

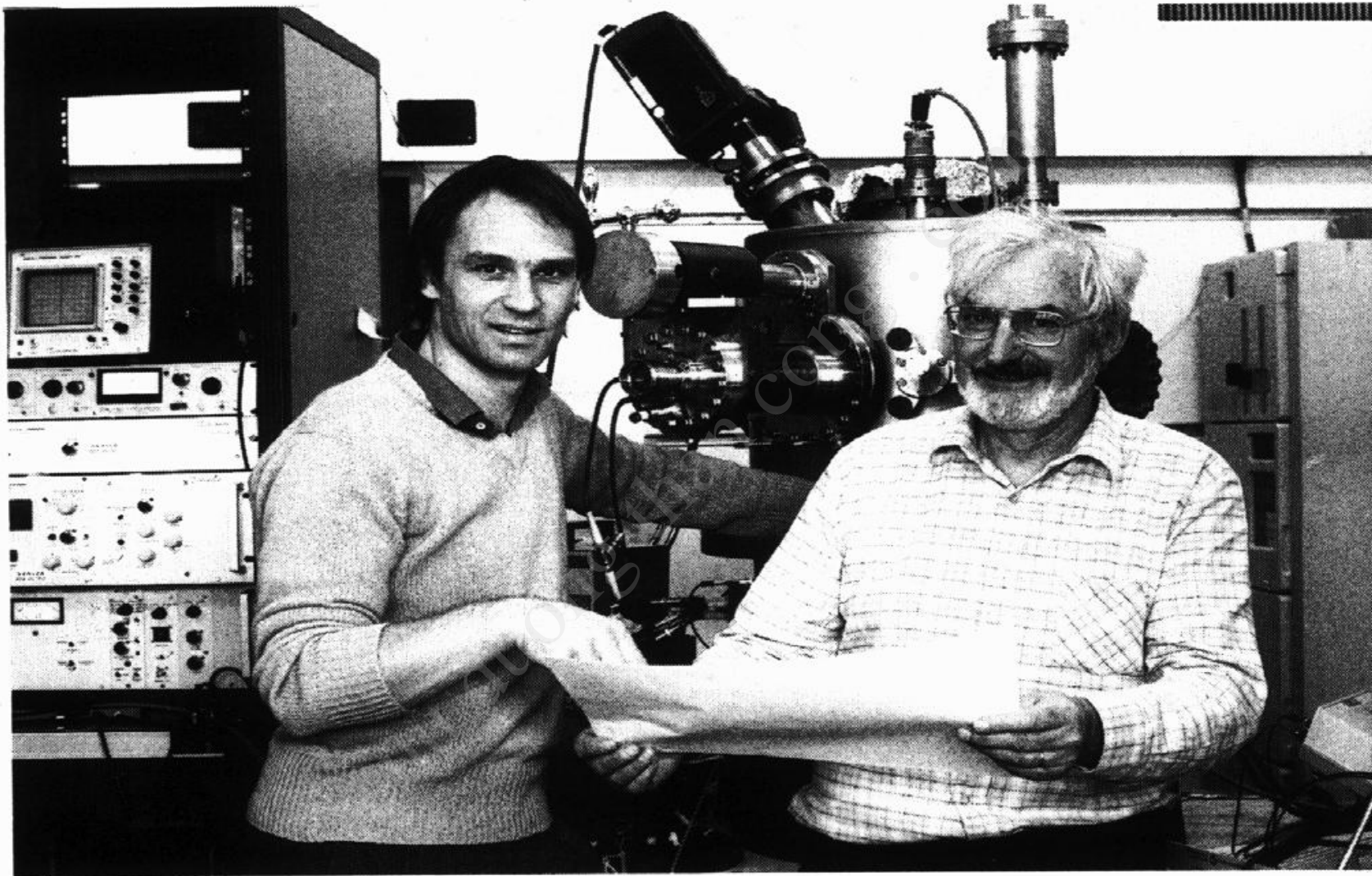
Chương 3

Kỹ thuật phân tích AFM, SEM, TEM

Kính hiển vi lực nguyên tử

AFM – Atomic Force Microscope

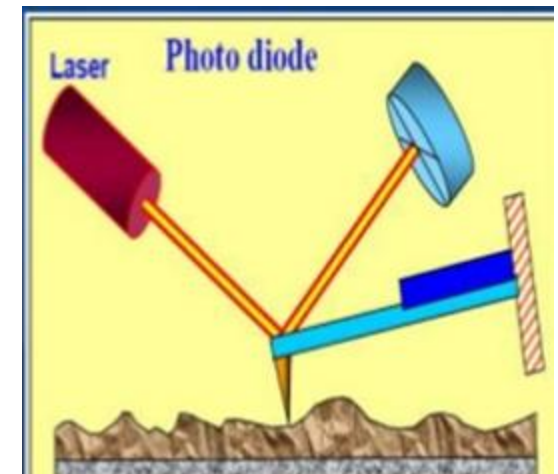
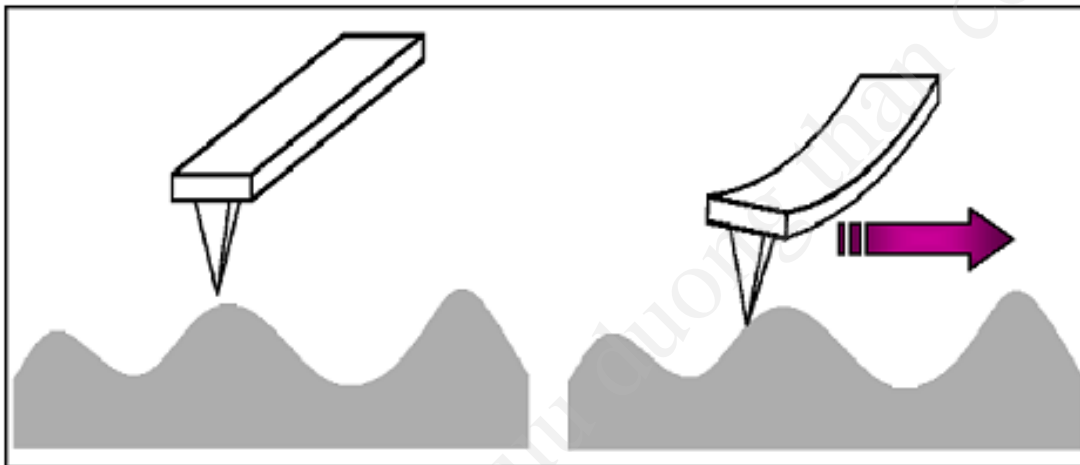
- Được sáng chế bởi Gerd Binnig và Christoph Gerber vào năm 1986.
- Loại kính này được phát triển từ một loại kính hiển vi đường hầm (STM) cũng do hai ông chế tạo vào năm 1982.
- Kính có độ phân giải ở cấp độ nanomet
- Thuộc nhóm kính hiển vi quét đầu dò hoạt động trên nguyên tắc quét đầu dò trên bề mặt.



Gerd Binnig (left) and Heinrich Rohrer (right) who were awarded the Nobel Prize for their invention of the scanning tunneling microscope.

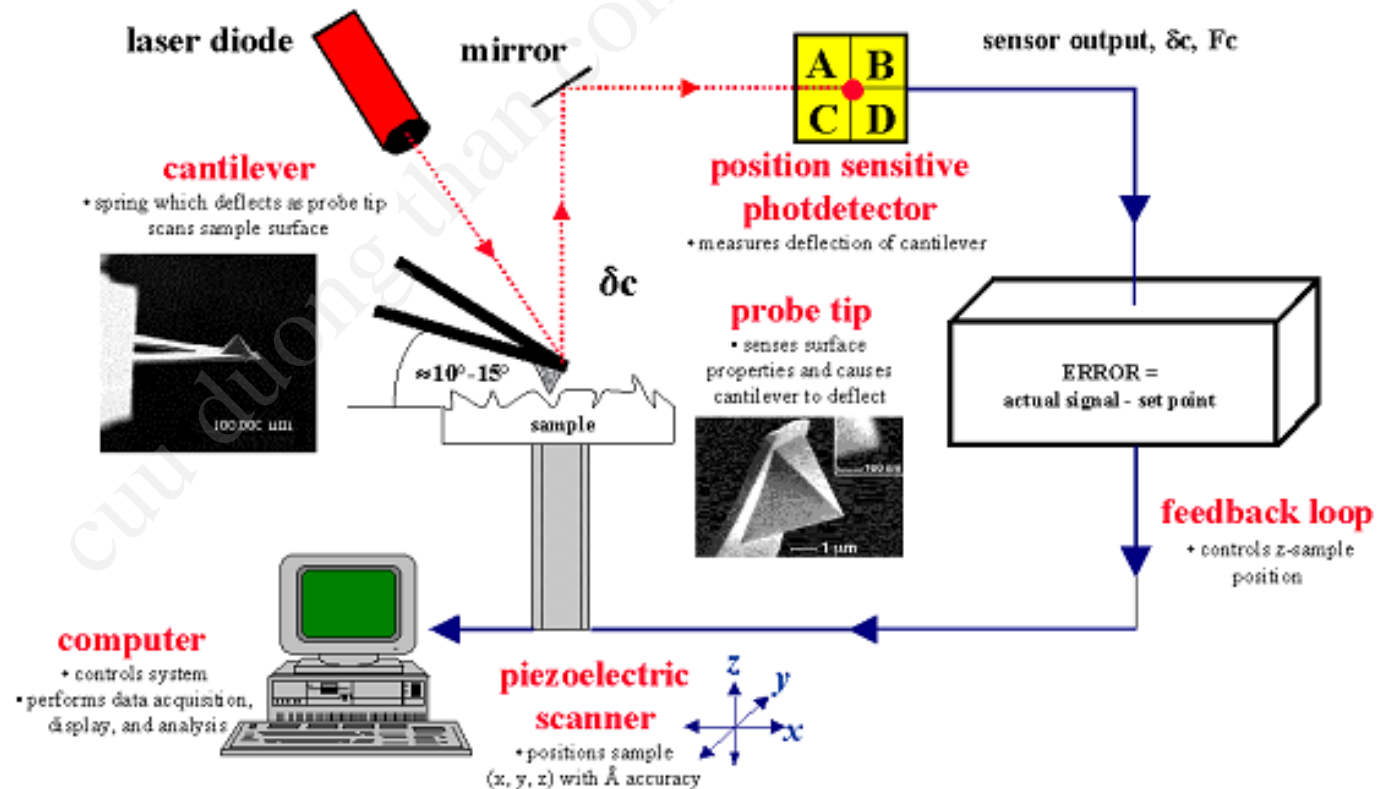
Nguyên lý của AFM

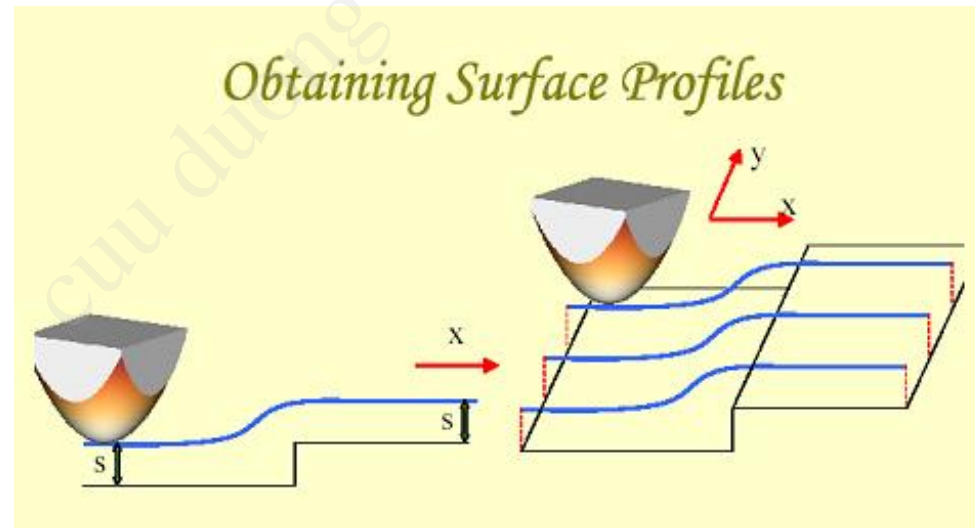
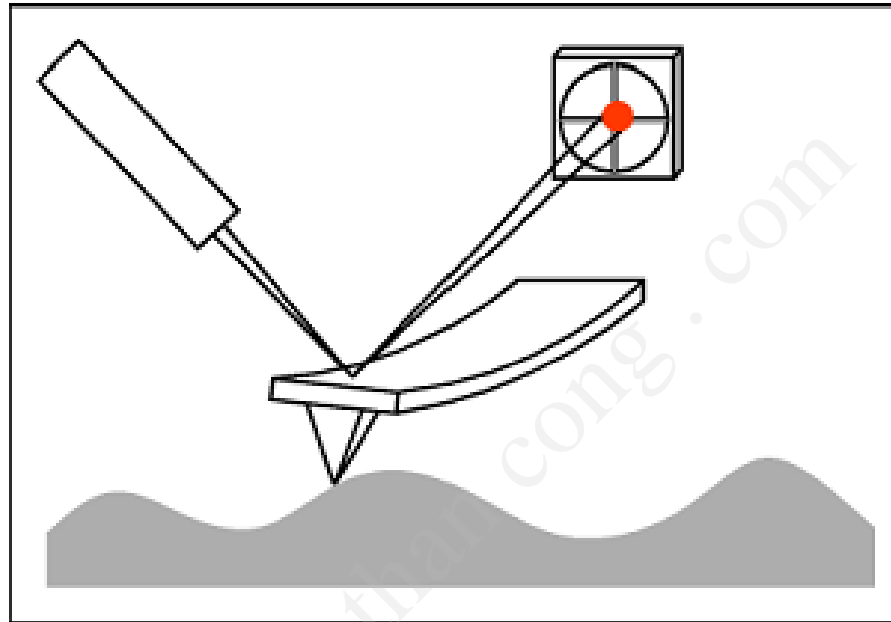
AFM là một thiết bị quan sát cấu trúc vi mô bề mặt của vật rắn dựa trên nguyên tắc **lực tương tác nguyên tử** giữa một đầu mũi dò nhọn với bề mặt của mẫu làm cong cần rung.



Cấu tạo:

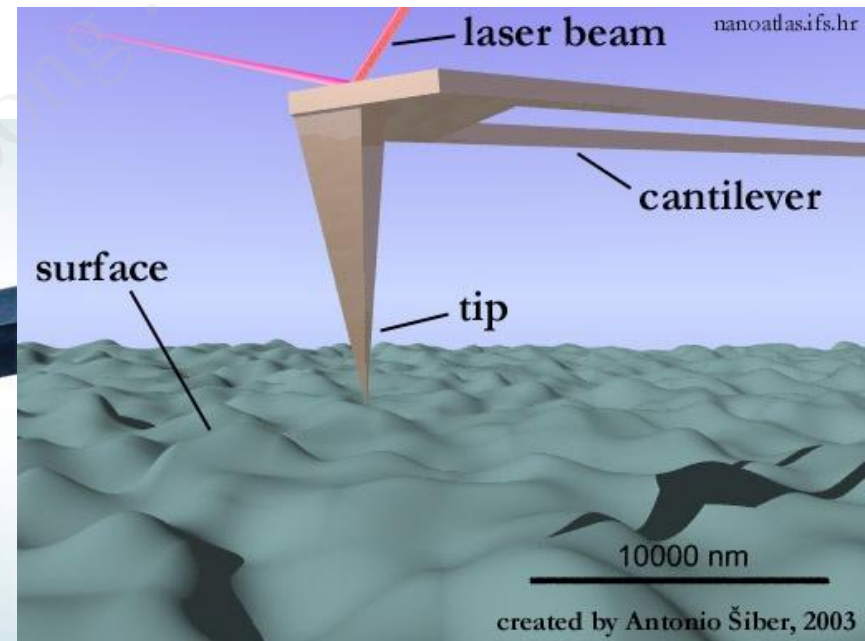
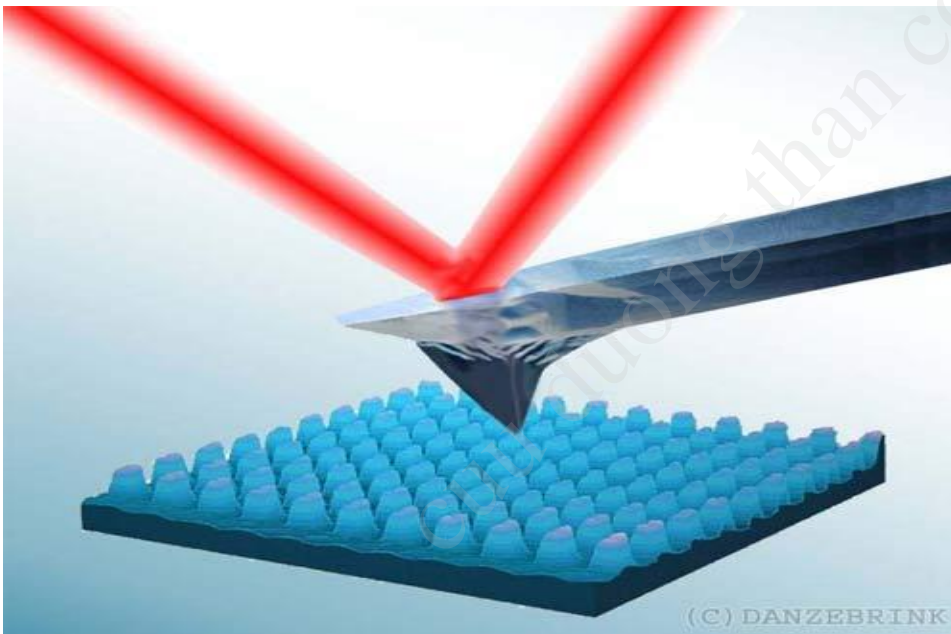
- Một mũi dò nhọn + Cần quét (cantilever).
- Nguồn Laser.
- Bộ quét áp điện.
- Giá đặt mẫu.
- Gương phản xạ (miroir).
- Photodetector.
- Bộ phận thu nhận tín hiệu.



