



(12) BẢN MÔ TẢ SÁNG CHẾ THUỘC BẢNG ĐỘC QUYỀN SÁNG CHẾ

(19) Cộng hòa xã hội chủ nghĩa Việt Nam (VN)
CỤC SỞ HỮU TRÍ TUỆ

(11)



1-0037936

(51)⁷ H05H 1/14; G21B 1/05; G21B 1/11;
H05H 1/16; H05H 1/12; G21B 1/00;
G21D 7/00

(13) B

(21) 1-2019-03089

(22) 15/11/2017

(86) PCT/US2017/061860 15/11/2017

(87) WO2018/093941 24/05/2018

(30) 62/422,525 15/11/2016 US

(45) 25/12/2023 429

(43) 26/08/2019 377A

(73) TAE Technologies, Inc. (US)

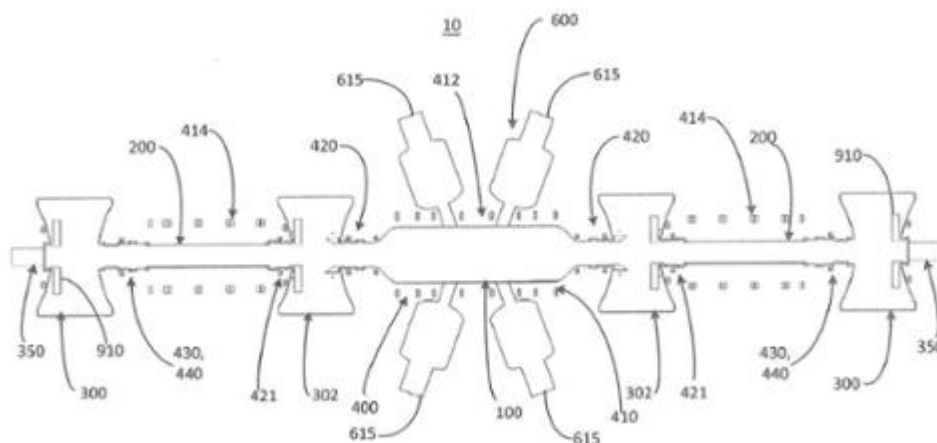
19631 Pauling, Foothill Ranch, California 92610, United States of America

(72) YANG, Xiaokang (US).

(74) Công ty Luật TNHH T&G (TGVN)

(54) PHƯƠNG PHÁP VÀ CÁC HỆ THỐNG SINH RA VÀ DUY TRÌ TỪ TRƯỜNG VỚI CẤU HÌNH ĐƯỢC ĐẢO TRƯỜNG

(57) Sáng chế đề cập đến các hệ thống và phương pháp để tạo điều kiện thuận lợi cho việc tạo ra và duy trì các FRC với độ ổn định cũng như hạt, năng lượng và thông lượng giảm giữ vượt trội và cụ thể hơn là, các hệ thống và phương pháp để tạo điều kiện thuận lợi cho việc tạo ra và duy trì các FRC với các năng lượng hệ thống được nâng cao và khả năng chống chịu tăng cường nhờ sử dụng sự phun chùm trung hòa và gia nhiệt electron sóng nhanh theo hàm điều hòa cao.



Lĩnh vực kỹ thuật được đề cập

Nói chung, sáng chế đề cập đến các hệ thống giam giữ plasma từ tính có cấu hình được đảo ngược trường (FRC) và cụ thể hơn là, đến các hệ thống và phương pháp để tạo điều kiện thuận lợi cho việc tạo ra và duy trì các FRC với độ ổn định cũng như việc giam giữ hạt, năng lượng và thông lượng vượt trội và cụ thể hơn là, đến các hệ thống và phương pháp để tạo điều kiện thuận lợi cho việc gia nhiệt electron sóng nhanh theo hàm điều hòa cao trong các FRC.

Tình trạng kỹ thuật của sáng chế

Cấu hình được đảo ngược trường (Field Reversed Configuration - FRC) phụ thuộc vào loại các kết cấu liên kết giữ plasma từ tính đã biết như các cuộn dây hình xuyên nhỏ gọn (compact toroid - CT). FRC có các trường từ cực trội và sở hữu các trường hình xuyên tự sinh ra bằng không hoặc nhỏ (xem M. Tuszewski, Nucl. Fusion **28**, 2033 (1988)). Sự hấp dẫn của cấu hình này là chúng có dạng hình học đơn giản để tạo thuận tiện cho việc xây dựng và vận hành, bộ chuyển hướng không bị hạn chế tự nhiên để tạo thuận tiện cho việc trích năng lượng và loại bỏ tro, và β rất cao (β là tỉ lệ của áp suất plasma trung bình so với áp suất trường từ trung bình bên trong FRC), tức là có mật độ năng lượng cao. β cao tự nhiên sẽ là các lợi thế cho việc vận hành một cách kinh tế và cho việc sử dụng của các nhiên liệu không có neutron tiên tiến như D-He³ và p-B¹¹.

Phương pháp truyền thống để tạo thành FRC sử dụng công nghệ ghim θ đảo ngược trường, tạo ra các plasma nóng, có mật độ cao (xem A. L. Hoffman and J. T. Slough, Nucl. Fusion **33**, 27 (1993)). Biến thể của nó là phương pháp dịch chuyển-bẫy mà trong đó plasma được tạo ra trong “nguồn” ghim theta được phun ngay trước hoặc sau ra khỏi một đầu cuối vào trong buồng giam. Sau đó plasmoid dịch chuyển bị bẫy giữa hai gương mạnh tại các đầu cuối của buồng (xem, ví dụ, H. Himura, S. Okada, S. Sugimoto, và S. Goto, Phys. Plasmas **2**, 191 (1995)). Khi đã ở trong buồng giam giữ, nhiều phương pháp gia nhiệt và điều khiển dòng điện có thể được sử dụng

như là việc phun chùm (trung hòa hoặc đã được trung hòa hóa), các từ trường quay, gia nhiệt RF ômic, v.v. Việc tách chức năng nguồn và chức năng giam giữ này tạo ra các ưu điểm kỹ thuật chủ yếu cho các lò phản ứng tổng hợp tiềm năng trong tương lai. Các FRC đã được chứng minh là đặc biệt mạnh mẽ, chống chịu được với biến dạng động, với sự dịch chuyển, và với các sự kiện va đập nghiêm trọng. Hơn nữa, chúng thể hiện xu hướng giả định là phù hợp với trạng thái plasma được ưu tiên (xem H. Y. Guo, A. L. Hoffman, K. E. Miller, and L. C. Steinhauer, *Phys. Rev. Lett.* **92**, 245001 (2004)). Tiến bộ đáng kể đã được tạo ra trong thập kỷ vừa qua liên quan tới việc phát triển các phương pháp hình thành FRC khác: hợp nhất các spheromak với các thành phần xoắn ốc được hướng theo hướng đối diện (xem Y. Ono, M. Inomoto, Y. Ueda, T. Matsuyama, và T. Okazaki, *Nucl. Fusion* **39**, 2001 (1999)) và bằng cách dẫn dòng với các từ trường quay (Rotating magnetic field - RMF) (xem I. R. Jones, *Phys. Plasmas* **6**, 1950 (1999)) cũng tạo ra thêm độ ổn định.

Hiện tại, kỹ thuật va chạm-hợp nhất, đã được đề xuất từ lâu (xem D. R. Wells, *Phys. Fluids* **9**, 1010 (1966)) đã phát triển một cách đáng kể: hai phần ghim theta tách biệt tại các đầu cuối đối diện của buồng giam giữ đồng thời sinh ra hai plasmoid và tăng tốc các plasmoid về phía nhau ở tốc độ cao; sau đó chúng va chạm tại trung tâm của buồng giam giữ và hợp nhất để tạo thành FRC phức hợp. Trong việc xây dựng và vận hành thành công của một trong số các thí nghiệm FRC lớn nhất tính tới giờ, phương pháp va chạm-hợp nhất truyền thống đã thể hiện là có thể tạo ra được các FRC ổn định, tồn tại lâu, có thông lượng cao và có nhiệt độ cao (xem M. Binderbauer, H.Y. Guo, M. Tuszewski *et al.*, *Phys. Rev. Lett.* **105**, 045003 (2010)).

Các FRC được tạo thành từ các hình xuyên của các đường trường đóng bên trong bộ phận tách, và lớp cạnh hình khuyên trên các đường trường hở ngay bên ngoài bộ phận tách. Lớp cạnh liên hợp thành các luồng vượt quá chiều dài FRC, tạo ra bộ chuyển hướng tự nhiên. Cấu trúc liên kết FRC trùng với cấu trúc liên kết của plasma gương đảo ngược trường (Field-Reversed-Mirror). Tuy nhiên, sự khác biệt đáng kể nằm ở chỗ plasma có β bằng khoảng 10. Trường từ bên trong thấp cố hữu tạo ra sự phân bố hạt động lực học cục bộ nhất định, tức là các hạt với các bán kính Larmor lớn, khi so với bán kính nhỏ FRC. Ở đó các hiệu ứng động lực mạnh xuất

hiện để đóng góp ít nhất một phần vào độ ổn định tổng thể của các FRC trong quá khứ và hiện tại, như các phần đã được tạo ra trong thí nghiệm va chạm-hợp nhất.

Các thí nghiệm FRC trước đây có xu hướng chiếm ưu thế bởi các tổn thất đối lưu với việc giam giữ năng lượng được xác định chủ yếu bởi việc vận chuyển hạt. Các hạt phân tán chủ yếu là theo hướng kính ra khỏi thể tích của bộ phận tách, và sau đó bị thất thoát theo hướng trục trong lớp cạnh. Do đó, việc giam giữ FRC phụ thuộc vào các tính chất của cả các vùng đường trường đóng hoặc mở. Thời gian phân tán hạt ra khỏi các thang của bộ phận tách là $\tau_{\perp} \sim a^2/D_{\perp}$ ($a \sim r_s/4$, trong đó r_s là bán kính bộ phận tách trung tâm), và $D_{\perp}$ là khả năng phân tán FRC đặc trưng, do $D_{\perp} \sim 12,5 \rho_{ie}$, với ρ_{ie} thể hiện bán kính hồi chuyển ion, được đánh giá tại trường từ được áp dụng từ bên ngoài. Thời gian giam giữ hạt lớp cạnh $\tau_{\parallel}$ về cơ bản là thời gian di chuyển theo trục trong các thí nghiệm FRC trong quá khứ. Trong trạng thái ổn định, sự cân bằng giữa các tổn thất hạt theo hướng kính và hướng trục tạo ra chiều dài chênh lệch mật độ của bộ phận tách $\delta \sim (D_{\perp}\tau_{\parallel})^{1/2}$. Các thang thời gian giam giữ hạt FRC là $(\parallel)1/2$ cho các FRC trong quá khứ có mật độ đáng kể tại bộ phận tách (xem M. TUSZEWSKI, "Field Reversed Configurations," Nucl. Fusion **28**, 2033 (1988)).

Nhược điểm khác của các thiết kế hệ thống FRC có trước là thiếu các chế độ gia nhiệt electron hiệu quả khác với sự phun chùm trung hòa, mà dẫn đến có hiệu suất gia nhiệt electron thấp do cơ chế tăng tốc động lực trên các electron thông qua sự thay đổi năng lượng ion-electron.

Do đó với tình trạng kỹ thuật nêu trên, thì có mong muốn cải thiện khả năng chống chịu của các FRC để sử dụng các FRC có trạng thái ổn định với các hệ thống năng lượng được nâng cao như đường dẫn đến tâm lò phản ứng để tổng hợp hạt nhân nhẹ cho việc tạo ra năng lượng cho tương lai.

Bản chất kỹ thuật của sáng chế

Các phương án thực hiện sáng chế được mô tả ở đây đề cập trực tiếp đến các hệ thống và phương pháp để tạo điều kiện thuận lợi cho việc tạo ra và duy trì các FRC với độ ổn định cũng như sự giam giữ hạt, năng lượng và thông lượng vượt trội và cụ thể hơn là, đến các hệ thống và phương pháp để tạo điều kiện thuận lợi cho việc tạo ra và duy trì các FRC với các năng lượng hệ thống được nâng cao và tăng

cường khả năng duy trì và cụ thể hơn là, đến các hệ thống và phương pháp để tạo điều kiện thuận lợi cho việc gia nhiệt electron sóng nhanh theo hàm điều hòa cao trong các FRC. Theo một phương án thực hiện của sáng chế, phương pháp để tạo ra và duy trì trường từ có cấu hình được đảo ngược trường (FRC) bao gồm bước tạo ra FRC quanh plasma trong buồng giam giữ, phun các chùm trung hòa bên trong plasma FRC ở góc về phía mặt phẳng giữa của buồng giam giữ, và phóng các sóng nhanh theo hàm điều hòa cao trong các dải tần số vô tuyến bên trong plasma FRC để gia nhiệt electron trong lõi của plasma FRC.

Theo phương án thực hiện khác của sáng chế, phương pháp còn bao gồm bước duy trì FRC bằng hoặc xấp xỉ trị số không đổi mà không bị phân rã và nâng nhiệt độ electron trong plasma đến khoảng trên 1,0 keV bằng cách phóng các sóng nhanh theo hàm điều hòa cao trong các dải tần số vô tuyến vào trong plasma FRC theo một góc từ mặt phẳng xuyên giữa của buồng giam giữ.

Việc gia nhiệt electron bằng các sóng nhanh theo hàm điều hòa cao trong các dải tần số vô tuyến làm giảm theo cách có lợi sự thất thoát trao đổi điện tích các ion nhanh và tăng cường sự giam giữ plasma, cũng như nâng cao hiệu suất điều khiển dòng plasma, mà tăng lên cùng với nhiệt độ electron T_e .

Theo phương án thực hiện khác của sáng chế, phương pháp còn bao gồm bước phun plasma cuộn dây hình xuyên nhỏ gọn (CT) từ các bộ phun CT thứ nhất và thứ hai bên trong plasma FRC ở góc về phía mặt phẳng giữa của buồng giam giữ, trong đó các bộ phun CT thứ nhất và thứ hai nằm đối nhau theo hướng kính ở các mặt đối diện của mặt phẳng giữa của buồng giam giữ.

Theo một phương án thực hiện của sáng chế, hệ thống để tạo ra và duy trì trường từ có cấu hình được đảo ngược trường (FRC) bao gồm buồng giam giữ, các vùng hình thành FRC thứ nhất và thứ hai đối diện nhau theo hướng xuyên tâm được ghép nối với buồng giam giữ thứ nhất và thứ hai, các bộ đổi hướng thứ nhất và thứ hai mà được nối với các vùng hình thành thứ nhất và thứ hai, một hoặc nhiều súng trong số các súng plasma, một hoặc nhiều điện cực thiên áp và các chốt cấm gương thứ nhất và thứ hai, trong đó các súng plasma bao gồm các súng plasma dọc trục thứ nhất và thứ hai mà được nối vận hành được với các bộ đổi hướng thứ nhất và thứ hai, các vùng hình thành thứ nhất và thứ hai và buồng giam giữ, trong đó một hoặc nhiều

điện cực thiên áp được định vị bên trong một hoặc nhiều buồng giam giữ, các vùng hình thành thứ nhất và thứ hai, và các bộ đổi hướng thứ nhất và thứ hai, và trong đó các chốt cấm gương thứ nhất và thứ hai được định vị giữa các vùng hình thành thứ nhất và thứ hai và các bộ đổi hướng thứ nhất và thứ hai, hệ thống chuyển đổi được ghép nối với buồng giam giữ và các bộ đổi hướng thứ nhất và thứ hai, các bộ phun chùm nguyên tử trung hòa được ghép nối với buồng giam giữ và có góc về phía mặt phẳng giữa của buồng giam giữ, hệ thống từ bao gồm các cuộn dây tựa như dc được định vị quanh buồng giam giữ, các vùng hình thành thứ nhất và thứ hai, và các bộ đổi hướng thứ nhất và thứ hai, và tập hợp các cuộn dây gương tựa như dc thứ nhất và thứ hai được định vị giữa các vùng hình thành thứ nhất và thứ hai và các bộ đổi hướng thứ nhất và thứ hai, và một hoặc nhiều anten được ghép nối với buồng giam giữ để phóng các sóng nhanh theo hàm điều hòa cao trong các dải tần số vô tuyến để gia nhiệt electron trong lõi của plasma FRC bên trong buồng giam giữ.

Theo phương án thực hiện khác của sáng chế, hệ thống còn bao gồm các bộ phun bằng cuộn dây hình xuyên nhỏ gọn thứ nhất và thứ hai (CT) ghép nối với buồng giam giữ theo một góc về phía mặt phẳng giữa của buồng giam giữ, trong đó các bộ phun CT thứ nhất và thứ hai nằm đối nhau theo hướng kính ở các mặt đối diện của mặt phẳng giữa của buồng giam giữ.

Các hệ thống, phương pháp, dấu hiệu và các ưu điểm khác của sáng chế sẽ được làm rõ cho người có kiến thức trung bình trong lĩnh vực này, dựa vào các hình vẽ kèm theo và phần mô tả chi tiết sau đây. Nó nhằm mục đích để tất cả các phương pháp, các đặc điểm và các ưu điểm khác nằm trong phần mô tả này, sẽ nằm trong phạm vi bảo hộ của sáng chế, và được bảo vệ bởi các yêu cầu bảo hộ kèm theo. Sáng chế cũng không bị hạn chế vào việc buộc phải có các chi tiết của các phương án thực hiện làm ví dụ.

Mô tả vắn tắt các hình vẽ

Các hình vẽ kèm theo, được coi như là một phần của bản mô tả sáng chế này, minh họa các phương án thực hiện làm ví dụ và cùng với phần mô tả chung nêu trên và mô tả chi tiết của phương án thực hiện được ưu tiên bên dưới, nhằm giải thích và chỉ ra các nguyên lý của sáng chế này.

Fig.1 minh họa việc giam giữ hạt trong hệ thống FRC hiện tại dưới chế độ FRC hiệu suất cao (high performance FRC regime - HPF) so với dưới chế độ FRC thông thường (conventional FRC - CR), và so với các thí nghiệm FRC thông thường khác.

Fig.2 minh họa các thành phần của hệ thống FRC hiện tại và cấu trúc liên kết từ tính của FRC có thể được tạo ra trong hệ thống FRC hiện tại.

Fig.3A minh họa sự bố trí cơ bản của hệ thống FRC theo sáng chế khi được nhìn từ trên xuống, bao gồm cách bố trí được ưu tiên của bình giam giữ trung tâm, bộ phận hình thành, các bộ chuyển hướng, các chùm trung hòa, các điện cực, các súng plasma, các chốt cấm gương và bộ phận phun hạt.

Fig.3B minh họa bình giam giữ trung tâm khi được nhìn từ trên đỉnh và thể hiện các chùm trung hòa được bố trí tại góc trục giao với trục chính đối xứng trong bình giam giữ trung tâm.

Fig.3C minh họa bình giam giữ trung tâm khi được nhìn từ trên đỉnh và thể hiện các chùm trung hòa được sắp xếp tại các góc nhỏ hơn góc trục giao so với trục chính đối xứng trong bình giam giữ trung tâm và được hướng để phun các hạt về phía mặt phẳng giữa của bình giam giữ trung tâm.

Fig.3D và Fig.3E lần lượt là hình chiếu từ trên xuống và hình vẽ phối cảnh của thiết kế cơ sở của phương án thay thế của hệ thống FRC hiện tại, bao gồm cách bố trí ưu tiên của buồng giam giữ trung tâm, vùng hình thành, các bộ đổi hướng bên trong và bên ngoài, các chùm trung hòa được bố trí ở góc nhỏ hơn góc vuông đối với đường trục đối xứng chính trong bình giam giữ trung tâm, các điện cực, các súng plasma và các chốt cấm gương.

Fig.4 minh họa sơ lược các thành phần của hệ thống công suất được tạo xung cho các vùng hình thành.

Fig.5 minh họa hình dạng cụ thể của phần chặn hình thành công suất được tạo xung riêng rẽ.

Fig.6 minh họa hình dạng cụ thể của cụm ống hình thành.

Fig.7 minh họa hình dạng cụ thể cắt chi tiết rời của hệ thống chùm trung hòa và các thành phần chủ yếu.

Fig.8 minh họa hình dạng cụ thể của cụm chùm trung hòa trên buồng giam giữ.

Fig.9 minh họa hình dạng cực cắt chi tiết rời của cách bố trí được ưu tiên của các hệ thống khử khí Ti và Li.

Fig.10 minh họa hình dạng cực cắt chi tiết rời của súng plasma được lắp đặt trong buồng bộ chuyển hướng. Cũng được thể hiện trên đó là chốt cấm gương từ tính được kết hợp và cụm điện cực chuyển hướng.

Fig.11 minh họa sự bố trí được ưu tiên của điện cực thiên áp dạng hình khuyên tại đầu cuối theo hướng trục của buồng giam giữ.

Fig.12 minh họa sự phát triển của bán kính thông lượng bị loại trừ trong hệ thống FRC thu được từ các chuỗi của các vòng lặp nghịch từ bên ngoài tại hai vùng hình thành ghim theta đảo ngược trường và các đầu dò từ được gắn bên trong buồng giam giữ trung tâm bằng kim loại. Thời gian được đo từ thời điểm đảo ngược trường được đồng bộ trong các nguồn tạo thành, và khoảng cách z được cho tương đối với mặt phẳng giữa theo trục của máy.

Fig.13, Fig.13A, Fig.13B, Fig.13C và Fig.13D minh họa dữ liệu từ biểu diễn phi HPF, việc xả không được chống đỡ trên hệ thống FRC theo sáng chế. Được thể hiện dưới dạng các hàm của thời gian (Fig.13A) là bán kính thông lượng bị loại trừ tại mặt phẳng giữa, (Fig.13B) 6 dây của mật độ được tích hợp đường từ giao thoa kế CO2 mặt phẳng giữa, (Fig.13C) các biên dạng theo hướng kính của mật độ đảo Abel từ dữ liệu giao thoa kế CO2, và (Fig.13D) tổng nhiệt độ plasma từ sự cân bằng áp suất.

Fig.14 minh họa các biên dạng theo trục thông lượng bị loại trừ tại các thời gian được chọn cho cùng một việc xả của hệ thống FRC theo sáng chế được thể hiện trên Fig.13A, Fig.13B, Fig.13C và Fig.13D.

Fig.15 minh họa hình dạng cực của các cuộn dây hình yên ngựa được gắn bên ngoài buồng giam giữ.

Fig.16A, Fig.16B, Fig.16C và Fig.16D minh họa các tương quan của thời gian sống của FRC và chiều dài xung của các chùm trung hòa được phun. Như được thể hiện, các xung chùm dài hơn tạo ra các FRC sống lâu hơn.

Fig.17A, Fig.17B, Fig.17C và Fig.17D minh họa các hiệu ứng riêng rẽ và kết hợp của các thành phần khác nhau của hệ thống FRC trên hiệu quả hoạt động của FRC và việc đạt được chế độ HPF.

Fig.18A, Fig.18B, Fig.18C và Fig.18D minh họa dữ liệu từ biểu diễn phi HPF, việc xả không được chống đỡ trên hệ thống FRC theo sáng chế. Được thể hiện dưới dạng các hàm của thời gian (Fig.18A) là bán kính thông lượng bị loại trừ tại mặt phẳng giữa, (Fig.18B) 6 dây của mật độ được tích hợp đường từ mặt phẳng giữa giao thoa kế CO₂, (Fig.18C) các biên dạng theo hướng kính của mật độ đảo Abel từ dữ liệu giao thoa kế CO₂, và (Fig.18D) tổng nhiệt độ plasma từ cân bằng áp suất.

Fig.19 minh họa việc nhốt thông lượng dưới dạng hàm của nhiệt độ của electron (electron temperature - T_e). Nó thể hiện hiển thị dạng đồ họa của cơ chế định cỡ vượt trội mới được thiết lập cho việc xả HPF.

Fig.20 minh họa thời gian sống của FRC tương ứng với chiều dài xung của các chùm trung hòa được phun theo cách được tạo góc và không tạo góc.

Fig.21A, Fig.21B, Fig.21C, Fig.21D và Fig.21E là các hình vẽ thể hiện chiều dài xung của các chùm trung hòa được phun có góc và tuổi sống của các thông số plasma FRC của bán kính plasma, mật độ plasma, nhiệt độ plasma, và thông lượng từ tương ứng với chiều dài xung của các chùm trung hòa được phun có góc.

Fig.22A và Fig.22B minh họa kết cấu bố trí cơ sở của bộ phun cuộn dây hình xuyên nhỏ gọn (CT: compact toroid).

Fig.23A và Fig.23B minh họa bình giam giữ trung tâm thể hiện bộ phun CT được lắp vào đó.

Fig.24A và Fig.24B minh họa kết cấu bố trí cơ sở của bộ phun CT có ống trôi gắn vào đó theo phương án khác.

Fig.25 minh họa bình giam giữ trung tâm khi nhìn từ phía trên và thể hiện các chùm trung hòa được bố trí ở góc nhỏ hơn góc vuông đối với đường trục đối xứng chính trong bình giam giữ trung tâm và được dẫn để phun các hạt về phía mặt phẳng giữa của buồng giam giữ trung tâm và thể hiện anten mà các sóng nhanh theo hàm điều hòa cao được lan truyền từ đó ở góc nhỏ hơn góc vuông với đường trục đối xứng chính trong buồng giam giữ trung tâm và được dẫn để lan truyền từ mặt phẳng giữa của buồng giam giữ trung tâm để gia nhiệt các electron plasma.

Fig.26A và Fig.26B là các hình vẽ thể hiện biên dạng mật độ hoàn toàn theo hướng xuyên tâm và biên dạng nhiệt độ electron hoàn toàn theo hướng xuyên tâm của plasma FRC của hệ thống FRC hiện tại.

Fig.27A đến Fig.27D là các hình vẽ thể hiện các biên dạng theo hướng xuyên tâm của trạng thái cân bằng hệ thống và tần số đặc trưng ở mặt phẳng giữa ($Z=0$) của hệ thống FRC hiện tại.

Fig.28A đến Fig.28C minh họa các quan sát về sự hấp thu năng lượng và sự đảo ngược chế độ dưới các điều kiện gia nhiệt electron của vi sóng ở 8GHz trong plasma FRC của hệ thống FRC hiện tại.

Fig.29A đến Fig.29F minh họa các quan sát về sự hấp thu năng lượng và sự đảo ngược chế độ dưới các điều kiện gia nhiệt electron của vi sóng ở 50GHz trong plasma FRC của hệ thống FRC hiện tại.

Fig.30A đến Fig.30C minh họa các quan sát về sự hấp thu năng lượng dưới các điều kiện gia nhiệt electron của sóng nhiều ở 0,5 GHz trong plasma FRC của hệ thống FRC hiện tại.

Fig.31 thể hiện biên dạng mật độ và sự lan truyền sóng trong plasma FRC của hệ thống FRC hiện tại.

Fig.32 thể hiện biên dạng thông lượng poloid và sự lan truyền sóng trong plasma FRC của hệ thống FRC hiện tại.

Fig.33 thể hiện biên dạng mật độ làm ví dụ và đường lan truyền sóng trong plasma FRC của hệ thống FRC hiện tại.

Fig.34 thể hiện biên dạng $\omega/\omega_{ci[D]}$ làm ví dụ và đường lan truyền sóng trong plasma FRC của hệ thống FRC hiện tại.

Fig.35 minh họa độ hấp thụ năng lượng làm ví dụ với khoảng cách của sự lan truyền sóng trong plasma FRC của hệ thống FRC hiện tại.

Fig.36 thể hiện biên dạng hấp thu năng lượng làm ví dụ trong plasma FRC của hệ thống FRC hiện tại.

Fig.37A và Fig.37B minh họa các biên dạng xuyên tâm làm ví dụ của mật độ năng lượng trong plasma FRC của hệ thống FRC hiện tại.

Fig.38 thể hiện biên dạng 2D làm ví dụ của độ hấp thụ mật độ năng lượng trong plasma FRC của hệ thống FRC hiện tại.

Fig.39 thể hiện biên dạng độ hấp thụ năng lượng làm ví dụ trong plasma FRC của hệ thống FRC hiện tại.

Fig.40 thể hiện biên dạng của các ion có bán kính Larmor giới hạn làm ví dụ trong plasma FRC của hệ thống FRC hiện tại.

Fig.41 thể hiện biên dạng hấp thu năng lượng làm ví dụ trong plasma FRC của hệ thống FRC hiện tại.

Fig.42 thể hiện biên dạng làm ví dụ của plasma FRC của hệ thống FRC hiện tại.

Cần chú ý rằng các hình vẽ không nhất thiết phải được vẽ theo cùng một tỉ lệ và các thành phần của các cấu trúc hoặc các chức năng tương tự sẽ được thể hiện chung bởi các số chỉ dẫn giống nhau trong toàn bộ các hình vẽ để minh họa. Cũng cần chú ý rằng các hình vẽ chỉ nhằm mục đích tạo thuận tiện cho việc mô tả các phương án thực hiện khác nhau được mô tả ở đây. Các hình vẽ không nhất thiết phải mô tả mọi khía cạnh của các chỉ dẫn được bộc lộ ở đây và không làm hạn chế phạm vi bảo hộ của các yêu cầu bảo hộ kèm theo.

Mô tả chi tiết sáng chế

Các phương án thực hiện này được tạo ra ở đây đề cập tới các hệ thống và phương pháp tạo thuận tiện cho việc tạo thành và duy trì các cấu hình được đảo ngược trường (Field Reversed Configurations - FRC) hiệu suất cao với độ ổn định vượt trội cũng như với khả năng giam giữ hạt, năng lượng và thông lượng. Một số phương án thực hiện trong số các phương án thực hiện sáng chế liên quan đến các hệ thống và phương pháp để tạo điều kiện thuận lợi cho việc tạo ra và duy trì các FRC với các năng lượng hệ thống được nâng cao và các nhiệt độ và khả năng chống chịu tăng cường nhờ sử dụng sự phun chùm trung hòa và gia nhiệt electron sóng nhanh theo hàm điều hòa cao.

Các ví dụ điển hình của các phương án được mô tả ở đây, mà sử dụng nhiều trong số các dấu hiệu và các nguyên lý bổ sung đó cả một cách riêng rẽ lẫn kết hợp với nhau, sẽ được mô tả chi tiết hơn dựa vào các hình vẽ kèm theo. Phần mô tả chi tiết này chỉ nhằm cung cấp cho người có kiến thức trung bình trong lĩnh vực này thêm những chi tiết để thực hiện các khía cạnh ưu tiên của sáng chế chứ không nhằm giới hạn phạm vi của sáng chế. Do đó, những sự kết hợp của các dấu hiệu và các bước được bộc lộ trong phần mô tả chi tiết sau đây có thể không phải là bắt buộc

phải có để thực hiện sáng chế theo nghĩa rộng nhất, mà thay vào đó, chỉ để mô tả cụ thể về các ví dụ điển hình của sáng chế.

Ngoài ra, các dấu hiệu khác nhau của các ví dụ điển hình đó và các điểm yêu cầu bảo hộ phụ thuộc có thể được kết hợp theo những cách mà không được đánh số một cách cụ thể và tường minh để cung cấp thêm các phương án hữu ích của sáng chế. Ngoài ra, lưu ý rằng tất cả các dấu hiệu được bộc lộ trong phần mô tả và/hoặc các điểm yêu cầu bảo hộ là nhằm được bộc lộ một cách riêng rẽ và độc lập với nhau cho mục đích bộc lộ ban đầu, cũng như nhằm mục đích giới hạn đối tượng được yêu cầu bảo hộ độc lập với các hợp phần của các dấu hiệu ở các phương án và/hoặc các điểm yêu cầu bảo hộ. Cũng cần chú ý rằng tất cả các khoảng giới hạn trị số hoặc các chỉ thị của các nhóm của các thực thể bộc lộ mọi trị số trung gian hoặc thực thể trung gian có thể có nhằm mục đích bộc lộ nguyên gốc, cũng như cho mục đích hạn chế đối tượng được yêu cầu bảo hộ.

Trước khi quay lại các hệ thống và phương pháp để tạo điều kiện thuận lợi cho việc gia nhiệt electron sóng nhanh theo hàm điều hòa cao trong các plasma FRC, phần mô tả của các hệ thống và phương pháp tạo ra và duy trì các FRC hiệu suất cao với độ ổn định vượt trội cũng như sự giam giữ hạt, năng lượng và thông lượng vượt trội hơn so với các FRC đã biết, cũng như phần mô tả của các hệ thống và phương pháp tạo ra và duy trì các FRC hiệu suất cao bằng hoặc xấp xỉ trị số không đổi mà không bị phân rã được trình bày. Các FRC hiệu suất cao này tạo ra con đường dẫn tới toàn bộ các ứng dụng bao gồm các nguồn neutron nhỏ gọn (cho việc sản xuất đồng vị y tế, xử lý chất thải hạt nhân, nghiên cứu vật liệu, xử lý rác thải hạt nhân, nghiên cứu vật liệu, chụp tia và chụp cắt lớp neutron), các nguồn photon nhỏ gọn (cho việc sản xuất và xử lý hóa học), các hệ thống tách và làm giàu khối, và các lõi lò phản ứng cho việc tổng hợp hạt nhân nhẹ để tạo năng lượng trong tương lai.

Các hệ thống lệ thuộc và các chế độ vận hành đã được phát hiện để đánh giá xem liệu có cơ chế giam giữ vượt trội trong các FRC hay không. Các nỗ lực này đã dẫn tới các phát hiện đột phá và việc phát triển của mẫu FRC hiệu suất cao được mô tả ở đây. Theo mô hình mới này, các hệ thống và phương pháp hiện tại kết hợp nhiều ý tưởng và phương tiện mới để cải tiến một cách mạnh mẽ việc giam giữ FRC như được minh họa trên Fig.1 cũng như tạo ra khả năng điều khiển ổn định mà không có

các tác dụng bất lợi. Như được mô tả chi tiết hơn dưới đây, Fig.1 mô tả việc giam giữ hạt trong hệ thống FRC 10 được mô tả bên dưới (xem Fig.2 và Fig.3), vận hành theo chế độ FRC hiệu suất cao (FRC High Performance - HPF) để tạo thành và duy trì FRC so với việc vận hành theo chế độ CR thông thường để tạo thành và duy trì FRC, và so với việc giam giữ hạt theo cách chế độ thông thường để tạo thành và duy trì FRC đã được sử dụng trong các thí nghiệm khác. Phần bộc lộ này sẽ lược tả và mô tả chi tiết các thành phần riêng rẽ, mới của hệ thống FRC 10 và các phương pháp, cũng như các hiệu quả tổng hợp của chúng.

Hệ thống FRC

Hệ thống chân không

Fig.2 và Fig.3 mô tả sơ lược của hệ thống FRC 10 theo sáng chế. Hệ thống FRC 10 bao gồm bình giam giữ trung tâm 100 được bao quanh bởi hai vùng hình thành ghim theta đảo ngược trường đối diện theo hướng đường kính 200 và, vượt quá các vùng hình thành 200, là hai buồng chuyển hướng 300 để điều khiển mật độ trung hòa và tạp nhiễm không tinh khiết. Hệ thống FRC 10 theo sáng chế được xây dựng để chứa chân không siêu cao và vận hành tại các áp suất cơ sở thông thường là 133.32×10^{-8} Pa (10^{-8} torr). Các áp suất chân không này yêu cầu việc sử dụng các gờ ăn khớp được bơm kép giữa các thành phần ăn khớp, các vòng O bằng kim loại, các thành bên trong có độ tinh khiết cao, cũng như việc điều hòa bề mặt ban đầu một cách cẩn thận cho tất cả các phần trước khi lắp ráp, như việc làm sạch bằng vật lý và hóa học và tiếp tục bởi việc nung chân không trong 24 giờ ở nhiệt độ 250°C và việc làm sạch bằng cách phóng điện chớp sáng Hydro.

Các vùng hình thành ghim theta đảo ngược trường 200 là các ghim theta đảo ngược trường tiêu chuẩn (field-reversed-theta-pinche - FRTP), thậm chí là với hệ thống hình thành công suất được tạo xung cải tiến được mô tả chi tiết dưới đây (xem các hình vẽ từ Fig.4 đến Fig.6). Mỗi vùng hình thành 200 được tạo thành từ các ống thạch anh cấp độ công nghiệp, mờ đục tiêu chuẩn có lớp lót bên trong bằng thạch anh siêu tinh khiết dày 2 milimet. Buồng giam giữ 100 được tạo thành từ thép không gỉ cho phép tạo nhiều cổng theo hướng kính và hướng tiếp tuyến; nó cũng có vai trò như bộ phận dự trữ thông lượng trên thang thời gian của các thí nghiệm được mô tả

bên dưới và hạn chế các chuyển tiếp từ tính nhanh. Chân không được tạo ra và được duy trì bên trong hệ thống FRC 10 bằng hệ thống bơm xoáy sơ bộ khô, các bơm turbo phân tử và các bơm lạnh.

Hệ thống từ tính

Hệ thống từ tính 400 được minh họa trên Fig.2 và Fig.3. Fig.2, ngoài các đặc điểm khác, minh họa các đường bao thông lượng từ FRC và mật độ (dưới dạng các hàm của các tọa độ theo bán kính và theo trục) thuộc về FRC 450 là có thể tạo ra được bởi hệ thống FRC 10. Các đường bao này được thu bởi việc mô phỏng số Hall-MHD điện trở 2-D sử dụng mã được phát triển bởi các hệ thống và phương pháp mô phỏng tương ứng với hệ thống FRC 10, và phù hợp tốt với dữ liệu thực nghiệm được đo. Như có thể thấy trên Fig.2, FRC 450 chứa hình xuyên của các đường trường đóng tại phần bên trong 453 của FRC 450 bên trong bộ phận tách 451, và của lớp cạnh hình khuyên 456 trên các đường trường hở 452 ngay bên ngoài bộ phận tách 451. Lớp cạnh 456 kết tụ vào trong các luồng 454 vượt quá chiều dài FRC, tạo ra bộ chuyển hướng tự nhiên.

Hệ thống từ tính chính 410 bao gồm nhiều chuỗi của các cuộn dây tựa như là dc 412, 414, và 416 nằm tại các vị trí theo hướng trục cụ thể dọc theo các thành phần, tức là dọc theo buồng giam giữ 100, các vùng hình thành 200 và các bộ chuyển hướng 300, của hệ thống FRC 10. Các cuộn dây tựa như là dc 412, 414 và 416 được nạp bởi các nguồn cấp công suất chuyển mạch tựa như là dc và tạo ra các trường dịch chuyển từ cơ bản khoảng 0,1T trong buồng giam giữ 100, các vùng hình thành 200 và các bộ chuyển hướng 300. Ngoài các cuộn dây tựa như là dc 412, 414 và 416, hệ thống từ tính chính 410 bao gồm các cuộn dây gương tựa như là dc 420 (được nạp bởi các nguồn cấp chuyển mạch) giữa hoặc là đầu cuối của buồng giam giữ 100 hoặc là các vùng hình thành liên kế 200. Các cuộn dây gương tựa như là dc 420 tạo ra các tỉ lệ gương từ tính lên tới 5 và có thể được tạo năng lượng một cách độc lập cho việc điều khiển cân bằng chính xác. Ngoài ra, các chốt cấm gương 440, được định vị giữa mỗi vùng trong các vùng hình thành 200 và các bộ chuyển hướng 300. Các chốt cấm gương 440 bao gồm các cuộn dây gương tựa như là dc nhỏ gọn 430 và các cuộn dây chốt cấm gương 444. Các cuộn dây gương tựa như là dc 430 chứa ba cuộn dây 432,

434 và 436 (được nạp bởi các nguồn cấp chuyển mạch) tạo ra các trường dẫn hướng bổ sung để tập trung các bề mặt thông lượng từ 455 về phía đường dẫn có đường kính nhỏ 442 đi qua các cuộn dây chót cắm gương 444. Các cuộn dây chót cắm gương 444, bọc quanh đường dẫn có đường kính nhỏ 442 và được nạp bởi mạch công suất được tạo xung LC, tạo ra các trường gương từ tính mạnh lên tới 4T. Mục đích của toàn bộ cách bố trí cuộn dây này là để bó chặt và dẫn hướng các bề mặt thông lượng từ 455 và các luồng phun plasma kết thúc luồng 454 vào trong các buồng từ xa 310 của các bộ chuyển hướng 300. Cuối cùng, bộ “các anten” cuộn dây hình yên ngựa 460 (xem Fig.15) được định vị bên ngoài buồng giam giữ 100, hai phần trên mỗi cạnh của mặt phẳng giữa, và được nạp vào trong các nguồn cấp công suất dc. Các anten cuộn dây hình yên ngựa 460 có thể được định cấu hình để tạo ra trường lưỡng cực hoặc tứ cực từ tính tựa như là tĩnh có độ lớn khoảng 0,01T để điều khiển các độ bất ổn định quay và/hoặc điều khiển dòng electron. Các anten cuộn dây hình yên ngựa 460 có thể tạo ra các từ trường một cách linh hoạt hoặc là đối xứng hoặc là phi đối xứng quanh mặt phẳng giữa của máy, phụ thuộc vào hướng của các dòng được áp dụng..

