

**BẢN CHẤT CỦA DÒNG ĐIỆN TRONG KIM LOẠI**

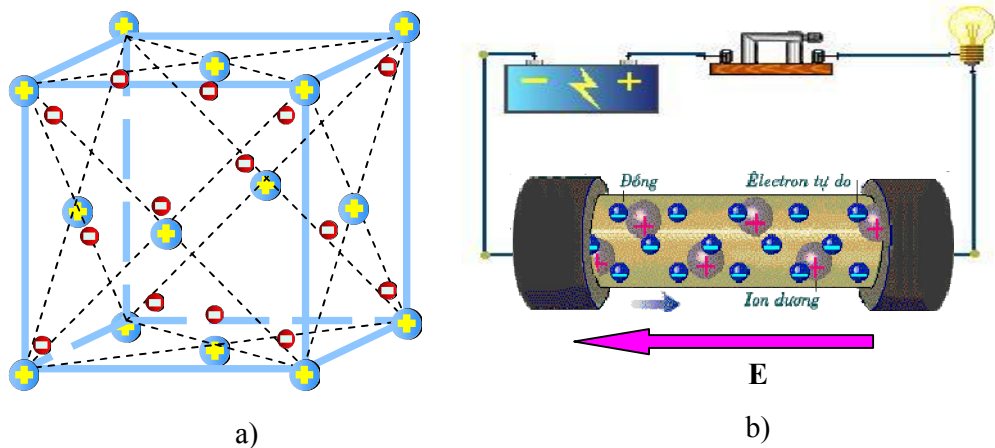
Vũ Huy Toàn

Công ty cổ phần CONINCO-MI

4 Tôn Thất Tùng, Hà Nội. Email: [vuhuytoan@conincomi.vn](mailto:vuhuytoan@conincomi.vn)

**1) Mở đầu**

Kim loại là một dạng chất rắn và cũng giống như nhiều dạng chất rắn khác, nó có cấu trúc mạng tinh thể, ở đó, các nguyên tử chiếm vị trí là các nút mạng. Nhưng có một điểm được cho là khác biệt ở chỗ, từ trước tới nay, người ta vẫn cho rằng các nguyên tử kim loại thường không giữ được các điện tử lớp ngoài cùng, khiến chúng thoát ra ngoài và trở thành các điện tử tự do, chuyển động hỗn loạn; còn bản thân nguyên tử trở thành các ion dương định vị tại các nút mạng; một trong các kiểu mạng như thế được thể hiện trên Hình 1a [1]. Vì vậy, trong trạng thái bình thường, vật liệu từ kim loại vẫn trung hòa về điện. Nhưng khi có tác động của điện trường ngoài, các điện tử tự do này sẽ chuyển động và tạo nên dòng điện như được thể hiện trên Hình 1b.



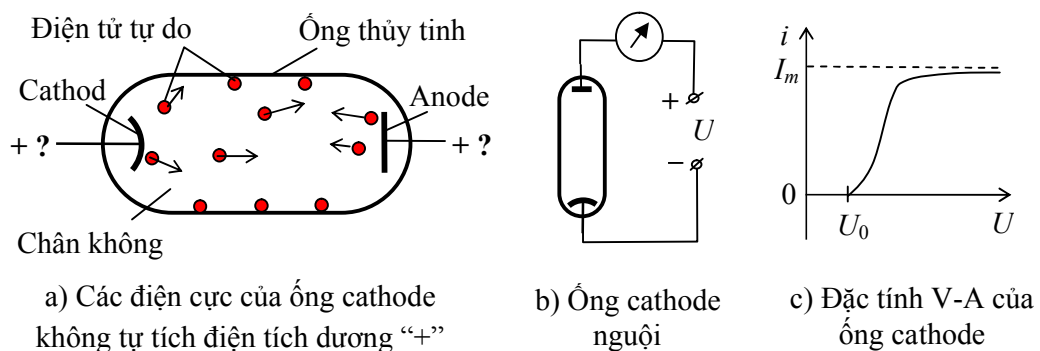
Hình 1. Dòng điện trong kim loại được cho là do chuyển động của điện tử tự do dưới tác động của điện trường ngoài

