



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

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

(11)



1-0037015

(51)<sup>8</sup> G21B 1/15; G21B 1/05; G21B 1/11;  
H05H 1/16; G21B 1/19; H05H 1/10;  
G21B 1/00

(13) B

(21) 1-2019-02737

(22) 30/10/2017

(86) PCT/US2017/059067 30/10/2017

(87) WO2018/081724 03/05/2018

(30) 62/414,574 28/10/2016 US

(45) 25/09/2023 426

(43) 25/07/2019 376A

(73) TAE Technologies, Inc. (US)

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

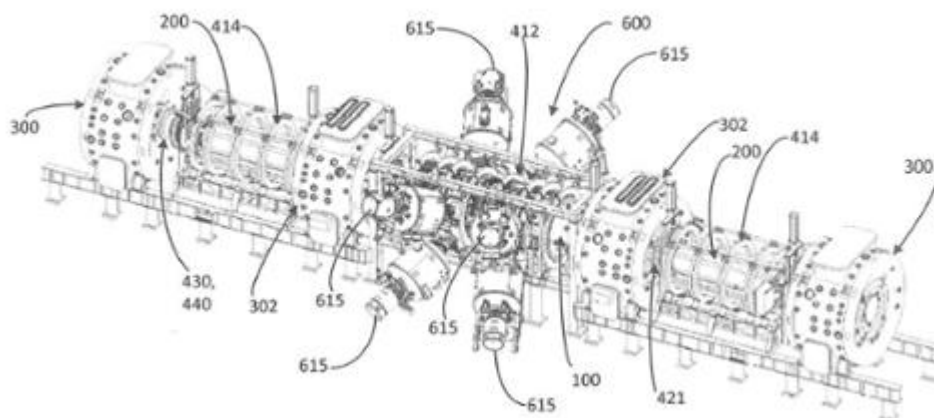
(72) DUNAEVSKY, Alexander (US); PUTVINSKI, Sergei (US); SMIRNOV, Artem N. (RU); BINDERBAUER, Michl W. (AT).

(74) Công ty Luật TNHH T&G (TGVN)

(54) PHƯƠNG PHÁP TẠO RA VÀ DUY TRÌ TỪ TRƯỜNG VỚI CẤU HÌNH ĐƯỢC ĐẢO TRƯỜNG

(57) Sáng chế đề cập đến các hệ thống và các phương pháp để tạo điều kiện thuận lợi cho việc tạo ra và duy trì các FRC (FRC: Field Reversed Configuration - cấu hình được đảo trường) với độ ổn định cũng như hạt, năng lượng và thông lượng giam giữ 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 hệ thống cao năng lượng và khả năng chống chịu tăng cường nhờ sử dụng các bộ phun chùm trung hòa với các khả năng năng lượng chùm điều hướng được.

10



### **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 trường (FRC: Field Reversed Configuration) 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 hạt, năng lượng và thông lượng giam giữ 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 khả năng chống chịu tăng cường nhờ sử dụng các bộ phun chùm trung hòa với các khả năng năng lượng chùm điều hướng được.

### **Tình trạng kỹ thuật của sáng chế**

Cấu hình được đảo 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). Nó thể hiện các từ trường có cực, trội và sở hữu các trường mạch hình xuyên tự tạo 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 làm lệch hướng không bị hạn chế tự nhiên để tạo thuận tiện cho việc trích năng lượng và loại bỏ tro, và  $\beta$  rất cao ( $\beta$  là tỉ lệ của áp suất plasma trung bình so với áp suất từ trường trung bình bên trong FRC), tức là có mật độ năng lượng cao.  $\beta$  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-He<sup>3</sup> và p-B<sup>11</sup>.

Phương pháp truyền thống để tạo thành FRC sử dụng công nghệ ghim  $\theta$  đảo trường, tạo ra các plasma nóng, có mật độ cao (xem A. L. Hoffman và 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 giữ. 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 dẫn dòng có thể được sử dụng như là việc phun chùm (trung hòa hoặc đã được trung hòa), các từ trường quay, gia nhiệt RF ômic, v.v. Việc tách của các chức năng nguồn và giam này đưa ra các ưu điểm kỹ thuật chủ yếu cho các lò phản ứng tổng hợp trong tương lai. Các FRC đã được chứng minh là đặc biệt mạnh mẽ, đàn hồi với biến dạng động, với sự dịch chuyển, và với các sự kiện bất giữ mạnh mẽ. 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, và 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 tạo thành FRC khác: dung hợp các spheromak với các thành phần xoắn ốc được hướng theo hướng đối lập (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 độ ổn định bổ sung.

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 lập của buồng giam giữ đồng thời tạo ra hai plasmoid và tăng tốc các plasmoid về phía nhau tại tốc độ cao; sau đó chúng va chạm tại trung tâm của buồng giam giữ và hợp nhất để tạo thành FRC hợp phần. 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 gồm có các hình xuyên của các đường trường đóng bên trong bộ phận tách, và của lớp cạnh hình khuyên trên các đường trường mở ngay bên ngoài bộ phận tách. Lớp cạnh kết tụ vào trong các luồng vượt quá chiều dài FRC, tạo ra bộ làm chệch hướng tự nhiên. Cấu trúc liên kết FRC trùng với cấu trúc liên kết của plasma gương đảo trường (Field-Reversed-Mirror). Tuy nhiên, khác biệt đáng kể là ở chỗ plasma có  $\beta$  khoảng 10. Từ trường bên trong thấp cổ hữu tạo ra cho phân bố

hạt động lực học cục bộ cụ thể, tức là các hạt với các bán kính Larmor lớn, khi so sánh 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 và chạm-hợp nhất.

Các thí nghiệm FRC thông thường trong quá khứ bị 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 xuyên tâm ra khỏi thể tích của bộ phận tách, và sau đó là tổn thất theo hướng dọc trục trong lớp cạnh. Do đó, việc nhốt 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  $\rho_{ie}$  thể hiện bán kính quay hồi chuyển ion, được nâng lên tại từ trường 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 xuyên tâm và hướng dọc trục tạo ra chiều dài độ nghiêng cho mật độ của bộ phận tách  $\delta \sim (D_{\perp}\tau_{\parallel})^{1/2}$ . Các thang thời gian giam giữ hạt FRC là  $(\tau_{\perp}\tau_{\parallel})^{1/2}$  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)).

Một nhược điểm khác của các thiết kế hệ thống FRC đã có là việc cần phải sử dụng các phân đa cực bên ngoài để điều khiển các bất ổn định quay như các bất ổn định trao đổi  $n=2$  phát triển nhanh. Theo cách này, các trường tứ cực thông thường được áp dụng từ bên ngoài tạo ra áp lực phục hồi từ tính cần thiết để làm suy giảm việc phát triển của các chế độ không ổn định này. Trong khi kỹ thuật này là tương ứng với việc điều khiển ổn định của plasma khối nhiệt, nó lại tạo ra nhiều vấn đề cho nhiều FRC động lực học hoặc cho các FRC lai cải tiến, trong đó phân bố hạt quỹ đạo lớn có động lực cao được kết hợp với plasma nhiệt thông thường. Trong các hệ thống này, các nhiễu loạn của từ trường đối xứng theo trục do các trường đa cực này dẫn tới các tổn thất hạt rất nhanh do khuếch tán ngẫu nhiên không va chạm, là hậu quả của việc mất mát của việc bảo toàn của động lượng góc chính tắc. Giải pháp sáng tạo



tạo ra khả năng điều khiển ổn định mà không tăng cường việc phân tán của các hạt bất kỳ và do đó quan trọng là đạt được lợi thế của việc có khả năng đạt hiệu suất cao hơn cho các ý tưởng FRC cải tiến chưa được phát hiện trước đó.

Xem xét tình trạng kỹ thuật nêu trên, do đó có mong muốn cải thiện khả năng chống chịu của các FRC để sử dụng các FRC có trạng thái ổn định với các năng lượng hệ thống được nâng cao như đường dẫn đến tâm lò phản ứng trong phản ứng tổng hợp hạt nhân nhẹ để tạo ra năng lượng 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 hạt, năng lượng và thông lượng giam giữ 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 khả năng chống chịu tăng cường nhờ sử dụng các bộ phun chùm trung hòa với các khả năng năng lượng chùm điều hướng được. Theo một phương án thực hiện của sáng chế, phương pháp để tạo ra và duy trì trường từ có cấu hình được đảo trường (FRC) bao gồm bước tạo ra FRC quanh plasma trong buồng giam giữ, và phun các chùm trung hòa vào trong plasma FRC trong khi điều hướng các năng lượng chùm của các chùm trung hòa giữa năng lượng chùm thứ nhất và năng lượng chùm thứ hai, trong đó năng lượng chùm thứ hai khác với năng lượng chùm thứ nhất.

Theo phương án thực hiện khác của sáng chế, các chùm trung hòa chuyển đổi giữa các năng lượng thứ nhất và thứ hai trong toàn bộ quá trình bắn phá.

Theo phương án thực hiện khác của sáng chế, phương pháp bao gồm bước điều chỉnh các năng lượng chùm của các chùm trung hòa để điều chỉnh profin định vị công suất chùm theo hướng xuyên tâm để điều chỉnh trị số chênh lệch áp suất.

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 plasma đến khoảng trên 1,0 keV bằng cách phun các chùm của các nguyên tử trung

hòa nhanh từ các bộ phun chùm trung hòa vào trong plasma FRC tại một góc về phía giữa qua mặt phẳng của buồng giam giữ.

Theo phương án thực hiện khác của sáng chế, phương pháp còn bao gồm bước phun plasmas cuộn dây hình xuyên nhỏ gọn (CT) từ các bộ phun CT thứ nhất và thứ hai vào 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 xuyên tâm ở các mặt đối lập 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 trường (FRC) bao gồm: buồng giam giữ; các vùng tạo thành FRC thứ nhất và thứ hai đối lập nhau theo hướng xuyên tâm ghép với các bộ làm chệch hướng bên trong thứ nhất và thứ hai đối lập nhau theo hướng xuyên tâm; các bộ làm chệch hướng thứ nhất và thứ hai mà được nối với các vùng tạo thành thứ nhất và thứ hai; một hoặc nhiều súng trong số các súng plasma, một hoặc nhiều điện cực định thiên 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 làm chệch hướng thứ nhất và thứ hai, các vùng tạo thành thứ nhất và thứ hai và buồng giam giữ, trong đó một hoặc nhiều điện cực định thiên được định vị bên trong một hoặc nhiều buồng giam giữ, các vùng tạo thành thứ nhất và thứ hai, và các bộ làm chệch 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 tạo thành thứ nhất và thứ hai và các bộ làm chệch hướng thứ nhất và thứ hai; hệ thống chuyển đổi được ghép với buồng giam giữ và các bộ làm chệch hướng thứ nhất và thứ hai; các bộ phun chùm nguyên tử trung hòa được ghép với buồng giam giữ và có góc về phía mặt phẳng giữa của buồng giam giữ, trong đó một hoặc nhiều bộ trong số các bộ phun chùm nguyên tử trung hòa điều hướng được giữa năng lượng chùm thứ nhất và năng lượng chùm thứ hai, trong đó năng lượng chùm thứ hai khác với năng lượng chùm thứ nhất; và hệ thống từ bao gồm các cuộn dây gần như là dòng điện một chiều (quasi-dc) được định vị quanh buồng giam giữ, các vùng tạo thành thứ nhất và thứ hai, và các bộ làm chệch hướng thứ nhất và thứ hai, và tập hợp các cuộn dây gương gần như là dòng điện một

chiều thứ nhất và thứ hai được định vị giữa các vùng tạo thành thứ nhất và thứ hai và các bộ làm chệch hướng thứ nhất và thứ hai.

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 với buồng giam giữ ở 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 xuyên tâm ở các mặt đối lập 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 tắc 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 bố trí cơ bản của hệ thống FRC theo sáng chế khi được nhìn từ trên xuống, bao gồm của bố trí được ưu tiên của bình giam giữ trung tâm, bộ phận tạo thành, các bộ làm chệch hướng, các chùm trung hòa, các điện cực, các súng plasma, các chốt cấm gương và bộ 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 sắp xếp 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 tạo thành, các bộ làm chệch 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 buồng 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 tạo thành.

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

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

Fig.7 minh họa hình dạng cụ thể cắt riêng phần 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 cụ thể cắt riêng phần của cụm thiết bị được ưu tiên của các hệ thống khử khí Ti và Li.

Fig.10 minh họa hình dạng cụ thể cắt riêng phần của súng plasma được lắp đặt trong buồng bộ làm chệch hướng. Cũng được thể hiện trên đó là chốt cấm gương từ tính được kết hợp và cụm điện cực làm chệch hướng.

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

Fig.12 minh họa việc 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 tạo thành ghim theta đảo trường và các đầu dò từ được gắn bên trong buồng giam giữ kim loại trung tâm. Thời gian được đo từ thời điểm được đảo trường được đồng bộ trong các nguồn tạo thành, và khoảng cách z được cho là so với mặt phẳng giữa theo trục của máy.

Fig.13A, Fig.13B, Fig.13C và Fig.13D minh họa dữ liệu từ biểu diễn phi HPF, việc xả không được duy trì trên hệ thống FRC theo sáng chế. Các hàm của thời gian được thể hiện là (a) bán kính thông lượng bị loại trừ tại mặt phẳng giữa, (b) 6 cung của mật độ được tích hợp đường từ mặt phẳng giữa giao thoa kế CO<sub>2</sub>, (c) các biên dạng theo hướng xuyên tâm của mật độ đảo Abel từ dữ liệu giao thoa kế CO<sub>2</sub>, và (d) tổng nhiệt độ plasma từ cân bằng áp suất.

Fig.14 minh họa các lược tả 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 cụ thể 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 vào. 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 duy trì 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 cung của mật độ được tích hợp đường từ mặt phẳng giữa giao thoa kế CO<sub>2</sub>, (Fig.18C) các biên dạng theo hướng xuyên tâm của mật độ đảo

Abel từ dữ liệu giao thoa kế CO<sub>2</sub>, 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 điện tử (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 chùm trung hòa được phun có góc và tuổi sống của các thông số plasma FRC gồm 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 sơ đồ đơn giản của bộ phun cuộn dây hình xuyên nhỏ gọn (compact toroid - CT);

Fig.23A và Fig.23B minh họa bề nhốt trung tâm thể hiện bộ phun CT được gắn vào đó;

Fig.24A và Fig.24B minh họa sơ đồ đơn giản của phương án thực hiện thay thế của bộ phun CT có ống trôi dạt được gắn vào đó;

Fig.25 là hình vẽ mặt cắt đẳng cự thể hiện hệ chùm trung hòa và các thành phần chính cho chùm ra có năng lượng điều hướng được;

Fig.26 là hình vẽ dạng sơ đồ thể hiện hệ chùm trung hòa với chùm ra có năng lượng điều hướng được;

Fig.27 là hình vẽ dạng sơ đồ thể hiện cơ chế điều khiển vị trí dọc trục của plasma FRC bên trong buồng giam giữ (CV: confining vessel);

Fig.28 là sơ đồ dạng lưu đồ thể hiện lược đồ điều khiển chế độ trượt chung;

Fig.29 là đồ thị tổng hợp của các ví dụ về mô phỏng sự điều khiển vị trí dọc trục chế độ trượt; và

Fig.30 là đồ thị tổng hợp của các ví dụ về mô phỏng sự điều khiển vị trí dọc trục chế độ trượt.

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 các phương pháp tạo thuận tiện cho việc tạo thành và duy trì các cấu hình được đảo trường (Field Reversed Configuration - FRC) hiệu suất cao với độ ổn định vượt trội cũng như với khả năng giam giữ hạt, năng lượng, 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 khả năng chống chịu tăng cường nhờ sử dụng các bộ phun chùm trung hòa với các khả năng năng lượng chùm điều hướng được. Một số phương án thực hiện trong số các phương án thực hiện sáng chế cũng liên quan đến các hệ thống và phương pháp mà tạo điều kiện thuận lợi cho độ ổn định của plasma FRC theo cả hướng xuyên tâm và hướng dọc trục và sự điều khiển vị trí dọc trục của plasma FRC dọc theo đường trục đối xứng của buồng giam giữ plasma FRC độc lập với các đặc tính ổn định dọc trục của trạng thái cân bằng của plasma FRC.

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 của các nhóm của các thực thể bộc lộ mọi trị số trung gian có thể hoặc thực thể trung gian cho mục đích của phần bộc lộ 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 mà tạo điều kiện thuận lợi cho độ ổn định của plasma FRC theo cả hướng xuyên tâm và hướng dọc trục và sự điều khiển vị trí dọc trục của plasma FRC dọc theo đường trục đối xứng của buồng giam giữ 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 được đưa ra. 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, 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 các Fig.2 và Fig.3), vận hành theo chế độ FRC hiệu suất cao (High Performance FRC - 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 bổc 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*

Các hình vẽ 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 tạo thành ghim theta được đảo trường đối lập theo hướng đường kính 200 và, vượt quá các vùng tạo thành 200, là hai buồng làm chệch 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  $133,32 \times 10^{-8}$  Pa ( $10^{-8}$  torr). Các áp suất chân không này yêu cầu việc sử dụng các vành mép 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 vật lý và hóa học và tiếp tục bởi việc nung chân không trong 24 giờ ở nhiệt độ  $250^{\circ}\text{C}$  và việc làm sạch phóng điện chớp sáng Hydro.

Các vùng tạo thành ghim theta được đảo trường 200 là các ghim theta được đảo trường tiêu chuẩn (field-reversed-theta-pinche - FRTP), thậm chí là với hệ thống tạo 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 tạo thành 200 được tạo thành từ các ống thạch anh cấp độ công nghiệp, mờ đục tiêu chuẩn có lớp lót bên trong dày 2 milimet là thạch anh siêu tinh khiết. Buồng giam giữ 100 được tạo thành từ thép không gỉ để cho phép tạo nhiều cổng theo hướng xuyên tâm và hướng tiếp tuyến; nó cũng phục vụ như là 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 nằm trong hệ thống FRC 10 với bộ các bơm thô cuộn 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, trong các đặc điểm khác, minh họa thông lượng từ FRC và các đường viền mật độ (như là các hàm của các tọa độ theo bán kính và theo trục) thuộc về FRC 450 là có thể sản xuất được bởi hệ thống FRC 10. Các đường viền 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 mở 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 làm chệch hướng tự nhiên.

Hệ thống từ tính chính 410 bao gồm nhiều chuỗi của các cuộn dây gần như là dòng điện một chiều 412, 414, và 416 nằm tại các vị trí theo hướng dọc trục cụ thể dọc theo các thành phần, tức là dọc theo buồng giam giữ 100, các vùng tạo thành 200 và các bộ làm chệch hướng 300, của hệ thống FRC 10. Các cuộn dây gần như là dòng điện một chiều 412, 414 và 416 được nạp bởi các nguồn cấp công suất chuyển mạch gần như là dòng điện một chiều và tạo ra các trường dịch chuyển từ cơ bản khoảng 0,1T trong buồng giam giữ 100, các vùng tạo thành 200 và các bộ làm chệch hướng 300. Bên cạnh các cuộn dây gần như là dòng điện một chiều 412, 414 và 416, hệ thống từ tính chính 410 bao gồm các cuộn dây gương gần như là dòng điện một chiều 420 (được nạp bởi các nguồn cấp chuyển mạch) giữa hoặc là đầu cuối của buồng giam giữ 100 hoặc là các vùng tạo thành liên kề 200. Các cuộn dây gương gần như là dòng điện một chiều 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 tạo thành 200 và các bộ làm chệch hướng 300. Các chốt cấm gương 440 bao gồm các cuộn dây gương

gần như là dòng điện một chiều nhỏ gọn 430 và các cuộn dây chốt cắm gương 444. Các cuộn dây gương gần như là dòng điện một chiều 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 chốt cắm gương 444. Các cuộn dây chốt 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 bố trí cuộn dây này là để bó chặt và dẫn hướng các bề mặt thông lượng từ 455 và các luồng phun tạo luồng cuối 454 vào trong các buồng từ xa 310 của các bộ làm chệch hướng 300. Cuối cùng, bộ “các ăng ten” 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 dòng điện một chiều. Các ăng ten cuộn dây hình yên ngựa 460 có thể được định cấu hình để tạo ra trường lưỡng cực hoặc tứ cực từ tính giống như tĩnh có độ lớn khoảng 0,01T để điều khiển các độ bất ổn định quay và/hoặc điều khiển dòng điện tử. Các ăng ten 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 tạo thành công suất được tạo xung*

Các hệ thống tạo thành có công suất được tạo xung 210 vận hành trên nguyên tắc ghim theta được biến đổi. Có hai hệ thống mà mỗi hệ thống cấp năng lượng cho một vùng trong các vùng tạo thành 200. Các hình vẽ Fig.4 tới Fig.6 minh họa các khối xây dựng chính và bố trí của các hệ thống tạo thành 210. Hệ thống tạo 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 bản giằng 230 (=các bản giằng) bọc quanh các ống thạch anh tạo thành 240. Mỗi bộ phận chèn 220 được tạo thành từ các tụ 221, các bộ phận cảm ứng 223, bộ ngắt mạch dòng cao, nhanh 225 và bộ kích hoạt được kết hợp 222 và mạch kết xuất 224. Tổng lại, mỗi hệ thống tạo 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 tạo thành 210 trên từng vùng tạo 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 tạo thành tĩnh) hoặc được tạo thành và được tăng tốc đồng thời (=việc tạo thành động lực).

#### *Các bộ 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 dẫn dòng cũng như để phát triển áp suất hạt nhanh. Như được thể hiện trên Fig.3A, Fig.3B và Fig.8, các đường chùm riêng rẽ bao gồm các hệ thống phun chùm nguyên tử trung hòa 610 và 640 được định vị bao quanh buồng giam giữ trung tâm 100 và phun các hạt nhanh theo tiếp tuyến với plasma FRC (và vuông góc hoặc tại góc pháp tuyến với trục đối xứng chính trong bình giam giữ trung tâm 100) với thông số tác động sao cho vùng bắn đích nằm 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 vào trong plasma FRC với các năng lượng hạt giữa 20keV và 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 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 kết xuất 628 được định vị giữa bộ phận làm trung hòa 622 và thiết bị ngắt 630 tại đầu cuối ra. Hệ thống làm mát bao gồm hai thiết bị làm lạnh 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 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  $90^\circ$  so với trục đối xứng chính trong bình giam giữ trung tâm 100. Các loại định hướng này của các bộ phun chùm 615 được thể hiện trên Fig.3C. Ngoài ra, các bộ phun chùm 615 có thể được định hướng sao cho các bộ 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 dọc 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 phun chùm 615 cho phép điều khiển trực tiếp và độc lập hơn cho việc mở rộng 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 dọc trục nhưng lại nóng hơn. Theo cách này, góc phun A và vị trí của các bộ 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 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 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 dọc trục gần với mặt phẳng giữa sẽ cải thiện việc ghép chùm-plasma, thậm chí khi plasma FRC bị co rút hoặc theo cách khác co lại theo hướng dọc 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 làm chệch hướng bên trong 302 ngoài các bộ phun chùm có góc 615. Các bộ làm chệch hướng bên trong 302 được định vị giữa các vùng tạo thành 200 và buồng giam giữ 100, và được tạo kết cấu và hoạt động hầu như tương tự với các bộ làm chệch hướng bên ngoài 300. Các bộ làm chệch 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 tạo thành để cho phép các FRC tạo thành đi qua các bộ làm chệch hướng bên trong 302 khi các FRC tạo thành tịnh tiến về phía mặt phẳng giữa của buồng giam giữ 100. Ngay khi các FRC tạo thành đi qua các bộ làm chệch hướng bên trong 302 vào trong buồng giam giữ 100, các bộ làm chệch hướng bên trong được kích hoạt để hoạt động hầu như giống với các bộ làm chệch hướng bên ngoài và cách ly buồng giam giữ 100 khỏi các vùng tạo thành 200.

#### *Các bộ phun hạt*

Để tạo ra các phương tiện để phun các hạt mới và điều khiển tốt hơn tồn trữ hạt FRC, bộ phun hạt 12 bình 700 (xem, ví dụ, I. Vinyar et al., “Pellet Injectors Developed at PELIN for JET, TAE, và HL-2A,” Proceedings của 26th Fusion Science và 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 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 150–250 km/giây. Mỗi hạt riêng rẽ chứa khoảng  $5 \times 10^{19}$  nguyên tử hydro, là có thể so sánh được với tồn trữ hạt FRC.

#### *Các hệ thống khử khí*

Đã biết tới rộng rãi rằng khí quang sáng trung hòa là vấn đề nghiêm trọng trong các hệ thống giam. 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 cắt ngắn 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 tích lũy titan và lithi 810 và 820 phủ các bề mặt đối lập với plasma của buồng giam giữ (hoặc bình) 100 và các bộ làm chệch 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  $600^{\circ}\text{C}$  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 tích lũy 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 giam giữ DC 412, tạo thành 414 và làm chệch 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 gần như là dòng điện một chiều nhỏ gọn 432, 434 và 436, được định vị giữa các vùng tạo thành 200 và các bộ làm chệch 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 thất 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 miligiây (ms) tới 20 miligiây). Các cuộn dây được tạo xung gương nhỏ gọn nhất 444 là các kích cỡ theo hướng xuyên tâm 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 nhân 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 tạo luồng cuối 454 vào trong các buồng làm chệch hướng từ xa 300. Nó đảm bảo rằng các hạt tải đặt tới được các bộ làm chệch hướng 300 một cách thích hợp và có các bề mặt thông lượng liên tục 455 mà đi từ vùng đường trường mở 452 của FRC trung tâm 450 đến hết đường tới các bộ làm chệch hướng 300. (2) Các phần thất 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 chảy từ các súng plasma 350 nằm trong các bộ làm chệch hướng 300. Theo cùng một mạch, các phần thất vào 442 hạn chế việc tạo dòng ngược lại của khí từ các vùng tạo thành 200 tới các bộ làm chệch 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 dọc trục mạnh mẽ được tạo ra bởi các cuộn dây 432, 434, 436 và 444 làm giảm tổn thất hạt theo hướng dọc trục và nhờ đó làm giảm tính khuếch tán hạt song song trên các đường trường mở.

