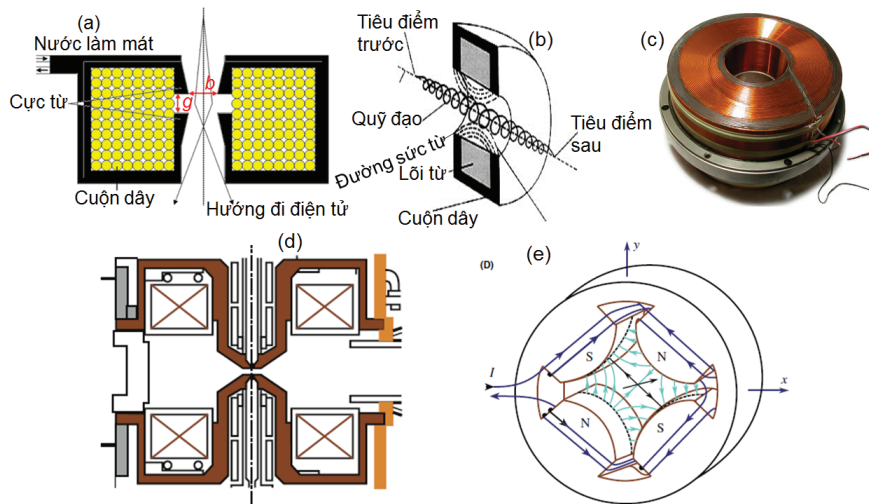


Bảng 2.2. Các đặc trưng của sóng điện tử tại các thế tăng tốc, V , khác nhau (Williams & Carter, 2009).

V (kV)	λ [phi tương đối tính, nm]	λ [tương đối tính, nm]	Khối lượng tương đối tính [$\times m_e$]	Vận tốc [$\times 10^8$ m/s]
100	0,00386	0,00370	1,196	1,644
120	0,00352	0,00335	1,235	1,759
200	0,00273	0,00251	1,391	2,086
300	0,00223	0,00197	1,587	2,330
400	0,00193	0,00164	1,783	2,484
1000	0,00122	0,00087	2,957	2,823

3.2. Các thấu kính từ (magnetic lens)

Thấu kính từ là bộ phận quang học của TEM, đóng vai trò định hướng, điều khiển và hội tụ chùm điện tử để tạo ảnh. Xét trên phương diện quang học, chúng hoàn toàn tương tự như các thấu kính thủy tinh ở kính hiển vi quang học, nhưng điểm khác biệt là có tiêu cự (*focal length*) có thể thay đổi bằng cách thay đổi dòng điện điều khiển. Thấu kính từ có bản chất là các nam châm điện có nhân rỗng. Chùm điện tử truyền qua trục của thấu kính từ, và quỹ đạo bị bẻ cong nhờ từ trường sinh ra trong lòng thấu kính từ, từ các cuộn dây có dòng điện cuốn quanh các lõi từ (hình 2.13).



Hình 2.13. (a) Sơ đồ nguyên lý cấu tạo của một thấu kính từ, (b) quỹ đạo của điện tử qua thấu kính từ, (c) ảnh chụp một thấu kính từ (d) sơ đồ mặt cắt của một vật kính trong TEM, (e) mặt cắt của vật kính nhìn thẳng từ trên xuống với các đường sức từ từ các cực từ của thấu kính. Hình từ (Williams & Carter, 2009).

Khi chùm điện tử truyền qua thấu kính, quỹ đạo của nó sẽ bị bẻ cong dưới tác dụng của lực Lorentz:

$$F = q(E + v \times B) = e(v \times B) \quad (2.14)$$

Dưới tác dụng của lực Lorentz, thực chất quỹ đạo của điện tử không phải là đường thẳng mà bị lái đi theo dạng xoắn [hình 2.12(b)]. Một cách gần đúng, nếu coi góc chùm điện tử truyền tới thấu kính gần như vuông góc với từ trường, thì bán kính của đường xoắn ốc có thể dễ dàng viết thành:

$$r = \frac{m_e v}{eB} \quad (2.15)$$

Ở đây, ta có thể kể tới hiệu ứng tương đối tính (vì chùm điện tử có năng lượng cao). Và khi đó, bán kính quỹ đạo xoắn của điện tử có thể được viết lại thành (Williams & Carter, 2009):

$$r = \frac{\sqrt{2m_e E \left(1 + \frac{E}{2E_0}\right)}}{eB} \quad (2.16)$$

Với E , E_0 là năng lượng của điện tử khi ở trạng thái chùm tia và năng lượng ở trạng thái nghỉ. Và từ đó, bán kính của quỹ đạo xoắn của điện tử có thể được viết lại thành một hàm phụ thuộc vào thế tăng tốc (đơn vị m) (Williams & Carter, 2009):

$$r = \frac{3,37 \times 10^6 \left[V \left(1 + 0,9788 \times 10^{-6} V\right) \right]^{1/2}}{B} \quad (2.17)$$

Rõ ràng là cường độ từ trường trong lòng thấu kính sẽ điều khiển khả năng hội tụ của chùm tia theo các quy tắc quang học thấu kính. Và tiêu cự có thể được xác định theo công thức (Gewartowski & Watson, 1965):

$$\frac{1}{f} = \left[\frac{e^2}{8m_e \cdot eV} \right] \int B_z^2 dz \quad (2.18)$$

Trong thấu kính từ, cảm ứng từ B phân bố dọc theo trục z (trục quang học của thấu kính) theo dạng hàm gần đúng như một hàm hyperbolic (Gewartowski & Watson, 1965):

$$B_z \approx B_0 \operatorname{sech}^2 \left(\frac{1,32z}{g} \right) \quad (2.19)$$

Với g là khoảng cách khe từ giữa hai cực từ của thấu kính [xem hình 2.12(a)]. Kết hợp với công thức (2.18), độ dài tiêu cự thấu kính từ có thể được xác định như một hàm của thế tăng tốc và từ trường trong lòng thấu kính theo hàm:

$$\frac{1}{f} = \frac{e}{8m_e \cdot V} B_0^2 \int \operatorname{sech}^4\left(\frac{1.32z}{g}\right) dz \quad (2.20)$$

Và tiêu cự được tính là (Gewartowski & Watson, 1965):

$$f \approx \frac{8m_e V}{geB_0^2} \quad (2.21)$$

Nếu từ trường cực đại tại trung tâm thấu kính từ là $B = 1$ T, thấu kính có độ rộng khe từ $g = 2$ cm, thì với chùm tia điện tử 200 kV, ta sẽ có vật kính có tiêu cự khoảng 0,45 mm, và đây là cỡ tiêu cự tiêu biểu ở các vật kính chuẩn ở TEM. Vì từ trường trong thấu kính có thể thay đổi bằng cách thay đổi cường độ dòng điện trong các cuộn dây cuốn nên tiêu cự của thấu kính từ cũng dễ dàng thay đổi theo dòng điện đặt vào. Vì thế, quang hệ dùng thấu kính từ có khả năng tùy biến dễ dàng hơn mà không đòi hỏi các dịch chuyển cơ học. Thay vào đó, mọi tính chất của hệ có thể thay đổi dễ dàng bằng cách thay đổi tiêu cự của các thấu kính có chức năng định trước.

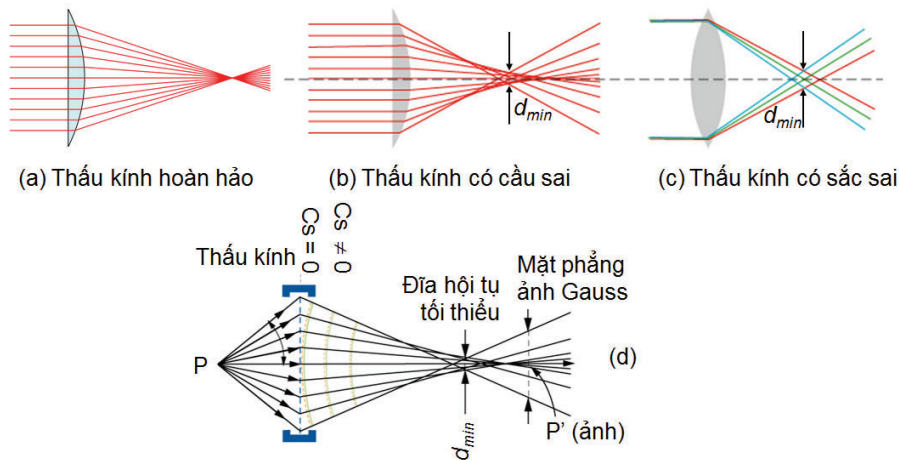
Thiết bị TEM hiện đại là một quang hệ của nhiều thấu kính từ với nhiều vai trò khác nhau:

- Thấu kính hội tụ (Condenser lens): là hệ thấu kính đầu tiên mà chùm điện tử truyền qua, đóng vai trò định hướng và tạo chùm tia chiếu sáng tới vật. Hệ hội tụ thường bao gồm hai (hoặc có thể nhiều hơn, tùy độ mạnh yếu) thấu kính hội tụ: kính C1 có vai trò điều khiển kích thước của chùm tia hội tụ (spot size), kính C2 có vai trò điều khiển độ hội tụ hoặc phân tán chùm tia. Cùng với các khẩu độ hội tụ, hệ hội tụ cho phép điều khiển tính chất của chùm tia (kích thước chùm tia, mức độ hội tụ, song song...) chiếu tới mẫu.

- Vật kính (Objective lens): là thấu kính quan trọng nhất ở TEM, có vai trò chính trong việc phóng đại và lấy nét. Vật kính chính là thấu kính mạnh nhất ở TEM, thường được thiết kế theo kiểu nhúng (immersed lens), có nghĩa là gồm hệ các cực đối xứng trên dưới [xem

hình 2.12(d)] mà mẫu vật sẽ được đặt tại trung tâm của hệ cực. Từ trường của các vật kính thường rất mạnh, có thể đạt tới hơn $2T$, vì thế nó có khả năng bão hòa hầu hết các mẫu vật liệu từ đặt trong nó. Cấu trúc vật kính kiểu nhúng này thường tạo ra quang hệ tương đương gồm một vật kính trên (upper objective lens, đóng vai trò song song chùm tia) và vật kính dưới (lower objective lens, đóng vai trò chính trong việc lấy nét và phóng đại). Nhiều thiết bị TEM hiện đại còn có cấu trúc hệ vật kính phức tạp hơn, với các mini-lens gắn kèm bổ trợ thêm cho hệ điều chỉnh ảnh.

- Kính trung gian (Intermediate lens): đặt bên dưới vật kính, đóng vai trò phóng đại cho quang hệ.
- Kính lật ảnh (Projection lens): đóng vai trò lật ảnh.
- Kính nhiễu xạ (Diffraction lens) bổ trợ cho quang hệ trong chế độ tạo ảnh nhiễu xạ.



Hình 2.14. Quang sai ở thấu kính: (a) Thấu kính hoàn hảo không có quang sai, tất cả các tia hội tụ tại một điểm duy nhất, (b) thấu kính có cầu sai, tia ở xa quang trục hội tụ nhiều hơn, (c) thấu kính có sắc sai, tia có bước sóng càng ngắn càng hội tụ nhiều, (d) mô tả vật lý về tính hội tụ ở thấu kính có cầu sai từ vật điểm.

Quang sai ở thấu kính từ: quang sai thể hiện sự kém hoàn hảo của các hệ thấu kính mà thấu kính từ cũng không nằm ngoài ngoại lệ đó. Cầu sai (*spherical aberration*) và sắc sai (*chromatic aberration*) là hai đóng góp đáng kể nhất đối với các thấu kính từ.

