



Sử dụng từ trường có dạng tập trung trong điều khiển dòng hạt plasma

Controlling particle transport using different localized magnetic fields

Lê Thị Quỳnh Trang^{a,b*}

Le Thi Quynh Trang^{a,b*}

^a*Viện Nghiên cứu và Phát triển Công nghệ cao, Đại học Duy Tân, Đà Nẵng, Việt Nam*

^a*Institute of Research and Development, Duy Tan University, Da Nang, 550000, Vietnam*

^b*Khoa Môi trường và Khoa học tự nhiên, Trường Công nghệ và Kỹ thuật, Đại học Duy Tân, Đà Nẵng, Việt Nam*

^b*Faculty of Environment and Natural Sciences, School of Engineering and Technology, Duy Tan University, Da Nang, 550000, Vietnam*

(Ngày nhận bài: 23/01/2025, ngày phản biện xong: 19/02/2025, ngày chấp nhận đăng: 03/03/2025)

Tóm tắt

Từ trường có dạng tập trung, đảo ngược có thể dùng để điều khiển sự dịch chuyển dòng hạt plasma trong các thiết bị từ. Để hiểu sâu hơn về phương pháp này, những độ lớn khác nhau của từ trường có dạng tập trung này được nghiên cứu. Hệ mô phỏng được xây dựng dựa trên mô hình Particle-in-Cell. Hệ bao gồm các dòng hạt electron và ion. Kết quả cho thấy mối liên hệ mật thiết giữa độ lớn của từ trường có dạng tập trung và mật độ, thông lượng của các hạt plasma khi tiến tới bề mặt kim loại.

Từ khóa: Từ trường tập trung; dòng hạt; thông lượng; nhiệt thông.

Abstract

In magnetic devices, the localized reversed magnetic field can be used to control the transport of the particles. To gain deeper understanding of the effects of this method, we consider the effects caused by different strengths of the localized reversed magnetic field. The Particle-in-Cell simulation is used for the simulation model. The simulation box consists of the flow of electrons and ions. The results show a close relationship between the strength of the localized magnetic field and particle density, and particle flux when particles reach the materials.

Keywords: localized magnetic field; particle transport; particle flux; heat flux.

1. Giới thiệu

Ảnh hưởng của từ trường lên chuyển động của các hạt plasma được nghiên cứu phổ biến và rộng rãi trong nhiều lĩnh vực khoa học liên quan tới vật lý năng lượng cao như nghiên cứu chuyển động của plasma trong các tàu vũ trụ hay trong

các lò phản ứng nhiệt hạch. Khi có sự xuất hiện của từ trường, các hạt mang điện tích sẽ di chuyển theo quỹ đạo xoay quanh các đường sức từ. Ở các tàu vũ trụ hay các máy gia tốc, sự hội tụ và phân kỳ của các đường sức từ đóng vai trò quan trọng cho việc dẫn đường, tăng tốc chuyển động của các hạt plasma và mở rộng kích thước

*Tác giả liên hệ: Lê Thị Quỳnh Trang

Email: letquynhtrang4@duytan.edu.vn

của dòng hạt [1-3]. Trong các lò nhiệt hạch, những đường sức từ khép kín đóng vai trò định hình hình dạng của các dòng hạt plasma, ngăn cho các hạt mang năng lượng cao va chạm vào vỏ lò để tránh ăn mòn hay hư hại chúng. Trong khi đó, những đường sức từ hở nơi mà cuối (hoặc đầu) của mỗi đường là các bề mặt kim loại, có tác dụng dẫn đường cho những hạt mang năng lượng, tạo ra từ phản ứng nhiệt hạch thoát ra từ khu vực trung tâm đến khu vực chân của vỏ lò [4-8]. Từ trường đóng vai trò quan trọng trong việc điều khiển sự dịch chuyển của các dòng hạt mang điện tích. Việc tìm hiểu về tương tác, ảnh hưởng của từ trường tới dòng hạt mang điện đóng góp vai trò quan trọng trong việc nghiên cứu chuyển động của các hạt plasma. Từ đó cho phép dễ dàng điều khiển, kiểm soát dòng hạt plasma trong các thiết bị.