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 làm chệch hướng bên trong 302 và các vùng tạo thành 200.



### *Các súng plasma theo trục*

Các luồng plasma từ các súng 350 được gắn trong các buồng làm lệch hướng 310 của các bộ làm lệch 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 làm lệch 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 làm lệch 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 chòng đệm và được thiết kế để tạo ra plasma được ion hóa hoàn toàn cỡ vài kiloampe từ 5 miligiây tới 10 miligiây. 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 cảm gương 440 và chảy vào trong vùng tạo thành 200 và buồng giam giữ 100. Hiệu quả của việc chuyển plasma qua chốt cảm 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/giây qua các chốt cảm gương 440 từ 2 T tới 4 T với các nhiệt độ ion và điện tử 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 làm lệch hướng 300 bên cạnh các chốt cảm gương 440 cải thiện việc nạp lại nhiên liệu của FRC lớp cạnh 456, việc tạo 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 trôi*

Thế hiệu dịch điện của các bề mặt thông lượng mở có thể tạo ra các thế theo hướng xuyên tâm 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 mở 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 trôi được định vị tại các vị trí được ưu tiên nằm trong hệ thống FRC 10.

Nói chung, có 4 loại điện cực: (1) các điện cực điểm 905 trong buồng giam giữ 100 tạo tiếp xúc với các đường trường mở 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 tạo thành 200 để nạp cho các lớp thông lượng xa cạnh 456 theo cách đối xứng theo phương vị, (3) các chồng của các điện cực đồng tâm 910 trong các bộ làm chệch 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 làm chệch 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 dòng điện một chiều 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 tạo thành plasma tiêu chuẩn trên hệ thống FRC 10 sẽ tuân theo kỹ thuật ghim theta được đảo 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 gần như là dòng điện một chiều 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 tạo 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 tạo thành 200. Tại điểm này, lượng định trước của khí trung hòa tại áp suất 9-20psi được phun vào trong hai thể tích tạo thành được xác định bởi các buồng ống thạch anh 240 của các vùng tạo thành (bắc và nam) 200 thông qua bộ các van phụt được định hướng theo góc phương vị tại các vành mép ở trên các đầu cuối phía ngoài của các vùng tạo thành 200. Tiếp theo, trường RF nhỏ ( $\sim$  vài trăm kilo-hertz) được tạo ra từ bộ các ăng ten 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 dẫn dòng 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 tạo thành có năng lượng được tạo xung 210 được bắn để dẫn các cuộn dây trường nam châm đảo 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 tạo ra đồng đều trong suốt chiều dài của các ống tạo thành 240 (việc tạo thành tĩnh) hoặc sao cho đạt được việc môđun hóa trường nhu động liên tiếp dọc trục của các ống tạo thành 240 (việc tạo thành động lực).

Trong toàn bộ quy trình tạo thành này, trường thực tế đảo trong plasma xuất hiện một cách nhanh chóng, nằm trong khoảng 5 microgiây ( $\mu s$ ). Công suất được tạo xung cỡ nhiều gigawatt được phân phối tới phần plasma tạo thành sẵn sàng để tạo ra các FRC nóng sau đó được phun từ các vùng tạo 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 tạo thành 210 (tạo thành

độ dốc từ trường theo trục mà quay theo hướng dọc trục về phía buồng giam giữ 100). Hai phần FRC tạo 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 gần như là dòng điện một chiều 412 tạo ra trường được dịch chuyển về phía trước để điều khiển việc mở rộng theo hướng xuyên tâm và tạo ra thông lượng từ bên ngoài cân bằng.

Khi các tạo 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 dọc trục của các tạo 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 dọc 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 1 miligiây, 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 diễn tiến theo thời gian thông thường của bán kính thông lượng bị loại trừ,  $r_{\Delta\Phi}$ , xấp xỉ bán kính bộ phận tách,  $r_s$ , để minh họa các động lực học của quy trình dung hợp 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 tạo thành tương ứng 200 tại tốc độ siêu âm,  $v_z \sim 250 \text{ km/giây}$ , và va chạm gần mặt phẳng giữa tại  $z = 0$ . Trong suốt quá trình va chạm, các plasmoid nén theo hướng dọc trục, tiếp theo bởi việc mở rộng nhanh theo hướng xuyên tâm và hướng dọc trục, trước hợp nhất cuối cùng để tạo thành FRC 450. Cả động lực học theo hướng xuyên tâm và theo hướng dọc trục của việc hợp nhất FRC 450 đều có chứng cứ bởi các đo đặc 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. FRC được bắt đầu tại  $t = 0$ , 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 mật độ được tích hợp theo đường được thể hiện trên Fig.13B, từ giao thoa kế  $\text{CO}_2/\text{He-Ne}$  6 cung nằm tại  $z = 0$ , 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 dọc trục và hướng xuyên tâm trong suốt 0,1 miligiây 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 yêu 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 dọc trục, phục hồi cân bằng theo hướng dọc trục và hướng xuyên tâm. 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,  $7 \times 10^{19}$  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 phun chùm trung hòa 600. Các chùm của các phần trung hòa nhanh được phun từ thời điểm các vùng tạo thành FRC bắc và 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 0,5 miligiây đến 0,8 miligiây 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 (xem, ví dụ *M.W. Binderbauer và N. Rostoker, Plasma Phys. 56, part 3, 451 (1996)*). Hơn nữa, từ khía cạnh được duy trì, các chùm từ các bộ phun chùm trung hòa 600 cũng là các phương tiện sơ cấp để dẫn dòng 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 điện tử 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 miligiây đến 0,5 miligiây, tạo thành việc gia nhiệt FRC đáng kể, chủ yếu là của các điện tử. Các ion nhanh tạo ra việc lệch lớn theo hướng xuyên tâm 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 cấm 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 phân trung hòa cạnh và cho phép tạo dòng ion nhanh cần thiết.

#### *Việc phun hạt*

Khi phân bố ion nhanh đáng kể được tạo ra trong FRC 450, với các nhiệt độ điện tử 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 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 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 siết 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 tan mòn gặp plasma đáng kể trong FRC 450, chúng trở nên được ion hóa hoàn toàn. Sau đó, thành phần plasma lạnh tạo thành được gia nhiệt theo va chạm bởi plasma FRC bản địa. Năng lượng cần thiết để duy trì nhiệt độ FRC mong muốn được cung cấp cuối cùng bởi các bộ phun chùm 600. Theo nghĩa này, các bộ phun hạt 700 cùng với các bộ phun chùm trung hòa 600 tạo thành hệ thống duy trì trạng thái ổn định và duy trì FRC 450.

#### *Việc phun CT*

Như một phương án thay thế cho bộ phun hạt, bộ phun cuộn dây hình xuyên nhỏ gọn (compact toroid - CT) được tạo ra, chủ yếu để nạp liệu các plasma có cấu hình được đảo trường (field-reversed configuration - FRC). Bộ 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 dịch chuyển được định vị bên trong của điện cực

bên trong 726 và bộ ngắt điện 728 trên đầu cuối đối lập với việc xả của bộ 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 tạo 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 phun CT 720 được ghép với bể giam giữ 100 gần trên các cạnh đối lập của mặt phẳng giữa của bể 100 để phun các CT vào trong plasma FRC trung tâm nằm trong bể giam giữ 100. Đầu cuối xả của các bộ phun CT 720 được hướng về phía mặt phẳng giữa của bể giam giữ 100 tại góc so với trục dài của bể giam giữ 100 tương tự với các bộ phun chùm trung tính 615.

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

Các ưu điểm của bộ 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 dây định thiên 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  $\sim 100\text{km/giây}$ . Các thông số plasma thông thường khác là như sau: mật độ điện tử  $\sim 5 \times 10^{21}\text{m}^{-3}$ , nhiệt độ điện tử  $\sim 30\text{-}50\text{eV}$ , 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



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 dẫn dòng 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 điện tử do lực ma sát điện tử-ion (tạo thành từ việc truyền động năng va chạm ion điện tử). Hệ thống FRC 10 sử dụng kỹ thuật mới để tạo ra việc phá vỡ điện tử 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 xuyên tâm được tác dụng theo phương ngang từ các cuộn dây hình yên ngựa 460 tạo ra điện trường theo hướng dọc trục trong plasma FRC quay. Dòng điện tử theo hướng dọc trục được tạo thành tương tác với từ trường theo hướng xuyên tâm để tạo ra lực phá vỡ theo phương vị trên các điện tử,  $F_{\theta} = -\sigma V_{e0} \langle |B_r|^2 \rangle$ . Với điều kiện thông thường trong hệ thống FRC 10, trường lưỡng cực (hoặc tứ cực) từ tính được áp dụng được yêu cầu nằm trong plasma chỉ cần ở cỡ 0,001T để tạo ra việc phá vỡ điện tử 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 lưỡng cực (hoặc tứ cực) từ tính được áp dụng đóng góp vào việc làm giảm độ mất ổn định. Kết hợp với việc phun chùm trung hòa theo tiếp tuyến và việc phun plasma theo hướng dọc trục, các cuộn dây hình yên ngựa 460 tạo ra mức điều khiển bổ sung liên quan với việc duy trì và độ ổn định dòng.

#### *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 (2 T tới 4 T) với tổng năng lượng vừa phải (khoảng 100 kJ). Đối với việc tạo 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 tạo 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 làm chệch hướng gần như là dòng điện một chiều 416 có thể được điều chỉnh để dẫn hướng các đường sức trường lên trên các điện cực làm chệch 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 điện từ 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 deuteri được phụt vào trong các ống thạch anh trong khi tạo thành FRC, khi khí ngược dòng vào trong các bộ làm chệch hướng 300 được giảm một cách đáng kể bởi độ dẫn khí nhỏ của các chốt (lớn 500L/giây). Hầu hết khí được phụt vào còn lại bên trong các ống tạo 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 làm chệch 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 làm chệch 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  $\tau_{||}$  tăng bởi khoảng lên tới cỡ biên độ. Việc cải thiện  $\tau_{||}$  sẵn sàng làm tăng việc giam giữ hạt FRC.

Giả sử rằng tổn thất hạt phân tán theo hướng xuyên tâm (D) từ thể tích của bộ phận tách 453 được làm cân bằng bởi tổn thất theo trục ( $\tau_{||}$ ) từ lớp cạnh 456, có thể thu được  $(2\pi r_s L_s)(Dn_s/\delta) = (2\pi r_s L_{s\delta})(n_s/\tau_{||})$ , mà từ đó chiều dài độ dốc mật độ của bộ phận tách có thể được viết lại như là  $\delta = (D\tau_{||})^{1/2}$ . 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  $\tau_N = [\pi r_s^2 L_s \langle n \rangle] / [(2\pi r_s L_s)(Dn_s/\delta)] = (\langle n \rangle / n_s)(\tau_{\perp} \tau_{||})^{1/2}$ , trong đó  $\tau_{\perp} = a^2/D$  với  $a=r_s/4$ . Theo nghĩa vật lý, việc cải thiện  $\tau_{||}$  dẫn tới  $\delta$  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  $\tau_{||}$ .

Cải thiện đáng kể trong  $\tau_{||}$  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 siết chặt đường. Plasma súng từ các súng plasma 350 được tạo 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 tứ 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 điện tử 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 cấm gương (*Mirror Plug*) nêu trên, nếu  $\tau_{||}$  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 ( $\sim 10^{22}$  /giây). 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 density  $n_e \sim 10^{13} \text{ cm}^{-3}$  và nhiệt độ ion khoảng 200eV, bị giam giữ giữa các chốt cấm 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  $\tau_{gd} \sim RL/2V_s \sim 2$  miligiây, 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  $\tau_c \sim 0,5\tau_{ii}(\ln R + (\ln R)^{0.5}) \sim 0,7$

miligiây. Việc phân tán ngang dị thường này có thể, theo nguyên tắc, 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  $\tau_{\perp} > \tau_{gd} \sim 2$  miligiây. 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 tạo 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 miligiây đến 0 miligiây, 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 tạo 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. Nếu được bật tại thời điểm  $t < -2$  miligiây, các luồng plasma có thể điền khoảng từ 1 đến 3 m<sup>3</sup> thể tích đường sức trường của các vùng tạo thành và giam giữ của các vùng tạo thành 200 và buồng giam giữ 100 với mật độ plasma đích cỡ vài  $10^{13}$  cm<sup>-3</sup>, đủ để cho phép tạo nên chùm trung hòa trước khi FRC tới. Các FRC tạo thành sau đó có thể được tạo thành và được dịch chuyển vào 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 xuyên tâm 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 xuyên tâm có thể được tạo ra

qua lớp cạnh 456 ở ngay bên ngoài FRC 450. Các điện trường theo hướng xuyên tâm 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 phân 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 mở 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 chẵn

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 ( $\sim 4\text{MW}$  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 ( $\sim 2,5\text{ MW}$ ) 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 dưới dạng hàm của thời gian. Trong tất cả các trường hợp, lượng vừa phải, không đổi của công suất chùm (khoảng  $2,5\text{MW}$ ) 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 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  $R^2/\rho_i$ , trong đó  $R$  là bán kính của từ trường bằng không (đo đặc thô của việc định cỡ vật lý của máy) và  $\rho_i$  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. Khi so sánh với hiệu quả hoạt động thông

thường trong CR chế độ thông thường, Fig.13A, Fig.13B, Fig.13C và Fig.13D, chế độ vận hành theo chế độ HPF thể hiện thời gian sống dài hơn quá 400%.

Dây biểu diễn của vết mật độ được tích hợp của đường được thể hiện trên Fig.18b với phần bù đảo Abel, các đường viền mật độ, trên Fig.18c. Khi so sánh với CR chế độ FRC thông thường, như được thể hiện trên Fig.13A, Fig.13B, Fig.13C và Fig.13D, plasma là yên tĩnh hơn trong suốt xung, là chỉ thị của việc vận hành rất ổn định. Mật độ đỉnh cũng thấp hơn một chút trong các lần bắn HPF – đó là kết quả của tổng nhiệt độ plasma cao hơn (lên tới hệ số 2) như được thể hiện trên Fig.18D.

Với việc xả tương ứng được minh họa trên Fig.18, các thời gian giam giữ năng lượng, hạt và thông lượng là 0,5 miligiây, 1 miligiây và 1 miligiây, một cách tương ứng. Tại thời gian tham chiếu 1 miligiây 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  $t = 0,5$  miligiây, ví dụ,  $t \leq 0,5$  miligiây và  $t > 0,5$  miligiây, 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 điện tử (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 Tokamak truyền thống, trong đó việc giam giữ thường tỉ lệ ngược với một số lũy thừa của nhiệt độ điện tử. 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 các 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 6 miligiây. Thời gian sống nghịch từ plasma được mô tả trong vùng A là khoảng 5,2 miligiây. Dữ liệu mới hơn thể hiện là có thể thu được thời gian sống nghịch từ plasma vào khoảng 7,2 miligiây với chiều dài xung chùm hoạt hóa bằng khoảng 7 miligiây.

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 cắt và bị bẫy. Việc co lại hoặc phân hủy của FRC chủ yếu là do trên thực tế có 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 chùm-plasma, thậm chí khi plasma FRC bị co rút hoặc theo cách khác co lại theo hướng dọc 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 6 miligiây 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°, bán kính đích 0,19 m. Góc phun có thể được thay đổi nằm trong khoảng giới hạn 15° - 25°. 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 phun chùm trung hòa 600 từ thời điểm các vùng tạo thành FRC bắc và 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 1 miligiây 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  $\sim 5+$  miligiây. 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 tạo

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.

*Các năng lượng chùm điều hưởng được các chùm trung hòa*

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 năng lượng hệ thống được nâng cao, 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 miligiây. Hệ thống NBI 600 bao gồm nhiều bộ phun dựa trên ion dương 615 (xem Fig.3D và Fig.3E) có thiết kế dạng môđun linh động, với một nhóm con của các bộ phun NBI 615, ví dụ, bốn (4) trong số tám (8) bộ phun NBI 615, có khả năng điều hưởng năng lượng chùm trong quá trình bắn từ năng lượng chùm thấp ban đầu đến năng lượng chùm tăng, ví dụ, từ khoảng 15 keV đến khoảng 40 keV ở dòng chùm không đổi. Khả năng này của các bộ phun NBI 615 được kỳ vọng là để đạt được sự gia nhiệt hiệu quả hơn và tạo ra áp lực của lõi plasma 450. Cụ thể là, khả năng này cho phép sự cải thiện hiệu suất cao theo mong muốn ở mức hoạt động năng lượng đỉnh so với năng lượng thấp: ví dụ, (i) hệ số tăng lên đến công suất gia nhiệt cao hơn hai lần; (ii) giảm gần năm lần các thất thoát do trao đổi điện tích; và (iii) tăng gấp đôi hiệu suất gia nhiệt. Ngoài ra, năng lượng chùm biến thiên liên tục tạo ra bởi các bộ phun NBI 615 cho phép sự phù hợp tối ưu của các thông số quỹ đạo của các ion nhanh đã được phun và sau đó được bẫy so với các biên dạng áp lực từ tính tức thời trong quá trình tăng tốc. Trước tiên, các tốc độ tăng nhanh, cho phép khoảng thời gian gia tốc bằng 0,1 miligiây đến 10 miligiây, cùng với khả năng điều hưởng nhanh (trong khoảng nhỏ hơn hoặc bằng 1

miligiây) của năng lượng chùm và công suất của các bộ phun NBI 615 tạo ra “các núm điều khiển” hiệu dụng bổ sung, tức là, các đặc điểm có thể điều khiển, để tạo hình dạng plasma và điều khiển phản hồi tích cực của plasma thông qua sự điều biến của năng lượng chùm và điện áp.

Công suất gia nhiệt thích hợp là cần thiết để cho phép gia nhiệt và tạo áp suất FRC 450, cả để duy trì cũng như tăng tốc đến các nhiệt độ plasma cao và các năng lượng hệ thống được nâng cao. Giả sử các tỷ lệ thất thoát đủ thấp, tốc độ tăng tốc hầu như là hàm của bao nhiêu công suất có thể được tích lũy trong tâm FRC 450 bởi các bộ phun NBI 615 ở thời gian định trước bất kỳ. Do đó, công suất chùm trung hòa chính cao hơn thông qua cửa phun luôn được kỳ vọng.

Ngoài ra, tốc độ gia nhiệt hiệu dụng do các bộ phun NBI 615 là sự tương tác phức tạp giữa các đặc tính của chùm phun và sau đó là các biên dạng tức thời liên tục của nhiệt độ của tất cả các hình thái, mật độ của electron và ion, nồng độ trung hòa, cũng như trường từ đi qua tâm FRC 450. Trong số chúng, các biên dạng trường từ được thay đổi một cách cố ý trên thang đo thời gian dưới mili giây trong quá trình tăng tốc bởi hệ thống điều khiển, trong khi các biên dạng liên quan đến áp suất động học phát triển thông qua các thay đổi nội tại là đạo hàm của các quá trình tự tổ chức và nhiễu loạn bên trong plasma cũng như năng lượng tích lũy bởi quá trình phun. Khả năng điều hướng của các chùm tạo ra phương tiện để hầu hết làm thích ứng tối ưu với các điều kiện biến thiên này.

Ví dụ, tiết diện trao đổi điện tích, tức là, khả năng bắt giữ electron bằng ion nhanh để tạo ra nguyên tử trung hòa, là một hàm mạnh của năng lượng chùm. Đối với khoảng từ 15 keV đến 40 keV, tốc độ trao đổi điện tích chính giảm một cách đột ngột dưới dạng hàm số của năng lượng chùm. Do đó, ở mức trường định trước bất kỳ, năng lượng giữ lại trong plasma là cao nhất khi phun các hạt ở năng lượng cao nhất có thể so sánh đối với mức trường này (trong số các mức khác, điều này yêu cầu rằng năng lượng của các hạt được phun tạo ra bán kính quỹ đạo ion được bẫy mà vừa bên trong thành trong của hệ thống giam giữ).

Ví dụ khác về các tác dụng biên dạng trên hiệu quả gia nhiệt tổng thể phải thực hiện với nơi mà năng lượng được tích lũy. Năng lượng chùm cao hơn sẽ thường

đến sự tích lũy năng lượng tương đối cao hơn ở biên FRC so với tâm. Khi tăng trường từ, nhưng giữ nguyên năng lượng chùm, sẽ dẫn đến các quỹ đạo ion được bẫy chặt chẽ hơn và năng lượng cao hơn tương thích hợp lại với plasma ở tâm FRC. Sau đó các yếu tố này cũng có tác động mạnh lên sự duy trì năng lượng – ví dụ năng lượng tích lũy ở chu vi được vận chuyển dễ dàng hơn nhiều ra khỏi hệ thống điện thoại cấu trúc đường trường mở, trong khi năng lượng tích lũy ở tâm bị thất thoát chậm hơn đáng kể do thời gian vận chuyển cắt qua trường thấp hơn. Do vậy, cần có hệ tọa độ kín của trường từ tăng tốc và làm tăng một cách thích hợp năng lượng chùm.

Hệ thống chùm 600 được thiết kế để tăng điện áp nhanh nằm trong khoảng 0,1 miligiây đến 10 miligiây. Hệ thống này tạo ra khả năng làm tăng nhiệt độ của ion và electron theo hệ số 2 và 10, một cách tương ứng, và thực hiện trên thang thời gian ngắn hơn thời gian tăng không ổn định trên phạm vi lớn theo cách thông thường. Do đó, độ ổn định plasma được tăng đáng kể, như độ tin cậy hoạt động và độ tái sinh.

Thời gian tăng điện áp biến thiên từ 0,05 miligiây đến 1 miligiây tạo ra thời gian đáp ứng đủ nhanh sao cho các chùm có thể được sử dụng là một phần của hệ thống phản hồi tích cực. Theo cách này, việc điều chế chùm có thể được sử dụng để điều khiển độ ổn định vĩ mô hoặc vi mô. Ví dụ, sự chuyển đổi tức thời biên dạng định vị điện áp theo hướng xuyên tâm bằng cách thay đổi năng lượng chùm (và nhờ đó chuyển đổi kiểu định vị năng lượng theo hướng xuyên tâm), thì có thể tác động lên các chênh lệch áp suất vốn có thể làm mất cân bằng sự kích hoạt của các chế độ plasma không ổn định. Hệ thống FRC 10 thể hiện trên Fig.3D và Fig.3E sử dụng khả năng này cùng với phản hồi từ nhanh để điều khiển độ nghiêng bên trong, tốc độ quay, sự phát triển sóng trôi và các trường hợp vận hành khác.

Fig.25 là hình vẽ thể hiện bộ phun NBI 615 của hệ thống FRC hiện tại 10. Bộ phun NBI 615 được thể hiện, theo phương án thực hiện làm ví dụ, bao gồm: bộ điều khiển hồ quang 650; hộp plasma 651; hệ thống quang ion 652, bao gồm nhóm lưới các lưới điện tách và gia tốc triode hoặc tetrode; khớp cac-đăng ngầm 653; bộ trung hòa 654, bao gồm các bộ bay hơi hồ quang 655, như, ví dụ, Ti các bộ bay hơi hồ quang, bộ giữ lạnh 656 có các kết cấu bề mặt, như, ví dụ, các kết cấu bề mặt có gờ,

được tạo kết cấu để duy trì lạnh tăng cường, và nam châm làm lệch hướng 656 để loại bỏ các ion không được trung hòa; và khẩu độ chuẩn trực 658, bao gồm nhiệt lượng kế có thể lắp 659 để phân loại, chẩn đoán và hiệu chuẩn lại chùm không liên tục.