Các hệ thống hình thành công suất được tạo xung

Các hệ thống hình thành có công suất được tạo xung 210 vận hành trên nguyên lý ghim theta được biến đổi. Có hai hệ thống mà mỗi hệ thống cấp năng lượng cho một vùng trong các vùng hình thành 200. Các hình vẽ từ Fig.4 đến Fig.6 minh họa các khối xây dựng chính và bố trí của các hệ thống hình thành 210. Hệ thống hình thành 210 được tạo thành từ bố trí công suất được tạo xung được môđun hóa chứa các bộ phận riêng rẽ (=các bộ phận chèn) 220 mà mỗi phần tạo năng lượng cho bộ con của các cuộn dây 232 của kết cấu liên kết 230 (=các liên kết) bọc quanh các ống thạch anh hình thành 240. Mỗi bộ phận chèn 220 được tạo thành từ các tụ 221, các bộ phận cảm ứng 223, các chuyển mạch dòng cao, nhanh 225 và bộ kích hoạt được kết hợp 222 và mạch kết xuất 224. Tổng lại, mỗi hệ thống hình thành 210 lưu năng lượng điện dung giữa 350-400kJ, tạo công suất lên tới 35GW để tạo thành và tăng tốc các FRC. Đạt được việc vận hành được phối hợp của các thành phần này thông qua hệ thống kích hoạt và điều khiển 222 và 224 đã biết tới trong tình trạng kỹ thuật

của sáng chế cho phép định thời được đồng bộ giữa các hệ thống hình thành 210 trên từng vùng hình thành 200 và tối thiểu hóa độ dài xung chuyển mạch tới cỡ hàng chục nano giây. Ưu điểm của thiết kế được môđun hóa này là việc vận hành linh hoạt của nó: Các FRC có thể được tạo thành tại chỗ và sau đó được tăng tốc và được phun vào (=việc hình thành tĩnh) hoặc được tạo thành và được tăng tốc đồng thời (=việc hình thành động lực).

Các bộ phận phun chùm tia trung hòa

Các chùm nguyên tử trung hòa 600 được triển khai trên hệ thống FRC 10 để tạo ra việc gia nhiệt và việc điều khiển dòng điện cũng như để phát triển áp suất hạt nhanh. Như được thể hiện trên Fig.3A, Fig.3B và Fig.8, các dòng chùm riêng lẻ bao gồm các hệ thống phun chùm nguyên tử trung hòa 610 và 640 được bố trí quanh buồng giam giữ trung tâm 100 và phun các hạt theo phương tiếp tuyến vào plasma FRC (và vuông góc hoặc ở một góc vuông với đường trục đối xứng chính trong buồng giam giữ trung tâm 100) với thông số va chạm sao cho vùng bẫy mục tiêu nằm thích hợp bên trong bộ phận tách 451 (xem Fig.2). Mỗi hệ thống phun 610 và 640 đều có khả năng phun với công suất chùm trung hòa lên tới 1MW bên trong plasma FRC với các năng lượng hạt nằm trong khoảng 20keV đến 40keV. Các hệ thống 610 và 640 là dựa trên các nguồn trích có nhiều khe hở cho ion dương và sử dụng việc tập trung hình học, việc làm lạnh quán tính của các lưới trích ion và bơm vi phân. Bên cạnh việc sử dụng các nguồn plasma khác nhau, các hệ thống 610 và 640 được tạo khác biệt chủ yếu bởi thiết kế vật lý của chúng để đáp ứng với các vị trí gắn tương ứng, các khả năng tạo ra ở cạnh và phun ở trên đỉnh của chúng. Các thành phần thông thường của các bộ phận phun chùm trung hòa này thường được minh họa trên Fig.7 cho các hệ thống phun ở cạnh 610. Như được thể hiện trên Fig.7, mỗi hệ thống chùm trung hòa riêng rẽ 610 bao gồm nguồn plasma RF 612 tại đầu cuối phun vào (nó được thể với nguồn hồ quang trong các hệ thống 640) với màn từ 614 che phủ đầu cuối. Nguồn quang học ion và các lưới gia tốc 616 được gắn vào nguồn plasma 612 và van cổng 620 được định vị giữa nguồn quang học ion và các lưới gia tốc 616 và bộ phận trung hòa 622. Nam châm làm lệch 624 và bộ kết xuất ion 628 được định vị giữa bộ phận trung hòa 622 và thiết bị ngắt 630 tại đầu cuối ra. Hệ thống làm mát bao gồm

hai máy lạnh cryo 634, hai tấm lạnh 636 và phần bao phủ LN2 638. Thiết kế linh hoạt này cho phép vận hành trên một khoảng giới hạn rộng của các thông số FRC.

Cấu hình thay thế cho các bộ phận phun chùm nguyên tử trung hòa 600 là ở chỗ việc phun của các hạt nhanh theo tiếp tuyến với plasma FRC, nhưng với góc A nhỏ hơn 90° so với trục đối xứng chính trong bình giam giữ trung tâm 100. Các loại định hướng này của các bộ phận phun chùm 615 được thể hiện trên Fig.3C. Ngoài ra, các bộ phận phun chùm 615 có thể được định hướng sao cho các bộ phận phun chùm 615 trên một trong các cạnh của mặt phẳng giữa của bình giam giữ trung tâm 100 phun các hạt của chúng về phía mặt phẳng giữa. Cuối cùng, vị trí theo hướng trục của các hệ thống chùm này 600 có thể được chọn gần hơn với mặt phẳng giữa. Các phương án thực hiện phun thay thế này tạo thuận tiện cho nhiều lựa chọn tiếp liệu trung tâm hơn, sẽ tạo ra việc gắn kết tốt hơn của các chùm và tạo hiệu suất bẫy cao hơn cho các hạt nhanh được phun vào. Hơn nữa, phụ thuộc vào góc và vị trí theo trục, bố trí này của các bộ phận phun chùm 615 cho phép điều khiển trực tiếp và độc lập hơn cho việc kéo dài theo trục và các đặc tính khác của FRC 450. Ví dụ, việc phun của các chùm tại góc nông A so với trục đối xứng chính của bình sẽ tạo plasma FRC với việc mở rộng theo trục dài hơn và nhiệt độ thấp hơn, trong khi việc lựa chọn góc A vuông hơn sẽ dẫn tới plasma ngắn hơn theo hướng trục nhưng lại nóng hơn. Theo cách này, góc phun A và vị trí của các bộ phận phun chùm 615 có thể được tối ưu hóa cho các mục đích khác nhau. Ngoài ra, việc tạo góc và định vị này của các bộ phận phun chùm 615 có thể cho phép các chùm có năng lượng cao hơn (nói chung là ưu tiên hơn để lắng đọng nhiều lắng đọng hơn với ít sự phân tán chùm hơn) có thể được phun vào trong các từ trường thấp hơn mà theo cách khác, là cần thiết để bẫy các chùm này. Đó là do trên thực tế, thành phần theo phương vị của năng lượng xác định quy mô quỹ đạo ion nhanh (trở nên nhỏ hơn nhanh chóng khi tại năng lượng chùm không đổi, góc phun so với trục đối xứng chính của bình được giảm). Hơn nữa, việc phun được tạo góc về phía mặt phẳng giữa và với các vị trí chùm theo hướng trục gần với mặt phẳng giữa sẽ cải thiện việc ghép nối chùm-plasma, thậm chí khi plasma FRC bị co rút hoặc theo cách khác co lại theo hướng trục trong suốt quá trình phun vào.

Quay lại Fig.3D và Fig.3E, kết cấu thay thế khác của hệ thống FRC 10 bao gồm các bộ đổi hướng bên trong 302 ngoài các bộ phun chùm có góc 615. Các bộ đổi hướng bên trong 302 được định vị giữa các vùng hình thành 200 và buồng giam giữ 100, và được tạo kết cấu và hoạt động hầu như tương tự với các bộ đổi hướng bên ngoài 300. Các bộ đổi hướng bên trong 302, mà bao gồm các cuộn dây từ chuyển đổi nhanh trên đó, được dùng hoạt động một cách hiệu quả trong quá trình hình thành để cho phép các FRC hình thành đi qua các bộ đổi hướng bên trong 302 khi các FRC hình thành tịnh tiến về phía mặt phẳng giữa của buồng giam giữ 100. Ngay khi các FRC hình thành đi qua các bộ đổi hướng bên trong 302 vào trong buồng giam giữ 100, các bộ đổi hướng bên trong được kích hoạt để hoạt động hầu như giống với các bộ đổi hướng bên ngoài và cách ly buồng giam giữ 100 khỏi các vùng hình thành 200.

Các bộ phận phun hạt

Để tạo ra các phương tiện để phun các hạt mới và điều khiển tốt hơn tồn trữ hạt FRC, bộ phận phun hạt 12 bình 700 (ví dụ, xem I. Vinyar et al., “Pellet Injectors Developed at PELIN for JET, TAE, và HL-2A,” Proceedings of 26th Fusion Science and Technology Symposium, 09/27 đến 10/01 (2010)) sẽ được sử dụng trên hệ thống FRC 10. Fig.3 minh họa thiết kế của bộ phận phun hạt 700 trên hệ thống FRC 10. Các hạt hình trụ ($D \sim 1\text{mm}$, $L \sim 1 - 2\text{ mm}$) được phun vào trong FRC với vận tốc trong khoảng giới hạn là 150–250km/s. Mỗi hạt riêng rẽ chứa khoảng 5×10^{19} nguyên tử hydro, là có thể so sánh được với tồn trữ hạt FRC.

Các hệ thống khử khí

Được biết tới rộng rãi rằng khí quang sáng trung hòa là vấn đề nghiêm trọng trong các hệ thống giam giữ. Các quy trình trao đổi và luân chuyển điện tích (phát ra vật liệu không nguyên chất lạnh từ thành) có thể có tác động tàn phá trên việc giam giữ năng lượng và hạt. Ngoài ra, mật độ đáng kể của khí trung hòa tại gần cạnh sẽ dẫn tới việc thúc đẩy các tổn thất, ít nhất là cản trở nhiều thời gian sống của các hạt (năng lượng cao) có quỹ đạo lớn được phun vào (quỹ đạo lớn đề cập tới các hạt có các quỹ đạo trên quy mô của cấu trúc liên kết FRC hoặc ít nhất là bán kính quỹ đạo lớn hơn quy mô chiều dài độ dốc từ trường đặc trưng) – thực tế là bất lợi cho tất cả

các ứng dụng plasma mạnh mẽ, bao gồm việc dung hợp thông qua việc gia nhiệt chùm phụ trợ.

Việc điều hòa bề mặt là các cách thức mà nhờ đó các hiệu ứng có hại của khí trung hòa và các tạp chất có thể được điều khiển hoặc được làm giảm trong hệ thống giam. Để đạt mục đích này, hệ thống FRC 10 được tạo ra ở đây sử dụng các hệ thống lắng đọng titan và lithi 810 và 820 phủ các bề mặt đối diện với plasma của buồng giam giữ (hoặc bình) 100 và các bộ phận chuyển hướng 300 và 302 với các màng (độ dày cỡ chục micro mét) của Ti và/hoặc Li. Có thể thu được các lớp phủ thông qua các kỹ thuật lắng đọng hơi. Li và/hoặc Ti rắn được làm bay hơi và/hoặc được thăng hoa và được phun lên trên các bề mặt gần kề để tạo thành các lớp phủ. Các nguồn là các lò nguyên tử với các vòi phun dẫn hướng (trong trường hợp của Li) 822 hoặc các hình cầu bị gia nhiệt của chất rắn với vỏ che vành đai dẫn hướng (trong trường hợp Ti) 812. Các hệ thống bay hơi Li thường vận hành trong chế độ liên tục trong khi các thành phần thăng hoa Ti hầu hết được vận hành gián đoạn giữa việc vận hành của plasma. Các nhiệt độ vận hành của các hệ thống này là trên 600°C để thu được các tốc độ lắng đọng nhanh. Để đạt được việc che phủ thành tốt, cần thiết có nhiều hệ thống bốc hơi/thăng hoa được định vị theo cách có tính toán. Fig.9 mô tả chi tiết bố trí được ưu tiên của các hệ thống lắng đọng khử khí 810 và 820 trong hệ thống FRC 10. Các lớp phủ hoạt động như là các bề mặt khử khí và việc bơm nguyên tử hiệu quả và các mẫu hydro phân tử (H và D). Các lớp phủ cũng làm giảm các tạp nhiễm thông thường khác như cacbon và oxy tới các mức không đáng kể.

Các chốt cấm gương

Như đã được mô tả trên đây, hệ thống FRC 10 sử dụng các bộ của các cuộn dây gương 420, 430, và 444 như được thể hiện trên Fig.2 và Fig.3. Bộ thứ nhất của các cuộn dây gương 420 được định vị nằm trong hai đầu cuối theo trục của buồng giam giữ 100 và được cấp năng lượng độc lập từ các cuộn dây DC giam giữ 412, hình thành 414 và chuyển hướng 416 của hệ thống từ tính chính 410. Bộ thứ nhất của các cuộn dây gương 420 chủ yếu giúp lái và chứa theo trục FRC 450 trong khi hợp nhất và tạo ra khả năng điều khiển cân bằng chính xác trong khi duy trì. Bộ cuộn dây gương thứ nhất 420 tạo ra các từ trường danh nghĩa (khoảng 0,4 đến 0,5T) cao

hơn trường giam giữ trung tâm được tạo ra bởi các cuộn dây giam giữ trung tâm 412. Bộ thứ hai của các cuộn dây gương 430, bao gồm ba cuộn dây gương tựa như là dc nhỏ gọn 432, 434 và 436, được định vị giữa các vùng hình thành 200 và các bộ chuyển hướng 300 và được dẫn bởi việc cấp nguồn chuyển mạch chung. Các cuộn dây gương 432, 434 và 436, cùng với các cuộn dây được tạo xung chốt cắm gương nhỏ gọn hơn 444 (được nạp bởi việc cấp công suất điện dung) và phần thắt vào vật lý 442 tạo thành các chốt cắm gương 440 tạo ra đường dẫn khí thấp, hẹp với các từ trường rất cao (giữa 2 tới 4T với các thời gian tăng từ khoảng 10 tới 20ms). Các cuộn dây được tạo xung gương nhỏ gọn nhất 444 là các kích cỡ theo hướng kính nhỏ gọn, cỡ 20cm và chiều dài tương tự, khi so sánh với cỡ mét hoặc dài hơn và thiết kế bánh kép của các cuộn dây giam giữ 412, 414 và 416. Mục đích của các chốt cắm gương 440 là để nêu lên: (1) Các cuộn dây 432, 434, 436 và 444 bó chặt và dẫn hướng các bề mặt thông lượng từ 452 và các luồng phun plasma kết thúc luồng 454 vào trong các buồng chuyển hướng từ xa 300. Nó đảm bảo rằng các hạt thải đạt tới được các bộ chuyển hướng 300 một cách thích hợp và có các bề mặt thông lượng liên tục 455 mà đi từ vùng đường trường hở 452 của FRC trung tâm 450 đến hết đường tới các bộ chuyển hướng 300. (2) Các phần thắt vào vật lý 442 trong hệ thống FRC 10, mà qua đó các cuộn dây 432, 434, 436 và 444 cho phép tạo thành đường dẫn của các bề mặt thông lượng từ 452 và các luồng phun plasma 454, tạo ra trở ngại cho khí trung hòa đi ra khỏi các súng plasma 350 nằm trong các bộ chuyển hướng 300. Theo cùng một mạch, các phần thắt vào 442 hạn chế việc tạo dòng ngược lại của khí từ các vùng hình thành 200 tới các bộ chuyển hướng 300 nhờ đó làm giảm số hạt trung hòa được đưa vào trong toàn bộ hệ thống FRC 10 khi bắt đầu việc khởi đầu của FRC. (3) Các gương theo hướng trục mạnh mẽ được tạo ra bởi các cuộn dây 432, 434, 436 và 444 làm giảm tổn thất hạt theo hướng trục và nhờ đó làm giảm tính khuếch tán hạt song song trên các đường trường hở.

Theo kết cấu thay thế thể hiện trên Fig.3D và Fig.3E, tập hợp các cuộn dây bó hẹp biên dạng thấp 421 là các vị trí giữa các bộ đổi hướng bên trong 302 và các vùng hình thành 200.

Các súng plasma theo trục

Các luồng plasma từ các súng 350 được gắn trong các buồng chuyển hướng 310 của các bộ chuyển hướng 300 nhằm cải thiện độ ổn định và hiệu quả hoạt động của chùm trung hòa. Các súng 350 được gắn trên trục bên trong buồng 310 của các bộ chuyển hướng 300 như được minh họa trên Fig.3 và Fig.10 và tạo ra dòng chảy plasma dọc các đường thông lượng mở 452 trong bộ chuyển hướng 300 và về phía trung tâm của buồng giam giữ 100. Các súng 350 vận hành tại việc xả khí mật độ cao trong kênh chông đệm và được thiết kế để tạo ra plasma được ion hóa hoàn toàn cỡ vài kiloampe từ 5ms tới 10ms. Các súng 350 chứa cuộn từ tính được tạo xung phù hợp với luồng plasma đầu ra với kích cỡ mong muốn của plasma trong buồng giam giữ 100. Các thông số kỹ thuật của các súng 350 được tạo khác biệt bởi kênh có đường kính ngoài từ 5cm đến 13cm và đường kính trong lên tới khoảng 10cm và tạo ra dòng xả từ 10kA đến 15 kA tại điện thế 400-600V với từ trường bên trong súng giữa 0,5T đến 2.3T.

Các luồng plasma từ súng có thể xâm nhập các từ trường của các chốt cấm gương 440 và chảy vào trong vùng hình thành 200 và buồng giam giữ 100. Hiệu quả của việc chuyển plasma qua chốt cấm gương 440 tăng với việc giảm khoảng cách giữa súng 350 và chốt 440 và bằng cách tạo chốt 440 rộng hơn và ngắn hơn. Dưới các điều kiện hợp lý, mỗi súng trong các súng 350 có thể phân phát xấp xỉ 10^{22} proton/s qua các chốt cấm gương 440 từ 2T tới 4T với các nhiệt độ ion và electron cao một cách tương ứng khoảng từ 150eV đến 300eV và khoảng từ 40eV tới 50eV. Các súng 350 tạo ra việc nạp lại nhiên liệu một cách đáng kể của lớp cạnh FRC 456, và việc giam giữ hạt FRC tổng hợp được cải thiện.

Để tiếp tục tăng mật độ plasma, hộp khí có thể được tận dụng để phụt khí bổ sung vào trong luồng plasma từ các súng 350. Kỹ thuật này cho phép việc tăng gấp nhiều lần mật độ plasma được phun vào. Trong hệ thống FRC 10, hộp khí được lắp đặt trên bộ chuyển hướng 300 bên cạnh các chốt cấm gương 440 cải thiện việc nạp lại nhiên liệu của FRC lớp cạnh 456, việc hình thành của FRC 450, và việc bó buộc theo đường của plasma.

Xem xét tất cả các thông số điều chỉnh được mô tả ở trên và cũng xem xét việc vận hành có thể thực hiện với chỉ một hoặc cả các súng, rõ ràng rằng phổ rộng của các chế độ vận hành là không thể truy cập được.

Các điện cực thiên áp

Thế hiệu dịch điện của các bề mặt thông lượng mở có thể tạo ra các thế theo hướng kính tăng dịch chuyển $E \times B$ theo góc phương vị tạo ra cơ chế điều khiển, tương tự với việc chỉnh núm, để điều khiển việc quay của đường trường hồ plasma cũng như lõi FRC thực sự 450 thông qua vận tốc trượt. Để hoàn thiện việc điều khiển này, hệ thống FRC 10 sử dụng các điện cực khác nhau được đặt theo cách có chiến lược trong các phần của máy. Fig.3 mô tả điện cực thiên áp được định vị tại các vị trí được ưu tiên nằm trong hệ thống FRC 10.

Theo nguyên lý, có bốn nhóm của các điện cực: (1) các điện cực điểm 905 trong buồng giam giữ 100 tạo tiếp xúc với các đường trường hồ cụ thể 452 trong cạnh của FRC 450 để tạo ra việc nạp cục bộ, (2) các điện cực hình khuyên 900 giữa buồng giam giữ 100 và các vùng hình thành 200 để nạp cho các lớp thông lượng xa cạnh 456 theo cách đối xứng theo phương vị, (3) các chông của các điện cực đồng tâm 910 trong các bộ chuyển hướng 300 để nạp cho nhiều lớp thông lượng đồng tâm 455 (nhờ đó việc chọn của các lớp là có thể lựa chọn được bằng cách điều chỉnh các cuộn dây 416 để điều chỉnh bộ chuyển hướng từ trường để dừng các lớp thông lượng mong muốn 456 trên các điện cực thích hợp 910), và cuối cùng là (4) tự bản thân các anốt 920 (xem Fig.10) của các súng plasma 350 (cắt các bề mặt thông lượng mở bên trong 455 gần bộ phận tách của FRC 450). Các hình vẽ Fig.10 và Fig.11 thể hiện một số thiết kế thường gặp cho một số chúng.

Trong tất cả các trường hợp, tất cả các điện cực này được dẫn bởi các nguồn công suất xung hoặc nguồn công suất dc tại các điện thế lên tới khoảng 800V. Phụ thuộc vào kích cỡ điện cực và các bề mặt thông lượng nào bị cắt, các dòng có thể được rút trong khoảng giới hạn cỡ kilo-ampe.

Việc vận hành không được duy trì liên tục của hệ thống FRC - Chế độ thông thường

Việc hình thành plasma tiêu chuẩn trên hệ thống FRC 10 sẽ tuân theo kỹ thuật ghim theta đảo ngược trường đã được phát triển đầy đủ. Quy trình thông thường cho việc khởi động các khởi đầu FRC bằng cách dẫn các cuộn dây tựa như là dc 412, 414, 416, 420, 432, 434 và 436 tới việc vận hành trạng thái ổn định. Các mạch công suất được tạo xung RFTP của các hệ thống hình thành có năng lượng được tạo xung

210 sau đó dẫn các cuộn dây trường nam châm đảo nhanh được tạo xung 232 để tạo dịch chuyển đảo tạm thời khoảng $-0.05T$ trong các vùng hình thành 200. Tại điểm này, lượng định trước của khí trung hòa tại áp suất 9-20psi được phun vào trong hai thể tích hình thành được xác định bởi các buồng ống thạch anh 240 của các vùng hình thành (bắc và nam) 200 thông qua bộ các van phụt được định hướng theo góc phương vị tại các gờ ở trên các đầu cuối phía ngoài của các vùng hình thành 200. Tiếp theo, trường RF nhỏ ($\sim$ vài trăm kilo-hertz) được sinh ra từ bộ các anten trên bề mặt của các ống thạch anh 240 để tạo ra việc ion hóa từ trước ở dạng của các vùng ion hóa nhân cục bộ nằm trong các cột khí trung hòa. Nó được tiếp theo bởi việc áp dụng việc môđun hóa kết vòng theta trên việc điều khiển dòng điện cho các cuộn dây trường nam châm đảo nhanh được tạo xung 232, dẫn tới việc ion hóa từ trước mang tính chất toàn cục hơn của các cột khí. Cuối cùng, các bộ phận trữ công suất được tạo xung chính của các hệ thống hình thành có năng lượng được tạo xung 210 được bắn để dẫn các cuộn dây trường nam châm đảo ngược nhanh được tạo xung 232 để tạo trường dịch chuyển về phía trước lên tới $0,4T$. Bước này có thể được sắp xếp theo thời gian sao cho trường được dịch chuyển về phía trước được sinh ra đồng đều trong suốt chiều dài của các ống hình thành 240 (việc hình thành tĩnh) hoặc sao cho đạt được việc môđun hóa trường nhu động liên tiếp dọc trục của các ống hình thành 240 (việc hình thành động lực).

Trong toàn bộ quy trình hình thành này, trường thực tế đảo ngược trong plasma xuất hiện một cách nhanh chóng, nằm trong khoảng $5\mu s$. Công suất được tạo xung cỡ nhiều gigawatt được phân phối tới phần plasma hình thành sẵn sàng để tạo ra các FRC nóng sau đó được phun từ các vùng hình thành 200 thông qua ứng dụng của hoặc là việc điều biến được sắp xếp theo thời gian của từ trường chuyển tiếp (nhu động từ) hoặc các dòng được tăng tạm thời trong các cuộn dây cuối cùng của các bộ cuộn dây 232 gần các đầu cuối bên ngoài trục của các ống hình thành 210 (tạo thành độ dốc từ trường theo trục mà quay theo hướng trục về phía buồng giam giữ 100). Hai phần FRC hình thành (bắc và nam) được tạo thành và được tăng tốc sau đó mở rộng vào trong buồng giam giữ có đường kính lớn hơn 100, trong đó các cuộn dây tựa như là dc 412 tạo ra trường được dịch chuyển về phía trước để điều khiển việc mở rộng theo hướng kính và tạo ra thông lượng từ bên ngoài cân bằng.

Khi các hình thành FRC bắc và nam đi tới gần mặt phẳng giữa của buồng giam giữ 100, các FRC sẽ va chạm. Trong quá trình va chạm, các năng lượng động lượng theo hướng trục của các hình thành FRC bắc và nam được gia nhiệt rất lớn khi các FRC cuối cùng hợp nhất vào trong một FRC đơn 450. Bộ lớn các chẩn đoán plasma là có sẵn trong buồng giam giữ 100 để nghiên cứu sự cân bằng của FRC 450. Các điều kiện vận hành thông thường trong hệ thống FRC 10 tạo ra các FRC hợp phần với bán kính bộ phận tách khoảng 0,4m và mở rộng theo hướng trục khoảng 3m. Các đặc điểm khác là các từ trường bên ngoài khoảng 0,1T, các mật độ plasma khoảng $5 \times 10^{19} \text{ m}^{-3}$ và nhiệt độ plasma tổng lên tới 1keV. Không có sự duy trì bất kỳ nào, tức là không có việc gia nhiệt và/hoặc dòng dẫn qua việc phun chùm trung hòa hoặc các phương tiện hỗ trợ khác, thời gian sống của các FRC này bị hạn chế tới khoảng 1ms, thời gian phân rã cấu hình đặc trưng bản địa.

Dữ liệu thực nghiệm của việc vận hành không được duy trì - Chế độ thông thường

Fig.12 thể hiện sự tiến triển thời gian tiêu biểu của bán kính thông lượng loại trừ, $r_{\Delta\Phi}$, vốn xấp xỉ bán kính bộ phận tách, r_s , để minh họa động lực học của quá trình hợp nhất ghim theta của FRC 450. Hai plasmoid riêng rẽ (bắc và nam) được tạo ra đồng thời và sau đó được tăng tốc ra khỏi các vùng hình thành tương ứng 200 tại tốc độ siêu âm, $v_Z \sim 250 \text{ km/s}$, và va chạm gần mặt phẳng giữa tại $z = 0$. Trong suốt quá trình va chạm, các plasmoid nén theo hướng trục, tiếp theo bởi việc mở rộng nhanh theo hướng kính và hướng trục, trước hợp nhất cuối cùng để tạo thành FRC 450. Cả động lực học theo hướng kính và theo hướng trục của việc hợp nhất FRC 450 đều có chứng cứ bởi các đo đạc biên dạng mật độ chi tiết và việc chụp cắt lát dựa trên nhiệt bức xạ kế.

Dữ liệu từ quá trình xả không được duy trì tiêu biểu của hệ thống FRC 10 được thể hiện dưới dạng các hàm của thời gian trên Fig.13A, Fig.13B, Fig.13C và Fig.13D. Bán kính thông lượng bị loại trừ tại mặt phẳng giữa theo trục của máy được thể hiện trên Fig.13A. Dữ liệu này được thu từ mảng các đầu dò từ tính, nằm ngay bên trong thành thép không gỉ của buồng giam giữ, đo từ trường theo trục. Thành thép là bộ phận lưu giữ thông lượng tốt trên các thang thời gian của việc xả này.

Các cường độ đường tích phân được thể hiện trên Fig.13B, từ dụng cụ đo giao thoa CO₂/He-Ne 6 dây nằm ở $z = 0$, xem xét việc dịch chuyển FRC thẳng đứng (y), như được đo bởi việc chụp cắt lát của nhiệt bức xạ kế, việc đảo Abel tạo ra các đường viền mật độ của các Fig.13C. Sau một số cú đánh mạnh theo hướng trục và hướng kính trong suốt 0,1ms đầu tiên, FRC ổn định với biên dạng mật độ rộng. Biên dạng này là tương đối phẳng, với mật độ chính trên trục, như được biểu cầu bởi cân bằng 2-D FRC thông thường.

Tổng nhiệt độ plasma được thể hiện trên Fig.13D, được dẫn ra từ cân bằng áp suất và hoàn toàn thống nhất với các đo đặc tán xạ và quang phổ Thomson.

Phân tích từ toàn bộ mảng thông lượng bị loại trừ chỉ thị rằng hình dạng của bộ phận tách FRC (được xấp xỉ bởi các biên dạng theo trục thông lượng bị loại trừ) phát triển đều đặn từ dạng đường chạy tới dạng hình elip. Việc phát triển này, như được thể hiện trên Fig.14, là thống nhất với việc tái kết nối từ tính đều đặn từ hai thành một FRC đơn. Thực sự là, các ước lượng thô đề xuất rằng thời điểm cụ thể này khoảng 10% của hai thông lượng từ RFC khởi tạo sẽ tái kết nối trong khi va chạm.

Chiều dài FRC co lại đều đặn từ 3m xuống khoảng 1m trong suốt thời gian sống của FRC. Việc co rút này, nhìn thấy được trên Fig.14, đề xuất rằng hầu hết tổn thất năng lượng đối lưu gây ảnh hưởng lớn tới việc giam giữ FRC. Khi áp suất plasma bên trong bộ phận tách giảm nhanh hơn áp suất từ tính bên ngoài, thì ứng suất đường sức từ trong các vùng kết thúc nén FRC theo hướng trục, phục hồi cân bằng theo hướng trục và hướng kính. Với việc xả được mô tả trong các Fig.13 và Fig.14, thông lượng từ FRC, tồn trữ hạt, và nhiệt năng (khoảng 10mWb, 7×10^{19} hạt, và 7kJ, một cách tương ứng) được giảm mạnh theo bậc của biên độ trong mili giây thứ nhất, khi cân bằng FRC xuất hiện để giảm xuống.

Việc vận hành được duy trì - Chế độ HPF

Các ví dụ trên các hình vẽ Fig.12 đến Fig.14 là đặc trưng của FRC phân rã mà không có bất kỳ sự duy trì nào. Tuy nhiên, nhiều kỹ thuật đã được phát triển trên hệ thống FRC 10 để tiếp tục cải tiến việc giam giữ FRC (lõi bên trong và lớp cạnh) cho chế độ HPF và duy trì cho cấu hình.

Các chùm trung hòa

Đầu tiên, (H) phần trung hòa nhanh được phun vuông góc vào B_z trong các chùm từ tám bộ phận phun chùm trung hòa 600. Các chùm của các phần trung hòa nhanh được phun từ thời điểm các vùng hình thành FRC bắc nam hợp nhất trong buồng giam giữ 100 thành một FRC 450. Các ion nhanh, được tạo chủ yếu bởi việc trao đổi điện tích, có các quỹ đạo betatron (với bán kính sơ cấp trên thang của cấu trúc liên kết FRC hoặc ít nhất là lớn hơn nhiều so với thang chiều dài độ dốc từ trường đặc trưng) thêm vào dòng theo phương vị của FRC 450. Sau một số phần của việc xả (sau 0.5ms đến 0.8ms vào trong một lần bắn), phân bố ion nhanh đủ lớn cải thiện một cách đáng kể các tính chất độ ổn định và giam giữ của FRC bên trong (ví dụ xem *M.W. Binderbauer and N. Rostoker, Plasma Phys. 56, part 3, 451 (1996)*). Hơn nữa, từ khía cạnh được duy trì, các chùm từ các bộ phận phun chùm trung hòa 600 cũng là các phương tiện sơ cấp để điều khiển dòng điện và gia nhiệt cho plasma FRC.

Trong chế độ plasma của hệ thống FRC 10, các ion nhanh giảm tốc chủ yếu là trên các electron plasma. Trong suốt phần đầu của việc xả, các thời gian giảm tốc được trung bình hóa cho quỹ đạo của các ion nhanh là 0,3 – 0,5ms, tạo thành việc gia nhiệt FRC đáng kể, chủ yếu là của các electron. Các ion nhanh tạo ra việc lệch lớn theo hướng kính ra bên ngoài bộ phận tách do từ trường FRC bên trong vốn đã thấp (trung bình khoảng 0,03T cho trường theo trục bên ngoài 0,1T). Các ion nhanh sẽ bị tổn thương cho tổn thất trao đổi nạp, nếu mật độ khí trung hòa là quá lớn ở bên ngoài bộ phận tách. Do đó, việc khử khí thành và các kỹ thuật khác (như súng plasma 350 và các chốt cảm gương 440 đóng góp, bên cạnh các phần khác, vào việc điều khiển khí) được triển khai trên hệ thống FRC 10 có xu hướng tối thiểu hóa các phần trung hòa cạnh và cho phép tạo dòng ion nhanh cần thiết.

Hoạt động phun hạt

Khi phân bố ion nhanh đáng kể được tạo ra trong FRC 450, với các nhiệt độ electron cao hơn và các thời gian sống FRC dài hơn, các hạt H hoặc D được đóng băng được phun vào trong FRC 450 từ bộ phận phun hạt 700 để duy trì tồn trữ hạt FRC của FRC 450. Các thang thời gian tiêu mòn thấy trước là đủ ngắn để tạo ra nguồn hạt FRC đáng kể. Tỷ lệ này cũng có thể được tăng bởi việc phóng đại diện tích bề mặt của mảnh được phun bằng cách phá vỡ các hạt riêng rẽ thành các phần vỡ

nhỏ hơn trong khi ở trong các thùng hoặc các ống phun của bộ phận phun hạt 700 và trước khi đi vào buồng giam giữ 100, bước này có thể đạt được bằng cách tăng ma sát giữa hạt và các thành của ống phun bằng cách xiết chặt bán kính gấp của phần cuối cùng của ống phun ngay trước khi đi vào trong buồng giam giữ 100. Theo việc thay đổi trình tự bắn và tỉ lệ của 12 thùng (các ống phun) cũng như việc phân mảnh, có thể điều chỉnh hệ thống phun hạt 700 để chỉ tạo ra mức mong muốn của việc duy trì tồn trữ hạt. Đến lượt nó, nó giúp duy trì áp suất động lực bên trong trong FRC 450 và việc vận hành được duy trì và thời gian sống của FRC 450.

Khi các nguyên tử bị phá tan gặp plasma đáng kể trong FRC 450, chúng được ion hóa hoàn toàn. Sau đó, thành phần plasma lạnh tạo thành được gia nhiệt theo va chạm bởi plasma FRC ban đầu. Năng lượng cần thiết để duy trì nhiệt độ FRC mong muốn được cung cấp cuối cùng bởi các bộ phận phun chùm 600. Theo nghĩa này, các bộ phận phun hạt 700 cùng với các bộ phận phun chùm trung hòa 600 tạo thành hệ thống duy trì trạng thái ổn định và duy trì FRC 450.

Hoạt động phun CT

Như một phương án thay thế cho bộ phận phun hạt, bộ phận cuộn dây hình xuyên nhỏ gọn (compact toroid - CT) được tạo ra, chủ yếu để nạp liệu các plasma có cấu hình được đảo ngược trường (field-reversed configuration - FRC). Bộ phận phun CT 720 chứa súng plasma đồng trục được từ hóa (magnetized coaxial plasma-gun - MCPG), mà, như được thể hiện trên Fig.22A và Fig.22B, chứa các điện cực bên trong và bên ngoài hình trụ đồng trục 722 và 724, cuộn thiên áp được định vị bên trong của điện cực bên trong 726 và bộ phận ngắt điện 728 trên đầu cuối đối diện với việc xả của bộ phận phun CT 720. Khí được phun vào qua cổng phun khí 730 vào trong không gian giữa các điện cực bên trong và bên ngoài 722 và 724 và plasma dạng Spheromak được sinh ra ở đó bằng cách xả và đẩy ra từ súng bởi lực Lorentz. Như được thể hiện trên Fig.23A và Fig.23B, cặp các bộ phận phun CT 720 được ghép nối với buồng giam giữ 100 gần trên các cạnh đối diện của mặt phẳng giữa của bể 100 để phun các CT bên trong plasma FRC trung tâm nằm trong buồng giam giữ 100. Đầu xả của các bộ phận phun CT 720 được hướng về phía mặt phẳng giữa của buồng giam

giữ 100 ở một góc so với đường trục dọc của buồng giam giữ 100 tương tự với các bộ phun chùm trung hòa 615.

Theo phương án thực hiện khác, bộ phận phun CT 720, như được thể hiện trên Fig.24A và Fig.24B, chứa ống trôi 740 chứa ống hình trụ kéo dài được ghép nối với đầu cuối xả của bộ phận phun CT 720. Như được mô tả, ống trôi 740 chứa các cuộn ống trôi 742 được định vị quanh và tách biệt theo hướng trục dọc theo ống. Nhiều công chân đoán 744 được mô tả dọc theo chiều dài của ống.

Các ưu điểm của bộ phận phun CT 720 là: (1) điều khiển và có khả năng điều chỉnh lượng tồn của các hạt cho mỗi CT được phun; (2) plasma ấm được lắng đọng (thay cho các hạt đông lạnh); (3) hệ thống có thể được vận hành trong chế độ rep-rate để cho phép nạp liệu liên tục; (4) hệ thống cũng có thể phục hồi thông lượng từ như các CT được phun mang từ trường được nhúng. Theo phương án thực hiện của việc sử dụng làm thí nghiệm, đường kính trong của điện cực bên ngoài là 83.1mm và đường kính ngoài của điện cực bên trong là 54.0mm. Bề mặt của điện cực bên trong 722 sẽ tốt hơn nếu được phủ bằng vonfram để làm giảm việc các tạp chất đi ra khỏi điện cực 722. Như được mô tả, cuộn thiên áp 726 được gắn bên trong điện cực trong 722.

Theo các thí nghiệm hiện tại, có thể đạt được tốc độ dịch chuyển CT siêu âm lên tới $\sim 100\text{km/s}$. Các thông số plasma thông thường khác là như sau: mật độ electron $\sim 5 \times 10^{21}\text{m}^{-3}$, nhiệt độ electron $\sim 30\text{-}50\text{eV}$, lượng dư của hạt là $\sim 0.5\text{--}1.0 \times 10^{19}$. Áp suất động năng cao của CT cho phép plasma được phun vào thâm nhập sâu vào trong FRC và lắng đọng các hạt bên trong bộ phận tách. Trong các thí nghiệm hiện tại, việc nạp liệu hạt FRC tạo thành $\sim 10\text{-}20\%$ là lượng dư hạt FRC được tạo ra bởi các bộ phận phun CT thể hiện thành công việc nạp liệu có thể được thực hiện mà không làm gián đoạn plasma FRC.