Trong quá trình chuyển động dưới tác động của điện trường ngoài, chúng va chạm với các ion trong mạng tinh thể kim loại làm xuất hiện điện trở. Nhiệt độ càng cao, mạng tinh thể dao động càng mạnh, xác suất va chạm càng lớn dẫn đến điện trở càng lớn. Tuy nhiên, bên cạnh những ưu điểm về khả năng ứng dụng để giải quyết các bài toán thực tế, mô hình điện tử tự do này chứa đựng khá nhiều bất cập:

*Thứ nhất*, không giải thích được vì sao hai dây dẫn có dòng điện chạy qua lại tương tác được với nhau theo lực Lorenz? Nếu dòng điện là dòng của các điện tử tự do thì bằng cách nào mà hai dây dẫn có dòng điện chạy qua, đặt cạnh nhau lại bị dịch chuyển như thế được? Chúng hút nhau lại gần, nếu hai dòng điện cùng chiều nhau và đẩy nhau ra xa, nếu hai dòng điện ngược chiều nhau? Dây dẫn là cái chúng ta có thể nhìn thấy được, còn điện tử thì không, mà chỉ có thể dự đoán nhờ trí tưởng tượng thôi. Dây dẫn bị dịch chuyển khi có dòng điện chạy qua là sự thật không phải bàn cãi vì ai cũng có thể thấy được. Nhưng việc điện tử có bị bứt ra khỏi nguyên tử rồi chạy tự do, lung tung như thế thật hay không là điều cần phải suy

ngãmlại. Bằng cách nào mà các điện tử đã thoát khỏi lực hút của các nguyên tử, tức là đã trở nên “tự do” rồi, lại có thể kéo theo chúng là cả mạng tinh thể của dây dẫn nữa? Nếu đã kéo theo được cả mạng tinh thể theo chúng thì các điện tử tạo nên dòng điện này đâu có thể “tự do”? Trái lại, chúng phải có mối liên kết rất chặt chẽ với mạng tinh thể là đằng khác?

*Thứ hai*, khi ở trong nguyên tử, các điện tử chuyển động với tốc độ cực lớn: cỡ ( $10^5 \div 10^6$ ) m/s. Do đó, muốn trở thành điện tử “tự do”, chúng phải chuyển động nhanh hơn nữa mới thắng được lực hút của hạt nhân và rời xa nó. Nhưng với tốc độ lớn như thế, tại sao các điện tử “tự do” lại không khuếch tán vào môi trường xung quanh, thậm chí ngay cả khi môi trường chỉ còn là chân không, không còn bất cứ môi chất nào cản trở chuyển động của nó? Có nghĩa là lẽ ra đưa một tấm kim loại vào bình chân không thì nó sẽ phải tích điện dương “+”, vì các điện tích tự do với tốc độ  $10^5$  m/s sẽ không thể nào ở lại trong kim loại được? Chúng ta đã có thực nghiệm về ống cathode nguội – là một ống thủy tinh được hút chân không; ở hai đầu bên trong có hai điện cực bằng kim loại gọi là anode, để nối với điện áp dương, và cathode, để nối với điện áp âm (xem Hình 2). Chưa thấy có bất kể thí nghiệm nào ghi nhận được rằng cathode và anode có điện tích dương “+” cả, vì nếu trong kim loại có điện tử tự do thì cathode và anode sẽ phải tự tích điện tích dương, vì các điện tử tự do sẽ nhanh chóng rời bỏ kim loại để bay vào khoảng chân không và bám dính vào thành ống thủy tinh như thể hiện bởi hình tròn màu đỏ trên Hình 2a. Trên Hình 2b mô tả một ống cathode như vậy được nối với nguồn điện có thể điều chỉnh được từ 0 đến  $U$  và điện kế đo dòng điện. Khi  $U = 0$ , không có dòng điện nào chạy qua cả ( $i = 0$ ). Khi đưa điện áp tới một giá trị nào đó  $> U_0$ , dòng điện mới bắt đầu xuất hiện, còn gọi là dòng cathode – là dòng các điện tử bị bứt ra từ cathode (xem đặc tính Vôn-Ăm pe trên Hình 2c). Điều đó chứng tỏ rằng để bứt được điện tử ra khỏi nguyên tử kim loại của cathode, cần phải có một lực tác động lớn hơn lực giữ nó ở lại với nguyên tử, tức là phải cần một năng lượng lớn hơn công thoát của nó. Nhưng ở đây, bề mặt của kim loại trong ống cathode là chân không, không thể gây nên bất cứ cản trở nào cho chúng cả nên cái gọi là “lực tác động lớn hơn” ấy chỉ có thể là lực điện trường của các nguyên tử kim loại trong các điện cực thôi.