Cụ thể là và tham chiếu đến Fig.26, phương án thực hiện của hệ thống chùm điều hướng được, như được thể hiện, tốt hơn là được dựa trên kiểu hệ thống quang ion triode (=IOS) 660. Ý tưởng là sơ đồ gia tốc-giảm tốc. Như được thể hiện trên Fig.26, lưới điện thứ nhất G1 là để thiết lập điện áp  $V1$ , trong khi lưới điện thứ hai G2 là để thiết lập điện áp  $V2$  và lưới điện cuối cùng G3 được thiết lập điện áp  $V3$ . Các ion được tách trước tiên được gia tốc đến năng lượng  $E1=e*(V1-V2)$  trong khi đi ngang qua khe hở giữa G1 và G2 ( $e$  ở đây để biểu thị điện tích của ion). Sau đó chúng được giảm tốc ở khe hở giữa G2 và G3 sao cho  $E2=E1+e*(V2-V3)$ . Các điện áp thường được điều chỉnh sao cho  $V1>V2<V3$ . Dựa trên nguồn điện riêng biệt thích hợp PS1, PS2, PS3, các điện áp lưới có thể được điều chỉnh gia tăng trong quá trình tạo xung để thay đổi đầu ra của các ion bắn ra 662. Ví dụ, để bắt đầu chùm xung của nguyên tử hydro, các điện áp làm việc có thể được điều chỉnh thành  $V1=15\text{ kV}$ ,  $V2=-25\text{ kV}$  và  $V3=0\text{ V}$ . Các ion chùm ban đầu sau đó sẽ được gia tốc lần đầu đến  $40\text{ keV}$  và sau đó thoát ra khỏi IOS với năng lượng bằng  $15\text{ keV}$ . Sau đó trong xung, các nguồn điện có thể được chuyển đổi để tạo ra  $V1=40\text{ kV}$ ,  $V2=-1\text{ kV}$ ,  $V3=0\text{ V}$ . Sự giảm tốc chùm ở khe thứ hai sau đó sẽ vắng mặt thực sự, tạo ra năng lượng chùm đầu ra xấp xỉ  $40\text{ keV}$ . Các nguồn điện có thể điều khiển riêng biệt từng nguồn và tạo ra sự điều biến điện áp thích hợp. Các ion chùm ban đầu được rút ra khỏi vô số vòm tiêu chuẩn hoặc RF dựa trên nguồn plasma PS. Sau khi thoát ra khỏi IOS 660, các ion chùm 662 vượt qua bộ trung hòa 664 trong đó các ion nhanh chuyển thành các ion trung hòa thông qua trao đổi điện tích của các electron nằm ngoài khí trung hòa lạnh có trong bộ trung hòa 664. Bộ giữ lạnh chuyên dụng ngăn không cho khí trung hòa thổi ra khỏi lỗ phía đầu ra của bộ trung hòa 664. Ở đầu của bộ trung hòa cũng có nam châm làm lệch hướng thích hợp 666 để loại bỏ các ion nhanh không được trung hòa 663 và đám ion liên kết 668 để hấp thu các ion nhanh và năng lượng của chúng. Chùm nguyên tử tách rời 670 sau đó được đi qua khẩu độ thích hợp 6720 để làm

giảm độ phân kỳ chùm và tạo ra dòng chuẩn trực thích hợp của các nguyên tử trung hòa về phía tâm lò phản ứng.

Theo phương án thực hiện thay thế, IOS được dựa trên thiết kế ống nhiệt bốn điện cực (tetrode). Trong trường hợp này, IOS bao gồm bốn lưới điện mà có cùng nguyên lý gia tốc-giảm tốc như được giải thích cho vỏ triode. Người có hiểu biết trung bình trong lĩnh vực kỹ thuật sẽ hoàn toàn nhận ra sự tương đồng giữa các thành phần hệ thống và các nguyên lý vận hành. Việc đưa vào lưới điện thứ tư tạo ra nhiều khả năng điều hưởng tinh hơn và về tổng thể tạo ra khả năng vận hành linh hoạt hơn.

Các phương án thực hiện làm ví dụ được đưa ra ở đây đã được mô tả trong đơn sáng chế Mỹ tạm thời số 62/414,574, mà toàn bộ nội dung sẽ được kết hợp bằng cách viện dẫn.

#### *Độ ổn định plasma và sự điều khiển vị trí dọc trục*

Các giải pháp đã biết về cơ bản để tạo ra sự ổn định cho các bất ổn định FRC theo hướng dọc trục nhưng không ổn định theo hướng xuyên tâm, hoặc ổn định theo hướng xuyên tâm nhưng không ổn định theo hướng dọc trục, nhưng không ổn định theo cả hai hướng ở cùng thời điểm. Đối với kiểu thứ nhất, sự cân bằng pha nơi mà vị trí plasma ổn định theo phương ngang hoặc hướng xuyên tâm có đặc tính đối xứng trục mong muốn, nhưng không ổn định theo hướng dọc trục. Xem xét phần mô tả phía trên, các phương án thực hiện được tạo ra ở đây đề cập đến các hệ thống và phương pháp để tạo thuận lợi cho việc làm ổn định plasma FRC theo cả hướng xuyên tâm và hướng dọc trục và sự điều khiển vị trí theo hướng dọc trục của plasma FRC dọc theo đường trục đối xứng của buồng giam giữ plasma FRC một cách độc lập với các đặc tính ổn định theo hướng dọc trục của sự cân bằng của plasma FRC. Sự bất ổn định vị trí dọc trục, tuy nhiên, được kiểm soát một cách chủ động nhờ sử dụng một nhóm cuộn dây bên ngoài bố trí đối xứng trục để điều khiển vị trí theo hướng dọc trục của plasma FRC. Các hệ thống và phương pháp tạo ra điều khiển phản hồi của vị trí hướng dọc trục của plasma FRC độc lập với sự ổn định các đặc tính của trạng thái cân bằng plasma bằng cách tác động lên các điện áp cấp cho nhóm chứa các cuộn dây bên ngoài đồng tâm với plasma và nhờ sử dụng kỹ thuật điều khiển bất tuyến tính.

Các phương án thực hiện sáng chế thực hiện các cân bằng pha bất ổn định theo hướng dọc trục của FRC để tạo cường bức sự ổn định theo hướng xuyên tâm, trong khi làm ổn định hoặc điều khiển sự bất ổn định hướng dọc trục. Bằng cách này, sự ổn định theo cả hướng dọc trục và hướng xuyên tâm có thể đạt được. Phương pháp luận về điều khiển được thực hiện để thay đổi trường từ bên ngoài hoặc trường từ cân bằng để tạo ra sự ổn định theo hướng dọc trục hoặc hướng ngang cho plasma FRC nhưng không ổn định theo hướng dọc trục, và sau đó tác động lên dòng điện của cuộn dây tạo trường xuyên tâm để phục hồi tức thời vị trí plasma FRC về phía mặt phẳng giữa trong khi làm giảm tới mức tối thiểu sự quá tải và/hoặc các dao động xung quanh mặt phẳng giữa của buồng giam giữ. Ưu điểm của giải pháp này là làm giảm độ phức tạp của các bộ kích hoạt mà cần thiết cho việc điều khiển. So với các giải pháp đã biết với nhiều bậc tự do, phương pháp luận của phương án thực hiện được mô tả ở đây là làm giảm độ phức tạp trong vấn đề điều khiển theo trục tròn xoay của plasma FRC có một bậc tự do.

Sự kết hợp của các dạng sóng trong các dòng điện của cuộn dây, hoạt động cấp nhiệt liệu và công suất chùm trung hòa mà khiến cho plasma sự bất ổn định theo hướng dọc trục tạo ra trường hợp điều khiển plasma mà đặt plasma vào tình huống sự bất ổn định theo hướng dọc trục. Trường hợp này có thể được tạo chương trình trước nhờ sử dụng các kiến thức trước đó về mô phỏng hoặc thực nghiệm, hoặc sự phản hồi có điều khiển để duy trì trạng thái cân bằng vốn sự bất ổn định theo hướng dọc trục. Vị trí plasma cần được điều khiển trong quá trình phóng một cách độc lập với điều khiển sự ổn định các đặc tính của sự cân bằng pha, ví dụ kế hoạch điều khiển cần làm việc hoặc cho plasma ổn định theo hướng dọc trục hoặc plasma sự bất ổn định theo hướng dọc trục, lên đến giới hạn. Plasma bất ổn định nhất theo hướng dọc trục mà có thể được điều khiển có thời gian tăng so với thời gian bên ngoài của bề.

Sau đây quay trở lại với các hệ thống và phương pháp để tạo thuận lợi cho việc làm ổn định plasma FRC theo cả hướng xuyên tâm và hướng dọc trục và sự điều khiển vị trí theo hướng dọc trục của plasma FRC dọc theo đường trục đối xứng của buồng giam giữ plasma FRC, Fig.27 là hình vẽ dạng sơ đồ đơn giản hóa để thể hiện phương án làm ví dụ thực hiện của sáng chế về cơ cấu điều khiển vị trí hướng dọc



trục 510. Plasma FRC quay 520 được thể hiện bên trong buồng giam giữ 100 có dòng plasma 522 và hướng dịch chuyển dọc trục 524. Trường cân bằng pha (không được thể hiện trên hình vẽ) được tạo ra bên trong buồng giam giữ 100 nhờ các thành phần tạo dòng đối xứng như các cuộn dây gần như là dòng điện một chiều 412 (xem Fig.2 và Fig.3A, Fig.3D và Fig.3E), chẳng hạn. Trường cân bằng pha không tạo ra lực liên kết mạng theo hướng dịch chuyển dọc trục 524, nhưng có thể được điều hướng để tạo ra plasma ổn định theo hướng ngang/hướng xuyên tâm hoặc plasma ổn định theo hướng dọc trục. Đối với các mục đích của phương án thực hiện mà được mô tả ở đây, trường cân bằng pha được điều hướng để tạo ra plasma FRC ổn định theo hướng ngang/hướng xuyên tâm 520. Như đã lưu ý trên đây, điều này tạo ra sự bất ổn định theo hướng dọc trục và do vậy, sự dịch chuyển theo hướng dọc trục của plasma FRC 520 theo hướng dịch chuyển dọc trục 524. Do plasma FRC 520 dịch chuyển theo hướng dọc trục, nó gây ra các dòng cảm ứng 514 và 516 vốn chống lại sự đối xứng, tức là, theo các hướng ngược lại trên các thành của buồng giam giữ 100 ở mỗi phía của mặt phẳng giữa của buồng giam giữ 100. Plasma FRC 520 sẽ cảm ứng các thành phần tạo dòng kiểu này trong cả bề và các cuộn dây bên ngoài. Các thành phần tạo dòng bất đối xứng 514 và 516 này tạo ra trường theo hướng xuyên tâm mà tương tác với dòng plasma có hình xuyên 522 để tạo ra lực ngược với sự dịch chuyển của plasma FRC 520, và kết quả của lực này là nó làm chậm sự dịch chuyển theo hướng dọc trục của plasma. Các thành phần tạo dòng 514 và 516 này tiêu mòn dần theo thời gian, do suất điện trở của buồng giam giữ 100.

Các cuộn tạo trường theo hướng xuyên tâm 530 và 531 mà được bố trí quanh buồng giam giữ 100 ở mỗi phía của mặt phẳng giữa tạo ra các thành phần tạo trường theo hướng xuyên tâm bổ sung vốn là do các dòng điện 532 và 534 được cảm ứng theo các hướng ngược lại trên các cuộn 530 và 531. Các cuộn tạo trường theo hướng xuyên tâm 530 và 531 có thể bao gồm tập hợp các cuộn đối xứng trục mà có thể được định vị bên trong hoặc bên ngoài bề giữ 100. Các cuộn theo hướng xuyên tâm 530 và 531 được thể hiện sẽ được định vị bên ngoài bề giữ 100 tương tự với các cuộn dây gần như là dòng điện một chiều 412 (xem Fig.2 và Fig.3A, Fig.3D và Fig.3E). Mỗi cuộn dây trong số các cuộn dây 530 và 531, hoặc tập hợp các cuộn dây, có thể mang dòng điện khác với các cuộn dây ở phía đối lập của mặt phẳng giữa, nhưng các dòng

là phản đối xứng đối với mặt phẳng giữa của bề giữ 100 và tạo ra kết cấu trường từ với  $B_z \neq 0$ ,  $B_r = 0$  dọc theo mặt phẳng giữa. Các cuộn tạo trường theo hướng xuyên tâm 530 và 531 tạo ra thành phần trường bổ sung có hướng xuyên tâm mà tương tác với dòng plasma có hình xuyên 522 để tạo ra lực dọc trục. Lực dọc trục sau đó dịch chuyển plasma quay lại phía mặt phẳng giữa của buồng giam giữ 100.

Cơ cấu điều khiển 510 bao gồm hệ thống điều khiển được cấu hình để tác động lên dòng điện của cuộn dây tạo trường xuyên tâm để phục hồi tức thời vị trí plasma về phía mặt phẳng giữa trong khi làm giảm đến mức thấp nhất sự cường điệu và/hoặc các dao động xung quanh mặt phẳng giữa máy. Hệ thống điều khiển bao gồm bộ xử lý lắp vận hành được với các cuộn tạo trường theo hướng xuyên tâm 530 và 531, các cuộn dây gần như là dòng điện một chiều 412, các nguồn cấp điện tương ứng của chúng, và các thành phần khác như các bộ cảm biến từ, đo vị trí plasma, vận tốc plasma, và các thành phần đo dòng cuộn dây chủ động. Bộ xử lý có thể được cấu hình để thực hiện các phép tính và phân tích đã được mô tả trong đơn này và có thể bao gồm hoặc lắp truyền thông được với một hoặc nhiều bộ nhớ bao gồm phương tiện đọc được bằng máy tính không tạm thời. Bộ xử lý có thể bao gồm hệ thống dựa trên bộ xử lý hoặc hệ thống dựa trên bộ vi xử lý chứa các hệ thống sử dụng các bộ vi điều khiển, máy tính với tập lệnh đơn giản hóa (RISC: Reduced Instruction Set Computer), các mạch tích hợp ứng dụng cụ thể (ASICs: application specific integrated circuits), các mạch logic và mạch khác bất kỳ hoặc bộ xử lý có khả năng thực thi các hàm mà đã được mô tả ở đây. Các ví dụ bên trên chỉ nhằm minh họa và không nhằm làm giới hạn theo cách bất kỳ định nghĩa và/hoặc ý nghĩa của thuật ngữ “bộ xử lý” hoặc “máy tính.”

Các chức năng của bộ xử lý có thể được thực hiện nhờ sử dụng các thủ tục phần mềm, các bộ phận phần cứng hoặc các kết hợp của chúng. Các bộ phận phần cứng có thể được thực hiện nhờ sử dụng các công nghệ khác nhau, ví dụ bao gồm các mạch tích hợp hoặc các phần tử điện tử rời rạc. Cụm xử lý thường bao gồm thiết bị lưu trữ bộ nhớ có thể đọc/ghi và cũng thường bao gồm phần cứng và/hoặc phần mềm để ghi và/hoặc đọc thiết bị lưu trữ bộ nhớ.

Bộ xử lý có thể bao gồm thiết bị điện toán, thiết bị nhập, bộ hiển thị và một giao diện, ví dụ, để truy cập Internet. Máy tính hoặc bộ xử lý có thể bao gồm bộ vi xử lý. Bộ vi xử lý có thể được kết nối với đường bus giao tiếp. Máy tính hoặc bộ xử lý có thể còn bao gồm bộ nhớ. Bộ nhớ có thể bao gồm Bộ nhớ truy cập ngẫu nhiên (RAM: Random Access Memory) và bộ nhớ chỉ đọc (ROM: Read Only Memory). Máy tính hoặc bộ xử lý có thể còn bao gồm thiết bị lưu trữ, mà có thể là ổ đĩa cứng hoặc ổ lưu trữ di động như ổ đĩa mềm, ổ đĩa quang, và thiết bị tương tự. Thiết bị lưu trữ cũng có thể là phương tiện tương tự khác để nạp các chương trình máy tính hoặc các lệnh khác vào trong máy tính hoặc bộ xử lý.

Bộ xử lý thực thi tập lệnh được chứa trong một hoặc nhiều phần tử lưu trữ, để xử lý dữ liệu nhập vào. Các phần tử lưu trữ cũng có thể lưu trữ dữ liệu hoặc thông tin khác khi muốn hoặc khi cần. Phần tử lưu trữ có thể là dưới dạng nguồn thông tin hoặc phần tử bộ nhớ vật lý bên trong máy xử lý.

Vấn đề về điều khiển vị trí của trạng thái FRC ổn định hoặc không ổn định theo hướng dọc trục sử dụng các bộ kích hoạt bằng cuộn dây có trường theo hướng xuyên tâm được giải quyết nhờ sử dụng một phần của lý thuyết điều khiển không tuyến tính được biết đến là điều khiển chế độ trượt. Hàm tuyến tính của các trạng thái hệ thống (bề mặt trượt) có tác dụng làm tín hiệu lỗi với hành vi (trượt) tiệm cận mong muốn. Bề mặt trượt được tạo ra nhờ sử dụng lý thuyết Liapunov để biểu diễn độ ổn định tiệm cận trên dải rộng của các thông số động FRC. Sau đó kế hoạch điều khiển đã được đề xuất có thể được sử dụng cho cả plasma ổn định và không ổn định theo hướng dọc trục mà không cần điều chỉnh lại các thông số đã sử dụng trên bề mặt trượt. Đặc tính này là ưu điểm của sáng chế, như đã được nêu bên trên, do sự cân bằng pha có thể phải chuyển tiếp giữa các cân bằng pha ổn định và các cân bằng pha bất ổn định theo hướng dọc trục trên các pha khác nhau của sự phóng điện FRC.

Cấu hình của kế hoạch điều khiển 500 được thể hiện trên Fig.25. Bộ lọc cho đi qua thấp hạn chế các tần số chuyển mạch bên trong dải tần điều khiển mong muốn. Tạo mẫu yêu cầu vòng lặp điều khiển số và truyền tín hiệu có độ trễ làm ví dụ được giả thiết. Tín hiệu lỗi (bề mặt trượt) là sự kết hợp tuyến tính của dòng cuộn dây, vị trí plasma và vận tốc plasma. Vị trí plasma và vận tốc của plasma thu được từ các

phép đo từ tính bên ngoài. Các dòng điện trong các hệ thống có cuộn dây chủ động có thể được đo bằng các phương pháp tiêu chuẩn.

Các dòng cuộn dây và vị trí plasma được yêu cầu để thực hiện điều khiển vị trí. Vận tốc plasma được yêu cầu để cải thiện hiệu suất nhưng thông số này là tùy chọn. Hàm không tuyến tính của tín hiệu lỗi này (định luật điều khiển role) tạo ra các mức điện áp riêng cho mỗi cặp nguồn điện nối với các cuộn dây đối xứng qua mặt phẳng giữa. Các cuộn dây đối xứng qua mặt phẳng giữa được cấp các điện áp role có cùng cường độ nhưng có dạng ngược lại. Điều này tạo ra thành phần trường theo hướng xuyên tâm để hồi phục vị trí plasma về phía mặt phẳng giữa.

Để thể hiện khả năng thực hiện của kế hoạch điều khiển, mô hình plasma không linh động được sử dụng để mô phỏng các chế độ động của plasma. Mô hình này sử dụng dạng hình học từ tính. Sự phân bố dòng plasma tương ứng với các cân bằng pha bất ổn định theo hướng dọc trục với thời gian tăng bằng 2 miligiây khi chỉ có plasma và bề được xét đến. Các nguồn cấp điện được giả sử là làm việc với các mức điện áp riêng, thường theo các bước 800 V.

Fig.29 thể hiện một số mô phỏng điều khiển plasma mà nhấn mạnh quan hệ giữa các điện áp được cấp cho các cuộn dây, và các thời gian ổn định vị trí plasma, cùng với dòng đỉnh của cuộn dây yêu cầu và các tỷ lệ dốc để đưa plasma trở lại mặt phẳng giữa mà đã được dịch chuyển dọc trục khoảng 20cm. Các ví dụ về mô phỏng điều khiển vị trí hướng dọc trục chế độ trượt này được thực hiện ở 0,3 T nhờ sử dụng bốn cặp các cuộn vi chỉnh ngoài. Bốn trường hợp được thể hiện tương ứng với các nguồn cấp điện có các mức điện áp riêng theo các bước bằng 200 V (hình vuông đặc), 400V (hình tròn đặc), 800 V (hình tam giác đặc) và 1600 V (hình vuông rỗng). Đối với tất cả bốn trường hợp dải tần điều khiển là 16 kHz và tần số lấy mẫu là 32 kHz. Vị trí plasma (hình vẽ trên), dòng điện trên cặp cuộn dây ngoài cùng (hình vẽ giữa) và tỷ lệ chênh lệch dòng điện của cuộn dây (hình vẽ dưới) được thể hiện. Sự dịch chuyển plasma được phép tăng một cách không ổn định cho tới khi nó đạt 20cm. Ở thời điểm này sự điều khiển phản hồi được áp dụng.

Các kết quả mô phỏng thể hiện rằng:

Đưa plasma trở lại mặt phẳng giữa trong vòng 5 miligiây (các vết hình vuông đặc), tỷ lệ chênh lệch dòng tăng của cuộn dây bằng 0,5MA/giây là thích hợp, yêu cầu nguồn điện 200 V.

Đưa plasma trở lại mặt phẳng giữa trong vòng 2,3 miligiây (các vết hình tròn đặc), tỷ lệ chênh lệch dòng tăng của cuộn dây bằng 1MA/giây là thích hợp, yêu cầu nguồn điện 400 V.

Đưa plasma trở lại mặt phẳng giữa trong vòng 1,3 miligiây (các vết hình tam giác đặc), tỷ lệ chênh lệch dòng tăng của cuộn dây bằng 2MA/giây là thích hợp, yêu cầu nguồn điện 800 V.

Đưa plasma trở lại mặt phẳng giữa trong vòng 1,0 miligiây (các vết hình vuông rỗng), tỷ lệ chênh lệch dòng tăng của cuộn dây bằng 4MA/giây là thích hợp, yêu cầu nguồn điện 1600 V.

Các dòng điện đỉnh cho tất cả các cuộn vi chỉnh cho trường hợp thứ ba nêu trên (trường hợp có tỷ lệ chênh lệch 2MA/giây) cũng được thể hiện trên Fig.27 là hàm của vị trí cuộn vi chỉnh. Mô phỏng điều khiển vị trí hướng dọc trục chế độ trượt các ví dụ được thực hiện ở 0,3 T nhờ sử dụng bốn cặp cuộn vi chỉnh ngoài dùng nguồn điện có ba mức điện áp (+800V,0,-800V), dải tần điều khiển bằng 16kHz và tần số lấy mẫu bằng 32 kHz. Để đưa plasma trở lại mặt phẳng giữa trong vòng 1,3 miligiây, tỷ lệ chênh lệch dòng tăng của cuộn dây bằng 2MA/giây được yêu cầu. Dòng điện đỉnh mà được yêu cầu trong tất cả các cặp cuộn nhỏ hơn 1,5kA. Tần số chuyển mạch thực tế cần có (khoảng 2kHz) thấp hơn dải tần điều khiển hệ thống.

Hệ thống điều khiển cũng có thể được thực hiện trên bề mặt đích vốn là hàm của dòng điện của cuộn và vận tốc plasma độc lập, không có vị trí plasma. Trong trường hợp này vòng lặp điều khiển vị trí hướng dọc trục chỉ tạo ra độ ổn định của các động lực có hướng dọc trục, mà không điều khiển. Điều này có nghĩa là plasma ở trong trạng thái giả bền và có thể chảy chậm dọc theo đường trục của nó. Sau đó sự điều khiển vị trí được thực hiện sử dụng vòng lặp phản hồi bổ sung để điều khiển các khe plasma giữa bộ tách plasma và bể, do vậy nó thực hiện việc tạo hình dạng plasma và điều khiển vị trí một cách đồng thời.

Thiết bị giam giữ plasma khác trong đó các hệ thống điều khiển tương tự được sử dụng là tokamak. Để duy trì sự giam giữ plasma, dòng plasma trong tokamak phải được giữ trong giới hạn dưới và giới hạn trên mà phần lớn góp phần vào mật độ plasma và trường hình xuyên, một cách tương ứng. Để vận hành với mật độ plasma cao dòng plasma được tăng. Đồng thời trường poloit phải được giữ càng thấp càng tốt sao cho hệ số an toàn  $q$  lớn hơn  $q=2$ . Yêu cầu này đạt được bằng cách mở rộng plasma theo hướng dọc trục của máy, cho phép làm thích hợp dòng plasma lớn (và do đó, cho phép mật độ plasma cao) mà không làm trường từ bao quanh tăng cao hơn giới hạn an toàn của nó. Các plasma được mở rộng này là không ổn định dọc theo hướng dọc trục của máy (đã biết trong biệt ngữ tokamak là phương thẳng đứng), và cũng yêu cầu các cơ cấu ổn định plasma. Việc điều khiển vị trí plasma thẳng đứng trong tokamaks cũng được hồi phục nhờ sử dụng tập hợp các cuộn tạo trường theo hướng xuyên tâm, do vậy nó hầu như giống với vấn đề điều khiển vị trí RFC. Tuy nhiên, các nguyên nhân mà yêu cầu làm ổn định trong tokamak và FRC là khác nhau. Trong tokamak sự bất ổn định plasma theo phương thẳng đứng là sự bất lợi cần được khắc phục để vận hành với dòng plasma lớn, điều này yêu cầu sự mở rộng plasma để vận hành với trường hình xuyên cao. Trong trường hợp của FRC, sự bất ổn định plasma là sự bất lợi cần được khắc phục để thu được sự ổn định theo phương ngang. Các tokamak có trường hình xuyên để làm ổn định cấu hình, do vậy chúng không cần làm ổn định theo phương ngang.

Theo một phương án thực hiện của sáng chế, phương pháp để tạo ra và duy trì trường từ có cấu hình được đảo trường (FRC) bao gồm bước tạo ra FRC quanh plasma trong buồng giam giữ, và phun các chùm trung hòa vào trong plasma FRC trong khi điều hướng các năng lượng chùm của các chùm trung hòa giữa năng lượng chùm thứ nhất và năng lượng chùm thứ hai, trong đó năng lượng chùm thứ hai khác với năng lượng chùm thứ nhất.

Theo phương án thực hiện khác của sáng chế, năng lượng chùm thứ hai là cao hơn năng lượng chùm thứ nhất.

Theo phương án thực hiện khác của sáng chế, các chùm trung hòa chuyển đổi giữa các năng lượng thứ nhất và thứ hai trong toàn bộ quá trình bắn phá.