Các cuộn dây hình yên ngựa

Để đạt được việc điều khiển dòng điện trạng thái ổn định và duy trì dòng ion cần thiết, mong muốn là phải hạn chế hoặc làm giảm một cách đáng kể việc quay tròn lên của electron do lực ma sát electron-ion (tạo thành từ việc truyền động năng va chạm ion electron). Hệ thống FRC 10 sử dụng kỹ thuật mới để tạo ra việc phá vỡ

electron thông qua trường lưỡng cực hoặc tứ cực từ tính được áp dụng từ bên ngoài. Điều này được hoàn thiện thông qua các cuộn dây hình yên ngựa bên ngoài 460 được mô tả trên Fig.15. Từ trường theo hướng kính được tác dụng theo phương ngang từ các cuộn dây hình yên ngựa 460 tạo ra điện trường theo hướng trục trong plasma FRC quay. Dòng electron theo hướng trục được tạo thành tương tác với từ trường theo hướng kính để tạo ra lực phá vỡ theo phương vị trên các electron, $F_{\theta} = -\sigma V_{e0} \langle |B_r|^2 \rangle$. Với điều kiện thông thường trong hệ thống FRC 10, trường từ lưỡng cực (hoặc tứ cực) được áp dụng được yêu cầu nằm trong plasma chỉ cần ở cỡ 0,001T để tạo ra việc phá vỡ electron tương xứng. Trường bên ngoài tương ứng khoảng 0,015 T là đủ nhỏ để không làm cho các hạt nhanh có giá trị bị mất, hoặc theo cách khác, là gây ảnh hưởng xấu tới việc giam. Thực tế, trường từ lưỡng cực (hoặc tứ cực) được áp dụng đóng góp vào việc làm kìm nén độ mất ổn định. Kết hợp với sự phun chùm trung hòa theo phương tiếp tuyến và phun plasma dọc trục, các cuộn dây hình yên ngựa 460 tạo ra mức điều khiển bổ sung đối với độ duy trì và độ ổn định dòng điện.

Các chốt cấm gương

Thiết kế của các cuộn dây được tạo xung 444 nằm trong các chốt cấm gương 440 cho phép tạo cục bộ các từ trường cao (2T tới 4 T) với tổng năng lượng vừa phải (khoảng 100 kJ). Đối với việc hình thành của các từ trường thông thường của việc vận hành hiện tại của hệ thống FRC 10, tất cả các đường sức trường nằm trong thể tích hình thành được chuyển qua các phần thất vào 442 tại các chốt cấm gương 440, như được đề xuất bởi các đường sức từ trường trên Fig.2 và tiếp xúc thành plasma sẽ không xuất hiện. Ngoài ra, các chốt cấm gương 440 trong bố trí trước sau với các nam châm bộ chuyển hướng gần như là dc 416 có thể được điều chỉnh để dẫn hướng các đường sức trường lên trên các điện cực chuyển hướng 910, hoặc làm loe các đường sức trường trong cấu hình đỉnh, cuối (không được thể hiện). Phần sau cải thiện độ ổn định và làm giảm cảm ứng nhiệt electron song song.

Các chốt cấm gương 440 tự bản thân chúng cũng đóng góp vào việc điều khiển khí trung hòa. Các chốt cấm gương 440 cho phép sử dụng tốt hơn khí đơteri được phụt vào trong các ống thạch anh trong khi hình thành FRC, khi khí ngược dòng vào trong các bộ chuyển hướng 300 được giảm một cách đáng kể bởi độ dẫn khí nhỏ của

các chốt (lớn 500L/s). Hầu hết khí được phụt vào còn lại bên trong các ống hình thành 210 sẽ nhanh chóng được ion hóa. Ngoài ra, luồng chảy plasma mật độ cao qua các chốt cấm gương 440 tạo ra việc ion hóa trung hòa một cách hiệu quả do đó tạo thành bộ phận chắn khí hiệu quả. Kết quả là, hầu hết các phần trung hòa được tái chế trong các bộ chuyển hướng 300 từ lớp cạnh FRC 456 không quay trở buồng giam giữ 100. Ngoài ra, các phần trung hòa được kết hợp với việc hoạt động của các súng plasma 350 (như được mô tả bên dưới) sẽ hầu như bị nhốt vào các bộ chuyển hướng 300.

Cuối cùng, các chốt cấm gương 440 có xu hướng cải thiện việc giam giữ lớp cạnh FRC. Với các tỉ lệ gương (các từ trường chốt/giam) trong khoảng giới hạn từ 20 đến 40, và với chiều dài 15m giữa các chốt cấm gương bắc và nam 440, thời gian giam giữ hạt ở lớp cạnh $\tau_{\parallel}$ tăng bởi khoảng lên tới cỡ biên độ. Việc cải thiện $\tau_{\parallel}$ sẵn sàng làm tăng việc giam giữ hạt FRC.

Giả sử rằng tổn thất hạt phân tán theo hướng kính (D) từ thể tích của bộ phận tách 453 được làm cân bằng bởi tổn thất theo trục ($\tau_{\parallel}$) từ lớp cạnh 456, có thể thu được $(2\pi r_s L_s)(Dn_s/\delta) = (2\pi r_s L_s \delta)(n_s/\tau_{\parallel})$, mà từ đó chiều dài độ dốc mật độ của bộ phận tách có thể được viết lại như là $\delta = (D\tau_{\parallel})^{1/2}$. Ở đây r_s , L_s và n_s là các bán kính của bộ phận tách, chiều dài bộ phận tách và mật độ của bộ phận tách một cách tương ứng. Thời gian giam giữ hạt FRC $\tau_N = [\pi r_s^2 L_s \langle n \rangle] / [(2\pi r_s L_s)(Dn_s/\delta)] = (\langle n \rangle / n_s)(\tau_{\perp} \tau_{\parallel})^{1/2}$, trong đó $\tau_{\perp} = a^2/D$ với $a=r_s/4$. Theo nghĩa vật lý, việc cải thiện $\tau_{\parallel}$ dẫn tới δ được tăng (độ dốc mật độ của bộ phận tách bị giảm thông số trôi dạt), và, do đó, tổn thất hạt FRC được làm giảm. Cải tiến tổng thể trong việc giam giữ hạt FRC thường nhỏ hơn bậc hai do n_s tăng với $\tau_{\parallel}$.

Cải thiện đáng kể trong $\tau_{\parallel}$ cũng yêu cầu là lớp cạnh 456 giữ được ổn định tổng thể (tức là, số $n = 1$ đường rãnh, ống chứa cháy, hoặc tính không ổn định MHD khác thông thường của các hệ thống mở). Việc sử dụng của các súng plasma 350 tạo ra độ ổn định cạnh được ưu tiên này. Theo nghĩa này, các chốt cấm gương 440 và súng plasma 350 tạo thành hệ thống điều khiển cạnh hiệu quả.

Các súng plasma

Các súng plasma 350 cải thiện độ ổn định của các luồng phun xả FRC 454 bằng cách xiết chặt đường. Plasma súng từ các súng plasma 350 được sinh ra mà không có động lượng góc phương vị, chứng minh được việc sử dụng hiệu quả trong việc điều khiển các tính bất ổn quay FRC. Do vậy, các súng 350 là các phương tiện hiệu quả để điều khiển tính bất ổn của FRC mà không cần phải có kỹ thuật ổn định từ cực cũ hơn. Kết quả là, các súng plasma 350 làm cho nó có thể thu được lợi thế của các hiệu ứng có lợi của các hạt nhanh hoặc truy cập chế độ FRC động lực lai cải tiến như được chỉ ra trong phần mô tả này. Do đó, các súng plasma 350 cho phép hệ thống FRC 10 có thể được vận hành với các dòng cuộn dây yên ngựa tương ứng cho việc phá vỡ electron nhưng bên dưới ngưỡng gây ra độ bất ổn FRC và/hoặc dẫn tới việc phân tán hạt nhanh mạnh mẽ.

Như được đề cập tới trong mô tả chốt cắm gương (*Mirror Plug*) nêu trên, nếu $\tau_{\parallel}$ có thể được cải thiện một cách đáng kể, plasma súng được cung cấp có thể so sánh được với tỉ lệ tổn thất hạt lớp cạnh ($\sim 10^{22}$ /s). Thời gian sống của plasma được tạo ra bởi súng trong hệ thống FRC 10 là trong khoảng cỡ mili giây. Thực vậy, xem xét plasma được tạo bởi súng với mật độ $n_e \sim 10^{13} \text{ cm}^{-3}$ và nhiệt độ ion khoảng 200eV, bị giam giữa các chốt cắm gương cuối 440. Chiều dài bẫy L và tỉ lệ gương R một cách tương ứng là khoảng 15m và 20. Đường tự do trung bình của ion do va chạm Coulomb là $\lambda_{ii} \sim 6 \times 10^3 \text{ cm}$ và, do $\lambda_{ii} \ln R / R < L$, nên các ion bị nhốt trong chế độ khí-động. Thời gian giam giữ plasma trong chế độ này là $\tau_{gd} \sim RL/2V_s \sim 2 \text{ ms}$, trong đó V_s là tốc độ âm thanh ion. Để so sánh, thời gian giam giữ ion truyền thống cho các thông số plasma này nên là $\tau_c \sim 0,5\tau_{ii}(\ln R + (\ln R)^{0,5}) \sim 0,7 \text{ ms}$. Việc phân tán ngang dị thường này có thể, theo nguyên lý, làm ngắn thời gian giam giữ plasma. Tuy nhiên, trong hệ thống FRC 10, nếu giả sử rằng tỉ lệ khuếch tán Bohm, thời gian giam giữ ngang được ước lượng cho plasma được tạo bởi súng là $\tau_{\perp} > \tau_{gd} \sim 2 \text{ ms}$. Do đó, các súng sẽ tạo ra việc nạp lại nhiên liệu một cách đáng kể của lớp cạnh FRC 456, và việc giam giữ hạt FRC tổng hợp được cải thiện.

Ngoài ra, các luồng plasma từ súng có thể được bật lên trong khoảng từ 150 tới 200 mili giây, cho phép sử dụng trong việc khởi động, dịch chuyển và dung hợp FRC vào trong buồng giam giữ 100. Nếu được bật quanh $t \sim 0$ (việc khởi đầu bộ phận trữ chính FRC), các plasma từ súng giúp duy trì FRC được tạo thành và được

dung hợp theo cách động hiện có 450. Các thành phần dự trữ hạt được kết hợp từ các phần FRC hình thành và từ các súng là tương ứng cho việc bắt giữ chùm trung hòa, gia nhiệt cho plasma, và việc duy trì dài. Nếu được bật tại t trong khoảng giới hạn từ -1 đến 0ms, thì các plasma súng có thể điền vào các ống thạch anh 210 với plasma hoặc ion hóa khí được phụt vào trong các ống thạch anh, do đó cho phép hình thành FRC với khí được phụt vào được giảm hoặc thậm chí là không có khí được phụt vào. Phần sau có thể yêu cầu việc tạo thành plasma đủ lạnh để cho phép phân tán nhanh từ trường trôi dạt đảo ngược. Nếu được bật tại thời điểm $t < -2$ ms, các luồng plasma có thể điền khoảng từ 1 đến 3 m³ thể tích đường sức trường của các vùng hình thành và giam giữ của các vùng hình thành 200 và buồng giam giữ 100 với mật độ plasma đích cỡ vài 10^{13} cm⁻³, đủ để cho phép tạo nên chùm trung hòa trước khi FRC tới. Các FRC hình thành sau đó có thể được tạo thành và được dịch chuyển bên trong plasma bình giam giữ được tạo thành. Theo cách này các súng plasma 350 cho phép tạo ra một dải rộng các điều kiện vận hành và các chế độ thông số.

Thế hiệu dịch điện

Việc điều khiển của biên dạng điện trường theo hướng kính trong lớp cạnh 456 là có lợi theo nhiều cho khả năng ổn định và giam giữ FRC. Theo các thành phần trôi dạt theo sáng chế được triển khai trong hệ thống FRC 10 có thể áp dụng nhiều phân bố thận trọng của các điện thế cho nhóm các bề mặt thông lượng mở xuyên qua máy từ các vùng bên ngoài vùng giam giữ trung tâm trong buồng giam giữ 100. Theo cách này, các điện trường theo hướng kính có thể được sinh ra qua lớp cạnh 456 ở ngay bên ngoài FRC 450. Các điện trường theo hướng kính sau đó biến đổi việc quay phương vị của lớp cạnh 456 và tác động tới việc giam giữ của nó thông qua vận tốc trượt $E \times B$. Việc quay vị phân bất kỳ giữa lớp cạnh 456 và lõi FRC 453 sau đó có thể được truyền vào phần bên trong của plasma FRC nhờ việc trượt. Kết quả là, việc điều khiển lớp cạnh 456 tác động một cách trực tiếp tới lõi FRC 453. Ngoài ra, do năng lượng tự do trong việc quay plasma cũng có thể chịu trách nhiệm cho việc bất ổn định nên kỹ thuật này tạo ra các phương tiện trực tiếp để điều khiển việc xâm nhập và phát triển của các phần không ổn định. Trong hệ thống FRC 10, việc trôi dạt cạnh thích hợp cung cấp việc điều khiển hiệu quả của việc vận chuyển

và quay đường trường hồ cũng như việc quay lõi FRC. Vị trí và hình dạng của các điện cực được tạo ra khác nhau 900, 905, 910 và 920 cho phép điều khiển các nhóm khác nhau của các bề mặt thông lượng 455 và tại các thể khác nhau và độc lập. Theo cách này, mảng rộng của các cấu hình điện trường khác nhau và các độ mạnh khác nhau có thể được nhận biết, mỗi phần với đặc trưng khác nhau tác động lên trên hiệu quả hoạt động của plasma.

Ưu điểm chính của tất cả các kỹ thuật trôi dạt mới này là ở chỗ hành vi của plasma lõi và cạnh có thể bị ảnh hưởng tốt từ bên ngoài plasma FRC, tức là không cần phải đem các thành phần vật lý bất kỳ nào tiếp xúc với plasma nóng ở trung tâm (vốn sẽ có nhiều tác động tới các tổn thất năng lượng, thông lượng và các tổn thất hạt). Nó có tác động có lợi chủ yếu lên hiệu quả hoạt động và tất cả các ứng dụng tiềm tàng của khái niệm HPF.

Dữ liệu thực nghiệm - việc hoạt động của HPF

Việc phun của các hạt nhanh thông qua các chùm từ các súng chùm trung hòa 600 đóng vai trò quan trọng trong việc cho phép thực hiện chế độ HPF. Fig.16A, Fig.16B, Fig.16C và Fig.16D minh họa trường hợp này. Được mô tả là bộ các đường đặc tuyến thể hiện cách mà thời gian sống FRC tương quan với chiều dài của các xung của chùm. Tất cả các điều kiện vận hành khác được giữ không đổi cho tất cả các việc xả, bao gồm cả nghiên cứu này. Dữ liệu được trung bình hóa qua nhiều lần bắn, và do đó thể hiện hành vi thông thường. Rõ ràng là khoảng thời gian của chùm dài hơn sẽ tạo ra các FRC sống dài hơn. Xem xét bằng chứng này cũng như các chẩn đoán khác trong nghiên cứu này, nó minh họa rằng các chùm làm tăng độ ổn định và làm giảm các tổn thất. Tương quan giữa chiều dài xung chùm và thời gian sống FRC là không hoàn hảo do việc bắn chùm trở nên không hiệu quả ở bên dưới kích cỡ plasma cụ thể, tức là, khi FRC 450 co lại trong kích thước vật lý mà không phải tất cả các chùm được phun vào đều được chặn và bắn. Việc co lại của FRC chủ yếu là do trên thực tế có tổn thất năng lượng thực (~4MW khoảng ở giữa tới phần xả) từ plasma FRC trong khi xả lớn hơn công suất tổng được nạp vào trong FRC thông qua các chùm trung hòa (~2,5 MW) cho thiết lập thực nghiệm cụ thể. Việc định vị các

chùm tại vị trí gần với mặt phẳng giữa của bình 100 hơn sẽ có xu hướng làm giảm các tổn thất này và mở rộng thời gian sống của FRC.

Fig.17A, Fig.17B, Fig.17C và Fig.17D minh họa các hiệu quả của các thành phần khác để đạt được chế độ HPF. Nó thể hiện họ các đường đặc tuyến thông thường mô tả thời gian sống của FRC 450 như là hàm của thời gian. Trong tất cả các trường hợp, lượng vừa phải, không đổi của công suất chùm (khoảng 2,5MW) được phun cho toàn bộ khoảng thời gian của từng lần xả. Mỗi đường cong là thể hiện của tổ hợp khác nhau của các thành phần. Ví dụ, việc vận hành của hệ thống FRC 10 mà không có các chốt cấm gương 440, các súng plasma 350 bất kỳ nào hoặc việc khử khí từ các hệ thống khử khí 800 sẽ tạo thành sự xâm nhập nhanh của phần không ổn định quay tròn và tạo thành tổn thất của cấu trúc liên kết FRC. Việc chỉ thêm các chốt cấm gương 440 làm trễ việc xâm nhập của phần không ổn định và làm tăng việc giam giữ hãm. Việc sử dụng tổ hợp của các chốt cấm gương 440 và súng plasma 350 còn làm giảm sự không ổn định và tăng thời gian sống FRC. Cuối cùng, việc khử khí bổ sung (Ti trong trường hợp này) trên đỉnh của súng 350 và các chốt 440 tạo ra các kết quả tốt nhất – FRC tạo thành không có sự mất ổn định nào và thể hiện thời gian sống dài nhất. Rõ ràng từ minh họa thực nghiệm rằng kết hợp hoàn toàn của các thành phần tạo ra hiệu quả tốt nhất và tạo ra các chùm với các điều kiện đích tốt nhất.

Như được thể hiện trên Fig.1, cơ chế HPF mới được phát hiện thể hiện thành vi vận chuyển được cải thiện một cách mạnh mẽ. Fig.1 minh họa thay đổi trong thời gian giam giữ hạt trong hệ thống FRC 10 giữa cơ chế thông thường và cơ chế HPF. Như có thể được quan sát, nó được cải thiện tốt, vượt quá thông số 5 trong chế độ HPF. Ngoài ra, Fig.1 chi tiết hóa thời gian giam giữ hạt trong hệ thống FRC 10 so với thời gian giam giữ hạt trong các thí nghiệm FRC thông thường trước đó. Liên quan tới các máy khác, chế độ HPF của hệ thống FRC 10 có việc giam giữ được cải tiến nhờ thông số trong khoảng từ 5 và gần tới 20. Cuối cùng và quan trọng nhất, bản chất của việc định cỡ giam giữ của hệ thống FRC 10 trong chế độ HPF là khác biệt một cách đáng kể với tất cả các đo đạc trước kia. Trước khi thiết lập của chế độ HPF trong hệ thống FRC 10, các định luật định cỡ theo kinh nghiệm khác nhau được dẫn ra từ dữ liệu để dự đoán các thời gian giam giữ trong các thí nghiệm FRC trước đó. Tất cả các quy tắc định cỡ này phụ thuộc chủ yếu vào tỉ lệ R^2/ρ_i , trong đó R là bán

kính của từ trường bằng không (đo đặc thô của việc định cỡ vật lý của máy) và p_i là bán kính larmor ion được nâng lên trong trường được tác dụng từ bên ngoài (đo đặc thô của từ trường được áp dụng). Từ Fig.1, rõ ràng là việc giam giữ dài trong các FRC truyền thống chỉ có thể thực hiện tại máy có kích cỡ lớn và/hoặc từ trường cao. Việc vận hành hệ thống FRC 10 trong CR chế độ FRC thông thường có xu hướng tuân theo các quy tắc định cỡ, như được chỉ ra trên Fig.1. Tuy nhiên, chế độ HPF là vượt trội và có thể thu được việc giam giữ tốt hơn nhiều mà không cần máy có kích cỡ lớn hoặc các từ trường cao. Quan trọng hơn, rõ ràng từ Fig.1 là chế độ HPF tạo thành thời gian giam giữ cải tiến với kích cỡ plasma được làm giảm khi so sánh với chế độ CR. Các xu hướng tương tự cũng có thể được nhìn thấy cho các thời gian giam giữ thông lượng và năng lượng, như được mô tả bên dưới, được tăng quá bởi thông số 3-8 cũng trong hệ thống FRC 10. Do đó, điểm vượt trội của chế độ HPF này là nó cho phép sử dụng công suất chùm vừa phải, các từ trường thấp hơn và kích cỡ nhỏ hơn để duy trì và duy trì sự cân bằng FRC trong hệ thống FRC 10 và các máy có năng lượng cao hơn trong tương lai. Cùng với các cải tiến này là có thể thu được các giá thành vận hành và xây dựng thấp, cũng như giảm được độ phức tạp về kỹ thuật.

Với so sánh khác, Fig.18 thể hiện dữ liệu từ việc xả chế độ HPF biểu diễn trong hệ thống FRC 10 dưới dạng hàm của thời gian. Fig.18A mô tả bán kính thông lượng bị loại trừ tại mặt phẳng giữa. Với các thang thời gian dài hơn này, thành thép dẫn không còn tốt cho bộ phận bảo toàn thông lượng và các đầu dò từ tính ở bên trong thành được tăng cường với các đầu dò ở bên ngoài thành để chịu trách nhiệm cho thông lượng từ việc phân tán qua thép. So sánh với hiệu suất đặc trưng trong chế độ CR thông thường, như được thể hiện trên Fig.13A, Fig.13B, Fig.13C và Fig.13D, chế vận hành chế độ HPF có trên 400% dài hơn tuổi làm việc.

Đường đặc trưng của vết mật độ đường tích phân được thể hiện trên Fig.18B với độ bù ngược Abel của nó, các đường bao mật độ, trên Fig.18C. So với chế độ CR của FRC thông thường, như được thể hiện trên Fig.13A, Fig.13B, Fig.13C và Fig.13D, plasma là ổn định hơn trong toàn bộ xung, biểu thị chế độ hoạt động rất ổn định. Mật độ đỉnh cũng hơi thấp hơn trong các lần bắn HPF— đây là hậu quả của tổng nhiệt độ plasma nóng hơn (lên đến hệ số bằng 2) như được thể hiện trên Fig.18D.

Với việc xả tương ứng được minh họa trên Fig.18A, Fig.18B, Fig.18C và Fig.18D, các thời gian giam giữ năng lượng, hạt và thông lượng là 0,5ms, 1ms và 1ms, một cách tương ứng. Tại thời gian tham chiếu 1ms vào trong việc xả, năng lượng plasma được giữ là 2 kJ trong khi các tổn thất là khoảng 4MW, làm cho đích này trở nên rất thích hợp cho việc duy trì chùm trung hòa.

Fig.19 tổng hợp tất cả các ưu điểm của chế độ HPF ở dạng của việc định cỡ giam giữ thông lượng HPF thực nghiệm mới được thiết lập. Như có thể thấy trên Fig.19, dựa trên các đo đạc được tiến hành trước và sau $t = 0,5\text{ms}$, ví dụ, $t \leq 0,5\text{ ms}$ và $t > 0,5\text{ ms}$, việc giam giữ thông lượng (và một cách tương tự là việc giam giữ hạt và giam giữ năng lượng) tỷ lệ mạnh với bình phương của nhiệt độ electron (electron Temperature - T_e) cho bán kính bộ phận tách (r_s) đã cho. Sự tỷ lệ mạnh này với lũy thừa dương của T_e (và không phải là lũy thừa âm) được hoàn thiện, trái với phần được thể hiện bởi các Tokomak truyền thống, trong đó việc giam giữ thường tỉ lệ ngược với một số lũy thừa của nhiệt độ electron. Biểu thị của việc định cỡ này là kết quả trực tiếp của trạng thái HPF và phân bố ion quỹ đạo lớn (tức là các quỹ đạo trên quy mô của cấu trúc liên kết FRC và/hoặc ít nhất là việc định cỡ chiều dài độ dốc từ trường đặc trưng). Về cơ bản, việc định cỡ mới này về cơ bản là tạo thuận tiện cho các nhiệt độ vận hành cao và cho phép các lò phản ứng có kích thước tương đối khiêm tốn.

Với các ưu điểm mà chế độ HPF đã thể hiện, có thể thu được khả năng duy trì FRC hoặc trạng thái ổn định được dẫn bởi các chùm trung hòa, nghĩa là các thông số plasma toàn cục như năng lượng nhiệt plasma, tổng số lượng hạt, chiều dài và bán kính plasma cũng như thông lượng từ là có thể duy trì được tại các mức hợp lý mà về cơ bản không bị phân hủy. Để so sánh, Fig.20 thể hiện dữ liệu trong vùng A từ việc xả chế độ HPF biểu diễn trong hệ thống FRC 10 dưới dạng hàm của thời gian và trong vùng B cho việc xả chế độ HPF biểu diễn được nhô ra trong hệ thống FRC 10 dưới dạng hàm của thời gian trong đó FRC 450 được duy trì mà không bị phân rã qua khoảng thời gian của xung chùm trung hòa. Với vùng A, các chùm trung hòa với công suất tổng trong khoảng giới hạn từ khoảng 2,5-2.9 MW được phun vào trong FRC 450 cho chiều dài xung chùm hoạt hóa bằng khoảng 6ms. Thời gian sống nghịch từ plasma được mô tả trong vùng A là khoảng 5.2ms. Dữ liệu mới hơn thể hiện là có

thể thu được thời gian sống nghịch từ plasma vào khoảng 7.2ms với chiều dài xung chùm hoạt hóa bằng khoảng 7ms.

Như được ghi chú ở trên liên quan tới Fig.16A, Fig.16B, Fig.16C và Fig.16D, tương quan giữa chiều dài xung chùm và thời gian sống FRC là không hoàn hảo do việc bẫy chùm trở nên không hiệu quả bên dưới kích cỡ plasma cụ thể, tức là, khi FRC 450 co lại trong kích thước vật lý mà không phải tất cả các chùm được phun vào đều bị chặn và bị bẫy. Việc co lại hoặc phân hủy của FRC chủ yếu là do thực tế là tổn thất năng lượng thực (-4MW khoảng ở giữa tới việc xả) từ plasma FRC trong khi việc xả lớn hơn công suất tổng được nạp vào trong FRC một chút thông qua các chùm trung hòa (-2,5MW) cho thiết lập thực nghiệm cụ thể. Như chú ý với Fig.3C, việc phun chùm được tạo góc từ các súng chùm trung hòa 600 về phía mặt phẳng giữa sẽ cải thiện việc ghép nối chùm-plasma, thậm chí khi plasma FRC bị co rút hoặc theo cách khác co lại theo hướng trục trong suốt quá trình phun vào. Ngoài ra, việc tiếp liệu hạt thích hợp sẽ duy trì mật độ plasma cần thiết.

Vùng B là kết quả của việc chạy mô phỏng sử dụng chiều dài xung chùm hoạt hóa bằng khoảng 6ms và tổng công suất chùm từ các súng chùm trung hòa 600 lớn hơn khoảng 10MW một chút, trong đó các chùm trung hòa sẽ phun các phần trung hòa H (hoặc D) với năng lượng hạt khoảng 15 keV. Dòng tương đương được phun bởi từng chùm trong các chùm là khoảng 110 A. Với vùng B, góc phun chùm tới trục thiết bị là khoảng 20° , nhỏ hơn thông thường với bán kính đích bằng 0,19 m. Góc phun có thể được thay đổi nằm trong khoảng giới hạn $15^\circ - 25^\circ$ nhỏ hơn thông thường. Các chùm được phun trong hướng đồng dòng theo phương vị. Lực theo cạnh cuối cùng cũng như lực theo trục cuối cùng từ việc phun động lượng chùm trung hòa sẽ được làm tối thiểu hóa. Như với vùng A, (H) phần trung hòa nhanh được phun từ các bộ phận phun chùm trung hòa 600 từ thời điểm các vùng hình thành FRC bắc nam hợp nhất trong buồng giam giữ 100 thành một FRC 450.

Các mô phỏng trong đó nền tảng cho vùng B sử dụng các bộ giải Hall-MHD đa chiều cho plasma nền và cho việc cân bằng, các bộ phận giải dựa trên Monte-Carlo hoàn toàn động lực cho các thành phần chùm mạnh mẽ và cho tất cả các xử lý tán xạ, cũng như bộ phận chứa cho các phương trình vận chuyển được kết hợp cho tất cả các mẫu plasma cho các xử lý tổn thất tương tác kiểu mẫu. Các thành phần vận

chuyển được hiệu chuẩn theo kinh nghiệm và được định chuẩn bao quát với cơ sở dữ liệu thực nghiệm.

Như được thể hiện bởi vùng B, thời gian sống nghịch từ trạng thái ổn định của FRC 450 sẽ là chiều dài của xung chùm. Tuy nhiên, điều quan trọng cần phải nhớ là vùng B tương quan chủ yếu thể hiện là khi các chùm được tắt thì plasma hoặc FRC bắt đầu phân rã tại thời điểm đó, nhưng không phải là trước thời điểm này. Việc phân rã sẽ là tương tự như việc phân rã đã được quan sát trong khi xả mà không được trợ giúp chùm, có thể là cỡ 1ms vượt quá thời gian tắt chùm - và đơn giản là sự phản chiếu của thời gian phân rã đặc trưng của plasma được dẫn bởi các xử lý tổn thất thuộc về bản chất.

Quay lại Fig.21A, Fig.21B, Fig.21C, Fig.21D và Fig.21E, các kết quả thực nghiệm mà được minh họa trên hình vẽ biểu thị việc đạt được sự duy trì FRC hoặc trạng thái ổn định mà được điều khiển bởi các chùm trung hòa có góc, tức là, các thông số plasma toàn cục như bán kính plasma, mật độ plasma, nhiệt độ plasma cũng như thông lượng từ có thể được duy trì ở các mức không đổi mà không bị phân rã trong sự tương quan với khoảng thời gian xung NB. Ví dụ, các thông số plasma này được giữ hầu như không đổi trong $\sim 5+$ ms. Hiệu suất plasma này, bao gồm khả năng duy trì, có mối tương quan mạnh với khoảng thời gian xung NB, với sự tồn tại nghịch từ thậm chí vài mili giây sau khi kết thúc NB do các ion nhanh tích lũy. Như được minh họa, hiệu suất plasma chỉ bị giới hạn ở các ràng buộc chiều dài xung sinh ra từ các năng lượng lưu trữ giới hạn trong các nguồn điện kết hợp của nhiều hệ thống tới hạn, như các bộ phun NB cũng như các thành phần hệ thống khác.

Gia nhiệt electron sóng nhanh theo hàm điều hòa cao

Như được lưu ý trên đây đối với Fig.3A, Fig.3B, Fig.3C, Fig.3D, Fig.3E và Fig.8, các chùm nguyên tử trung hòa 600 được triển khai trên hệ thống FRC 10 để tạo sự gia nhiệt và điều khiển dòng cũng như để phát triển áp suất hạt nhanh. Các dòng chùm riêng lẻ bao gồm các hệ thống phun chùm nguyên tử trung hòa 600 được bố trí quanh buồng giam giữ trung tâm 100 và, như được thể hiện trên Fig.3C, Fig.3D và Fig.3E, tốt hơn là được tạo góc để phun các hạt trung hòa về phía mặt phẳng giữa của buồng giam giữ 100. Để cải thiện hơn nữa khả năng duy trì FRC và chứng minh

việc tăng tốc FRC đến các nhiệt độ plasma cao và các hệ thống cao năng lượng, hệ thống FRC 10 theo sáng chế bao gồm hệ thống phun chùm trung hòa (NBI) 600 có điện áp tăng và chiều dài xung mở rộng, ví dụ, chỉ nhằm mục đích làm ví dụ, điện áp bằng khoảng 20+ MW với chiều dài xung lên đến 30 ms.

Tuy nhiên, sự phun chùm trung hòa có xu hướng có hiệu suất gia nhiệt electron thấp do cơ chế tăng tốc động lực trên các electron thông qua sự thay đổi năng lượng ion-electron. Các đặc tính duy nhất của plasma FRC của hệ thống FRC hiện tại 10, ví dụ, plasma không thường quá dày ($\omega_{pe} > 30 \omega_{ce}$ bên trong bộ phận tách) và trường từ giảm nhanh về không trong lõi plasma, khiến cho vô cùng khó gia nhiệt các electron trong lõi của các plasma FRC. Các trường hợp gia nhiệt electron thông thường như gia nhiệt tần số cộng hưởng cyclotron electron (hoặc các hàm điều hòa thứ hai và thứ ba của nó) vốn được sử dụng rộng rãi trong các tokamak, các stellarator, và các máy nhỏ, không thể được làm thích ứng với các plasma FRC do vấn đề về khả năng tiếp cận sóng kém bên trong lõi plasma. Các trường hợp gia nhiệt electron khác, như các sóng Bernstein electron, các sóng cộng hưởng hỗn hợp trên, và các sóng nhiễu, gặp phải các vấn đề tương tự hoặc có hiệu suất gia nhiệt thấp khi chúng được áp dụng cho các plasma FRC.

Theo một phương án thực hiện làm ví dụ, hệ thống FRC 10 theo sáng chế bao gồm gia nhiệt electron sóng nhanh theo hàm điều hòa cao để nâng nhiệt độ electron plasma và, do vậy, tiếp tục cải thiện khả năng duy trì FRC. Như được thể hiện trên Fig.25, hệ thống FRC 10 theo sáng chế bao gồm một hoặc nhiều anten 650, như, ví dụ, anten mảng pha có bốn (4) liên kết, được triển khai trên hệ thống FRC 10 và được tạo kết cấu để lan truyền các sóng nhanh theo hàm điều hòa cao trong các dải tần số vô tuyến bên trong plasma FRC trong buồng giam giữ 100 để tạo ra sự gia nhiệt electron trong lõi của plasma FRC từ khoảng 150 eV đến khoảng trên 1 keV. Theo một phương án thực hiện làm ví dụ, anten 650 sẽ bao gồm khoảng hệ thống 2 MW RF ở khoảng 15-25 Mhz. Việc gia nhiệt electron bằng các sóng nhanh theo hàm điều hòa cao trong các dải tần số vô tuyến làm giảm theo cách có lợi sự thất thoát trao đổi điện tích các ion nhanh và tăng cường sự giam giữ plasma, cũng như nâng cao hiệu suất điều khiển dòng plasma, mà tăng lên cùng với nhiệt độ electron T_e .

Các mô phỏng của sự gia nhiệt electron trong các plasma FRC hiệu suất cao như plasma FRC của hệ thống FRC hiện tại 10 được thực hiện trong các trường hợp sau đây: (1) tần số cộng hưởng hỗn hợp trên (50 GHz); (2) tần số cộng hưởng máy gia tốc electron (ECR: electron cyclotron resonant) (28 GHz); (3) các sóng Bernstein electron (EBW) ở tần số bằng 2,45 GHz, 5 GHz, 8 GHz, và 18 GHz; (4) các sóng nhiều ở 0,5 GHz; (5) HHFW ở 15 MHz. Các kết quả mô phỏng đã thể hiện rõ rằng chế độ của HHFW không chỉ có một hấp thụ động lực vượt qua cực kỳ mạnh (~100%), mà còn có khả năng tiếp cận sóng rất cao bên trong lõi của các plasma FRC. Các mô phỏng này biểu thị rằng sự xung đột giữa khả năng tiếp cận sóng thích hợp và sự tăng động lực hiệu quả trên các electron được xử lý bằng cách sử dụng sự gia nhiệt sóng nhanh theo hàm điều hòa cao (HHFW) này, mà đã được làm thích ứng hoàn toàn với beta cao, so với các plasma tokamak hình cầu dày đặc (ST: spherical tokamak) như NSTX cho các thực nghiệm của sự gia nhiệt electron trong lõi và sự điều khiển dòng lệch trục.

Cơ chế gia nhiệt của HHFW bao gồm cả hai bộ hãm electron Landau (LD: Landau damping) (trong đó lực tác động lên các electron là $F_{LD} = eE_{||}$) và bơm từ theo thời gian chuyển (TTMP - transit time bơm từ hoặc hoặc MP - bơm từ) (trong đó lực là $F_{MP} = -\nabla_{||}(\mu B_{||})$). Ở đây, e và μ là mômen điện tích và mômen từ của electron, và $E_{||}$ và $B_{||}$ là các thành phần song song của trường điện và trường từ sóng nhanh, một cách tương ứng. Sự gia nhiệt electron sóng nhanh thông thường trong plasmas tokamak yêu cầu vận tốc sóng pha song song $V_{ph||} \equiv \omega/k_{||} \approx V_{Te}$ vận tốc nhiệt của electron) để hấp thụ đáng kể bất kỳ thông qua LD chiếm ưu thế; MP không góp phần đáng kể vào độ hãm electron và nó thường có thể được bỏ qua. Ngoài ra, sự hấp thụ sóng nhanh trong plasmas tokamak là yếu và do đó thường yêu cầu có sự gia nhiệt sơ bộ electron mạnh bằng các vi sóng ở tần số cộng hưởng cyclotron electron để tăng cường độ hấp thụ động lực đi qua nhiều lần. Tuy nhiên, trong plasmas ST beta cao như NSTX, đã phát hiện rằng MP làm tăng đáng kể sự hấp thụ động lực trên các electron so với một mình LD electron, và nó trở nên hầu như lớn hơn ở dải cao hơn của vận tốc độ, $\omega/k_{||} \leq 2,5 V_{Te}$. Sự kết hợp của MP và LD có thể dẫn đến 100% sự hấp thụ một lần đi qua.

Trong các chế độ beta cao như plasma FRC hiệu suất cao của hệ thống FRC hiện tại 10 (mà có trị số của β_e bằng khoảng 90% plasma trong lõi), độ hãm bị tác động bởi bơm từ, mà có thể được định tỷ lệ là $\text{Im } k_{\perp} \propto n_e T_e / B^2 \propto \beta_e$, [1] và bơm từ sẽ là đáng kể khi $\omega/k_{\parallel} \leq 2,5 V_{Te}$. Trong các mô phỏng cho hệ thống FRC 10 theo sáng chế, $T_e = 150 \text{ eV}$, $T_i = 800 \text{ eV}$, $n_e = n_i = 3,2 \times 10^{19} \text{ m}^{-3}$, trường từ $B = 1000 \text{ Gauss}$, HHFW có 1 MW công suất hoạt động và tần số của nó được chọn là $f = 15 \text{ MHz}$, do vậy $\omega = 2\pi f = 10 \omega_{ci} [\text{H}] = 20 \omega_{ci} [\text{D}] \ll \omega_{LH}$, đạt được sự hấp thụ một lần đi qua lớn hơn 99%, và năng lượng HHFW được hãm trên các electron được thể hiện là cao bằng 90%. Động lực mà được hãm trên các ion hoặc được hãm qua sự va chạm, có thể nhỏ hơn 5% một cách tương ứng. Ngoài ra, biên dạng xuyên tâm của sự hãm năng lượng trên các electron, ion và thông qua sự va chạm thể hiện lớn hơn 60% năng lượng HHFW được hãm bên trong lớp bộ phận tách của các plasma FRC.

Fig.26A và Fig.26B là các hình vẽ thể hiện biên dạng mật độ hoàn toàn theo hướng xuyên tâm và biên dạng nhiệt độ electron hoàn toàn theo hướng xuyên tâm của plasma FRC của hệ thống FRC hiện tại 10. Hệ thống FRC theo sáng chế, theo các phương án thực hiện của sáng chế, được tạo kết cấu theo các cặp thông số và trị số thể hiện trên bảng 1.

