

MICROSCOPIA DE VARRIMENTO POR SONDA (SPM)

M. R. GONÇALVES, J. H. F. RIBEIRO, P. L. VIEIRA e R. F. M. LOBO

Departamento de Física, Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa, Quinta da Torre, 2825 Monte da Caparica

A invenção do Microscópio de Efeito de Túnel (*Scanning Tunneling Microscope*) em 1981, por G. Binnig e H. Rohrer, seguida do aparecimento do Microscópio de Força Atómica, em 1986, conduziu ao desenvolvimento de um conjunto de novas técnicas de microscopia, genericamente designadas por Microscopias de Varrimento por Sonda (*Scanning Probe Microscopy ou SPM*). Os avanços conseguidos com este tipo de microscopia, associada a outras técnicas, deram origem a uma nova área de engenharia, fortemente interdisciplinar: a Nano-Engenharia. Neste artigo, é analisado o funcionamento de alguns tipos de microscópios SPM e suas aplicações.

1. Introdução

O Microscópio de Efeito de Túnel (*Scanning Tunneling Microscope ou STM*) [1] constitui um dos marcos mais importantes da microscopia. Permitiu atingir resoluções atómicas, analisar topográfica e espectroscopicamente superfícies de materiais condutores e semicondutores e, sob certas condições, manipular átomos e moléculas [2]. Para além disso, pode funcionar em diversos ambientes, como em Ultra Alto Vácuo (UHV), a baixa e a alta temperatura, em água, ou em soluções electrolíticas. Esta versatilidade estimulou a utilização do STM em diversas áreas como Física de Superfícies, Biologia Molecular, Microelectrónica, Supercondutores, Electroquímica e o desenvolvimento de uma nova disciplina de Engenharia: a Nano-Engenharia.

Contudo, o STM tem uma limitação importante: não pode funcionar com amostras isolantes eléctricas.

Em 1986, G. Binnig, Gerber e Quate [3] desenvolveram um novo microscópio, o Microscópio de Força Atómica (*Atomic Force Microscope ou AFM*). Este microscópio tem um processo de varrimento semelhante ao STM, mas baseia-se na medição das forças interatómicas entre os

átomos da extremidade da sonda e os da amostra, em lugar da corrente de túnel. Tem a vantagem de poder funcionar com qualquer tipo de amostra.

Desde 1986, foram desenvolvidos novos microscópios tais como o Microscópio de Força Magnética (*Magnetic Force Microscope ou MFM*), o Microscópio Óptico de Varrimento de Campo Próximo (*Scanning Near-Field Optical Microscope ou SNOM*), o Microscópio de Força de Fricção (*Friction Force Microscope ou FFM*), entre outros.

Paralelamente, diversas aplicações se iniciaram, nomeadamente manipulação atómica e molecular [2, 4], nano-tribologia [5], modificação de superfícies com AFM no modo de contacto [6], modificação de filmes orgânicos [7], análise de meios de gravação magnética de grande densidade [6], e análise de materiais supercondutores [8].

Em Portugal, a actividade neste domínio é ainda bastante reduzida. O Grupo de Nano-Engenharia da FCT/UNL está presentemente a desenvolver um STM baseado num tubo piezoeléctrico e sonda de tungsténio, e a iniciar a actividade na produção de filmes orgânicos, com objectivos de análise e modificação local dos filmes, com AFM e STM.

Microscopia
de Efeito Túnel

Microscopia
de Força Atómica

Modos de funcionamento

Formação e processamento
de imagens

Novos desenvolvimentos
de microscópios

Aplicações

2. O Microscópio de Efeito de Túnel

2.1. Princípios físicos e funcionamento

O efeito de túnel aparece entre duas superfícies metálicas, quando separadas por um filme de material isolante ou vácuo, de espessura suficientemente pequena. Este filme constitui uma barreira de potencial entre as superfícies. A corrente de túnel que se estabelece depende da distância entre as superfícies dos eléctrodos e dos valores das respectivas funções de onda, na região entre as superfícies.

Numa barreira de potencial planar, a densidade de corrente de túnel j é dada pela expressão [1]:

$$j = \frac{e^2}{\hbar} \cdot \frac{\kappa_0}{4\pi^2 s} \cdot V \cdot \exp(-2\kappa_0 s) \quad (1)$$

onde V , em $|V|$ é a tensão aplicada entre os eléctrodos, κ_0 , em $|\text{Å}|$, é uma constante relacionada com o decaimento da função de onda fora das superfícies metálicas, ($2\kappa_0 = A \sqrt{\phi}$), ϕ em $[\text{eV}]$, é a função de trabalho efectiva, $A = 1025 \text{ eV}^{-1/2} \text{ Å}^{-1}$ e s , em $[\text{Å}]$, é a separação entre os eléctrodos.