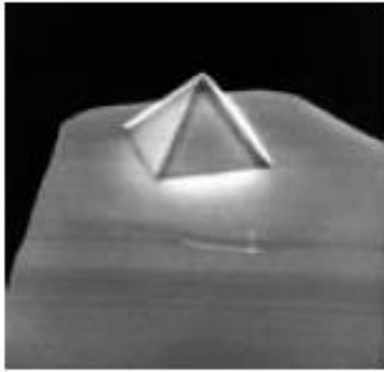


Đầu dò

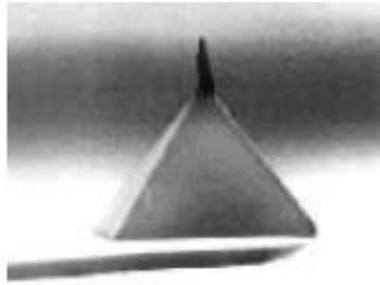
Đầu dò thường được làm bằng silic nitrit (Si_3N_4), kích thước khoảng một nguyên tử.



Đầu dò



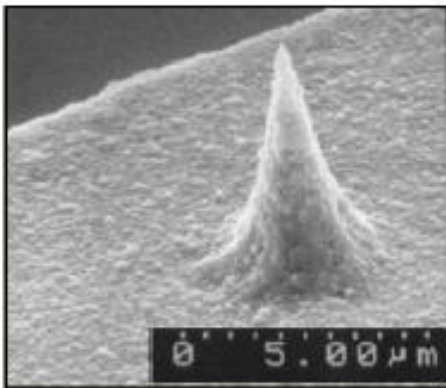
Normal Tip



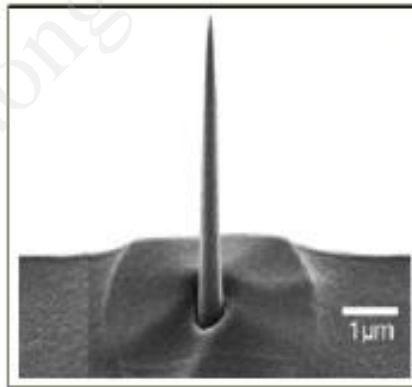
Supertip



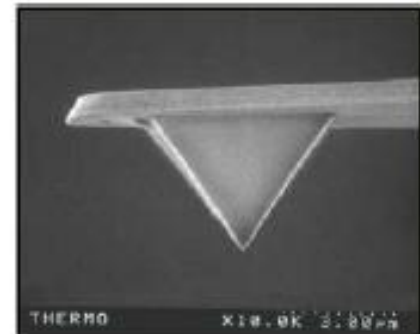
Ultralever



Diamond-coated tip

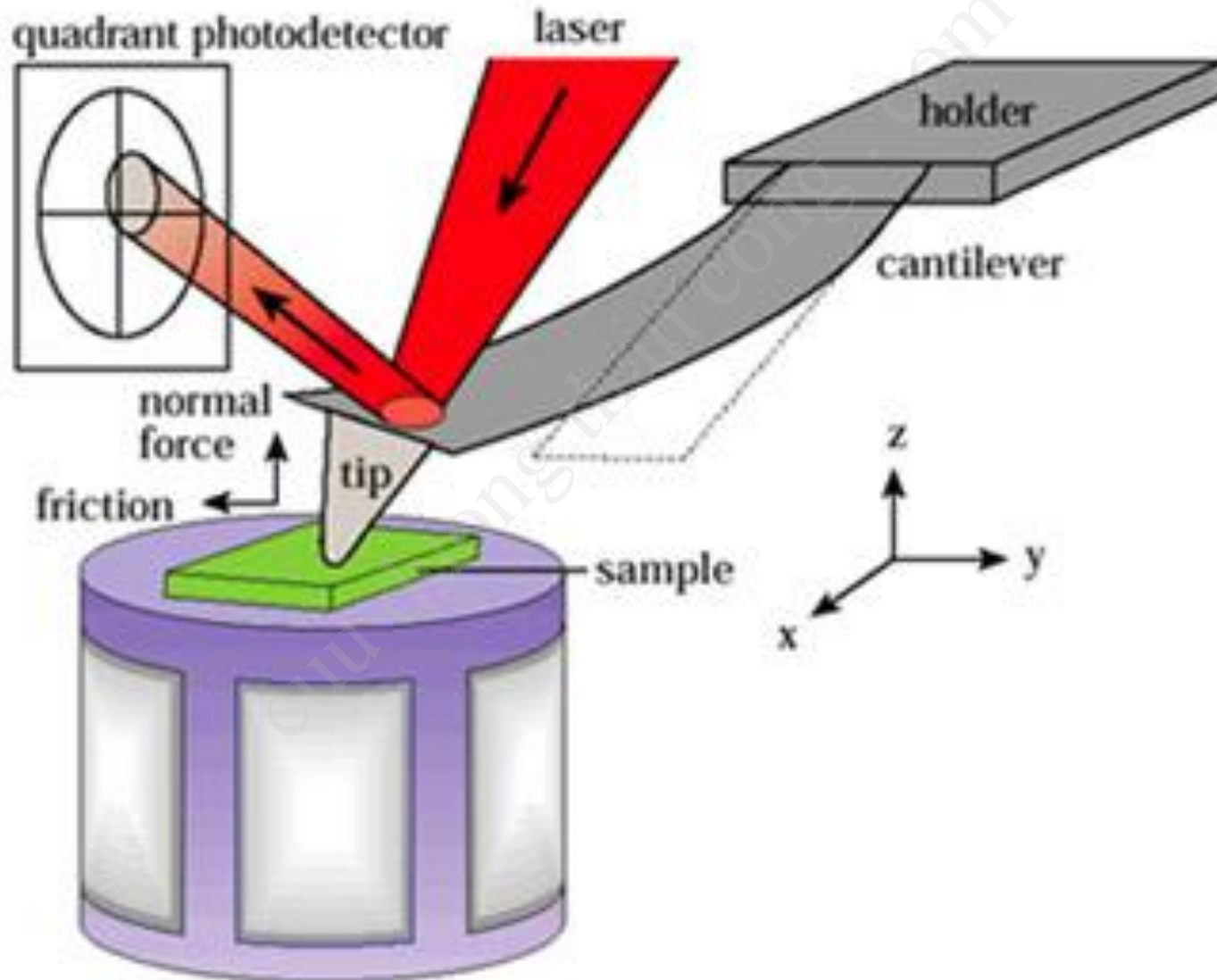


FIB-sharpened tip



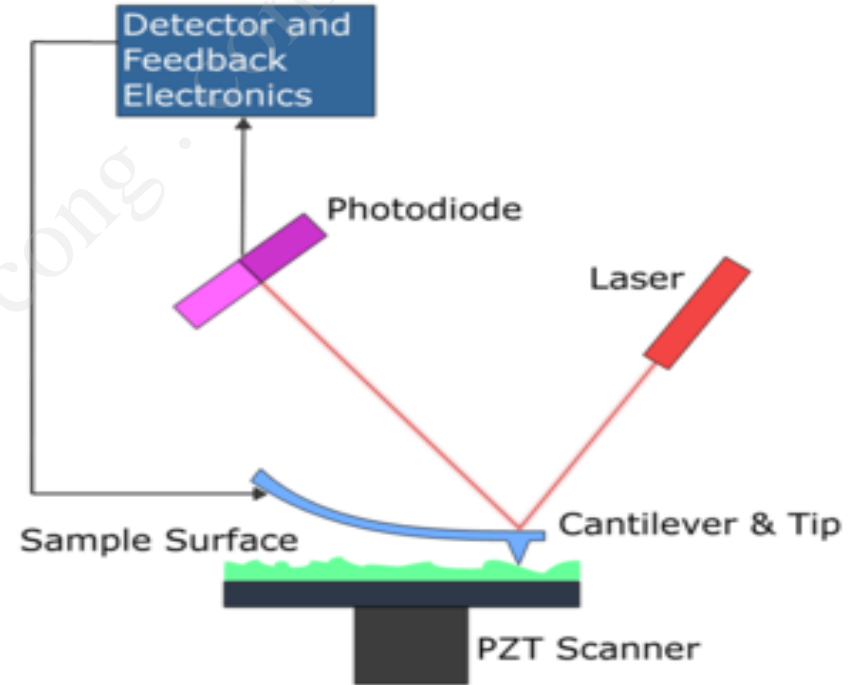
Gold-coated Si₃N₄ tip

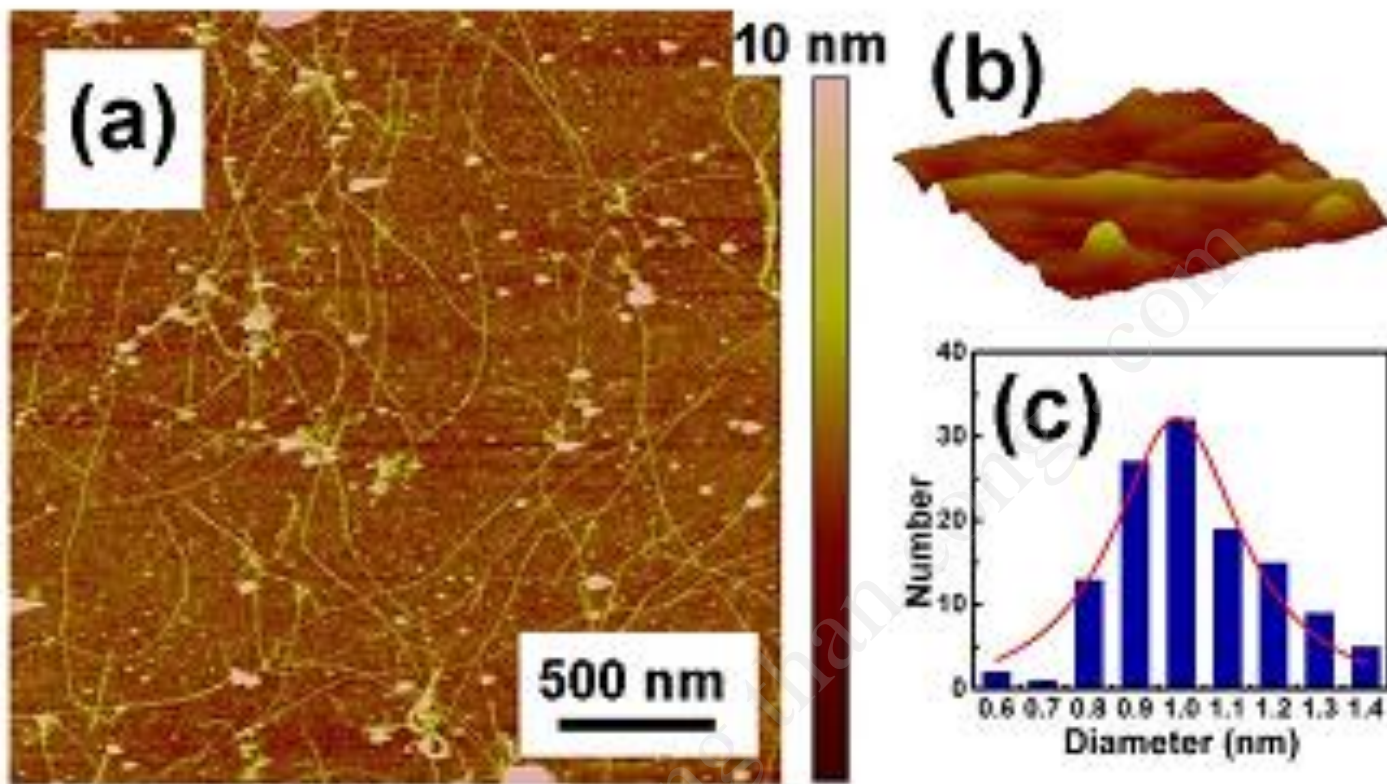
3. 6. Bộ quét áp điện:



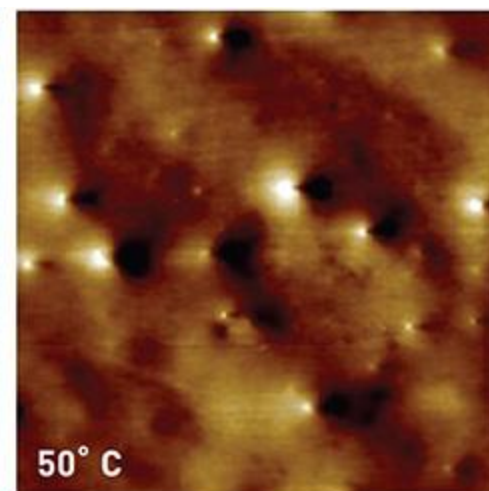
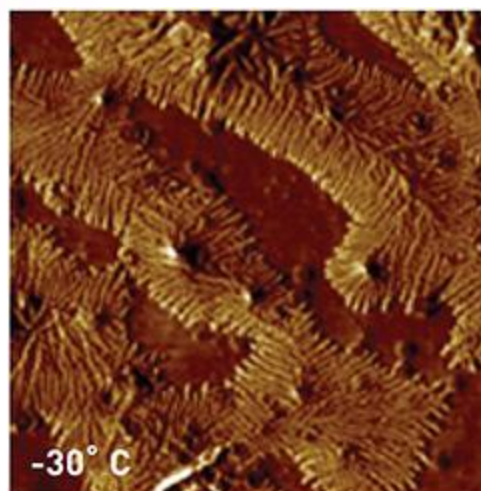
Nguyên lý hoạt động của AFM

