

Introdução aos Microscópios Eletrônicos de Varredura e Tunelamento

(Introduction to the scanning and tunneling electron microscopes)

Eduardo de Campos Valadares

Department of Physics, University of Nottingham

NG7 2RD Nottingham, UK

Recebido do antigo editor em 30 de Agosto de 1989; Reformulação recebida em 27 de Setembro de 1991;
Aceito para publicação em 17 de Junho de 1992

Resumo

É apresentada uma introdução aos princípios básicos e possibilidades da microscopia eletrônica de varredura. Discute-se a formação da imagem, o estudo do relevo das superfícies de amostras e o mapeamento dos elementos químicos nelas presentes. É abordado também de forma elementar o microscópio de varredura de tunelamento, sendo mencionadas algumas de suas aplicações.

Abstract

An introduction to the basic principles and possibilities of scanning electron microscopy is presented. The image formation, the study of the relief of sample surfaces, and the mapping of the chemical elements present in these samples are discussed. In addition, the scanning tunneling electron microscope is approached in an elementary way some of its applications are highlighted.

I. Introdução

É bem sabido que os microscópios óticos permitem ampliar imagens através de uma combinação adequada de lentes, uma vez iluminado o objeto em estudo. O comprimento de onda da luz empregada, λ , é um parâmetro básico do microscópio ótico (MO). Este comprimento está associado à periodicidade espacial das ondas eletromagnéticas (veja figura 1). Ele estabelece uma escala em que a luz visível ocupa uma faixa de comprimentos cujo valor médio é da ordem de 6000 angstroms (1 Å é igual a um décimo de bilionésimo do metro - vale a comparação entre uma pulga (Å) e a Terra (m)).

Um limite básico do MO é dado por sua resolução. A resolução de um microscópio refere-se à distância mínima que deve existir entre dois pontos da superfície examinada para que na imagem formada eles possam ser vistos separadamente. Se a distância entre os dois pontos for inferior à esta distância mínima eles são vistos como um só. A resolução está portanto diretamente associada ao nível máximo de detalhes que se pode captar de uma superfície através de um instrumento de

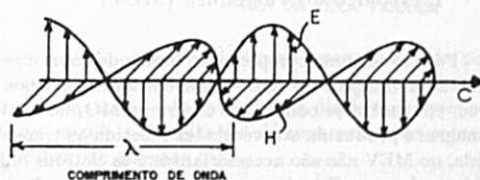


Figura 1: As ondas eletromagnéticas tem origem em oscilações de campos elétricos (E) e magnéticos (H) perpendiculares à direção de propagação (c). O comprimento de onda (λ) está associado à periodicidade espacial das ondas. A intervalos correspondentes a λ ou a múltiplos de λ a configuração de campos se repete.

observação. No caso do MO a resolução vale aproximadamente a metade do comprimento de onda da luz empregada, ou seja $\lambda/2$. Assim, quanto menor λ , a princípio menor é a resolução alcançada e consequentemente maior o grau de detalhes que se pode visualizar através da imagem obtida. Para a luz visível, a menor

resolução corresponde a cerca de 1000 vezes o diâmetro típico de um átomo. Isto explica porque não é possível observar átomos individualmente através do MO.

Comprimentos de onda podem ser também associados à partículas como o elétron, devido ao seu caráter dual de onda-partícula. Esta é uma das noções mais fundamentais em Mecânica Quântica, a teoria que descreve o comportamento da matéria a nível atômico. O comprimento de onda associado a um elétron está diretamente ligado à sua energia. Quanto mais energético for um elétron menor será o comprimento de onda a ele associado. Dependendo de sua energia um elétron pode apresentar um comprimento de onda (λ) comparável ao diâmetro típico de um átomo, aproximadamente 3 Å. Este comprimento representa uma enorme diferença em relação ao comprimento de onda médio da luz visível ($\lambda = 6000$ Å). Isto tem importantes consequências para a formação de imagens, sobretudo quando se trata de mapear detalhes da matéria a nível atômico.

Quando foi concebida a ideia de utilizar elétrons para a obtenção de imagens, tinha-se em mente tirar proveito dos comprimentos de onda muito pequenos, da ordem das dimensões atômicas, e com isso atingir grandes ampliações da imagem com ganhos significativos de resolução (nível de detalhes observados na imagem). O resultado alcançado superou as expectativas. Foi possível obter aumentos muito superiores às mil ampliações correntes fornecidas pelos microscópios óticos, passando-se para cem mil ampliações da imagem. Além disso obteve-se uma sensível melhoria da resolução, permitindo visualizar detalhes da matéria a nível atômico.