O STM de Binnig e Rohrer permitia obter uma corrente de túnel controlada, substituindo um dos eléctrodos por uma sonda de extremidade muito fina e aproximando-a da superfície do outro eléctrodo, a apenas alguns Å . O sistema de varrimento baseava-se num tripé de cerâmicas piezoeléctricas, que podiam controlar a distância entre a ponta da sonda e a superfície da amostra, e executar um movimento transversal sobre a superfície, por aplicação de tensões de polarização adequadas. Apesar da forma da sonda ser uma agulha, a variação da corrente de túnel com a distância continua a ser exponencial.

Os primeiros microscópios STM usavam um sistema de varrimento baseado em três barras piezoeléctricas, colocadas ortogonalmente entre si, de modo a produzirem o movimento da amostra nas direcções X, Y (varrimento) e Z (vertical) [1, 9]. Mais tarde, desenvolveram-se sistemas baseados em tubos piezoeléctricos metalizados, com 5 eléctrodos (4 segmentos externos idênticos e um interno) [9]. Os tubos têm a vantagem, relativamente às barras, de terem flutuações térmicas mais fáceis de compensar e de requererem menores dimensões para produzir as mesmas elongações (Z) e deflexões (X e Y), aumentando por isso as frequências de ressonância do material piezoeléctrico [9].

A aproximação de larga escala ($> 1\text{mm}$), entre a agulha e a amostra, faz-se em geral por intermédio de um parafuso micrométrico (nos sistemas mais simples), ou por um motor passo-a-passo. A partir de distâncias inferiores a $1\mu\text{m}$, a aproximação é conseguida polarizando o

eléctrodo interno do piezoeléctrico, com tensões adequadas e proporcionais (de -200 a $+200 \text{ V}$) aos deslocamentos pretendidos (ver Fig. 1).

O varrimento segundo X e Y faz-se por aplicação de sinais tipo dente de serra aos pares de eléctrodos externos opostos do tubo. Por exemplo, por cada linha segundo X, mantém-se V_y constante, variando continuamente V_x . No varrimento seguinte, varia-se V_y e repete-se o processo para V_x (ver Fig. 1).

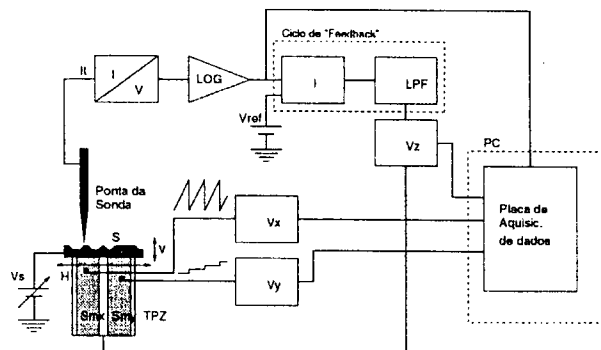


Fig. 1 — Esquema de um STM baseado num tubo piezoeléctrico. A placa de aquisição instalada no PC, permite ao operador obter em tempo real a imagem STM em formação e alterar os valores de variáveis de controlo, tais como corrente de túnel e dimensões do varrimento. O tubo piezoeléctrico TPZ deforma-se por aplicação de tensões às suas faces metalizadas, produzindo movimento horizontal H, e vertical V, de modo a gerar o varrimento sobre a superfície S. A fonte V_s polariza a amostra, criando uma diferença de potencial entre a sonda e a amostra.

O processo de varrimento sobre a amostra em observação conduz à variação da corrente de túnel. Esta corrente tem valores típicos da ordem dos nA, sendo por isso necessário amplificá-la. Se se pretender manter a corrente constante, por exemplo para gerar imagens topográficas de corrente constante, é indispensável um sistema de controlo que faça variar V_z adequadamente.

Uma vez que a corrente de túnel apresenta uma variação exponencial com a distância (eq. 1), torna-se necessário proceder à sua linearização, antes de entrar no ciclo de "feedback" do sistema de controlo (Fig. 1). Este ciclo permite controlar o valor da tensão de polarização do tubo segundo Z, a partir dos valores pretendido e medido da corrente de túnel.