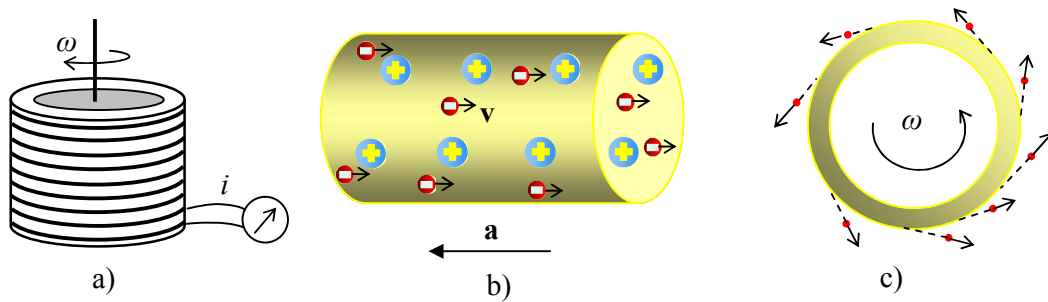


Hình 2. Ống cathode

Nói cách khác, chính hiệu ứng “dòng điện cathode” là một thực nghiệm thuyết phục, chứng tỏ trong kim loại không hề có điện tử nào là tự do cả, mà trái lại, chúng luôn bị các nguyên tử chiếm giữ. Điều này khiến ta liên hệ tới thí nghiệm khe Young: Những vạch sáng tối xen kẽ là tất cả những gì nhận được từ thí nghiệm, còn cái được gọi là “sóng” không ai

nhìn thấy mà chẳng qua là suy diễn mà thôi; những vạch sáng tối ấy thật ra là do chính các hạt photon, sau khi tương tác với khe hẹp, vẽ nên [2]. Tức là cùng một thực nghiệm như nhau, nhưng cách lý giải kết quả thực nghiệm khác nhau dẫn đến bản chất của hiện tượng lại bị hiểu khác hẳn nhau.

*Thứ ba*, trái ngược với hiệu ứng dòng điện cathode, thí nghiệm từng được Stewart và Tolman thực hiện vào năm 1916 [3] với một ống dây đồng hình trụ quay có gia tốc quanh trục của nó như được thể hiện trên Hình 3a dường như khẳng định có tồn tại các điện tử tự do này trong kim loại?



Hình 3. Thí nghiệm của Stewart và Tolman

Người ta cho rằng dường như chính sự tăng tốc của mạng tinh thể dây đồng đã bỏ lại đằng sau nó các “điện tử tự do”, do tính  $i$  của chúng (xem Hình 3b), còn khi cuộn dây đang quay đều mà đột ngột bị hãm lại thì dường như theo quán tính, các “điện tử tự do” vẫn tiếp tục “quay” mà gây ra dòng điện  $i$  có thể đo được nhờ một điện kế nối với hai đầu của cuộn dây (xem Hình 3a)? Tức là mâu thuẫn hoàn toàn với thực nghiệm về ống cathode? Tuy nhiên không khó khăn gì để có thể nhận ra rằng, nếu quả thật có những “điện tử tự do” ấy thì khi cuộn dây quay tròn, chúng sẽ không di chuyển cùng nếu không bị một nguyên tử nào đó đẩy đi? Nhưng đã bị đẩy đi như thế thì điều gì ngăn cản chúng không bị văng ra theo phương tiếp tuyến với vòng dây như được mô tả trên Hình 3c? Mà nếu như thế thì hầu hết các điện tử tự do này không chạy dọc theo vòng dây được? Còn nếu cho rằng dây dẫn được bọc một lớp sơn cách điện, khiến các điện tử không thể văng được ra ngoài thì chỉ một phần điện tử bị dồn ứ lại do không bị đẩy đi thôi, còn phần lớn vẫn sẽ bị nguyên tử đẩy đi theo chiều quay của cuộn dây. Kết quả là dòng điện có được sẽ nhỏ hơn nhiều so với tính toán trong [3].