II. Formação da imagem no Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV)

Para se ter uma compreensão básica de como é produzida a imagem no MEV, convém antes mencionar que, em contraste com o que ocorre no MO, no qual a imagem é produzida através da luz refletida ou transmitida, no MEV não são necessariamente os elétrons refletidos pela superfície da amostra, denominados *elétrons retroespalhados*, que dão origem à imagem observada. Na grande maioria das aplicações são usados para este fim os chamados *elétrons secundários*. Estes elétrons são arrancados da superfície da amostra examinada pelos elétrons incididos sobre a mesma, denominados *elétrons primários*, emitidos por um filamento aquecido pela passagem de uma corrente elétrica (efeito termiônico). O feixe de elétrons primários representa o mesmo que o feixe de luz incidente no MO, podendo ter sua energia e portanto o comprimento de onda variados continuamente. Um diagrama esquemático de um moderno MEV é mostrado na figura 2. O instrumento dispõe de um canhão de elétrons, a fonte de elétrons primários. Estes elétrons são acelerados por uma diferença de potencial e jogados sobre o material

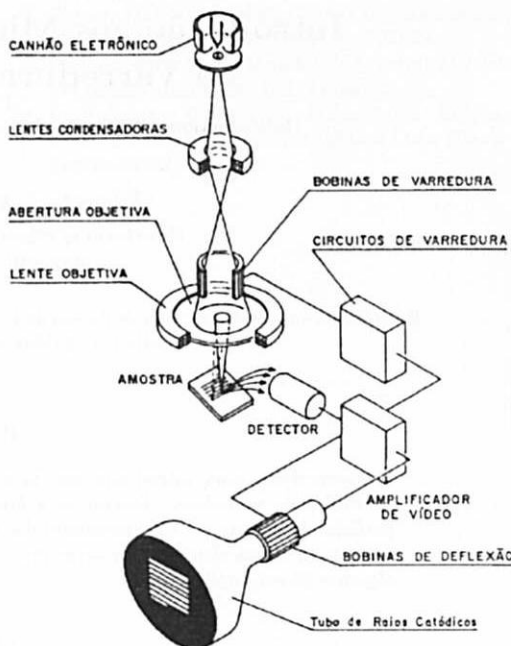


Figura 2: Representação esquemática de um moderno MEV (veja texto). O sistema encontra-se em alto vácuo ($10^{-6} - 10^{-7}$ torr) para evitar que os elétrons do feixe sofram desvios devido à colisões com moléculas de gás, minimizar a contaminação da superfície e a oxidação do detector.

em inspeção. Um conjunto de lentes eletromagnéticas permite convergir os elétrons emitidos pelo filamento. Elas desempenham para os elétrons um papel semelhante ao das lentes comuns em relação à luz. Na ausência destas lentes os elétrons primários divergiriam, chocando-se muitos deles contra as paredes do instrumento.

O sistema de lentes eletromagnéticas responsável pela produção do feixe de elétrons nada mais é do que um conjunto de bobinas nas quais circula uma corrente elétrica cuja intensidade é controlada pelo operador do microscópio eletrônico. Esta corrente dá origem a uma configuração de campo magnético que atua sobre os elétrons em movimento (veja figura 3).

Escolhendo-se uma geometria adequada para estas bobinas e ajustando-se a intensidade da corrente circulando nas mesmas é possível ter-se um controle bastante preciso do direcionamento do feixe de elétrons primários. Valores típicos do diâmetro deste feixe estão na faixa de 50-100 Å. Assim, a região de incidência do feixe sobre a superfície da amostra pode ser considerada praticamente um ponto. A posição deste ponto na superfície pode ser alterada através do conjunto de bo-

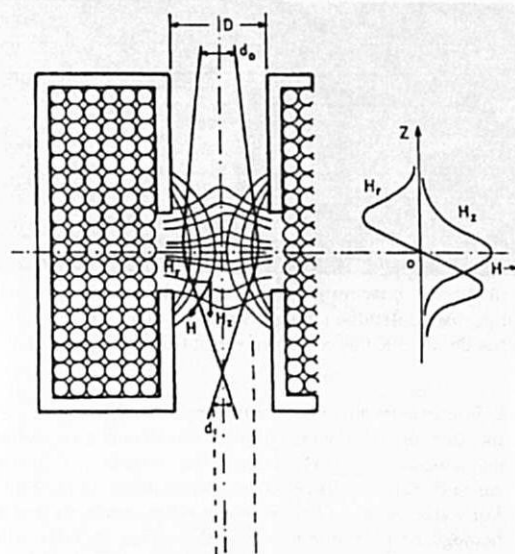


Figura 3: Detalhe de uma bobina (fios enrolados saindo do plano do papel) do sistema de lentes eletromagnéticas. Ao lado, a variação radial e longitudinal do campo magnético (H) produzido pela corrente elétrica na bobina, responsável pela trajetória indicada dos elétrons do feixe.

bobinas de varredura mostradas na figura 2. Variando-se a corrente destas bobinas é possível varrer o feixe de elétrons sobre toda a superfície da amostra, daí o nome microscópio eletrônico de varredura.