Hiểu được tầm quan trọng này, rất nhiều nhóm khoa học đã nghiên cứu cả thực nghiệm lẫn mô phỏng về mối tương quan giữa hai đại lượng này [9-13]. Một trong những ứng dụng quan trọng trong việc hiểu rõ mối tương quan này là biến đổi cấu trúc từ trường vốn có của thiết bị nhằm thay đổi, điều hướng dòng nhiệt và giảm tải dòng nhiệt lớn tới bề mặt kim loại với mục đích bảo vệ bề mặt của các lò phản ứng nhiệt hạch, vỏ lò tàu vũ trụ. Trong một công bố trước đó, nhóm chúng tôi sử dụng mô hình một chiều để mô phỏng, nghiên cứu ảnh hưởng của từ trường có dạng tập trung, đảo ngược tới chuyển động của các hạt plasma. Kết quả chỉ ra rằng, từ trường có dạng tập trung này giúp giảm tải đáng kể lượng dòng nhiệt mang năng lượng cao tới bề mặt kim loại [14].

Nhằm mục đích hiểu rõ thêm ảnh hưởng của từ trường có dạng tập trung, đảo ngược tới dòng hạt plasma, trong bài báo này, hệ quả thu được từ những độ lớn khác nhau của từ trường có dạng tập trung sẽ được xem xét. Mô hình mô phỏng Particle-in-Cell (PIC) một chiều được sử dụng để xác định ảnh hưởng của những từ trường tập

trung với độ lớn khác nhau tới sự chuyển động của dòng hạt electron và ion mang nguồn năng lượng cao tới tiếp xúc với kim loại. Giá trị của dòng nhiệt, dòng hạt tới bề mặt kim loại được đem đi so sánh. Phần 2 đề cập tới mô hình sẽ được sử dụng cho bài toán mô phỏng trong khi phần 3 kết quả thu được từ mô phỏng sẽ được đưa ra và giải thích. Kết luận về ảnh hưởng của sử dụng những độ lớn khác nhau của từ trường tập trung, đảo ngược được đề cập ở phần 4.

2. Mô hình mô phỏng

Xét một đoạn thẳng dài 0.1m tính từ bề mặt kim loại nơi mà dòng hạt plasma sẽ chạy qua. Từ một hệ trục ban đầu, dòng nhiệt mang năng lượng cao bao gồm hạt electron và ion được bơm liên tục vào khu vực đang xét từ bên trái. Dòng hạt này sẽ di chuyển bên trong vùng đang xét dọc theo các đường sức từ từ phía nguồn tới bề mặt kim loại (xét chiều từ trái qua phải). Giả sử rằng, khi các hạt bị thấm thấu ăn sâu vào kim loại, chúng sẽ bị loại bỏ ra khỏi phép mô phỏng. Số lượng hạt electron và ion được thêm vào hệ trong mỗi bước nhảy thời gian sao cho thông lượng của chúng tại điểm nguồn luôn luôn không đổi theo thời gian. Do đó, số lượng electron và ion được thêm vào hệ không giống nhau và có giá trị khác nhau vào từng thời điểm. Bởi vì thông lượng phụ thuộc và mật độ và vận tốc của hạt nên số lượng hạt được thêm vào này phụ thuộc vào vận tốc của hạt. Nhiệt độ tại nguồn tại thời điểm thêm vào hệ ban đầu của chúng ($k_B T_0$) có giá trị lần lượt là 100 eV và 50eV cho electron và ion. Vận tốc của hạt được tính theo nhiệt độ theo biểu thức $v = \sqrt{k_B T/m}$, trong đó m là khối lượng của hạt, k_B là hằng số Boltzmann.

Không có sự va chạm đàn hồi nào giữa các hạt được thực hiện trong mô phỏng này. Các hạt di chuyển bên trong hệ nhờ vào lực Lorentz và lớp vỏ bọc điện thế được hình thành ở trước bề mặt kim loại. Lực Lorentz tác dụng lên mỗi hạt phụ thuộc vào vận tốc của hạt và điện trường, từ trường có trong hệ. Điện trường sẽ tự phát sinh