Theo phương án thực hiện khác của sáng chế, các năng lượng thứ nhất và thứ hai nằm trong khoảng từ khoảng 15 keV đến 40 keV.

Theo phương án thực hiện khác của sáng chế, phương pháp còn bao gồm điều khiển các năng lượng chùm của các chùm trung hòa bằng tín hiệu phản hồi nhận được từ hệ thống điều khiển plasma phản hồi tích cực.

Theo phương án thực hiện khác của sáng chế, phương pháp còn bao gồm điều khiển các năng lượng chùm của các chùm trung hòa bằng tín hiệu phản hồi nhận được từ hệ thống điều khiển plasma phản hồi tích cực.

Theo phương án thực hiện khác của sáng chế, điều khiển các năng lượng chùm của các chùm trung hòa bao gồm bước điều chỉnh các năng lượng chùm của các chùm trung hòa để điều chỉnh profin định vị công suất chùm theo hướng xuyên tâm để điều chỉnh trị số chênh lệch áp suất.

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 plasma đến khoảng trên 1,0 keV bằng cách phun các chùm của các nguyên tử trung hòa nhanh từ các bộ phun chùm trung hòa vào trong plasma FRC tại một góc về phía giữa qua mặt phẳng của buồng giam giữ.

Theo phương án thực hiện khác của sáng chế, nâng nhiệt độ plasma bao gồm nâng nhiệt độ từ khoảng 1,0 keV đến khoảng 3,0 keV.

Theo phương án thực hiện khác của sáng chế, nâng nhiệt độ plasma bao gồm nâng nhiệt độ từ khoảng 1,0 keV đến khoảng 3,0 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 gần như là dòng điện một chiều mở rộng quanh buồng giam giữ và trường từ đối xứng gương bên trong các đầu đối lập của buồng giam giữ có các cuộn dây gương gần như là dòng điện một chiều mở rộng quanh các đầu đối lập 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 gần như là dòng điện một chiều mở rộng quanh buồng giam giữ và trường từ đối xứng gương bên trong

các đầu đối lập của buồng giam giữ có các cuộn dây gương gần như là dòng điện một chiều mở rộng quanh các đầu đối lập của buồng giam giữ.

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

Phương pháp theo điểm bất kỳ trong số các điểm từ 4 và 5 trong đó, bước tạo thành FRC bao gồm một trong số việc tạo thành phần FRC tạo thành trong khi tăng tốc phần FRC tạo thành về phía mặt phẳng giữa của buồng và việc tạo thành phần FRC tạo thành và sau đó tăng tốc phần FRC tạo thành về phía mặt phẳng giữa của buồng.

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

Theo phương án thực hiện khác của sáng chế, đẩy FRC tạo thành từ các vùng tạo thành thứ nhất và thứ hai qua các bộ làm chệch hướng bên trong thứ nhất và thứ hai bao gồm dừng kích hoạt các bộ làm chệch hướng bên trong thứ nhất và thứ hai khi FRC tạo thành từ các vùng tạo thành thứ nhất và thứ hai đi qua các bộ làm chệch 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 làm chệch 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 làm chệch hướng bên ngoài thứ nhất và thứ hai mà được ghép với các đầu của các vùng tạo thành.



Theo phương án thực hiện khác của sáng chế, phương pháp còn bao gồm bước tạo ra trường từ bên trong các vùng tạo thành và các bộ làm chệch hướng bên ngoài thứ nhất và thứ hai với các cuộn dây gần như là dòng điện một chiều mở rộng quanh các vùng tạo thành và các bộ làm chệch hướng.

Theo phương án thực hiện khác của sáng chế, phương pháp còn bao gồm bước tạo ra trường từ bên trong các vùng tạo thành và các bộ làm chệch hướng bên trong thứ nhất và thứ hai với các cuộn dây gần như là dòng điện một chiều mở rộng quanh các vùng tạo thành và các bộ làm chệch 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 tạo thành thứ nhất và thứ hai và các bộ làm chệch hướng bên ngoài thứ nhất và thứ hai có các cuộn dây gương gần như là dòng điện một chiều.

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 tạo thành thứ nhất và thứ hai và các bộ làm chệch hướng bên ngoài thứ nhất và thứ hai có các cuộn dây chốt cắm gương gần như là dòng điện một chiều mở rộng quanh độ bó hẹp giữa các vùng tạo thành và các bộ làm chệch 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 làm chệch hướng bên trong thứ nhất và thứ hai có các cuộn dây gương gần như là dòng điện một chiều và tạo ra trường từ thu hẹp giữa các vùng tạo thành thứ nhất và thứ hai và các bộ làm chệch hướng bên trong thứ nhất và thứ hai có các cuộn dây thu hẹp biên dạng thấp gần như là dòng điện một chiều.

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 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 tạo thành thứ nhất và thứ hai, các bộ làm chệch hướng thứ nhất và thứ hai xen giữa buồng giam

giữ và các vùng tạo thành thứ nhất và thứ hai, và các bộ làm chệch hướng bên ngoài thứ nhất và thứ hai mà được nối với các vùng tạo 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.

Phương pháp theo điểm 18 trong đó, bước điều khiển biên dạng điện trường theo hướng xuyên tâm 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 trôi.

Theo phương án thực hiện khác của sáng chế, phương pháp còn bao gồm bước làm ổn định plasma FRC theo hướng xuyên tâm vuông góc với đường trục dọc của buồng giam giữ để định vị plasma FRC đối xứng trục quanh đường trục dọc và theo hướng dọc trục dọc theo đường trục dọc để định vị plasma FRC đối xứng trục quanh mặt phẳng giữa của buồng giam giữ.

Theo phương án thực hiện khác của sáng chế, phương pháp còn bao gồm bước tạo ra trường từ được tác động bên trong buồng với các cuộn dây gần như là dòng điện một chiều mở rộng quanh buồng.

Theo phương án thực hiện khác của sáng chế, phương pháp còn bao gồm bước làm ổn định plasma FRC theo hướng xuyên tâm bao gồm điều chỉnh trường từ đã được tác động để tạo ra độ ổn định theo hướng xuyên tâm độ bất ổn định theo hướng xuyên tâm trong plasma FRC.

Theo phương án thực hiện khác của sáng chế, bước làm ổn định plasma FRC theo hướng xuyên tâm bao gồm bước tạo ra các trường từ theo hướng xuyên tâm thứ nhất và thứ hai, trong đó các trường từ theo hướng xuyên tâm thứ nhất và thứ hai tương tác với FRC để dịch chuyển theo hướng xuyên tâm plasma FRC để định vị plasma FRC đối xứng trục quanh mặt phẳng giữa.

Theo phương án thực hiện khác của sáng chế, phương pháp còn bao gồm bước phun plasmas cuộn dây hình xuyên nhỏ gọn (CT) từ các bộ phun CT thứ nhất và thứ hai vào 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 xuyên tâm ở các mặt đối lập 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 trường (FRC) bao gồm: buồng giam giữ; các vùng tạo thành FRC thứ nhất và thứ hai đối lập nhau theo hướng xuyên tâm ghép với các bộ làm chệch hướng bên trong thứ nhất và thứ hai đối lập nhau theo hướng xuyên tâm; các bộ làm chệch hướng thứ nhất và thứ hai mà được nối với các vùng tạo thành thứ nhất và thứ hai; một hoặc nhiều súng trong số các súng plasma, một hoặc nhiều điện cực định thiên 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 làm chệch hướng thứ nhất và thứ hai, các vùng tạo thành thứ nhất và thứ hai và buồng giam giữ, trong đó một hoặc nhiều điện cực định thiên được định vị bên trong một hoặc nhiều buồng giam giữ, các vùng tạo thành thứ nhất và thứ hai, và các bộ làm chệch 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 tạo thành thứ nhất và thứ hai và các bộ làm chệch hướng thứ nhất và thứ hai; hệ thống chuyển đổi được ghép với buồng giam giữ và các bộ làm chệch hướng thứ nhất và thứ hai; các bộ phun chùm nguyên tử trung hòa được ghép với buồng giam giữ và có góc về phía mặt phẳng giữa của buồng giam giữ, trong đó một hoặc nhiều bộ trong số các bộ phun chùm nguyên tử trung hòa điều hướng được giữa năng lượng chùm thứ nhất và năng lượng chùm thứ hai, trong đó năng lượng chùm thứ hai khác với năng lượng chùm thứ nhất; và hệ thống từ bao gồm các cuộn dây gần như là dòng điện một chiều được định vị quanh buồng giam giữ, các vùng tạo thành thứ nhất và thứ hai, và các bộ làm chệch hướng thứ nhất và thứ hai, và tập hợp các cuộn dây gương gần như là dòng điện một chiều thứ nhất và thứ hai được định vị giữa các vùng tạo thành thứ nhất và thứ hai và các bộ làm chệch hướng thứ nhất và thứ hai.

Theo phương án thực hiện khác của sáng chế, năng lượng chùm thứ hai là cao hơn năng lượng chùm thứ nhất.

Theo phương án thực hiện khác của sáng chế, các chùm trung hòa được tạo kết cấu để chuyển đổi giữa các năng lượng thứ nhất và thứ hai trong toàn bộ quá trình bắn phá.

Theo phương án thực hiện khác của sáng chế, các năng lượng thứ nhất và thứ hai nằm trong khoảng từ khoảng 15 keV đến 40 keV.

Theo phương án thực hiện khác của sáng chế, hệ thống còn bao gồm hệ thống điều khiển plasma phản hồi tích cực được tạo kết cấu để điều khiển các năng lượng chùm của các chùm trung hòa.

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 vào trong plasma và nâng nhiệt độ plasma đến khoảng 1,0 keV đến 3,0 keV.

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

Hệ thống theo điểm bất kỳ trong số các điểm từ 33 đến 39, trong đó, vùng tạo thành bao gồm các hệ thống tạo thành được môđun hóa để tạo ra FRC và chuyển dịch nó về phía mặt phẳng giữa của buồng giam giữ.

Hệ thống theo điểm bất kỳ trong số các điểm từ 33 đến 40, trong đó, điện cực trôi bao gồm một hoặc nhiều thành phần trong số một hoặc nhiều điện cực điểm được định vị nằm trong buồng giam giữ để tiếp xúc với các đường trường mở, bộ các điện cực hình khuyên giữa buồng giam giữ và các vùng tạo thành thứ nhất và thứ hai để nạp cho các lớp thông lượng ở cạnh xa theo cách đối xứng theo phương vị, nhiều điện cực được chồng lên nhau, đồng tâm được định vị trong các bộ làm chệch hướng thứ nhất và thứ hai để nạp cho nhiều lớp thông lượng đồng tâm, và các anôt của các súng plasma để cắt thông lượng mở.

Theo phương án thực hiện khác của sáng chế, hệ thống còn bao gồm hệ thống điều khiển được ghép vận hành được với các cuộn dây gần như là dòng điện một chiều và các cuộn dây trường từ theo hướng xuyên tâm thứ nhất và thứ hai, hệ thống điều khiển bao gồm bộ xử lý ghép với bộ nhớ bất chuyển tiếp bao gồm các lệnh mà khi thực thi làm cho bộ xử lý điều hướng trường từ tạo ra bởi các cuộn dây gần như là dòng điện một chiều và thứ nhất và thứ hai các cuộn dây tạo trường theo hướng xuyên tâm để ổn định plasma FRC theo hướng xuyên tâm vuông góc với đường trục dọc của buồng để định vị plasma FRC đối xứng trục quanh đường trục dọc và theo hướng dọc trục dọc theo đường trục dọc để định vị plasma FRC đối xứng trục quanh mặt phẳng giữa.

Hệ thống theo điểm 33, trong đó, hệ thống được định cấu hình để tạo ra FRC và duy trì FRC tại hoặc quanh trị số không đổi mà không bị phân rã trong khi các chùm nguyên tử trung hòa được phun vào trong FRC.

Theo phương án thực hiện khác của sáng chế, các trường từ theo hướng xuyên tâm thứ nhất và thứ hai là bất đối xứng qua mặt phẳng giữa.

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: compact toroid) ghép với buồng giam giữ ở 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 xuyên tâm ở các mặt đối lập 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 hoạ 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. Phần mô tả trích dẫn của mỗi sự kết hợp và thay thế có thể có là việc quá phiền phức, đặc biệt là chỉ cần khả năng cho phép của mỗi và mọi sự kết hợp và thay thế sẽ hoàn toàn được xác định bởi người có hiểu biết trung bình trong lĩnh vực kỹ thuật ngay khi đọc bản mô tả này.

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.

Mặc dù các phương án thực hiện có thể có các biến thể và các phương án thay thế khác nhau, 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 tạo ra và duy trì từ trường với cấu hình được đảo trường (field reversed configuration - FRC) bao gồm các bước:

tạo thành plasma FRC với buồng giam giữ bằng cách tạo thành từ trường FRC quanh plasma trong buồng giam giữ, và

phun các chùm trung hòa vào trong plasma FRC từ nhiều bộ phun chùm trung hòa được ghép với buồng giam giữ, trong đó một hoặc nhiều bộ phun chùm trung hòa điều chỉnh được giữa năng lượng chùm thứ nhất và năng lượng chùm thứ hai, trong đó năng lượng chùm thứ hai khác so với năng lượng chùm thứ nhất, trong đó năng lượng chùm thứ hai cao hơn năng lượng chùm thứ nhất, và

điều chỉnh năng lượng chùm của một hoặc nhiều bộ phun chùm trung hòa điều chỉnh được giữa các năng lượng chùm thứ nhất và thứ hai trong khi phun một hoặc nhiều chùm trung hòa từ một hoặc nhiều bộ phun chùm trung hòa điều chỉnh được vào trong plasma FRC.

2. Phương pháp theo điểm 1, phương pháp này còn bao gồm bước phun các plasma cuộn dây hình xoắn nhỏ gọn (compact toroid - CT) từ các bộ phun CT thứ nhất và thứ hai vào 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 đối lập một cách hoàn toàn ở các phía đối lập của mặt phẳng giữa của buồng giam giữ.

3. Phương pháp theo điểm 1, trong đó các năng lượng chùm thứ nhất và thứ hai nằm trong phạm vi khoảng từ 15 keV đến 40 keV.

4. Phương pháp theo điểm 1, phương pháp này còn bao gồm bước điều khiển các năng lượng chùm của nhiều chùm trung hòa bởi tín hiệu phản hồi được nhận từ hệ thống điều khiển plasma phản hồi tích cực.

5. Phương pháp theo điểm 4, trong đó bước điều khiển các năng lượng chùm của nhiều chùm trung hòa bao gồm bước điều chỉnh các năng lượng chùm của nhiều chùm trung hòa để điều chỉnh các biên dạng lắng đọng năng lượng chùm theo hướng



xuyên tâm của nhiều chùm trung hòa để điều chỉnh các trị số gradien áp suất của nhiều chùm trung hòa.

6. Phương pháp theo điểm 1, phương pháp này còn bao gồm bước duy trì plasma FRC ở hoặc quanh trị số mà không đổi không phân rã và nâng cao nhiệt độ của plasma FRC đến trên khoảng 1,0 keV bằng cách phun các chùm nguyên tử trung hòa nhanh từ các bộ phun chùm trung hòa vào trong plasma FRC ở góc về phía mặt phẳng xuyên giữa của buồng giam giữ.

7. Phương pháp theo điểm 6, trong đó bước nâng cao nhiệt độ plasma bao gồm bước nâng cao nhiệt độ từ khoảng 1,0 keV đến khoảng 3,0 keV.

8. Phương pháp theo điểm 1, trong đó bước tạo thành plasma FRC bao gồm bước tạo thành plasma FRC tạo thành ở các đoạn tạo thành thứ nhất và thứ hai đối lập được ghép với buồng giam giữ và gia tốc plasma FRC tạo thành từ các đoạn tạo thành thứ nhất và thứ hai về phía mặt phẳng xuyên giữa của buồng giam giữ trong đó hai plasma FRC tạo thành hợp nhất để tạo thành plasma FRC.

9. Phương pháp theo điểm 8, trong đó bước gia tốc plasma FRC tạo thành từ các đoạn tạo thành thứ nhất và thứ hai về phía mặt phẳng xuyên giữa của buồng giam giữ bao gồm bước qua plasma FRC tạo thành từ các đoạn tạo thành thứ nhất và thứ hai qua các bộ làm chệch hướng bên trong thứ nhất và thứ hai được ghép với các đầu đối lập của buồng giam giữ đặt vào giữa buồng giam giữ và các đoạn tạo thành thứ nhất và thứ hai.

10. Phương pháp theo điểm 9, trong đó bước qua plasma FRC tạo thành từ các đoạn tạo thành thứ nhất và thứ hai qua các bộ làm chệch hướng bên trong thứ nhất và thứ hai bao gồm bước dừng kích hoạt các bộ làm chệch hướng bên trong thứ nhất và thứ hai dưới dạng plasma FRC tạo thành từ các đoạn tạo thành thứ nhất và thứ hai qua các bộ làm chệch hướng bên trong thứ nhất và thứ hai.

11. Phương pháp theo điểm 9, phương pháp này còn bao gồm bước dẫn hướng các bề mặt đường sức từ của plasma FRC tạo thành vào trong các bộ làm chệch hướng bên trong thứ nhất và thứ hai.

12. Phương pháp theo điểm 6, phương pháp này còn bao gồm bước tạo ra một trong số trường lưỡng cực từ và trường bốn cực từ trong buồng với các cuộn dây hình yên ngựa được ghép với buồng.

13. Phương pháp theo điểm 6, phương pháp này còn bao gồm bước quy định các bề mặt bên trong của buồng và các bề mặt bên trong của các đoạn tạo thành thứ nhất và thứ hai, các bộ làm chệch hướng thứ nhất và thứ hai đặt vào giữa buồng giam giữ và các đoạn tạo thành thứ nhất và thứ hai, và các bộ làm chệch hướng bên ngoài thứ nhất và thứ hai được ghép với các đoạn tạo thành thứ nhất và thứ hai với hệ thống thu.

14. Phương pháp theo điểm 6, phương pháp này còn bao gồm bước điều khiển biên dạng điện trường theo hướng xuyên tâm trong lớp mép của plasma FRC.

15. Phương pháp theo điểm 14, trong đó bước điều khiển biên dạng điện trường theo hướng xuyên tâm trong lớp mép của plasma FRC bao gồm bước áp dụng sự phân bố của điện thế vào nhóm các bề mặt luồng mở của plasma FRC với các điện cực định thiên.

16. Phương pháp theo điểm 1, phương pháp này còn bao gồm bước ổn định plasma FRC theo hướng xuyên tâm trục giao với trục dọc của buồng giam giữ để định vị plasma FRC đối xứng trục quanh trục dọc và theo hướng trục dọc dọc theo trục dọc để định vị plasma FRC đối xứng trục quanh mặt phẳng giữa của buồng giam giữ.

17. Phương pháp theo điểm 16, phương pháp này còn bao gồm bước tạo ra từ trường được áp dụng trong buồng với các cuộn dây gần như là dòng điện một chiều mở rộng quanh buồng.

18. Phương pháp theo điểm 16, trong đó bước ổn định plasma FRC theo hướng xuyên tâm bao gồm bước điều hướng từ trường được áp dụng để gây ra độ ổn định theo hướng xuyên tâm và độ không ổn định theo hướng dọc trục trong plasma FRC.

19. Phương pháp theo điểm 16, trong đó bước ổn định theo hướng dọc trục plasma FRC bao gồm bước tạo ra các từ trường theo hướng xuyên tâm thứ nhất và thứ hai, trong đó các từ trường theo hướng xuyên tâm thứ nhất và thứ hai tương tác với FRC để dịch chuyển theo hướng dọc trục plasma FRC để định vị plasma FRC đối xứng trục quanh mặt phẳng giữa.