As sondas do STM mais usadas são de tungsténio. Podem ser fabricadas por estrição ou por erosão electroquímica. O tipo de extremidade da sonda é um factor importante, uma vez que quanto mais aguda for essa extremidade maior será a resolução lateral alcançada. Fink demonstrou a possibilidade experimental de obter sondas extremamente agudas, recorrendo ao Microscópio de Emissão de Campo (*Field-Ion Microscope* ou *FIM*). O método proposto permite obter sondas estáveis e terminadas num único átomo, evaporando os átomos da extremi-

dade de uma agulha de tungsténio (111), por controlo intenso do campo eléctrico aplicado.

No varrimento da sonda, há a considerar três movimentos e, conseqüentemente, três resoluções, associadas à imagem a ser formada: a resolução vertical, ou da distância entre a sonda e a amostra, δ_z , e as resoluções horizontais do movimento, segundo X e Y : δ_x e δ_y , respectivamente. Os seus valores dependem, essencialmente, das sensibilidades dos piezoeléctricos e estabilidade conseguida.

As resoluções necessárias para observar os átomos de uma superfície, individualmente, situam-se em 0.1 \AA , para z e 1 \AA para x e y [9]. Para se obterem imagens com esta resolução vertical, as sensibilidades dos piezoeléctricos devem ter valores não superiores a 1 pm , para a direcção Z , e cerca de 10 pm para as direcções X e Y . Os varrimentos da sonda requerem igualmente uma regulação das dimensões da janela, entre $0.1 \text{ }\mu\text{m}$ e $1 \text{ }\mu\text{m}$ [9]. Contudo, estas resoluções só podem ser alcançadas garantindo grande estabilidade mecânica e térmica no sistema de varrimento, com isolamento térmico e mecânico e compensação dos seus efeitos. De facto, as dificuldades mais frequentes, seja no STM, seja em outros microscópios de varrimento, são a estabilidade térmica e o isolamento de vibrações mecânicas de baixa frequência. As variações de temperatura condicionam fortemente o controlo da corrente de túnel e o isolamento de vibrações mecânicas de baixa frequência é difícil de alcançar. Nos STM instalações em sistemas de UHV, usando uma baixa temperatura (alguns K) e sistemas de amortecimento de vibrações mecânicas conseguem-se boas resoluções. É, inclusive, possível a manipulação individual de átomos adsorvidos na superfície [11].

2.2. Modos de Operação

A corrente de túnel depende não só da estrutura atómica da amostra, mas também da estrutura electrónica dos átomos envolvidos no processo. Esta dependência dificulta a obtenção de imagens exclusivamente topográficas. Mas, por outro lado, permite fazer estudos espectroscópicos das amostras.

O STM pode funcionar em vários modos, dependendo do tipo de parâmetro que se quer controlar e medir. Os modos de operação dividem-se principalmente em dois grupos: *topográficos* e *espectroscópicos* [1, 8].

a) Entre os modos topográficos estão:

- *Modo de corrente constante.* Mantém-se constante a corrente de túnel, variando continuamente Z . Obtém-se assim imagens $Z = Z(X, Y)$ a corrente constante.

- *Altura constante.* Mantém-se Z constante, medindo continuamente a corrente de túnel à medida que se faz o varrimento. Tem a vantagem de não necessitar de “feed-

back” para controlar Z . Mas só é aplicável em casos de superfícies relativamente lisas. Em superfícies de grande rugosidade corre-se o risco de destruir a sonda.

- *Modulação da corrente.* Coloca-se a sonda em vibração, na direcção do varrimento X e com uma frequência superior à frequência de resposta do ciclo de “feedback”. O sinal dI/dx medido permite obter relações sinal/ruído melhores do que o modo de corrente constante.

b) O modo espectroscópico [1, 8, 12] mais comum é o seguinte:

- *Modulação da tensão da barreira.* É modulada a tensão aplicada entre a sonda e a amostra, V , e medida a variação da corrente de túnel com a tensão, dI/dV . Este sinal está relacionado com a densidade local de estados electrónicos e, portanto, pode distinguir os diferentes tipos de átomos da amostra.

c) Para além dos modos anteriores, o STM pode fornecer informação sobre a função de trabalho ϕ [1, 8]:

- *Modulação da altura da barreira.* Coloca-se a sonda em vibração na vertical, variando a distância entre a sonda e a amostra, z , com frequência superior à do ciclo de “feedback”. A imagem dI/dz obtida é uma imagem das funções de trabalho locais.

d) Para além dos modos de funcionamento acima descritos, é possível usar o STM para manipular átomos individualmente [2, 11, 13], para depositar átomos da ponta da sonda num substrato [4], por aplicação de um potencial elevado, ou modificar uma superfície por contacto.

A fig. 2 apresenta uma imagem STM, com resolução atómica, obtida em UHV e à temperatura do He líquido.

