得 $P_{cavloss}$ 和 E_{total} .利用 Cu 薄膜标准 样品进行标定得到金属薄膜样品的 Q 随薄膜 σ 的模拟曲线,如图 4(b)所示,可以发现:样品的 σ 越高,由于电阻加热产生的能量损耗越大,样品的 Q 值就越低.

接着利用射频溅射手段在玻璃衬底上制备了 掺杂 Al₂O₃ 的 IrMn 薄膜.图 4(c)给出了 M=100 nm 时,Q随 Al₂O₃ 掺杂浓度的变化曲线,发 现随着掺杂浓度从 0.875%增加到 13.79%,测得 的 Q 从 138 降到了 80.根据图 4(b)曲线得到 IrMn 薄膜 σ 随 Al 原子分数的变化曲线图,如图 4(d)所示.将 NSMM 测量的 σ 和四探针测量的 σ 相比,NSMM 测得的 σ 变化范围为直流的 5 倍, 这是因为 NSMM 给出的是微波频率下的局域电 导率.NSMM 在电导率测量方面的优势在于其 能够获得同一薄膜上电导率分布图,这是其他方 法难以做到的.



(a)玻璃衬底上不同金属薄膜的 Q 随 M 的变化



(b)模拟 Q 与玻璃基板上薄膜电导率的关系



(c) M=100 nm 测量的 Q 随 Al₂O₃ 掺杂浓度的变化



(d)NSMM 测量的σ随 Al₂O₃ 掺杂浓度的变化
 图 4 NSMM 测试实验数据与模拟实验数据对比^[26]

NSMM 对于介电常量的测量通常采用腔微 扰理论的方法,由于扰动前后腔体内的电场都必 须满足麦克斯韦方程组,经过计算可以得到介电 常量和谐振频率的关系式,又由于测量的介质材 料都是非磁性材料,即 $\mu = \mu_0$,可以进一步将其化 简为

$$\frac{\Delta f_{r}}{f_{r}} = -\frac{\int_{v_{0}} (\Delta \boldsymbol{\varepsilon} \boldsymbol{E}_{1} \cdot \boldsymbol{E}_{0} + \Delta \boldsymbol{\mu} \boldsymbol{H}_{1} \cdot \boldsymbol{H}_{0}) dV}{\int_{v_{0}} (\boldsymbol{\varepsilon}_{0} \boldsymbol{E}_{0}^{2} + \boldsymbol{\mu}_{0} \boldsymbol{H}_{0}^{2}) dV} \approx -\frac{\int_{v_{0}} [(\boldsymbol{\varepsilon} - \boldsymbol{\varepsilon}_{0}) \boldsymbol{E}_{1} \cdot \boldsymbol{E}_{0}] dV}{\int_{v_{0}} (\boldsymbol{\varepsilon}_{0} \boldsymbol{E}_{0}^{2} + \boldsymbol{\mu}_{0} \boldsymbol{H}_{0}^{2}) dV}, \qquad (10)$$

式(10)中除去扰动后电场 E、谐振频率 f_r 以及样品的介电常量 ϵ 外,其余均是与空腔相关的已知量.

当样品被放置在针尖的近场范围内时,针尖的半径和有效场分布范围远小于波长,因此电磁 波可以视为准静态场,可以应用镜像电荷法分析 静态场分布.

Gao 等人采用镜像电荷法对扰动后的电场进 行近似^[27],通过在系统的某个合适位置放置虚拟 的镜像电荷,以此来代替由源电荷引起的感应电 荷或者极化电荷对电场分布造成的影响.基于唯 一性定理,只要引入的虚拟电荷能够保持原系统 的边界条件不发生变化,则此时电场的解就是原 系统的电场解.在空腔探针的情况下,样品会干 扰探针尖端下的局部电场,采用镜像电荷法可以 得到在软接触距离下的谐振频移 Δf_r 和 Q 的倒 数位移 ΔQ^{-1} 的表达式^[27].

$$\frac{\Delta f_{\mathrm{r}}}{f_{\mathrm{r}}} = -\frac{\int_{v_0} (\Delta \varepsilon \boldsymbol{E}_1 \cdot \boldsymbol{E}_0 + \Delta \mu \boldsymbol{H}_1 \cdot \boldsymbol{H}_0) \,\mathrm{d}V}{\int_{v_0} (\varepsilon_0 E_0^2 + \mu_0 H_0^2) \,\mathrm{d}V} \approx A \left[\frac{\ln (1-b)}{b} + 1\right], \tag{11}$$

$$\Delta Q^{-1} = -(B + \tan \delta) \frac{\Delta f_r}{f_r}, \qquad (12)$$

$$b = \frac{\varepsilon - \varepsilon_0}{\varepsilon + \varepsilon_0}, \tag{13}$$

$$A \approx 16R_0 \ln\left(\frac{R_2/R_1}{\lambda}\right),$$
 (14)