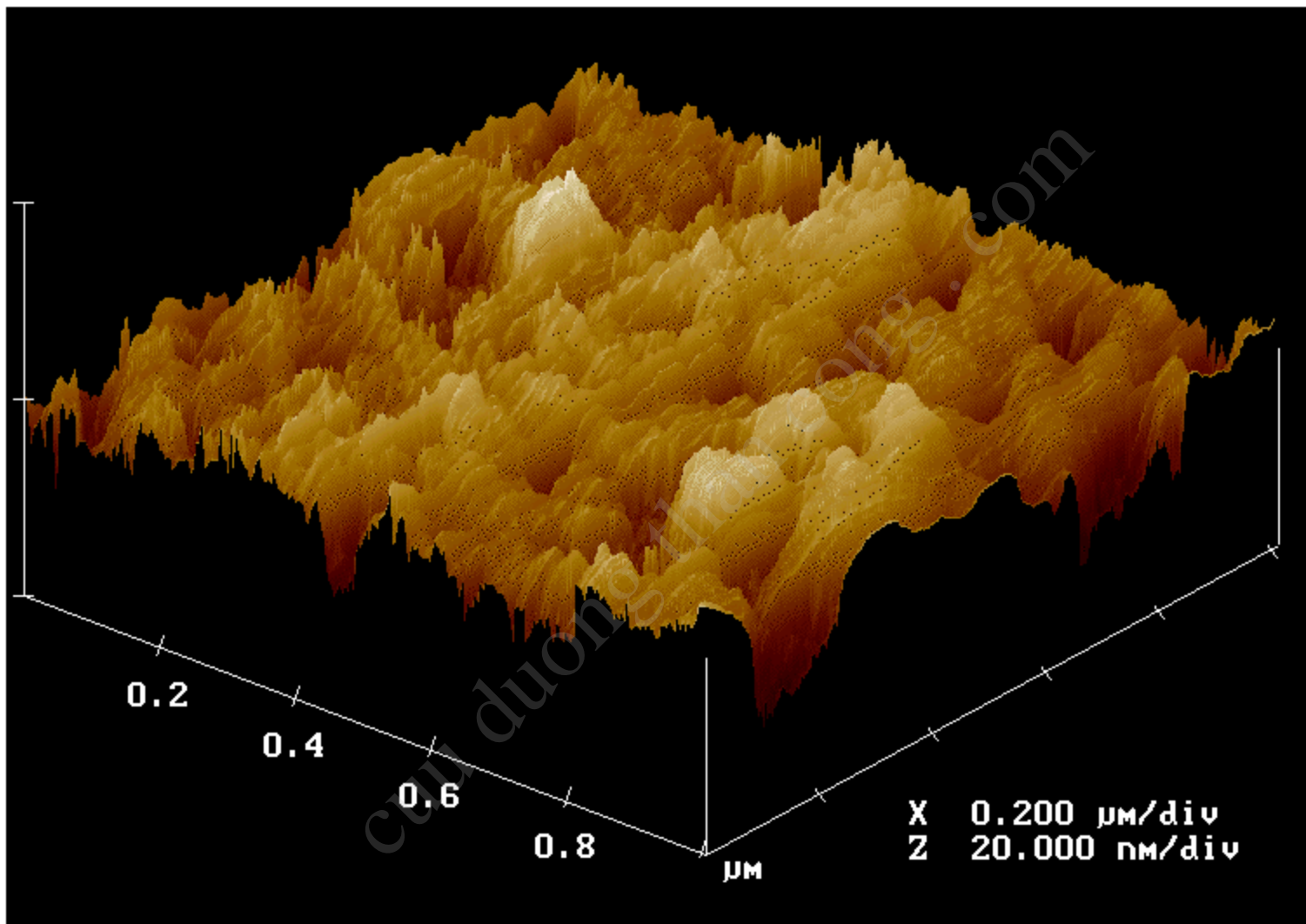
- Khi mũi dò quét gần bề mặt mẫu sẽ xuất hiện lực Van der Waals giữa các nguyên tử làm rung thanh rung. Lực này làm cho cần rung rung nhẹ theo độ nhấp nhô của bề mặt mẫu
- Dao động của thanh rung do lực tương tác được ghi lại nhờ một tia laser chiếu qua bề mặt của thanh rung.
- Dao động của thanh rung làm thay đổi góc lệch của tia laser và được detector ghi lại, từ đó mã hóa lại độ nhấp nhô của bề mặt.





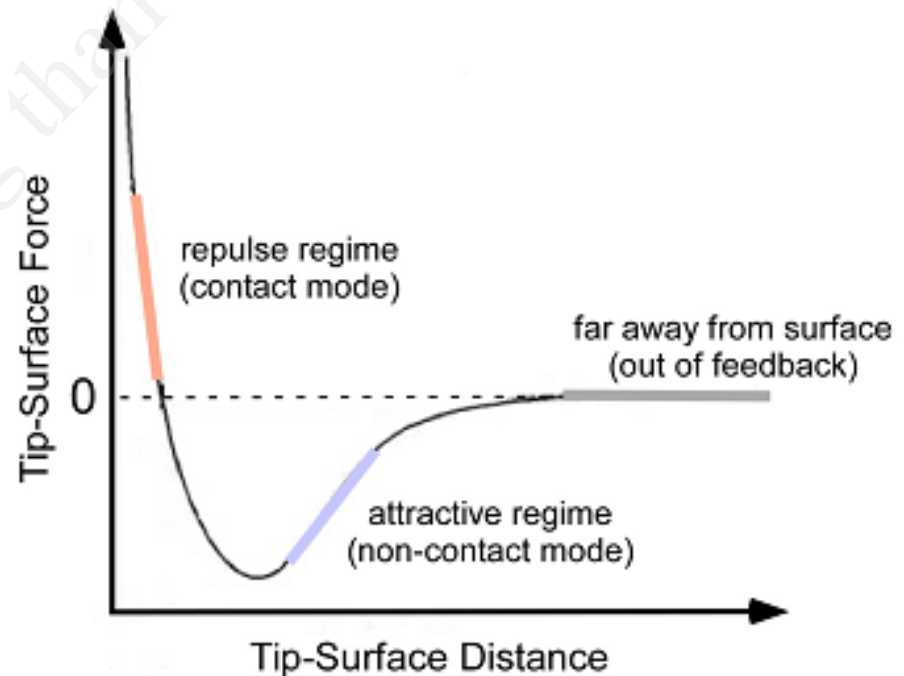
Carbon Nanotubes



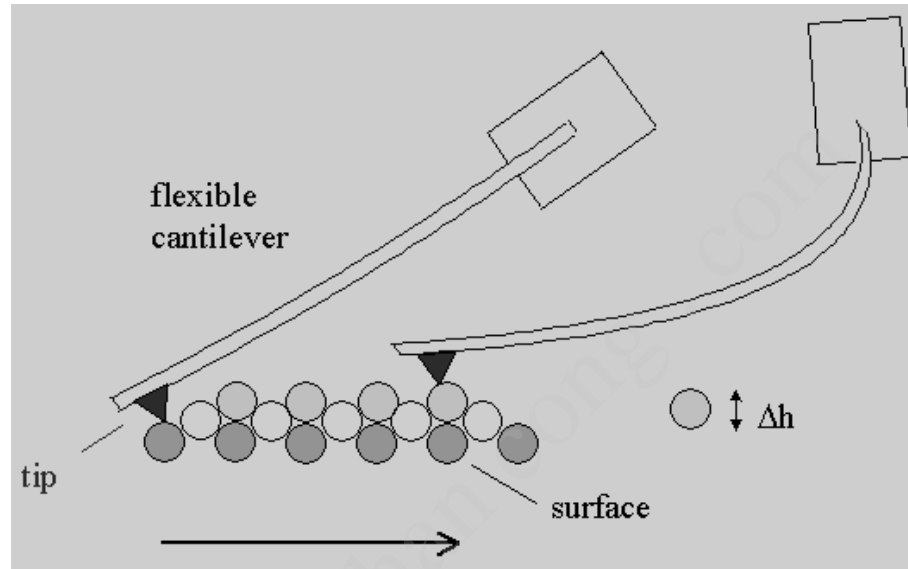


Máy AFM có thể thao tác trong 3 chế độ khác nhau của đầu dò

- Chế độ tiếp xúc (Contact Mode)
- Chế độ không tiếp xúc (Non- Contact Mode)
- Chế độ tapping.

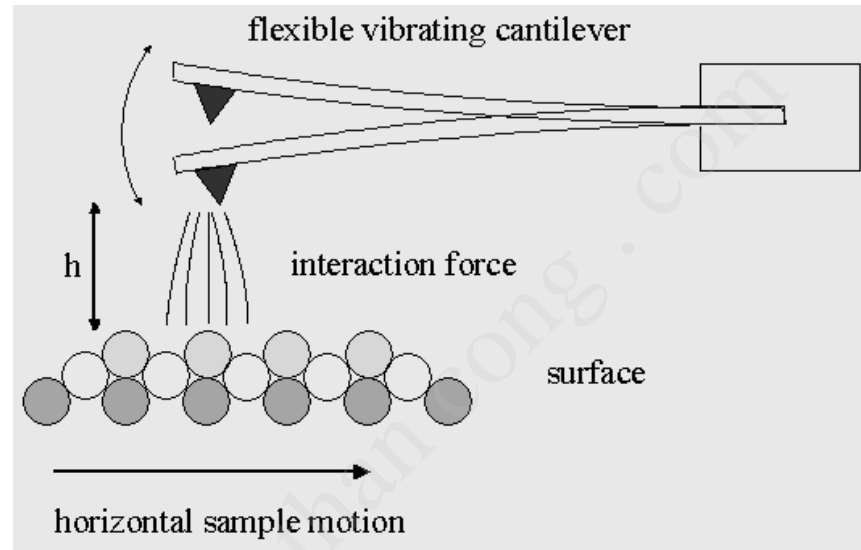


CHẾ ĐỘ TIẾP XÚC (CONTACT MODE)



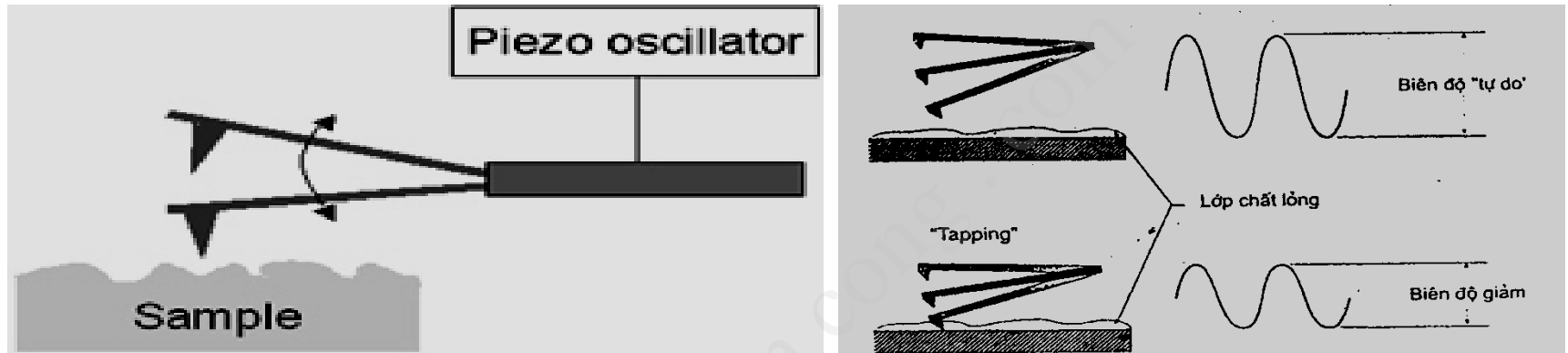
- Tip được tiếp xúc và kéo lê trên bề mặt mẫu và cho ảnh địa hình
- Khi khoảng cách giữa tip và bề mặt mẫu nhỏ (vài Å) Lực tương tác là lực đẩy khoảng 10^{-9}N
- Nhược điểm của phương pháp: dễ phá huỷ bề mặt mẫu và tip, hình ảnh dễ bị méo (nhiều) do lớp vật chất hấp phụ trên bề mặt mẫu làm nhiều lực đẩy. Chỉ có thể khắc phục nếu AFM hoạt động trong môi trường chân không cao.

CHẾ ĐỘ KHÔNG TIẾP XÚC (NON-CONTACT MODE)



- Trong chế độ này đầu dò luôn được giữ ở một khoảng cách rất nhỏ ngay sát bề mặt mẫu (10-15 nm), sự thay đổi độ lệch của cần rung là do thay đổi lực hút sẽ được ghi nhận và tạo ảnh 3 chiều trên bề mặt mẫu.
- Khuyết điểm: lực hút quá yếu và đầu dò phải đặt sát bề mặt mẫu dễ bị kéo xuống bề mặt mẫu do lực căng bề mặt của những lớp khí hấp phụ trên mặt mẫu. Hình ảnh có độ phân giải kém và dễ bị sai lệch.

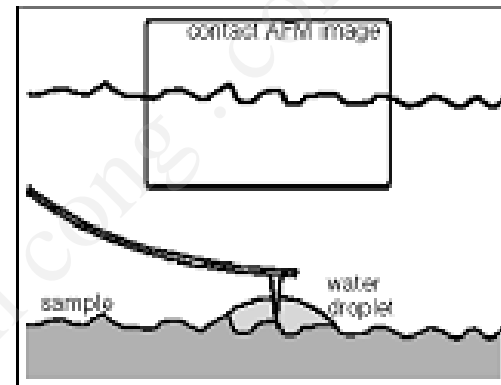
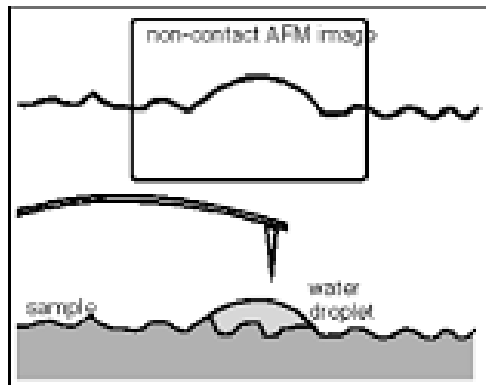
CHẾ ĐỘ TAPPING (TAPPING MODE)



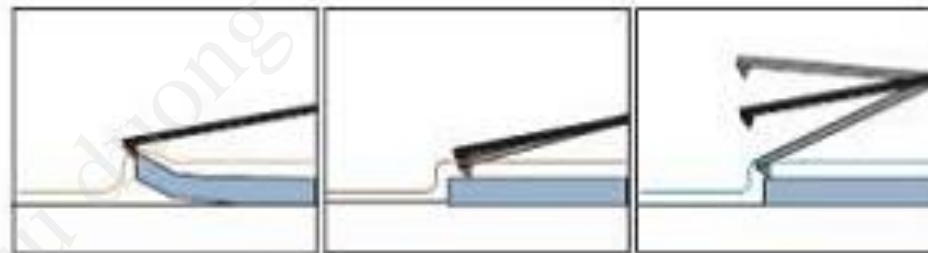
- Trong chế độ này đầu dò gõ lên bề mặt mẫu với năng lượng đủ lớn được tiến hành bằng cách cho tip tiếp xúc bề mặt mẫu sau đó tip được nâng lên để tránh cào xước bề mặt mẫu.
- Đầu dò hoặc mẫu sẽ được dịch chuyển.
- Chế độ này tránh được kéo lê đầu dò trên bề mặt mẫu, tránh làm hỏng mẫu cũng như tránh được lực bám dính giữa mẫu và đầu dò, tránh được nhiễu hình ảnh do những lớp chất lỏng bám trên bề mặt mẫu.

So sánh 3 chế độ quét

Non-Contact vs. Contact Through Water



Non-Contact



Contact,

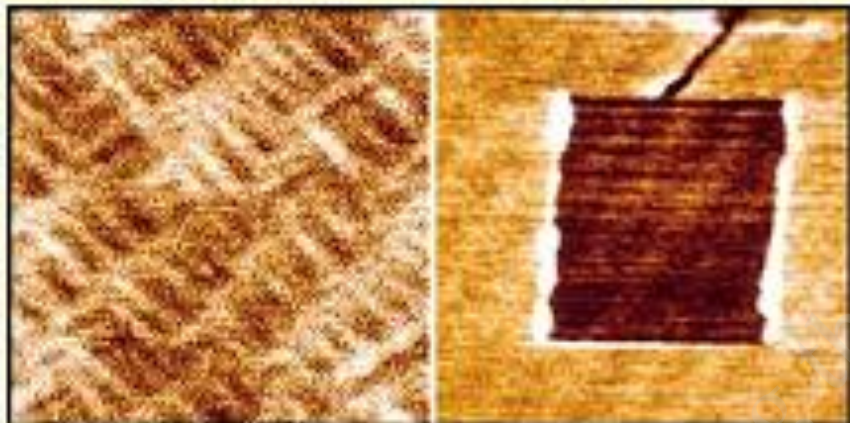
Non-Contact,

Tapping

Contact vs. Tapping – Si (100)

1st scan

2nd scan



1 μm

2 μm

Contact

1st scan

2nd scan



1 μm

2 μm

Tapping

Ưu điểm của AFM

- Đo được cả vật dẫn điện và vật không dẫn điện.
- AFM không đòi hỏi môi trường chân không cao, có thể hoạt động ngay trong môi trường bình thường.
- AFM cũng có thể tiến hành các thao tác di chuyển và xây dựng ở cấp độ từng nguyên tử, một tính năng mạnh cho công nghệ nano.
- Mẫu chuẩn bị đơn giản, cho thông tin đầy đủ hơn so với hình ảnh của hiển vi điện tử truyền qua.
- AFM cung cấp những phép đo độ cao trực tiếp về địa hình của mẫu và những hình ảnh khá rõ ràng về những đặc trưng bề mặt mẫu (không cần lớp bao phủ mẫu).