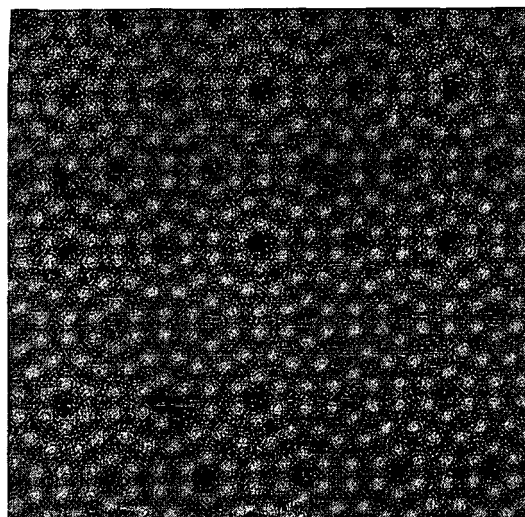


Fig. 2 — Imagem STM de resolução atómica, de Silício (111), obtida em UHV. Cortesia da CRIOLAB.

3. O Microscópio de Força Atômica

3.1. Funcionamento do AFM

O microscópio de Força Atômica (*Atomic Force Microscope* ou *AFM*) usa um processo de varrimento sobre a amostra semelhante ao do STM. A diferença reside no fenómeno físico envolvido e no mecanismo da sua detecção. Neste caso, o tipo de interações entre a sonda e a amostra são forças interatómicas de natureza diversa: covalentes, de van der Waals, iónicas, de adesão, etc. [3, 12].

A sonda do AFM está incorporada na extremidade de uma viga de suporte (ver Fig. 3). As sondas AFM são fabricadas por erosão electroquímica ou por microfabricação, e são frequentemente constituídas por SiO_2 ou Ni_3O_4 .

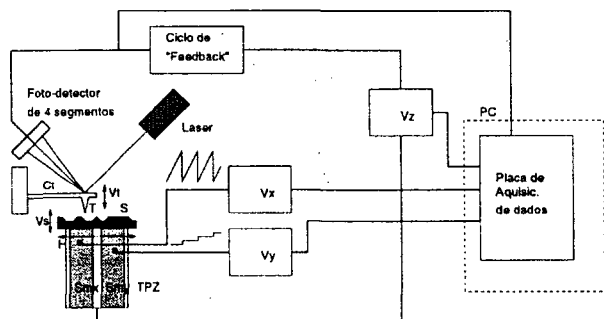


Fig. 3 — Esquema de um AFM com sistema de detecção óptico (deflexão de feixe laser). Tal como no STM o tubo piezoelétrico produz o movimento vertical V_z e horizontal H , necessários ao varrimento. A deflexão V_t , sofrida pela viga da sonda, produz diferentes intensidades do feixe laser reflectido, nos segmentos do detector, permitindo a sua medição.

A medição da intensidade da força é, habitualmente, obtida por um sistema óptico (por deflexão, ou interferometria), embora, em alguns casos, se possa medir recorrendo a um STM [3]. Nos casos de detecção óptica, a parte superior da viga tem um filme reflector.

Quando a amostra se aproxima da sonda, por actuação no tubo piezoelétrico, a força atômica deflete a viga, alterando o ângulo de reflexão do feixe laser, fazendo incidir diferentes intensidades luminosas nos quatro segmentos do fotodetector. A viga pode sofrer igualmente torções. A vantagem da utilização do fotodetector com quatro segmentos é a possibilidade de medir em simultâneo deflexões e torções, com base nas intensidades de luz relativas que incidem em cada um.

Tal como o STM, o AFM pode funcionar em diversos modos.

a) Entre os modos topográficos referimos:

- *Modo de força constante.* Durante o varrimento é mantida constante a força, variando a distância entre a

ponta da sonda e a amostra, por acção do ciclo de “feedback”.

- *Modo de deflexão variável.* A deflexão da viga é medida continuamente, sem recorrer a qualquer controlo. Não necessita por isso de “feedback”.

- *Modo de gradiente de força constante.* A viga é sujeita a uma vibração próxima da sua frequência de ressonância f_0 . Por outro lado $f_0 \propto c_{\text{eff}}$ e $c_{\text{eff}} = c - \partial F / \partial z$ (c é a constante de elasticidade da viga), F é a força e c_{eff} a constante de elasticidade efectiva. Se f_0 for constante, obtêm-se linhas de varrimento com gradiente de força constante. Este é o modo de funcionamento mais comum do AFM com detecção óptica.

- *Modos espectroscópicos.* Não estão tão desenvolvidos como os do STM. Baseiam-se na dependência da força com a distância.