khi có sự chênh lệch dịch chuyển giữa dòng hạt ion và electron. Đây là một lợi thế khi sử dụng phương pháp mô phỏng PIC. PIC có thể giải quyết các bài toán liên quan tới sự tự phát sinh của điện trường và từ trường có trong hệ mà những phương pháp khác khó có thể làm được. Trong bài báo này, hai trường hợp sẽ được nghiên cứu: a) từ trường là hằng số không phụ thuộc vào thời gian hay không gian (gọi tắt là từ trường đều hay trường hợp ban đầu), b) từ trường có dạng tập trung đảo ngược (chỉ phụ thuộc vào không gian, không phụ thuộc vào thời gian). Trong trường hợp từ trường đều, độ lớn của từ trường được giả sử bằng 0.2 T theo phương x đang xét. Không có giá trị của từ trường theo các phương còn lại. Trong trường hợp sử dụng từ trường tập trung đảo ngược, đồ thị của từ trường này được hiển thị tại Hình 1. Phương trình mô phỏng của từ trường được sử dụng ở đây tương tự với phương trình từ trường trong nghiên cứu trước đây [14]. Từ trường dạng tập trung này được thêm vào theo phương y. Trong báo cáo này, ảnh hưởng của việc sử dụng những độ lớn khác nhau của từ trường tập trung tới sự dịch chuyển của các hạt electron và ion được xem xét. Bốn vị trí mà từ trường có giá trị cực đại gọi là bốn điểm tiêu biểu. Những giá trị này hình thành nên bốn “bức tường”. Những bức tường này kết hợp với nhau tạo nên các khu vực “buồng giam” các hạt plasma. Ba độ lớn khác nhau của từ trường tập trung sử dụng trong bài báo này được mô tả theo ba màu khác nhau ở Hình 1. Sự khác nhau về hình thái của từ trường cho trường hợp khác nhau này chủ yếu tập trung tại khu vực các “buồng giam” (như Hình 1). Đồ thị màu đỏ biểu thị từ trường trong trường hợp có độ lớn thấp nhất, màu xanh nước biển đại diện trường hợp có độ lớn trung bình, màu hồng biểu diễn cho trường hợp từ trường tập trung có độ lớn cao nhất trong cả ba trường hợp xem xét, kí hiệu lần lượt là trường hợp (TH) 1, 2, 3 theo thứ tự độ lớn từ trường tăng dần. Ba màu này sẽ được sử dụng chung cho các kết quả về điện thế, nhiệt

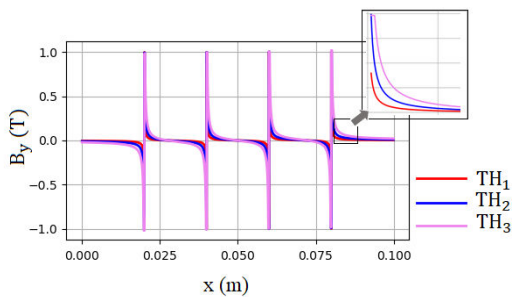
thông, v.v... thu được từ quá trình mô phỏng được chỉ ra ở phần tới. Ngoài ra, màu xanh lá cây đại diện cho trường hợp sử dụng từ trường đều (không có sự tồn tại của từ trường tập trung). Các kết quả ở phần 3 sẽ so sánh kết quả mô phỏng thu được từ bốn trường hợp này.

Thông số bước nhảy thời gian, bước nhảy không gian được sử dụng sao cho thỏa mãn điều kiện để mô hình PIC đạt được độ chính xác cao và bền vững. Mô hình mô phỏng PIC được mô tả chi tiết ở nhiều tài liệu tham khảo [15-18]. Ở bài báo này, mô hình một chiều được xem xét. Riêng vận tốc và từ trường của hệ được xét theo cả ba chiều không gian vì hạt có thể dịch chuyển dựa vào lực Lorentz. Trong biểu thức biểu diễn lực Lorentz, tích có hướng của vector vận tốc và từ trường được bao gồm. Do đó, để có thể tính chính xác độ lớn của lực Lorentz tác dụng lên mỗi hạt làm hạt di chuyển, vector vận tốc và từ trường được sử dụng theo cả ba chiều không gian. Các đại lượng còn lại như vị trí, điện thế, thông lượng và nhiệt thông được xét theo một chiều, chiều chuyển động của dòng hạt trực tiếp tới bề mặt vật liệu, gọi tắt là chiều x theo hệ trục tọa độ Descartes. Mặc dù các đại lượng đầu vào được sử dụng có giá trị nhỏ hơn nhiều so với giá trị thực tế nhưng các giá trị này đủ để hệ thu được kết quả mô phỏng hợp lý và đảm bảo kết quả phân tích các hiện tượng vật lý xảy ra trong hệ được khách quan.