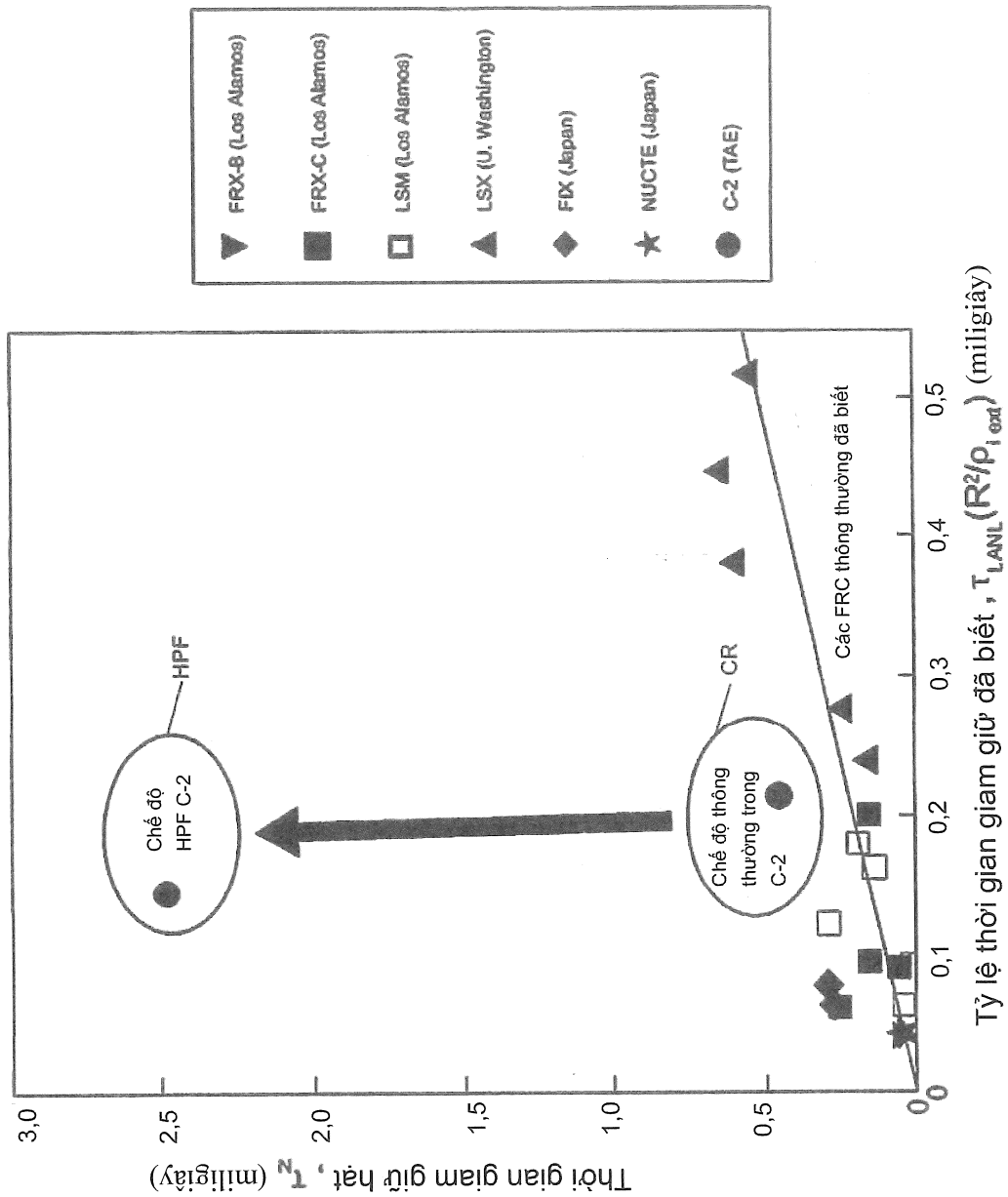


Fig.1

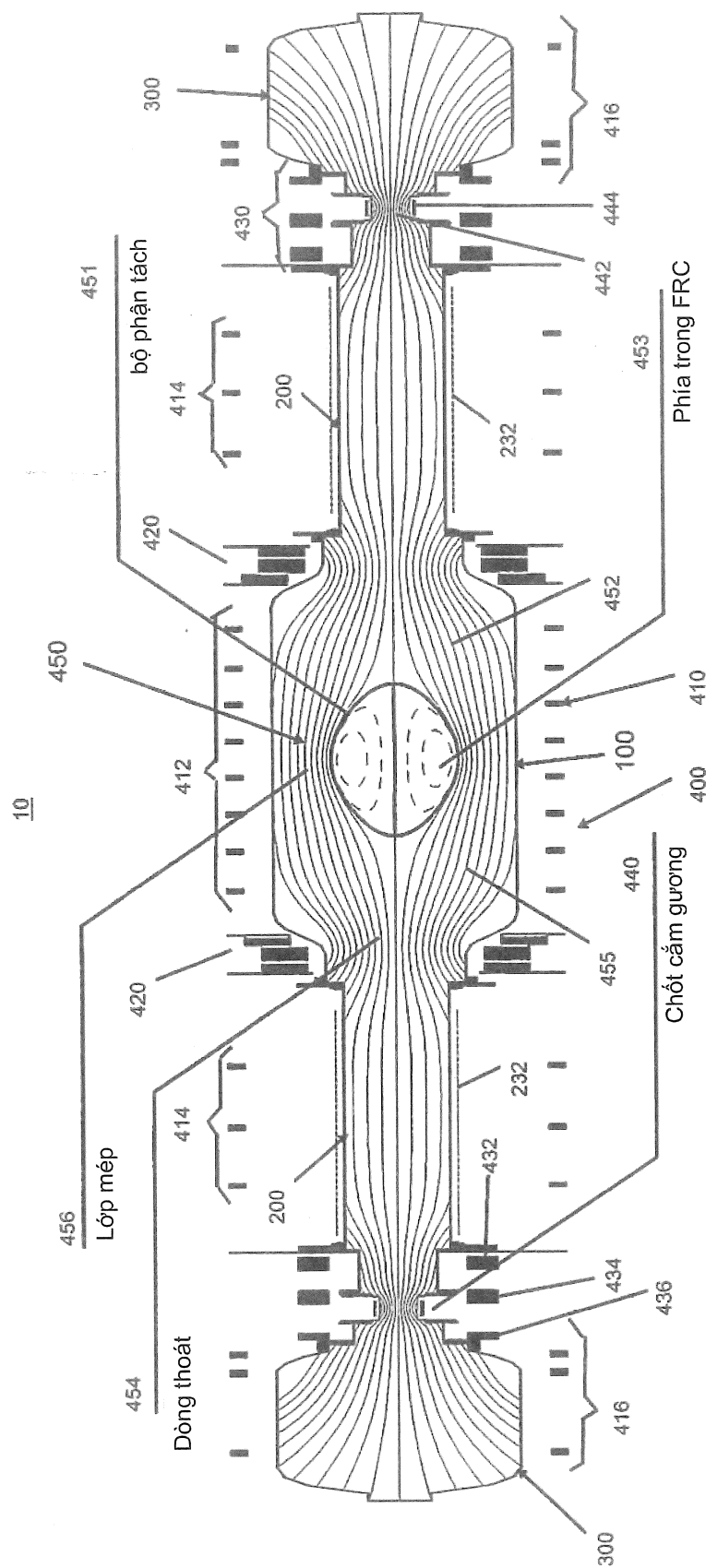
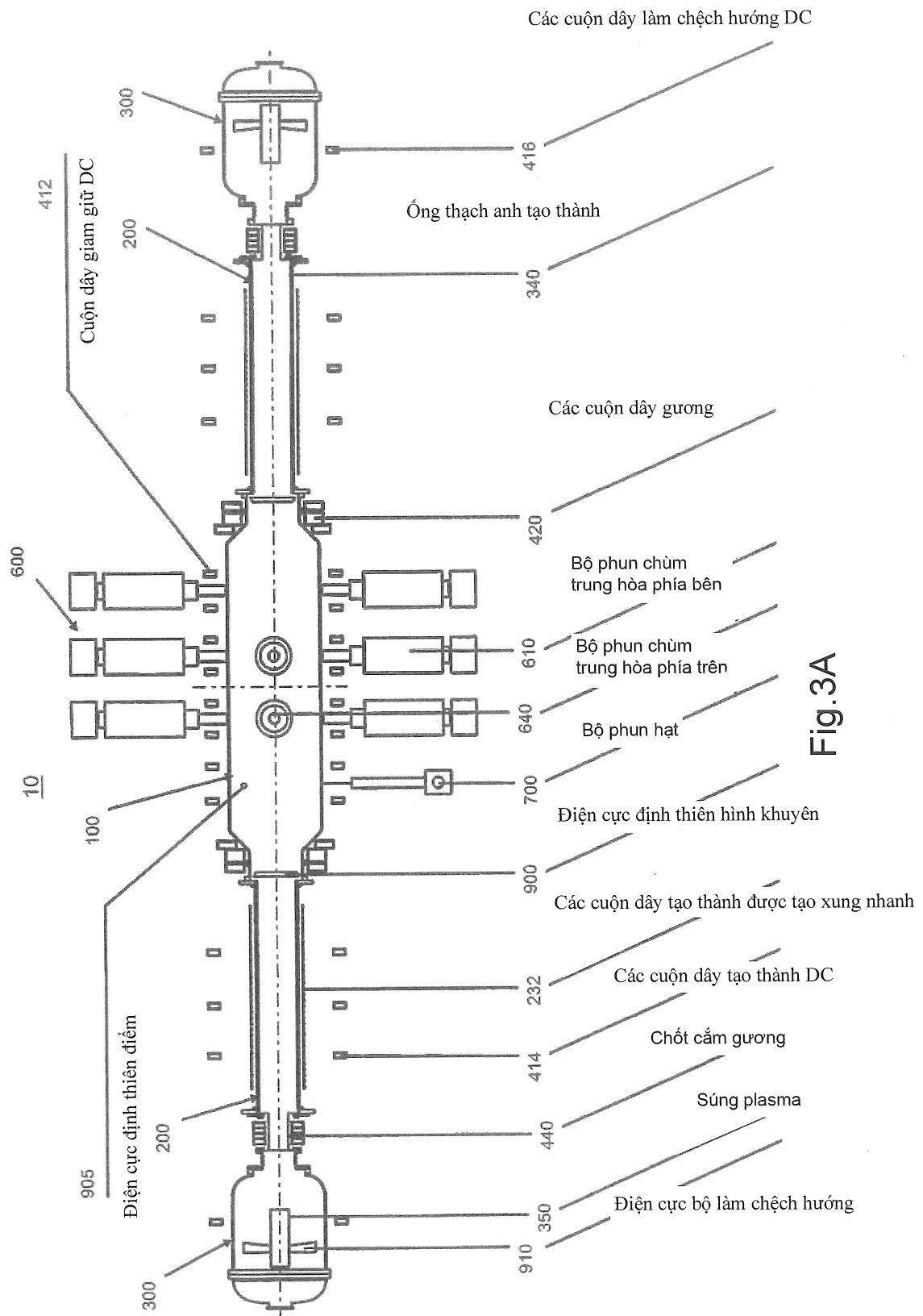