Uma vez incidido na superfície da amostra, o feixe de elétrons primários produz elétrons secundários. A taxa de produção destes elétrons depende da forma e da composição química de cada região da superfície examinada. Os elétrons arrancados, em geral fracamente ligados aos átomos da superfície do material, são coletados por um "copo de Faraday". Este detector é basicamente um "copo" metálico, em cuja entrada (janela) é aplicada uma tensão positiva, de modo a acelerar os elétrons secundários, que são elétrons pouco energéticos.

A corrente medida pelo copo de Faraday ao passar por uma resistência elétrica gera uma diferença de potencial que é amplificada por um amplificador eletrônico. A diferença de potencial amplificada controla a intensidade do feixe de elétrons em um tubo de raios catódicos, o popular tubo de imagem da televisão, indicado na figura 2. A tela do tubo é revestida com um material especial fosforescente que emite luz quando um feixe de elétrons incide sobre ela, mantendo persistente o brilho.

A varredura do tubo de raios catódicos é man-

tida permanentemente sincronizada com a varredura do feixe de elétrons primários incidente na superfície da amostra. Isto significa que o movimento do feixe de elétrons primários é acompanhado simultaneamente pelo feixe de elétrons do tubo de raios catódicos, de modo que a cada ponto da tela corresponde um ponto da superfície da amostra varrida pelo feixe de elétrons primários. A relação entre a amplitude de varredura dos dois feixes (as distâncias máximas que cada um deles varre) determina o aumento fornecido pelo instrumento, isto é, o quanto é ampliada a superfície da amostra em inspeção (veja figura 4).

A área varrida pelo feixe de elétrons do tubo de raios catódicos pode ser a princípio tipicamente 20 cm por 20 cm. Assim, caso se deseje um aumento (ampliação) de 1000 vezes é necessário controlar a varredura do feixe de elétrons primários de modo que a distância percorrida pelo feixe sobre a superfície seja no máximo de 200 microns ($1\mu\text{m} = 10^{-4}\text{cm}$). Se a ampliação desejada for de cem mil vezes, o comprimento de varredura do feixe passa a ser dois microns.

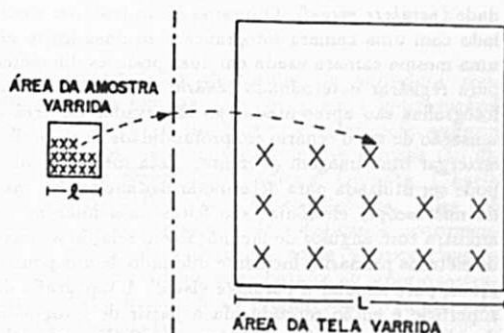


Figura 4: O aumento obtido na imagem é dado pela razão L/l entre a distância máxima varrida pelo feixe de elétrons na tela do tubo (L) e a distância correspondente varrida pelo feixe de elétrons primários sobre a superfície da amostra (l).

O aumento pode ser facilmente controlado bastando apenas ajustar a intensidade da corrente das bobinas do sistema de varredura do microscópio. Deste modo ampliações intermediárias podem ser obtidas controlando-se um botão do aparelho. A imagem que é formada no tubo de raios catódicos permite distinguir o relevo da superfície devido às diferenças de contraste observadas na tela. Na prática, são produzidas sucessivas imagens com ampliações cada vez maiores. Deste modo é possível obter informações bastante detalhadas sobre a morfologia de toda a superfície da amostra (veja figura 5).

O levantamento topográfico da superfície examinada é feito através de um procedimento inteiramente análogo aos métodos empregados em aerofotogrametria.



Figura 5: Sequência de imagens com aumentos crescentes. À direita, imagem geral da superfície examinada (100 x), com detalhe indicado pela seta. Ao centro e à esquerda imagens do detalhe com aumentos de 2000 x e 10.000 x, respectivamente (cortesia do Prof. Israel Baumvol).

tria (levantamento de relevos a partir de fotografias aéreas) ou por engenheiros de campo em levantamentos topográficos. O princípio básico subjacente é que os dois olhos de um observador captam diferentes imagens. Seu cérebro processa as informações procedentes dos dois olhos produzindo a percepção de profundidade (*paralaxe visual*). O mesmo efeito pode ser simulado com uma câmara fotográfica com duas lentes ou uma mesma câmara usada em duas posições diferentes para registrar determinado cenário. Quando as duas fotografias são apresentadas ao observador ele terá a sensação de ver o cenário em profundidade se cada olho enxergar uma imagem diferente. Esta mesma técnica pode ser utilizada para determinar distâncias. No caso do microscópio eletrônico são feitas duas imagens da amostra com ângulos de inclinação em relação ao feixe de elétrons primários incidente diferindo de uns poucos graus, para simular a paralaxe visual. A topografia da superfície é então reproduzida a partir de fotografias das duas imagens. Nos MEV mais sofisticados, a obtenção da imagem tridimensional é obtida através de um sistema computadorizado de aquisição e processamento de dados.