Thông số	Trị số
B_{ext} , kG	~ 1
r_s , cm	~ 36
L , m	$2 - 3$
N_e , cm ⁻³	$\sim 3 \times 10^{13}$
T_i , eV	$500 - 800$
T_e , eV	$100 - 150$

Bảng 1: Các thông số cho hệ thống FRC theo sáng chế

Fig.27A đến Fig.27D minh họa các biên dạng xuyên tâm của trạng thái cân bằng C-2U và tần số đặc trưng ở mặt phẳng giữa ($Z=0$) của hệ thống FRC hiện tại 10. Các thách thức nhìn thấy được là, bên trong lớp bộ phận tách, plasma quá dày ($\omega_{pe} > 30 \omega_{ce}$) và B rơi nhanh về 0 trong phạm vi khoảng cách xuyên tâm 11cm. Tất

cả các lớp cộng hưởng điều hòa ECR được nén trong một vùng rất hẹp do vậy các vi sóng chỉ có thể lan truyền theo hướng xuyên tâm trong khoảng cách rất ngắn.

Các mô phỏng sau đây được thực hiện với Mã dò tia GENRAY-C cho các trường hợp có tần số vi sóng như sau:

EBW (2,45 GHz, 5 GHz, 8 GHz, 18 GHz, và 28 GHz);

Tần số cộng hưởng hỗn hợp trên (50 GHz, 55 GHz);

Tần số sóng nhiễu (0,5 – 1,0 GHz).

Không may là, các trường hợp này không thể giải quyết xung đột giữa sóng xuyên vào trong lõi plasma và sự tăng động lực hiệu quả trên các electron.

Fig.28A đến Fig.28C minh họa các quan sát sự hấp thụ năng lượng và chế độ đảo ngược dưới các điều kiện gia nhiệt sóng electron Bernstein (EBW: Electron Bernstein wave) của vi sóng ở 8GHz trong plasma FRC của hệ thống FRC hiện tại 10. Trên Fig.28A đến Fig.28C, sáu tia được phát ra ở các góc khác nhau, sự đảo ngược rõ ràng O->X->B được quan sát. Trên 90% năng lượng vi sóng có thể được hấp thụ bởi các electron ở lớp ECR điều hòa thứ tư (bộ phận tách bên ngoài); vốn dẫn đến sự hấp thụ rất cục bộ. Chế độ EBW chỉ có thể gia nhiệt ở mép plasma, nó không thể xuyên vào trong lõi plasma.

Fig.29A đến Fig.29F minh họa các quan sát sự hấp thụ năng lượng và chế độ đảo ngược dưới các điều kiện gia nhiệt electron của vi sóng ở 50GHz trong plasma FRC của hệ thống FRC hiện tại 10. Trên Fig.29A đến Fig.29F, thì quan sát được rằng các tia dừng lan truyền sau khi đảo ngược O->X->B, và 30% năng lượng vi sóng được hấp thụ.

Fig.30A đến Fig.30C minh họa các quan sát sự hấp thụ năng lượng dưới các điều kiện gia nhiệt electron của sóng nhiễu ở 0,5 GHz trong plasma FRC của hệ thống FRC hiện tại 10. Trên Fig.30A đến Fig.30C, đã quan sát được rằng sóng nhiễu ở 0,5GHz ($\sim 1/4 f_{ce}$) có độ hấp thụ năng lượng cao nhưng có khả năng tiếp cận sóng thấp. Sóng được phát ra với $N_{\parallel}$ lớn (bắt đầu ở 16) và sóng quay tròn khi có độ cong lớn của trường từ.

Tương phản với các chế độ gia nhiệt này, sự gia nhiệt sóng nhanh điều hòa cao tạo ra, như được thể hiện bởi các kết quả mô phỏng, đặc điểm sau cho plasma FRC với độ trung bình cao β_e ($\approx 90\%$) như plasma FRC của hệ thống FRC hiện tại

10: 1) sự hấp thụ một lần đi qua mạnh ($\approx 100\%$); 2) có khả năng tiếp cận thích hợp đến lõi plasma; 3) độ hấp thụ năng lượng hiệu quả bởi các electron lõi lên đến 60%; 4) độ hãm năng lượng trên electron bị ảnh hưởng bởi bơm từ (TTMP), mà có thể được định tỷ lệ là $lm\ k_{\perp} \propto n_e T_e / B^2 \propto \beta_e$.

Fig.31 thể hiện biên dạng mật độ và sự lan truyền sóng trong plasma FRC của hệ thống FRC hiện tại 10. Trên Fig.10, $T_e = 150$ eV, mặc dù T_e (bộ phận tách) = 100 eV. $T_i = 800$ eV, mặc dù T_i (bộ phận tách) = 200 eV. Các ion nhiệt có cùng mật độ và biên dạng với các electron. Sự hình thành các ion nhanh không được thể hiện trên Fig.31. Fig.32 thể hiện biên dạng thông lượng poloid và sự lan truyền sóng trong plasma FRC của hệ thống FRC hiện tại 10.

Fig.33 thể hiện biên dạng mật độ làm ví dụ và đường lan truyền sóng trong plasma FRC của hệ thống FRC hiện tại 10. Trên Fig.33, $T_e = 150$ eV, mặc dù T_e (bộ phận tách) = 100 eV. $T_i = 800$ eV, mặc dù T_i (bộ phận tách) = 200 eV. Trên Fig.33, $f=6$ MHz ($\omega / \omega_{ci[D]}$ ban đầu ~ 9), với tổng năng lượng bằng 1MW. Năm tia được phát ra ở mặt phẳng giữa với $n_{//}$ ban đầu nằm trong khoảng 4 và 6.

Fig.34 thể hiện biên dạng $\omega / \omega_{ci[D]}$ làm ví dụ và đường lan truyền sóng trong plasma FRC của hệ thống FRC hiện tại 10. Trên Fig.34, các mức của $\omega / \omega_{ci[D]} > 28$ không được hiển thị để làm rõ. Các đường nét đứt trong khe hở là đường biên thông lượng từ.

Fig.35 minh họa độ hãm năng lượng làm ví dụ với khoảng cách của sự lan truyền sóng trong plasma FRC của hệ thống FRC hiện tại 10. Trên Fig.35, năm tia được phát ra với $n_{//}$ khác nhau nằm trong khoảng 4 và 6. Mỗi tia có năng lượng 200KW ở điểm phóng. Vùng hãm năng lượng đáng kể nằm trong khoảng 30cm và 50cm.

Fig.36 thể hiện biên dạng hấp thụ năng lượng làm ví dụ trong plasma FRC của hệ thống FRC hiện tại 10. Trên Fig.36, có sự hấp thụ năng lượng đáng kể đã quan sát được trên các ion và các electron khi các HHFW xuyên qua lớp bộ phận tách.

Fig.37A và Fig.37B minh họa các biên dạng xuyên tâm làm ví dụ của mật độ năng lượng trong plasma FRC của hệ thống FRC hiện tại 10. Các biên dạng xuyên tâm của mật độ năng lượng là thể hiện cho (a) tổng hấp thụ, (b) độ hãm trên các electron, (c) độ hãm trên các ion, và (d) độ hãm do va chạm. Trên Fig.37A, $P_{total} =$

1000kW, $P_e = 448\text{kW}$, $P_i = 486\text{kW}$, và $P_{cl} = 66\text{kW}$. Trên Fig.37B, $P_{total} = 999\text{kW}$, $P_e = 720\text{kW}$, $P_i = 194\text{kW}$, và $P_{cl} = 85\text{kW}$. Sự hấp thụ một lần đi qua của 100% được quan sát trong quá trình gia nhiệt HHFW trong lõi plasma.

Fig.38 thể hiện biên dạng 2D làm ví dụ của độ hãm mật độ năng lượng trong plasma FRC của hệ thống FRC hiện tại 10.

Fig.39 thể hiện biên dạng độ hãm năng lượng làm ví dụ trong plasma FRC của hệ thống FRC hiện tại 10. Trên Fig.39, đã quan sát được rằng độ hãm năng lượng trên các electron tăng đến tối đa khi $|B|$ tiến dần đến cực tiểu. Đã quan sát được $|E_{||}/E|$ rất nhỏ do vậy ít tác động hơn đến độ hãm Landau đối với độ hấp thụ năng lượng.

Fig.40 thể hiện biên dạng của các ion có bán kính Larmor giới hạn làm ví dụ trong plasma FRC của hệ thống FRC hiện tại 10. Trên Fig.40, các hiệu ứng đáng kể của ion với bán kính Larmor giới hạn quan sát được ngay cả khi nhiệt độ ion $T_i < 1\text{ keV}$. Bên trong bộ phận tách, $K_{\perp} \times \rho_{Larmor} \gg 1$. Nó đi đến vô cùng tại trường rỗng trên mặt phẳng giữa ($z=0$). Điều này có thể dẫn đến lực tương tác giữa các ion nhiệt với HHFW do vậy tạo ra độ hãm năng lượng trên các ion nhiệt.

Fig.41 thể hiện biên dạng hấp thụ năng lượng làm ví dụ trong plasma FRC của hệ thống FRC hiện tại 10. Trên Fig.41, độ hấp thụ năng lượng đáng kể bởi các ion nhiệt được quan sát thấy. Độ hấp thụ cộng hưởng cyclotron ion được quan sát thấy với số điều hòa $n = (11-20)$. Các đáng kể cho độ hãm năng lượng đáng kể trên các ion là $K_{\perp} \times \rho_{Larmor} \gg 1$ và $\omega/K_{\perp} < 2V_{Ti}$.

Fig.42 thể hiện biên dạng làm ví dụ trong plasma FRC của hệ thống FRC hiện tại 10. Trên Fig.42, các thay đổi của (a) $|B(r,z)|$ cục bộ, (b) phần ảo của số lượng sóng vuông K_i , (c) tỷ lệ của $|E_{\perp}/E|$, và (d) chỉ số khúc xạ song song $n_{||}$ được quan sát với khoảng cách dọc theo sự lan truyền sóng.

Các mô phỏng sự gia nhiệt HHFW của plasma FRC của hệ thống FRC hiện tại 10 đã chứng minh một cách rõ ràng rằng sự gia nhiệt HHFW dẫn đến: 1) 100% độ hấp thụ năng lượng một lần đi qua; 2) TTMP bị ảnh hưởng bởi cơ chế hấp thụ năng lượng để gia nhiệt các electron lõi; 3) độ hãm năng lượng tối đa trên các electron xảy ra khi vận tốc pha sóng song song $V_{ph \parallel} = \omega/k_{\parallel} < V_{Te}$; và, 4) độ hấp thụ năng lượng đáng kể bởi các ion nhiệt có xu hướng xảy ra khi các điều kiện của $K_{\perp} \times \rho_{Larmor} \gg 1$ và $\omega/k_{\perp} < 2V_{Ti}$ được duy trì.

Theo một phương án thực hiện của sáng chế, phương pháp để tạo ra và duy trì trường từ có cấu hình được đảo ngược trường (FRC) bao gồm bước tạo ra FRC quanh plasma trong buồng giam giữ, phun các chùm trung hòa bên trong plasma FRC ở góc về phía mặt phẳng giữa của buồng giam giữ, và gia nhiệt các electron trong plasma FRC bằng các sóng nhanh theo hàm điều hòa cao lan truyền bên trong plasma FRC.

Theo phương án thực hiện khác của sáng chế, việc gia nhiệt các electron bao gồm phát ra các sóng nhanh theo hàm điều hòa cao từ một hoặc nhiều anten bên trong plasma FRC trong buồng giam giữ.

Theo phương án thực hiện khác của sáng chế, việc gia nhiệt các electron bao gồm phát ra các sóng nhanh theo hàm điều hòa cao từ một hoặc nhiều anten bên trong plasma FRC trong buồng giam giữ ở góc phát từ mặt phẳng giữa của buồng giam giữ.

Theo phương án thực hiện khác của sáng chế, góc vận hành nằm trong khoảng từ 15° đến khoảng 25° so với mặt phẳng giữa của buồng giam giữ.

Theo phương án thực hiện khác của sáng chế, góc vận hành gần bằng nhưng nhỏ hơn góc vuông với đường trục dọc của buồng giam giữ.

Theo phương án thực hiện khác của sáng chế, một hoặc nhiều anten là anten mảng pha có nhiều liên kết.

Theo phương án thực hiện khác của sáng chế, các sóng nhanh theo hàm điều hòa cao là các sóng nhanh trong các dải tần số vô tuyến.

Theo phương án thực hiện khác của sáng chế, việc gia nhiệt các electron bao gồm gia nhiệt các electron từ khoảng 150 eV đến khoảng trên 1 keV.

Theo phương án thực hiện khác của sáng chế, phương pháp còn bao gồm duy trì FRC bằng hoặc xấp xỉ trị số không đổi mà không bị phân rã và nâng nhiệt độ electron trong plasma đến khoảng trên 1,0 keV.

Theo phương án thực hiện khác của sáng chế, phương pháp còn bao gồm bước tạo ra trường từ bên trong buồng giam giữ với các cuộn dây tựa như dc kéo dài quanh buồng giam giữ và trường từ đối xứng gương bên trong các đầu đối diện của buồng giam giữ có các cuộn dây gương tựa như dc kéo dài quanh các đầu đối diện của buồng giam giữ.

Theo phương án thực hiện khác của sáng chế, phương pháp còn bao gồm bước tạo ra trường từ bên trong buồng giam giữ với các cuộn dây tựa như dc kéo dài quanh buồng giam giữ và trường từ đối xứng gương bên trong các đầu đối diện của buồng giam giữ có các cuộn dây gương tựa như dc kéo dài quanh các đầu đối diện của buồng giam giữ.

Theo phương án thực hiện khác của sáng chế, bước tạo ra FRC bao gồm bước tạo ra FRC hình thành ở các vùng hình thành thứ nhất và thứ hai đối diện được ghép nối với buồng giam giữ và bước gia tốc FRC hình thành từ các vùng hình thành thứ nhất và thứ hai về phía mặt phẳng xuyên giữa của buồng giam giữ nơi mà hai FRC hình thành hòa trộn để tạo ra FRC.

Theo phương án thực hiện khác của sáng chế, bước tạo ra FRC bao gồm một trong số FRC hình thành đồng thời gia tốc FRC hình thành về phía mặt phẳng giữa của buồng giam giữ và bước tạo ra FRC hình thành sau đó gia tốc FRC hình thành về phía mặt phẳng xuyên giữa của buồng giam giữ.

Theo phương án thực hiện khác của sáng chế, gia tốc FRC hình thành từ các vùng hình thành thứ nhất và thứ hai về phía mặt phẳng giữa của buồng giam giữ bao gồm đẩy FRC hình thành từ các vùng hình thành thứ nhất và thứ hai qua các bộ đổi hướng bên trong thứ nhất và thứ hai mà được ghép nối với các đầu đối diện của buồng giam giữ xem giữa buồng giam giữ và các vùng hình thành thứ nhất và thứ hai.

Theo phương án thực hiện khác của sáng chế, đẩy FRC hình thành từ các vùng hình thành thứ nhất và thứ hai qua các bộ đổi hướng bên trong thứ nhất và thứ hai bao gồm dừng kích hoạt các bộ đổi hướng bên trong thứ nhất và thứ hai khi FRC hình thành từ các vùng hình thành thứ nhất và thứ hai đi qua các bộ đổi hướng bên trong thứ nhất và thứ hai.

Theo phương án thực hiện khác của sáng chế, phương pháp còn bao gồm dẫn hướng các bề mặt thông lượng từ của FRC vào trong các bộ đổi hướng bên trong thứ nhất và thứ hai.

Theo phương án thực hiện khác của sáng chế, phương pháp còn bao gồm dẫn hướng các bề mặt thông lượng từ của FRC vào trong các bộ đổi hướng bên ngoài thứ nhất và thứ hai mà được ghép nối với các đầu của các vùng hình thành.

Theo phương án thực hiện khác của sáng chế, phương pháp còn bao gồm bước tạo ra trường từ bên trong các vùng hình thành và các bộ đổi hướng bên ngoài thứ nhất và thứ hai với các cuộn dây tựa như dc kéo dài quanh các vùng hình thành và các bộ đổi hướng.

Theo phương án thực hiện khác của sáng chế, phương pháp còn bao gồm bước tạo ra trường từ bên trong các vùng hình thành và các bộ đổi hướng bên trong thứ nhất và thứ hai với các cuộn dây tựa như dc kéo dài quanh các vùng hình thành và các bộ đổi hướng.

Theo phương án thực hiện khác của sáng chế, phương pháp còn bao gồm bước tạo ra trường từ đối xứng gương giữa các vùng hình thành thứ nhất và thứ hai và các bộ đổi hướng bên ngoài thứ nhất và thứ hai có các cuộn dây gương tựa như dc.

Theo phương án thực hiện khác của sáng chế, phương pháp còn bao gồm bước tạo ra trường từ chốt cắm gương bên trong độ bó hẹp giữa các vùng hình thành thứ nhất và thứ hai và các bộ đổi hướng bên ngoài thứ nhất và thứ hai có các cuộn dây chốt cắm gương tựa như dc kéo dài quanh độ bó hẹp giữa các vùng hình thành và các bộ đổi hướng.

Theo phương án thực hiện khác của sáng chế, phương pháp còn bao gồm bước tạo ra trường từ đối xứng gương giữa buồng giam giữ và các bộ đổi hướng bên trong thứ nhất và thứ hai có các cuộn dây gương tựa như dc và tạo ra trường từ thu hẹp giữa các vùng hình thành thứ nhất và thứ hai và các bộ đổi hướng bên trong thứ nhất và thứ hai có các cuộn dây thu hẹp biên dạng thấp tựa như dc.

Theo phương án thực hiện khác của sáng chế, phương pháp còn bao gồm bước tạo ra một trong số trường lưỡng cực từ và trường tứ cực từ bên trong buồng với các cuộn dây kiểu yên ngựa mà được ghép nối với buồng.

Theo phương án thực hiện khác của sáng chế, phương pháp còn bao gồm bước điều hòa các bề mặt trong của buồng và các bề mặt trong của các vùng hình thành thứ nhất và thứ hai, các bộ đổi hướng thứ nhất và thứ hai xem giữa buồng giam giữ và các vùng hình thành thứ nhất và thứ hai, và các bộ đổi hướng bên ngoài thứ nhất và thứ hai mà được nối với các vùng hình thành thứ nhất và thứ hai bằng hệ thống chuyển đổi.

Theo phương án thực hiện khác của sáng chế, hệ thống chuyển đổi bao gồm một trong số hệ tích lũy Titan và Hệ tích lũy Lithi.

Theo phương án thực hiện khác của sáng chế, phương pháp còn bao gồm bước phun dọc trục plasma vào trong FRC từ các súng plasma được lắp dọc trục.

Theo phương án thực hiện khác của sáng chế, phương pháp còn bao gồm bước điều khiển biên dạng trường điện theo hướng xuyên tâm ở lớp mép của FRC.

Theo phương án thực hiện khác của sáng chế, bước điều khiển biên dạng điện trường theo hướng kính trong lớp cạnh của FRC bao gồm việc áp dụng phân bố của điện thế cho nhóm các bề mặt thông lượng mở của FRC với điện cực thiên áp.

Theo phương án thực hiện khác của sáng chế, phương pháp còn bao gồm bước phun plasma cuộn dây hình xuyên nhỏ gọn (CT) từ các bộ phun CT thứ nhất và thứ hai bên trong plasma FRC ở góc về phía mặt phẳng giữa của buồng giam giữ, trong đó các bộ phun CT thứ nhất và thứ hai nằm đối nhau theo hướng kính ở các mặt đối diện của mặt phẳng giữa của buồng giam giữ.

Theo phương án thực hiện khác của sáng chế, hệ thống để tạo ra và duy trì trường từ có cấu hình được đảo ngược trường (FRC) bao gồm buồng giam giữ, các vùng hình thành FRC thứ nhất và thứ hai đối diện nhau theo hướng xuyên tâm được ghép nối với buồng giam giữ, các bộ đối hướng đối nhau theo hướng xuyên tâm thứ nhất và thứ hai ghép nối với FRC các vùng hình thành, một hoặc nhiều súng trong số các súng plasma, một hoặc nhiều điện cực thiên áp và các chốt cắm gương thứ nhất và thứ hai, trong đó các súng plasma bao gồm các súng plasma dọc trục thứ nhất và thứ hai mà được nối vận hành được với các bộ đối hướng thứ nhất và thứ hai, các vùng hình thành thứ nhất và thứ hai và buồng giam giữ, trong đó một hoặc nhiều điện cực thiên áp được định vị bên trong một hoặc nhiều buồng giam giữ, các vùng hình thành thứ nhất và thứ hai, và các bộ đối hướng bên ngoài thứ nhất và thứ hai, và trong đó các chốt cắm gương thứ nhất và thứ hai là vị trí giữa các vùng hình thành thứ nhất và thứ hai và các bộ đối hướng thứ nhất và thứ hai, hệ thống chuyển đổi được ghép nối với buồng giam giữ và các bộ đối hướng thứ nhất và thứ hai, các bộ phun chùm nguyên tử trung hòa được ghép nối với buồng giam giữ và có góc về phía mặt phẳng giữa của buồng giam giữ, hệ thống từ bao gồm các cuộn dây tựa như dc được định vị quanh buồng giam giữ, các vùng hình thành thứ nhất và thứ hai, và các bộ đối

hướng thứ nhất và thứ hai, và tập hợp các cuộn dây gương tựa như dc thứ nhất và thứ hai được định vị giữa các vùng hình thành thứ nhất và thứ hai và các bộ đổi hướng thứ nhất và thứ hai, và hệ thống anten được định vị quanh buồng giam giữ, trong đó hệ thống anten được tạo kết cấu để phóng các sóng nhanh theo hàm điều hòa cao bên trong plasma FRC để gia nhiệt các electron plasma.

Theo phương án thực hiện khác của sáng chế, hệ thống được tạo kết cấu để tạo ra FRC và duy trì FRC mà không bị phân rã trong khi các chùm trung hòa được phun bên trong plasma và tăng nhiệt độ electron trong plasma đến khoảng trên 1,0 keV.

Theo phương án thực hiện khác của sáng chế, hệ thống anten bao gồm một hoặc nhiều anten được bố trí để phát ra các sóng nhanh theo hàm điều hòa cao ở góc phát từ mặt phẳng giữa của buồng giam giữ bên trong plasma FRC.

Theo phương án thực hiện khác của sáng chế, góc vận hành nằm trong khoảng từ 15° đến khoảng 25° so với mặt phẳng giữa của buồng giam giữ.

Theo phương án thực hiện khác của sáng chế, góc vận hành gần bằng nhưng nhỏ hơn góc vuông với đường trục dọc của buồng giam giữ.

Theo phương án thực hiện khác của sáng chế, hệ thống anten bao gồm anten mảng pha có nhiều liên kết.

Theo phương án thực hiện khác của sáng chế, các sóng nhanh theo hàm điều hòa cao là các sóng nhanh trong các dải tần số vô tuyến.

Theo phương án thực hiện khác của sáng chế, hệ thống được tạo kết cấu để gia nhiệt các electron plasma FRC từ khoảng 150 eV đến khoảng trên 1 keV.

Theo phương án thực hiện khác của sáng chế, các bộ đổi hướng thứ nhất và thứ hai bao gồm các bộ đổi hướng bên trong thứ nhất và thứ hai nằm xen giữa các vùng hình thành thứ nhất và thứ hai và buồng giam giữ, và còn bao gồm các bộ đổi hướng bên ngoài thứ nhất và thứ hai mà được nối với các vùng hình thành thứ nhất và thứ hai, trong đó các vùng hình thành thứ nhất và thứ hai nằm xen giữa các bộ đổi hướng bên trong thứ nhất và thứ hai và các bộ đổi hướng bên ngoài thứ nhất và thứ hai.

Theo phương án thực hiện khác của sáng chế, hệ thống còn bao gồm các súng plasma dọc trục thứ nhất và thứ hai được ghép nối vận hành được với các bộ đổi

hướng bên trong thứ nhất và thứ hai và bên ngoài, các vùng hình thành thứ nhất và thứ hai và buồng giam giữ.

Theo phương án thực hiện khác của sáng chế, hệ thống còn bao gồm hai hoặc nhiều cuộn dây kiểu yên ngựa được ghép nối với buồng giam giữ.

Theo phương án thực hiện khác của sáng chế, vùng hình thành bao gồm hệ thống hình thành môđun hóa để tạo ra FRC và chuyển nó về phía mặt phẳng giữa của buồng giam giữ.

Theo phương án thực hiện khác của sáng chế, các điện cực thiên áp bao gồm một hoặc nhiều trong số một hoặc nhiều các điện cực điểm được bố trí trong buồng giam giữ để tiếp xúc với các đường trường hờ, nhóm các điện cực hình khuyên giữa buồng giam giữ và các vùng hình thành thứ nhất và thứ hai để nạp điện cho các lớp thông lượng mép xa theo kiểu đối xứng góc phương vị, các điện cực xếp chồng đồng tâm được bố trí trong các bộ đôi hướng thứ nhất và thứ hai để nạp điện nhiều lớp thông lượng đồng tâm, và các anot của các súng plasma để chặn thông lượng hờ.

Theo phương án thực hiện khác của sáng chế, hệ thống còn bao gồm các bộ phun bằng cuộn dây hình xuyên nhỏ gọn thứ nhất và thứ hai (CT) ghép nối với buồng giam giữ theo một góc về phía mặt phẳng giữa của buồng giam giữ, trong đó các bộ phun CT thứ nhất và thứ hai nằm đối nhau theo hướng kính ở các mặt đối diện của mặt phẳng giữa của buồng giam giữ.

Tuy nhiên, các phương án ví dụ được cung cấp ở đây chỉ là các ví dụ minh họa chứ không nhằm giới hạn dưới bất kì hình thức nào.

Tất cả các dấu hiệu, các chi tiết, các bộ phận, các chức năng, và các bước đã được mô tả đối với phương án thực hiện bất kỳ mà được đưa ra ở đây được dự tính là có thể kết hợp và thay thế một cách tùy ý với phần tương ứng từ phương án thực hiện khác bất kỳ. Nếu dấu hiệu, chi tiết, bộ phận, chức năng, hoặc bước cụ thể được mô tả chỉ cho một phương án thực hiện, nhưng cần hiểu rằng dấu hiệu, chi tiết, bộ phận, chức năng hoặc bước đó có thể được sử dụng với mỗi phương án thực hiện khác mà đã được mô tả ở đây trừ khi được chỉ ra một cách cụ thể theo hướng khác. Do đó, đoạn mô tả này có tác dụng làm cơ sở tiền đề và phần hỗ trợ bằng văn bản cho phần mở đầu của các điểm yêu cầu bảo hộ, ở thời điểm bất kỳ, mà kết hợp các dấu hiệu, các chi tiết, các bộ phận, các chức năng và các bước từ các phương án thực

hiện khác nhau, hoặc thay thế các dấu hiệu, các chi tiết, các bộ phận, các chức năng và các bước từ một phương án thực hiện với các dấu hiệu, các chi tiết, các bộ phận, các chức năng và các bước của phương án khác, ngay cả nếu phần mô tả sau đây không nêu ra một cách rõ ràng, trong trường hợp cụ thể, thì các kết hợp hoặc thay thế này cũng có thể được thực hiện. Phải thừa nhận một cách tường minh rằng việc thể hiện cụ thể mọi sự kết hợp và sự thay thế có thể có là quá rườm rà, đặc biệt là do sự cho phép của mỗi sự kết hợp và sự thay thế như vậy sẽ được người có hiểu biết trung bình trong lĩnh vực này dễ dàng nhận ra.

Trong nhiều trường hợp, các thực thể đã được mô tả ở đây sẽ được lắp với các đối tượng khác. Cần hiểu rằng các thuật ngữ “lắp” và “nối” (hoặc dạng bất kỳ của chúng) được sử dụng dưới dạng hoán đổi một cách linh động ở đây và, trong cả hai trường hợp, đều có nghĩa là ghép trực tiếp hai đối tượng (không cần các thành phần xen giữa không đáng kể bất kỳ (ghép tạp)) và ghép gián tiếp hai đối tượng (với một hoặc nhiều thành phần pha tạp). Trong trường hợp các đối tượng được thể hiện dưới dạng ghép trực tiếp với nhau, hoặc được mô tả dưới dạng ghép không cần thành phần pha tạp bất kỳ, cần hiểu rằng các đối tượng này cũng có thể được ghép trực tiếp với nhau trừ trường hợp có mô tả rõ ràng khác.

Sáng chế có thể có nhiều biến đổi khác nhau, và các dạng thay thế, dù các ví dụ cụ thể của chúng đã được thể hiện trên các hình vẽ và được mô tả chi tiết ở đây. Tuy nhiên, cần hiểu rằng các phương án thực hiện này không bị giới hạn ở dạng bộc lộ cụ thể, mà ngược lại, các phương án thực hiện này là để bao hàm tất cả các biến thể, phương án tương đương và phương án thay thế nằm trong phạm vi của sáng chế. Ngoài ra, các dấu hiệu, các chức năng, các bước hoặc các chi tiết bất kỳ của các phương án thực hiện có thể được viện dẫn hoặc bổ sung vào các điểm yêu cầu bảo hộ, cũng như các giới hạn phủ định mà định ra phạm vi bảo hộ của các điểm yêu cầu bảo hộ bởi các dấu hiệu, các chức năng, các bước hoặc các chi tiết không nằm trong phạm vi của sáng chế.

YÊU CẦU BẢO HỘ

1. Phương pháp sinh ra và duy trì từ trường với cấu hình được đảo ngược trường (Field-reversed configuration - FRC), phương pháp bao gồm các bước:

tạo ra FRC quanh plasma trong buồng giam giữ,
phun các chùm trung hòa bên trong plasma FRC ở góc về phía mặt phẳng giữa của buồng giam giữ, và

gia nhiệt các electron của plasma FRC bằng các sóng nhanh theo hàm điều hòa cao lan truyền bên trong plasma FRC bằng cách phát ra các sóng nhanh theo hàm điều hòa cao từ một hoặc nhiều anten bên trong plasma FRC trong buồng giam giữ ở góc phát nằm trong khoảng từ khoảng 15° đến khoảng 25° so với mặt phẳng giữa của buồng giam giữ, trong đó các sóng nhanh theo hàm điều hòa cao là các sóng nhanh trong các khoảng tần số vô tuyến.

2. Phương pháp theo điểm 1, trong đó một hoặc nhiều anten là anten mảng pha có nhiều liên kết.

3. Phương pháp theo điểm 1, trong đó bước gia nhiệt các electron bao gồm gia nhiệt các electron từ khoảng 150 eV đến trên 1 keV.

4. Phương pháp theo điểm 1, trong đó phương pháp còn bao gồm bước duy trì FRC bằng hoặc xấp xỉ trị số không đổi mà không bị phân rã trong khi phun các chùm của các nguyên tử trung hòa nhanh bên trong plasma FRC trong buồng giam giữ và nâng nhiệt độ electron trong các plasma đến trên 1,0 keV.

5. Phương pháp theo điểm 1, trong đó phương pháp còn bao gồm bước tạo ra trường từ bên trong buồng giam giữ với các cuộn dây tựa như là dc kéo dài quanh buồng giam giữ và trường từ đối xứng gương bên trong các đầu đối diện của buồng giam giữ có các cuộn dây gương tựa như là dc kéo dài quanh các đầu đối diện của buồng giam giữ.

6. Phương pháp theo điểm 1, trong đó bước tạo ra FRC bao gồm bước tạo ra FRC hình thành ở các vùng hình thành thứ nhất và thứ hai đối diện được ghép nối với buồng giam giữ và bước gia tốc FRC hình thành từ các vùng hình thành thứ nhất và thứ hai về phía mặt phẳng xuyên giữa của buồng giam giữ nơi mà hai FRC hình thành hòa trộn để tạo ra FRC.

7. Hệ thống sinh ra và duy trì từ trường với cấu hình được đảo ngược trường (FRC), hệ thống này bao gồm:

buồng giam giữ,

các vùng hình thành FRC thứ nhất và thứ hai đối diện nhau theo hướng xuyên tâm ghép nối với buồng giam giữ,

các bộ chuyển hướng thứ nhất và thứ hai được gắn vào các vùng hình thành thứ nhất và thứ hai,

một hoặc nhiều súng trong số các súng plasma, một hoặc nhiều điện cực thiên áp và các chốt cấm gương thứ nhất và thứ hai, trong đó các súng plasma bao gồm các súng plasma dọc trục thứ nhất và thứ hai mà được nối vận hành được với các bộ đổi hướng thứ nhất và thứ hai, các vùng hình thành thứ nhất và thứ hai và buồng giam giữ, trong đó một hoặc nhiều điện cực thiên áp được định vị bên trong một hoặc nhiều buồng giam giữ, các vùng hình thành thứ nhất và thứ hai, và các bộ đổi hướng bên ngoài thứ nhất và thứ hai, và trong đó các chốt cấm gương thứ nhất và thứ hai là vị trí giữa các vùng hình thành thứ nhất và thứ hai và các bộ đổi hướng thứ nhất và thứ hai,

hệ thống khử khí được gắn vào buồng giam giữ và các bộ chuyển hướng thứ nhất và thứ hai,

các bộ phun chùm nguyên tử trung hòa được ghép nối với buồng giam giữ và có góc về phía mặt phẳng giữa của buồng giam giữ,

hệ thống từ bao gồm các cuộn dây tựa như là dc được định vị quanh buồng giam giữ, các vùng hình thành thứ nhất và thứ hai, và các bộ đổi hướng thứ nhất và thứ hai, và tập hợp các cuộn dây gương tựa như là dc thứ nhất và thứ hai được định vị giữa các vùng hình thành thứ nhất và thứ hai và các bộ đổi hướng thứ nhất và thứ hai, và

hệ thống anten bao gồm một hoặc nhiều anten được định vị quanh buồng giam giữ liên kết mặt phẳng giữa của buồng giam giữ, trong đó hệ thống anten được tạo kết cấu để phóng các sóng nhanh theo hàm điều hòa cao bên trong plasma FRC theo góc phóng nằm trong khoảng từ khoảng 15° đến khoảng 25° so với mặt phẳng giữa của buồng giam giữ, trong đó các sóng nhanh theo hàm điều hòa cao là các sóng nhanh trong các khoảng tần số vô tuyến.

8. Hệ thống theo điểm 7, trong đó hệ thống anten bao gồm các anten mảng pha có nhiều liên kết.

9. Hệ thống theo điểm 7, trong đó các sóng nhanh theo hàm điều hòa cao là các sóng nhanh trong các dải tần số vô tuyến.

10. Hệ thống theo điểm 7, trong đó hệ thống được tạo kết cấu để gia nhiệt các electron plasma FRC từ khoảng 150 eV đến trên 1 keV.

11. Hệ thống theo điểm 7, trong đó hệ thống được tạo kết cấu để tạo ra FRC và duy trì FRC mà không bị phân rã trong khi các chùm trung hòa được phun bên trong plasma.

12. Hệ thống theo điểm 11, trong đó hệ thống được tạo kết cấu để tăng nhiệt độ electron plasma FRC cao hơn 1 keV.

13. Hệ thống theo điểm 7, trong đó các bộ đổi hướng thứ nhất và thứ hai bao gồm các bộ đổi hướng bên trong thứ nhất và thứ hai nằm xen giữa các vùng hình thành thứ nhất và thứ hai và buồng giam giữ, và hệ thống còn bao gồm các bộ đổi hướng bên ngoài thứ nhất và thứ hai mà được nối với các vùng hình thành thứ nhất và thứ hai, trong đó các vùng hình thành thứ nhất và thứ hai nằm xen giữa các bộ đổi hướng bên trong thứ nhất và thứ hai và các bộ đổi hướng bên ngoài thứ nhất và thứ hai, và hệ thống còn bao gồm một hoặc nhiều súng plasma dọc trục thứ nhất và thứ hai được ghép nối vận hành được với các bộ đổi hướng bên trong và bên ngoài thứ nhất và thứ

hai, các vùng hình thành thứ nhất và thứ hai và buồng giam giữ, và hai hoặc nhiều cuộn dây kiểu yên ngựa được ghép nối với buồng giam giữ.