Nhược điểm của AFM

- AFM quét ảnh trên một diện tích hẹp (tối đa đến 150 micromet).
- Tốc độ ghi ảnh chậm do hoạt động ở chế độ quét.
- Chất lượng ảnh bị ảnh hưởng bởi quá trình trễ của bộ áp điện.
- Đầu dò rung trên bề mặt nên kém an toàn, đồng thời đòi hỏi mẫu có bề mặt sạch và sự chống rung.

So sánh với các phương pháp khác

Kính hiển vi quét đường ngầm (STM)

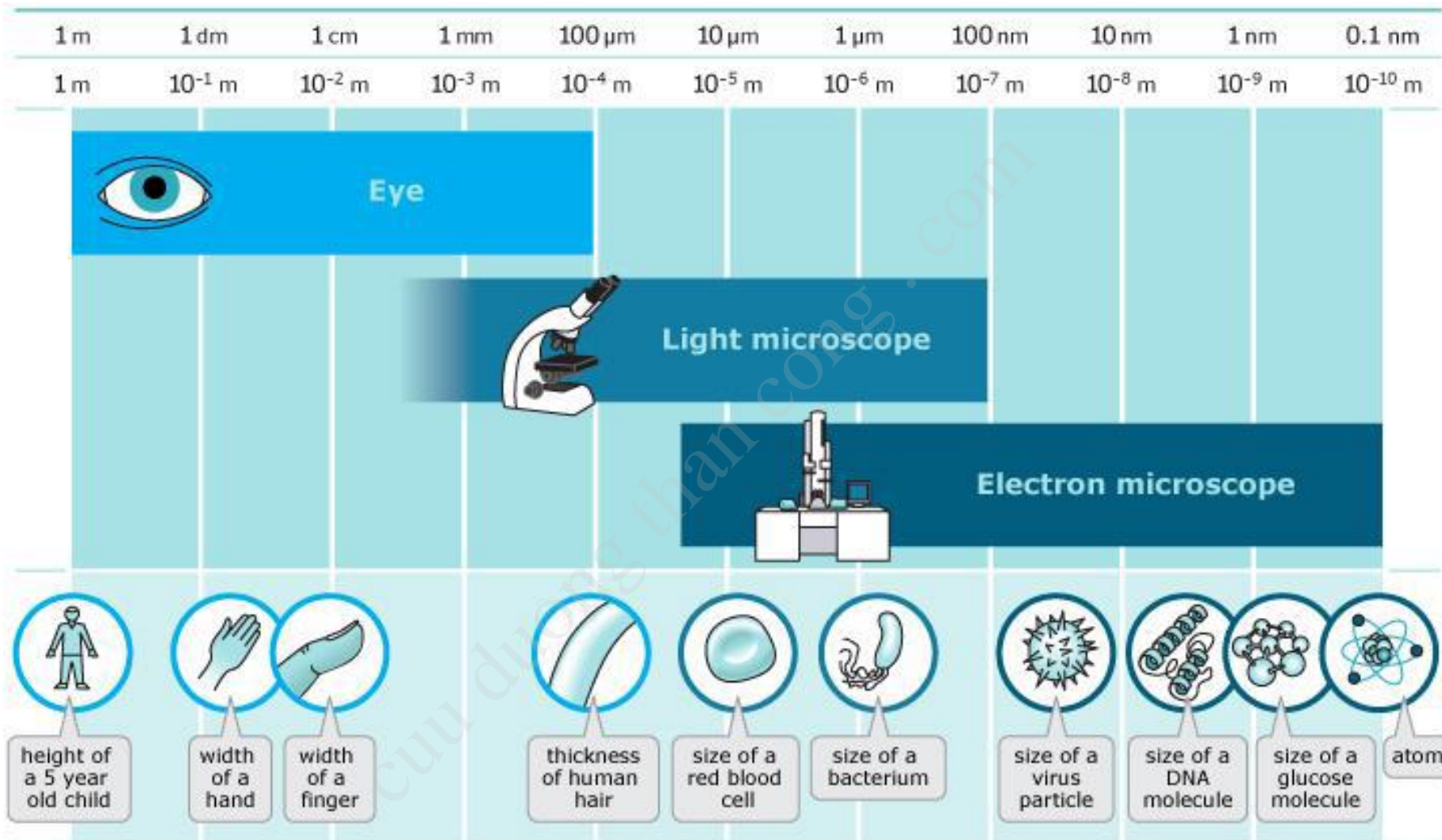
Trong một số trường hợp, độ phân giải của STM là tốt hơn AFM, do sự phụ thuộc hàm mũ của dòng tunnel vào khoảng cách. Sự phụ thuộc của lực vào khoảng cách trong AFM là phức tạp hơn nhiều khi kể đến hình dạng đầu dò và lực tiếp xúc. STM nói chung là chỉ áp dụng được với đối với các mẫu dẫn điện, trong khi đó AFM áp dụng được cho cả các vật dẫn và vật cách điện. Hơn nữa, AFM có được ưu điểm là điện thế và khoảng cách giữa đầu dò với mặt nền có thể được điều khiển một cách độc lập, trái lại, ở STM, hai tham số này lại phụ thuộc vào nhau.

Kính hiển vi quét điện tử (SEM)

So với kính hiển vi quét điện tử (SEM - Scanning Electron Microscope), AFM cung cấp những phép đo độ cao trực tiếp về địa hình của mẫu và những hình ảnh khá rõ ràng về những đặc trưng bề mặt mẫu (không cần lớp bao phủ mẫu).

Kính hiển vi điện tử truyền qua (TEM)

So với kính hiển vi điện tử truyền qua (TEM - Transmission Electron Microscope), các hình ảnh AFM ba chiều có thể thu được mà không cần chuẩn bị mẫu quá phức tạp, nó cho thông tin đầy đủ hơn nhiều so với các hình ảnh mặt cắt hai chiều của TEM.



© Copyright. 2012. University of Waikato. All Rights Reserved.

KÍNH HIỂN VI QUANG HỌC

Ưu điểm:

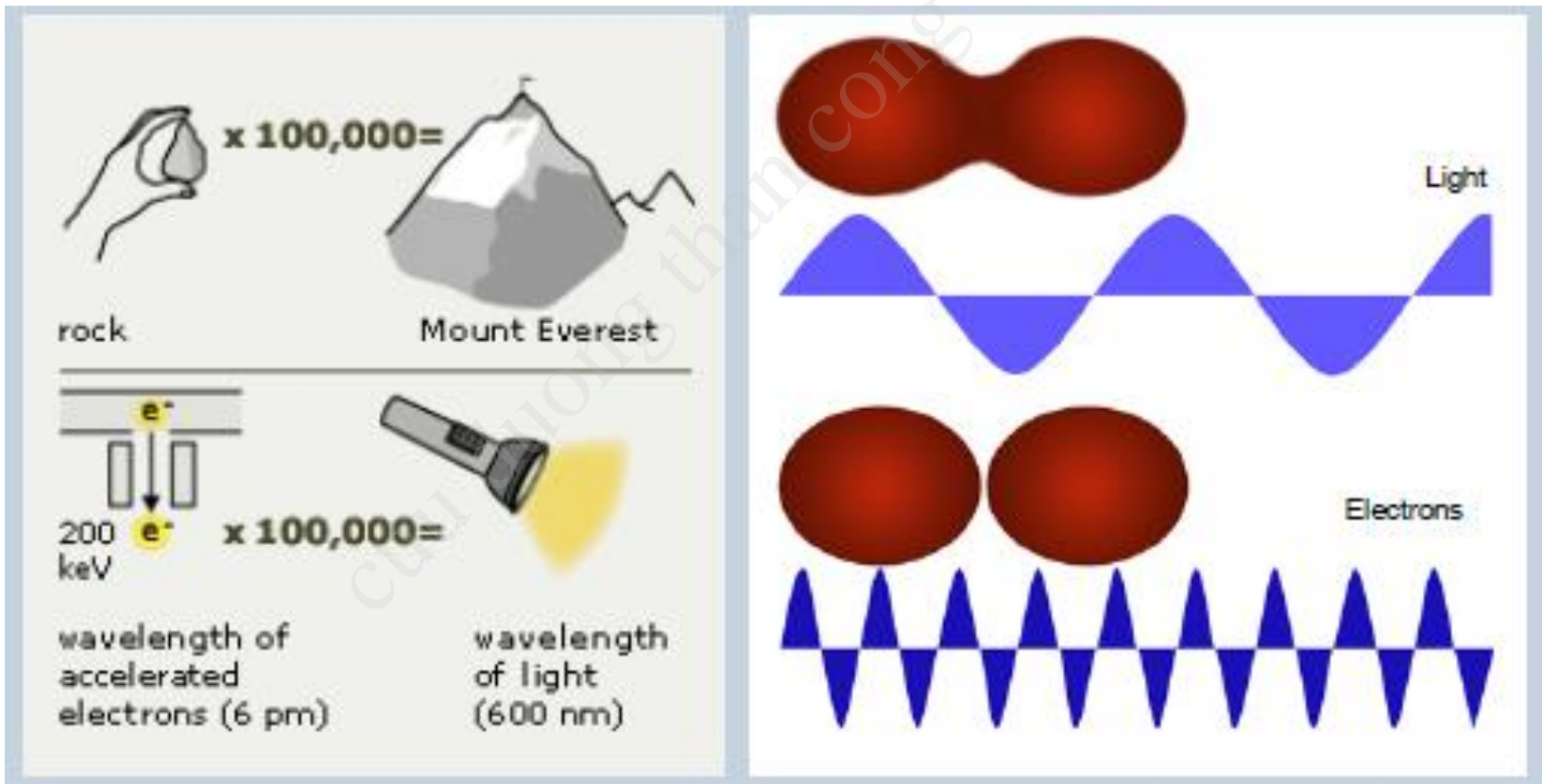
- Thu được ảnh trực tiếp mà không cần bước xử lý mẫu.
- Nhanh và phù hợp với mọi loại mẫu từ khí, lỏng và rắn.
- Dễ dàng tích hợp với camera để lưu giữ hình ảnh và phân tích.

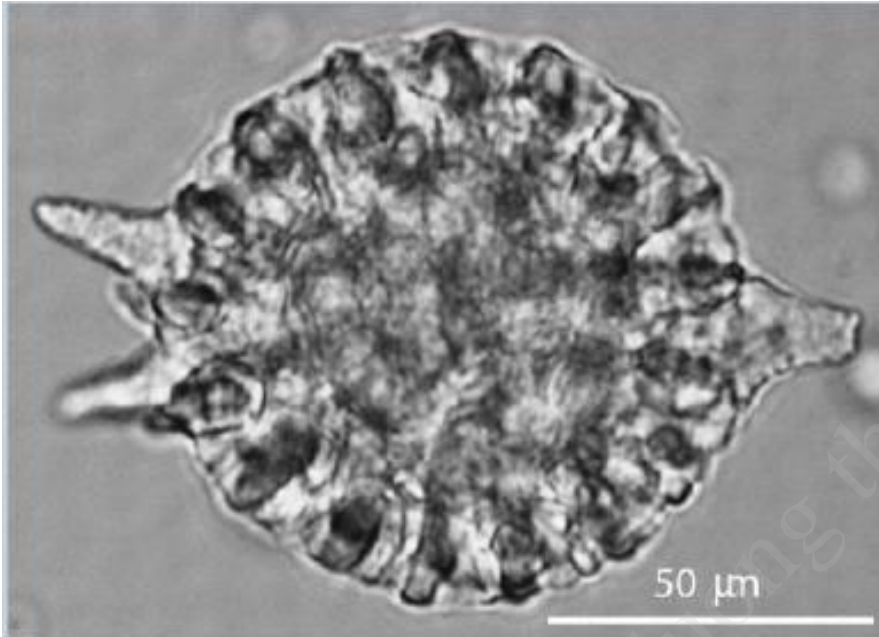
Nhược điểm:

- Độ phân giải thấp (vài trăm nm) là do giới hạn của nhiễu xạ ánh sáng.

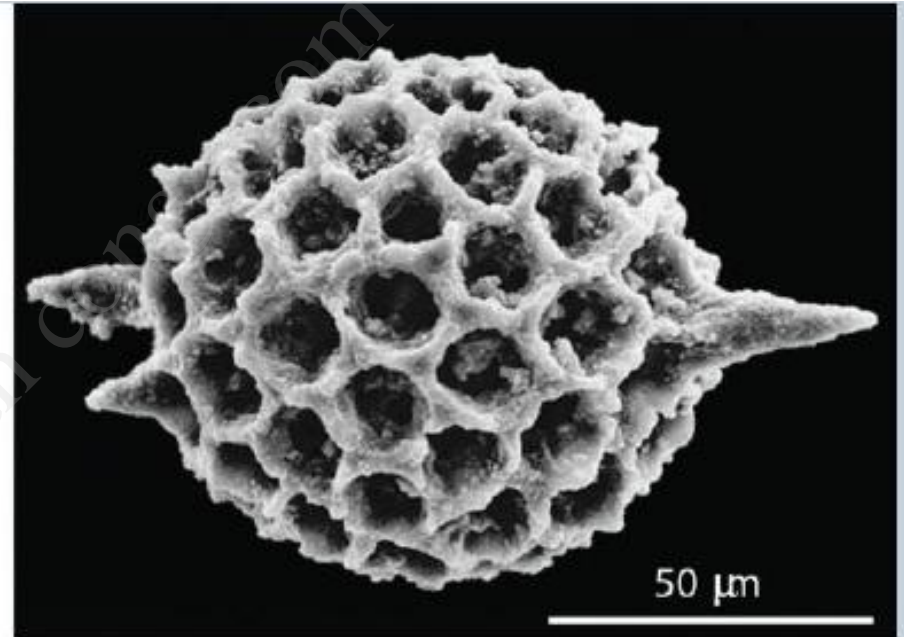
KÍNH HIỂN VI ĐIỆN TỬ

Có độ phân giải tốt hơn ($\sim \text{nm}$) vì bước sóng của electron nhỏ hơn so với ánh sáng



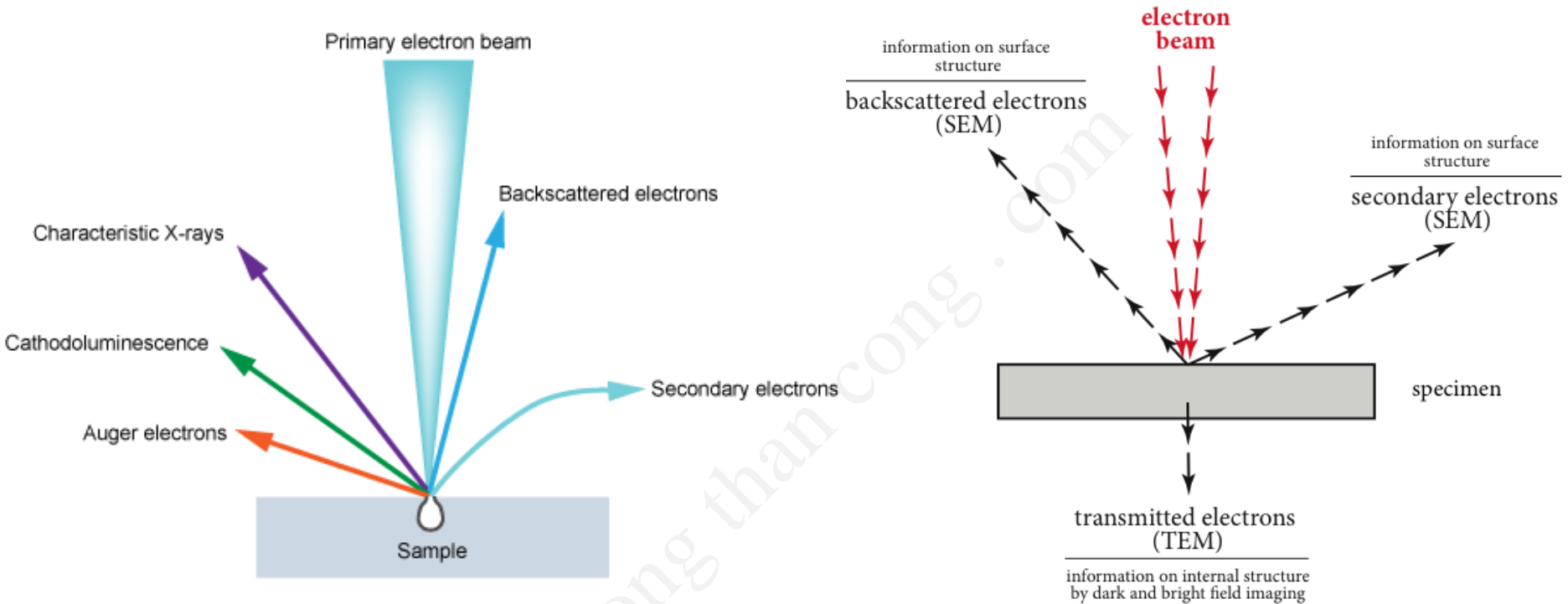


(a) Radiolarian under light microscope



(b) Radiolarian under electron microscope

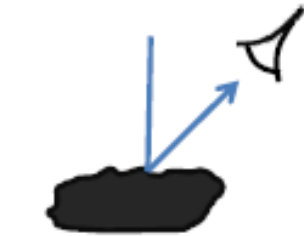
TƯƠNG TÁC GIỮA ELECTRON VÀ VẬT CHẤT



- Electron tán xạ ngược → hình thái học bề mặt và thành phần
- Electron thứ cấp → hình thái học bề mặt
- Electron truyền qua → cấu trúc và thành phần
- X-Rays → thành phần