3. Kết quả và thảo luận

Để đơn giản cho quá trình mô phỏng, điện thế tại vị trí gốc tọa độ được giả thiết bằng không. Điện thế ở các vị trí khác trong hệ được tính toán thông qua phương trình Poisson có trong mô hình PIC. Khối lượng và vận tốc của electron và ion là khác nhau, ion nặng hơn ngàn lần so với các hạt electron nên di chuyển chậm hơn và khó khăn hơn so với các hạt electron. Do đó số lượng hạt electron bị mất đi khi tiếp xúc với bề mặt kim loại tại những thời điểm ban đầu cao hơn nhiều so với số hạt ion. Lớp điện thế âm được tạo thành

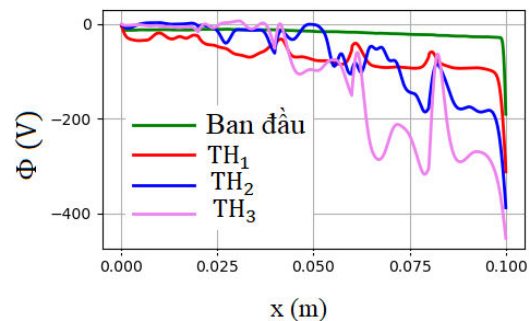
trước bề mặt kim loại để bảo vệ sự thất thoát của các hạt electron khi chúng tiến tới khu vực này. Hình 2 mô tả giá trị điện thế của hệ tại thời điểm cân bằng, thời điểm mà hầu hết các giá trị vật lý có trong hệ gần như không đổi theo thời gian. Gần vị trí bơm hạt, $x=0$, điện thế giữa các trường hợp gần như là giống nhau. Không có sự chênh lệch lớn về mật độ của electron và ion trong khu vực này. Sự khác nhau giữa các trường hợp xảy ra ở khu vực gần với điểm cuối trước bề mặt kim loại, tại $x = 0.1$ m. Trong trường hợp ban đầu khi sử dụng từ trường đều, đồ thị điện thế có sự biến



Hình 1. Từ trường tập trung được sử dụng cho hệ mô phỏng. Có ba TH với ba độ lớn khác nhau của từ trường được xem xét. Theo thứ tự từ màu đỏ tới xanh nước biển, màu hồng, độ lớn của từ trường tăng dần, kí hiệu lần lượt là TH 1,2,3.

Theo phương trình Poisson, điện thế của hệ được tính toán dựa trên sự chênh lệch mật độ của electron và ion. Để hiểu rõ thêm về nguyên nhân thay đổi của điện thế, mật độ của hạt được xem xét. Hình 3 chỉ ra mật độ của các hạt electron (Hình a) và ion (Hình b) tại thời điểm cân bằng. Trong trường hợp sử dụng từ trường đều (đường màu xanh), ngoại trừ 2 khu vực gần sát điểm đầu và điểm cuối của hệ nơi mà mật độ của electron và ion giảm đột ngột, mật độ của các hạt electron và ion giảm đều trong suốt chiều dài của hệ. Do sự hình thành lớp vỏ bọc điện thế ở điểm cuối của hệ trước bề mặt vật liệu nhằm ngăn chặn sự thất thoát của các hạt, mật độ của các hạt có xu hướng giảm dần từ vị trí điểm đầu vào tới khu