Hãy phân tích lại trong thí nghiệm này, cái gì là có thật, còn cái gì chỉ là suy diễn? Cuộn dây đồng đang quay rồi dừng lại đột ngột là có thật. Dòng điện  $i$  xuất hiện vào khoảng thời gian cuộn dây gia tốc cũng là thật. Chỉ có cách giải thích thí nghiệm là mang tính chủ quan, là suy diễn thôi. Điều này khác hẳn với thí nghiệm ở trên với ống cathode – ở đó hoàn toàn không có yếu tố chủ quan nào, ngoại trừ một sự chấp nhận về mô hình mạng tinh thể với các nguyên tử vốn đã được thực nghiệm quan sát bằng kính hiển vi xác nhận và không còn trái với một thực nghiệm nào khác, ít nhất cũng là cho đến lúc này. Và lại, trong thí nghiệm của Stewart và Tolman này cũng vẫn sử dụng mô hình đó, nhưng phát sinh thêm yếu tố chủ quan cho rằng có “các điện tử tự do”, hơn nữa lại còn gián tiếp qua cái gọi là “tính  $i$ ” của chúng, chứ không trực tiếp với tương tác điện như ở ống cathode. Và do đó, đã đưa ra kết luận trái ngược và chứa đựng nhiều bất cập mới là chuyện đáng đặt dấu hỏi, tức là độ tin cậy của các

kết luận đưa ra từ thí nghiệm này cần phải được xem xét lại. Ta sẽ còn trở lại thí nghiệm này ở mục sau.

*Thứ tư*, lực tương tác giữa các điện tích điểm  $q_1, q_2$  tạo ra tuân theo định luật Coulomb là tỷ lệ nghịch với bình phương khoảng cách:

$$F_C = k_C \frac{q_1 q_2}{R^2}, \quad (1)$$

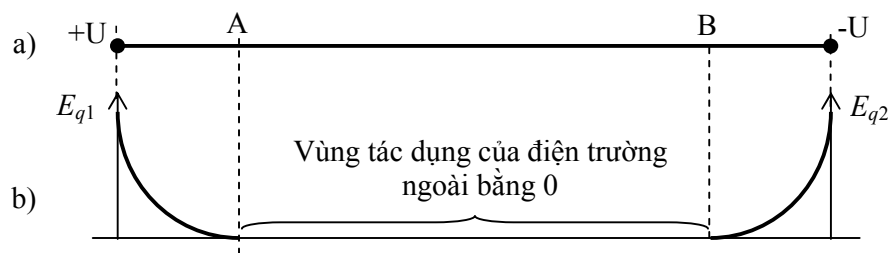
ở đây  $k_C = 1/4\pi\epsilon_0 \approx 9 \times 10^9 \text{ N.m}^2/\text{C}^2$  – hằng số điện tĩnh;  $R$  – khoảng cách giữa 2 điện tích điểm. Nếu chia cả hai vế của (1) cho  $q_2$ , ta có cường độ điện trường  $E$  do điện tích  $q_1$  tạo ra:

$$E_{q_1} = \frac{F_C}{q_2} = k_C \frac{q_1}{R^2} \quad (2)$$

Tương tự như vậy với điện tích  $q_2$ , ta cũng có:

$$E_{q_2} = \frac{F_C}{q_1} = k_C \frac{q_2}{R^2} \quad (3)$$

Khi khoảng cách giữa các điện tích lớn hơn rất nhiều lần kích thước của các vật tích điện, các điện tích tương ứng cũng có thể coi là các điện tích điểm. Trên thực tế, các dây dẫn điện có đường kính rất nhỏ trong khi chiều dài có thể lớn hơn cả chục ngàn lần nên chúng thỏa mãn điều kiện này. Nếu bây giờ nối hai đầu của dây dẫn với hai cực của nguồn điện như trên Hình 4a, ta có thể thấy cường độ điện trường trên dọc dây dẫn có dạng tỷ lệ nghịch với bình phương khoảng cách tới các đầu dây dẫn theo các biểu thức (2) và (3) và được biểu diễn trên Hình 4b.



Hình 4. Phân bố cường độ điện trường dọc theo chiều dài dây dẫn điện

Từ đây cho thấy chỉ có hai đoạn đầu và cuối dây dẫn là chịu ảnh hưởng của điện trường, còn ở khoảng giữa AB, cường độ điện trường bằng không nên các điện tử chỉ chuyển động hỗn loạn? Khi đó làm sao có được dòng điện duy trì thường xuyên và như nhau trên toàn bộ tiết diện của dây dẫn như đã thể hiện trên Hình 1b? Kể cả việc đã tính đến khả năng tại đầu âm ( $-U$ ) của nguồn điện luôn luôn cung cấp một số lượng nhất định các điện tử vào cho dây dẫn thì chúng cũng chỉ có động năng ban đầu do tác dụng của điện trường thôi, còn sau đó, chúng vẫn chuyển động tự do?