2 different approaches:

Backscattered and
secondary electrons



SEM

Transmitted electrons

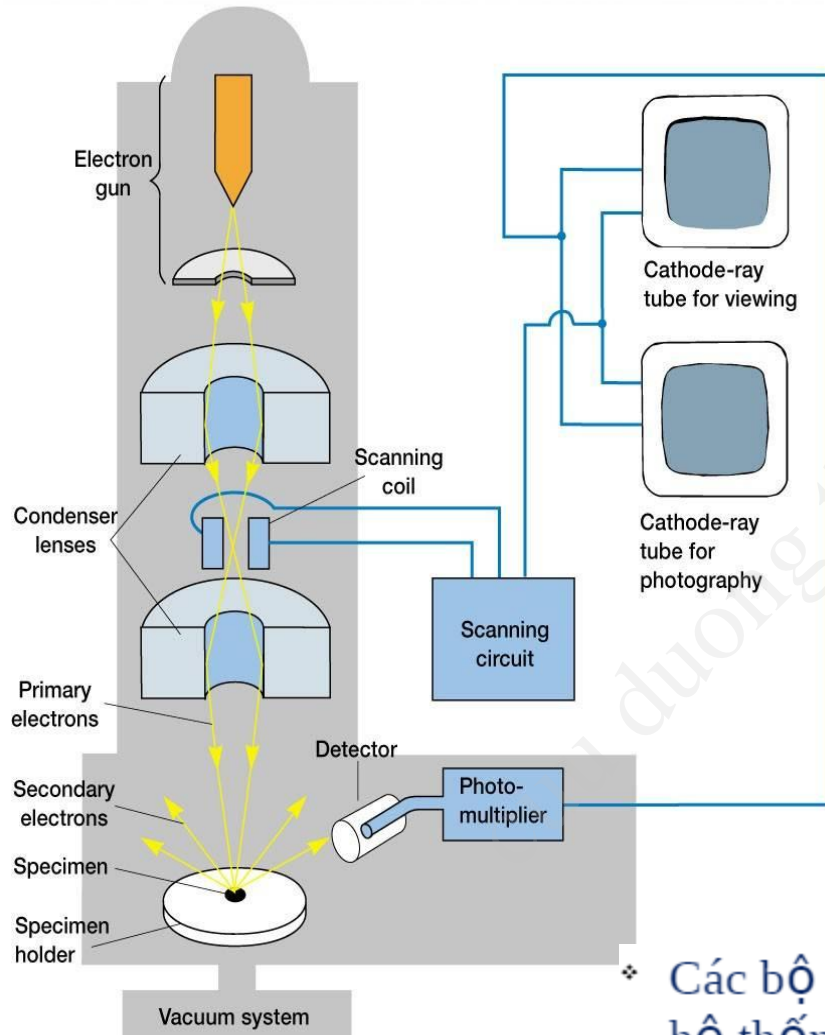


TEM

SEM: *Scanning Electron Microscope*

- Kính hiển vi điện tử SEM đầu tiên được phát triển bởi Zworykin vào năm 1942.
- Đến năm 1948 C. W. Oatley phát triển kính hiển vi điện tử quét trên mô hình này với chùm điện tử hẹp có độ phân giải đến 500 \AA .
- Kính hiển vi điện tử quét thương phẩm đầu tiên được sản xuất vào năm 1965 bởi Cambridge Scientific Instrument Mark I.

Cấu tạo của SEM



Kính hiển vi điện tử gồm có các bộ phận sau:

❖ *Súng điện tử.*

❖ *Hệ thấu kính từ.*

(Hệ thống các cuộn quét, được đặt giữa thấu kính thứ hai và thứ ba).

❖ *Buồng chân không và bộ phận giữ mẫu.*

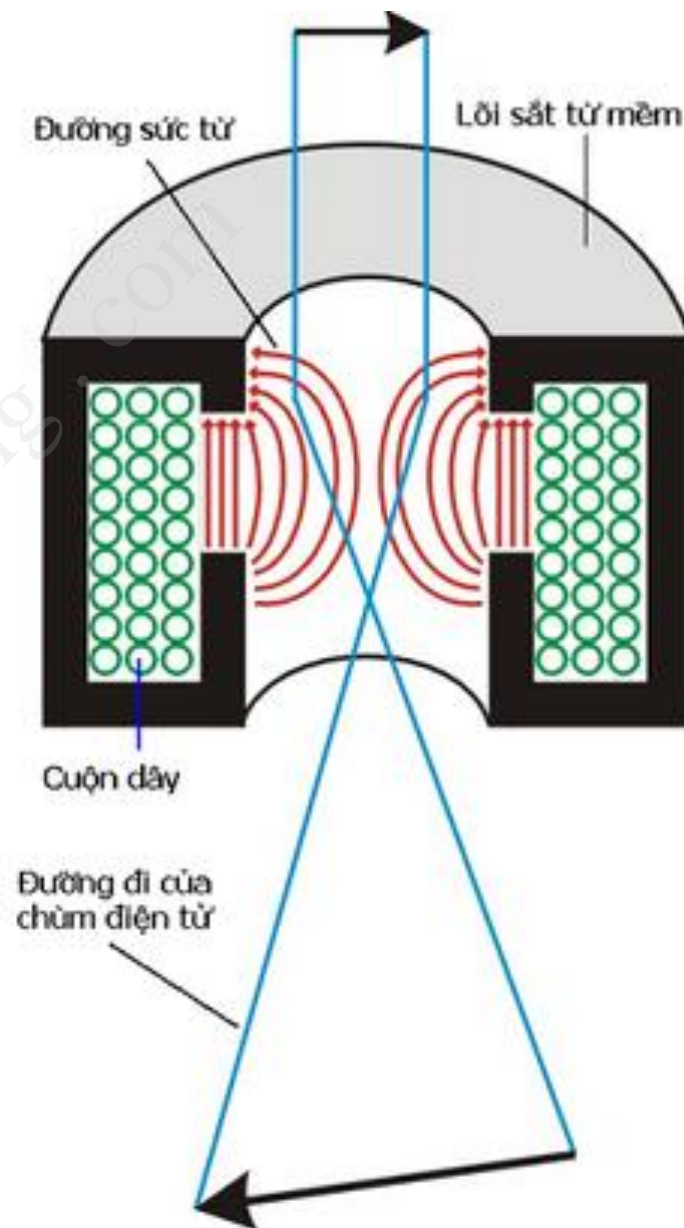
❖ *Hệ thống thu nhận ảnh.*

(Ống nhân quang điện, dùng để ghi nhận chùm điện tử thứ cấp).

❖ Các bộ phận khác: nguồn cấp điện, hệ chân không, hệ thống làm lạnh, bơm chống rung, hệ thống chống nhiễm từ trường và điện trường

Các hệ thấu kính và lăng kính

Thấu kính từ thực chất là một nam châm điện có cấu trúc là một cuộn dây cuốn trên lõi làm bằng vật liệu từ mềm. Từ trường sinh ra ở khe từ sẽ được tính toán để có sự phân bố sao cho chùm tia điện tử truyền qua sẽ có độ lệch thích hợp với từng loại thấu kính. Tiêu cự của thấu kính được điều chỉnh thông qua từ trường ở khe từ, có nghĩa là điều khiển cường độ dòng điện chạy qua cuộn dây. Vì có dòng điện chạy qua, cuộn dây sẽ bị nóng lên do đó cần được làm lạnh bằng nước hoặc nitơ lỏng.



- Điện tử được phát ra từ súng phóng điện tử (có thể là phát xạ nhiệt, hay phát xạ trường...), sau đó được tăng tốc.
- Thế tăng tốc của SEM thường chỉ từ 10 kV đến 50 kV vì sự hạn chế của thấu kính từ, việc hội tụ các chùm điện tử có bước sóng quá nhỏ vào một điểm kích thước nhỏ sẽ rất khó khăn.
- Điện tử được phát ra, tăng tốc và hội tụ thành một chùm điện tử hẹp (cỡ vài trăm Angstrom đến vài nanomet) nhờ hệ thống thấu kính từ, sau đó quét trên bề mặt mẫu nhờ các cuộn quét tĩnh điện.

❑ Độ phân giải của SEM được xác định từ kích thước chùm điện tử hội tụ, mà kích thước của chùm điện tử này bị hạn chế bởi quang sai, chính vì thế mà SEM không thể đạt được độ phân giải tốt như TEM.

❑ Độ phân giải của SEM còn phụ thuộc vào tương tác giữa vật liệu tại bề mặt mẫu vật và điện tử. Khi điện tử tương tác với bề mặt mẫu vật, sẽ có các bức xạ phát ra, sự tạo ảnh trong SEM và các phép phân tích được thực hiện thông qua việc phân tích các bức xạ này.

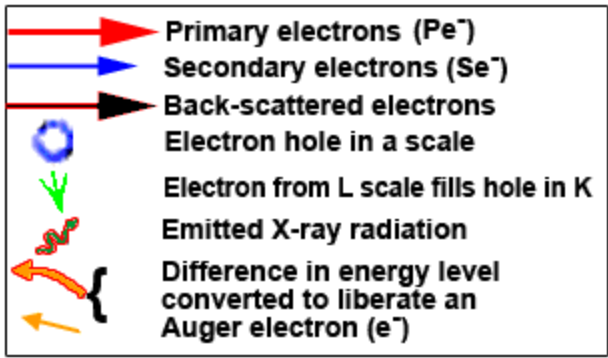
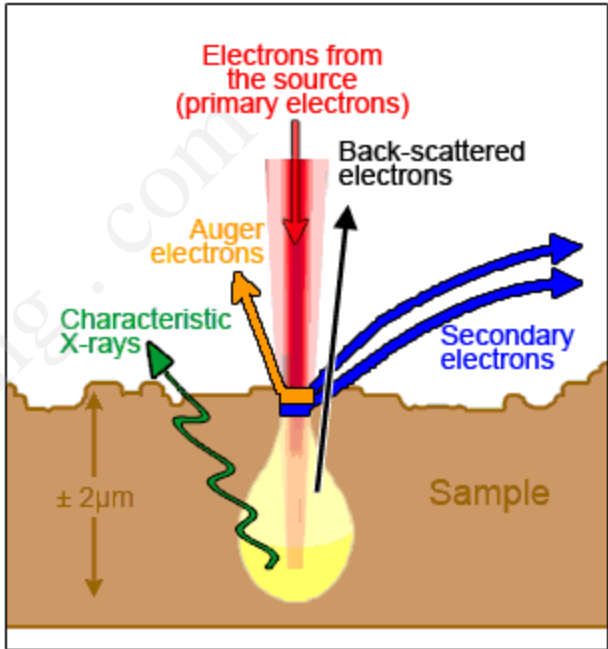
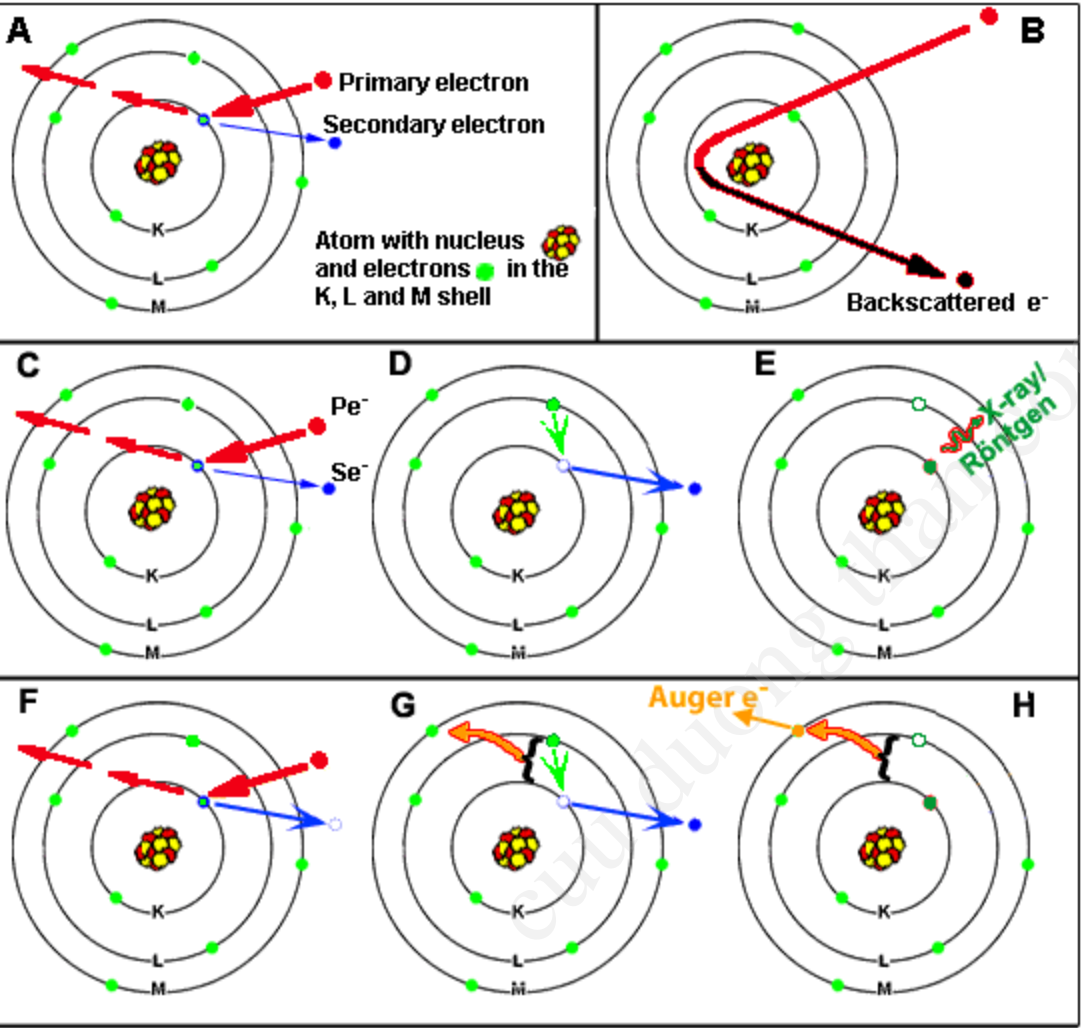
Các bức xạ chủ yếu gồm:

Điện tử thứ cấp (Secondary electrons):

- chế độ ghi ảnh thông dụng nhất của kính hiển vi điện tử quét,
- chùm điện tử thứ cấp có năng lượng thấp ($< 50 \text{ eV}$) được ghi nhận bằng ống nhân quang nhấp nháy.
- chúng tạo ra ảnh hai chiều của bề mặt mẫu (do các điện tử phát ra từ bề mặt mẫu với độ sâu chỉ vài nanomet).

Điện tử tán xạ ngược (Backscattered electrons):

- chùm điện tử ban đầu khi tương tác với bề mặt mẫu bị bật ngược trở lại
- chúng thường có năng lượng cao.
- Sự tán xạ này phụ thuộc rất nhiều vào thành phần hóa học ở bề mặt mẫu, do đó ảnh điện tử tán xạ ngược rất hữu ích cho phân tích về độ tương phản thành phần hóa học.
- ghi nhận ảnh nhiễu xạ điện tử tán xạ ngược, giúp cho việc phân tích cấu trúc tinh thể.