其中, $\tan \delta = \epsilon' / \epsilon; \mu$ 为样品的磁导率, $\epsilon'' \pi \mu''$ 分别 为样品介电常量和磁导率的虚部部分; H 为磁场 强度. 下标 0 表示无样本状态,下标 1 为有样品 时的状态. λ 为波长, R_0 为尖端的半径, R_2 和 R_1 分别为内导体和外导体的半径. A 和 B 的值可以 通过测量 Teflon 等标准样品来进行校准. 但是 这种方法仅限用于均匀和各向同性介电材料. 当 确定针尖-样品处于软接触距离下^[28],将有无样 品时产生的 Δf_r 和 ΔQ^{-1} 分别代入公式即可得到 样品的实部和虚部.

2.1.2 薄膜的 NSMM 检测

在材料科学和工程领域,薄膜已经成为许多 重要应用的关键组成部分,例如电子设备中的导 电薄膜、太阳能电池中的光电转换层,以及医学领 域中的生物薄膜,因此理解和表征薄膜的微观结 构和表面特性至关重要.近年来,石墨烯因具有 优异的物理和化学性质(例如高机械强度、良好的 导电性和生物相容性)而被多种场合应用.

Wu等人对氧化石墨烯(GO)还原制备石墨 烯方法中,退火温度对石墨烯质量的影响进行了 探究^[29-30].图 5(a)和 5(b)显示了不同退火温度 下石墨烯薄膜的 Δf 和 Q = M 的关系.



 $(a)\Delta f$ 随M的变化图像





图 5 石墨烯薄膜的 NSMM 测量结果图^[29]

图 5 中可以看出: Δf 和 Q 都随 M 增加而增 加,当M相同时,不同退火温度下薄膜的f,相差 不大,Q差距却较大.这是因为 fr 主要由针尖-样品耦合电容和介质衬底电容决定,而不是由金 属薄膜决定;而Q主要取决于金属薄膜上以电阻 加热形式产生的能量损失.固定 M=3.5 µm,不 同退火温度下石墨烯薄膜的 Δf ,Q和四探针测量 的 σ 图像如图 5(c)和 5(d)所示.可以看出:不同 退火温度下薄膜的 Q 与测试得到的σ 趋势一致. 退火后制备的石墨烯薄膜的所有 Q 都远小于 Ta 薄膜. 在 400 ℃,450 ℃和 650 ℃退火后,石墨烯 薄膜的低Q因子说明其能量损失较高和导电性 较差.在 550 ℃和 700 ℃退火后的 Q 更接近于 Ta 薄膜,说明 550 ℃和 700 ℃退火后制备的石墨 烯薄膜的导电性优于其他温度退火后的样品.这 说明可以通过 NSMM 提取薄膜的介电特性来分 析薄膜的品质特性.

2.2 生物领域的 NSMM 检测

2.2.1 电解质溶液的 NSMM 检测 电解质溶液环境中的微纳级成像是当前分析

精细生物医学对象和反应性液-固界面电化学过 程的必要条件.

Wu 课题组利用自制的 NSMM 对不同类型 的电解质溶液的浓度及流速的电磁响应进行了研 究^[31-33],实现了 NSMM 技术在液体环境中的应 用.将探针尖端放置在具有固定浓度梯度下 KCl 溶液的毛细管样品上方(固定距离处),进行线扫 描得到 *f*_r和 Q 曲线图,如图 6 所示.





图 6 KCl 溶液的实验测试结果^[31]

图 6 中可以看出:在不同浓度梯度下 f_r 相差 不大,但是 Q 相差较大.溶液浓度越高,Q 值越 小,这是因为溶液浓度越高,产生的功率损耗 P_{loss} 越大,因此 Q 越小.对毛细管中保存的 KCl 样品 进行的实验说明了 NSMM 系统用于研究 KCl 具 有非破坏性、非侵入性等优点.将毛细管模拟为 植物叶脉结构,则 NSMM 可以应用于植物叶脉 中的重金属检测.