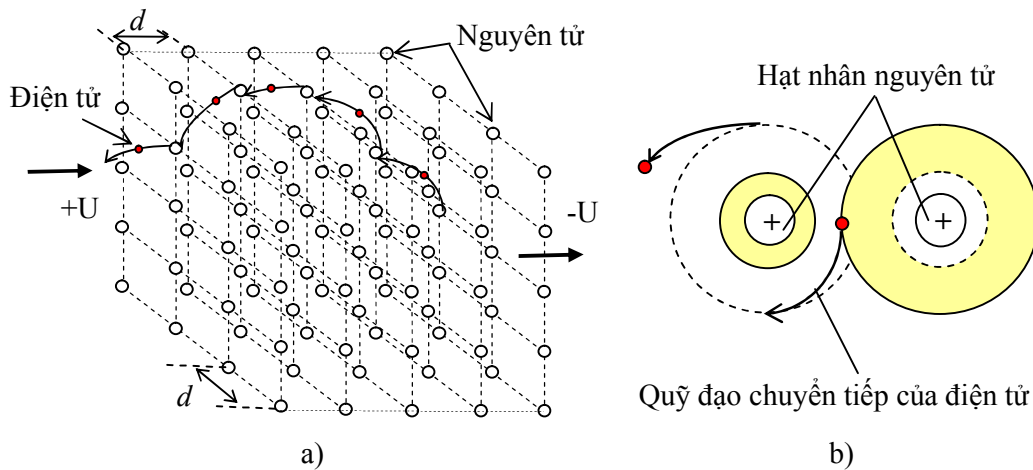
Vậy, rút cuộc bản chất của dòng điện trong kim loại thật ra là gì? Tại sao với nhiều bất cập đến vậy mà trong suốt hàng thế kỷ qua mà người ta vẫn làm ngơ?

## 2) Bản chất của dòng điện trong kim loại

Kim loại nói riêng và các chất rắn nói chung, đều có cấu trúc dạng mạng tinh thể theo đó, tại các nút mạng là các nguyên tử như đã nói ở trên, nhưng có một điều khác biệt ở chỗ tất

cả các nguyên tử đều trong trạng thái trung hòa về điện chứ không có điện tử nào của chúng bị thoát ra thành điện tử tự do cả; vì vậy, bản thân chúng cũng không phải là các ion dương “+” như mô hình đã được chấp nhận đó (xem Hình 1a).

Ta sẽ xem xét mô hình khác dưới đây như được thể hiện ở Hình 5. Khi không có điện trường ngoài, các điện tử này vẫn chuyển động theo quỹ đạo của mình trong nguyên tử. Dưới tác động của điện trường ngoài, những điện tử của các nguyên tử nằm gần nhất với điện cực “+” của nguồn điện sẽ chịu tác động của điện trường ngoài mạnh nhất và bị điện cực này bứt ra khỏi nguyên tử, bay về phía điện cực “+” đó (xem Hình 5a).



Hình 5. Chuyển động của điện tử trong mạng tinh thể dưới tác động của điện trường

Khi đó, nguyên tử bị mất điện tử mới trở thành ion dương “+”, tức là có thể xem như nó là một “điện cực +” mới đối với các nguyên tử lân cận kề cận (xem Hình 5b). Chính vì thế, nó có thể bứt được điện tử lớp ngoài cùng của nguyên tử kế cận khi hội đủ điều kiện. Quá trình lại được diễn ra như với nguyên tử tiếp theo và sau đó là đối với các nguyên tử tiếp theo nữa... Cứ như thế cho đến điện cực “-” của nguồn. Tức là ở đây, không có các điện tử tự do nào chuyển động giữa hai điện cực nào cả, mà là sự chuyển động của các điện tử lớp ngoài cùng của nguyên tử này sang lớp ngoài cùng của nguyên tử kia, khi có điều kiện, và cứ thế tiếp nối giữa nguyên tử này với nguyên tử khác mà tạo ra dòng điện.