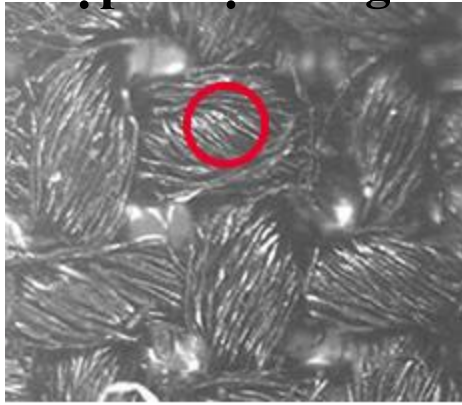


Các tính năng của SEM:

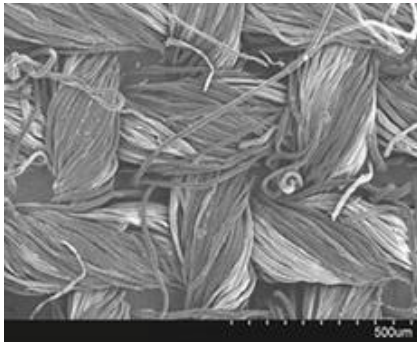
1. Quan sát bề mặt mẫu rắn ở các độ phóng đại khác nhau
2. Độ sâu trường quan sát lớn hơn rất nhiều so với kính hiển vi quang học, cho phép thu ảnh lập thể
3. Kết hợp với đầu thu phổ tán xạ năng lượng tia X (EDX) cho phép phân tích thành phần nguyên tố của vùng quan sát

so sánh hình ảnh của kính hiển vi quang học và SEM

Mẫu được chụp là sợi dùng để chế tạo dù chắn tia cực tím



kính hiển vi quang học cung cấp thông tin màu của mẫu, nhưng độ sâu trường quan sát ngắn, nên khi điều chỉnh để quan sát một vùng của mẫu (khoanh đỏ trong hình) thì các vùng có độ cao khác bị mờ. Độ phóng đại x110



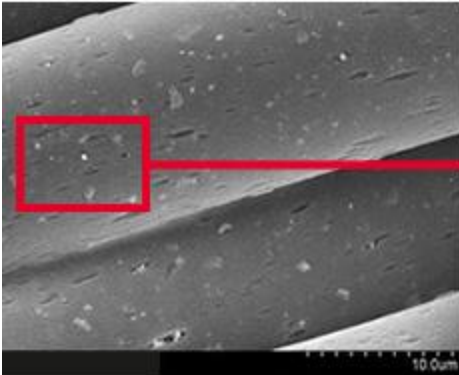
Dù SEM chỉ cho ảnh với 2 màu đen trắng (mất thông tin màu), nhưng độ sâu trường quan sát lớn hơn nhiều và cho hình ảnh nổi. Độ phóng đại x110

Ảnh do điện tử thứ cấp (x4000 lần). Vật liệu vô cơ (hạt trắng) được sử dụng để chặn tia cực tím có thể được nhìn thấy rải rác trong sợi.

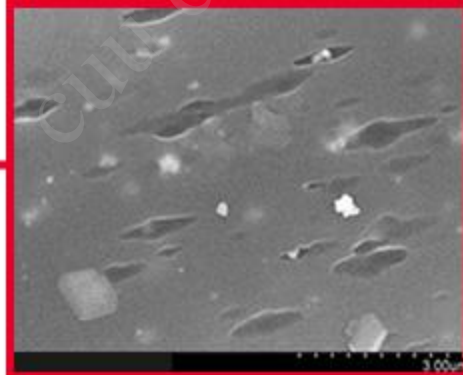
(x15.000 lần) có thể quan sát các hạt vô cơ có kích cỡ từ 100nm tới 500nm. Khi quan sát mặt cắt, có thể nhận ra cách thức các hạt vô cơ này phân bố trong sợi.

36

Khi tăng độ phóng đại



x 4.000 lần.

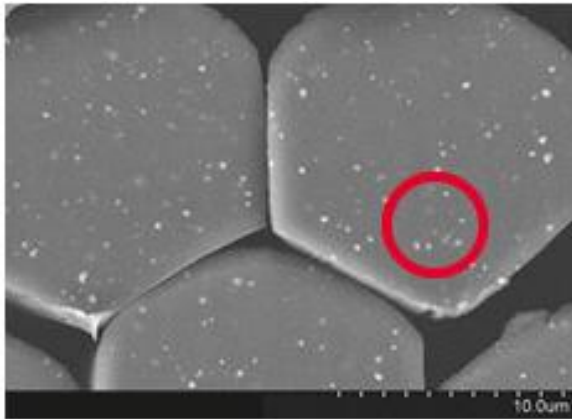


x 15.000 lần.

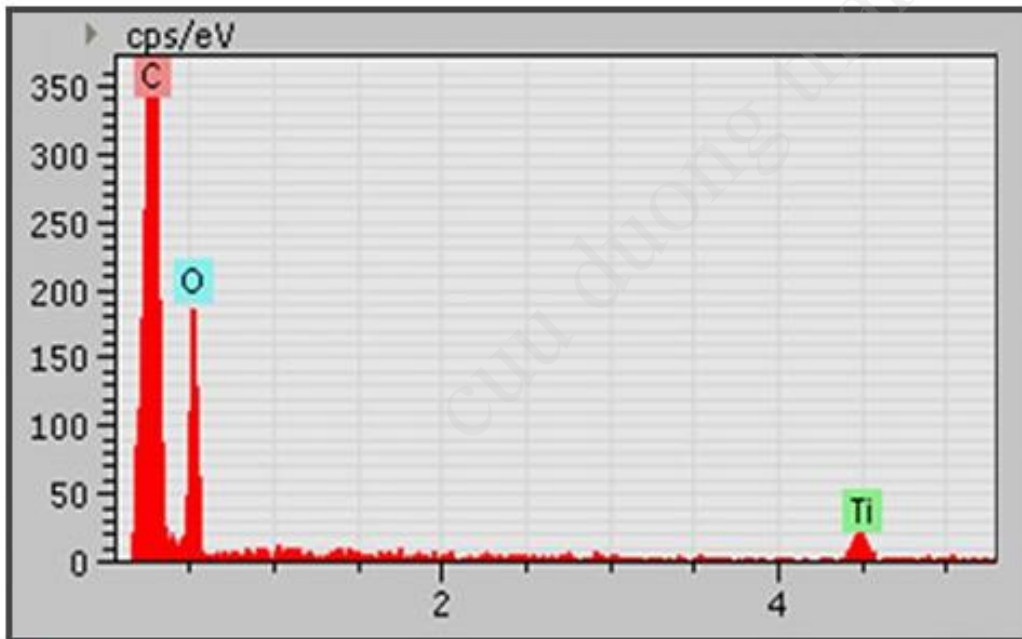
Ảnh điện tử tán xạ ngược BSE (x 5.000 lần)

Cấu trúc mặt cắt của sợi thu được với đầu dò điện tử tán xạ ngược → các hạt trắng được phân bố trong sợi như thế nào.

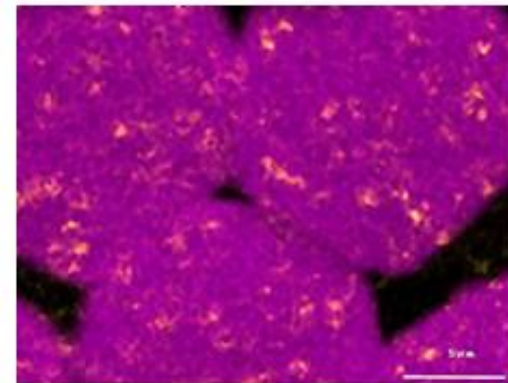
sự khác nhau về nguyên tử số trung bình của thành phần cấu tạo sẽ cho độ tương phản khác nhau



▼ Hãy thử phân tích thành phần



○ Phổ x-ray của ảnh bên trên

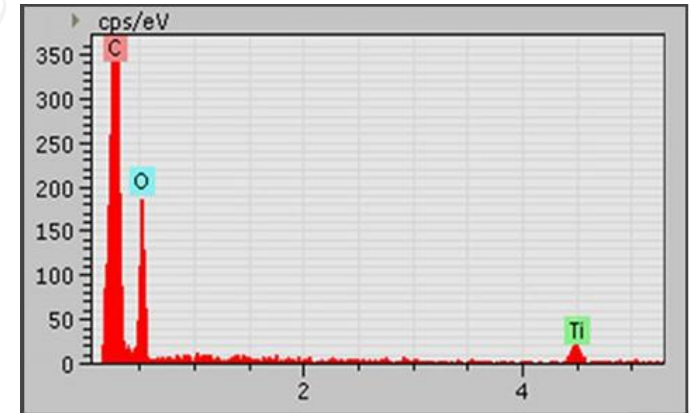


C Ti
Ảnh bản đồ tia X của Ti và C

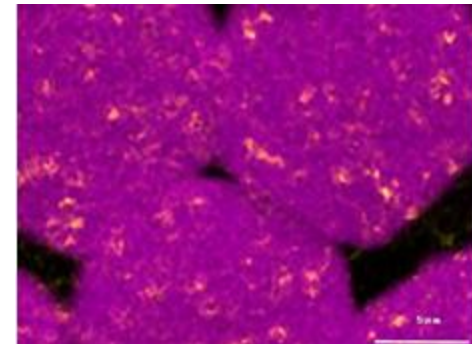
Energy-dispersive X-ray spectroscopy (EDS, EDX, EDXS or XEDS)

Khi chiếu chùm tia điện tử vào mẫu, các tia X đặc trưng cũng được sinh ra. Bằng cách lắp thêm đầu thu phổ tán xạ năng lượng tia X vào hệ thống kính hiển vi điện tử, chúng ta có thể thu được phổ của các tia X đặc trưng, và biết được các nguyên tố nào tồn tại và phân bố ở đâu trên mẫu.

Chúng ta thấy vật liệu chủ yếu của mẫu sợi này là thành phần hữu cơ (chủ yếu là C) và các hạt Ti (thực ra là TiO_2) có tác dụng ngăn tia cực tím phân bố rải rác trên sợi.



Phổ tia X đặc trưng thu được của vùng quan sát trên ảnh BSE bên trên cho thấy mẫu có chứa Ti.



Khi chiếu vào mẫu bằng chùm tia điện tử trong chân không: điện tử thứ cấp (SE), điện tử tán xạ ngược (BSE), tia X đặc trưng, và các tín hiệu khác được hình thành.

Trong kính hiển vi điện tử quét SEM các tín hiệu SE và BSE thường được sử dụng để tạo nên ảnh. Các điện tử thứ cấp SE được sinh ra ở lớp gần bề mặt mẫu, và ảnh SE thu được từ các điện tử này phản ánh chi tiết cấu trúc địa hình mẫu.

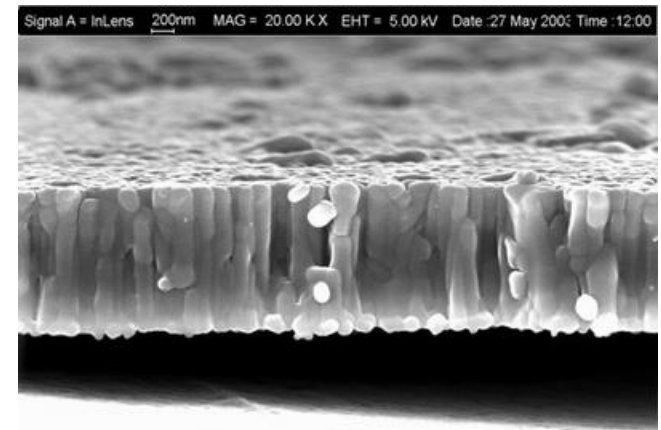
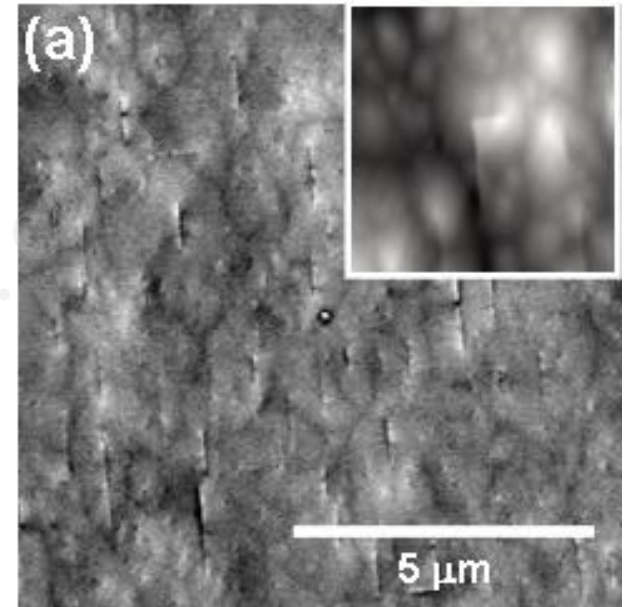
BSE là các điện tử phản xạ ngược trở lại sau khi va vào các nguyên tử trên bề mặt mẫu, số lượng điện tử tán xạ ngược phụ thuộc vào thành phần (nguyên tử số, hướng tinh thể v.v.) của mẫu → phản ánh sự phân bố thành phần cấu tạo của bề mặt mẫu.

Đầu dò tia X cũng có thể gắn trên SEM cho phép phân tích thành phần nguyên tố.

SEM không chỉ được sử dụng để quan sát cấu trúc mẫu mà còn được dùng để xác định và định lượng nguyên tố.

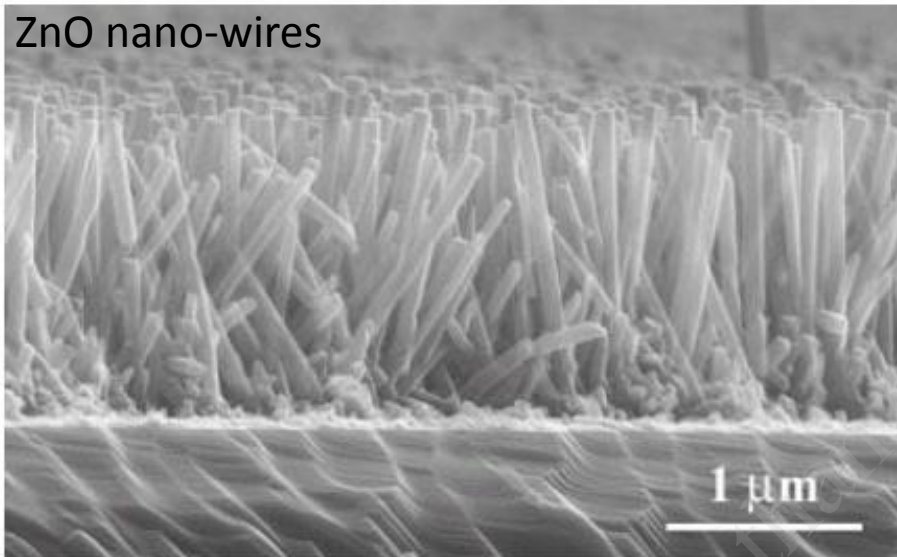
Nguyên tắc hoạt động của SEM

- Điện tử được phát ra từ súng phóng điện tử
- Sau đó được gia tốc và hội tụ thành một chùm điện tử hẹp (cỡ vài trăm Angstrom đến vài nanomet) nhờ hệ thống thấu kính từ, sau đó quét trên bề mặt mẫu nhờ các cuộn quét tĩnh điện.
- Các electron thoát ra từ bề mặt mẫu được thu nhận bởi ống nhân quang điện.