O AFM pode funcionar em dois modos de interacção: modo de contacto e modo de não-contacto. No primeiro caso, a interacção entre a sonda e a amostra é feita ao nível atômico. O tipo de forças que produzem interacção neste modo são forças de fricção, adesão metálica, etc. No modo de não-contacto, a intensidade das interacções é muito menor e como as distâncias entre a ponta da sonda e a amostra são grandes, as interacções sonda-átomo são muito menos importantes, prevalecendo as interacções entre muitas partículas.

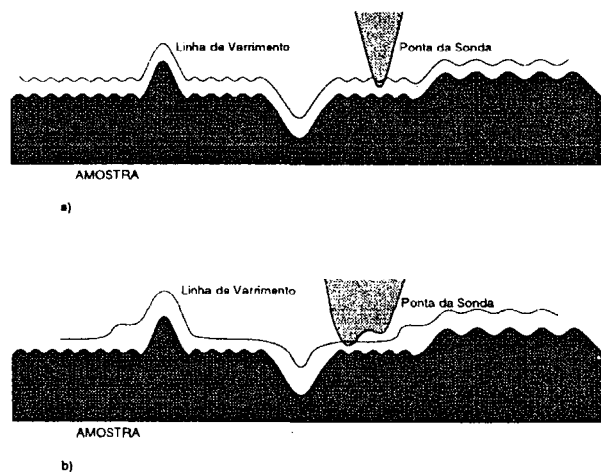


Fig. 4 — Interação entre a ponta da sonda da viga e a superfície da amostra, num AFM. A forma da extremidade da ponta da sonda influencia o varrimento, podendo reduzir a resolução.

3.2. Formação e processamento das imagens SPM

As imagens SPM, independentemente da sua origem, são constituídas, na sua forma mais básica, pelas sequências de sinais das linhas de varrimento segundo uma dada direcção, da ponta da sonda sobre a amostra. A necessidade de proceder ao seu armazenamento electrónico, para observação e/ou processamento posterior, implica a digi-

talização destas linhas [14]. O processo de digitalização faz-se por intermédio de uma placa de aquisição de dados. Deste modo, é possível observar, em tempo real, a formação da imagem, seja topográfica, espectroscópica ou de outra natureza (ver Figs. 1 e 3).

As imagens digitalizadas são armazenadas no disco do computador, num formato digital adequado, para processamento posterior, ou simples visualização. Frequentemente há necessidade de filtrar as imagens para reduzir o ruído, detectar contornos, ou reforçar detalhes que tenham particular interesse.

O formato da imagem digitalizada deve permitir a execução de cópias e a manipulação numérica da imagem¹. É frequente representar as imagens SPM em escala de cinzentos ou de tons de cor, associadas às intensidades do sinal em cada pixel, ou em representações tri-dimensionais (Fig. 5).

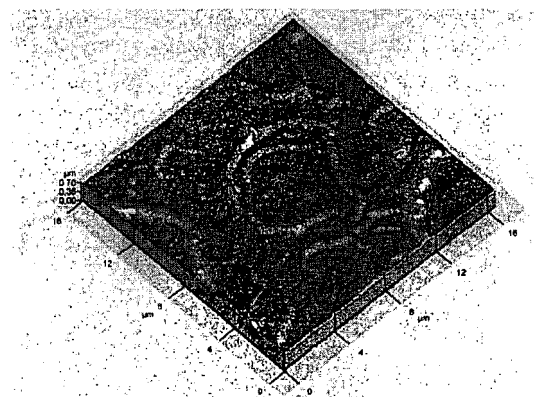


Fig. 5 — Imagem topográfica de cadeias poliméricas de um filme de material electroluminescente, obtida à pressão atmosférica e temperatura ambiente, com um AFM da Park Scientific Instruments (16 µm x 16 µm). Cortesia da CRIOLAB.

O processamento das imagens pode ser feito eventualmente num computador diferente daquele em que foram adquiridas, com “software” específico. Nas Figs. 6 e 7 apresentam-se as imagens original e processada numericamente de um circuito integrado.

4. Microscopia de Varrimento por Sonda (SPM)

4.1. Outros tipos de microscópios de varrimento

Desde 1986, novos tipos de microscopia de varrimento foram sendo desenvolvidos baseados nas forças atómicas, na corrente de túnel, ou ainda em outros fenómenos físicos microscópicos.