III. Deposição de filmes para melhorar a imagem

Muitas vezes, a partir de determinado aumento, a imagem fornecida pelo microscópio eletrônico não permite distinguir o relevo da superfície examinada. Para melhorar a resolução e o contraste, é usado o "truque" de depositar um filme fino com espessura na faixa de 20-1000 Å sobre a superfície do material. No caso de amostras não condutoras, utiliza-se ouro, platina e outros metais para compensar a baixa emissão de elétrons secundários e proporcionar uma capa condutora elétrica e térmica, necessária para dissipar o calor gerado na amostra. Usa-se também para recobrimento alumínio e carbono, que são mais baratos que o ouro e têm baixo número atômico, sendo transparentes ao feixe primário.

É importante que a espessura do filme seja suficientemente grande para que o número de elétrons arrancados do elemento de cobertura gere uma corrente de elétrons capaz de fornecer um contraste satisfatório na imagem. Por outro lado, o filme deve ser suficientemente fino e homogêneo para que não haja distorções no relevo da superfície. Se a distribuição dos elementos de cobertura sobre a amostra não for uniforme o bastante, isto afetará a imagem, pois nos pontos onde houver maior concentração destes elementos haverá uma maior amplificação da corrente de elétrons secundários original, acarretando perdas de informação sobre a superfície. Por esta razão a amplificação proporcionada pelo elemento de cobertura deve ser praticamente a mesma para todos os pontos da superfície recoberta com o filme, a fim de garantir uma imagem de boa qualidade (veja figura 6). O filme de cobertura desempenha o papel de um pré-amplificador de corrente instalado na própria amostra.

IV. Mapeamento dos elementos químicos

O microscópio eletrônico de varredura permite obter ainda inúmeras outras informações de grande importância para a caracterização de superfícies. O feixe de elétrons primários ao incidir sobre a amostra, além de elétrons secundários, produz também raios-X característicos (veja Apêndice I). Estas radiações são características de cada elemento químico. Um mapa da localização e densidade dos diversos elementos químicos na superfície da amostra pode ser obtido diretamente na tela do microscópio eletrônico.

Para se obter este "mapa" analisa-se o raio-X característico proveniente de cada ponto da superfície da amostra através de um detector de raios-X. A princípio este dispositivo pode detectar todas as radiações características dos elementos químicos presentes na superfície do material. Para se detectar apenas o raio-X característico de um determinado elemento químico, ajusta-se o detector de forma a selecionar a radiação de interesse. O "mapa" é obtido sincronizando-se a leitura do detector de raio-X com a varredura do feixe

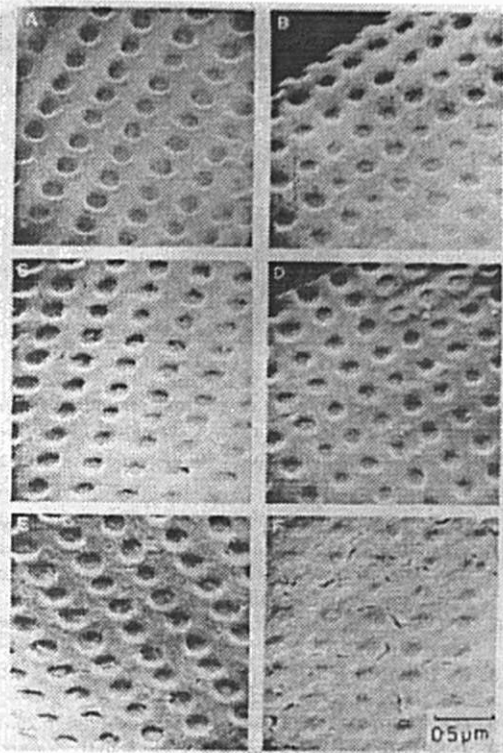


Figura 6: Sequência de imagens de superfícies com filmes de ouro de espessuras crescentes (Ref [2]). Os melhores contrastes neste caso são obtidos com filmes mais finos. Quando o filme torna-se muito espesso (F), perde-se contraste.

de elétrons secundários e do feixe de elétrons no tubo de raios catódicos. Estes dois feixes, conforme mencionamos acima, já encontram-se sincronizados. Deste modo a leitura da intensidade do raio-X característico produzido em um ponto da superfície coincide com a formação da imagem deste ponto na tela. Converte-se então a leitura do detector em um sinal elétrico, que por sua vez modula a intensidade do feixe de elétrons no tubo de raios catódicos. Pode-se obter assim duas imagens: uma representando o relevo da superfície da amostra e a outra a densidade de átomos do elemento selecionado em cada ponto da superfície. Nesta última, os pontos brilhantes da tela correspondem a átomos do elemento selecionado, estando ausentes os átomos deste elemento nas regiões escuras (veja figura 7).