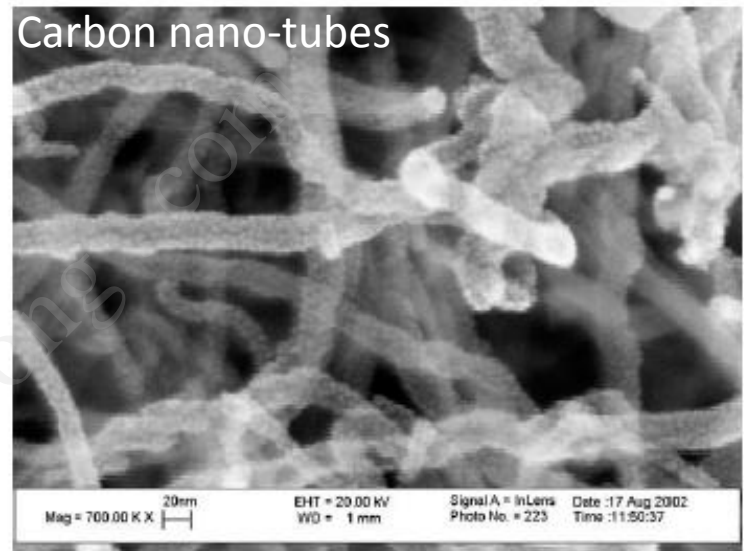


MỘT VÀI ẢNH SEM

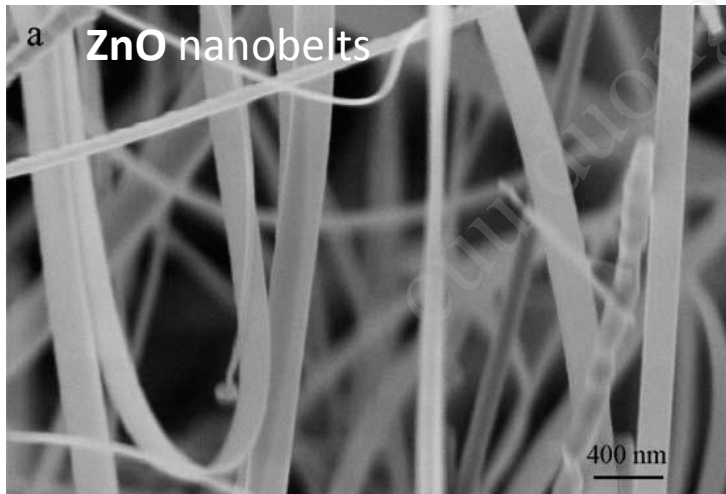
ZnO nano-wires



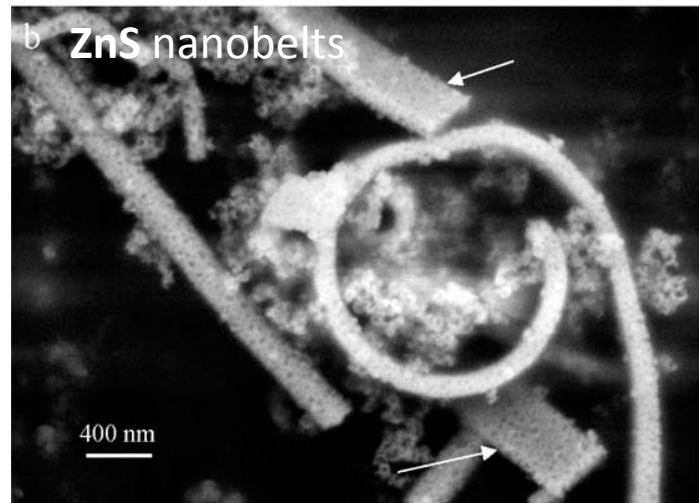
Carbon nano-tubes



a ZnO nanobelts



b ZnS nanobelts





SEM image of comb-like nanostructure of **ZnO**, which is the result of surface polarization induced growth

Z. L. Wang, Annual Review of Physical Chemistry, 2004, Vol. 55: 159-196

ƯU ĐIỂM CỦA SEM

- Cho thông tin về bề mặt của mẫu.
- Phân tích mà không cần phá hủy mẫu vật.
- Hoạt động ở chân không thấp.
- Tốc độ thu dữ liệu nhanh.
- Độ phân giải cao.
- Việc chuẩn bị mẫu đơn giản.
- phân tích mà không cần phá hủy mẫu
- Giá thành của SEM thấp hơn rất nhiều so với TEM.

Kính hiển vi phát xạ trường FESEM

Cũng giống như kính hiển vi SEM tuy nhiên nguồn electron được tạo ra với súng phát xạ trường

Vào năm 1968, Tập đoàn Hitachi Ltd. (Hitachi) đã phát minh ra nguồn chùm tia điện tử phát xạ trường (FE) cùng với Tiến sĩ Albert V. Crewe (Trường Đại học Chicago trước đây).

năm 1972, Hitachi tiến hành lắp đặt thành công nguồn chùm tia điện tử FE lên **kính hiển vi điện tử** (SEM), đánh dấu sự phát triển thành công của thiết bị mang tên HFS-2, kính hiển vi điện tử quét phát xạ trường (FE-SEM) thương mại đầu tiên trên thế giới

Ống phát xạ trường hoạt động không cần nhiệt độ cao do đó có độ bền cao.

Cường độ dòng trong ống phát xạ trường rất lớn nên tạo ra ánh có độ sáng cao.

Kích thước hội tụ của ống phát xạ trường nhỏ nên độ phóng đại lớn.

Ống phát xạ trường hoạt động trong môi trường chân không siêu cao, nên giá thành rất cao. Phát xạ nhiệt thì yêu cầu về chân không không quá khắt khe.

TEM: Transmission Electron Microscope

Kính hiển vi điện tử truyền qua TEM hoạt động dựa trên nguyên lý tương tự như kính hiển vi quang học.

Nguồn chiếu sáng trong TEM là chùm các electron có năng lượng cao được phát ra từ súng điện tử.

Chùm electron được hội tụ lại nhờ các vật kính là thấu kính điện từ, sau đó ảnh được phóng đại qua một số thấu kính từ trung gian với độ phóng đại lớn (có thể tới hàng triệu lần), ảnh có thể tạo ra trên màn huỳnh quang, hay trên film quang học, hay ghi nhận bằng các máy chụp kỹ thuật số.

Có độ phân giải một vài \AA đặc trưng của các hạt nanô. Độ phân giải TEM có thể cung cấp thông tin và kích thước và hình dạng của mẫu.

Xét trên nguyên lý, ảnh của TEM vẫn được tạo theo các cơ chế quang học, chỉ khác chế độ ghi ảnh.

Điểm khác cơ bản là độ tương phản.

- độ tương phản trong kính hiển vi quang học do hiệu ứng hấp thụ ánh sáng

- độ tương phản của ảnh TEM xuất phát từ khả năng tán xạ điện tử.

Tương phản biên độ: do hiệu ứng hấp thụ điện tử (do độ dày, do thành phần hóa học) của mẫu vật.

Tương phản pha: do các điện tử bị tán xạ dưới các góc khác nhau.

Tương phản nhiễu xạ: do các điện tử bị tán xạ theo các hướng khác nhau do tính chất của vật rắn tinh thể.

Kính hiển vi điện tử truyền qua TEM

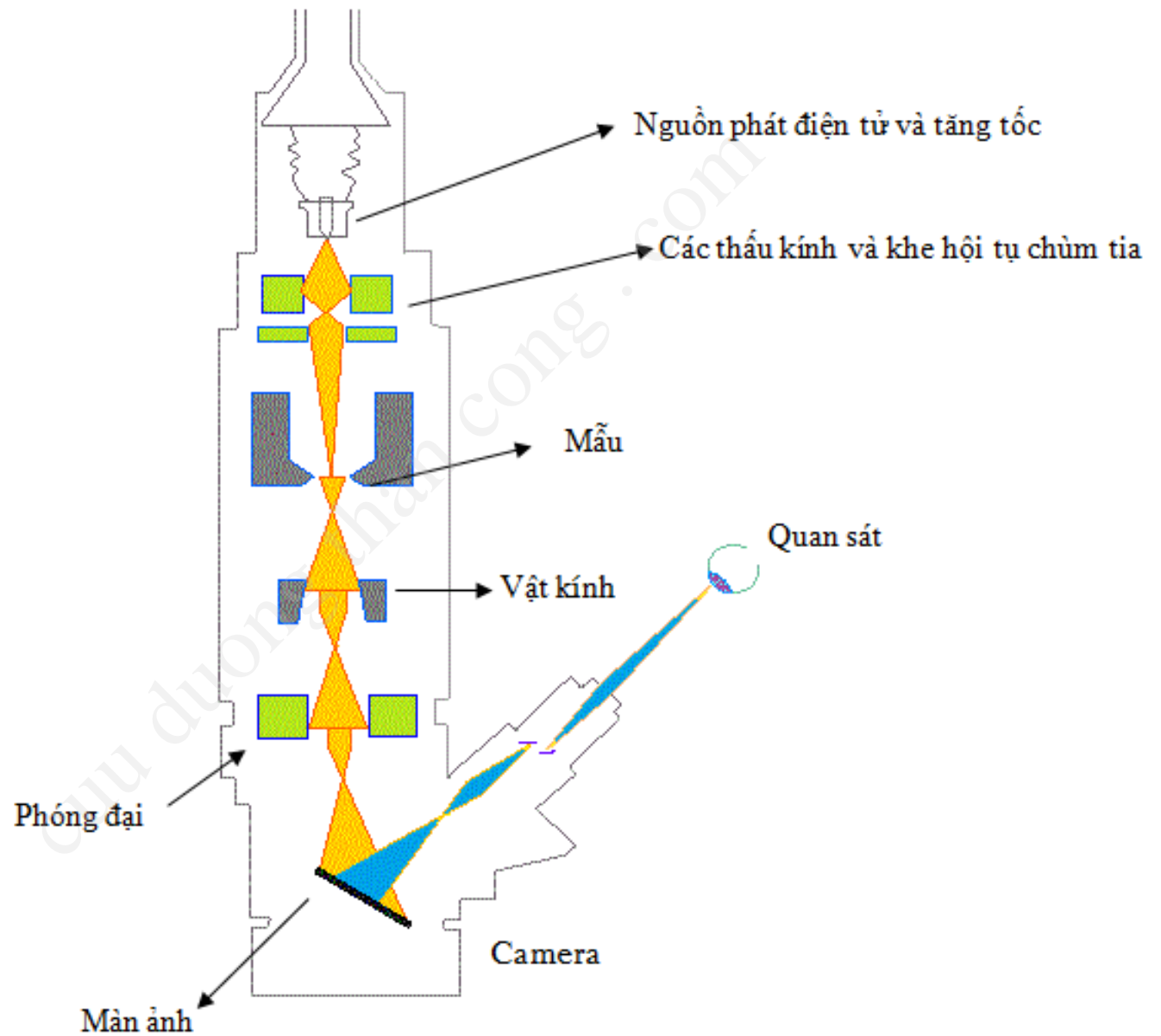
- Năm 1931, Knoll and Ruska đưa ra mô hình.
- Năm 1933, chế tạo ra máy đo TEM với 2 thấu kính từ, cho độ phóng đại 12000 lần.



Ernst Ruska: Nobel Prize in physics 1986



Electron Microscope Deutsches Museum, 1933 model



ƯU VÀ NHƯỢC ĐIỂM CỦA TEM

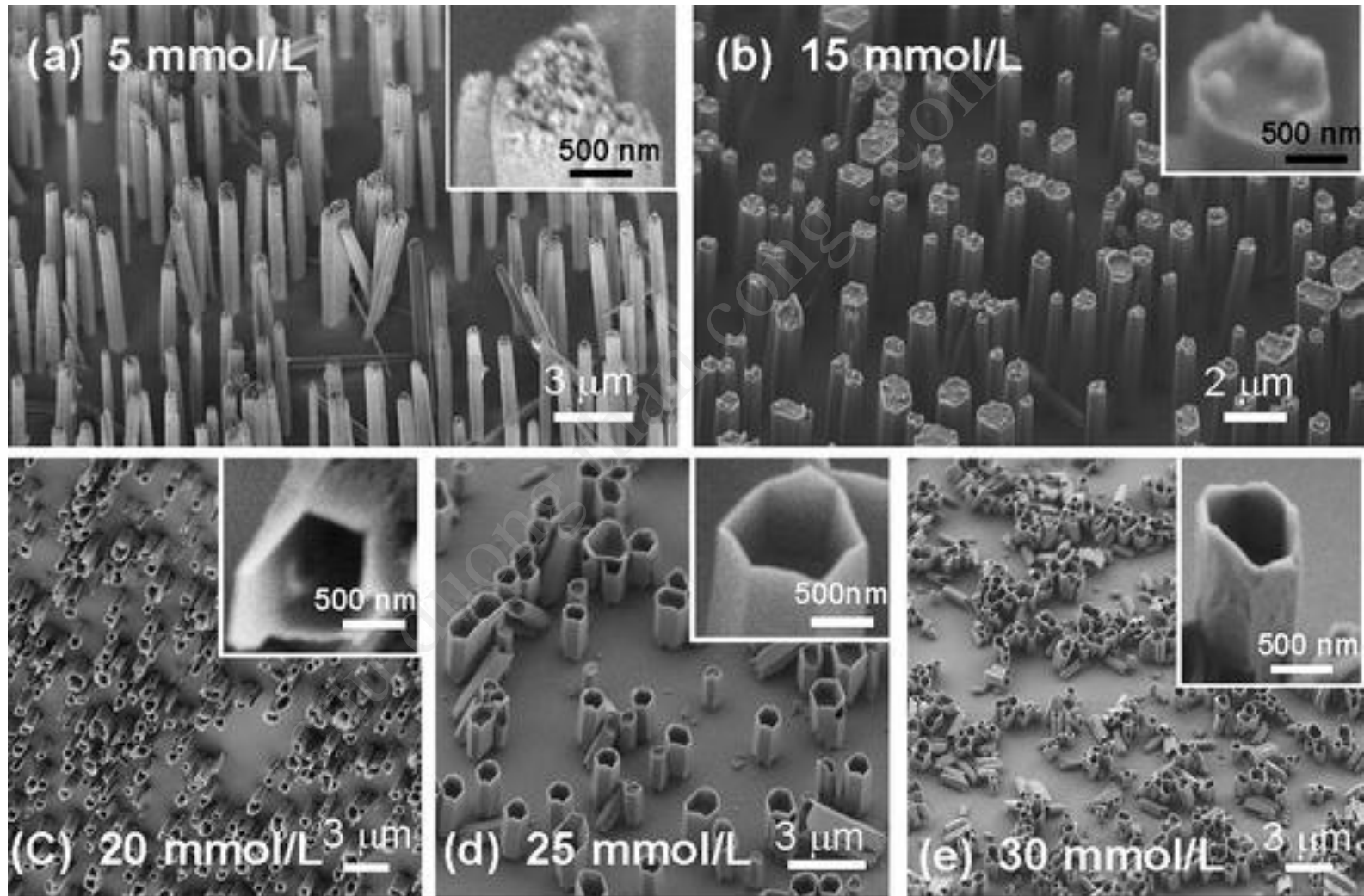
Ưu điểm:

- Phân giải cao, nhỏ nhất ~ 0.2 nm.
- Cho ảnh thực tế của mạng tinh thể.
- Phác họa các sai hỏng trong mẫu.
- Không cần phủ lớp dẫn điện do đó thuận lợi cho nghiên cứu vật liệu hữu cơ.
- Kỹ thuật nhiễu xạ điện tử giúp xác định cấu trúc tinh thể, hằng số mạng, các sai hỏng