Esta nova geração de microscópios não só alargou o espectro de aplicações do AFM e STM como proporcio-



Fig. 6 — Imagem AFM topográfica de um circuito integrado ASIC desenvolvido pelo INESC, obtida no ar, com um AFM da Park Scientific Instruments (90 µm x 90 µm). Cortesia da CRIOLAB.

nou a investigação não destrutiva em superfícies (adsorção atómica de moléculas monocamadas, detecção de defeitos em alta resolução, imagiologia de macro-moléculas e células, estudo de impactos e implantação iónica, materiais supercondutores, etc) e a modificação local (nano-litografia, manipulação atómica e molecular, gravação em alta densidade, modificação de filmes orgânicos, entre outros).

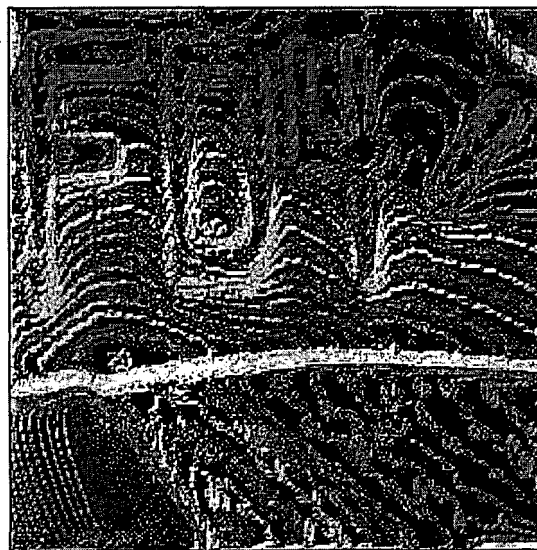


Fig. 7 — Imagem da figura anterior, após detecção de contornos e equalização de histograma. A detecção de contornos permite realçar o enrugamento da superfície, degraus ou regiões menos lisas.

¹ As imagens apresentadas neste artigo foram armazenadas em formato TIFF e depois convertidas em PostScript, de modo a serem incorporadas no texto.

Entre os microscópios SPM, para além do AFM e STM, os de maior expansão são os seguintes:

- *Microscópio de Força Lateral / Microscópio de Força de Fricção. (Lateral Force Microscope ou LFM/ Friction Force Microscope ou FFM).* O LFM é um AFM modificado, funcionando como detector de força lateral [15, 16]. A força lateral tem como componentes a força de fricção entre a sonda e a superfície da amostra e a componente lateral da força de reacção normal. Estas forças produzem torções na viga do microscópio (cantilever), provocando variações de intensidade luminosa nos segmentos do fotodetector. As diferenças relativas entre a intensidade de luz reflectida nos quatro sensores permitem separar a componente lateral da componente normal (imagem topográfica) e determinar o valor da força lateral. A associação da força lateral à fricção faz do LFM/FFM o microscópio mais usado no estudo de filmes lubrificantes, rugosidade e defeitos da superfície e fricção.

- *Microscópio de Força Magnética. (Magnetic Force Microscope ou MFM).* O MFM é um dos SPM's mais usados. O funcionamento é semelhante ao do AFM, mas a sonda é magnetizável. O tipo de interacção predominante é a magnética, dado que o MFM funciona em modo de não-contacto, pelo que as outras interacções são relativamente pouco importantes (a distância à amostra é superior a 10 nm) [12]. A sonda pode ser construída por erosão electroquímica, de um material ferromagnético, ou por microfabricação, depositando um filme de Ni, Co ou Permalloy sobre uma sonda não magnética (Si).

O varrimento da sonda sobre um material magnético faz intervir forças magnéticas atractivas e repulsivas, deflectindo a viga diferentemente, consoante a orientação dos domínios magnéticos do material.

As resoluções podem atingir 10 a 100 nm, o que faz do MFM o método mais poderoso de imagiologia local de materiais magnéticos.

- *Microscópio Óptico de Varrimento de Campo Próximo. (Scanning Near-Field Optical Microscope ou SNOM).* O SNOM é significativamente diferente do AFM, embora tenha um mecanismo de funcionamento semelhante. A sonda do SNOM é um fibra óptica, com uma pequena abertura na extremidade, funcionando como antena óptica. O SNOM pode ser, por isso, considerado um microscópio óptico, conseguindo porém resoluções muito superiores aos microscópios tradicionais.

Num microscópio óptico, o limite de resolução é de meio comprimento de onda da radiação $\sim \lambda/2$, imposto pela difracção. Para a radiação visível, este valor é $\sim 200 \mu\text{m}$. Porém, é possível medir a radiação transmitida através de uma fenda de dimensão inferior ao comprimento de onda, na proximidade da fenda [17, 18]. A radiação detectada não é propagada, mas sim evanescente, e portanto, só existe a curta distância da abertura. Se se fizer passar a radiação através de um filme, pode-se

obter uma imagem do filme. O SNOM baseia-se neste princípio.