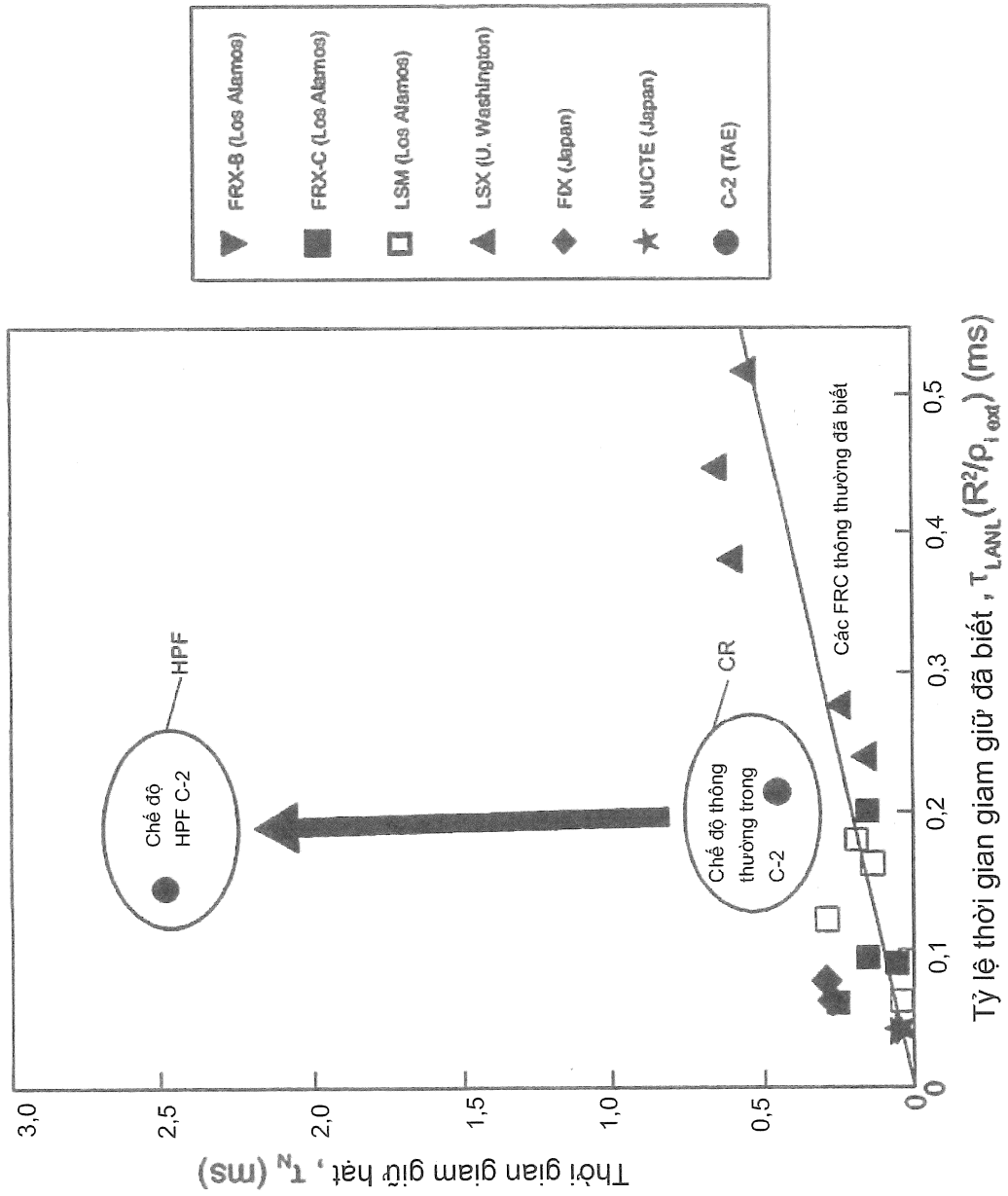


Fig.1

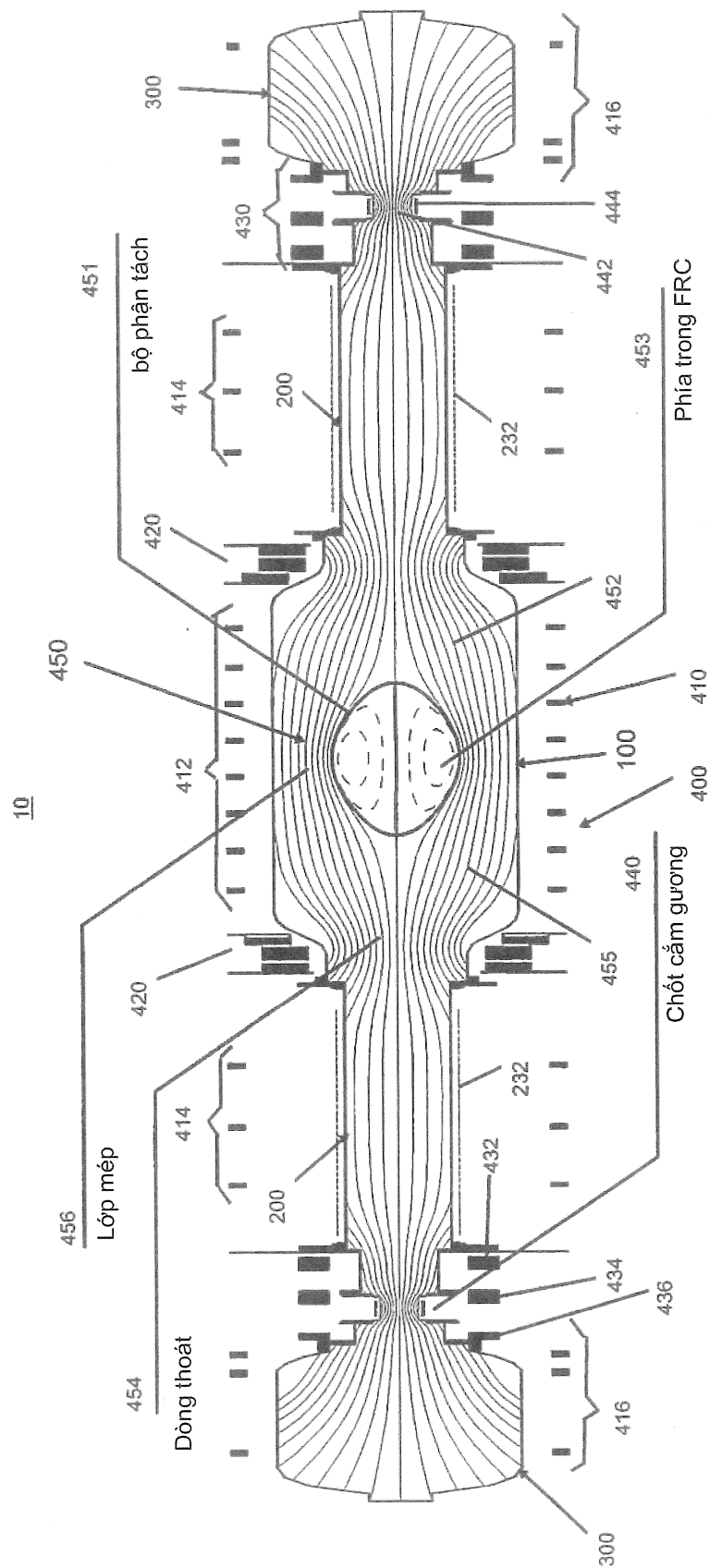


Fig.2

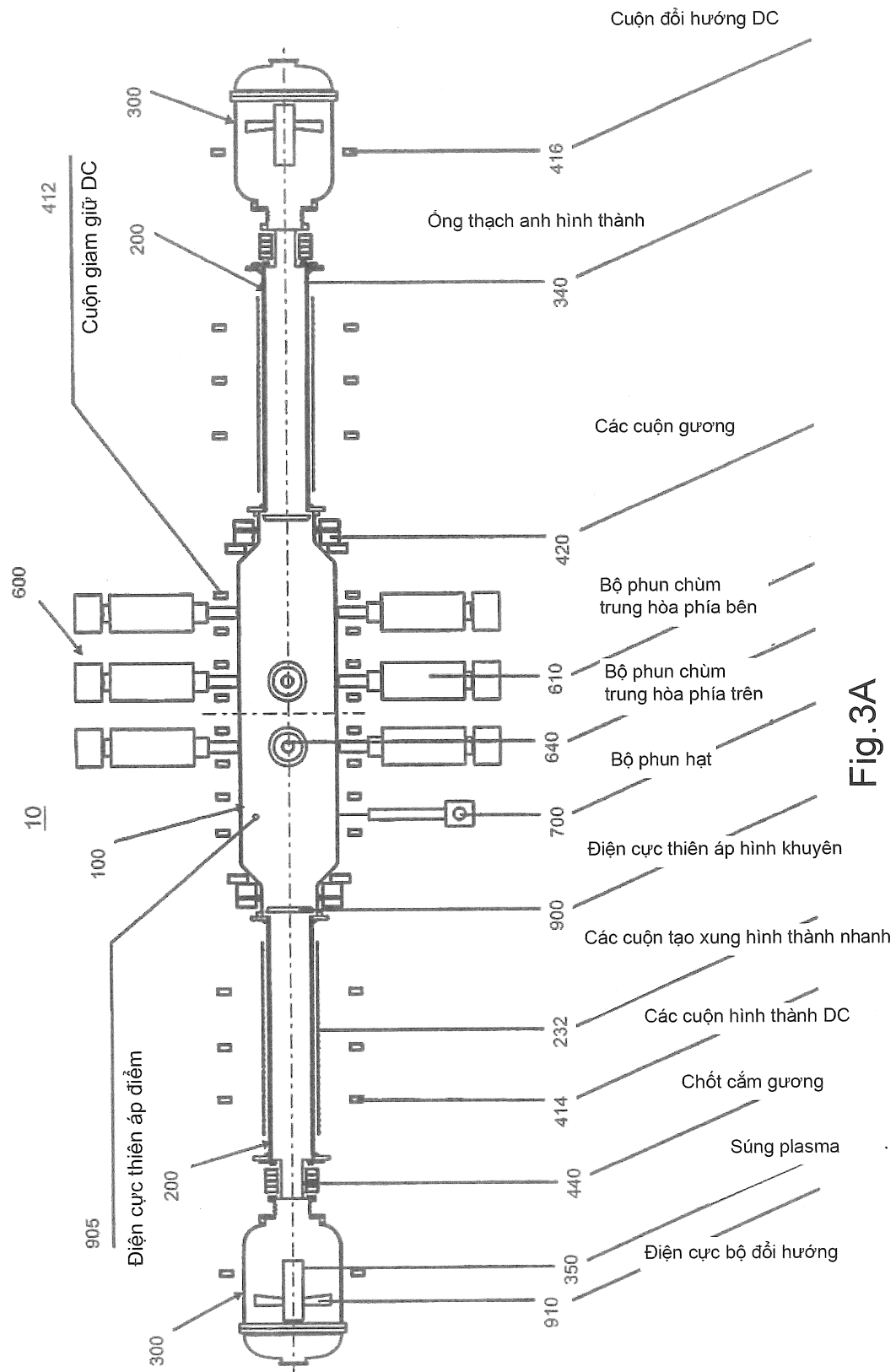


Fig.3A

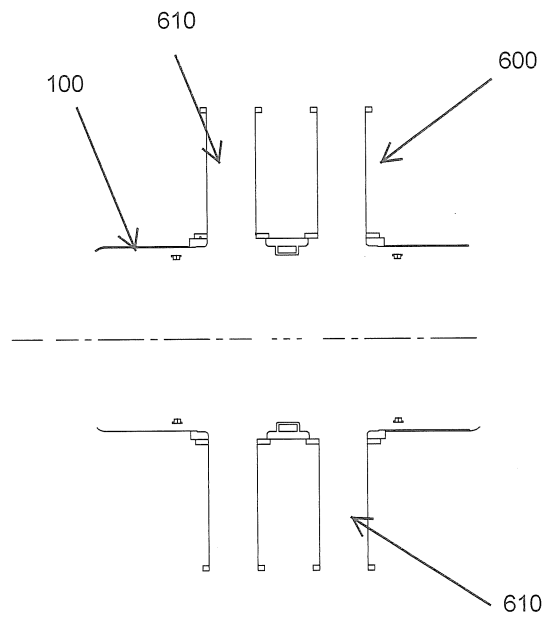


Fig.3B

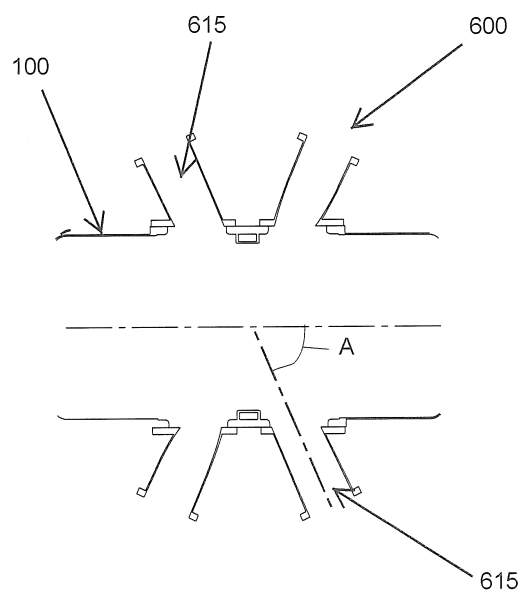


Fig.3C

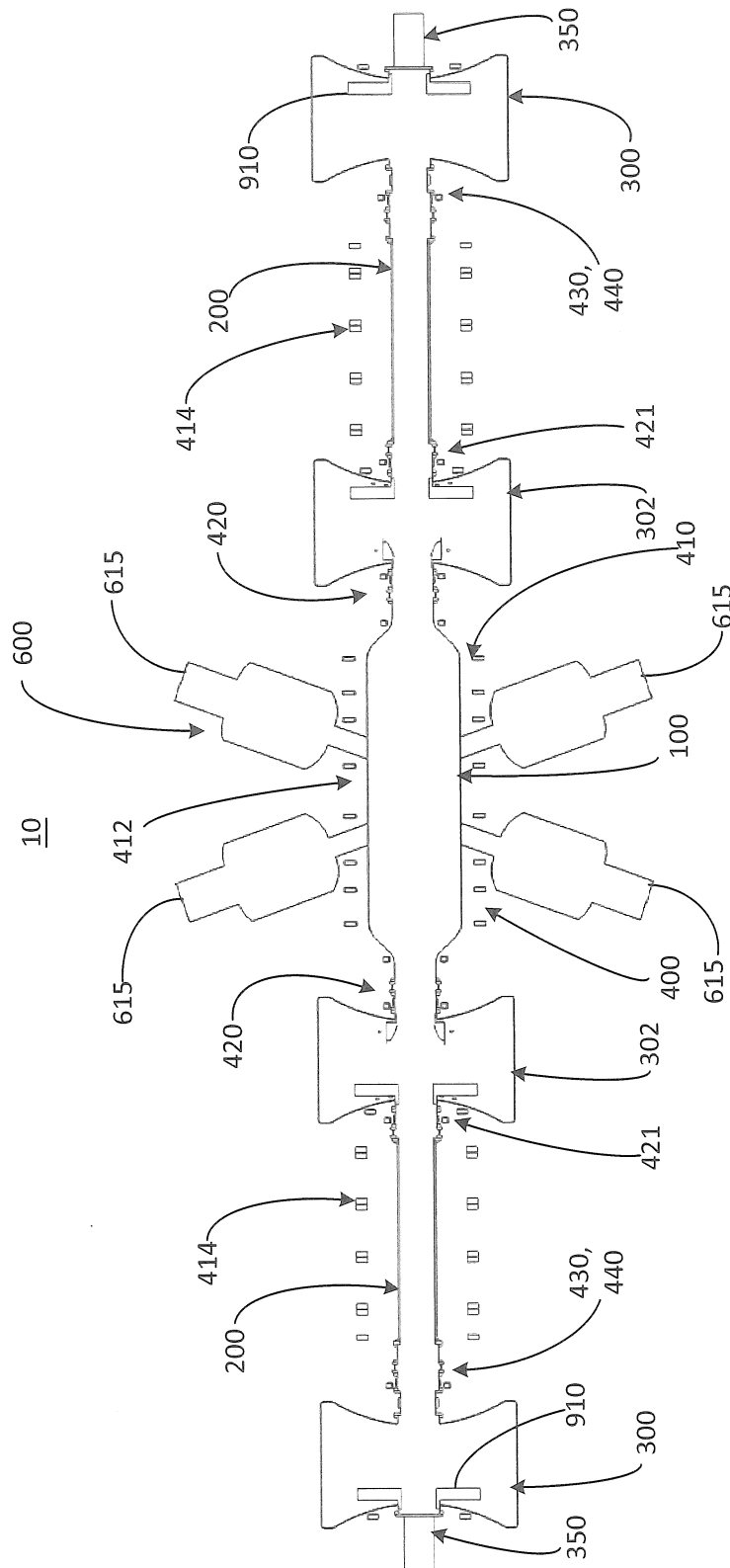


Fig. 3D

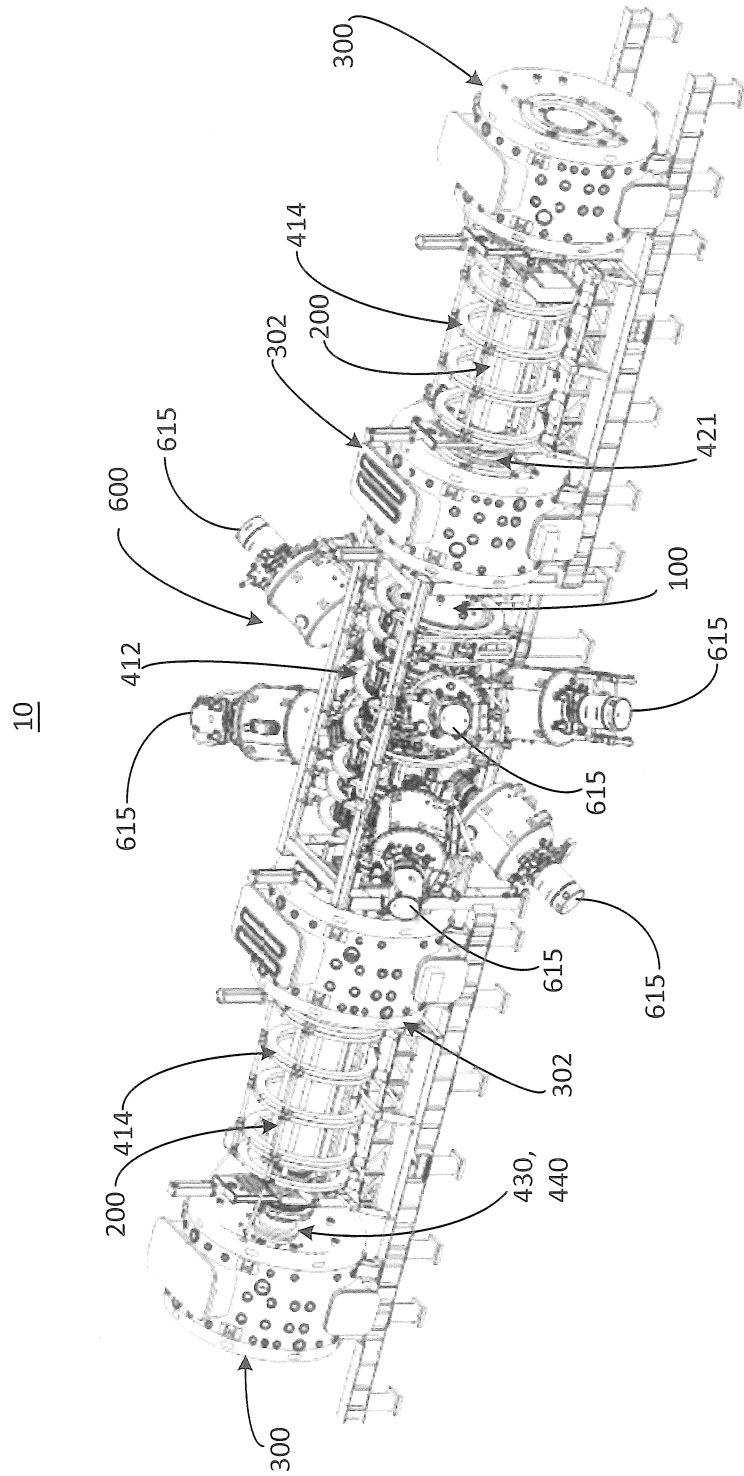


Fig.3E

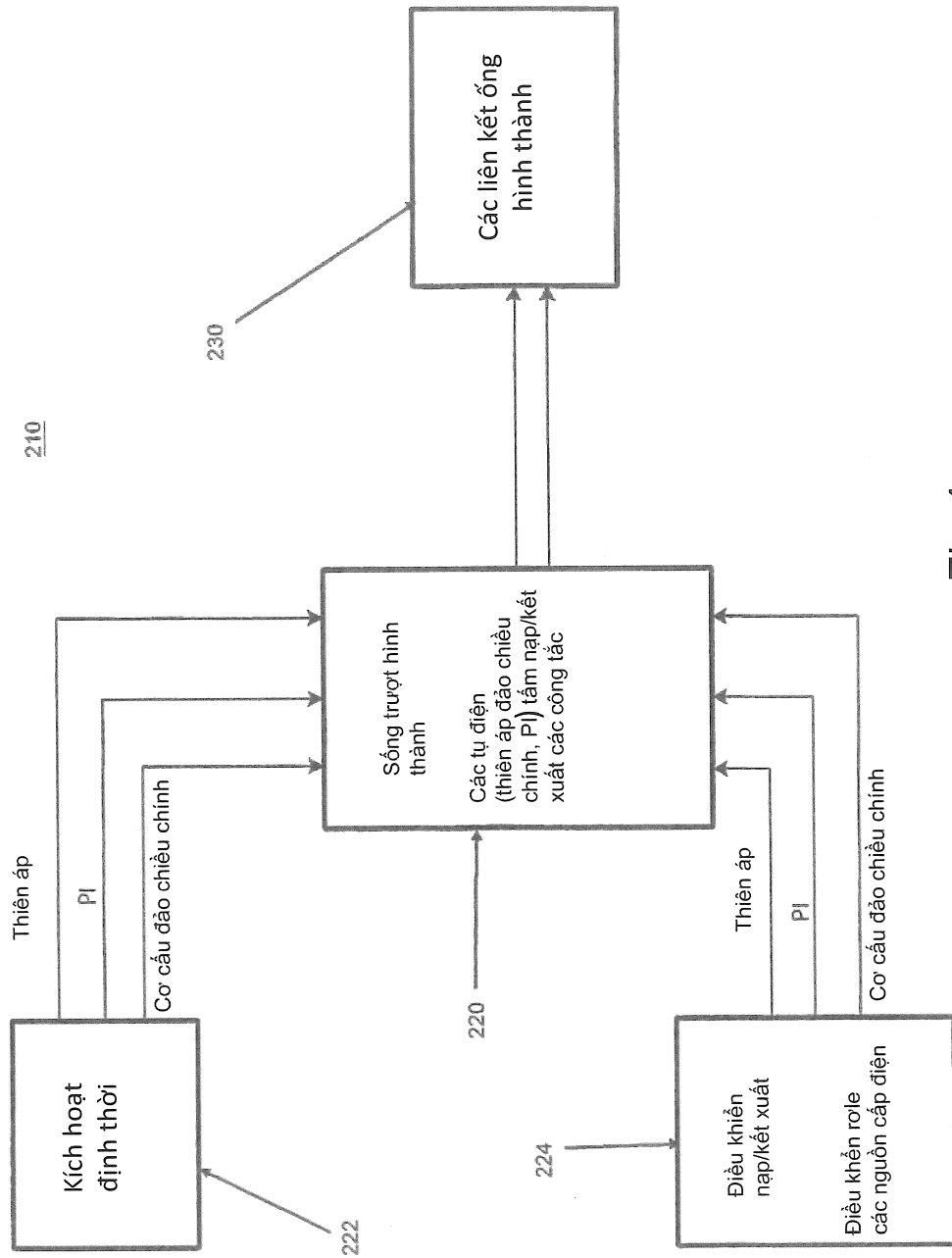


Fig.4

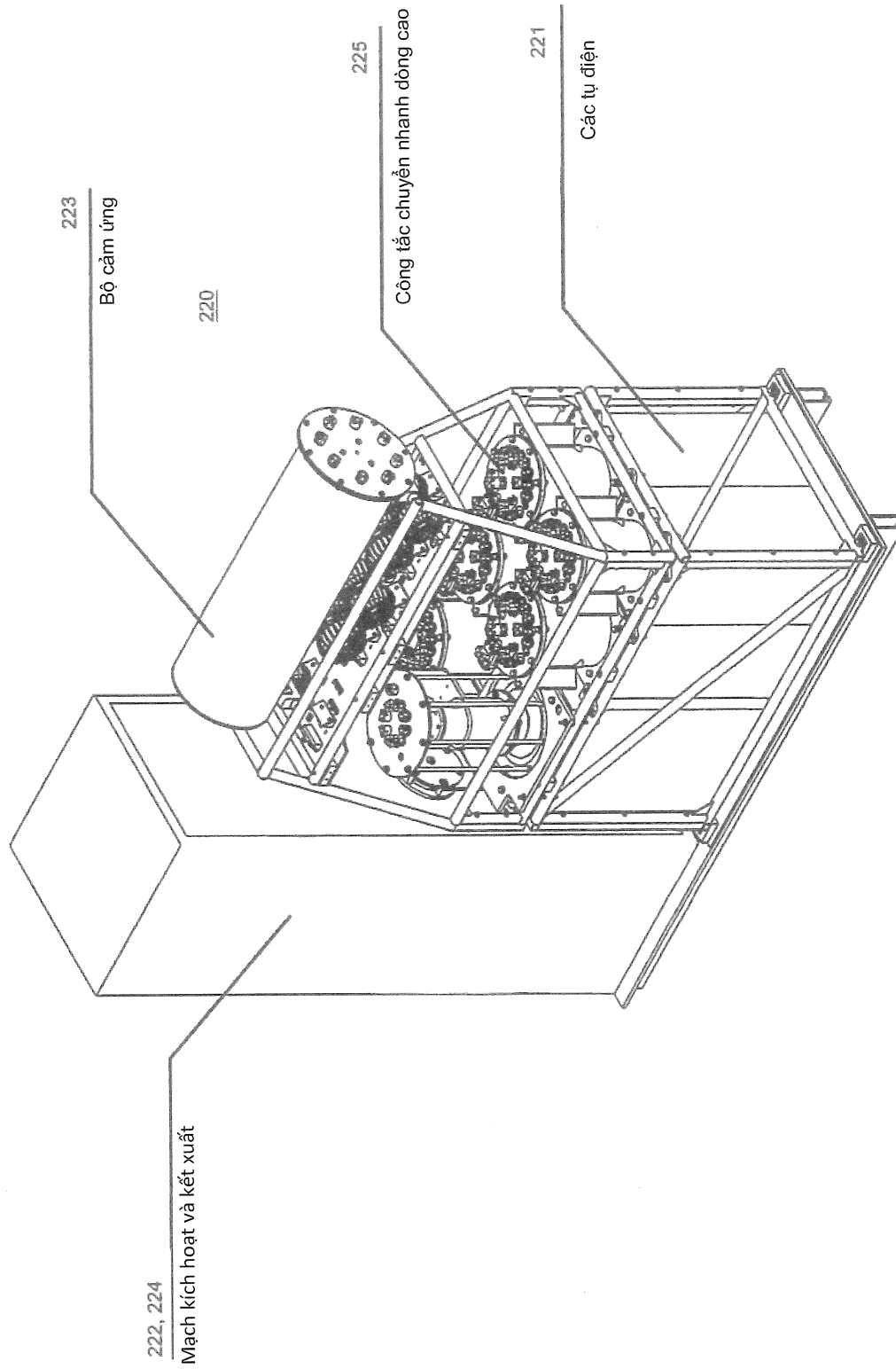


Fig.5

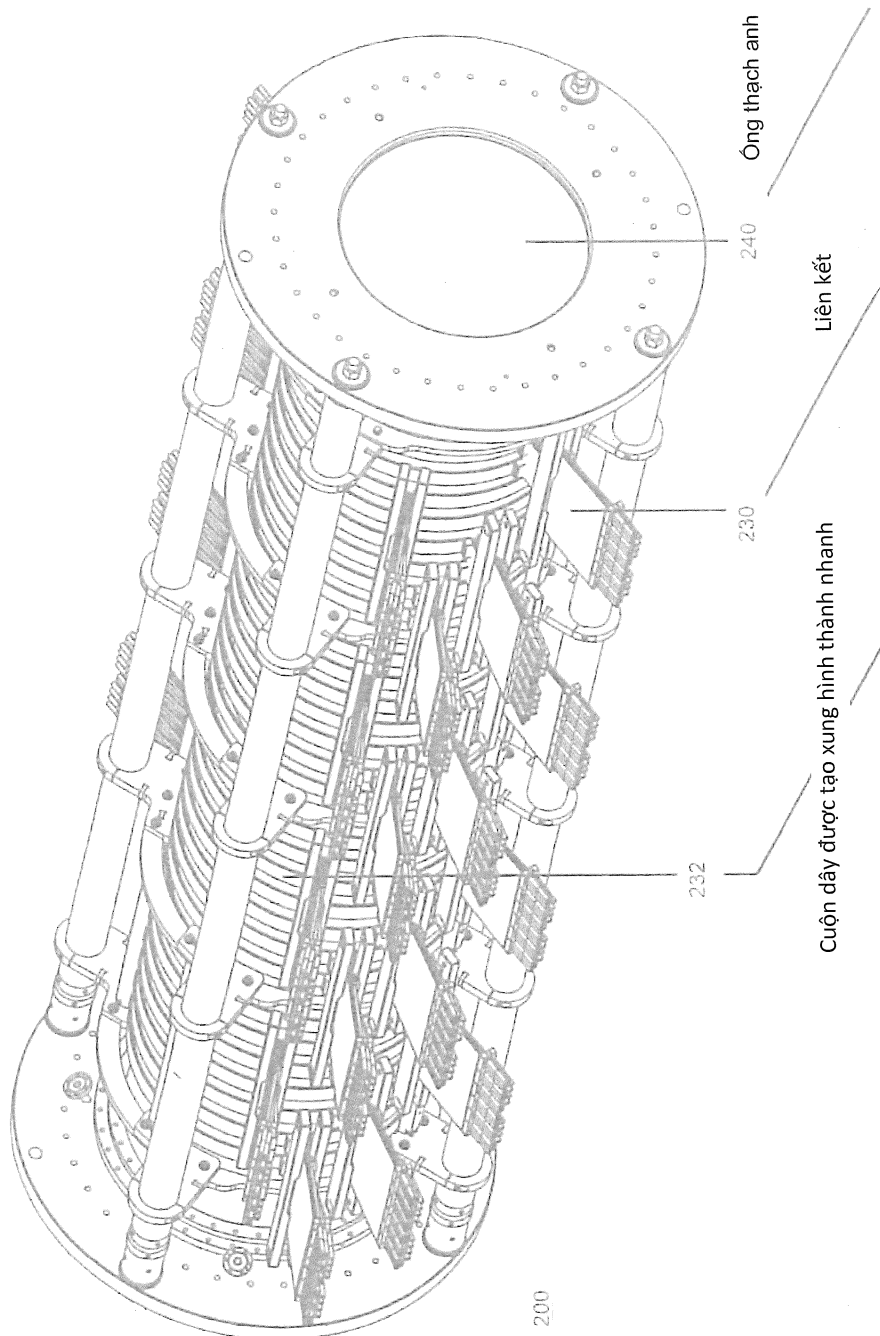


Fig.6

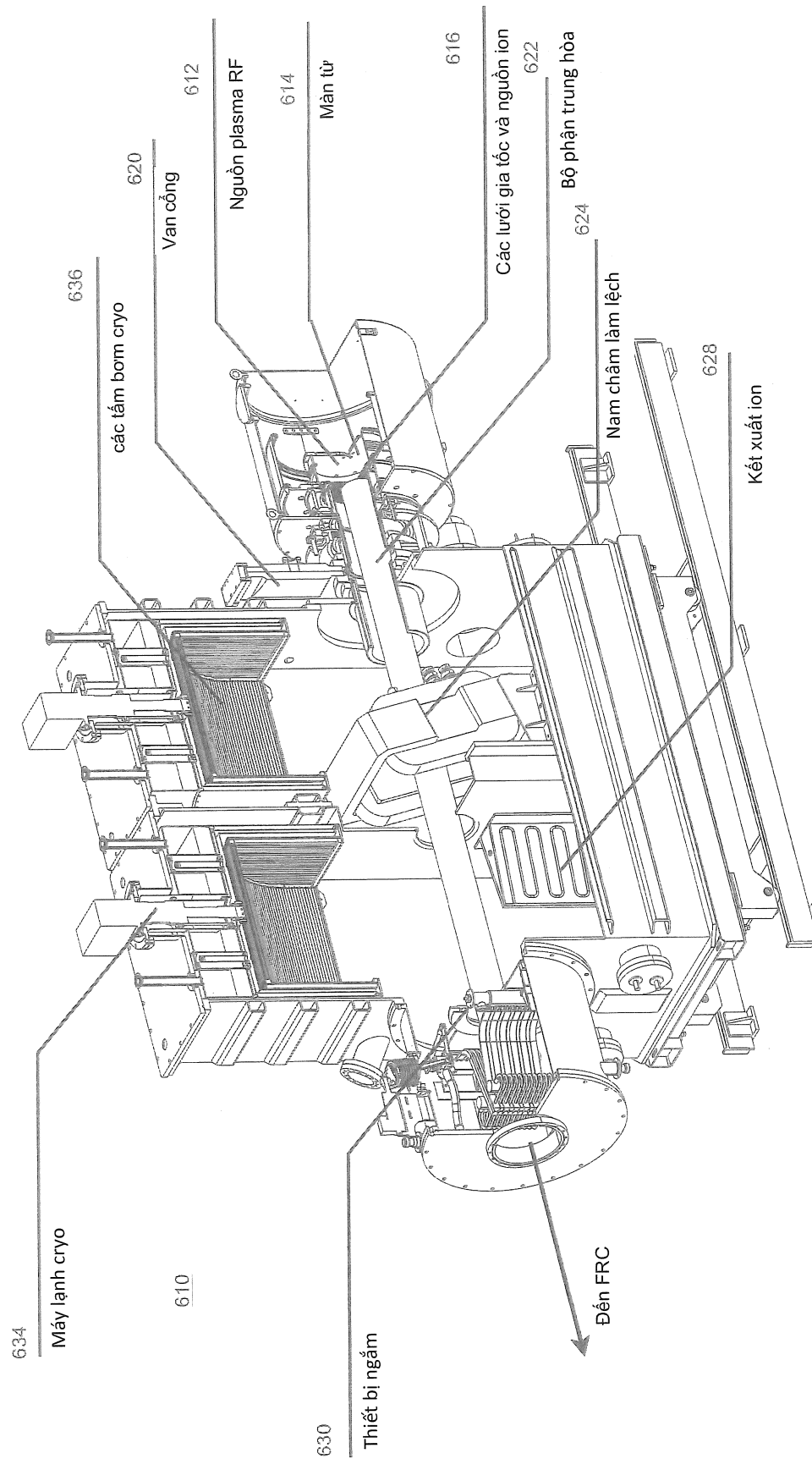


Fig. 7

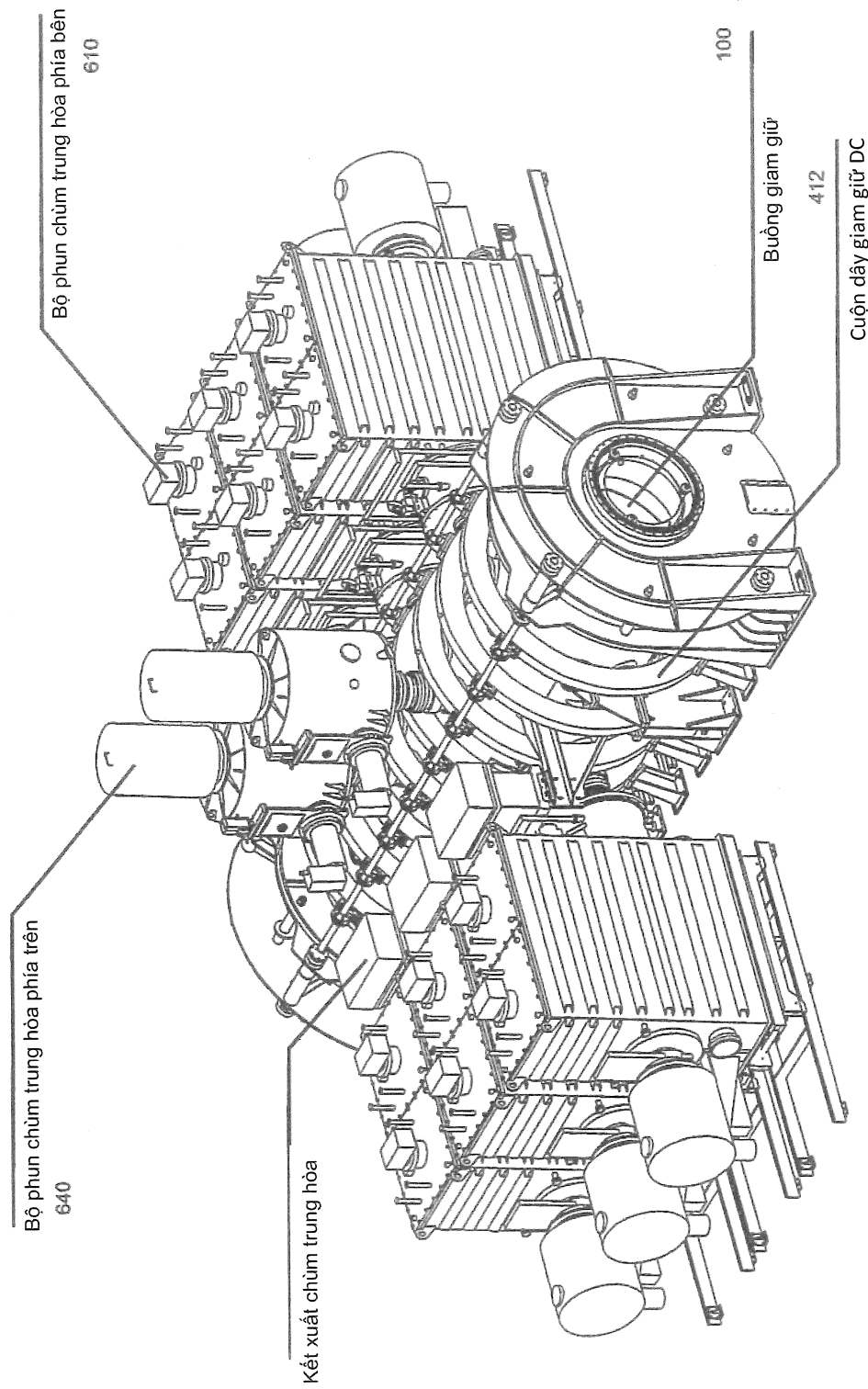


Fig.8

12/44

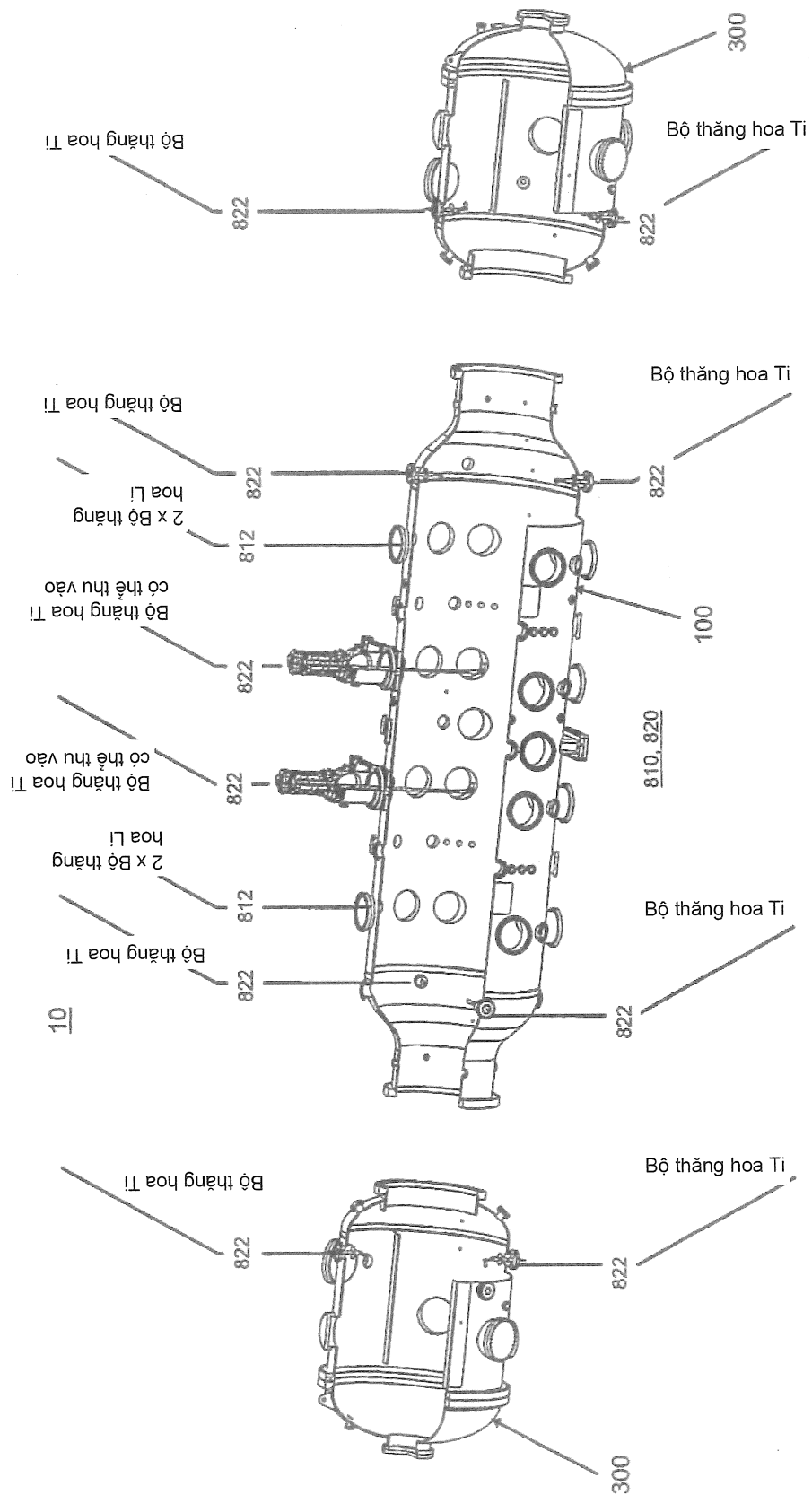


Fig.9

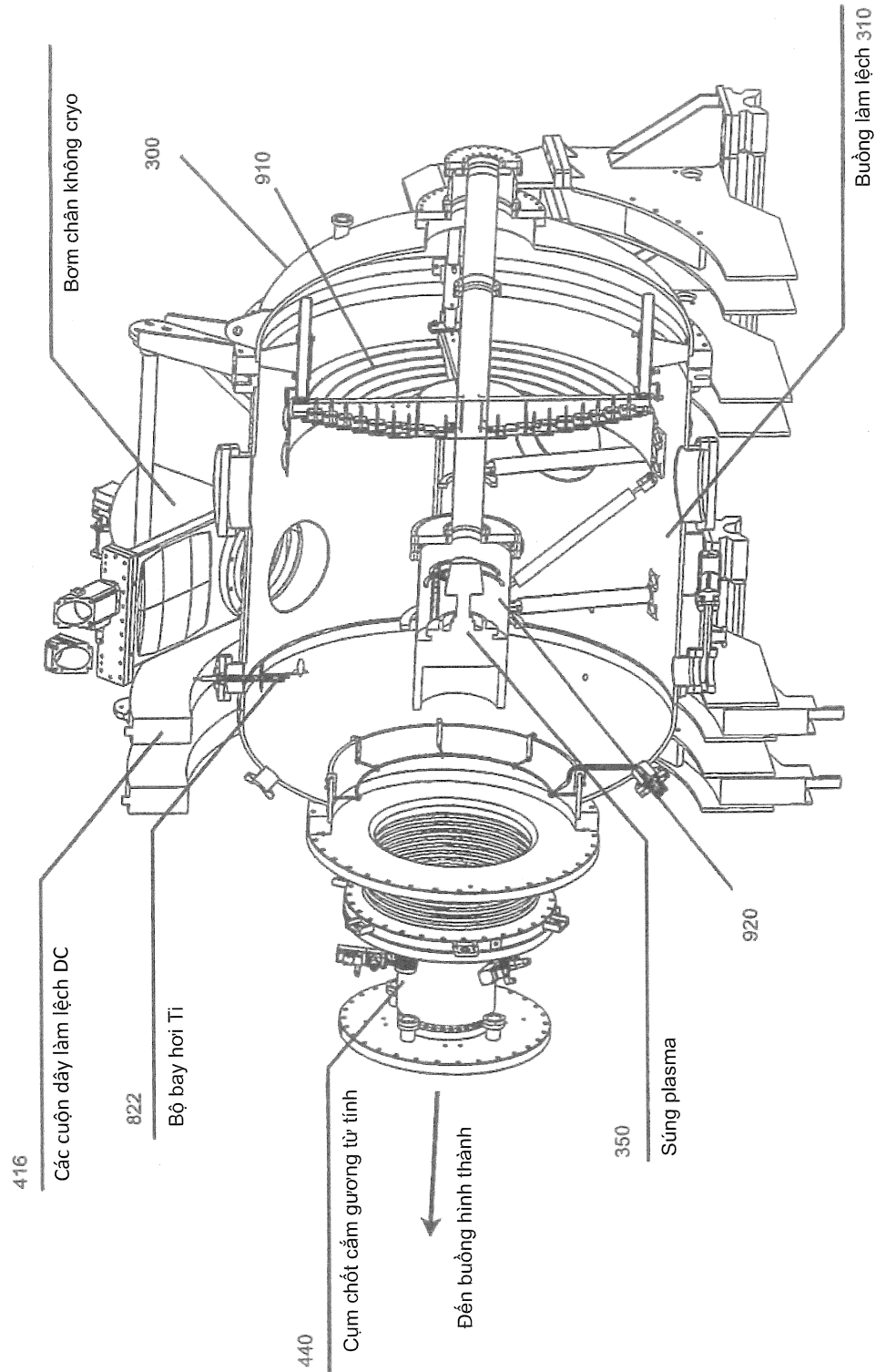


Fig.10