Fig. 2



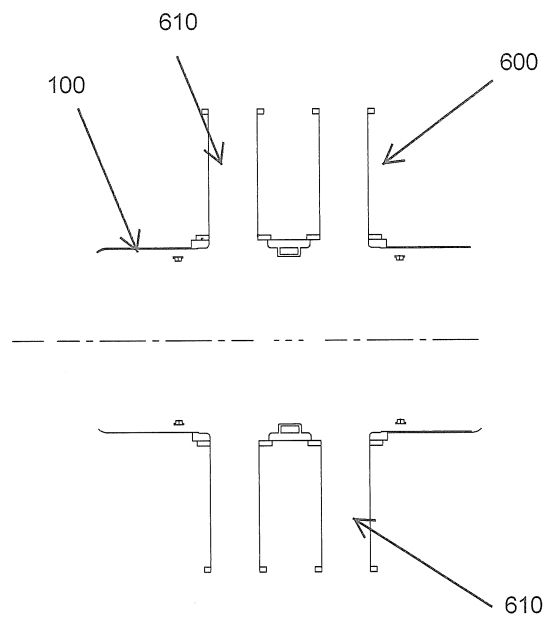


Fig.3B

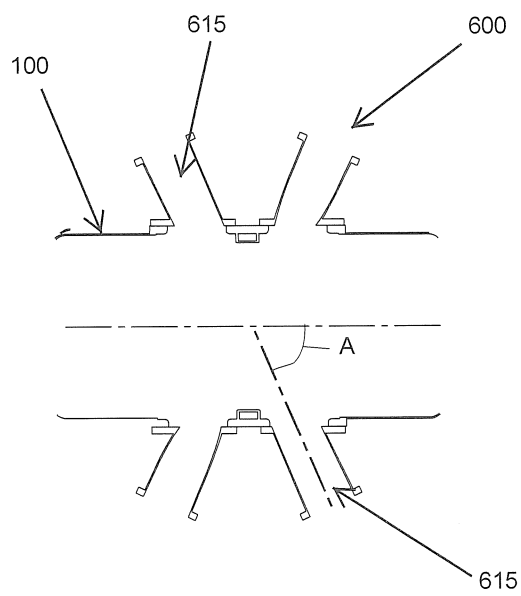


Fig.3C

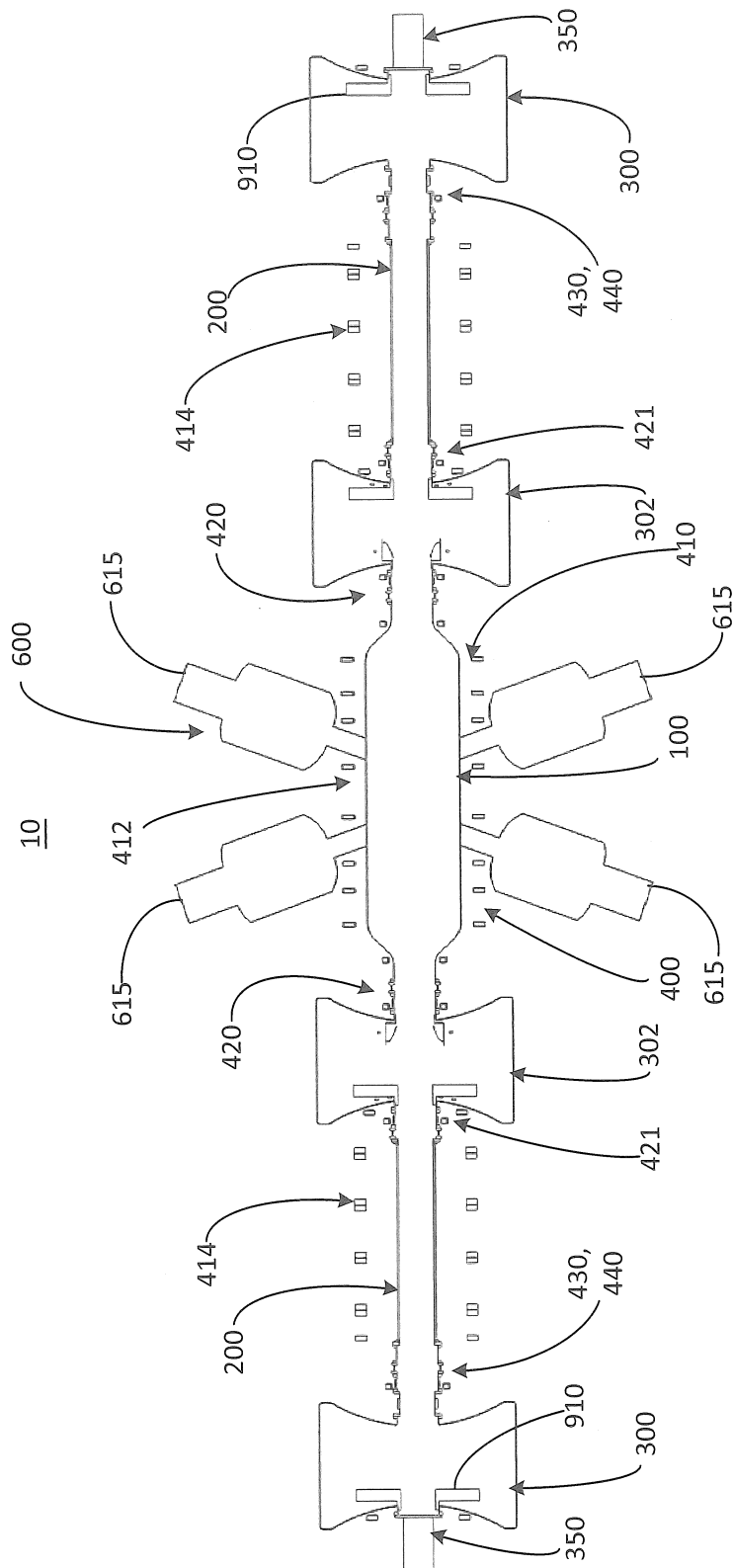


Fig. 3D



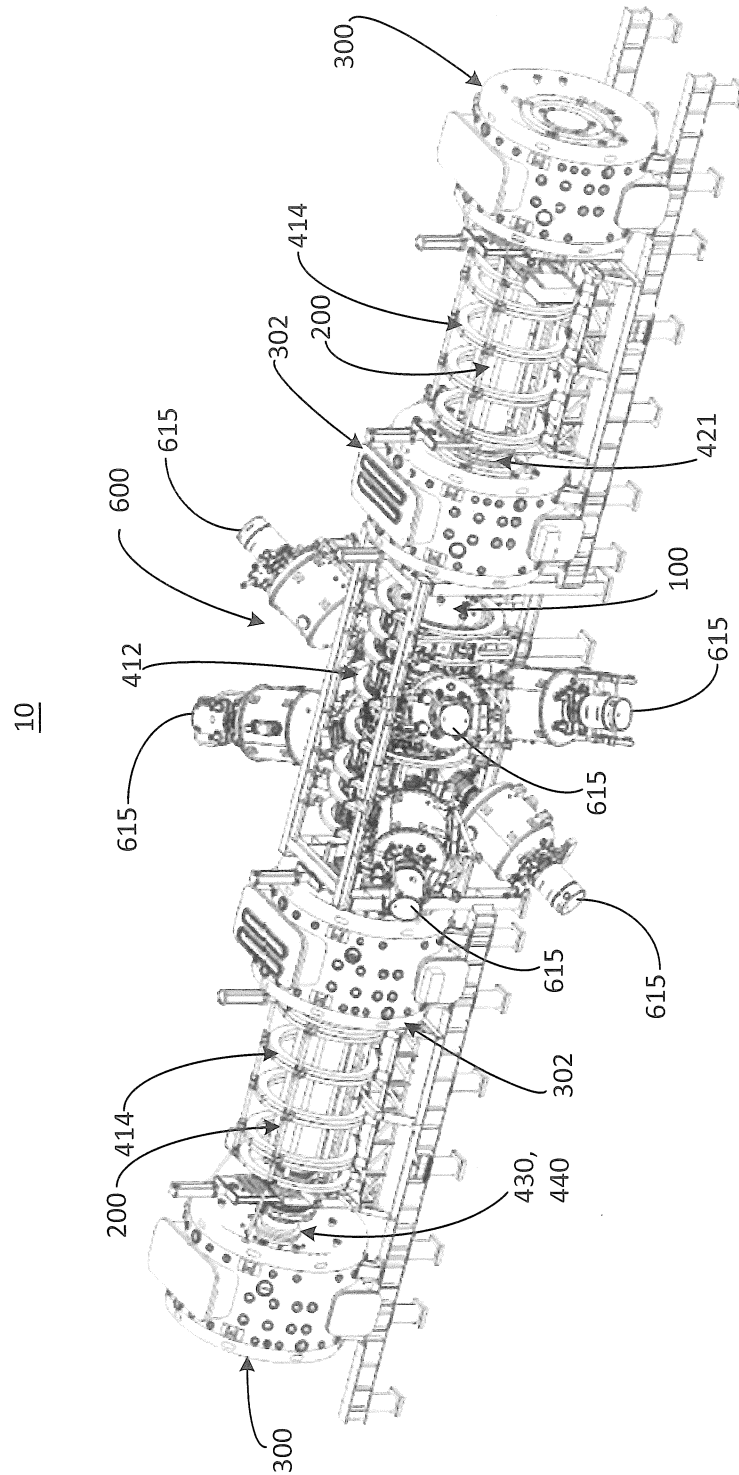


Fig.3E

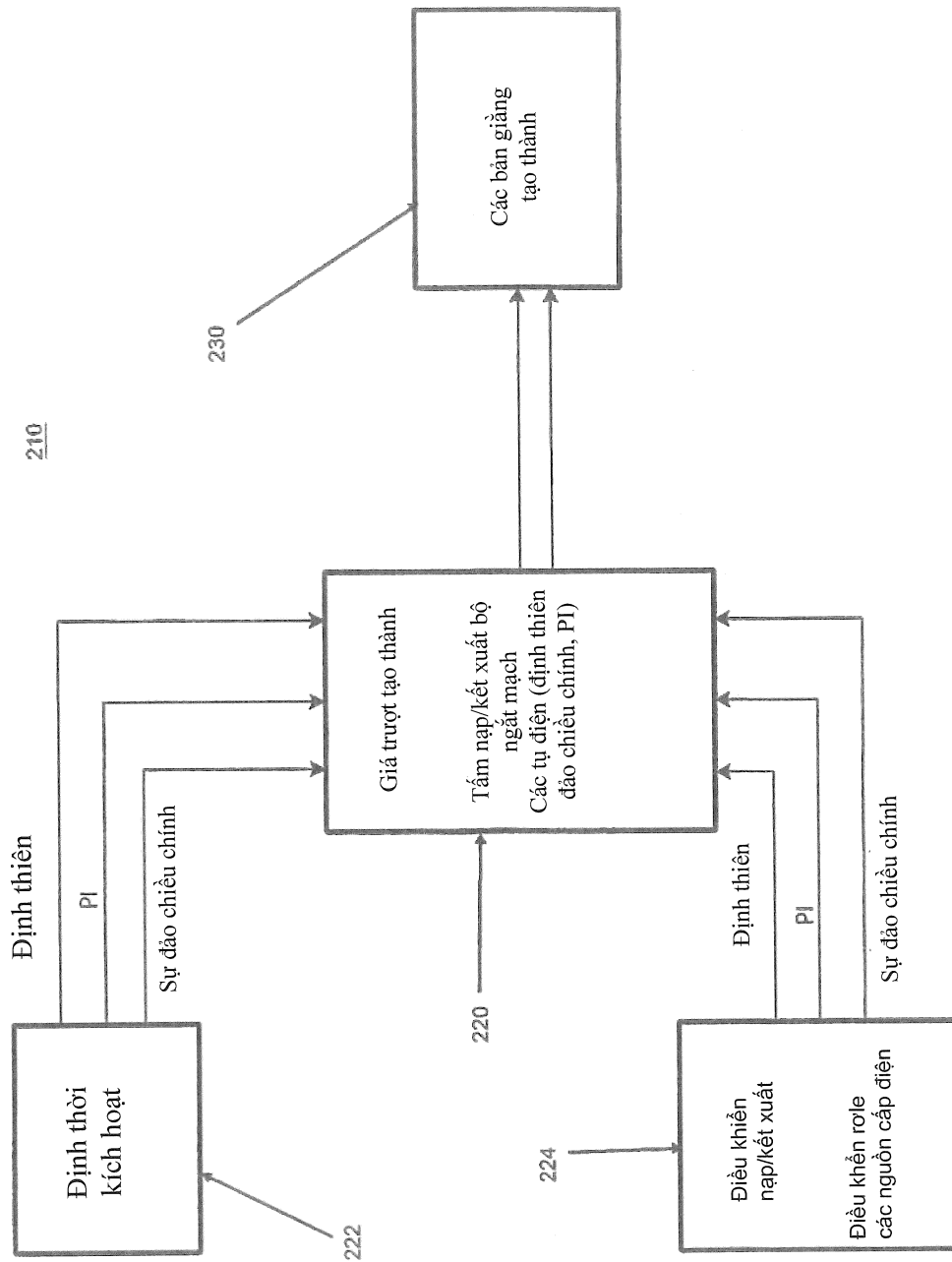


Fig.4

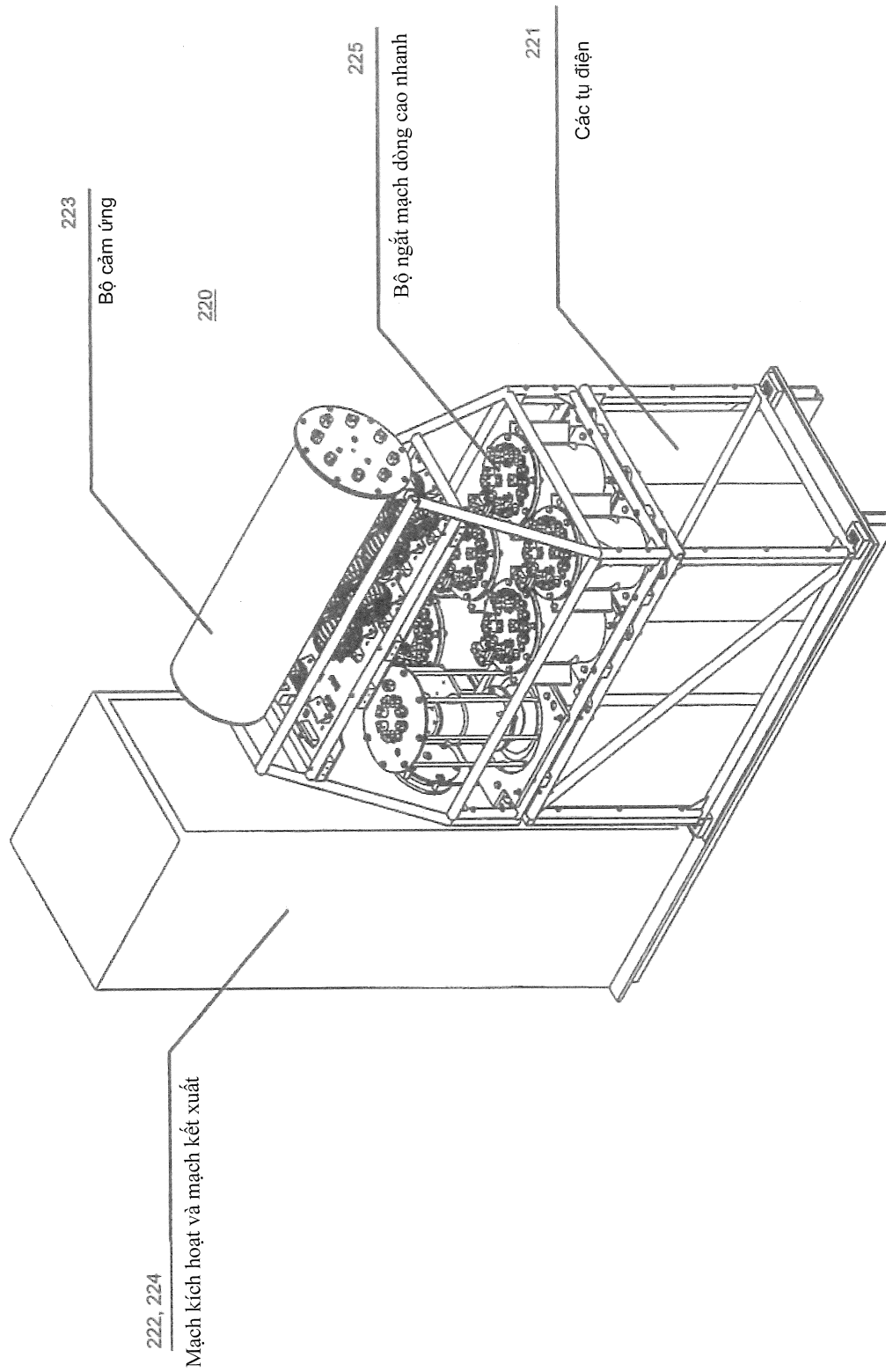


Fig.5

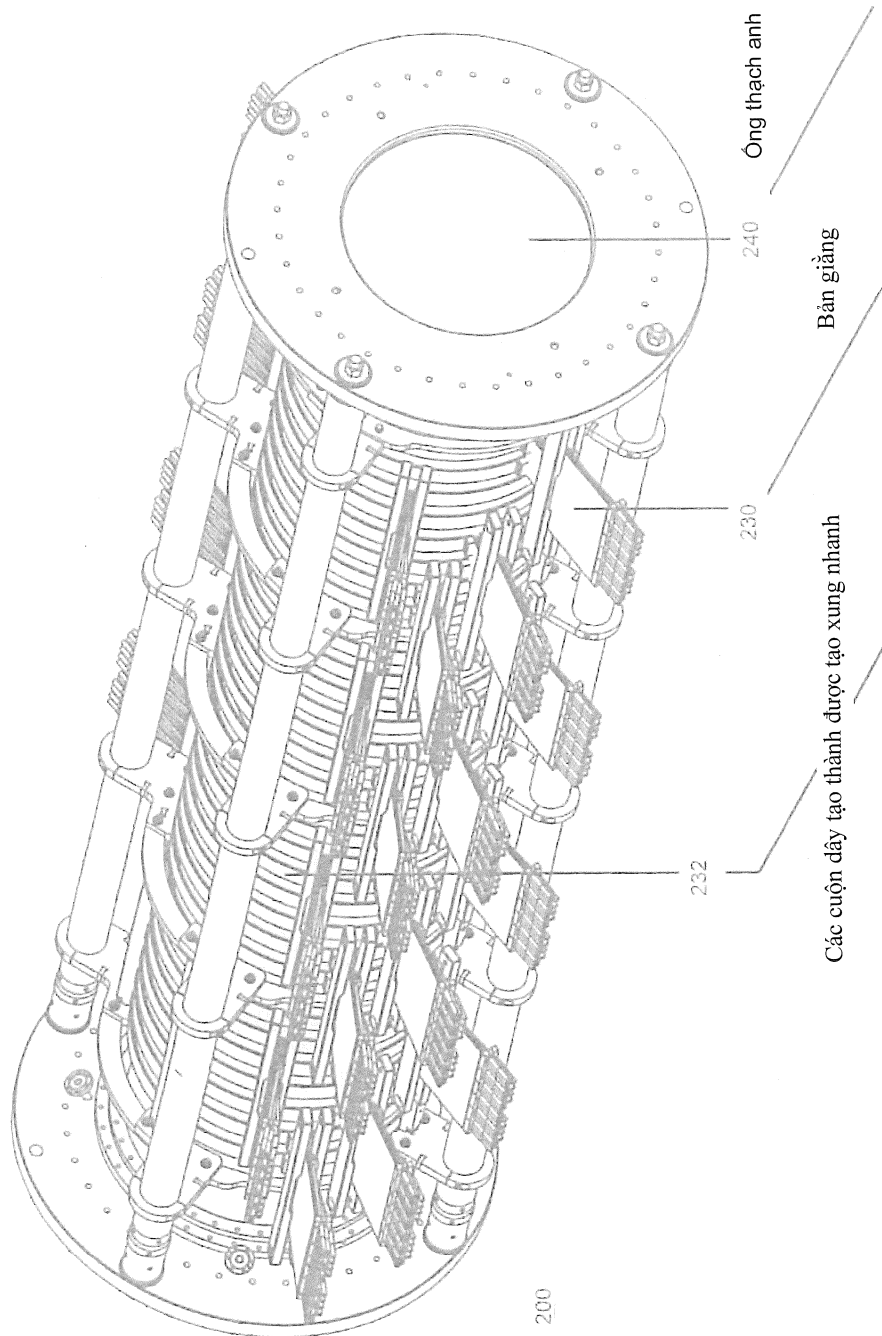


Fig. 6

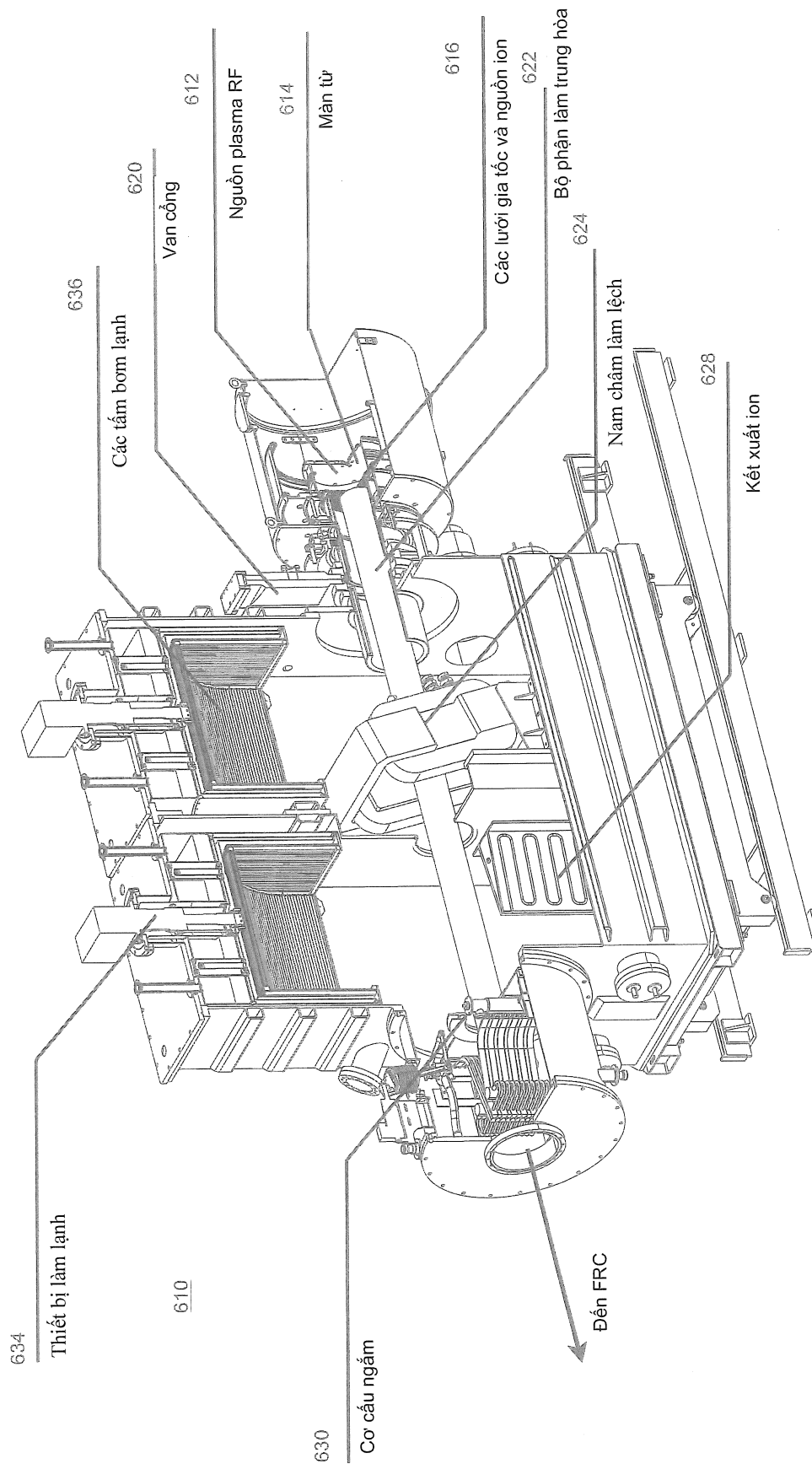


Fig.7

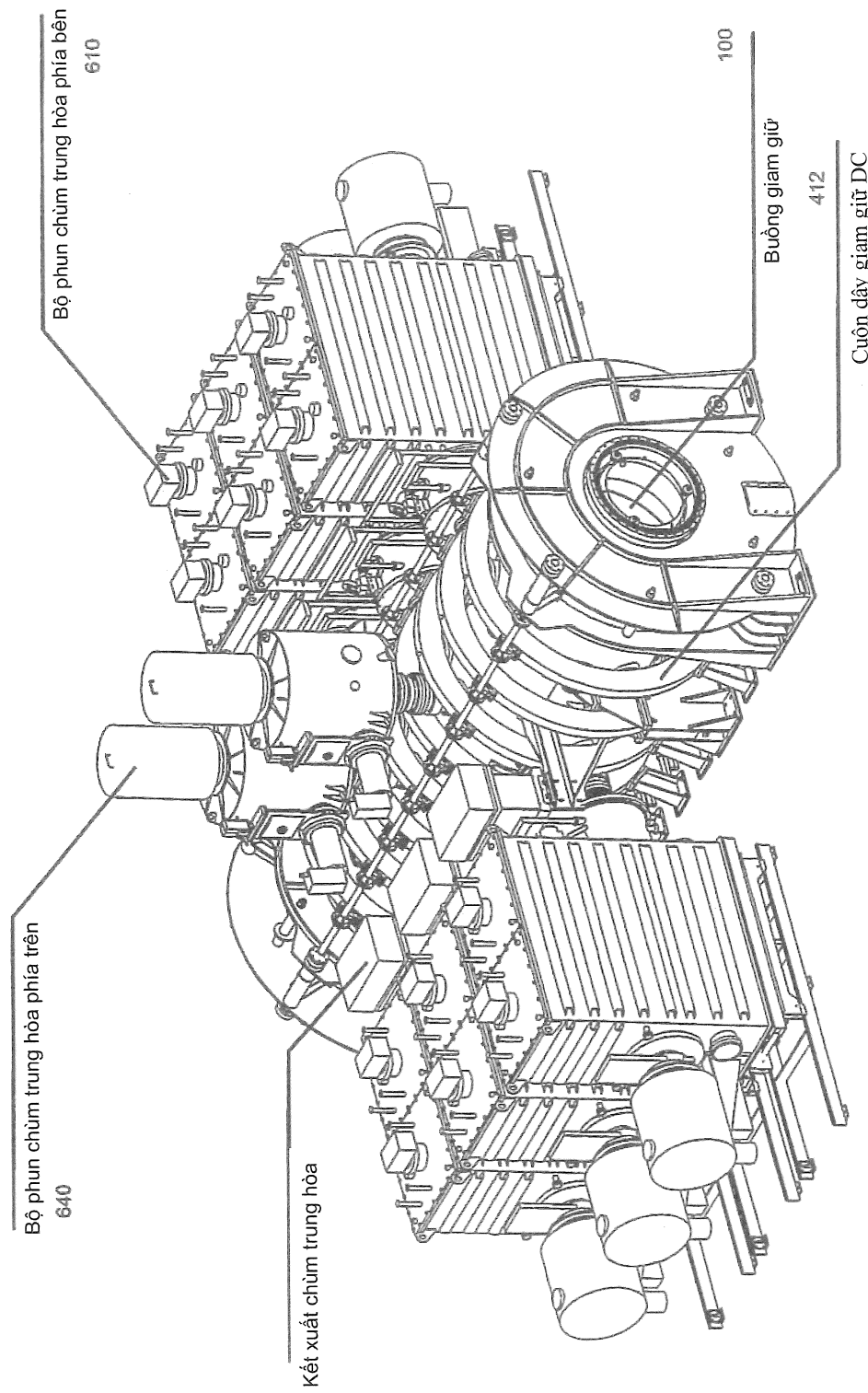