Se se aproximar uma fibra óptica de pequena abertura ($< \lambda$), a uma distância suficientemente pequena, pode-se captar uma quantidade de energia susceptível de ser medida por um fotomultiplicador [17]. Quanto menor for a abertura da fibra (sonda), maior será a resolução alcançada. Há, contudo, duas limitações: a potência transmitida decai exponencialmente com a redução do diâmetro da fibra e a profundidade de penetração da radiação é limitada. Por essa razão, o limite da resolução do SNOM é, aproximadamente, 10 nm.

O SNOM pode, no entanto, usar outros tipos de sondas e funcionar em modo de transmissão ou reflexão [12, 17]. O controlo da distância à amostra analisada pode fazer-se por Regulação da Distância de Túnel (*Tunnel Distance Regulation, ou TDR*), usando uma sonda de transmissão óptica com uma sonda STM incorporada na sua extremidade [19].

4.2. Aplicações

Entre as grandes aplicações da Microscopia de Varrimento por Sonda, destacam-se: a nano-fabricação de componentes electrónicos e biológicos [12, 7], a nano-litografia, a gravação de grande densidade, a detecção de nano-defeitos, a observação de domínios magnéticos e vórtices em supercondutores, o crescimento de filmes em superfícies, a distribuição de temperatura em circuitos integrados em funcionamento, entre muitas outras.

5. Conclusões

Desde o aparecimento do STM, um novo campo de técnicas de análise nanoscópica surgiu, revelando um enorme potencial analítico, nunca alcançados por outras técnicas.

A importância industrial da nano-engenharia dá às técnicas de SPM uma grande relevância, dadas as suas potencialidades para modificar e manipular, de modo controlado, átomos e moléculas simples, por exemplo.

Além disso, os métodos SPM têm um carácter interdisciplinar, possibilitando a utilização em múltiplos campos, entre as quais a Física de Superfícies, a Biologia Molecular, a Electroquímica, Nano-Electrónica bem como Catálise Química.

Agradecimentos

As imagens apresentadas neste artigo foram obtidas com um AFM da Park Scientific Instruments (PSI), num "Workshop" organizado pela firma Criolab na cidade do Porto.

Os autores expressam o seu agradecimento ao Prof. Luis Alcácer, pela amostra cedida, às firmas Criolab e PSI pela utilização do AFM e pelo apoio prestado, e ao Prof. Augusto Moutinho pelo seu empenho em apoiar a investigação em superfícies. Este trabalho foi subsidiado pela JNICT, através do projecto "Microscopia Atómica", PBIC/C/CEN/1037/92.

REFERENCIAS

- [1] BINNIG, G. and ROHRER, H. — *Scanning tunneling microscopy*, IBM J. Res. Develop., **30**, 355-369 (1986).
- [2] GOMER, R. — *Possible mechanisms of atom transfer in scanning tunneling microscopy*, IBM J. Res. Develop., **30**, 428-430 (1986).
- [3] BINNIG, G.; QUATE, C. F. and GERBER, Ch. — *Atomic force microscope*, Phys. Rev. Letters, **56**, 930-933 (1986).
- [4] ABRAHAM, D. W.; MANIN, H. J.; GANZ, E. and CLARKE, J. — *Surface modification with the scanning tunneling microscope*, IBM J. Res. Develop., **30**, 492-499 (1986).
- [5] BHUSHAM, B.; KOINKAR, V. N. and RUAN, J. A. — *Microtribology of magnetic media*, In Proc. Instn. Mech. Engrs. part J: J. Eng. Tribology, **208**, 17-29 (1994).
- [6] RUGAR, D.; MANIN, H. J.; GUENTHER, P.; LAMBERT, S. E.; STERN, J. E. and MCFADYEN, I. — *Magnetic force microscopy: General principles and application to longitudinal recording media*, J. Appl. Phys. **68**, 1169-1183 (1990).
- [7] FUJIHARA, M. — *Directions for the Nineties*, vol. 1 of *Organic Thin Films and Surfaces*, chapter Photoinduced Electron Transfer in Monolayer Assemblies and its Applications to Artificial Photosynthesis and Molecular Devices, 2-44, Academic Press (1994).
- [8] GUNTHERODT, H. J. and WIESENDANGER, R. — *Scanning Tunneling Microscopy I*. Springer (1992).
- [9] POHL, D. W. — *Some design criteria in scanning tunneling microscopy*, IBM J. Res. Develop., **30**, 460-465 (1986).
- [10] FINK, H. W. — *Mono-atomic tips for scanning tunneling microscopy*, IBM J. Res. Develop., **30**, 460-465 (1986).
- [11] WIESENDANGER, R. and GUNTHERODT, H. J. — *Scanning Tunneling Microscopy II*. Springer (1992).
- [12] STROSCIO, J. A. and EIGLER, D. M. — *Atomic and molecular manipulation with the scanning tunneling microscope automation*, IBM J. Res. Develop., **30**, 525-532 (1986).
- [15] MATE, C. M.; MCCLELLAND, G. M.; ERLANDSSON, R. and CHIANG, S. — *Atomic-scale friction of a tungsten tip on a graphite surface*, Phys. Rev. Lett. **59**, 1942-1945 (1987).
- [16] FUJISAWA, S.; SUGAWARA, Y. and MORITA, S. — *Origins of forces measured by atomic force/lateral force microscope*, Microbeam Analysis, **2**, 311-316 (1993).
- [17] DURIG, U.; POHL, D. W. and ROHER, F. — *Near-field optical scanning microscopy*, J. Appl. Phys. **59**, 3318-3327 (1986).
- [18] BETZIG, E. and TRAUTMAN, J. K. — *Near-field optics: Microscopy, spectroscopy and surface modification beyond the diffraction limit*, Science, **257**, 189-195 (1992).
- [19] DURIG, U.; POHL, D. W. and ROHER, F. — *Near-field optical scanning microscopy with tunnel-distance regulation*, IBM J. Res. Develop., **30**, 478-483 (1986).