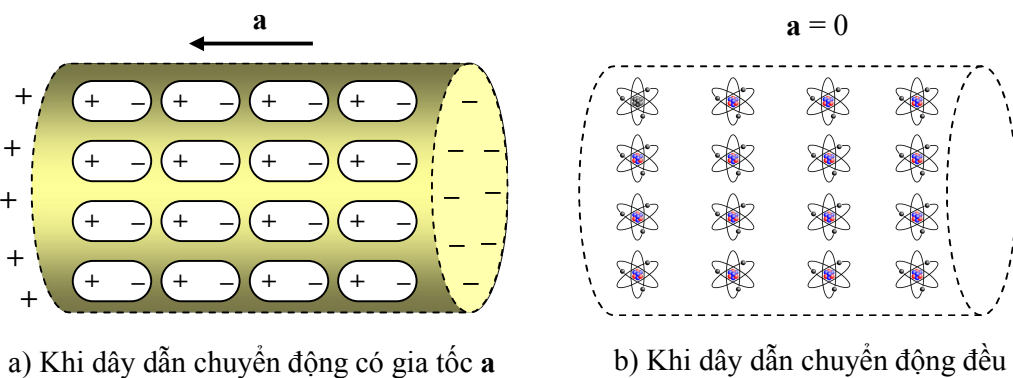
Ở đây, các điện tử bị bứt ra luôn có hướng chuyển động về phía nguyên tử đã bị mất điện tử trở thành ion dương “+”, chứ không hướng ra khoảng không gian tự do giữa các nguyên tử như đối với các điện tử tự do và hơn nữa, điện tử bị bứt ra không nhất thiết là chính điện tử vừa mới sát nhập vào nguyên tử mà có thể là một điện tử hóa trị khác của nguyên tử đó. Chính khoảng thời gian chờ đợi bước chuyển tiếp của điện tử từ nguyên tử này sang nguyên tử khác làm hạn chế tốc độ trung bình của điện tử đã gây nên cái gọi là “điện trở” cho dây dẫn. Vấn đề là ở chỗ mặc dù có tác động của điện trường ngoài, nhưng trạng thái của điện tử trong nguyên tử chưa đủ thích hợp cho bước chuyển tiếp thì điện tử vẫn tiếp tục quay xung quanh hạt nhân trên quỹ đạo của mình. Với mô hình này, tất cả các bất cập đã nói tới ở trên đều hoàn toàn được hóa giải.

Với bất cập thứ nhất, có thể thấy chính vì dòng điện trong dây dẫn không phải là dòng các điện tử tự do mà là dòng các điện tử dẫn của chính bản thân các nguyên tử, nên việc tương

tác giữa hai dòng điện trong hai dây dẫn khác nhau theo lực Lorenz kéo theo sự chuyển dời của các mạng tinh thể của cả hai dây dẫn như đã thấy trong thực tế là điều hiểu được.

Với bất cập thứ hai đối với ống cathode, dòng điện cathode chỉ xuất hiện khi cường độ điện trường ngoài phải lớn hơn cường độ điện trường trong nguyên tử là cũng rất phù hợp rồi.

Với bất cập thứ ba, liên quan tới thí nghiệm của Stewart và Tolman, có thể nhận thấy ngay rằng khi gia tốc cho cuộn dây đồng, người ta đã trực tiếp gia tốc cho các nguyên tử của mạng tinh thể, mà các điện tử dẫn của chúng ở xa hạt nhân nguyên tử nhất sẽ phản ứng chậm lại hơn một chút. Kết quả là các nguyên tử trong mạng tinh thể sẽ bị kéo dài ra, hình thành nên các dipole như được mô tả trên Hình 6; khi đó, hai đầu dây sẽ bị tích điện ngược chiều nhau. Nếu nối chúng bởi hai dây dẫn kim loại với hai đầu của điện kế như trên Hình 3a ở trên thì sẽ xuất hiện dòng điện  $i$ . Khi cuộn dây dẫn quay đều (gia tốc  $a = 0$ ), các nguyên tử đều trung hòa về điện nên điện tích trên hai đầu dây = 0 như được chỉ ra trên Hình 6b.



Hình 6. Mô hình của nguyên tử khi dây dẫn bị gia tốc

Tức là dòng điện trong thí nghiệm này cũng vẫn không phải là dòng của các điện tử tự do. Và chính điều này đã lý giải vì sao trong thí nghiệm, tốc độ thẳng của dây dẫn đạt tới 100 m/s, nhưng tốc độ của điện tử tính ra chỉ vào khoảng  $10^{-3}$  m/s, vì đây chỉ là tốc độ quy đổi của dòng “điện tích” gây ra bởi các dipole chứ không phải là tốc độ chuyển dịch thật của các điện tử trong mạng tinh thể, do không có điện trường ngoài.