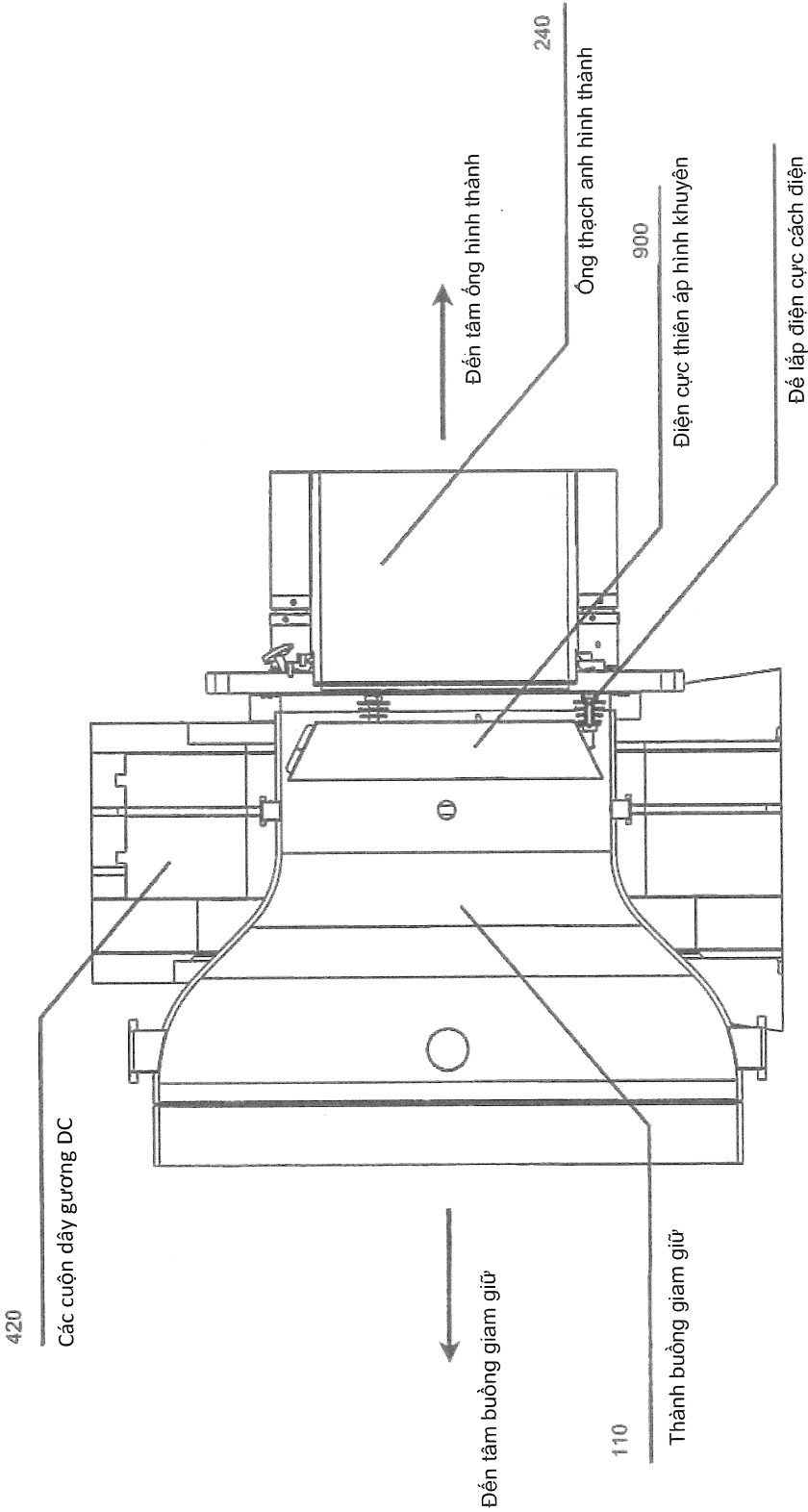


Fig.11

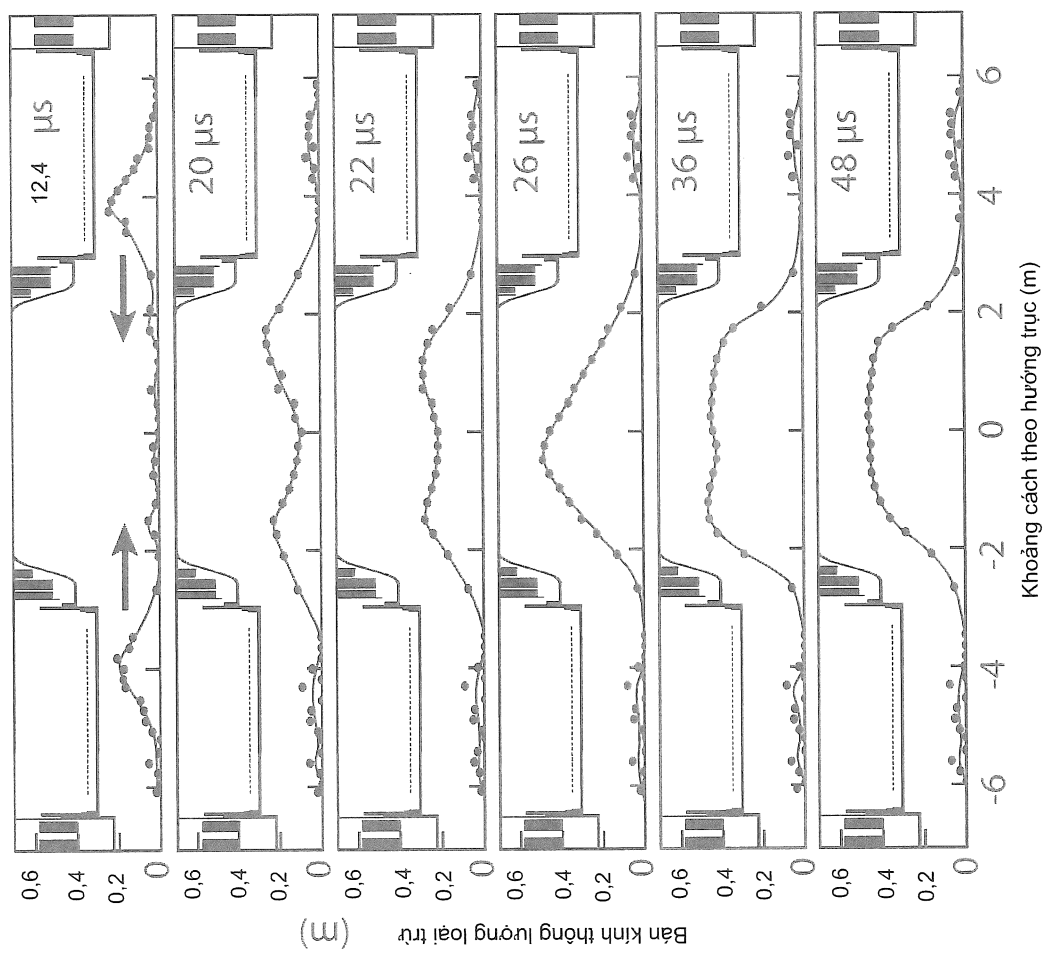


Fig.12

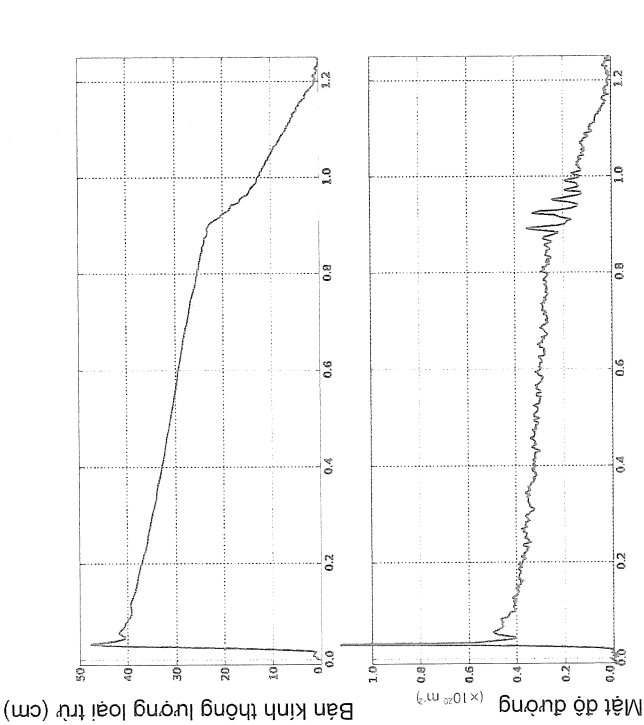


Fig.13A

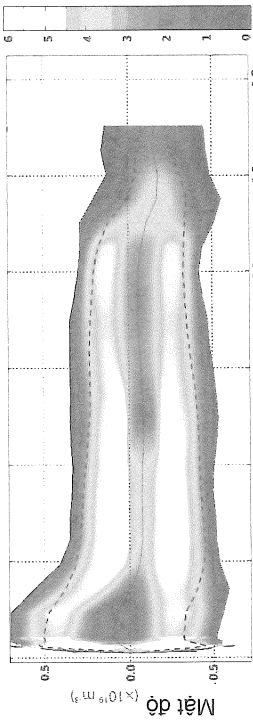


Fig.13C

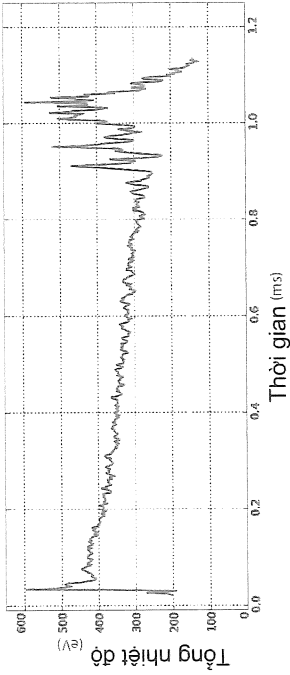


Fig.13D

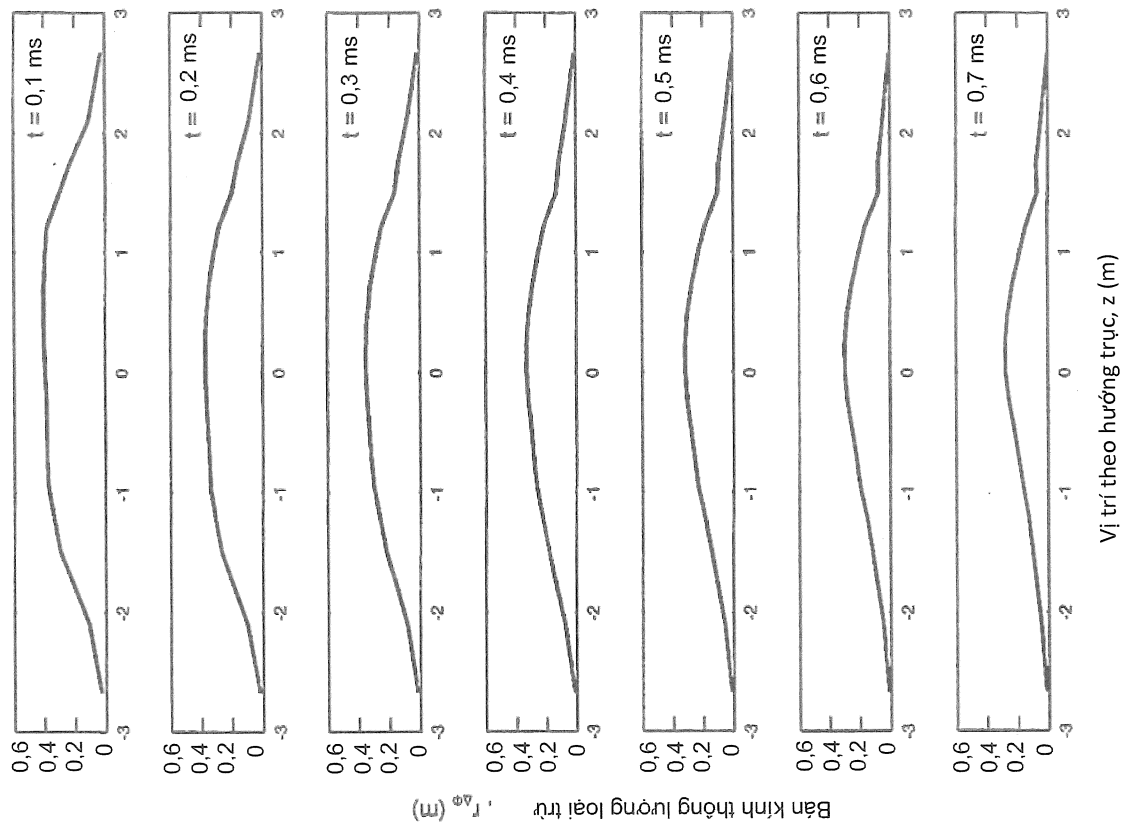


Fig.14

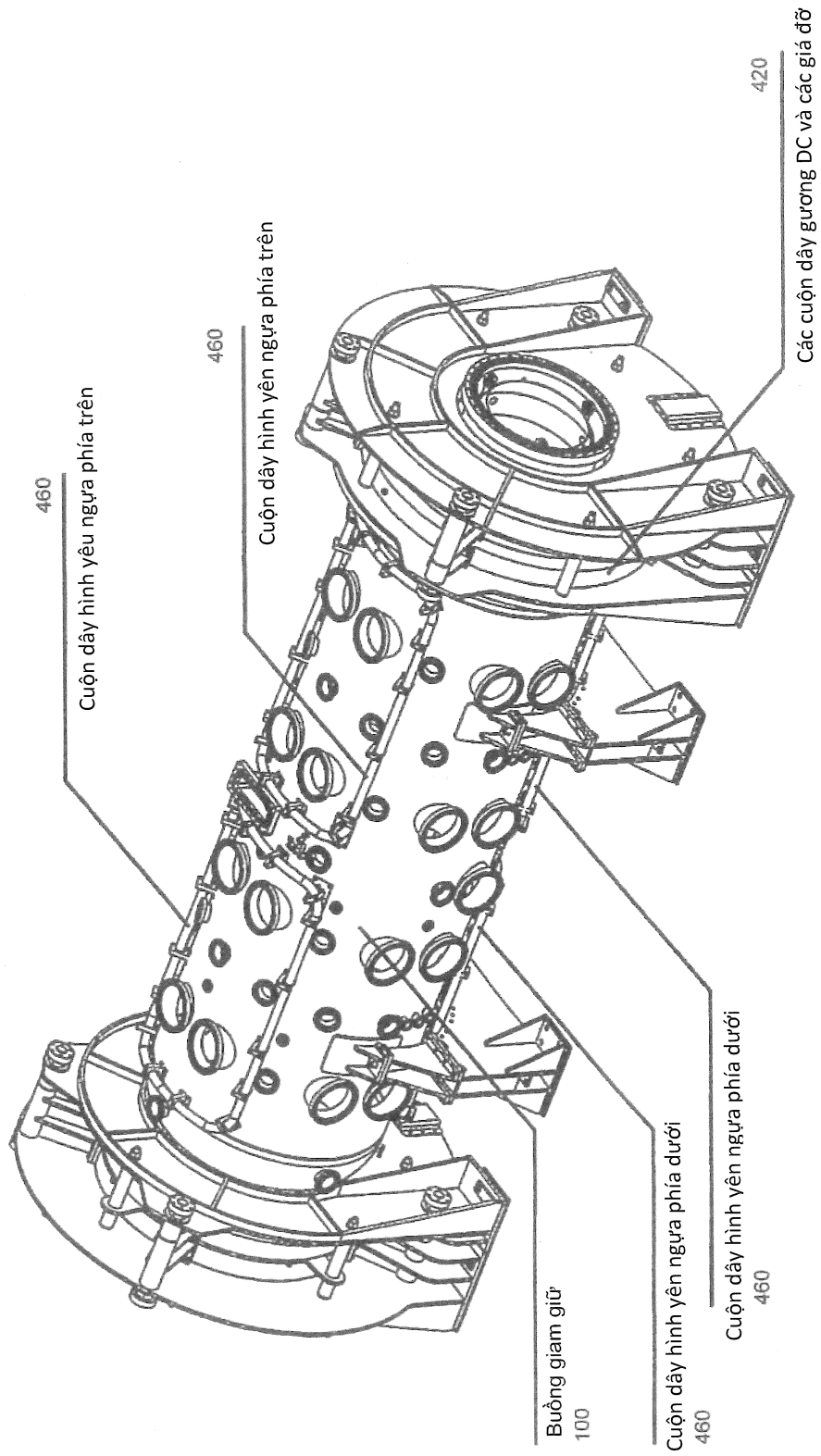


Fig.15

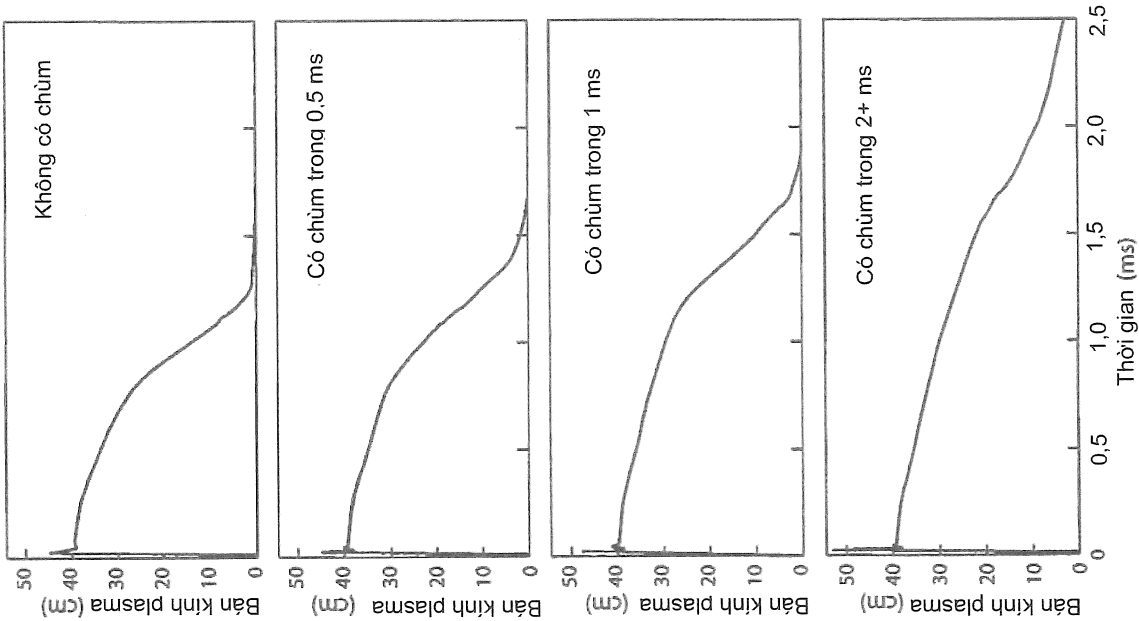


Fig.16A

Fig.16B

Fig.16C

Fig.16D

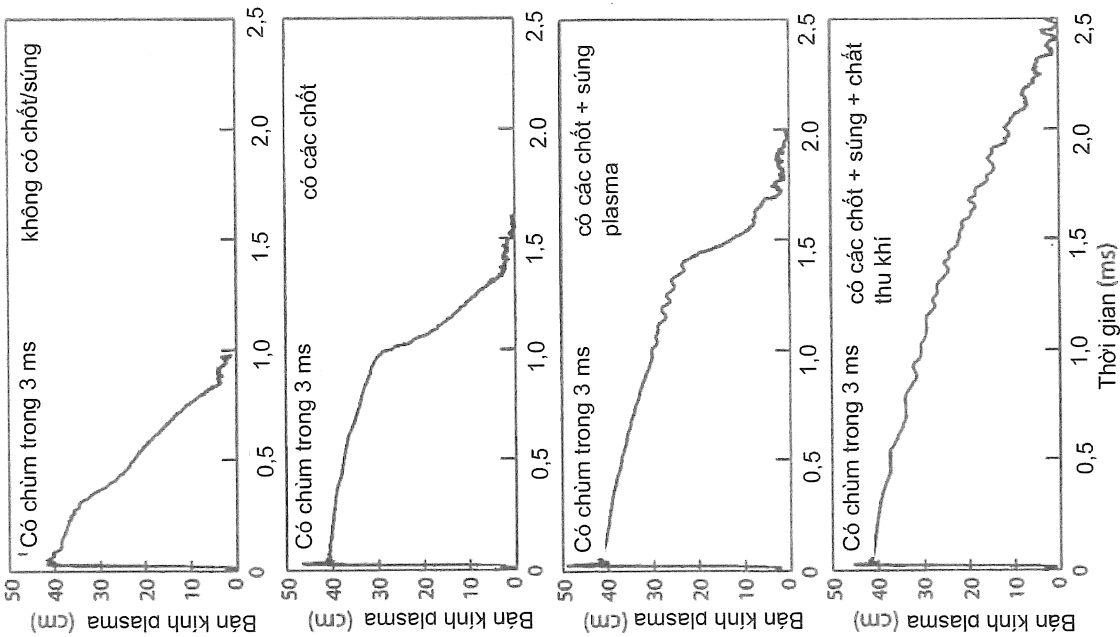


Fig.17A

Fig.17B

Fig.17C

Fig.17D

Fig.18A

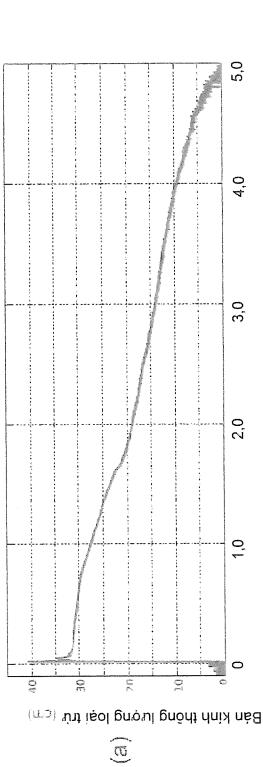


Fig.18B

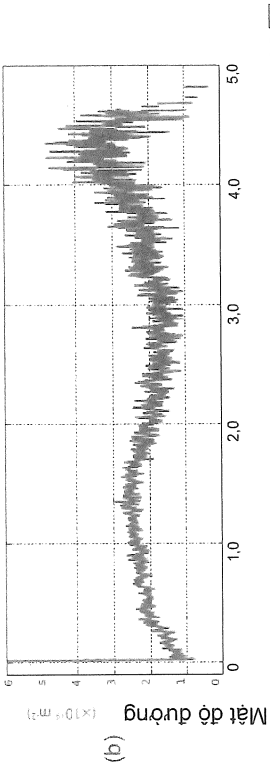


Fig.18C

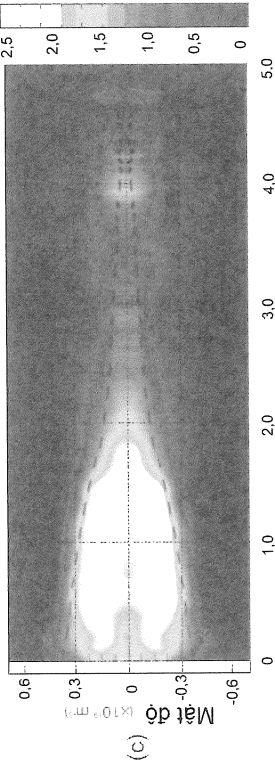
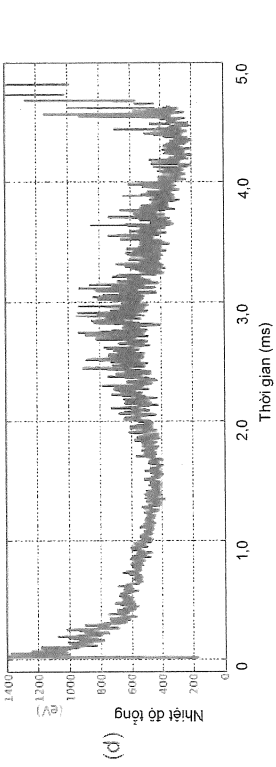