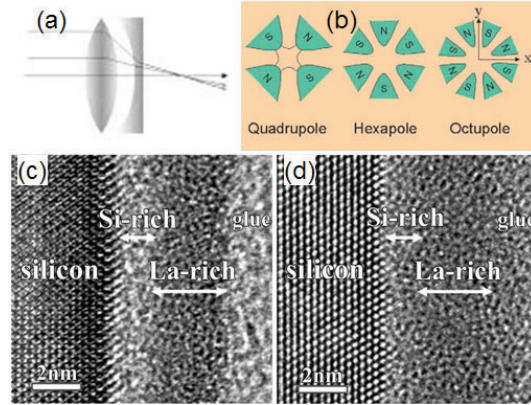
- *Cầu sai*: là tính kém hoàn hảo ở thấu kính liên quan tới khả năng hội tụ các tia ở các khoảng cách khác nhau tới quang trục. Nếu như một thấu kính hoàn hảo không có cầu sai, một chùm tia (đơn sắc) song song với trục chính sẽ hội tụ tại tiêu điểm sau của vật kính dù bất kể kích thước chùm tia ra sao [hình 2.13(a)]. Khi có tồn tại cầu sai, tia càng xa trục chính sẽ càng bị hội tụ gần hơn về phía thấu kính, còn các tia càng gần trục thì bị hội tụ tại tiêu điểm càng xa hơn [hình 2.14(b)]. Điều này khiến cho một chùm tia song song (đơn sắc) sẽ không thể hội tụ tại một tiêu điểm, mà tạo ra một đĩa tròn với đường kính nhỏ nhất có thể là d_{min} , gọi là *disk of least confusion* (đĩa hội tụ tối thiểu). Một cách vật lý hơn, như ở hình 2.14(d), nếu như nửa góc hứng sáng lớn nhất của vật kính là β , thì khi đó đường kính đĩa hội tụ tối thiểu sẽ được cho bởi (Williams & Carter, 2009):

$$d_{min} = 0.5C_s\beta^3 \quad (2.22)$$

Hệ số C_s có ý nghĩa là hệ số cầu sai, thường có giá trị cỡ vài mm với các vật kính thông thường. Và khi đó giới hạn độ phân giải của thiết bị theo cầu sai sẽ là (Williams & Carter, 2009):

$$d_s = 0.91(C_s\lambda^3)^{1/4} \quad (2.23)$$

Ví dụ như thiết bị TEM có thể tăng tốc 200 kV, sẽ có bước sóng 2,51 pm, nếu như có hệ số cầu sai khoảng 1,2 mm (như thiết bị phổ biến FEI Tecnai T20), thì độ phân giải tốt nhất nó có thể đạt được sẽ giới hạn theo công thức (2.23) là 0,24 nm. Cầu sai là một điểm thiếu hoàn hảo cần loại trừ (hoặc giảm thiểu) nếu muốn tăng độ phân giải ở TEM. Một cách đơn giản là sử dụng vật kính có tiêu cự nhỏ (thực tế cách này làm tăng giá thành lên nhiều lần vì nó sẽ đòi hỏi vật kính với từ trường mạnh và khe từ hẹp – một yếu tố làm giảm khả năng biến tấu buồng TEM cho các thí nghiệm khác).



Hình 2.15. (a) Nguyên lý loại trừ quang sai ở hệ quang học, (b) hệ loại trừ quang sai với các cặp cuộn dây phụ đặt dưới vật kính (c-d) ảnh HRTEM so sánh khi chưa loại trừ (c) và sau khi loại trừ (d) cầu sai ở thiết bị JEOL JEM-2100F (Inamoto et al., 2010). Độ phân giải ở ảnh HRTEM có loại trừ cầu sai (d) rõ ràng cao hơn, và chất lượng ảnh tốt, khả năng lấy nét phân bố đều hơn.

Cách thứ hai là sử dụng hệ cuộn dây loại trừ quang sai (*aberration corrector*), là các cặp cuộn dây có cấu trúc kiểu từ 4 đến 8 cuộn dây đối xứng (hình 2.15). Các cuộn dây này sẽ đóng vai trò như một thấu kính phụ đặt bên dưới vật kính nhằm điều chỉnh các chùm tia có tính hội tụ khác nhau thành hội tụ tại một điểm. Hệ loại trừ kiểu tám cuộn dây là loại tốt nhất hiện nay.