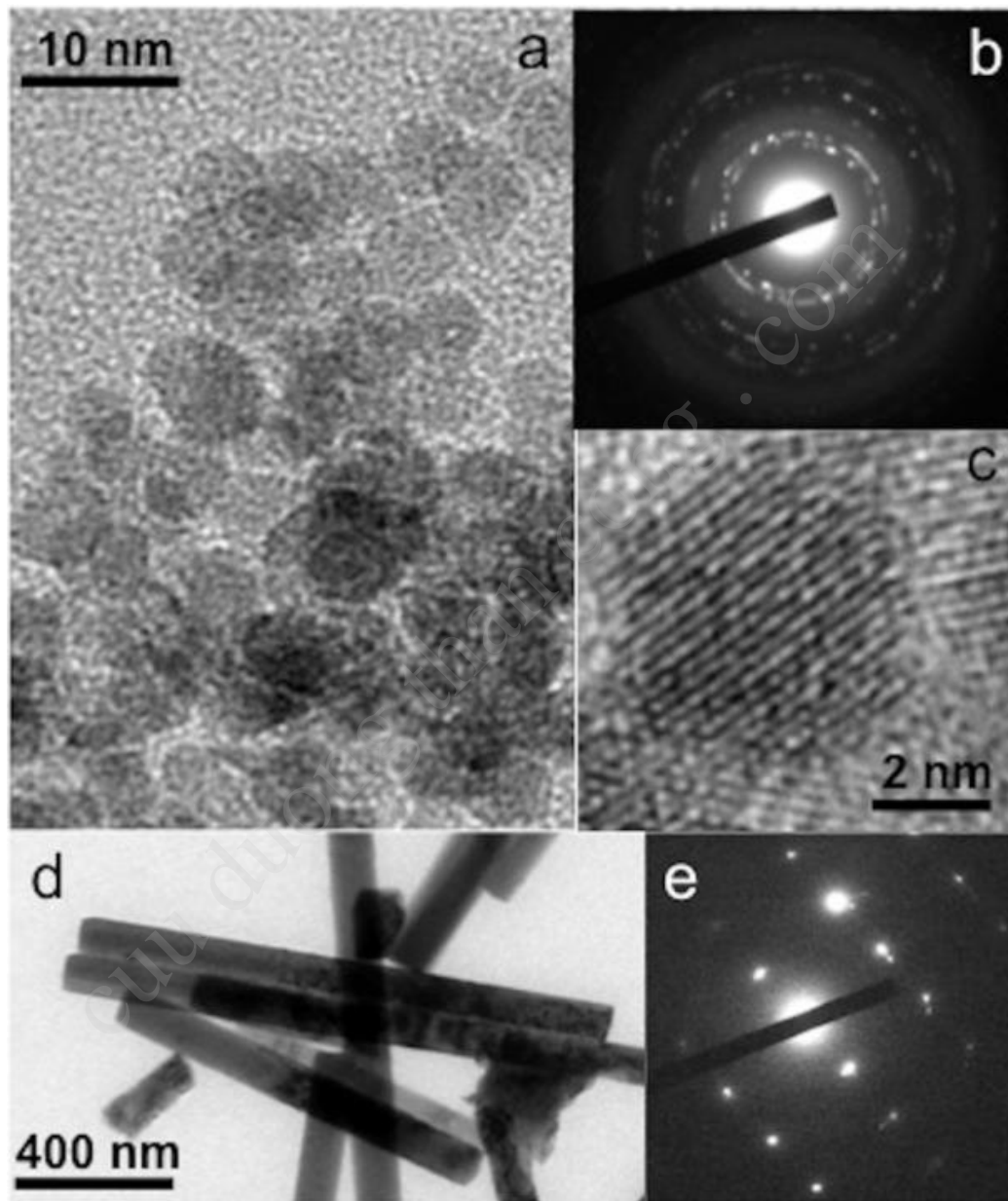
Nhược điểm

- Khó khăn trong quá trình chuẩn bị mẫu trong suốt đối với chùm electron từ mẫu khối (do độ dẫn, mật độ điện tử và độ dày của mẫu).

ẢNH TEM



ZnO nanotubes



ZnO nanoparticles (a) and ZnO nanorods (d) 52

Chuẩn bị mẫu cho kính hiển vi điện tử

1 số phương pháp phổ biến:

- Đóng khối và cắt lát
- Nghiền ion
- Phủ dẫn điện

và 1 số phương pháp khác.

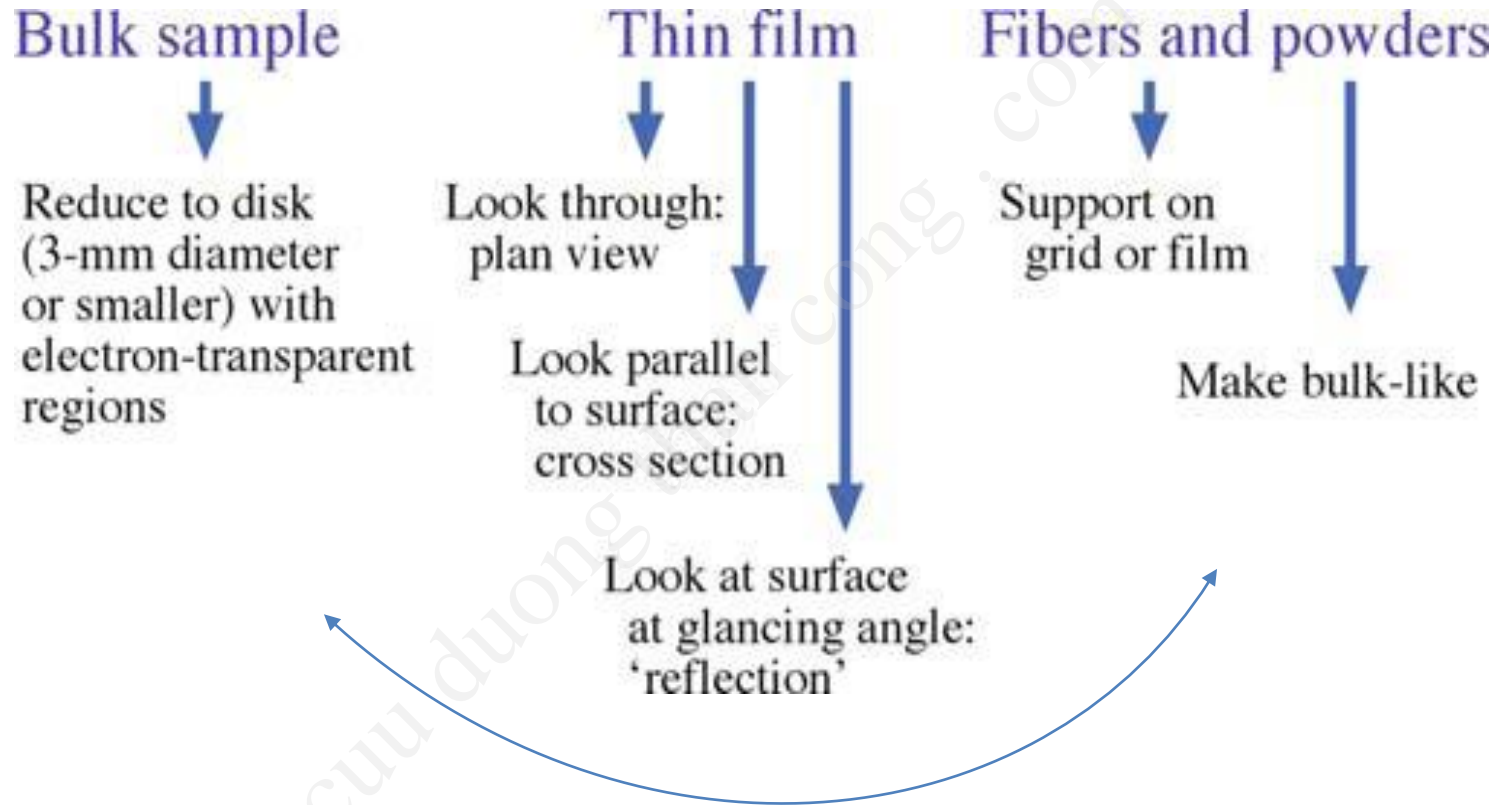
Yêu cầu về mẫu TEM và SEM

Mẫu TEM: yêu cầu bề dày của mẫu đạt được nhỏ hơn 30um và cấu trúc mẫu không bị biến dạng. Kích thước mẫu khoảng 30mm đường kính

Mẫu SEM: không yêu cầu quá mỏng nhưng bề mặt phải được đánh bóng với kết quả cuối cùng hoàn toàn không có vết xước và biến dạng. Kích thước mẫu khoảng 1cmx1cmx1/2cm. Bề mặt nên có tính dẫn điện.



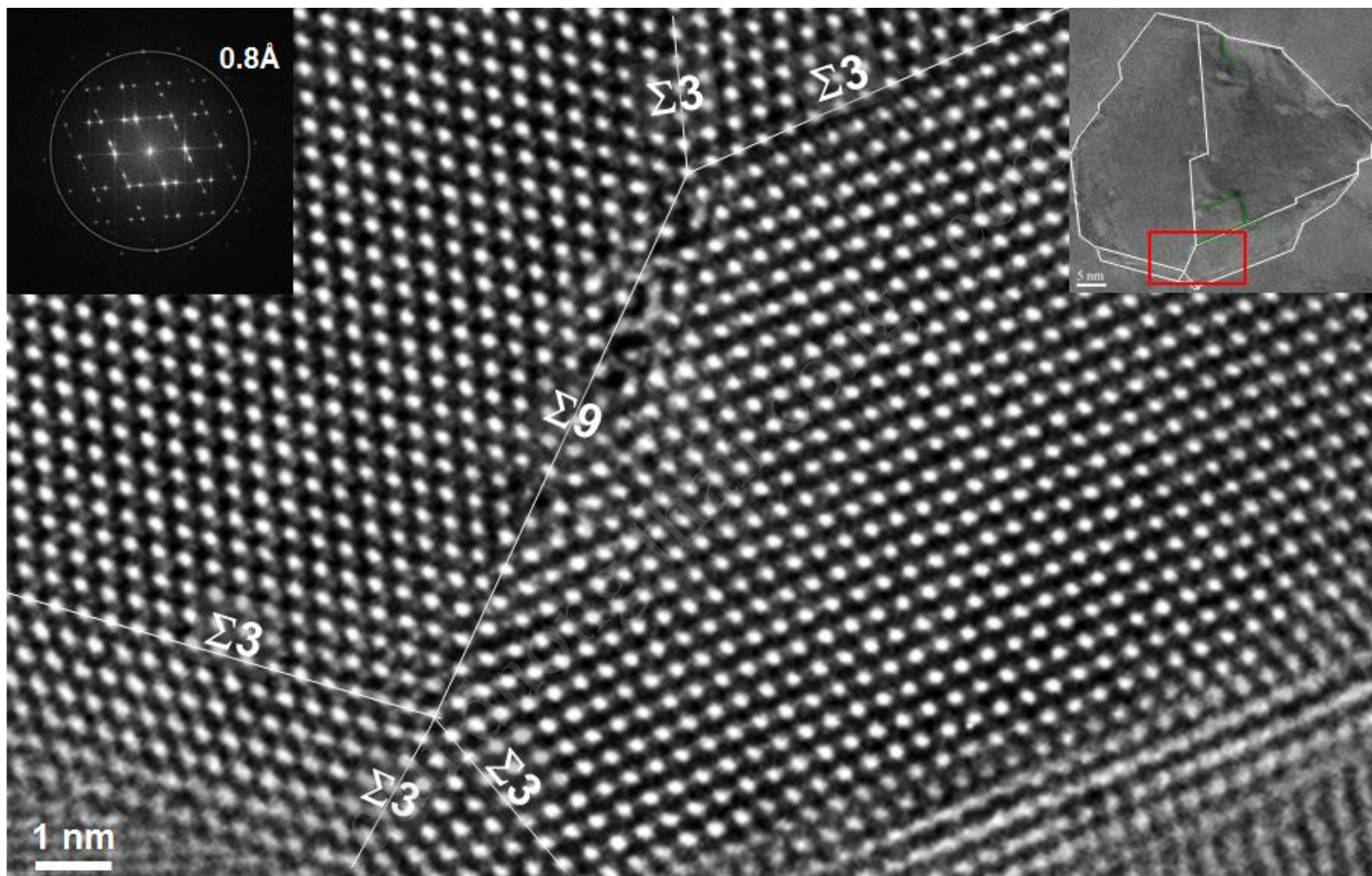
Preparation philosophies

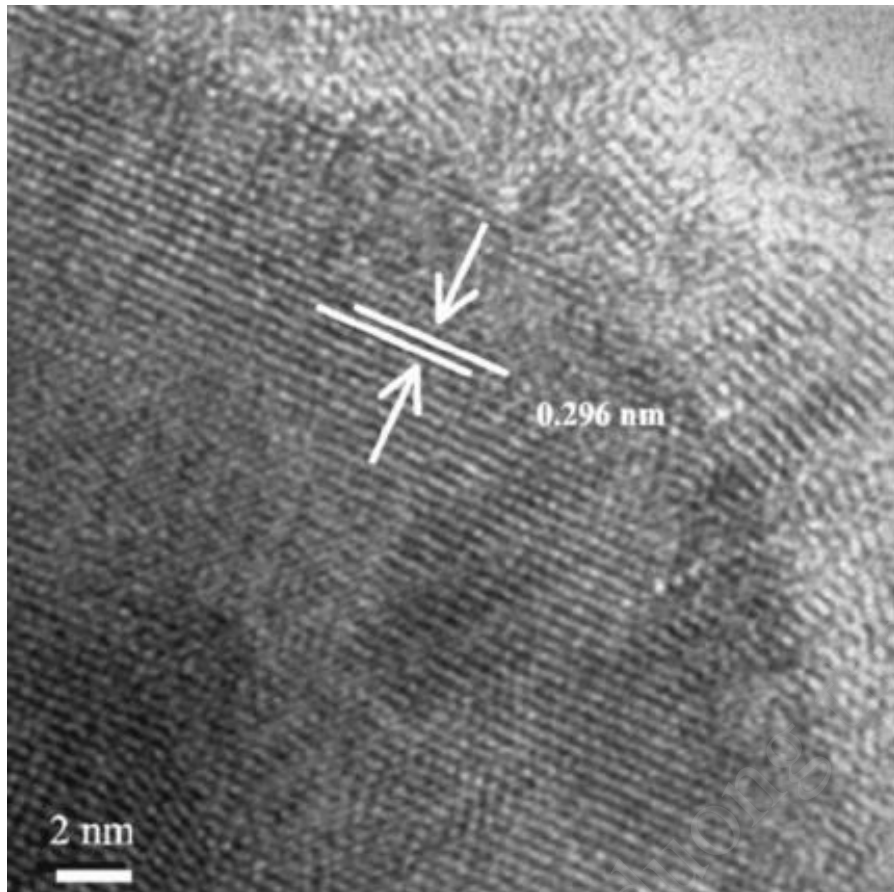


Self-supporting discs or specimen supported on a grid or washer

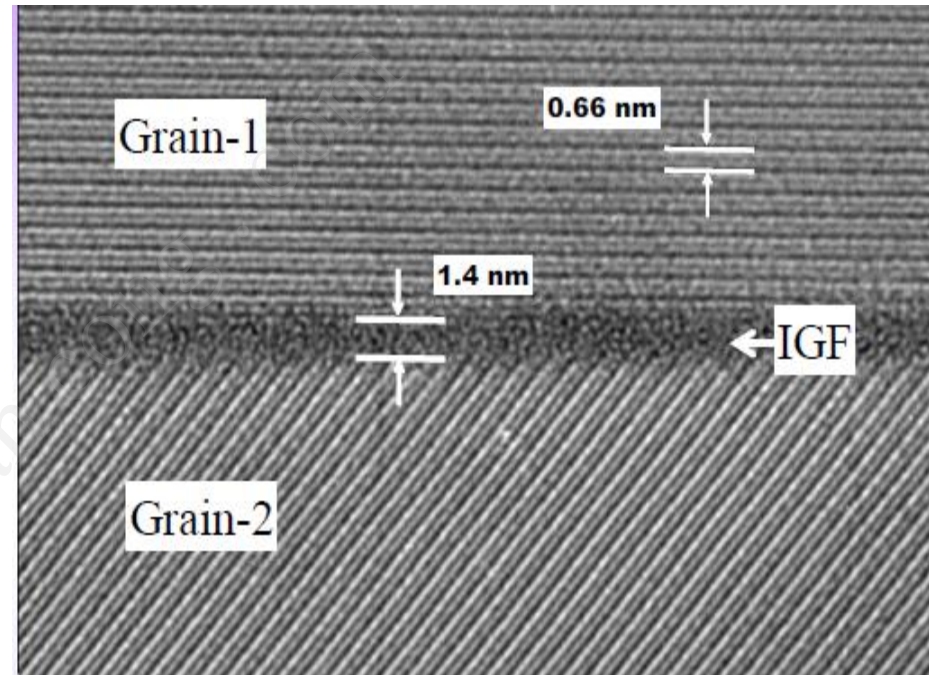
High-resolution transmission electron microscopy (HRTEM)

So với TEM, HRTEM tăng độ tương phản pha lên. Độ phân giải điểm cao nhất nhận được trong HRTEM tương phản pha là khoảng $0,5 \text{ \AA}^\circ$ (0,050 nm). Ở những quy mô nhỏ này, các nguyên tử riêng lẻ của tinh thể và các khuyết tật của nó có thể thấy được





ảnh HRTEM của hạt nano Sn



High-resolution micrograph from a Lu-Mg doped Si₃N₄ sample showing the presence of an Intergranular Glassy Film (IGF).