O sistema funciona como uma televisão de muitos canais. Se o canal 13 é selecionado (o número atômico do alumínio), então na tela se vê a distribuição de alumínio sobre a superfície. Se agora o canal 15 é selecionado (o número atômico do fósforo), observa-se a dis-

tribuição de fósforo, e assim por diante. Este sistema de caracterização de superfícies através de raios-X característicos é mais conhecido pelo nome de *microanálise*. O mesmo procedimento pode ser empregado para estudar ligas e compostos, nos quais dois ou mais tipos de átomos encontram-se presentes em uma rede cristalina de forma ordenada ou materiais amorfos, os quais não apresentam ordem cristalina.

Detalhes do mapeamento superficial obtido segundo o procedimento descrito podem ainda não estar totalmente isentos de ambiguidades. Isto decorre do fato de que raios-X característicos provenientes de camadas mais profundas podem estar mascarando as emissões de, por exemplo, grãos de dimensões menores do que estas profundidades. Para se chegar a conclusões consistentes é necessário nestes casos realizar análises adicionais, por exemplo espectroscopia de elétrons Auger, provenientes das camadas mais próximas da superfície. Em outros casos pode ser necessário realizar cortes na amostra, transversais à superfície examinada, sendo o perfil de composição destes cortes determinado através da técnica de microanálise.

V. Epílogo

Os microscópios eletrônicos de varredura constituem hoje em dia uma ferramenta indispensável para a obtenção de imagens e caracterização química de superfícies. Sua aplicação envolve campos tão diversos como Física de Superfícies, Química, Ciência dos Materiais, Biologia e Microeletrônica. Eles são também parte importante de sofisticados instrumentos de análise de superfícies, como o espectrômetro Auger, onde encontram-se embutidos no próprio instrumento com a finalidade de proporcionar a imagem da superfície estudada.

Nos últimos anos um esforço considerável tem sido realizado para que mais e mais seja decifrado sobre a constituição da matéria a nível atômico. Este esforço tem conduzido a grandes progressos. A resolução dos microscópios eletrônicos comerciais situa-se na faixa dos 40-60 Å. Uma outra importante modalidade do microscópio eletrônico, o microscópio de transmissão, permite uma resolução ainda melhor, em torno de 2 Å. Neste caso, o feixe de elétrons primários atravessa a amostra, que deve ser necessariamente muito fina, sendo modulado por ela. A imagem obtida é formada num anteparo fosforescente. A implementação do microscópio de varredura de tunelamento (veja Apêndice II) permitiu resoluções ainda menores.

Os microscópios eletrônicos de varredura podem ser adaptados com grande vantagem para produzir alto-relevos numa superfície visando-se obter circuitos nanométricos, com dimensões na faixa de 100-1000 Å, com funções específicas. Nestas aplicações, a superfície é recoberta com um filme sensível ao feixe de elétrons. Este filme atua de modo semelhante aos filmes comuns quando expostos à luz. Ao ser incidido na superfície

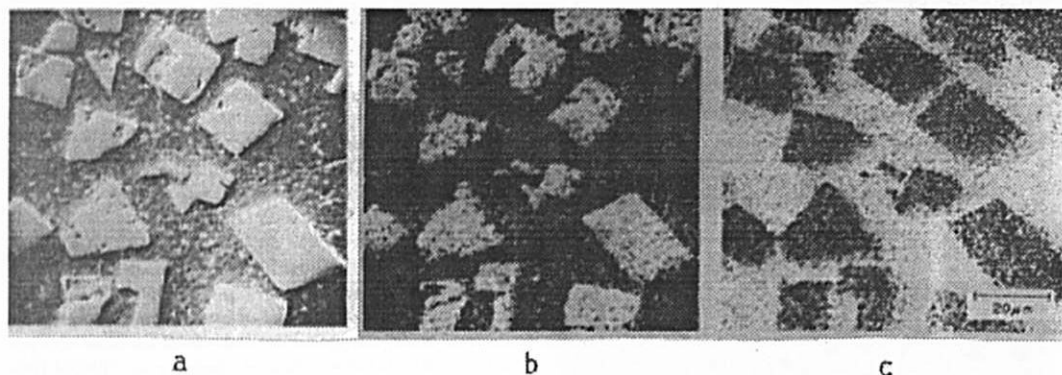


Figura 7: Partículas de carbeto de tântalo sobre uma matriz de níquel. (a) imagem de elétrons secundários; (b) imagem da distribuição de raios-X de tântalo (M_{α}); (c) imagem da distribuição de raios-X de níquel (K_{α}). As regiões claras revelam a presença do elemento com raio-X característico correspondente (Ref [3]).