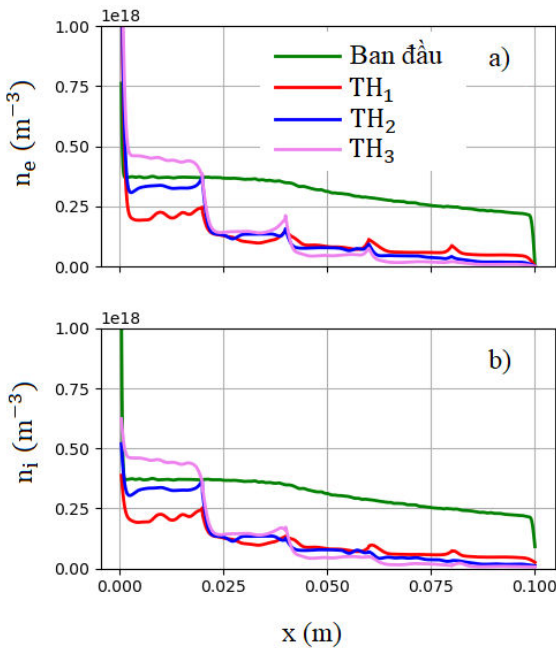
động lớn chỉ khi ở sát điểm cuối, nơi mà lớp vỏ bọc điện thế được hình thành để bảo vệ sự mất mát của hạt electron. Ở khu vực gần điểm cuối này, điện thế bắt đầu giảm mạnh nếu sử dụng từ trường tập trung có độ lớn càng cao. Do sự biến thiên của từ trường lớn, và số lượng hạt di chuyển trong khu vực này nhỏ, một vài nhiễu do mô phỏng xuất hiện gây nên dao động nhiều trong các hình. Kết quả này không ảnh hưởng tới chiều hướng giảm của dòng hạt hay mục đích của nghiên cứu nên những nhiễu mô phỏng này đang nằm trong khoảng có thể chấp nhận được.



Hình 2. Điện thế thu được tại thời điểm cân bằng qua các trường hợp khác nhau. Màu xanh lá cây đại diện cho trường hợp sử dụng từ trường đều. Màu đỏ (TH1), xanh nước biển (TH2) và màu hồng (TH3) lần lượt đại diện cho trường hợp sử dụng từ trường tập trung với độ lớn từ trường tăng dần.

vực này. Việc giảm đột ngột của electron và ion ngay sát điểm cuối cũng do sự hình thành lớp vỏ bọc điện thế gây nên. Đối với vùng sát điểm đầu vào, việc giảm đột ngột mật độ hay số lượng các hạt electron và ion dựa trên điều kiện biên ban đầu. Tại khu vực này tập trung lượng lớn electron và ion được thêm vào hệ mỗi thời điểm cũng như electron và ion bị đổi chiều để quay ngược lại vị trí ban đầu. Khi từ trường tập trung được thêm vào hệ, mật độ của các hạt electron và ion có trong hệ thay đổi. Các gương từ trường, hay các “buồng giam” hạt electron và ion được tạo ra từ từ trường tập trung này tham gia vào hoạt động điều khiển luồng hạt. Các hạt electron và ion được thêm vào hệ từ phía bên trái, di

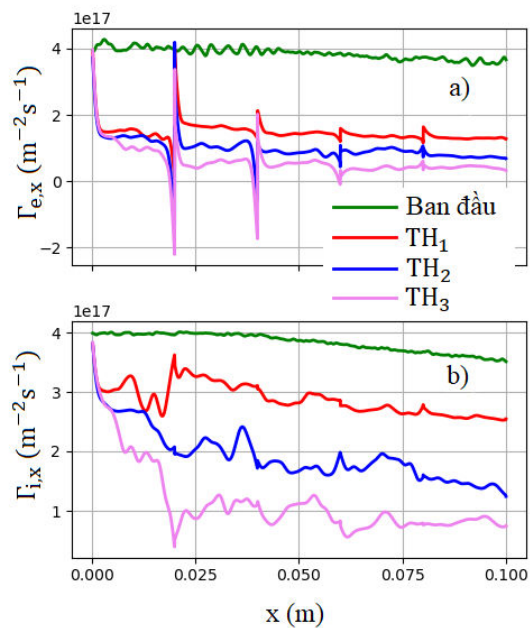
chuyển bên trong hệ. Khi chúng gặp phải các gương từ trường, hầu hết chúng sẽ bị giữ lại bên trong các khu vực này. Chỉ có những hạt electron hay ion nào mang vận tốc song song cực cao (vận tốc song song là vận tốc có chiều song song với vector từ trường) có thể vượt qua khỏi những “bức tường của buồng giam” để tiến xa hơn trong hệ đi về phía kim loại. Do đó, càng đi xa hơn so với vị trí điểm đầu vào, số lượng hạt electron và ion giảm theo cấp bậc. Bên trong mỗi buồng giam, electron và ion có thể di chuyển tự do nên mật độ gần như là đường thẳng trong khu vực này. Chính nhờ vào sự xuất hiện của các



Hình 3. Mật độ của electron (Hình a) và ion (Hình b) trong cả bốn trường hợp sử dụng từ trường đều và từ trường tập trung. Trường hợp 1 là trường hợp từ trường tập trung có độ lớn nhỏ nhất.