- *Sắc sai*: Sắc sai ở thấu kính liên quan tới khả năng hội tụ các tia có bước sóng khác nhau. Ý nghĩa vật lý của nó tương tự như ở thấu kính thủy tinh mà ở đó chiết suất của thấu kính phụ thuộc vào bước sóng của ánh sáng, do đó, mỗi bước sóng sẽ có tiêu cự khác nhau. Kết quả là, bước sóng ngắn thì có tiêu cự ngắn (hội tụ nhiều hơn) trong khi bước sóng dài thì có tiêu cự dài hơn, và cũng tạo ra hệ quả tương tự như cầu sai. Nếu gọi C_c là hệ số sắc sai, thì giới hạn độ phân giải do cầu sai ngoài việc phụ thuộc vào bước sóng, hệ số cầu sai, còn phụ thuộc vào độ phân tán năng lượng (xem lại phần 3.1) theo công thức (Williams & Carter, 2009):

$$d_c = A \sqrt{\lambda \frac{\Delta E}{E} C_c} \quad (2.24)$$

với A là số khẩu độ (0,9 – 1,0 ở TEM).

Cách làm giảm sắc sai là dùng nguồn điện tử có độ kết hợp cao, tăng thể tăng tốc, dung mẫu mỏng và sử dụng các bộ loại trừ sắc sai theo nguyên lý tương tự như loại trừ cầu sai.

Việc loại trừ quang sai có ý nghĩa vô cùng quan trọng cho việc nâng cao độ phân giải ở TEM. Cầu sai thường là nhân tố đóng góp nhiều nhất, và loại trừ cầu sai là kỹ thuật tốn kém nhất. Loại trừ cầu sai đặc biệt có ý nghĩa đối với thiết bị STEM, sử dụng chùm điện tử hội tụ. Độ phân giải ở STEM hoàn toàn phụ thuộc vào kích thước chùm điện tử hội tụ. Không có loại trừ cầu sai, người ta chỉ có thể có độ phân giải STEM vào cỡ 0,2-0,5 nm, nhưng nhờ có loại trừ cầu sai, thiết bị STEM có thể đạt độ phân giải 0,07 nm (thiết bị thương phẩm).

3.3. Hệ các khẩu độ

Là các khẩu độ có dạng các lỗ tròn làm trên lá thép (hình 2.15), đóng vai lựa chọn chùm tia, bao gồm nhiều khẩu độ có vai trò khác nhau:

- *Khẩu độ hội tụ (condenser aperture)*, có thể từ 1 tới 2 khẩu độ, đóng vai trò tạo ra chùm tia song song hoặc hội tụ sau khi đi qua hệ hội tụ. Ở chế độ TEM, các khẩu độ hội tụ và thấu kính hội tụ cho phép tạo ra chùm tia song song hay hội tụ chiếu tới mẫu với kích thước có thể thay đổi nhờ kích cỡ khẩu độ và tiêu cự của thấu kính hội tụ, còn ở chế độ STEM, khẩu độ hội tụ đóng vai trò tạo ra chùm tia hội tụ với góc hội tụ có thể điều chỉnh nhờ kích thước khẩu độ. Các TEM thông thường chỉ có một khẩu độ hội tụ, nhưng nhiều thiết bị TEM hiện đại ngày nay có thể có tới 2 khẩu độ hội tụ.

- *Khẩu độ vật kính (objective aperture)*, đặt tại tiêu diện của vật kính, đóng vai trò lựa chọn chùm tia tạo ảnh (tán xạ hay không tán xạ) sau khi truyền qua vật kính, tạo ra các ảnh với mức độ tương phản khác nhau. Khẩu độ vật kính càng nhỏ thì càng tạo ra độ tương phản lớn hơn, vì thế nó còn được gọi là khẩu độ tạo tương phản (*contrast forming aperture*). Nhưng khẩu độ vật kính càng nhỏ thì càng làm giảm độ phân giải của ảnh.

- *Khẩu độ lựa chọn vùng (selected area aperture)*: được đặt tại mặt phẳng ảnh, cho phép lựa chọn một vùng trên ảnh để tạo ra phổ