Fig.18D



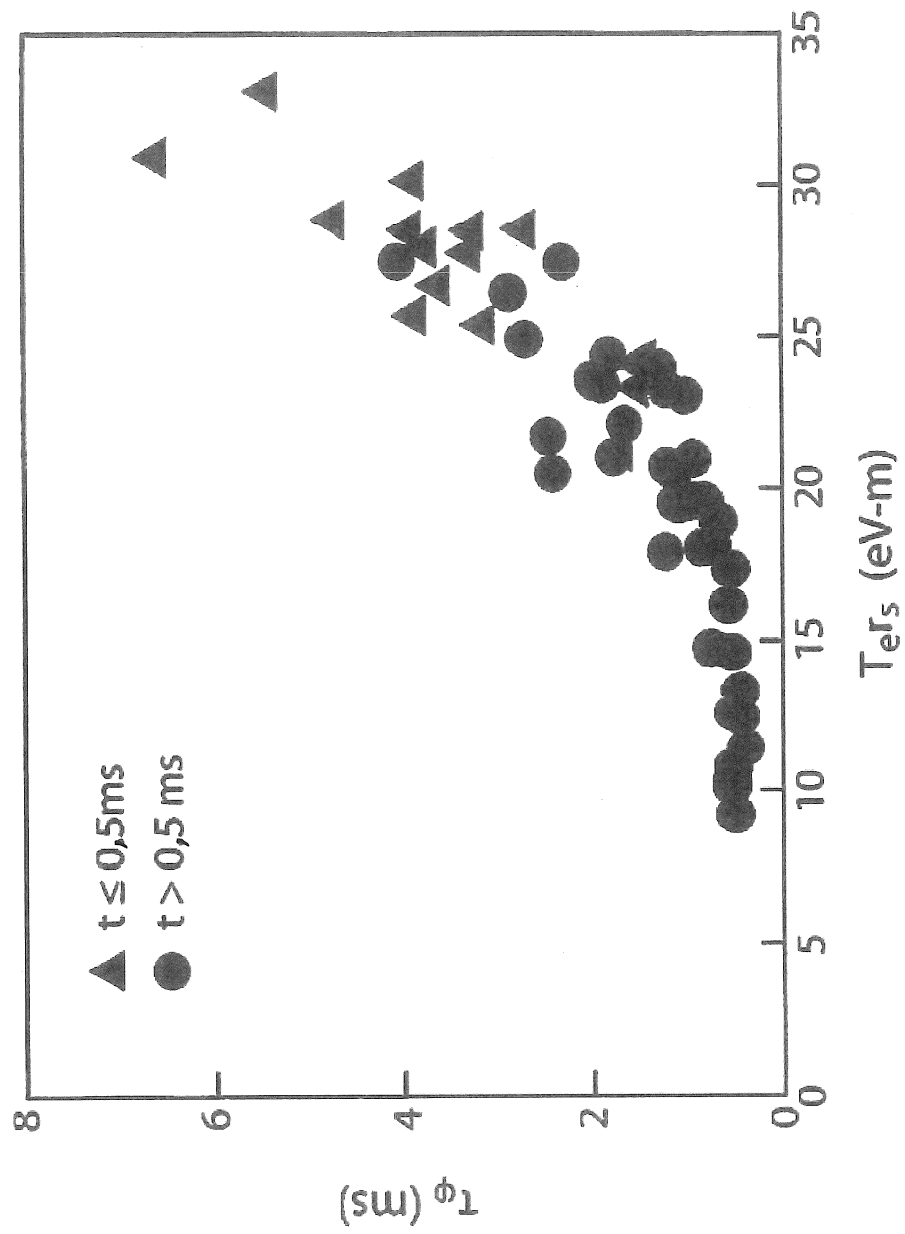


Fig.19

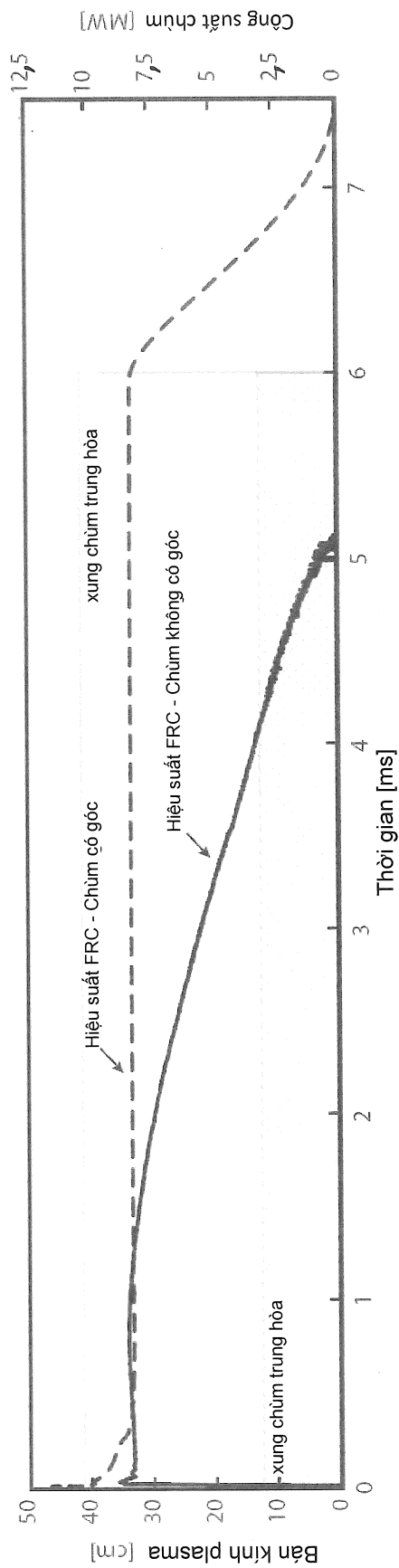


Fig.20

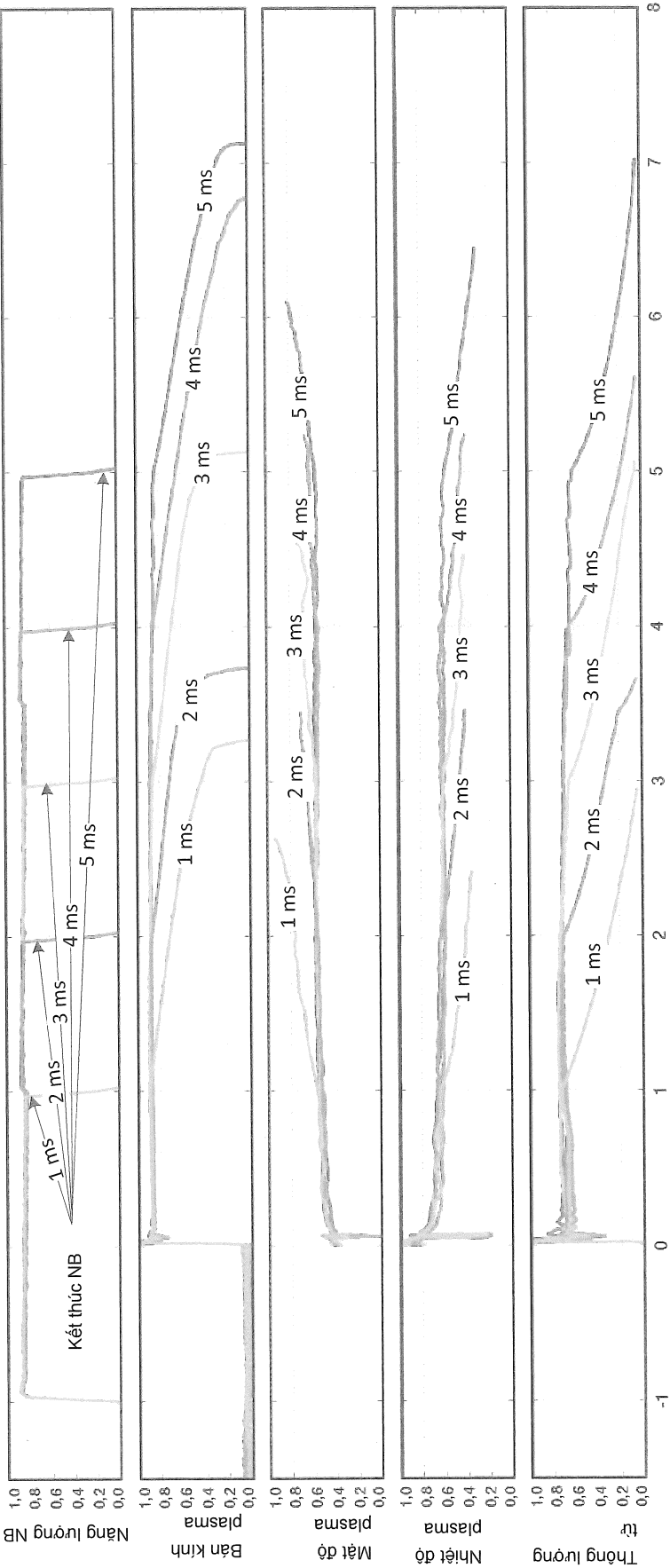


FIG.21A

Fig.21B

Fig.21C

Fig.21D

Fig.21E

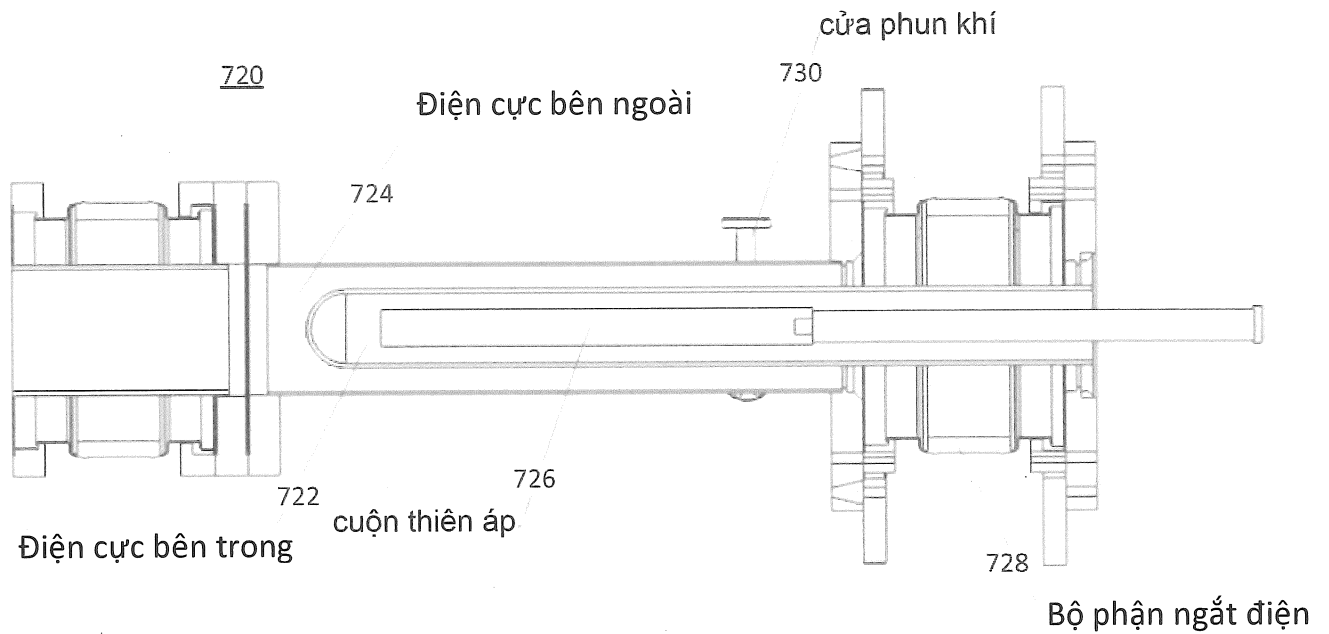


Fig.22A

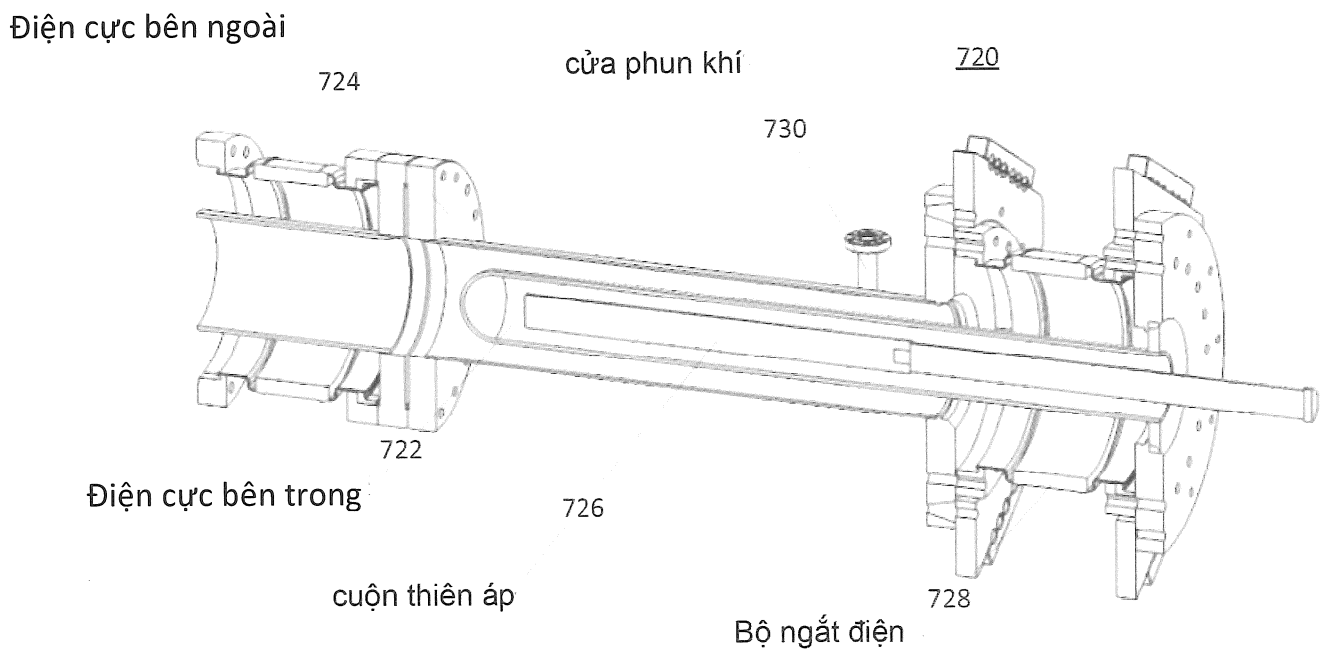


Fig.22B

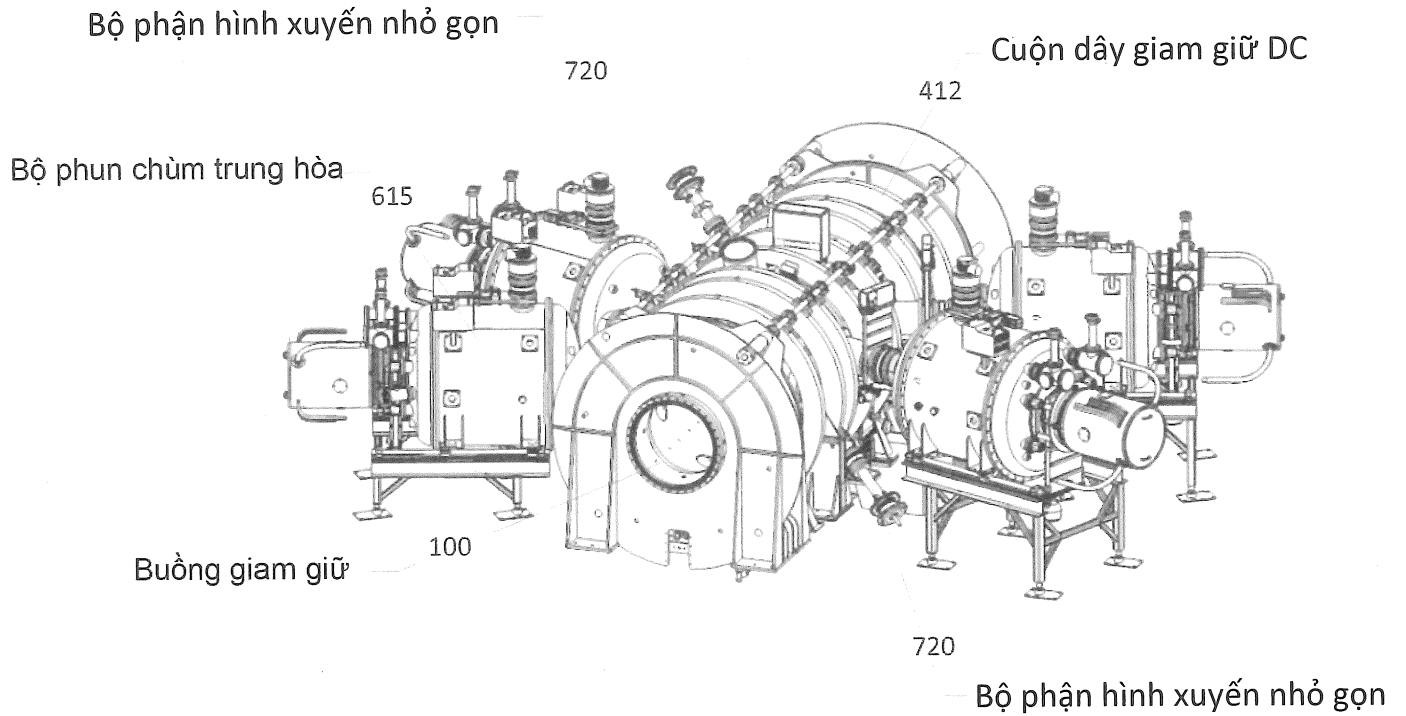


Fig.23A

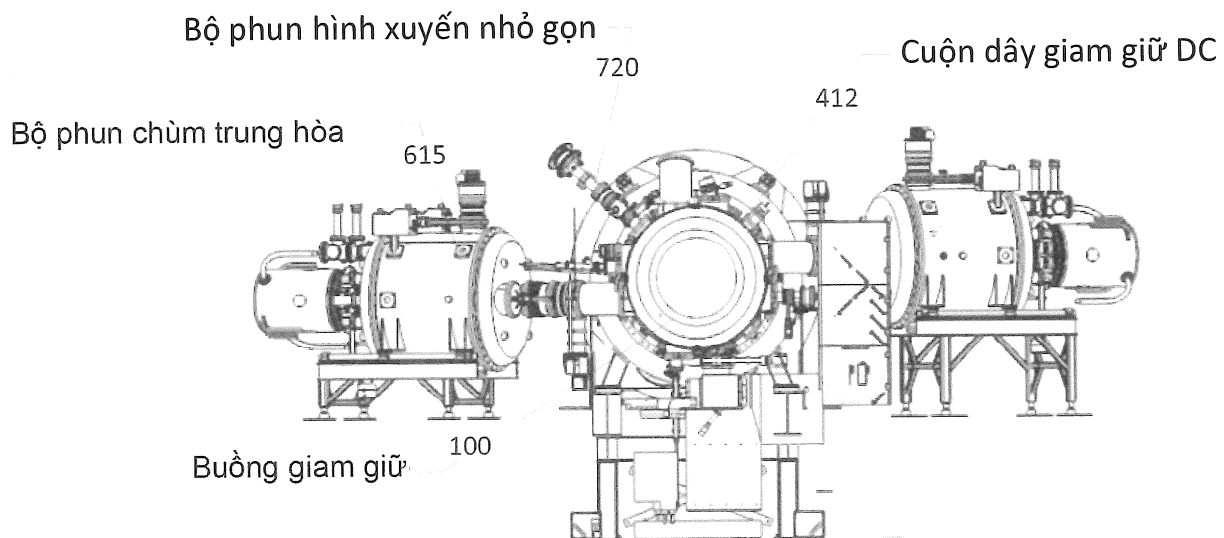


Fig.23B

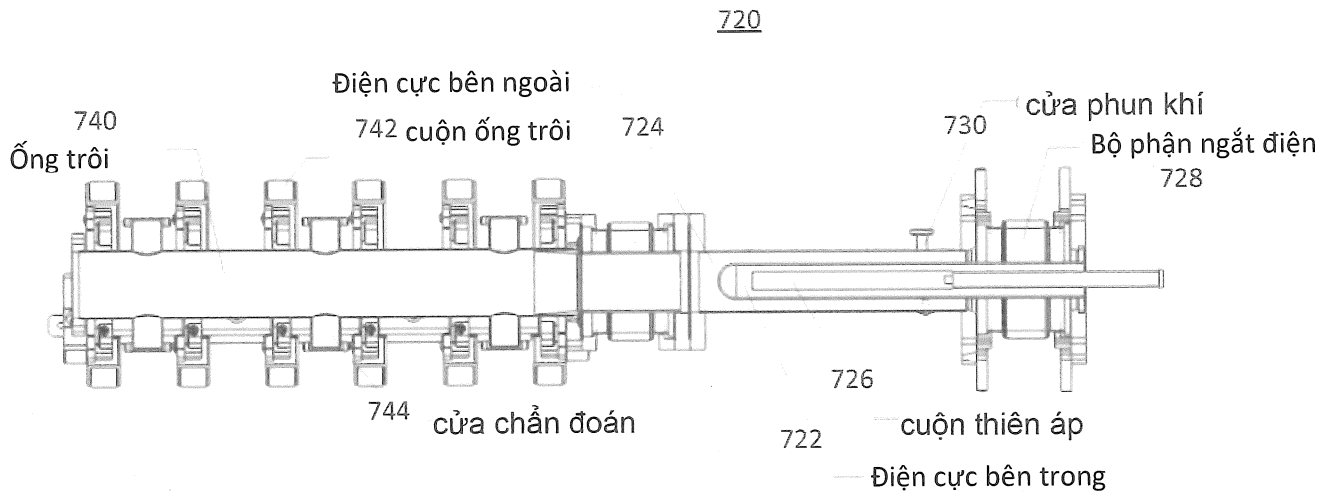


Fig. 24A

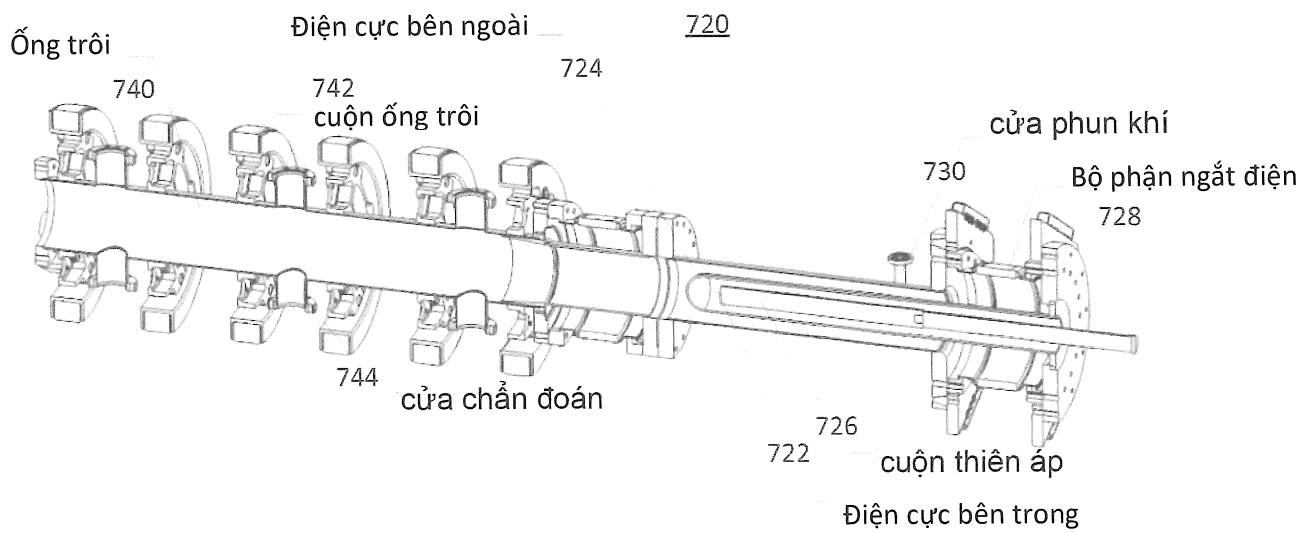


Fig. 24B

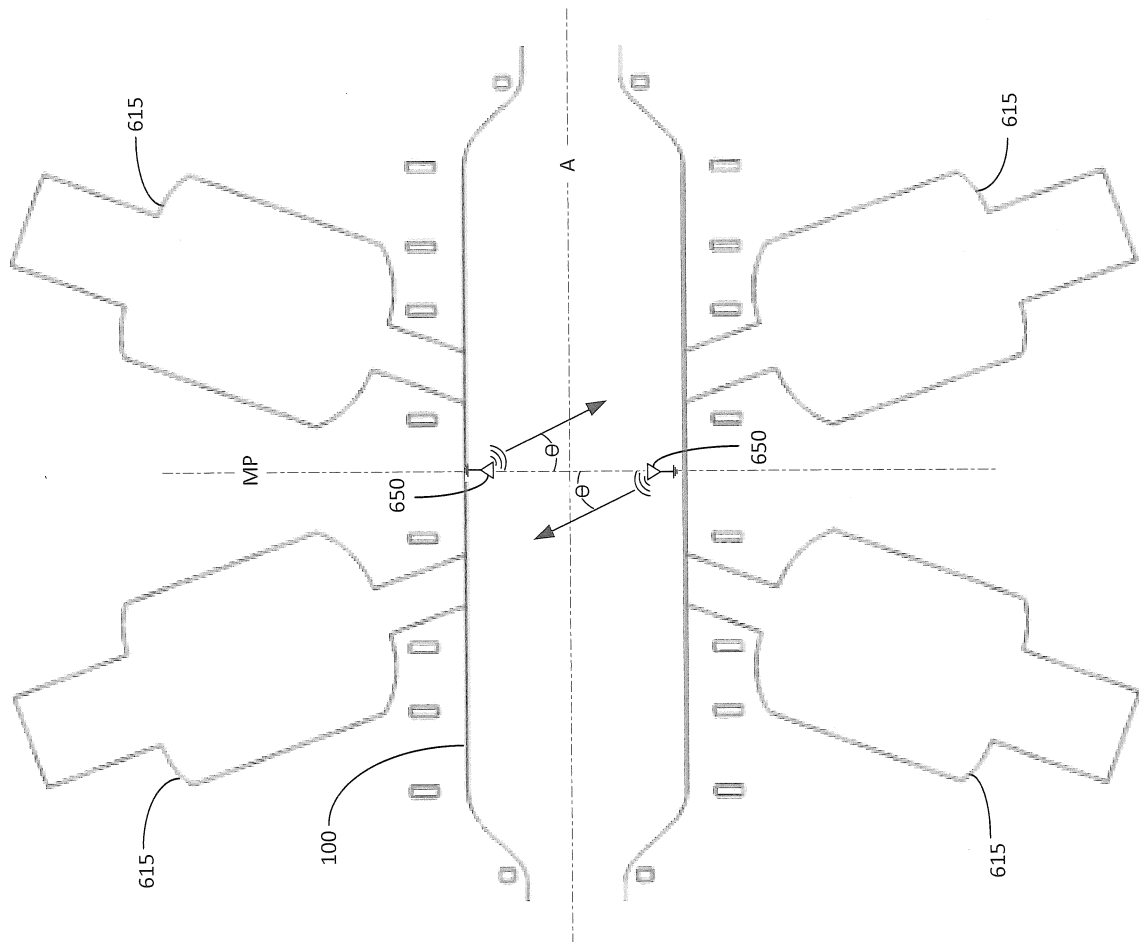


Fig. 25

Biên dạng mật độ electron hoàn toàn theo hướng xuyên tâm

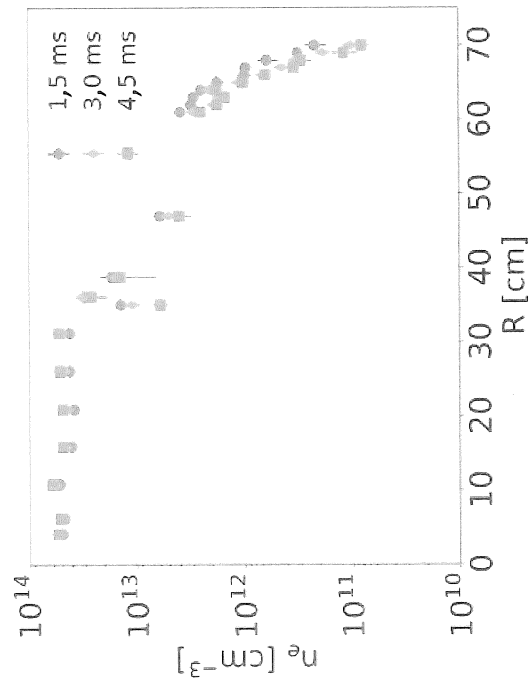


Fig.26A

Biên dạng nhiệt độ electron hoàn toàn theo hướng xuyên tâm

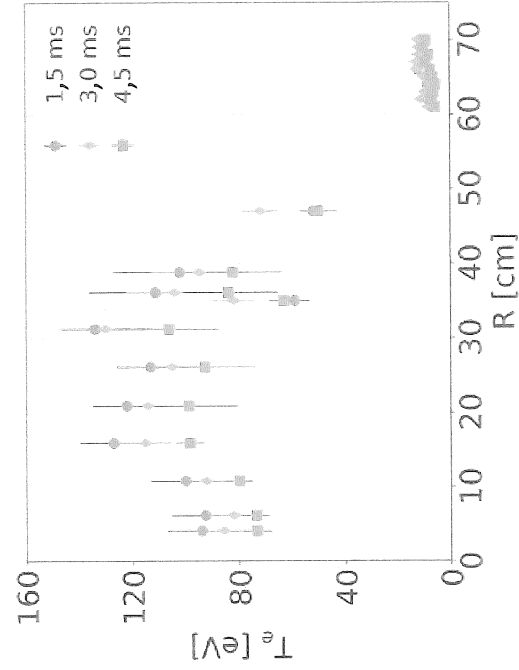


Fig.26B

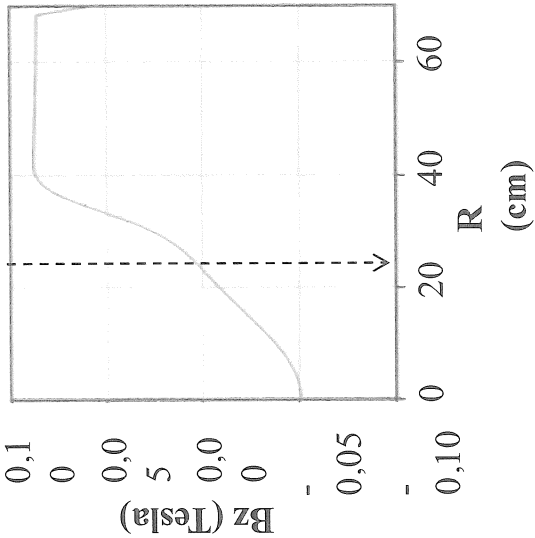


Fig.27C

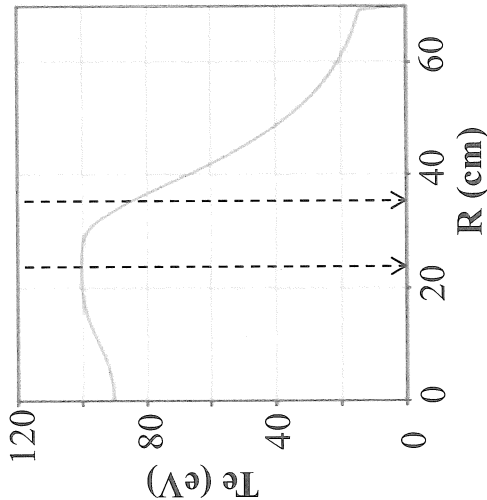


Fig.27B

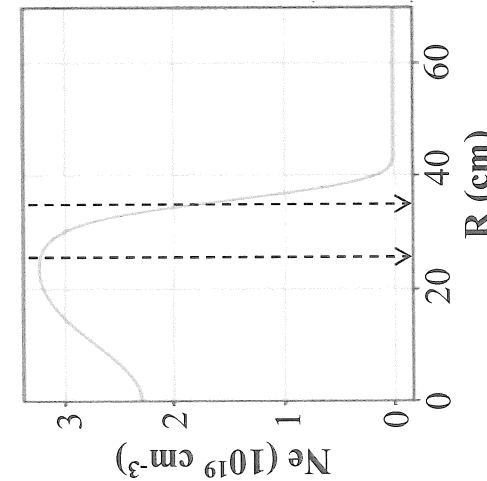


Fig.27A

Lớp bộ phân tách

Trường rỗng

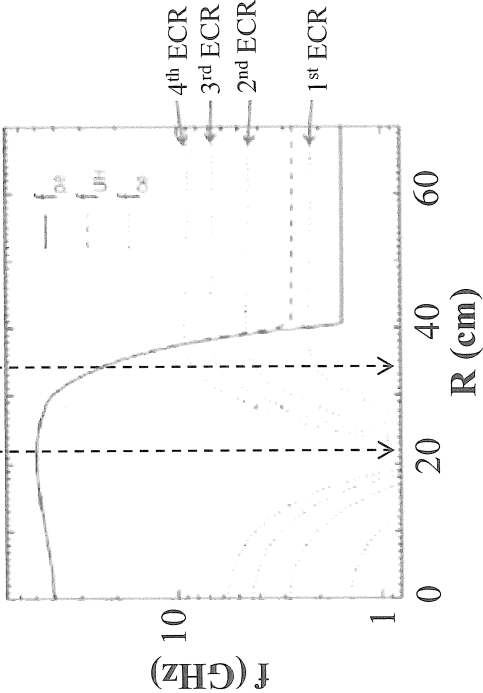


Fig.27D

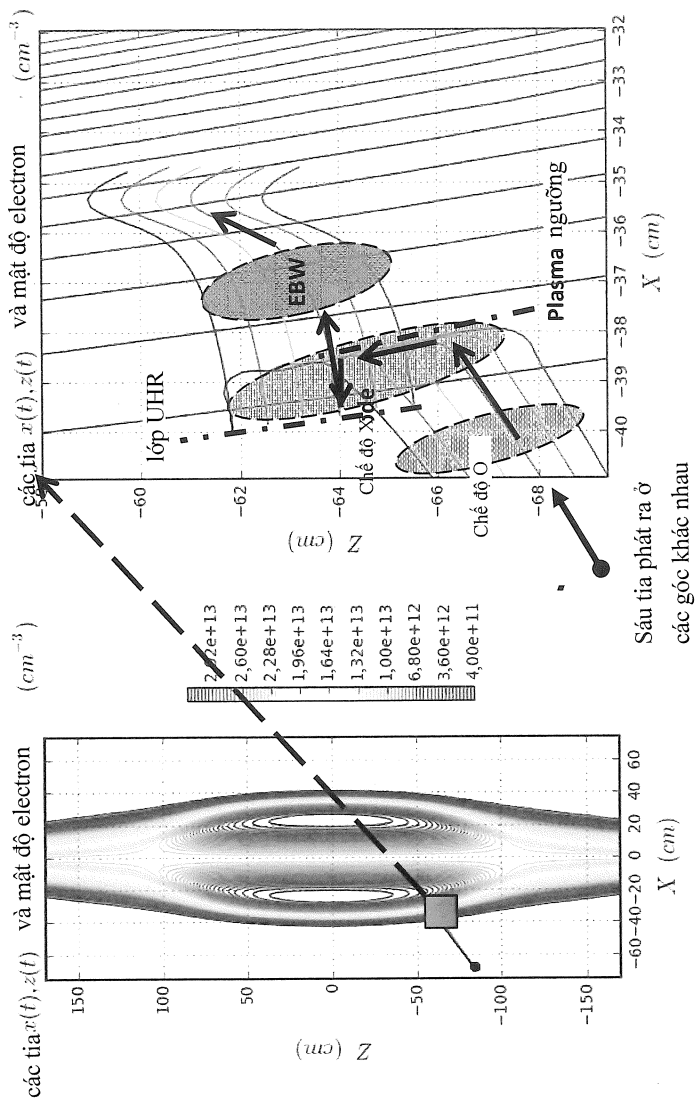


Fig.28A

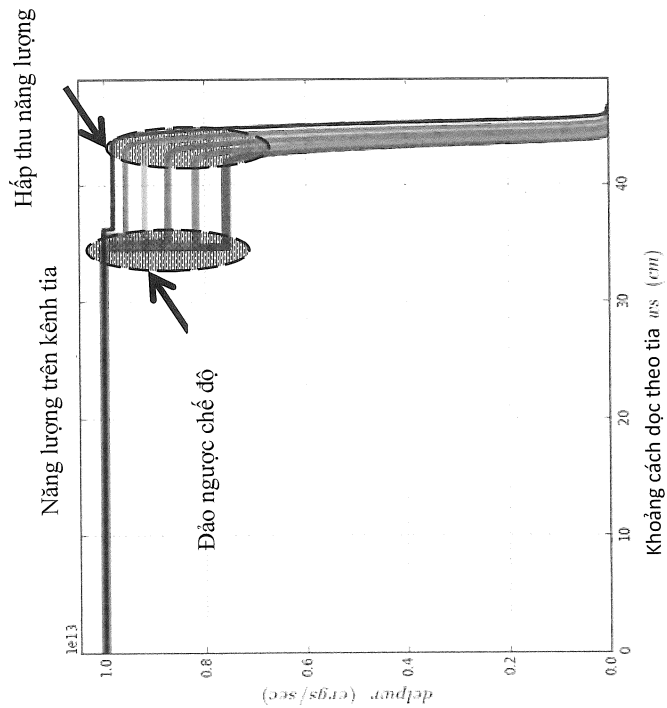


Fig.28B

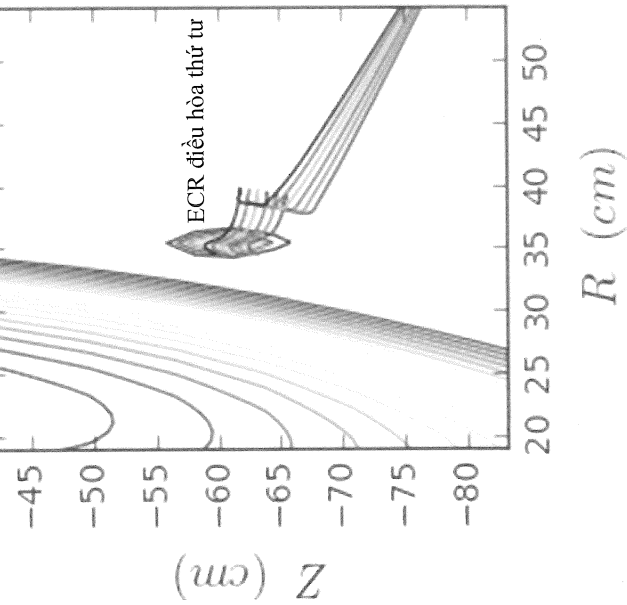


Fig.28C

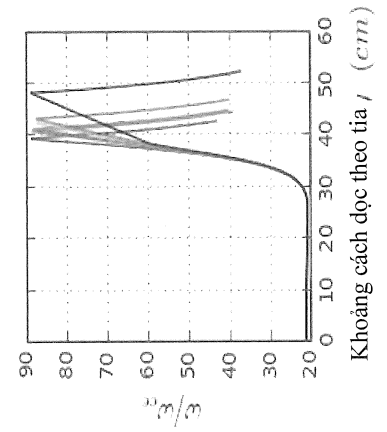
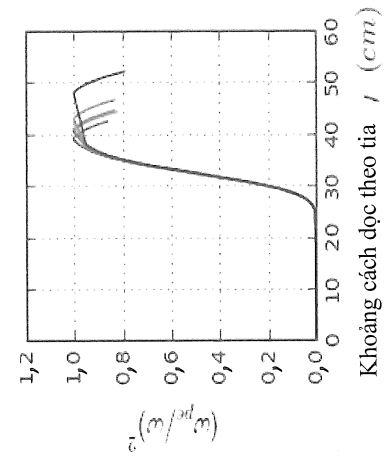
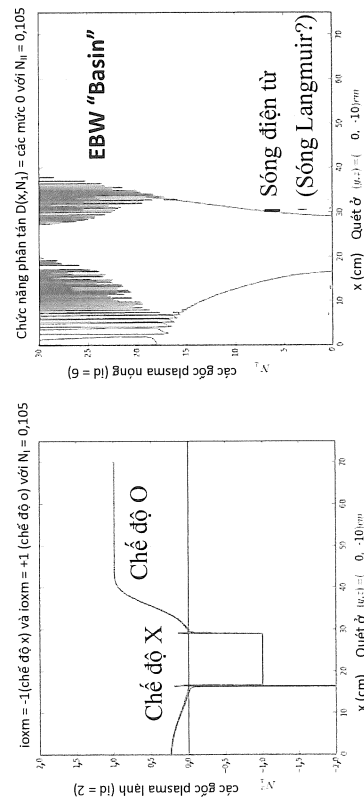
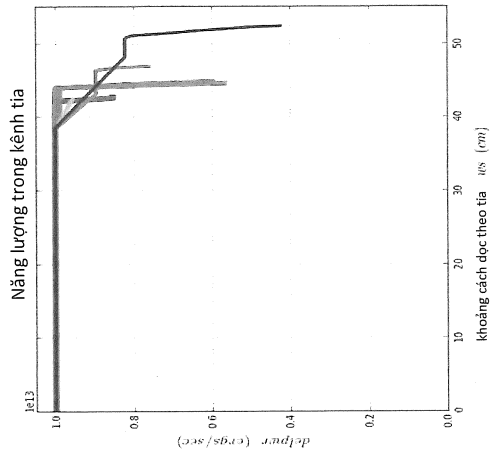
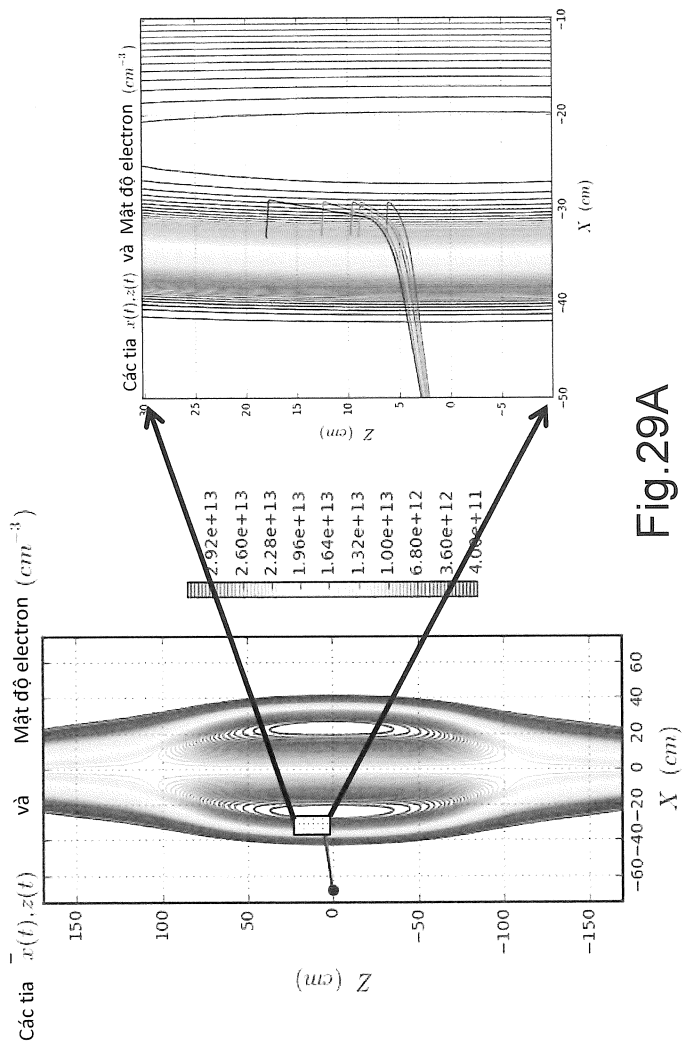