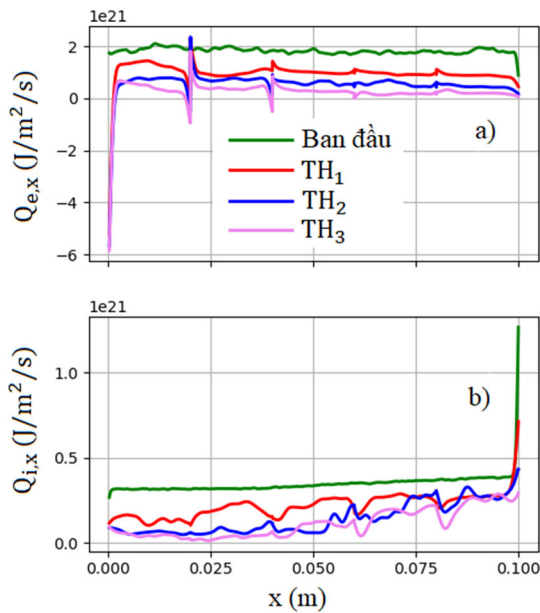
Tại vị trí $x=0$, thông lượng của hạt được giả sử bằng nhau cho electron và ion và bằng nhau trong cả bốn trường hợp từ trường khác nhau đang xem xét. Khi số lượng electron và ion tiến tới điểm cuối khác nhau trong cả bốn trường hợp dựa theo đồ thị Hình 3, thông lượng theo phương x của chúng cũng khác nhau. Hình 4 cho ta thấy, khi sử dụng từ trường tập trung có độ lớn càng cao thì thông lượng của chúng càng giảm so với trường hợp sử dụng từ trường đều. Tại trường hợp 3 (đồ

buồng giam hạt, số lượng electron và ion có thể tiến tới kim loại giảm mạnh so với trường hợp từ trường đều. Xét trong ba trường hợp sử dụng từ trường tập trung, kết quả chỉ ra rằng, khi sử dụng từ trường tập trung có độ lớn càng cao thì sự giam giữ của electron và ion diễn ra trong các buồng xảy ra càng hiệu quả. Hệ quả kéo theo số lượng cả electron và ion có thể tiến tới về mặt vật liệu tỉ lệ nghịch với độ lớn từ trường tập trung. Giá trị từ trường tập trung càng lớn thì càng có ít hạt electron và ion tiến tới bề mặt kim loại. Điều này sẽ ảnh hưởng tới thông lượng và nhiệt thông của dòng hạt.



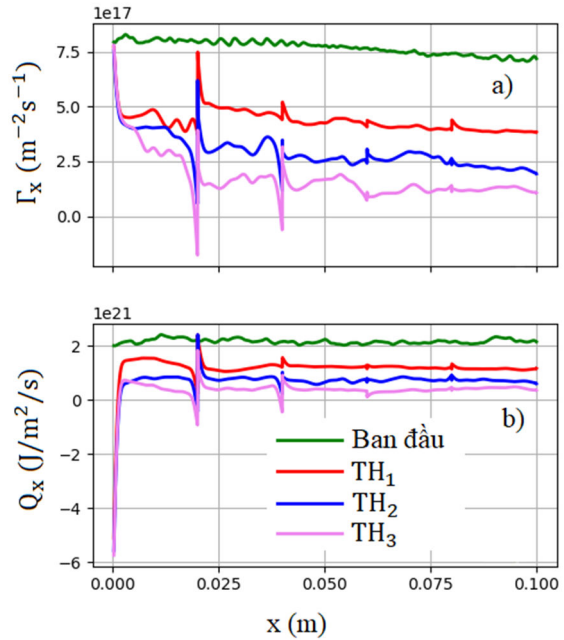
Hình 4. Thông lượng theo phương x của electron (Hình a) và ion (Hình b) trong bốn trường hợp sử dụng từ trường đều và từ trường tập trung. Trường hợp 3 là trường hợp từ trường tập trung có độ lớn lớn nhất.