Fig.8

12/32

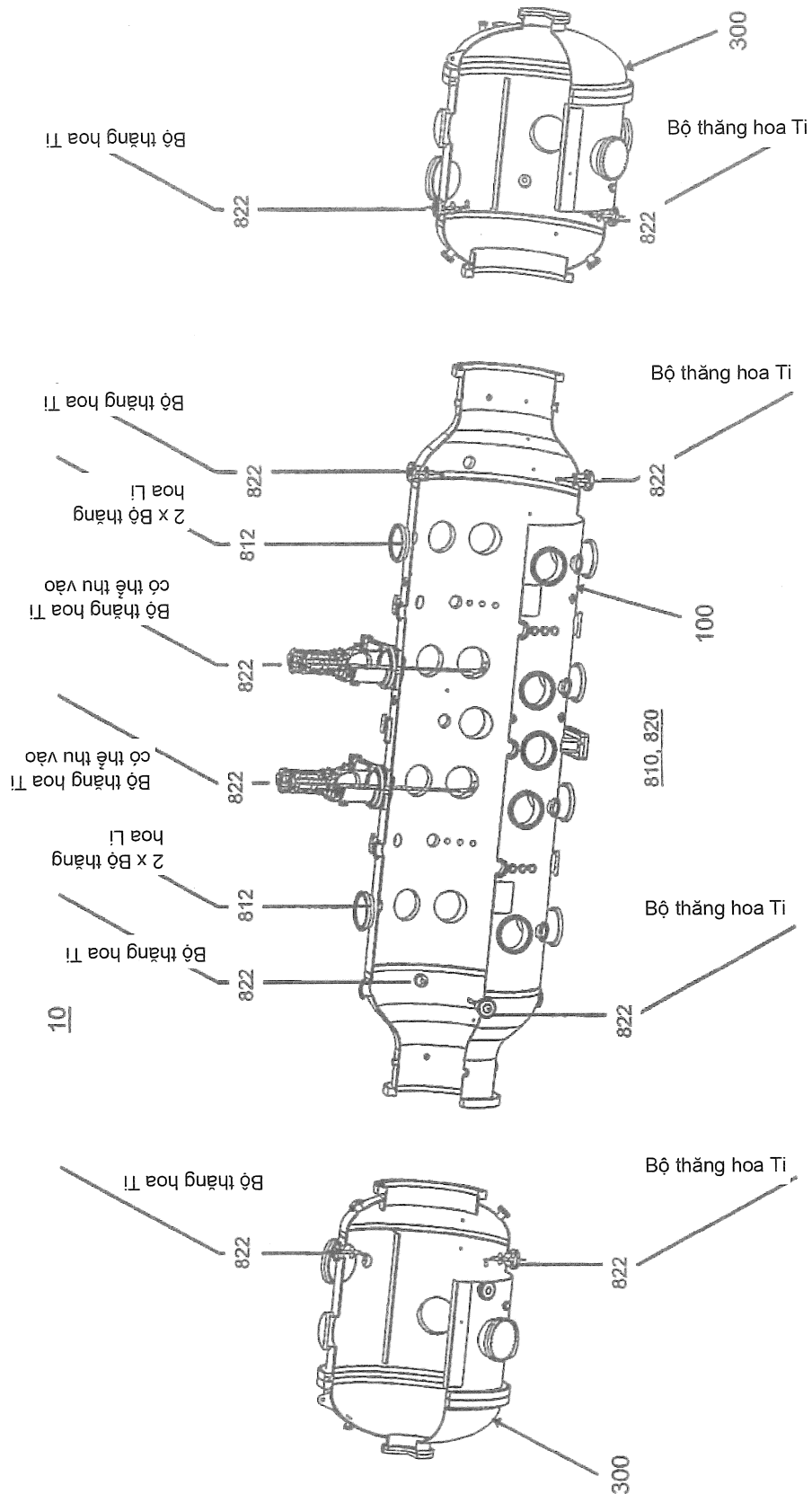


Fig.9

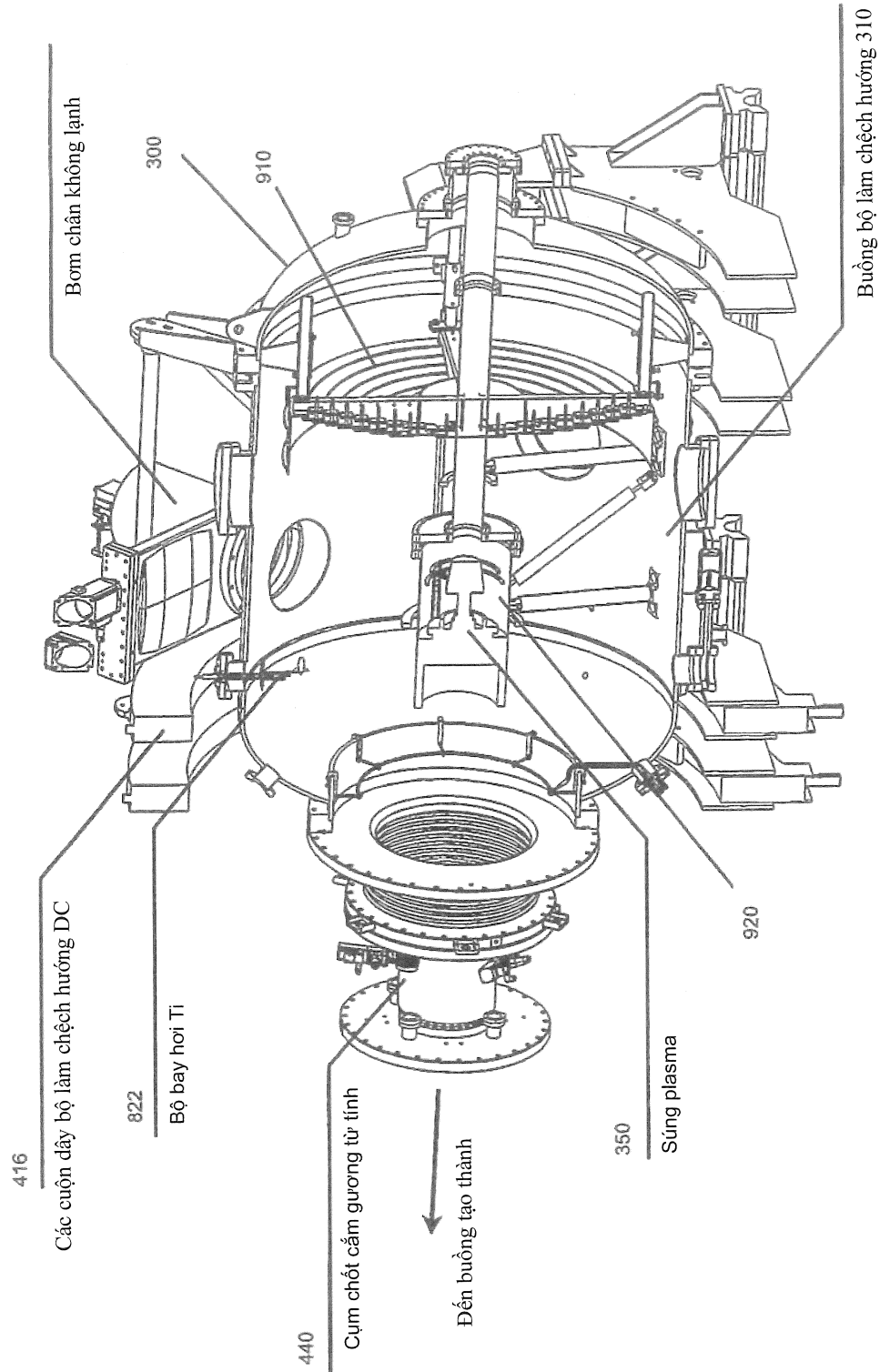


Fig.10



14/32

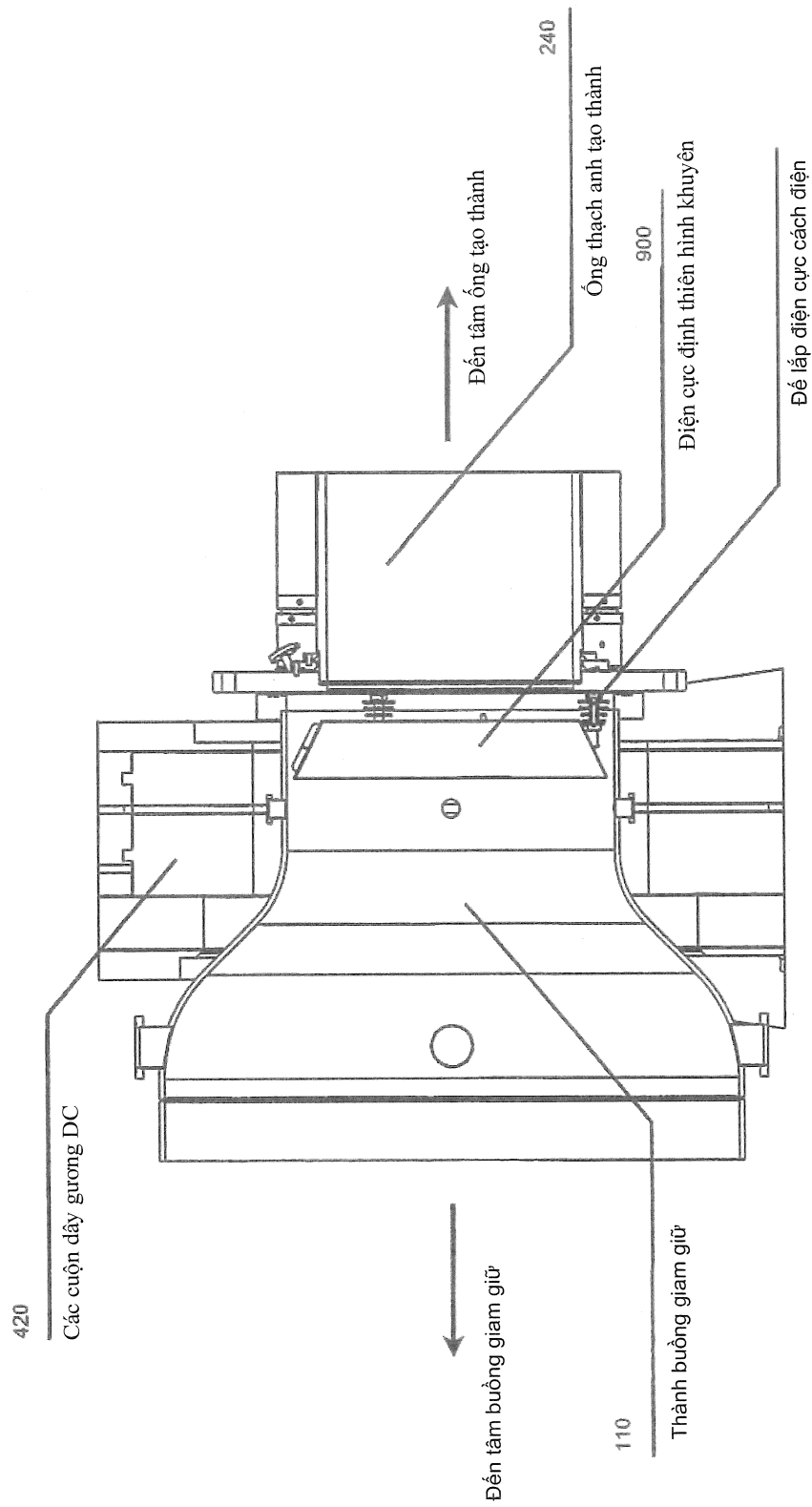


Fig.11

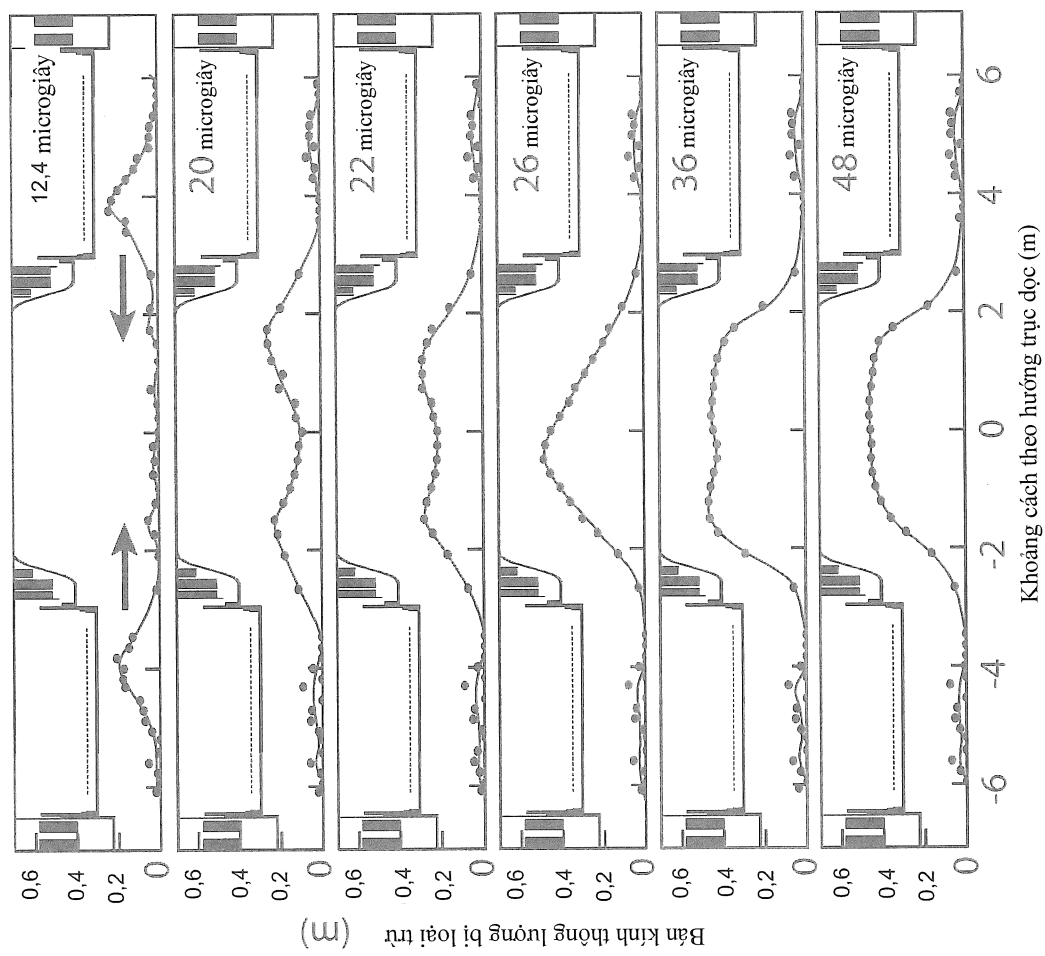


Fig.12

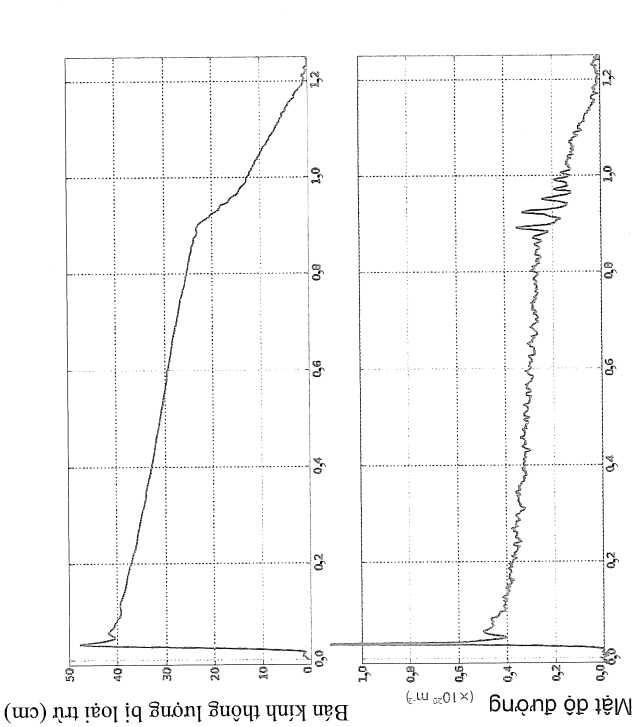


Fig.13A

Fig.13B

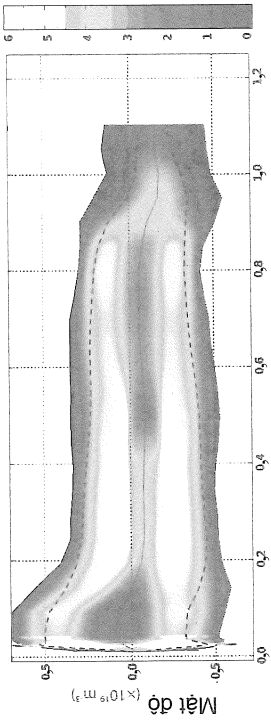


Fig.13C

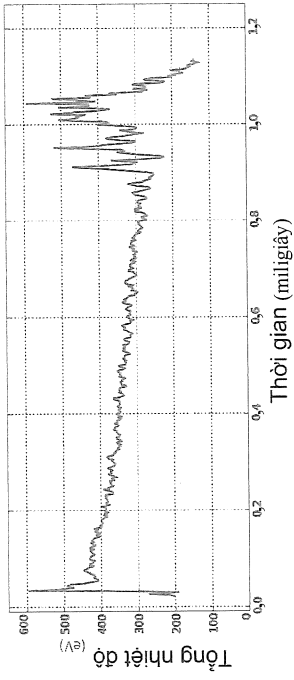
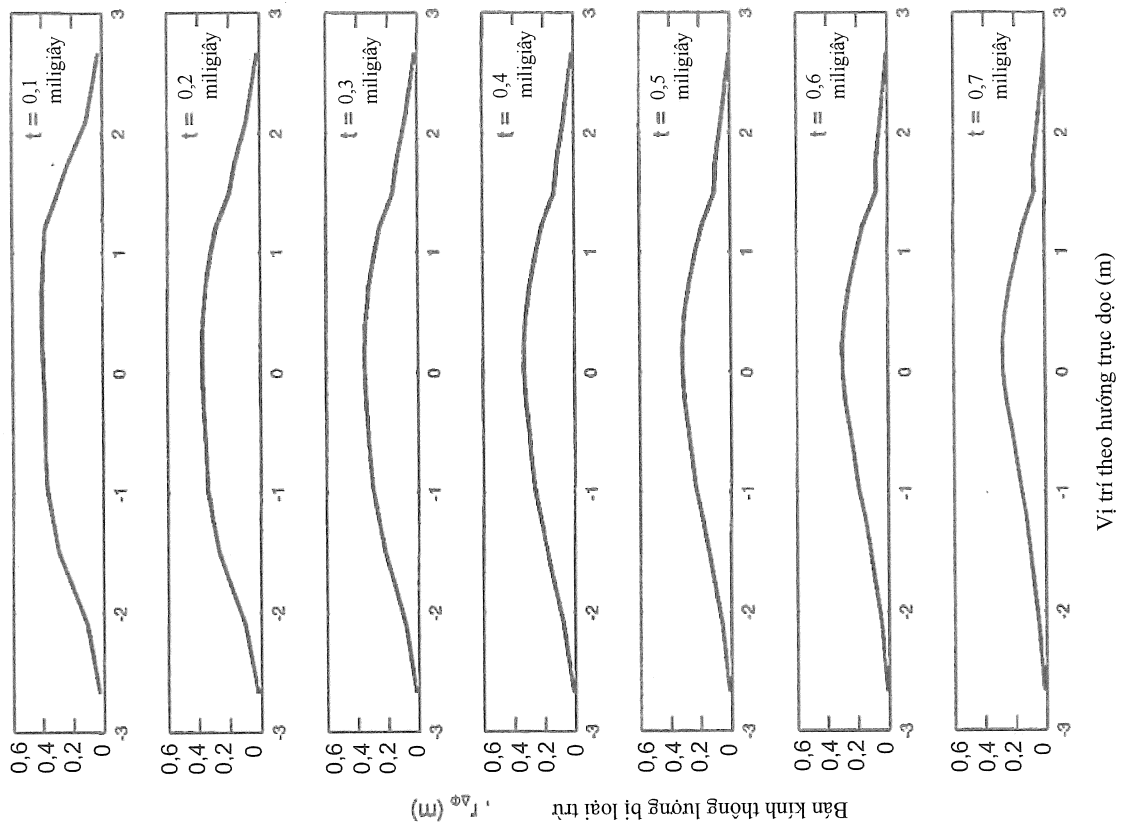