在化学工业和生物医学领域的研究中,关于 流速的测量至关重要.例如,工业中管道输送流 体的稳定性与临界流速密切相关,除了流速测量 外,局部流速测量也展示出很好的前景. 与传统 的流量法相比,NSMM 技术可以测量样品的流 速,而不需要在样品内部或使样品接触任何侵入 性的检测器,可以保持样品的原始特征. 对微流 控芯片内的液体流速进行的 NSMM 研究^[33],如 图 7(a)所示. 固定 $M=6.25 \ \mu m$,给出了 4 种溶 液(1 mol/L NaCl 溶液,1 mol/L CaCl₂,去离子 水,葡萄糖溶液)在 5 种不同的注射体积流量下 (0,20,40,60,80 mL/h,1 mL/h≈0.278 m/s), 点扫描得到的 Q^{-1} 的图像,如图 7(b)所示.



(a) 同轴圆柱谐振腔和微流控芯片作用示意图



(b) Q⁻¹与溶液体积流速的关系曲线





从图中发现: Q^{-1} 与流速之间的关系呈线性 关系,随着溶液流速越大,Q⁻¹值越大.CaCl₂溶 液与 NaCl 相比,Q更依赖于 CaCl₂ 体积流速的变 化,这是因为离子浓度越高, Ploss 的变化越大. Q⁻¹与流速之间的线性关系揭示了 NSMM 测量 的液体流速与Q之间有很强的相关性.利用线扫 描研究不同体积流速下 2 mol/L NaCl 溶液填充 200 μm 的微流控通道线宽上 Q 值的分布,为了 排除溶液种类或浓度等非干扰因素的影响,用体 积流速为 0 的 Q^{-1} 减去体积流速分别为 30,60, 90,120 和 150 mL/h 时的 Q⁻¹值, △Q⁻¹值与通道 位置的关系如图 7(c)所示. 可以推断微流控通道 内的液体流速在通道壁面处近似于 0,在通道中 间处达到最大值. 这说明 NSMM 装置能够优化 化学反应和筛选药物中的局部流速,可应用于化 学工业和生物医学领域的二维或三维流速成像. 2.2.2 生物细胞的 NSMM 检测

近场微波显微镜可以对物体内部电磁特性进 行检测,是细胞内部物理化学特性检测和表面形 貌成像的基础. Wu 课题组提出通过 NSMM 测 量正常细胞样品和含有重金属离子的细胞样品的 Q,以此来定性分析细胞内特定重金属离子存在 与否的方法[34]. 以洋葱鳞片的内表皮层为实验 对象,制备3株成熟的洋葱植株:1株直接置于植 物营养液中进行培养;第2株先置于营养液中,然 后切下1枚硬币大小的鳞片,将其浸泡在质量浓 度为 60%的醋酸镍溶液中;第3株直接培养于质 量浓度为 60%的醋酸镍溶液中. 1 周后,将每个 植物样品鳞片的内表皮撕下,放在载玻片上,进行 点扫描,结果见图 8(a). 可以看出:该 NSMM 装 置可以识别出不同重金属离子浓度下培养的植物 细胞,并从检测结果中清晰地分辨出异常细胞. 此外,还对酵母细胞进行了研究[31],将样品分为2 类:a. 放在营养液中培养的活酵母细胞;b. 经过高 温下处理的失活酵母细胞. 将这 2 种细胞放在载 玻片上进行点扫描[图 8(b)],从Q值可以很好地 区分2种状态下的酵母细胞.以上均表明: NSMM 检测在生物样品中具有应用潜力.

在微波频率范围内,多壁碳纳米管束几乎与 频率无关且具有柔韧性,在扫描过程中不会划伤 样品表面,将纳米碳管尖端用于高导电性和介电 性材料上,利用自制的含碳纳米管尖端软质材料 的 NSMM 对角膜内皮细胞(细胞系 B4G12)进行 面扫描,得到 f_r和反射系数 S₁₁的 NSMM 图 像^[35],如图 8(c)和 8(d)所示.在 B4G12 内皮细 胞的成像中,细胞核用红色箭头表示,图 8(c)中 黄色和图 8(d)绿色区域对应于 B4G12 内皮细胞 的细胞质,与光学图像中的轮廓相似,深蓝色和暗 红色区域对应于 B4G12 细胞内的细胞质.该检 测结果中也可以识别出 B4G12 细胞对的叶状突 起,最长的叶状突起见图 8(c)和图 8(d)中黑色箭 头标记,插图为 B4G12 细胞的电子显微镜图像. 在光学图像中可能很难区分细胞质和细胞周围的 介质,但在 NSMM 图像中可以清楚地区分,这展 现了 NSMM 在细胞成像中的应用潜力.