thị biểu diễn theo đường màu hồng) khi từ trường tập trung có độ lớn cao nhất, thông lượng của các hạt giảm đáng kể nhất. Do ion có bán kính Larmor lớn hơn nhiều lần so với electron nên quỹ đạo bước nhảy không gian của nó lớn hơn so với ion trong cùng một điều kiện. Vì vậy, đồ thị của ion (Hình 4b) có nhiều nhiễu hơn và thông lượng tại bốn điểm tiêu biểu (điểm mà tại đó từ trường có độ lớn cực đại) ít biến động hơn so với thông lượng của electron (Hình 4a).



Hình 5. Nhiệt thông theo phương x của electron (Hình a) và ion (Hình b) trong cả bốn trường hợp sử dụng từ trường đều và từ trường tập trung. Màu hồng hiển thị cho trường hợp từ trường tập trung có độ lớn lớn nhất.

Tương tự giống như thông lượng, sự giảm của nhiệt thông của electron và ion theo phương x của electron và ion cũng tỉ lệ thuận với độ lớn của từ trường tập trung (như Hình 5). Electron có vận tốc lớn hơn so với ion nên giá trị nhiệt thông của nó lớn hơn. Do lớp vỏ bọc điện thế được hình thành, chúng giúp ngăn chặn các hạt electron và thu hút thêm các hạt ion tiến tới khu vực này, thông lượng của electron có xu hướng giảm dần khi tiến dần về bề mặt kim loại trong khi thông lượng của ion tăng dần. Khi có sự xuất hiện của từ trường có dạng tập trung, dựa vào phân bố mật độ của các hạt; số lượng hạt electron và ion tiến dần về điểm cuối giảm đáng kể, nhiệt thông của chúng giảm theo. So sánh giữa ba trường hợp sử dụng độ lớn khác nhau của từ trường tập trung, tương tự như thông lượng và mật độ, nhiệt thông theo phương x giảm dần khi độ lớn của từ trường tập trung tăng dần. Tổng thông lượng và nhiệt thông theo phương x của hệ được mô tả ở Hình 6. Hệ chỉ bao gồm hạt electron và ion nên giá trị này bằng tổng giá trị của các hạt electron và ion riêng lẻ. Thông lượng của electron và ion đều giảm đều với cùng một



Hình 6. Tổng thông lượng (Hình a) và nhiệt thông (Hình b) theo phương x của hệ trong các trường hợp sử dụng từ trường khác nhau. Màu đỏ đại diện cho trường hợp từ trường tập trung có độ lớn nhỏ nhất.

xu hướng nên tổng thông lượng của nó cũng biểu diễn với giá trị tương tự. Khi độ lớn từ trường tăng lên, thông lượng tiến tới kim loại của các hạt giảm xuống. Xét đồ thị Hình 6b biểu diễn giá trị nhiệt thông của hệ, sự giảm của nhiệt thông cũng phụ thuộc vào độ lớn của từ trường tập trung tương tự như thông lượng. Hệ mô phỏng đang xét là hệ cô lập, không có sự va chạm nào được đem vào tính toán. Tại thời điểm cân bằng, tổng năng lượng, động năng của hệ được bảo toàn. Không có sự mất mát năng lượng trong hệ. Do đó, mặc dù nhiệt thông của electron theo phương x giảm (Hình 5a) trong khi nhiệt thông của ion tăng mạnh (Hình 5b) ngay trước bề mặt kim loại, tổng nhiệt thông hệ khi tiến tới kim loại không có sự biến đổi tăng (giảm) đột ngột này. Đại lượng giảm xuống của electron và tăng lên từ ion được bù trừ vào nhau.