recoberta, o feixe de elétrons primários nela produz o perfil desejado (técnica conhecida como *litografia por feixe de elétrons*). Um papel semelhante pode ser também desempenhado por microscópios de varredura de tunelamento devidamente adaptados. Novos horizontes tecnológicos abrem-se assim a partir de instrumentos concebidos inicialmente para obtenção de imagens, evidenciando-se uma vez mais a enorme versatilidade destes instrumentos.

Agradecimentos

O autor expressa seus sinceros agradecimentos ao Prof. Israel Baumvol, à Dra. Helena L. Santos e à Profa. Egli Conforto pela inspiração e leitura crítica. Este trabalho é especialmente dedicado à Profa. Beatriz Alvarenga pelo seu entusiasmo, incentivo e contínuo esforço em prol do ensino de Física. Apoio financeiro do CNPq.

Referências

1. E. Ruska, *Rev. Mod. Phys.* vol. 59, nº 3, 627 (1987), (um relato pessoal de quem participou do desenvolvimento do microscópio eletrônico).
2. J.I. Goldstein, D.E. Newbury, P. Echlin, D.C. Joy, C. Fiori e E. Lifshin, *Scanning electron microscopy and X-ray microanalysis*, Plenum Press, New York & London (1981).
3. O.C. Wells, *Scanning Electron Microscopy*, MacGraw-Hill Book Company (1974).
4. P.J. Goodhew e F.J. Humphreys, *Electron Microscopy and Analysis*, Taylor & Francis, London, New York & Philadelphia (1988).
5. I.M. Watt, *The principles and practice of electron microscopy*, Cambridge University Press (1989).

6. C. E. Lyman et. al., *Scanning Electron Microscopy, X-Ray Microanalysis, and Analytical Electron Microscopy, A Laboratory Workbook*, Plenum Press, New York & London (1990).
7. D. Clauser, *Scanning Nature*, Cambridge University Press (1983).
8. G. Binnig e H. Rohrer, *Scientific American*, vol. 253 nº 2, p. 40 (Agosto de 1985).
9. C.F. Quate, *Physics Today*/ agosto de 1986, p.26.
10. J. S. Foster, J.E. Frommer e P.C. Arnett, *Nature*, vol. 331, 324 (1988).

Apêndice I: Emissões características

Quando elétrons primários incidem sobre a amostra, são produzidas várias emissões pelos átomos da superfície e das camadas mais profundas do material. Dependendo da energia dos elétrons primários, além de elétrons secundários, responsáveis em geral pela imagem formada, podem ser gerados raios-X. Estas radiações são usadas como fonte complementar de informações sobre a superfície. Os raios-X de interesse são os chamados raios-X característicos, pois o seu comprimento de onda é característico dos diversos elementos existentes na superfície do material. Outro grupo de emissões características de grande importância para suplementar as informações fornecidas pelas imagens padrões do MEV são os chamados elétrons característicos, dos quais o mais conhecido é o elétron Auger.

O elétron Auger resulta de um processo de decaimento de dois elétrons (veja figura 8). Um elétron do feixe incidente ioniza uma camada interna de um átomo (isto é, arranca um elétron desta camada), formando-se aí um "buraco". Um primeiro elétron, oriundo de uma camada mais externa pula para este buraco, deixando atrás de si um novo buraco. Um segundo elétron, proveniente de uma camada ainda mais externa então

preenche o vazio deixado pelo primeiro elétron na camada em que se encontrava. O elétron de uma camada mais externa, capaz de absorver as emissões de energia decorrentes dos dois processos de decaimento, escapa do átomo com a energia característica. O elétron liberado é o chamado elétron Auger, produzido à profundidades máximas de 10-20 Å abaixo da superfície da amostra. Tanto os elétrons Auger como os raios-X característicos fornecem informações sobre a natureza dos elementos químicos presentes na superfície da amostra estudada.

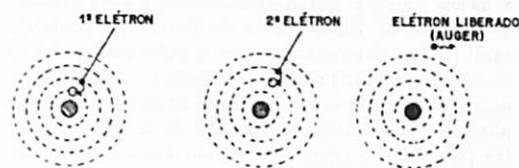


Figura 8: Sequência de decaimentos que dá origem ao elétron Auger.