(a)正常细胞和污染细胞滴样的Q与M关系图^[34]



(b)不同酵母细胞之间的Q与M关系图[31]



(c)角膜内皮细胞(B4G12)的等高线 fr 图



(d)角膜内皮细胞(B4G12)S₁₁幅值等高线图^[35]
 图 8 NSMM 检测在生物细胞的应用

3 科研前沿与教学研究

NSMM 的结构原理和工作机制可以作为"电磁学"或"材料科学"课程中的教学模块之一,帮助学生掌握微波和电磁场的基本知识.同时,利用 NSMM 的探测原理,学生可以更深入理解微波与 材料特性之间的相互作用.这不仅拓展了经典电 磁理论的教学内容,还为学生提供了接触前沿技 术的机会.由于 NSMM 在多个领域都有广泛应 用,因此该技术也适合作为跨学科教学的桥梁. 例如,在电子工程与生物医学等专业课程中,可以 介绍 NSMM 的实际应用案例,让学生理解如何 在不同学科中利用这项技术实现突破.

为了帮助学生掌握 NSMM 的实际操作技能,可以将 NSMM 的实验技术引入实验课程中. 例如,教师可以设计基于 NSMM 的材料表征实验,要求学生通过近场微波显微镜对材料进行局部电导率和介电常量的测量,并分析相关数据. 这将使学生亲身体验科研设备的操作,理解其在 实际应用中的重要性.

NSMM 在纳米技术和生物医学领域的应用 前景广阔,学生可以通过小组讨论和课题设计,进 一步探讨如何利用 NSMM 技术解决现实问题. 通过这种方式,不仅能培养学生的批判性思维,还 能激发他们参与相关科研项目的兴趣. 教师可以 安排学生对 NSMM 的最新研究进行文献综述, 从而增强学生对科研领域发展趋势的把握. 此 外,教师可以组织不同专业的学生参与跨学科项 目,共同探索 NSMM 技术的创新应用. 例如本装 置使用到的 1/4 波长谐振腔主要是由本科生在毕 业设计中完成优化和设计的;对电解质溶液的 NSMM研究主要是依托于本科生的创新训练项 目完成.以上都体现了科研融于教学,这样不仅 可以丰富学生学业内容,还能帮助学生将理论知 识与实际应用相结合,培养未来科研创新人才. 这种将科研前沿技术引入课堂的教学模式,不仅 有助于激发学生的学习兴趣,还为他们未来的科 研和职业生涯奠定了坚实的基础.

4 总结和展望

过去几年,NSMM 得到了飞速地发展,本文 详细介绍了其工作原理、图像修正方法及其在材 料和生物领域的应用. NSMM 凭借卓越的穿透 能力和无损检测的优势,已经成为表征材料电磁 特性的关键工具. 通过对 NSMM 图像的修正技 术,例如倾斜校正法的运用,进一步提升了图像的 清晰度和分辨率,使得 NSMM 在复杂环境中的 应用更为广泛.NSMM 在薄膜材料研究中,通过 对薄膜介电常量和电导率的精确测量,揭示了材 料的微观电磁特性变化.在电解质溶液中, NSMM 实现了对不同浓度和流速的 KCl 溶液样 品电磁特性的测量,表明了该技术在液态样品研 究中的重要性.此外,对生物细胞,尤其是单核细 胞白血病细胞(THP1)的成像研究,展示了 NSMM 在生物学领域的潜力. 总体而言,NSMM 通过高分辨率的成像和测量能力,已经在材料科 学、生命科学研究中展现出巨大的应用前景.未 来,随着技术的进一步发展,NSMM 有望在更多 领域发挥重要作用,为科学研究提供更为精确和 全面的分析工具.

参考文献:

- [1] IMTIAZ A, WALLIS T M, KABOS P. Near-field scanning microwave microscopy: An emerging research tool for nanoscale metrology [J]. IEEE Microwave Magazine, 2014,15(1);52-64.
- [2] ANLAGE S M, TALANOV V V, SCHWARTZ A
 R. Principles of near-field microwave microscopy.
 In Scanning probe microscopy: Electrical and electromechanical phenomena at the nanoscale [M].
 New York: Springer, 2007:215-253.
- [3] 高琛,项晓东,吴自勤. 新型扫描近场微波显微术 [J]. 物理,1999,28(10):630-634.
- [4] 冯一军,刘雷,刘庆国,等. 微波近场显微镜及其在 超导薄膜和衬底材料特性无损检测上的应用[J].