Với bất cập thứ tư, cũng hoàn toàn được hóa giải, vì mặc dù điện trường ngoài có bán kính tác dụng rất ngắn, chỉ ở phần hai đầu dây dẫn như đã thấy trên Hình 4b, nhưng cũng đủ để ion hóa các nguyên tử ở đây và do đó, sinh ra phản ứng dây chuyền từ hai đầu lan dần vào bên trong dây dẫn, cho dù dây dẫn có dài đến bao nhiêu.

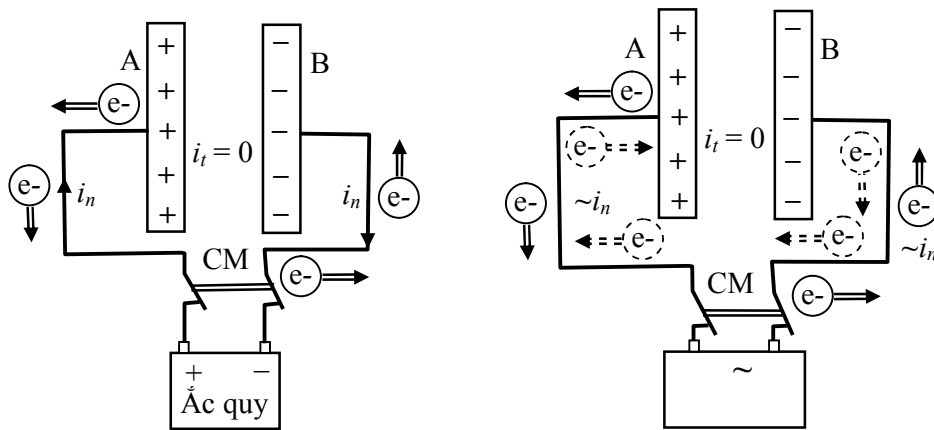
Tóm lại, bản chất dòng điện trong kim loại là dòng các điện tử, nhưng không phải là điện tử tự do, mà là các điện tử ở lớp ngoài cùng của nguyên tử (còn được gọi là các điện tử dẫn – chúng có mối liên kết yếu nhất với hạt nhân của nguyên tử đó) chuyển động lần lượt từ nguyên tử này đến nguyên tử khác. Nếu các nguyên tử trong mạng tinh thể bị dao động do nhiệt độ, chúng sẽ cản trở quá trình giải phóng và tiếp nhận điện tử của nhau trong chuỗi nối tiếp vừa nói và kết quả là sinh ra điện trở cho dây dẫn.

Đối với các vật liệu là chất rắn không phải kim loại, nhưng có cấu trúc tinh thể, sẽ có khả năng dẫn điện theo cùng một cách thức như đã được trình bày ở trên; song tùy thuộc vào

điều kiện cụ thể mà điện trở có thể khác nhau từ rất nhỏ tới rất lớn, mà vật lý chia ra thành 3 nhóm: Chất dẫn điện, chất bán dẫn và chất cách điện. Việc coi dòng điện trong chất bán dẫn là chuyển động của các điện tử và lỗ trống [1], về thực chất, cũng chính là những gì đã nói tới ở trên đối với kim loại, chỉ có điều cấu trúc mạng tinh thể, cũng như nguyên tử, có những điểm khác biệt đã tạo ra đặc thù riêng cho chúng.

Riêng đối với dòng điện trong chất điện môi (chất cách điện) được coi là “dòng điện dịch” của các dipole là hoàn toàn không đúng, vì kể cả với một tụ điện trong chân không, không cần bất cứ chất điện môi nào, dường như cũng xuất hiện “dòng điện” kia mà? Mà đã là chân không rồi thì làm gì còn có dipole nào nữa? Đồng ý là có thể có một số điện tử trong chất điện môi có thể bị điện trường ngoài kéo ra khỏi tụ điện nên sẽ xuất hiện cái gọi là dòng điện “rò” nhỏ hơn dòng điện chủ đạo ở mạch ngoài rất nhiều. Ta sẽ minh họa điều này bằng hai thí dụ cụ thể sau:

- Trong trường hợp điện trường ngoài là một chiều gây bởi một ắc quy, má tụ điện A được nối với cực “+” của ắc quy nhờ một đoạn dây dẫn kim loại, qua tiếp điểm của bộ chuyển mạch CM, còn má tụ điện B nối với cực “-” của ắc quy đó nhờ một đoạn dây dẫn kim loại, qua tiếp điểm kia của bộ chuyển mạch đó như trên Hình 7a.



a) Điện trường 1 chiều

b) Điện trường xoay chiều

Hình 7. Trong chất cách điện, không có dòng điện đi qua

Khi đóng chuyển mạch CM, cực “+” của ắc quy bứt các điện tử trên má A của tụ điện và kéo chúng về nguồn điện, khiến má A này còn dư lại các ion dương “+”; còn cực “-” của ắc quy vốn thừa các điện tử nên các điện tử này bị đẩy lên má B của tụ điện, khiến má B này tích tụ điện tích âm “-”. Ở đây, ta bỏ qua không nói đến quá trình xảy ra bên trong dây dẫn kim loại từ ắc quy tới các má tụ điện, vì bản chất dòng điện trong kim loại đã được biết đến ở trên rồi. Trong quá trình chuyển dịch các điện tử đó, hình thành nên cái gọi là dòng điện, ký hiệu là  $i_n$ . Dòng điện này chỉ có một chiều và chỉ xuất hiện vào khoảng thời gian quá độ khi đóng chuyển mạch CM. Có thể thấy không hề có một “dòng điện” nào đúng nghĩa đi qua khoảng giữa hai má tụ điện cả ( $i_t = 0$ ).

- Còn đối với dòng điện xoay chiều, lúc má A tụ điện có điện áp “+”, còn má B có điện áp âm “-” chuyển động của điện tử cũng tương tự như vậy (trên Hình 7b ký hiệu các điện tử

này giống như các điện tử trên hình 6a); nhưng khi nguồn xoay chiều đổi lại cực âm thành dương và dương thành âm thì các điện tử lại chuyển động theo chiều ngược lại, nhưng cùng trên đoạn dây dẫn ấy thôi (trên Hình 7b ký hiệu các điện tử này bằng vòng tròn với mũi tên nét đứt). Ngay cả trong trường hợp này, dòng điện cũng chỉ xảy ra ở mạch ngoài của tụ điện chứ không liên quan gì tới môi chất (hoặc chân không) ở bên trong tụ điện cả ( $i_t = 0$ ). Dòng điện thực sự có trong môi chất chỉ là dòng điện “rò” mà thôi.

Hay nói cách khác, dòng điện không phải bao giờ cũng đòi hỏi mạch phải khép kín cả. Việc đưa ra khái niệm “dòng điện dịch” trong chất điện môi chỉ để “hợp thức” các định luật về mạch điện dùng cho tính toán như định luật Ohm, định luật Kirchoff...[4], nhưng hoàn toàn không có ý nghĩa vật lý. Điều này cũng tương tự như khái niệm “từ trường” được đưa vào để thuận tiện cho tính toán, chứ không có bản chất độc lập như điện trường, vì nó chỉ là cách gọi khác đi của “trường điện động” vốn tuân theo định luật Ampere, để phân biệt với “trường điện tĩnh” tuân theo định luật Coulomb mà thôi.

### 3) Kết luận

- Trong kim loại, không có điện tử tự do.
- Dòng điện trong kim loại nói riêng và dòng điện trong chất rắn nói chung đều có chung một bản chất là dòng chuyển dịch từ nguyên tử này đến nguyên tử khác của các điện tử ở quỹ đạo ngoài cùng của nguyên tử cấu thành nên vật liệu, dưới tác động của điện trường ngoài.
- Dòng điện trong mạch điện không nhất thiết phải khép kín.

## TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1] N.I. Ka-ri-an-kin, K.N. Bu-xtrov, P.X. Ki-rê-ev. (Phạm Quang Khang dịch). *Sách tra cứu tóm tắt về vật lý*. NXB Khoa học & Kỹ thuật, Hà Nội, 2004.
- [2] Vũ Huy Toàn. *Xét lại thí nghiệm khe Young*. Hà Nội, 2012.  
<http://vuhuytoan.files.wordpress.com/2009/09/xet-lai-thi-nghiem-khe-young.pdf>
- [3] James Munro. Creating a version of the Tolman-Stewart experiment. Department of Physics, Ithaca College. 2013.
- [4] Л. А. Бесонов. *Теоретические основы электро-техники*. Москва. 1976.