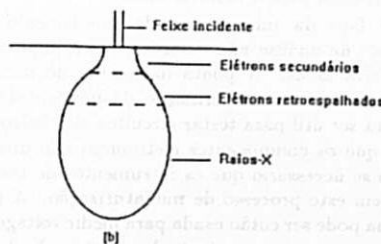
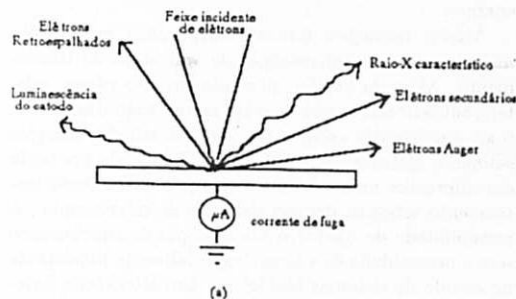


Figura 9: Diversas emissões da amostra (a) e regiões em que elétrons secundários, elétrons retroespalhados e raios-X são emitidos (b).

Os elétrons Auger são empregados em uma importante técnica de análise de superfícies, a *espectroscopia Auger*. Ela é capaz de distinguir, por exemplo, se átomos de silício presentes na superfície de uma amostra estão ligados a outros átomos de silício ou ligados à oxigênio. Além de identificar o tipo de ligação de um átomo esta técnica permite medir sua concentração sobre a superfície em que se encontra. Isto ilustra o

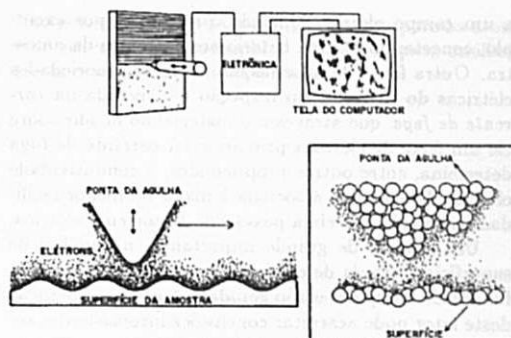


Figura 10: Princípio de funcionamento do microscópio de varredura de tunelamento. Cada dez centímetros na imagem corresponde a 10 Å na superfície. Aumento obtido: cem milhões de vezes. No detalhe pilhas de átomos presentes na ponta da agulha.

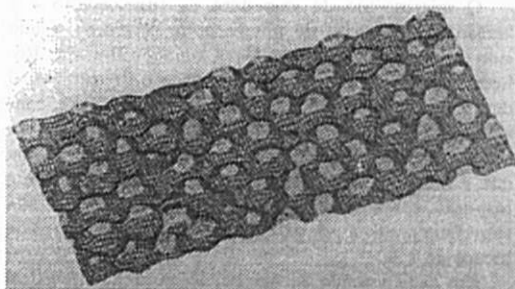


Figura 11: Imagem computadorizada de uma superfície de silício obtida através do microscópio de varredura de tunelamento (Ref [8]). O uso deste instrumento permitiu determinar pela primeira vez o arranjo dos átomos do silício na superfície, que difere do arranjo existente nas camadas mais internas do material.

importante papel dos elétrons Auger na caracterização fina de superfícies.

Além de raios-X característicos, observa-se também outras emissões (veja figura 9), como luz na faixa do visível. Esta radiação é denominada *luminescência do catodo* (outra forma de se referir à amostra), e constitui um método versátil e eficiente de caracterizar rapidamente dispositivos semicondutores. A luminescência é característica dos elementos presentes na superfície e das ligações químicas que eles apresentam. A sua utilização se estende ainda ao controle de qualidade de circuitos microeletrônicos, os *chips*, à determinação, em semicondutores, do tipo de dopante (átomos introduzidos no material com a finalidade de alterar suas propriedades elétricas) e sua concentração. A luminescência pode ser usada também para medir a mobilidade eletrônica, associada ao grau de resposta de um elétron de condução do semicondutor ("elétron livre")

a um campo elétrico aplicado, produzido, por exemplo, conectando-se uma bateria aos extremos da amostra. Outra fonte de informações sobre as propriedades elétricas do material em inspeção é a medida da *corrente de fuga*, que atravessa o material ao incidir sobre ele um feixe de elétrons primários. A corrente de fuga determina, entre outras propriedades, a condutividade elétrica da amostra, associada à maior ou menor facilidade oferecida por ela à passagem de corrente elétrica.

Um aspecto de grande importância na análise de superfícies através de emissões características é a profundidade em que elas são geradas. A não consideração deste fator pode acarretar conclusões inconsistentes sobre a superfície estudada. A figura 9 ilustra as diferentes profundidades em que as diversas emissões características são produzidas na amostra.