低温物理学报,1999(4):39-43.

- [5] ROSNER B T, VAN DER WEIDE D W, High-frequency near-field microscopy [J]. Review of Scientific Instruments, 2002,73(7):2505-2525.
- [6] GAO C, WEI T, DUEWER F, et al. High spatial resolution quantitative microwave impedance microscopy by a scanning tip microwave near-field microscope [J]. Applied Physics Letter, 1997, 71 (13):1872-1874.
- [7] 马慧瑾,白明,邵一鹏,等. 微波近场扫描显微镜无 损介质层透视探测成像[J]. 现代电子技术,2012, 35(10):68-72.
- [8] CHU Z, ZHENG L, LAI K. Microwave microscopy and its applications [J]. Annual Review of Materials Research, 2020,50(1):105-130.
- [9] WEI T, XIANG X D, WALLACE-FREEDMAN W G, et al. Scanning tip microwave near-field microscope [J]. Applied Physics Letter, 1996,68(24): 3506-3508.
- [10] PLASSARD C, BOURILLOT E, ROSSIGNOL J M, et al. Detection of defects buried in metallic samples by scanning microwave microscopy [J]. Physical Review B, 2011,83(12):121409.
- [11] FABI G, JOSEPH C H, JIN X, et al. Electrical properties of Jurkat cells: An inverted scanning microwave microscope study [C]//In 2020 IEEE/ MTT-S International Microwave Symposium, IEEE, 2020:237-240.
- [12] JOSEPH C H, FRANCESCA L, AZMAN S N A, et al. Nanoscale characterization of graphene oxide-based epoxy nanocomposite using inverted scanning microwave microscopy [J]. Sensors, 2022,22(24):9608.
- [13] JOSEPH C H, CAPOCCIA G, LUCIBELLO A, et al. Fabrication of ultra-sharp tips by dynamic chemical etching process for scanning near-field microwave microscopy [J]. Sensors, 2023,23(6): 3360.
- [14] WANG C, WEN H F, XUE Y, et al. Fabrication of oscillating metal probe for dynamic scanning microwave microscopy [J]. Japanese Journal of Applied Physics, 2024,63(2):026501.
- [15] BERWEGER S, MACDONALD G A, YANG M, et al. Electronic and morphological inhomogeneities in pristine and deteriorated perovskite photovoltaic films [J]. Nano Letters, 2017, 17 (3): 1796-1801.

- [16] BERWEGER S, TYRELL-EAD R, CHANG H, et al. Imaging of magnetic excitations in nanostructures with near-field microwave microscopy [J]. Journal of Magnetism and Magnetic Materials, 2022,546:168870.
- [17] PENG C, CHEN X, ZHAN J, et al. Non-contact near-field cavity perturbation method for quantitative dielectric measurement and metallic defect inspection [J]. NDT&E International, 2024, 145: 103124.
- [18] RUAN H, SAUNDERS T G, GIDDENS H, et al. Microwave characterization of two Ba_{0.6} Sr_{0.4} TiO₃ dielectric thin films with out-of-plane and in-plane electrode structures [J]. Journal of Advanced Ceramics, 2023,12(8):1521-1532.
- [19] OH Y J, HUBER H P, HOCHLEITNER M, et al. High-frequency electromagnetic dynamics properties of THP1 cells using scanning microwave microscopy [J]. Biophysical Journal, 2011, 100(3):161a.
- [20] FARINA M, DI DONATO A, MONTI T, et al. Tomographic effects of near-field microwave microscopy in the investigation of muscle cells interacting with multi-walled carbon nanotubes [J]. Applied Physics Letters, 2012,101(20):203101.
- [21] FARINA M, PIACENZA F, ANGELIS F, et al. Investigation of fullerene exposure of breast cancer cells by time-gated scanning microwave microscopy
 [J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 2016,64(12):4823-4831.
- [22] MELIKYAN H, SARGSYAN T, BABAJAN-YAN A, et al. Harddisk magnetic domain nanospatial resolution imaging by using anear-field scanning microwave microscope with an AFM probe tip [J]. Journal Magnetism and Magnetic Materials, 2009,321(16):2483-2487.
- [23] MELIKYAN H, BABAJANYAN A, LEE N J, et al. Characterization of magnetoresistance hysteresis of permalloy thin-film using near-field microwave microscope [J]. Thin Solid Films, 2010,519 (1):399-403.
- [24] ZHANG X, WU Z, LAN Q, et al. Improvement of spatial resolution by tilt correction in near-field scanning microwave microscopy [J]. AIP Advances, 2021,11(3):035114.