Fig.13D



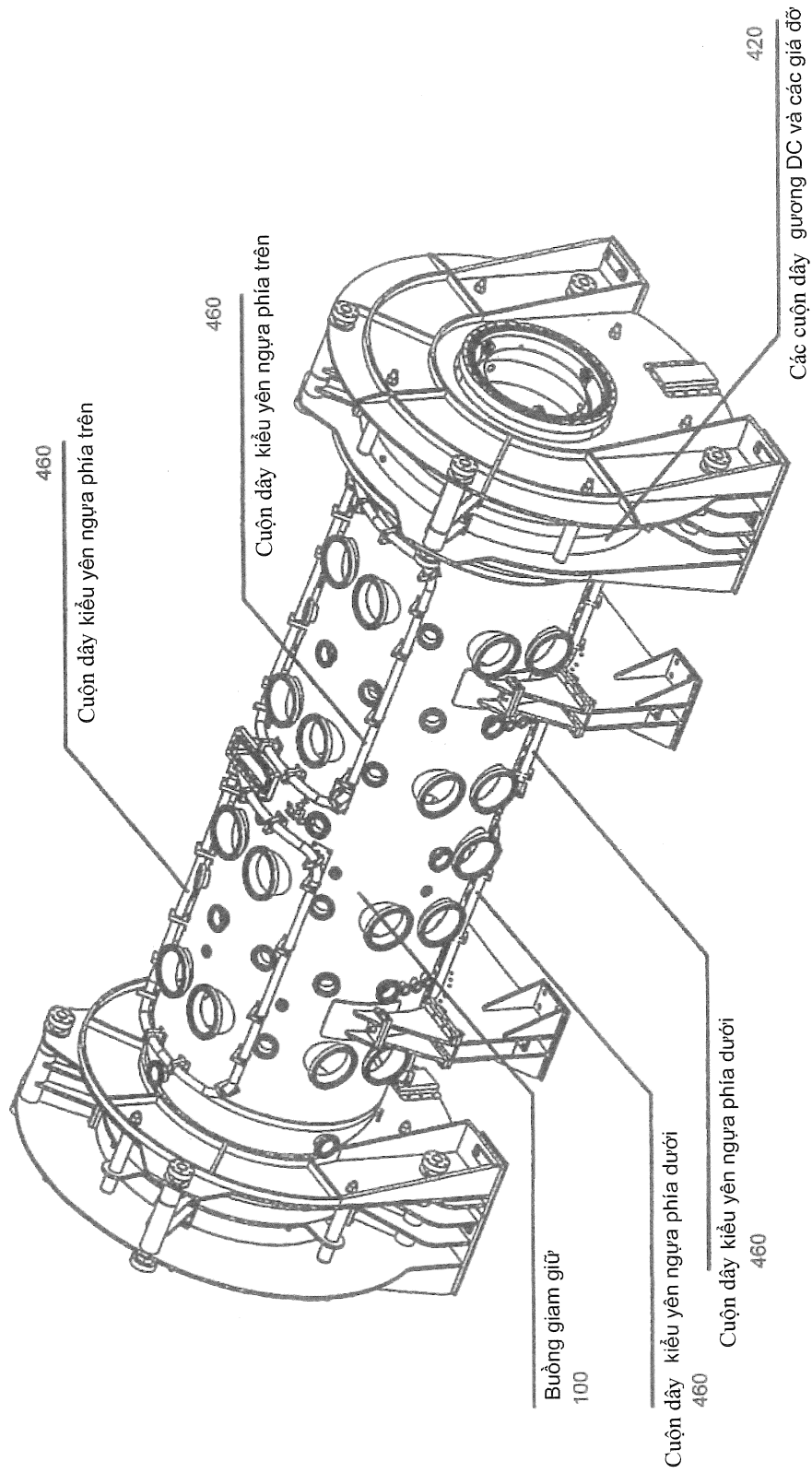


Fig.15

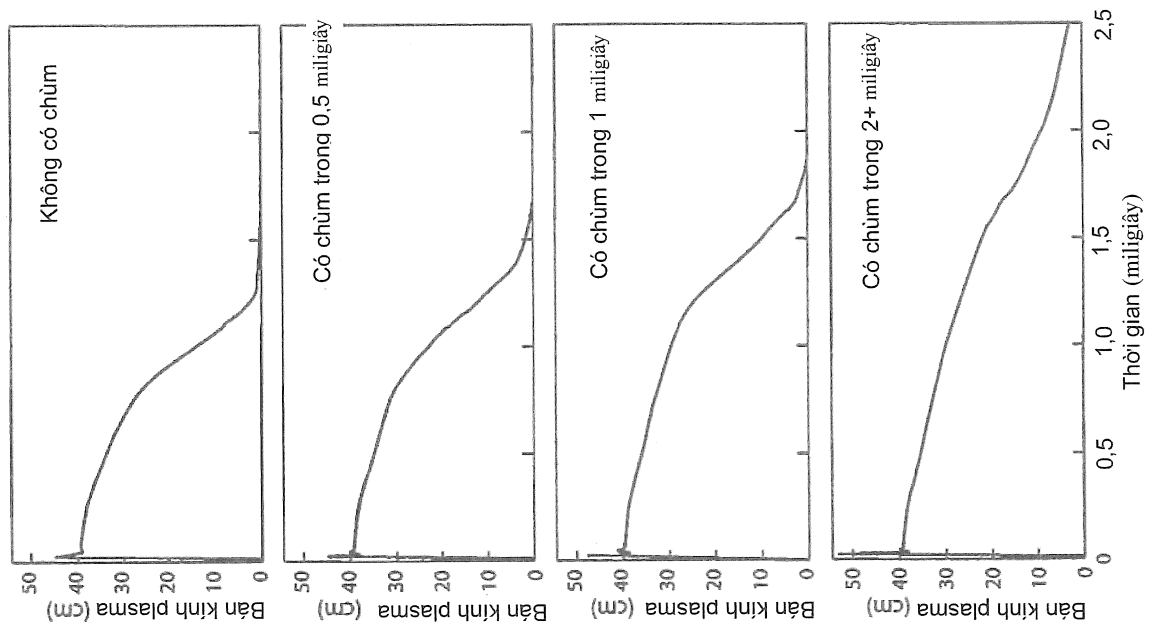


Fig. 16A

Fig. 16B

Fig. 16C

Fig. 16D

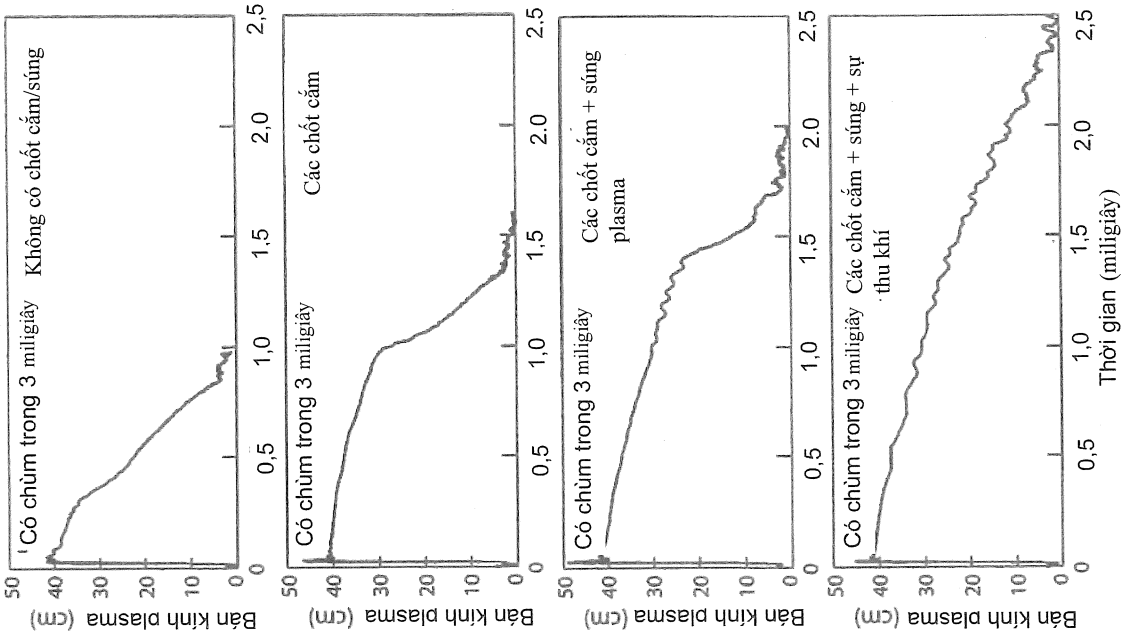


Fig.17A

Fig.17B

Fig.17C

Fig.17D

Fig.18A

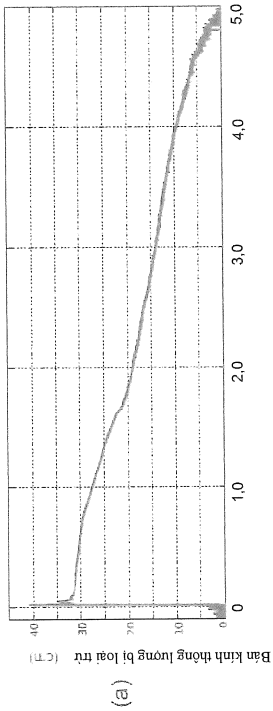


Fig.18B

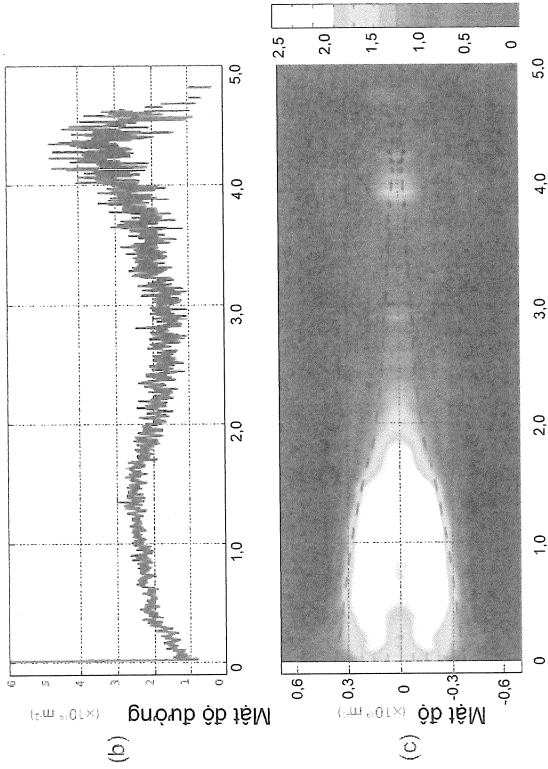


Fig.18C

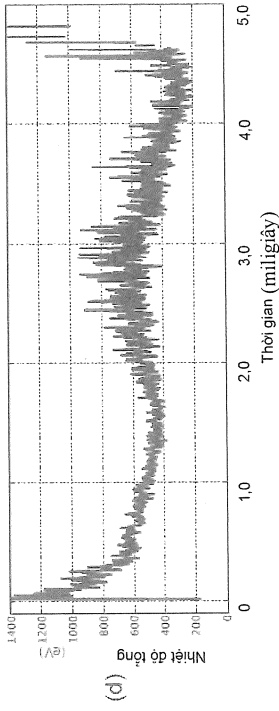


Fig.18D



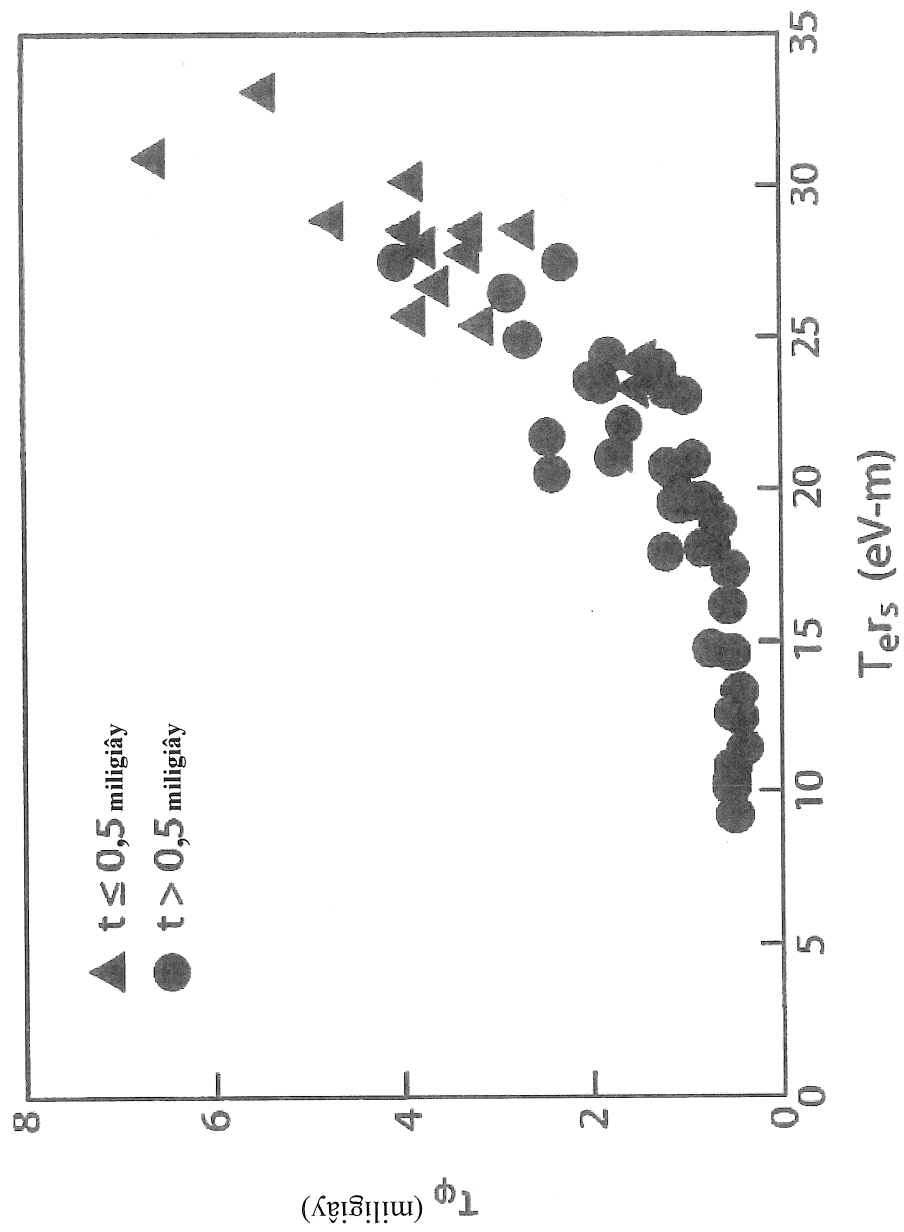


Fig.19

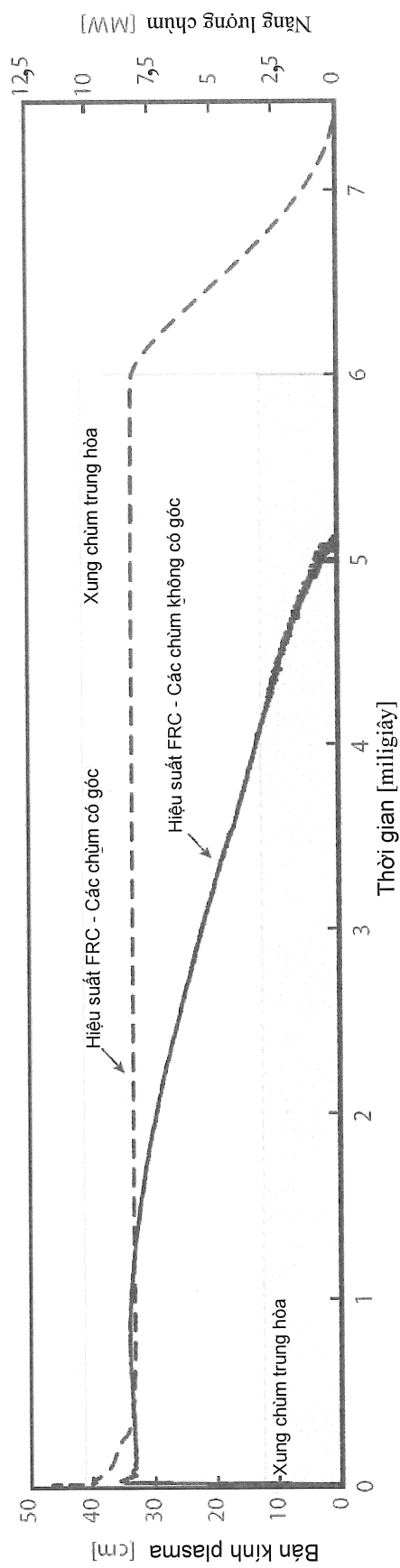


Fig.20

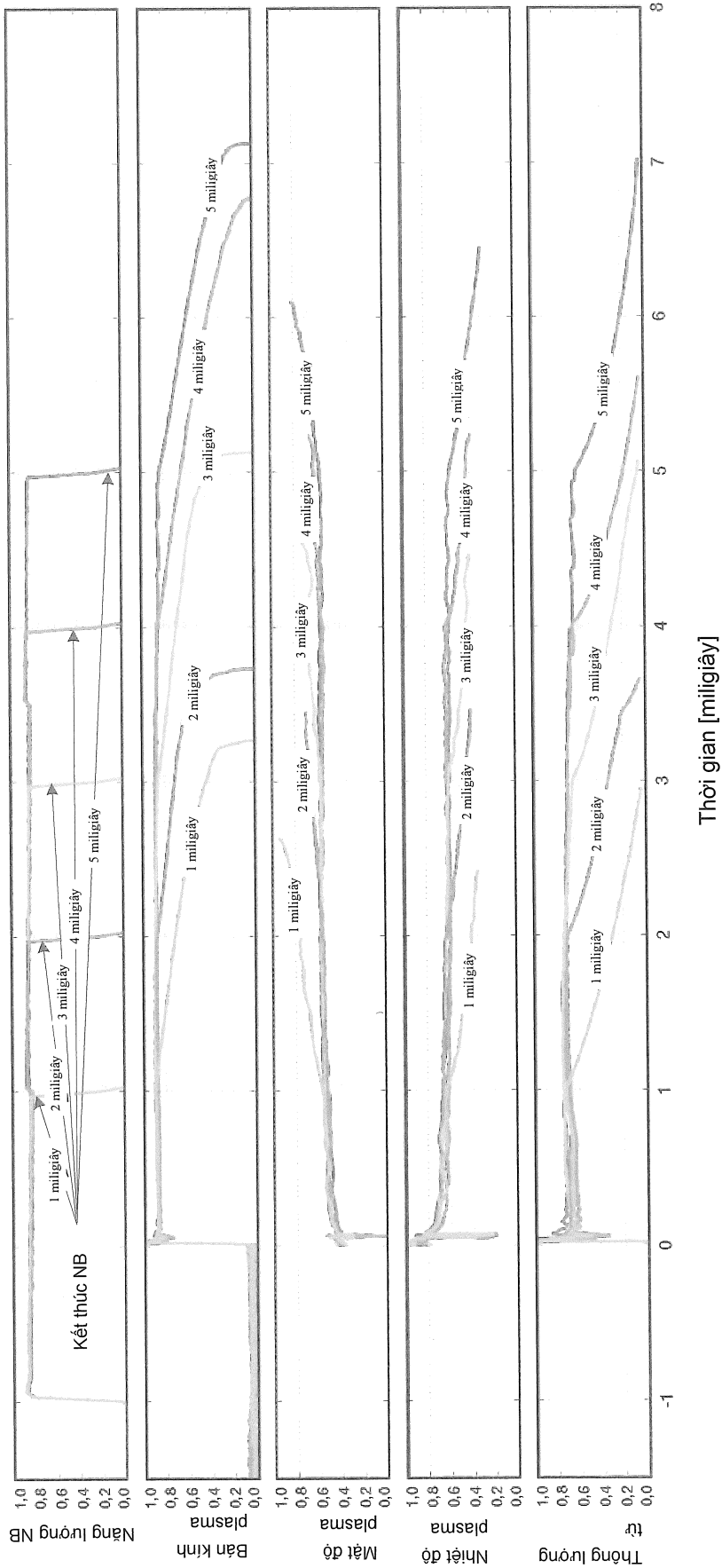


Fig.21A

Fig.21B

Fig.21C

Fig.21D

Fig.21E

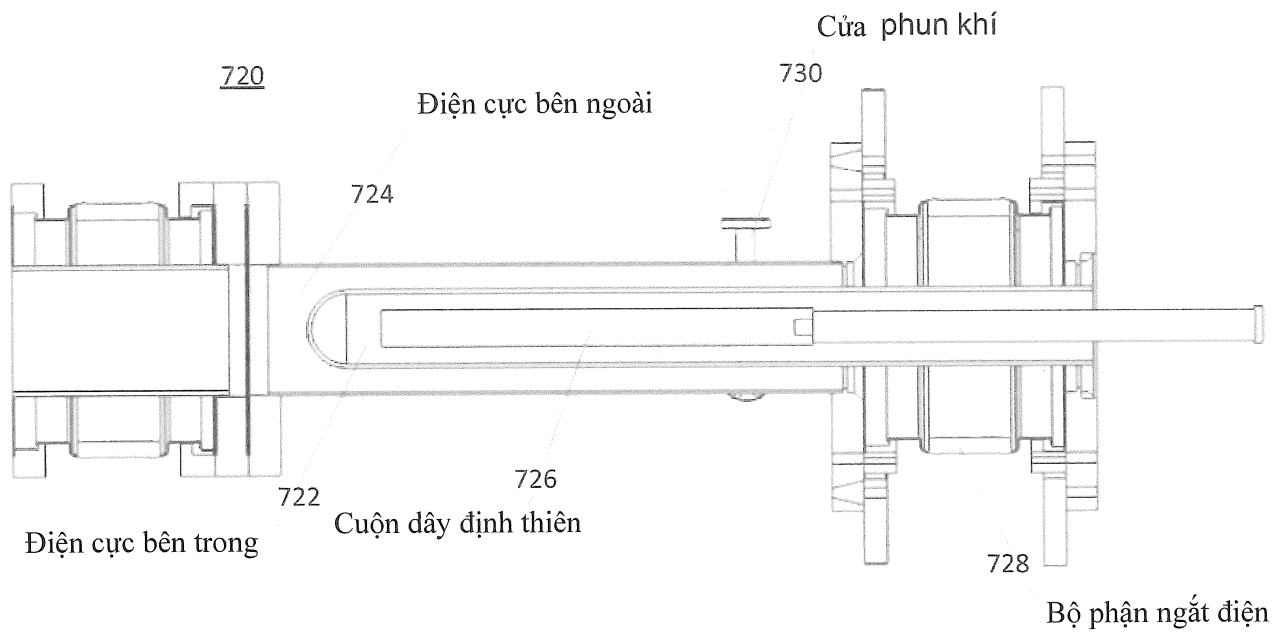


Fig. 22A

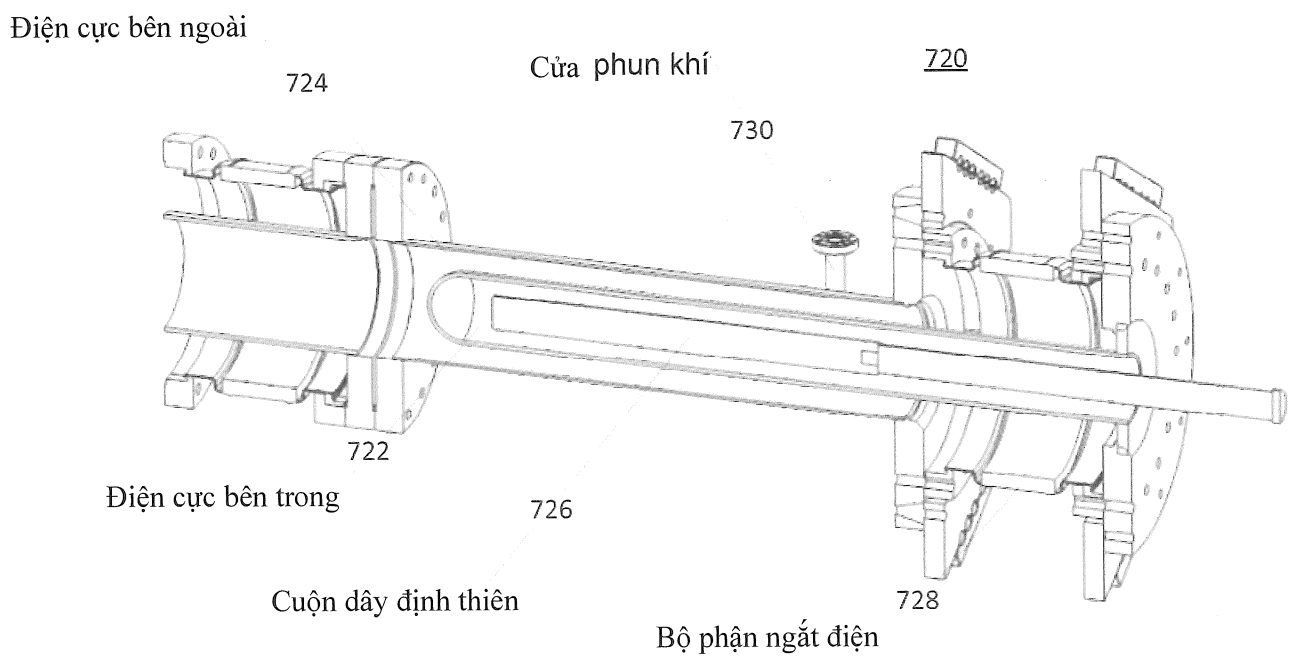


FIG. 22B

Bộ phun cuộn dây hình xuyên nhỏ gọn

720

Cuộn dây giam giữ DC

412

Bộ phun chùm trung hòa

615

Buồng giam giữ

100

720

Bộ phun cuộn dây hình xuyên nhỏ gọn

Fig.23A

Bộ phun cuộn dây hình xuyên nhỏ gọn

720

Cuộn dây giam giữ DC

412

Bộ phun chùm trung hòa

615

Buồng giam giữ

100

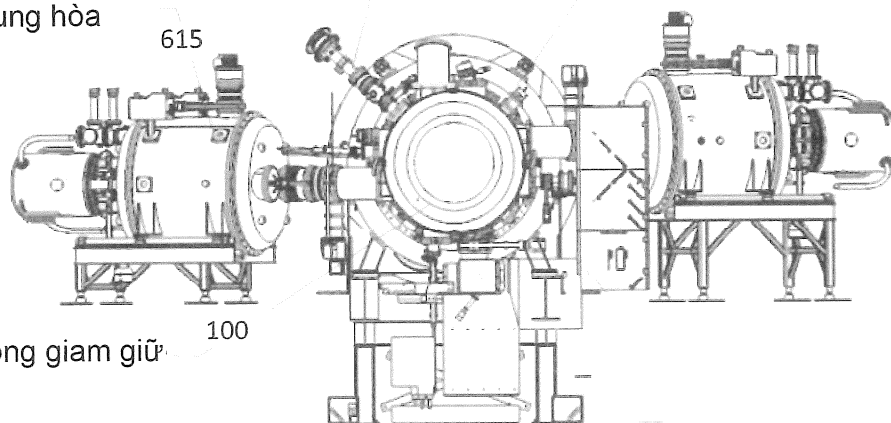


Fig.23B

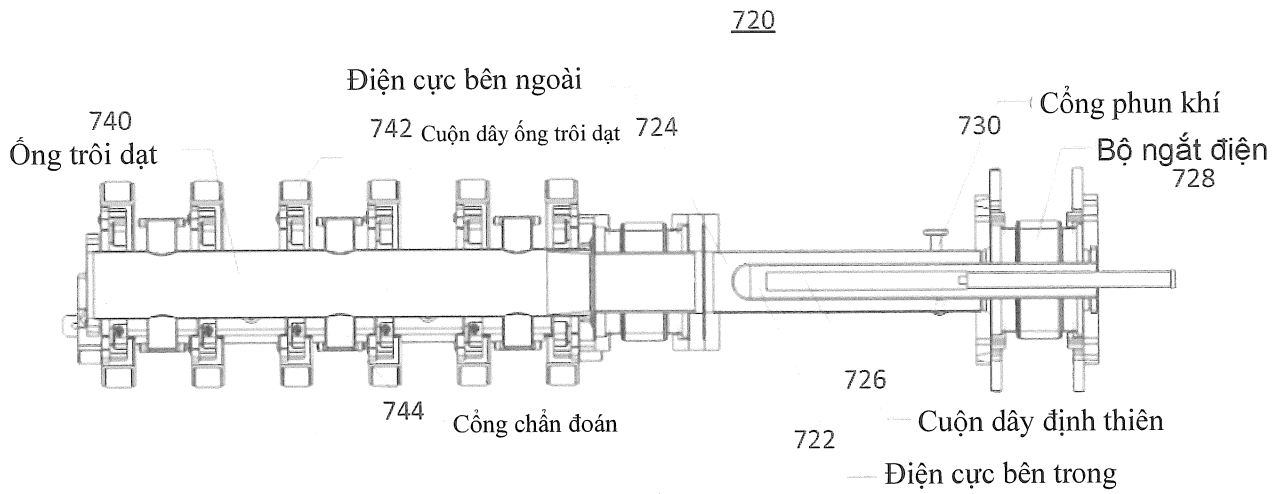


Fig. 24A

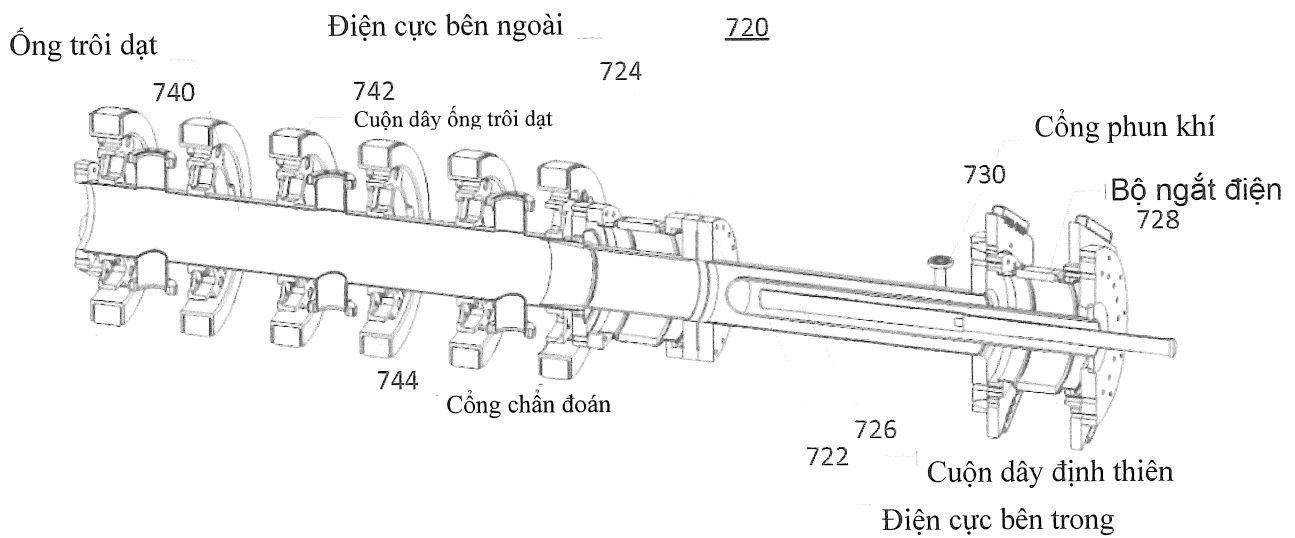


Fig. 24B

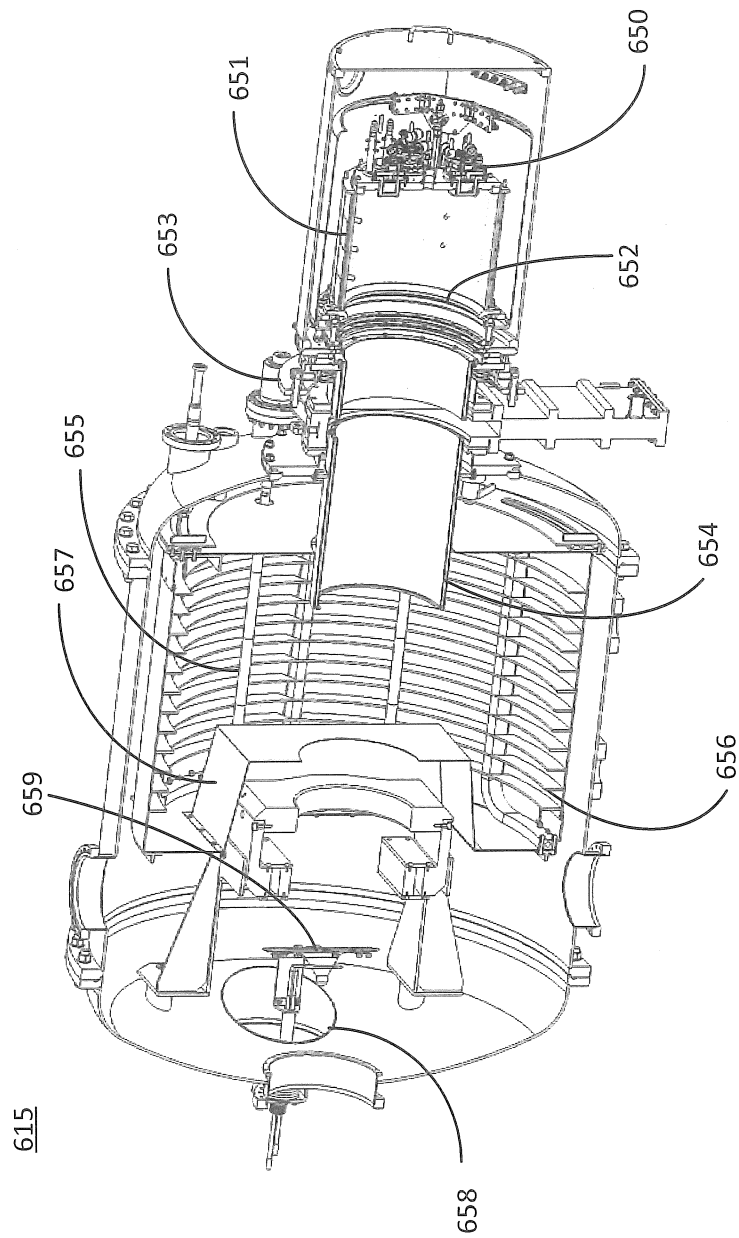


Fig.25

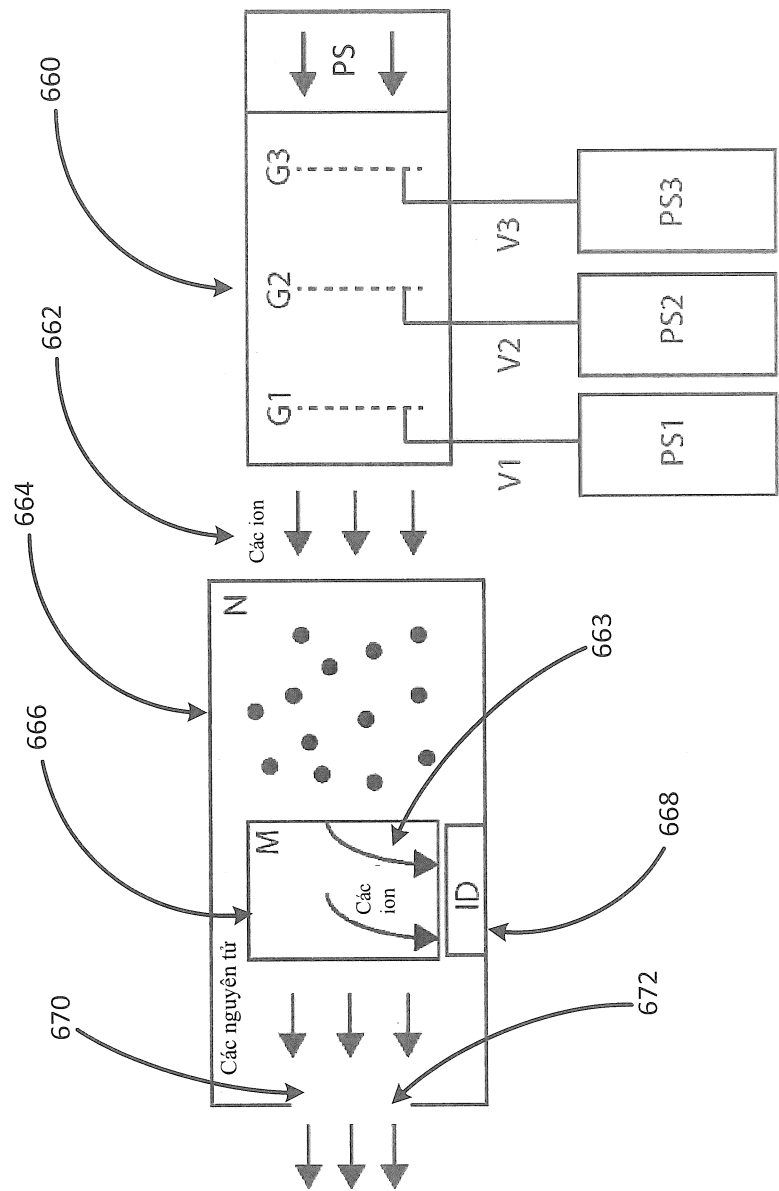


Fig.26

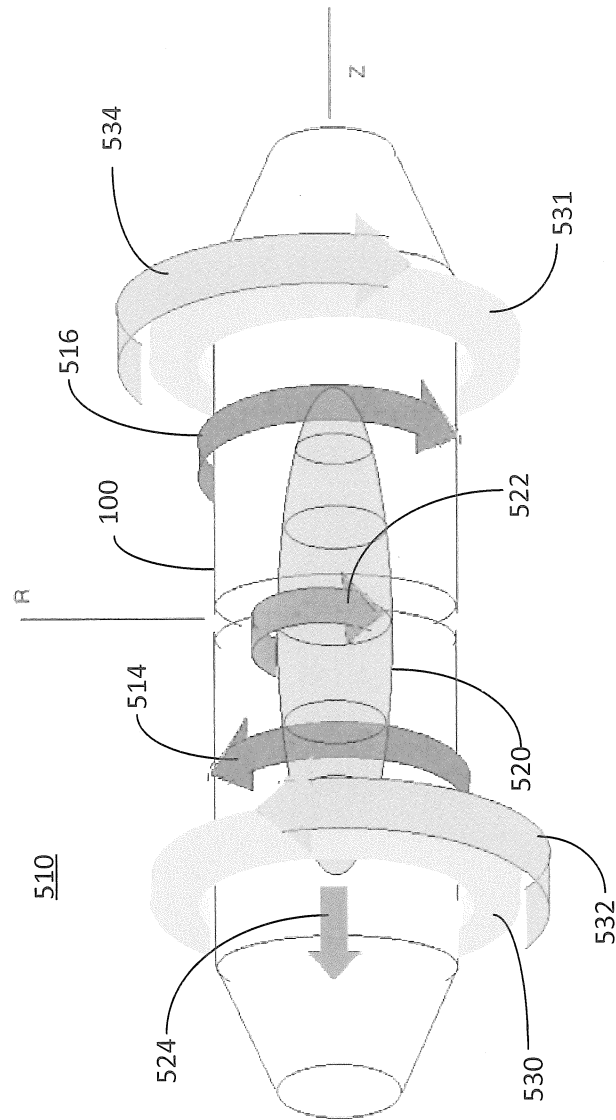


Fig. 27



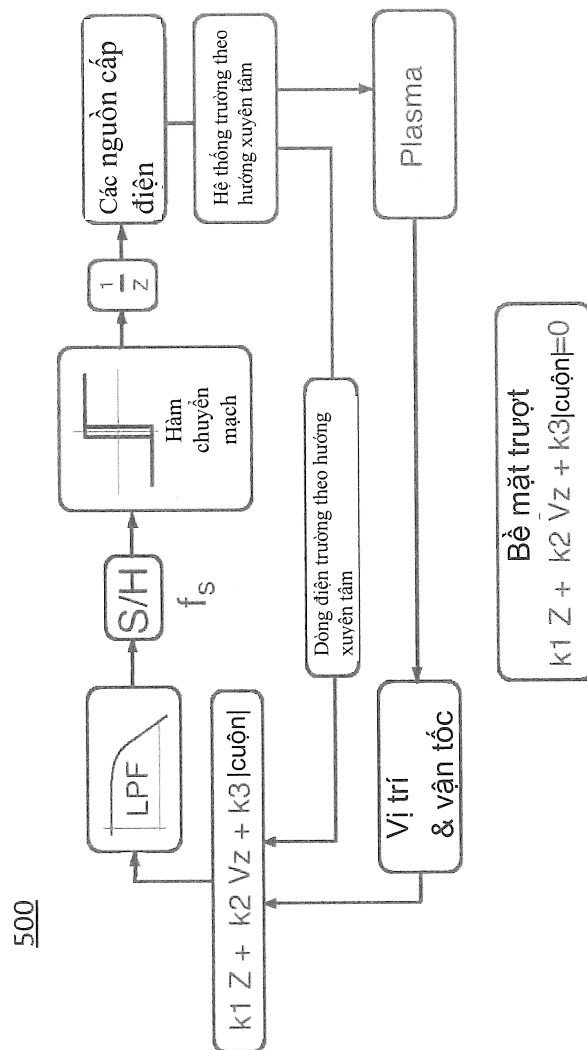


Fig.28

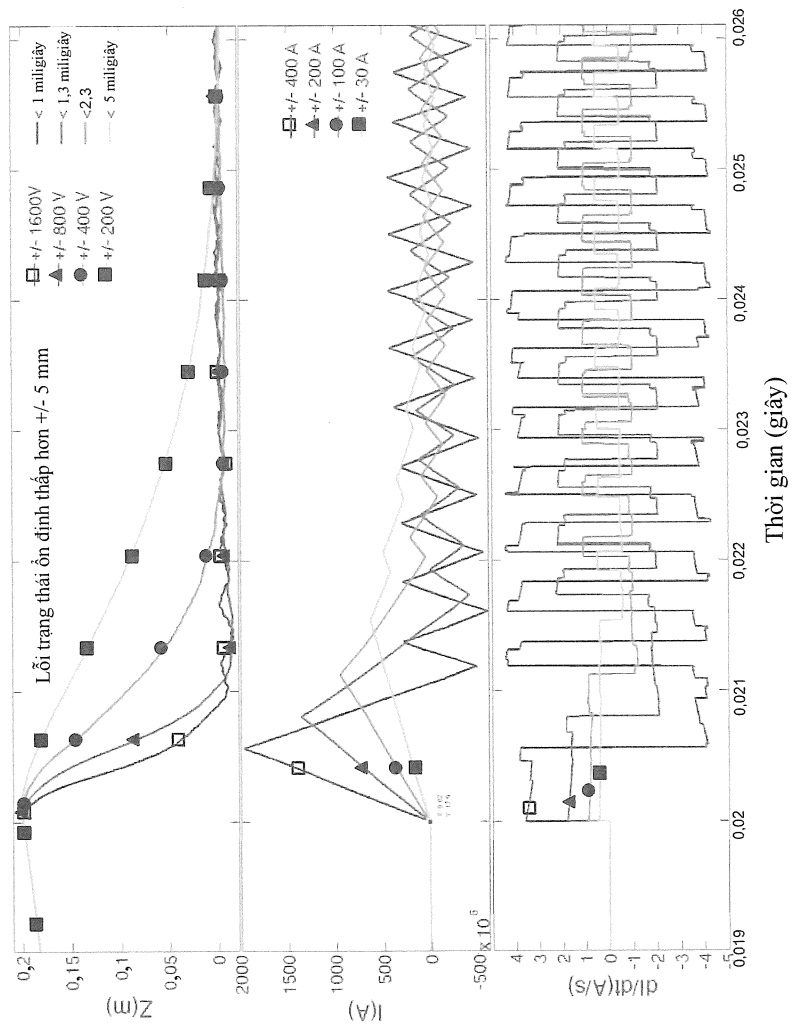


Fig.29

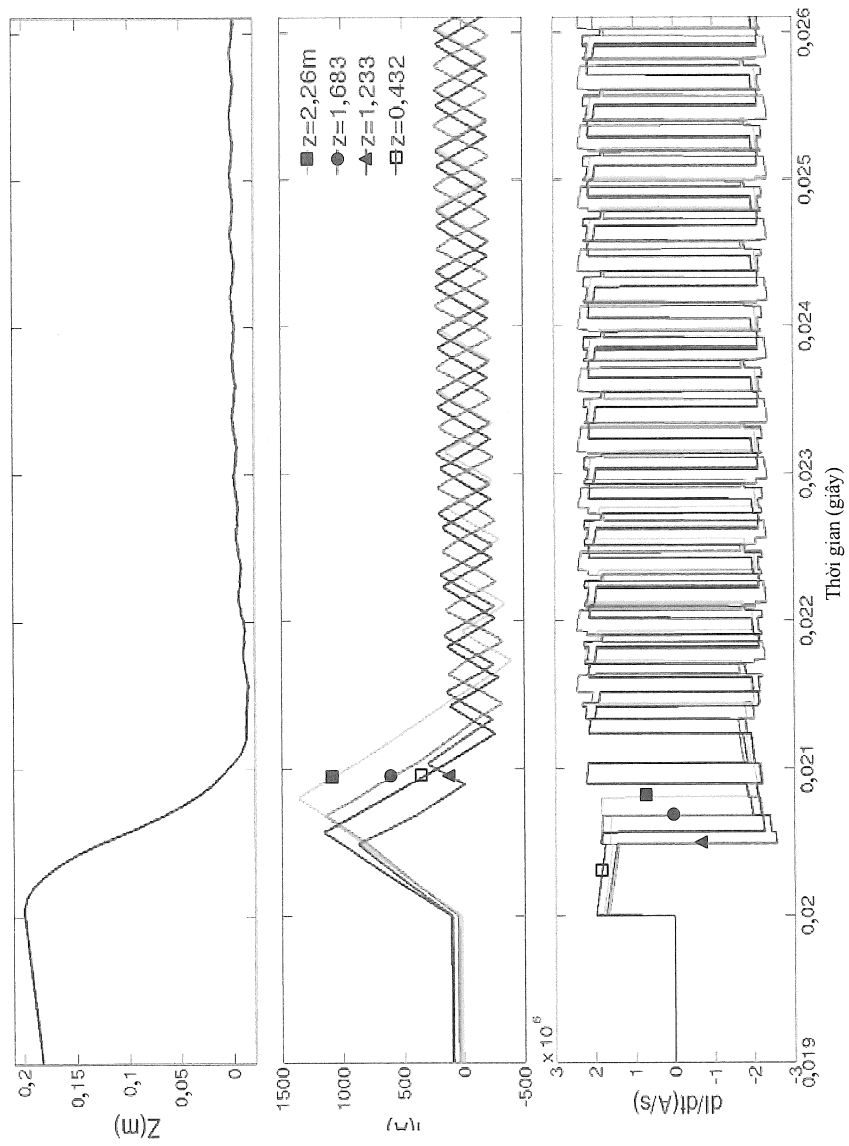


Fig.30