Fig.29C

Fig.29D

Fig.29E

Fig.29F

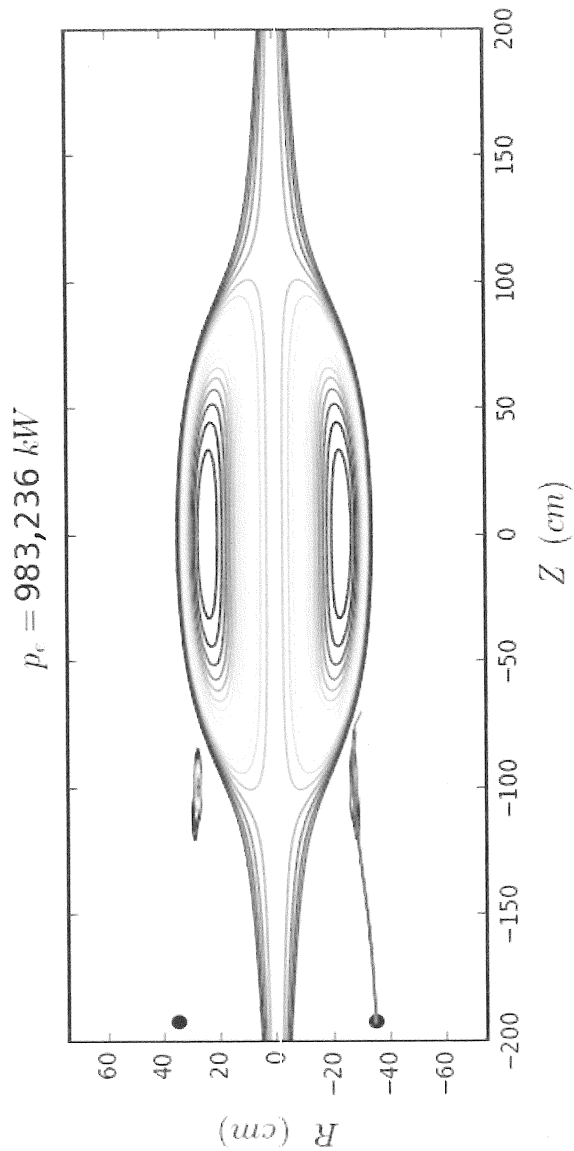


Fig.30A

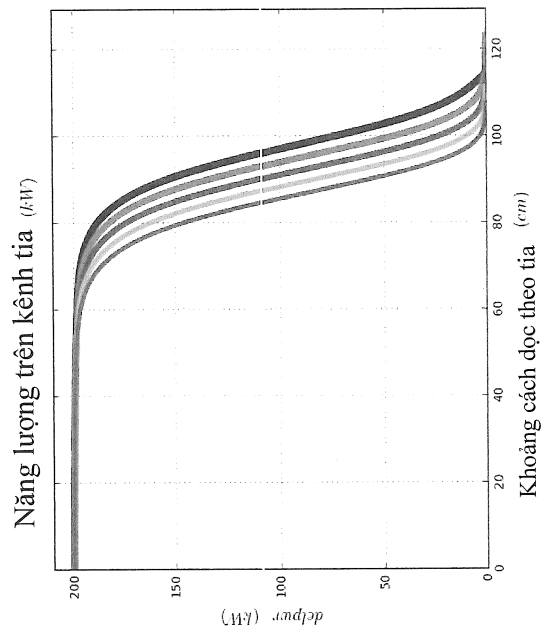


Fig.30B

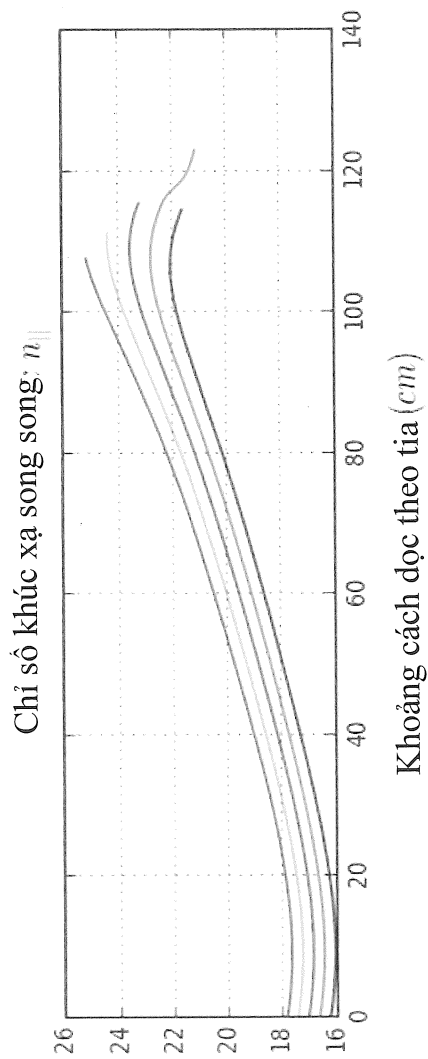


Fig.30C

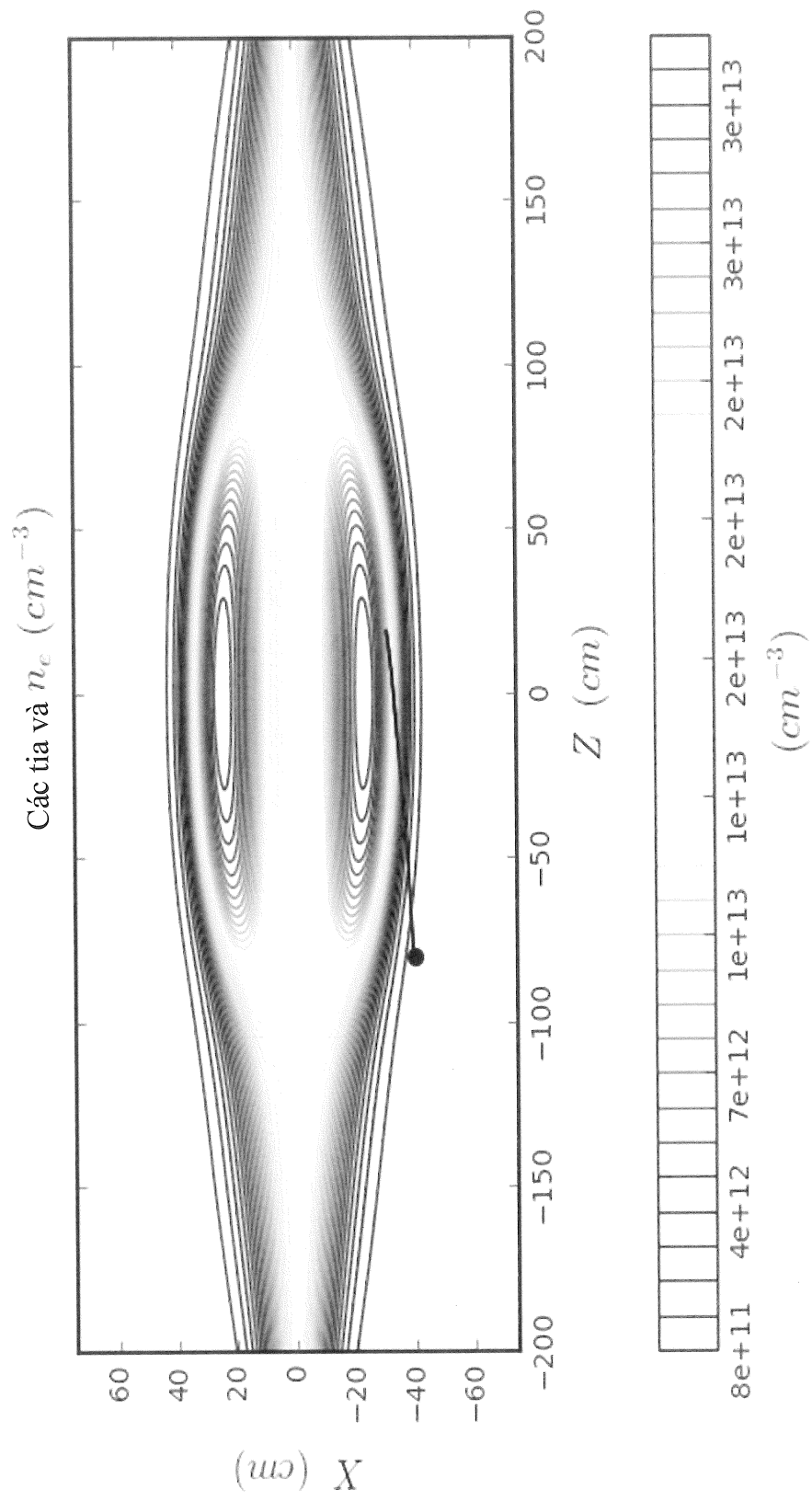


Fig.31

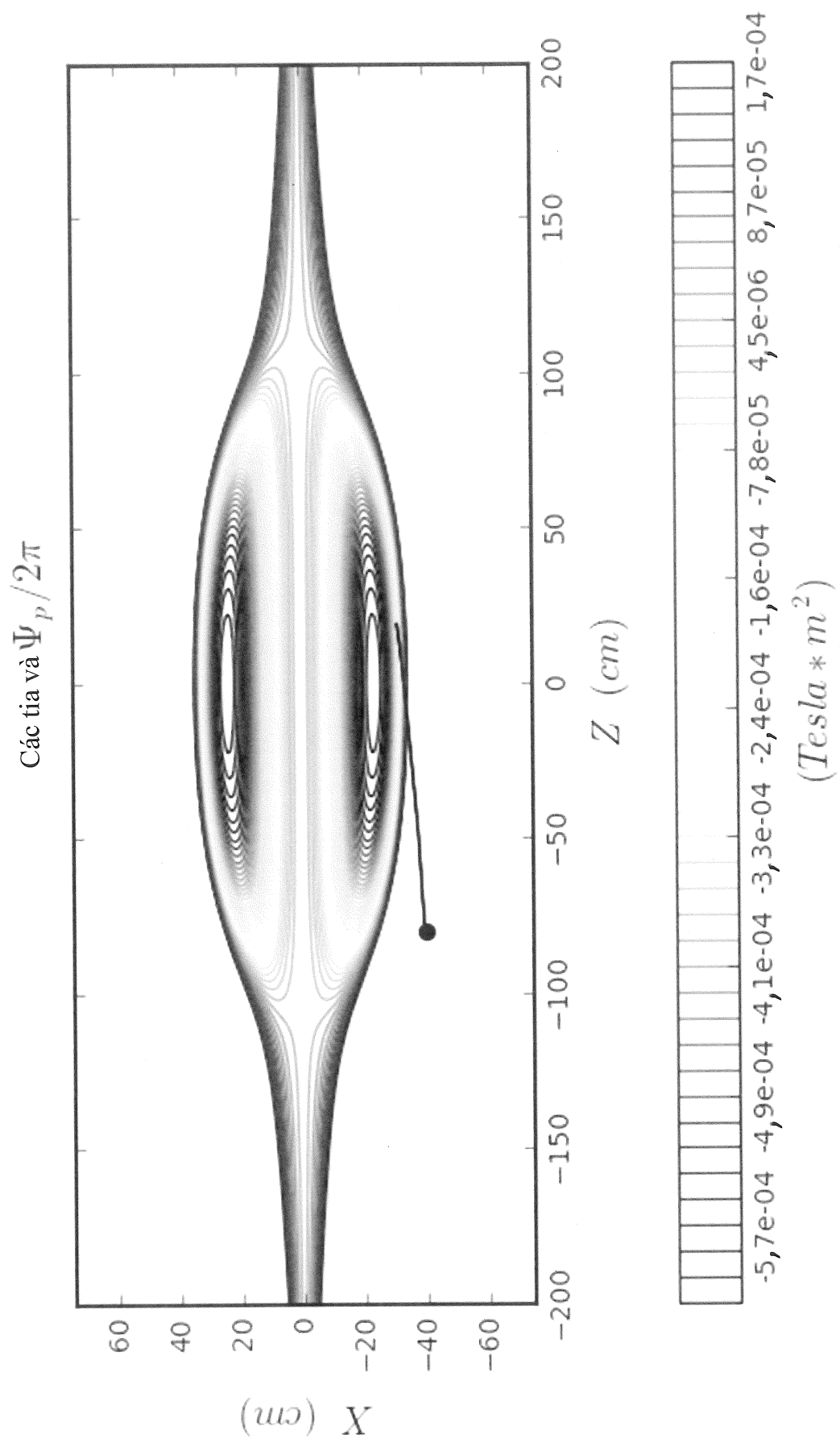


Fig.32

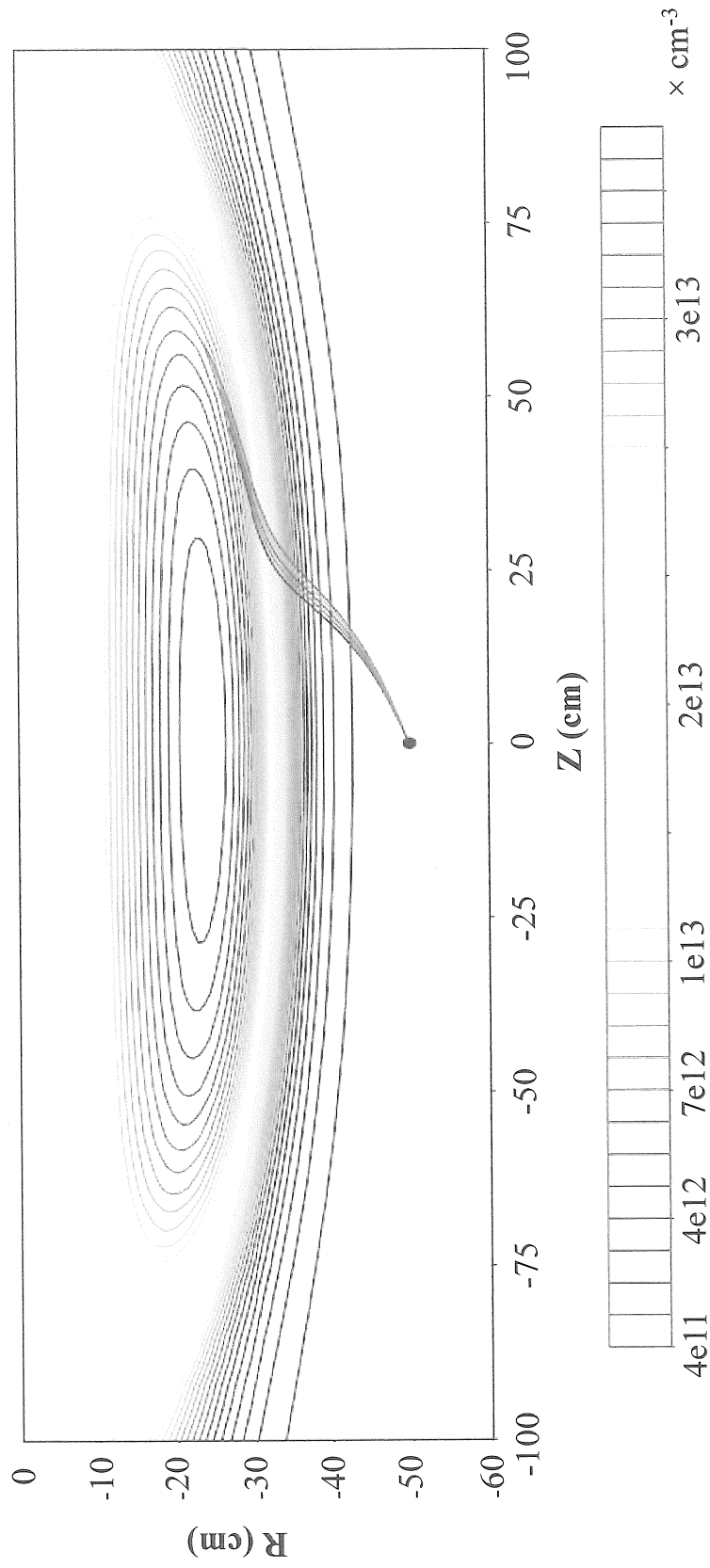


Fig.33

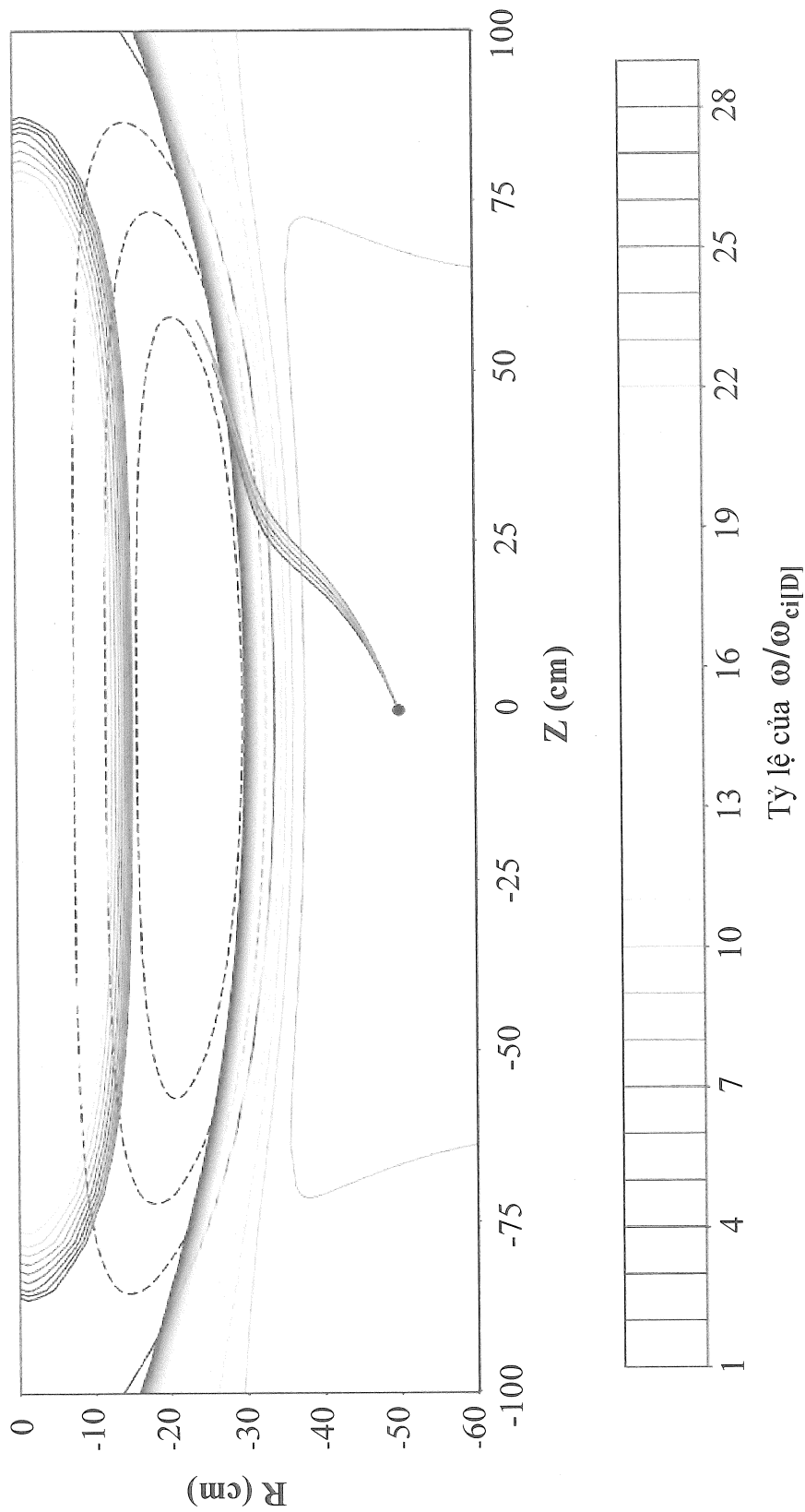


Fig.34

- Các mức $\omega/\omega_{ci[D]} > 28$ không được vẽ để làm rõ
- Các đường nét đứt trong khe là đường biên thông lượng từ

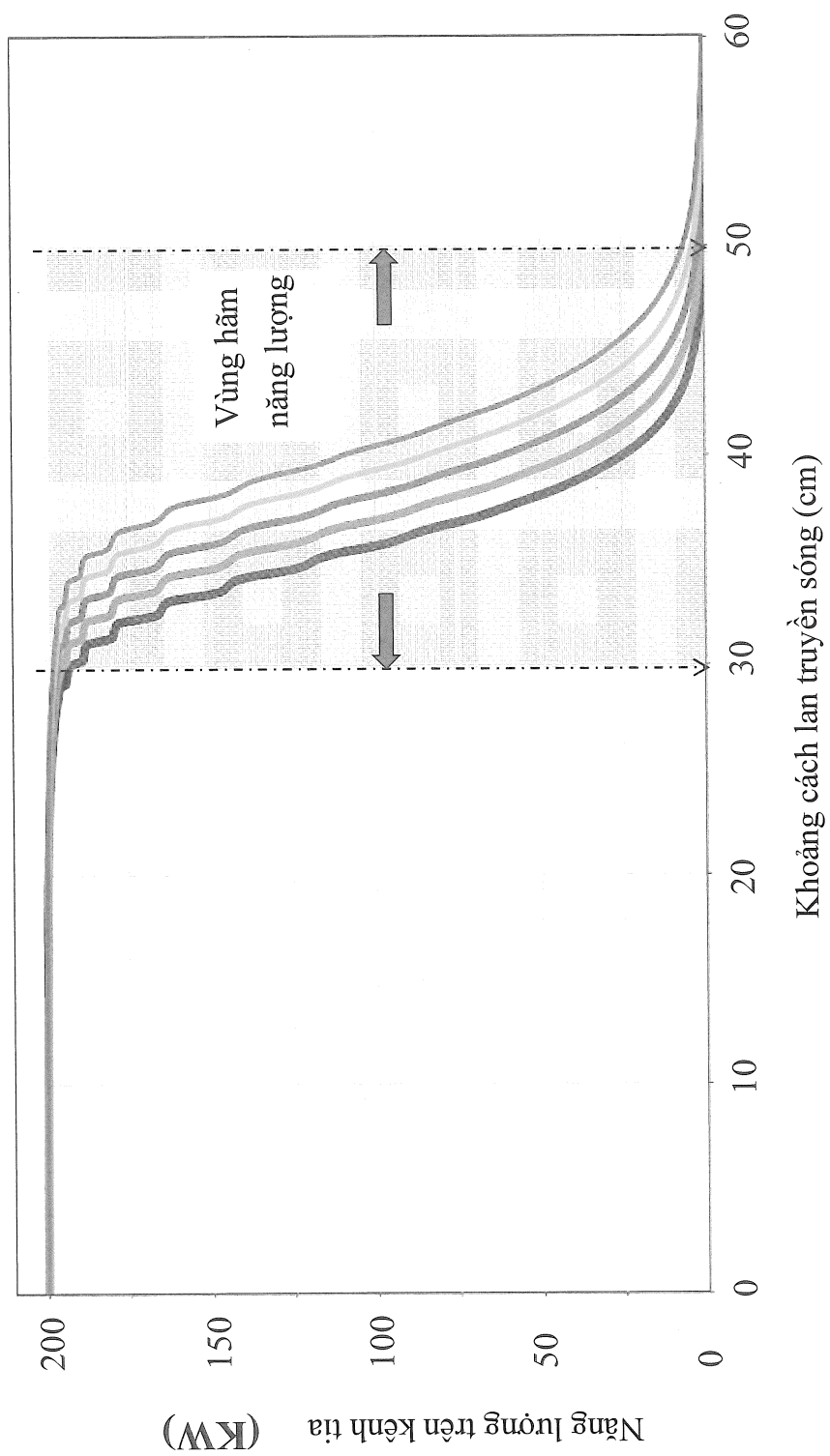


Fig.35

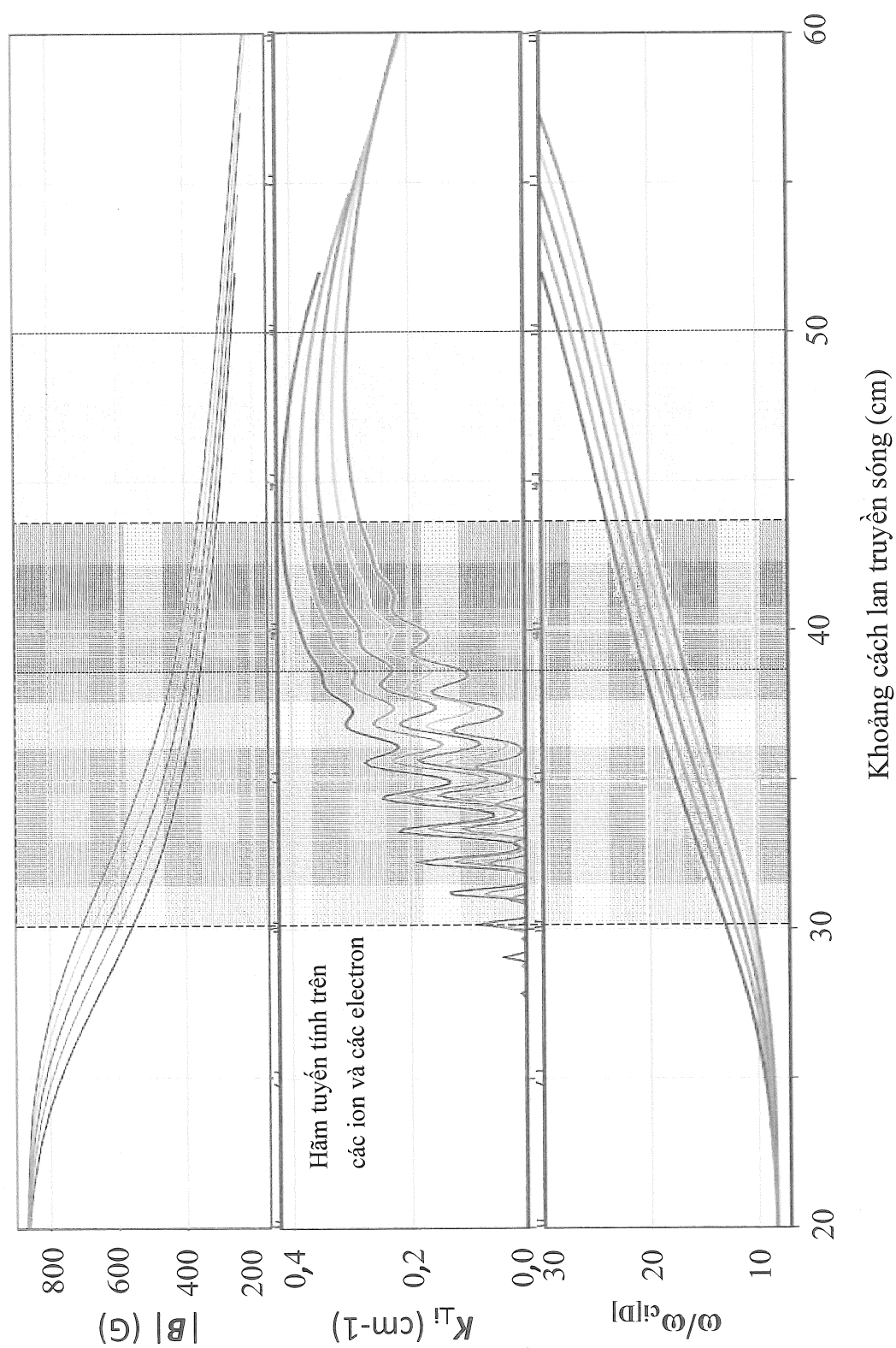


Fig.36

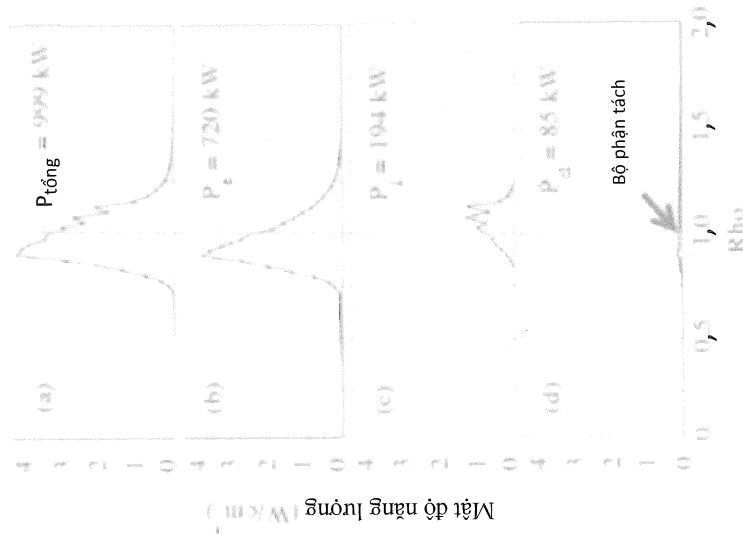


Fig.37B

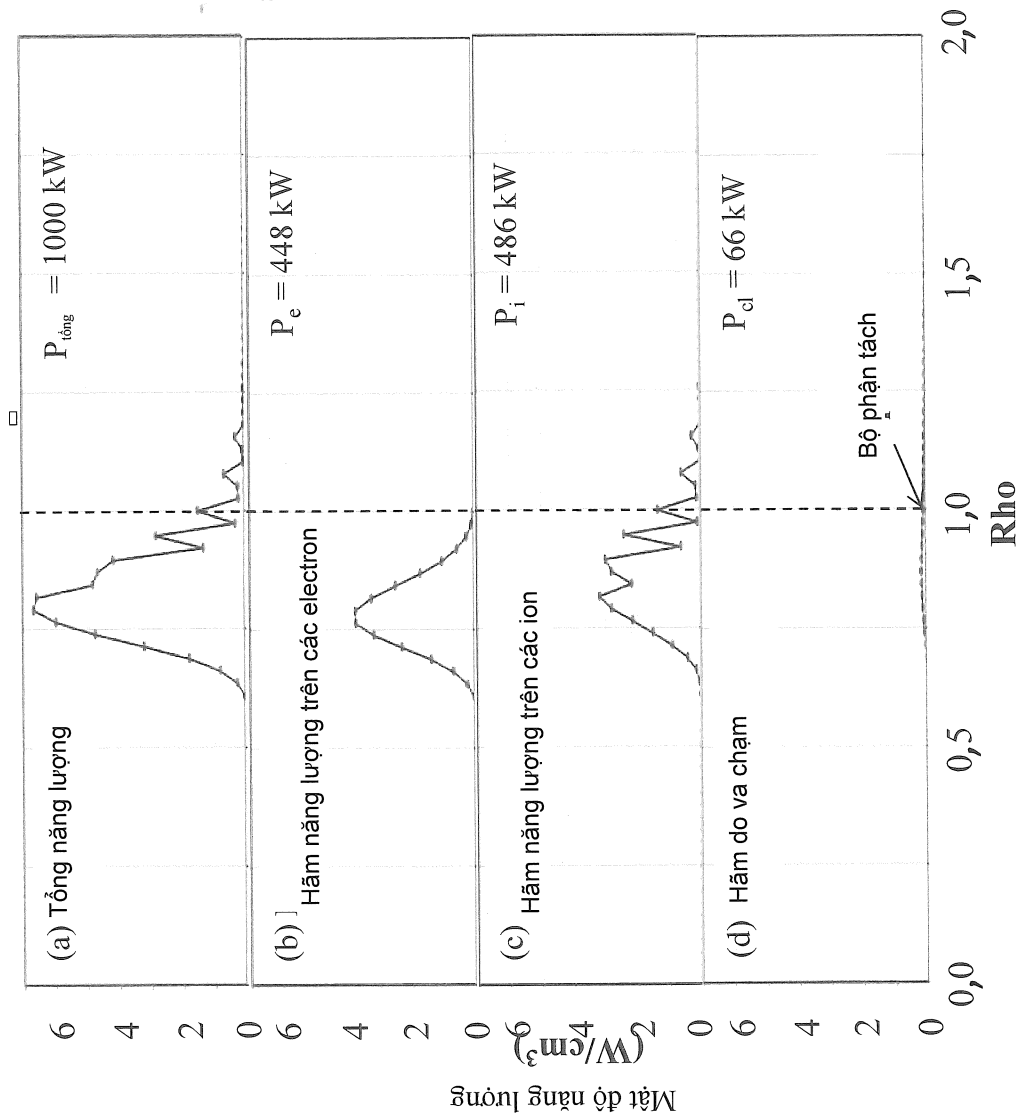


Fig.37A

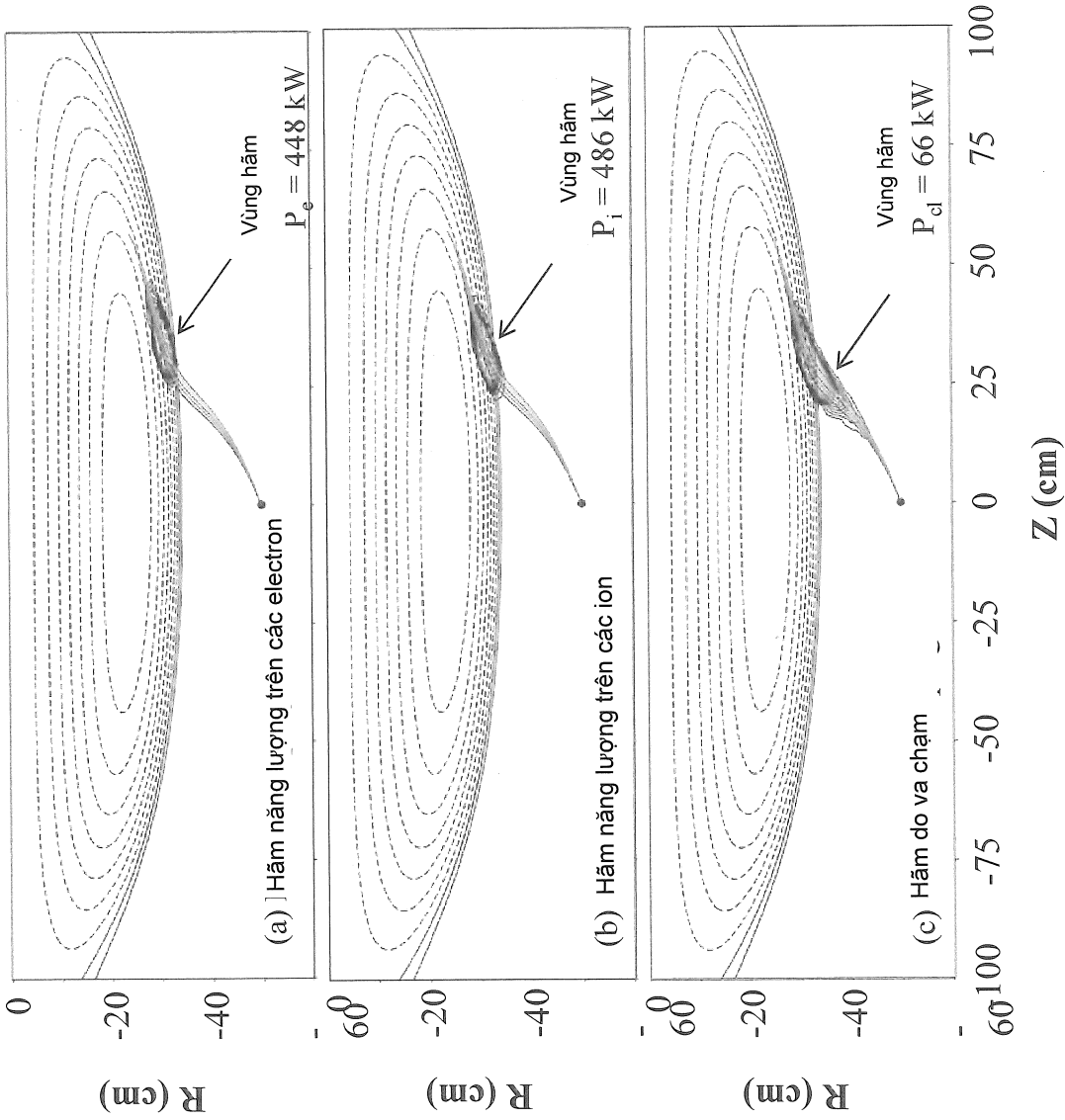


Fig.38

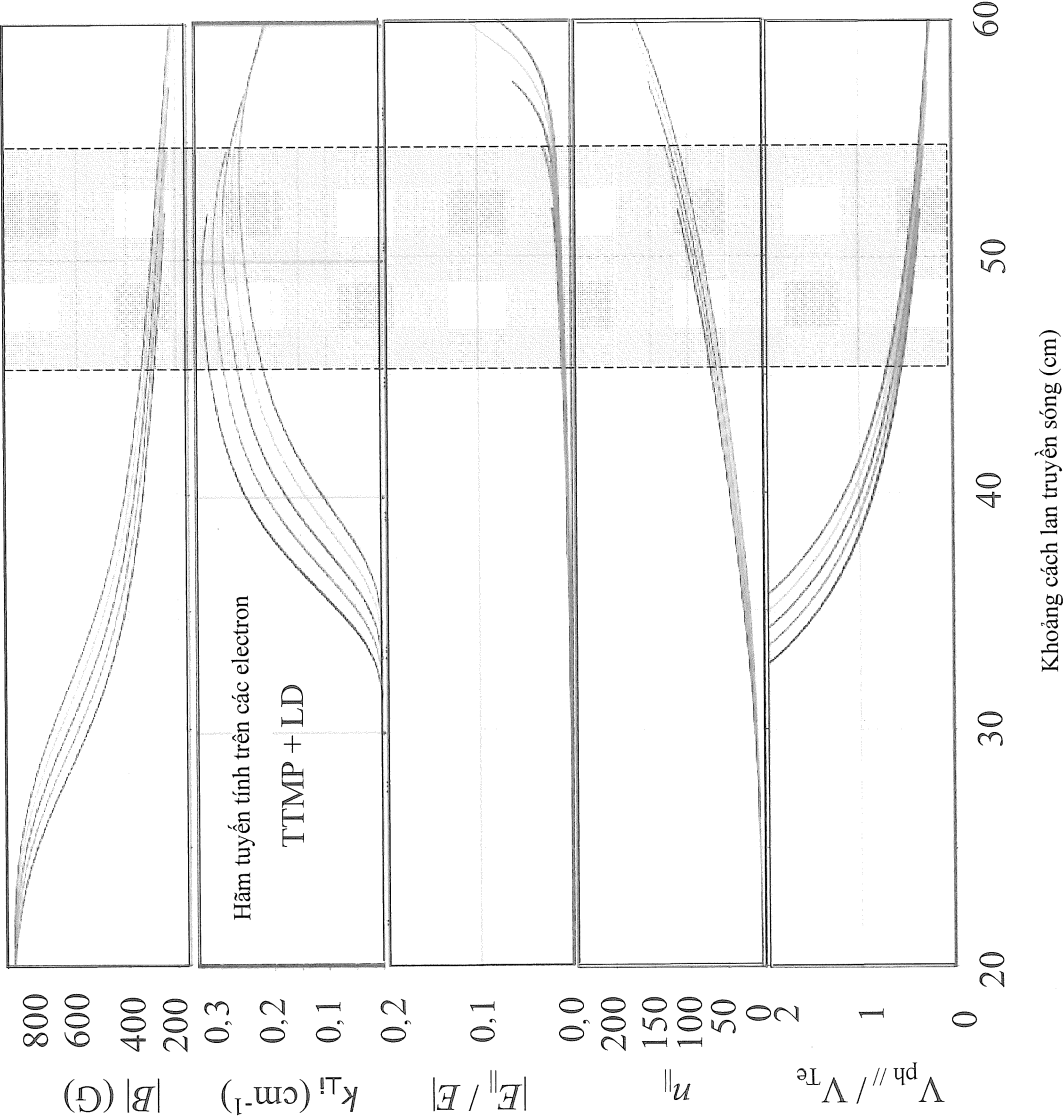


Fig.39

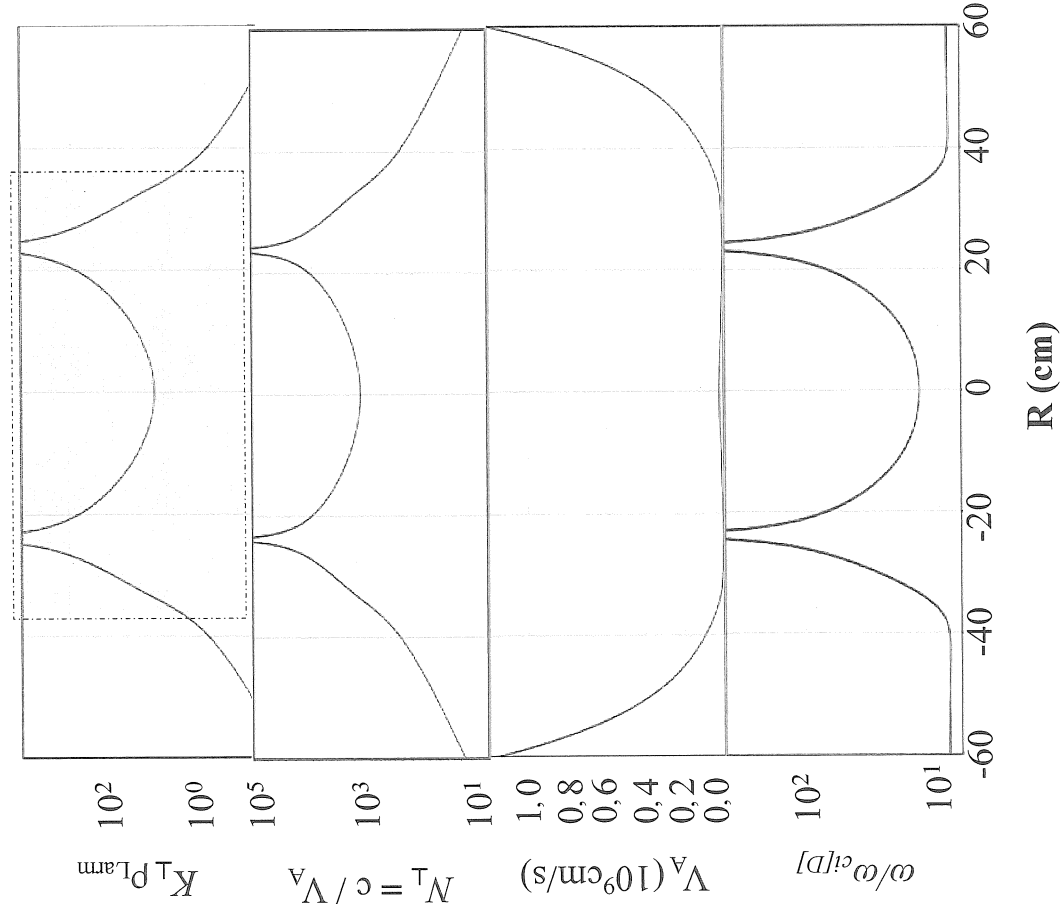


Fig.40

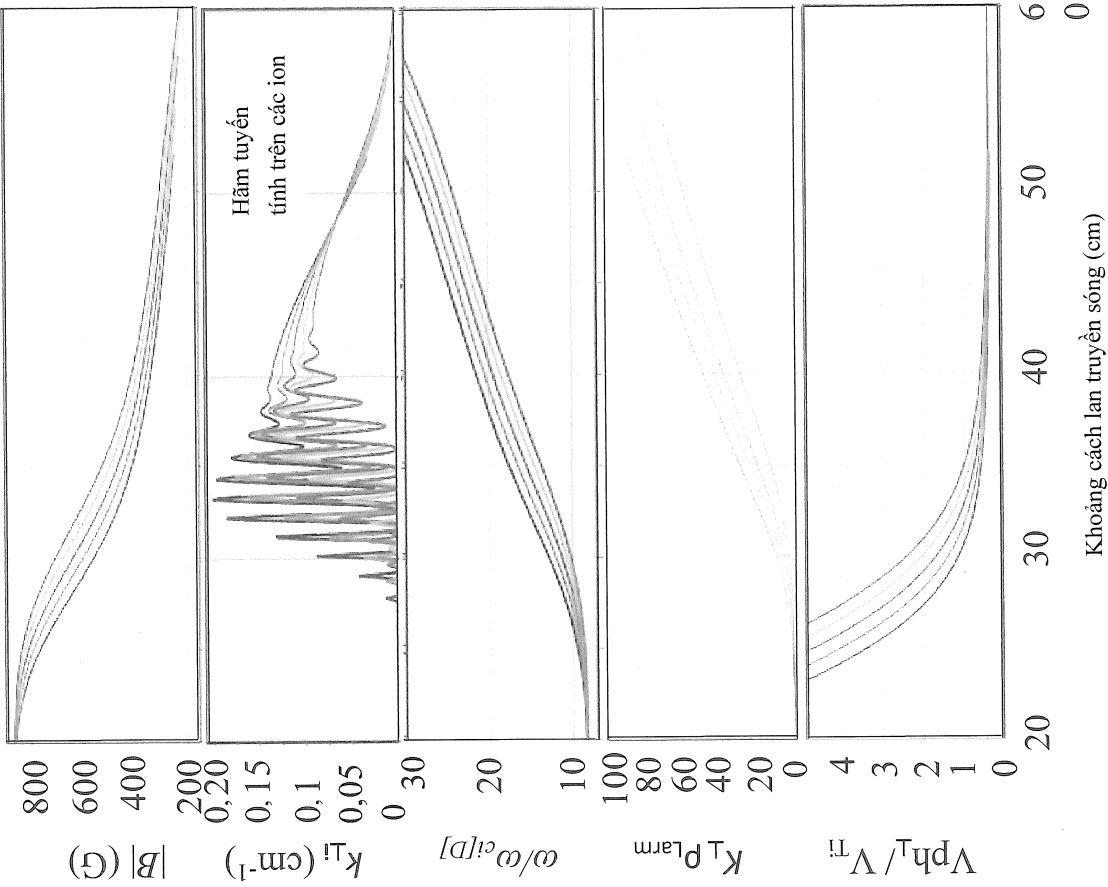
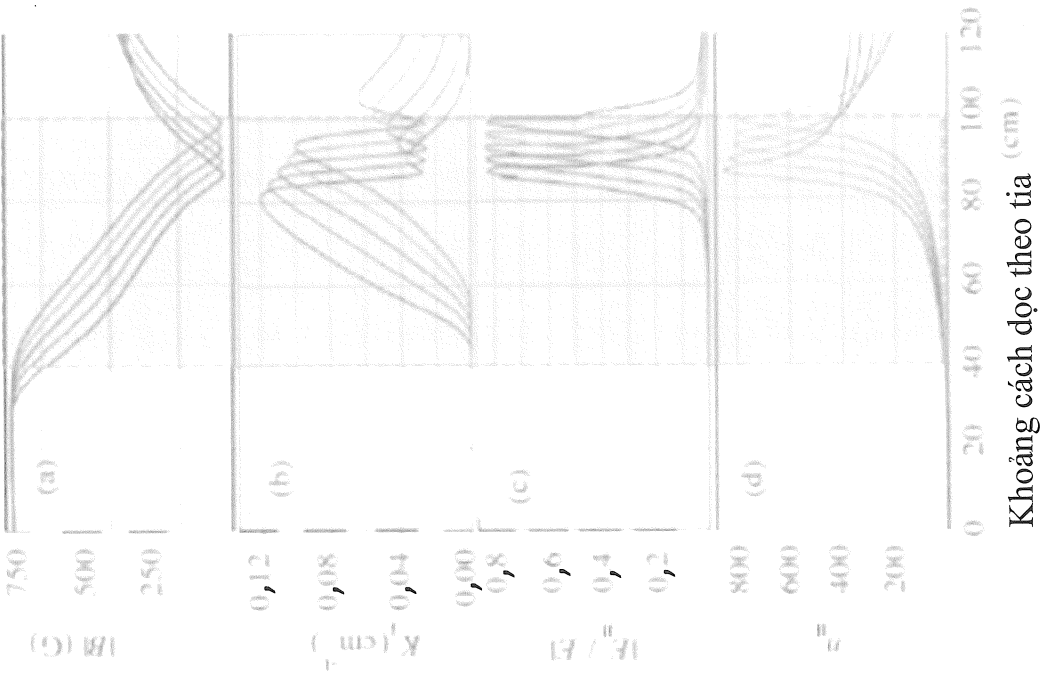


Fig.41



Khoảng cách dọc theo tia

Fig. 42