- [25] 鞠量,彭斌,黄和,等. 针尖-样品距离对近场扫描 微波显微镜空间分辨率的影响[J].测试技术学 报,2019,33(4):365-368.
- [26] WU Z, SOUZA A D, PENG B, et al. Measurement of high frequency conductivity of oxide-doped anti-ferromagnetic thin film with a near-field scanning microwave microscope [J]. AIP Advances, 2014,4(4):047114.
- [27] GAO C, XIANG X D. Quantitative microwave near-field microscopy of dielectric properties [J]. Review of Scientific Instruments, 1998, 69 (11): 3846-3851.
- [28] 黄和,彭斌,曾慧中,等.近场微波显微镜软接触模 式测量介电常数的研究[J].测试技术学报,2020, 34(6):461-464.
- [29] WU Z, DU Z, PENG K, et al. Defect detection in graphene preparation based on near-field scanning microwave microscopy [J]. IEEE Microwave and Wireless Components Letters, 2020, 30(8): 757-760.
- [30] 彭坤,吴喆,杨山,等. 近场微波显微镜对石墨烯的 无损检测研究[J]. 真空电子技术,2018(1):39-41.
- [31] CHEN Y, YANG X, WEI Z, et al. Application of near-field scanning microwave microscopy in liquid environment [J]. IEEE Access, 2022,10:75720-75728.
- [32] WANG Y, WEI Z, CHEN Y, et al. An approach to determine solution properties in micro pipes by near-field microwave microscopy [J]. Journal of Physics: Condensed Matter, 2021,34(5):054001.
- [33] YUAN Z, LUO H, CHEN Y, et al. An approach of flow velocity measurement on microfluidic chip by near-field scanning microwave microscopy [J]. AIP Advances, 2023,13(7):075211.
- [34] GUO J T, LIU H Y, WU Z. Qualitative analysis of heavy metals in onion epidermal cells by nearfield microwave microscopy [C]// In 2023 24th International Vacuum Electronics Conference, 2023:1-2.
- [35] WU Z, SUN W Q, FENG T, et al. Imaging of soft material with carbon nanotube tip using nearfield scanning microwave microscopy [J]. Ultramicroscopy, 2015,148,75-80.

Applications of near-field microwave microscopy

WANG Meidi, ZHANG Haiyang, ZHOU Zihan, WU Zhe

(School of Physics, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu 611731, China)

Abstract: Near-field scanning microwave microscopy (NSMM) has emerged as a crucial tool for characterizing electromagnetic properties at the micro and nanoscale for its strong penetration capability and non-destructive detection. This article firstly introduced structural principle of NSMM, probe simulation optimization, and methods for correcting image tilt. Then, the article elaborated on the measurement of local high-frequency electrical conductivity and permittivity of samples. Finally, the application of NSMM in the fields of materials and biology was discussed especially, and the obtained point scan, line scan and plane scan were analyzed in detail. This article aimed to enhance readers' understanding of the current status and future prospects of NSMM.

Key words: near-field microwave imaging; microwave microscope; microwave probe; non-destructive testing

[编辑:赵辰一]

欢迎订阅 欢迎投稿

《物理实验》是由教育部主管、东北师范大学主办的学术期刊,是教育部高等学校物理学类专业教学 指导委员会会刊,是全国高等学校实验物理教学研究会副秘书长单位,是全国高等学校物理演示实验教 学研究会常务理事单位.本刊宗旨主要是交流物理实验研究成果,介绍国内外物理实验教学经验,培养 读者的科学精神与创新能力,引领我国物理实验教学的改革与发展.杂志着重刊载对物理实验教学改 革与发展具有前瞻性,对实验教学的具体问题具有指导性,对新科技成果应用于实验教学具有深度融合 性,对传统实验内容具有拓展性和创新性的论文.目前开设的主要栏目有:前沿导读、近代与综合实验、 普通物理实验、专家讲坛、拓展与创新、专题、互联网+物理、学生园地、基础教育等.《物理实验》适合于 物理实验工作者、理工科学生以及教学仪器研制技术人员阅读.

《物理实验》为月刊,全国各地邮局均可订阅,邮发代号为12-44. 若错过邮局订阅时间,可直接与编辑部联系.

物理实验杂志