M. R. Gonçalves, J. H. F. Ribeiro, P. L. Vieira e R. F. M. Lobo são investigadores do Grupo de Nano-Engenharia do Dep. Física, FCT/UNL, Quinta Torre, 2825 Monte de Caparica, Portugal.
E-mail: nanoeng@ideiafix.fct.uni.pt

ACÇÕES DE APOIO ÀS ESCOLAS DO ENSINO SECUNDÁRIO

Utilização e rentabilização de equipamento laboratorial

Na sequência de um anúncio anterior (*Gaz. Fis.* Março 95, pág. 25), a Delegação Norte da SPF foi contactada por algumas escolas do Ensino Secundário para realizar acções de apoio nesta área. Na consequência destes contactos, foram já realizadas acções na Escola Secundária de Filipa de Vilhena (nos dias 13 e 14 de Julho), Escola Secundária de Canidelo (nos dias 19 e 21) e na Escola Secundária de Ilhavo (no dia 20), pelo Doutor Manuel de Barros.

Transcreve-se em seguida, para conhecimento dos leitores da Gazeta, um relatório que nos foi recentemente enviado.

"Do que observei, e daquilo que os colegas do ensino secundário me contaram pude concluir que o apetrechamento em material de laboratório - quer para demonstrações quer para a realização de trabalhos pelos alunos - é em muitos casos satisfatório. Dadas as boas notícias, vamos agora às más: o material aparece, regra geral, sem ninguém dizer "água vai", vindo não se sabe de onde, e apenas acompanhado de uma guia de remessa da transportadora. Compreensivelmente, os fornecedores preferem fazer expedições conjuntas. No entanto, para quem recebe, muitas vezes não conhecendo antecipadamente o material, verificar se uma determinada experiência está ou não completa pode ser muito difícil. (Vi por exemplo um caso de um carril de ar onde faltavam os contadores de tempo). Aparentemente não existe grande controlo sobre as condições em que material é recebido, antes de o respectivo pagamento ser efectuado. Talvez, por isso, eventuais reclamações efectuadas directamente aos fornecedores não costumam ser bem recebidas. Reclamações efectuadas ao Ministério da Educação tornam-se difíceis por não se saber a quem as endereçar. Tudo isto se repete no caso de avarias e, não tenhamos dúvidas, o resultado é ao fim de algum tempo, um acumular de material avariado e portanto inútil. Um outro aspecto é a falta de instruções em português. Mas se elas faltam, mesmo em inglês, como resolver o problema?

E, para acabar, um pedido: os Departamentos de Física das Universidades não poderiam ser também contemplados com esta chuva de material didáctico? É que comparado (falo obviamente do Departamento de Física da Faculdade de Ciências da Universidade do Porto, mas suponho que os outros não estarão muito melhor) com o que vi no Ensino Secundário estamos em situação de verdadeira indigência. Peço desculpa àquele Secretário de Estado que há tempos disse mais ou menos isto, e de quem na altura duvidei."

Manuel de Barros
Dep. Física, Fac. Ciências U. Porto