Apêndice II: microscópio de varredura de tunelamento

O microscópio de varredura de tunelamento é a versão mais recente do microscópio eletrônico, tendo sido inventado pelos físicos Gerd Binnig e Heinrich Rohrer, que ganharam por esta invenção o Prêmio Nobel de Física em 1986, juntamente com Ernst Ruska, considerado o pai do microscópio eletrônico. Este instrumento consiste basicamente de uma agulha ultrafina que é mantida suspensa pouco acima da amostra em inspeção, conforme ilustrado na figura 10, varrendo sua superfície ponto a ponto, com uma resolução lateral de menos de 1 Å.

Em cada posição da agulha, elétrons da superfície da amostra pulam para a ponta da agulha, havendo uma diferença de potencial de uns poucos volts aplicada entre a ponta e a superfície com a finalidade de manter o fluxo de elétrons. Este fenômeno, denominado *tunelamento*, é estritamente quântico e está ligado ao fato do elétron, mesmo a princípio preso à superfície da amostra, ter uma probabilidade finita de se encontrar fora dela como consequência do seu caráter dual de onda-partícula. A analogia com um lago permite visualizar esta situação facilmente. Se o lago estiver congelado, seus limites serão bem definidos, sendo pertinente afirmar que ele está confinado em uma certa região. Esta imagem representa a concepção clássica do elétron como partícula. Caso o lago não se encontre mais congelado, seus limites deixam de ser bem definidos, pois a água pode recuar e avançar sobre terrenos adjacentes. Esta imagem ilustra o caráter ondulatório do elétron, associado à indeterminação na sua localização. O fenômeno de tunelamento seria o análogo da passagem de água, através de lençóis subterrâneos, entre dois lagos, estando eles situados em diferentes altitudes. Esta diferença em altitude corresponde, nesta analogia, justamente à diferença de potencial aplicada entre a amostra e a ponta da agulha.

A corrente de elétrons que flui da superfície da amostra para a ponta da agulha diminui sensivelmente com o

aumento da distância entre a ponta e a superfície, sendo este fator responsável pela excelente resolução vertical do instrumento, cerca de 0,01 angstroms! Assim, a medida da corrente de elétrons que tunelam para a ponta permite realizar o levantamento do relevo de superfícies com resolução subatômica (veja figura 11).

Binnig e Rohrer imaginaram inicialmente que a ponta da agulha fosse relativamente suave. Suas pesquisas posteriores evidenciaram ser ela extremamente rugosa, devido ao tamanho finito dos átomos, havendo, a menos que um tratamento especial fosse realizado, a formação de várias pilhas de átomos na ponta da agulha. Eles determinaram que a pilha mais próxima da amostra recebe praticamente toda a corrente de tunelamento. Atualmente, a preparação de pontas em ultra-alto vácuo avançou ao nível de se fabricar pontas piramidais terminando em um único átomo. Estas pontas atômicas são particularmente importantes na investigação de estruturas não-periódicas, sistemas desordenados e superfícies rugosas. Elas são também importantes como fontes de íons e elétrons de baixa energia.

Várias inovações foram incorporadas em versões mais recentes do microscópio de varredura de tunelamento. Além da versão operando em alto vácuo, existem outras versões que operam em contato direto com o ar, em líquidos criogênicos, água destilada, soluções salinas e eletrolíticas. Esta flexibilidade de operação em diferentes meios é uma vantagem extra deste instrumento sobre os demais sistemas de microscopia. A possibilidade de operar o microscópio de tunelamento sem a necessidade de vácuo é especialmente importante no estudo de sistemas biológicos. Em alto vácuo haveria a eliminação de água, um componente de grande importância para a matéria viva.

O fato da microscopia de tunelamento ser um método de análise não destrutivo tem implicações em inúmeras áreas. A ponta da agulha do microscópio, além do seu uso na formação da imagem de relevos, poderá ser útil para testar circuitos eletrônicos. A medida que os componentes eletrônicos vão diminuindo, torna-se necessário que os instrumentos de teste acompanhem este processo de miniaturização. A ponta da agulha pode ser então usada para medir voltagens locais bem como servir como fonte de corrente. Neste sentido, o princípio de funcionamento do microscópio de varredura de tunelamento pode tornar-se extremamente útil quando o nível de miniaturização alcançar os estágios de uma engenharia atômica, tornando-se possível manipular átomos e moléculas individualmente em projetos específicos (veja Ref. [10]). Outras aplicações incluem a possibilidade de se estudar reações químicas, regulando-se para isto a voltagem aplicada na ponta de modo que a energia dos elétrons que tunelam para ela se encontre na faixa das energias dos processos químicos envolvidos.

A evolução do microscópio de varredura de tunelamento tem sido notável. De um instrumento complexo

e volumoso, ele passou ao que se poderia chamar de um "microscópio de bolso", tal o grau já alcançado de simplificação e miniaturização de seus componentes.

Isto permite que ele seja facilmente incorporado a outros sistemas, por exemplo a um MEV, para análises locais com resolução subatômica.