4. Kết luận

Trong nghiên cứu này, ảnh hưởng của độ lớn từ trường tập trung tới chuyển động của các hạt electron và ion đã được phân tích bằng cách sử dụng hệ mô phỏng được xây dựng dựa trên mô

hình một chiều không gian Particle-in-Cell. Kết quả mô phỏng cho phép kết luận rằng độ lớn của từ trường có dạng tập trung ảnh hưởng tới các đại lượng vật lý của electron và ion. Số lượng hạt bị giam giữ bên trong hệ tỷ lệ thuận với độ lớn từ trường tập trung được thêm vào. Do đó, mật độ, thông lượng và nhiệt thông của hệ giảm khi sử dụng từ trường tập trung có độ lớn càng cao. Kết quả này cung cấp thêm minh chứng rõ ràng trong việc sử dụng từ trường tập trung để điều khiển chuyển động của các hạt electron và ion chạy trong các thiết bị từ.

Lời cảm ơn

Nghiên cứu trong bài báo này được triển khai trong thời gian theo học nghiên cứu sinh của tôi tại Đại học SOKENDAI, Nhật Bản. Tôi xin được gửi lời biết ơn chân thành nhất tới những người đã hướng dẫn và giúp đỡ tôi hoàn thành đề tài này: GS. Yasuhiro Suzuki (Đại học Hiroshima, Nhật Bản), TS. Hiroaki Ohtani (NIFS, Nhật Bản), TS. Hiroki Hasegawa (NIFS), TS. Toseo Moritaka (NIFS).

Tài liệu tham khảo

- [1] Goebel, Dan M., Ira Katz, and Ioannis G. Mikellides. (2023). Fundamentals of electric propulsion. *John Wiley & Sons*.
- [2] Yamamoto, Naoji, et al. (2007). "Effects of magnetic field configuration on thrust performance in a miniature microwave discharge ion thruster." *Journal of Applied Physics* 102.12.
- [3] Wirz, Richard, and Dan Goebel. (2008). "Effects of magnetic field topography on ion thruster discharge performance". *Plasma Sources Science and Technology* 17.3: 035010.
- [4] Ariola, Marco, and Alfredo Pironti. (2008). *Magnetic control of tokamak plasmas*. Vol. 187. London: Springer.
- [5] Federici, G., et al. (2024). "Relationship between magnetic field and tokamak size—a system engineering perspective and implications to fusion development." *Nuclear Fusion* 64.3: 036025.
- [6] Wesson, John, and David J. Campbell. *Tokamaks*. Vol. 149. Oxford university press, 2011.
- [7] Hegna, C. C., et al. (1993). "Magnetic islands and their effects in Tokamak plasmas." *Plasma physics and controlled fusion* 35.8: 987.
- [8] Ribeiro, T. T., and B. Scott. (2005). "Tokamak turbulence computations on closed and open magnetic flux surfaces." *Plasma physics and controlled fusion* 47.10: 1657.
- [9] Dröge, Wolfgang. (2000). "Particle scattering by magnetic fields." *Space Science Reviews* 93.1: 121-151.
- [10] Malkov, V. N., and D. W. O. Rogers. (2016). "Charged particle transport in magnetic fields in EGSnrc." *Medical physics* 43.7: 4447-4458.
- [11] Puri, Ishwar K., and Ranjan Ganguly. (2014). "Particle transport in therapeutic magnetic fields." *Annual review of fluid mechanics* 46.1: 407-440.
- [12] Stoneking, M. R., et al. (1994). "Particle transport due to magnetic fluctuations." *Physical review letters* 73.4: 549.
- [13] Zhang, Shuaizhong, et al. (2020). "Controlled multidirectional particle transportation by magnetic artificial cilia." *ACS nano* 14.8: 10313-10323.
- [14] Le, T. et al. (2021). "Particle simulation of controlling particle and heat flux by magnetic field". *Plasma Fusion Res.* 16, 1401103–1401103.
- [15] Grigoryev, Y.N., Vshivkov, V.A. and Fedoruk, M.P. (2012). Numerical "particle-in-cell" methods: theory and applications. *Walter de Gruyter*.
- [16] Birdsall, C. K. & Langdon, A. B. (2004). *Plasma Physics Via Computer Simulation*, CRC Press, London.
- [17] Verboncoeur, J. P. (2005). "Particle simulation of plasmas: Review and advances". *Plasma Phys. Control. Fusion* 47, A231.
- [18] Tskhakaya, D. et al. (2007). "The particle-in-cell method". *Contrib. Plasma Phys.* 47, 563–594.