



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

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

(11)



1-0024774

(51)⁷

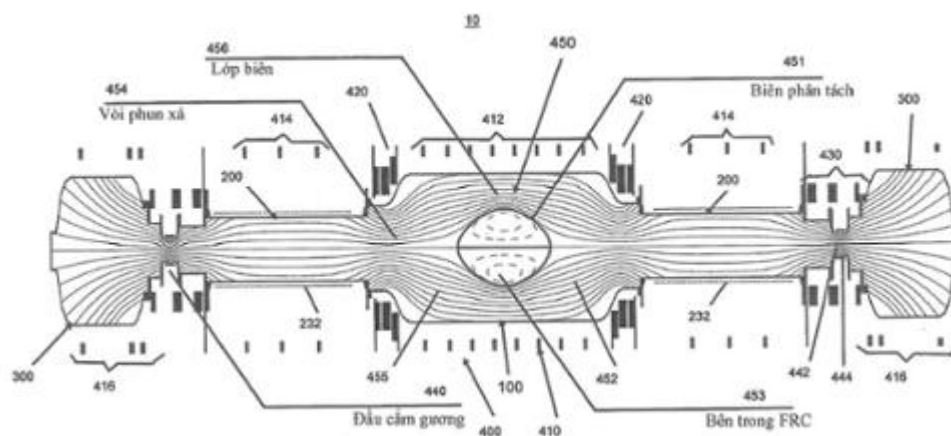
G21B 1/05

(13) B

- (21) 1-2014-01858 (22) 14/11/2012
(86) PCT/US2012/065071 14/11/2012 (87) WO2013/074666 23/05/2013
(30) 61/559,154 14/11/2011 US; 61/559,721 15/11/2011 US
(45) 27/07/2020 388 (43) 25/09/2014 318A
(73) THE REGENTS OF THE UNIVERSITY OF CALIFORNIA (US)
1111 Franklin Street, 12th Floor, Oakland, CA 94607, United States of America
(72) TUSZEWSKI, Michel (US); BINDERBAUER, Michl (AT); BARNES, Dan (US);
GARATE, Eusebio (US); GUO, Houyang (US); PUTVINSKI, Sergei (US);
SMIRNOV, Artem (RU).
(74) Công ty Luật TNHH T&G (TGVN)

(54) HỆ THỐNG TẠO RA VÀ DUY TRÌ TỪ TRƯỜNG VỚI CẤU HÌNH TRƯỜNG ĐẢO

(57) Sáng chế đề cập đến hệ thống và phương pháp tạo điều kiện thuận lợi cho sự tạo ra và sự duy trì các cấu hình trường đảo (Field Reversed Configuration - FRC) hiệu năng cao mới. Hệ thống FRC dùng cho FRC hiệu năng cao (High Performance FRC -HPF) bao gồm bể giam giữ trung tâm được bao quanh bởi hai khu vực tạo ra việc thất theta trường đảo đối diện hoàn toàn và, tùy theo các khu vực tạo ra, hai buồng của bộ chuyển hướng để kiểm soát mật độ trung tính và sự nhiễm tạp. Hệ thống từ tính này bao gồm dây cuộn dây tựa như là dc (quasi-dc) được định vị theo hướng trục dọc theo các bộ phận cấu thành của hệ thống FRC, các cuộn dây gương tựa như là dc giữa buồng giam giữ và các khu vực tạo ra liền kề, và các đầu cắm gương giữa các khu vực tạo ra và các bộ chuyển hướng. Các khu vực tạo ra bao gồm các hệ thống tạo ra năng lượng được tạo xung theo môđun cho phép FRC được tạo ra tại chỗ và sau đó tăng tốc và phun (= sự tạo ra tĩnh) hoặc được tạo ra và tăng tốc một cách đồng thời (= sự tạo ra động). Hệ thống FRC còn bao gồm các đầu phun chùm nguyên tử trung tính, đầu phun hạt, các hệ thống thu, các súng plasma hướng trục và các điện cực định thiên của bề mặt từ thông.



Lĩnh vực kỹ thuật được đề cập

Nhìn chung, sáng chế đề cập đến hệ thống giam giữ plasma từ và, cụ thể hơn là, đề cập đến hệ thống và phương pháp mà tạo điều kiện thuận tiện cho việc tạo ra và duy trì cấu hình trường đảo với độ ổn định cũng như việc giam giữ hạt, năng lượng và từ thông rất tốt.

Tình trạng kỹ thuật của sáng chế

Cấu hình trường đảo (Field Reversed Configuration - FRC) thuộc loại topo giam giữ plasma từ tính còn được biết đến dưới dạng cuộn dây hình xuyên nhỏ gọn (Compact Toroids - CT). Nó thể hiện từ trường cực chủ đạo và cho trường cuộn dây hình xuyên tự tạo ra bằng zero hoặc nhỏ (tham chiếu ẩn phẩm: M. Tuszewski, Nucl. Fusion 28, 2033 (1988)). Sự hấp dẫn của cấu hình này là ở chỗ nó có dạng hình học đơn giản để dễ dàng tạo cấu trúc và duy trì, bộ chuyển hướng tự nhiên không hạn chế để tạo điều kiện thuận tiện cho việc trích xuất năng lượng và loại bỏ tro, và β rất cao (β là tỷ lệ giữa áp suất plasma trung bình với áp suất từ trường trung bình bên trong FRC), tức là, mật độ năng lượng cao. Bản chất β cao là có lợi để vận hành tiết kiệm và sử dụng các nhiên liệu anơtron (aneutronic) tiên tiến như là D-He³ và p-B¹¹.

Phương pháp truyền thống để tạo ra FRC sử dụng công nghệ thắt theta (θ -pinch) trường đảo, tạo ra plasma nóng, mật độ cao (tham chiếu ẩn phẩm: A. L. Hoffman and J. T. Slough, Nucl. Fusion 33, 27 (1993)). Biến thể của phương pháp này là phương pháp bẫy dịch chuyển trong đó plasma được tạo ra trong “nguồn” thắt theta ít nhiều được phun ngay lập tức ra khỏi một đầu vào trong buồng giam giữ. Plasmoit dịch chuyển (translating plasmoid) sau đó được bẫy giữa hai gương chắc chắn ở các đầu của buồng (tham chiếu, ví dụ ẩn phẩm: H. Himura, S. Okada, S. Sugimoto, và S. Goto, Phys. Plasmas 2, 191 (1995)). Một khi trong buồng giam giữ, các phương pháp gia nhiệt và dẫn dòng điện khác nhau có thể được áp dụng như là phun chùm (trung tính hoặc được tạo trung tính), từ trường quay, RF hoặc gia nhiệt thuần trở, v.v.. Việc tách riêng nguồn và các chức năng giam giữ như vậy đem lại các ưu điểm chủ đạo về

thiết kế đối với các lò phản ứng nhiệt hạch tiềm năng trong tương lai. Các FRC được chứng tỏ là rất bền vững, kháng lại sự tạo ra động lực, dịch chuyển, và các sự kiện bất giữ khắc nghiệt. Hơn nữa, chúng thể hiện xu hướng thừa nhận trạng thái plasma được ưu tiên (tham chiếu, ví dụ ấn phẩm: H. Y. Guo, A. L. Hoffman, K. E. Miller, và L. C. Steinhauer, Phys. Rev. Lett. 92, 245001 (2004)). Sự tiến triển đáng kể trong việc phát triển các phương pháp tạo ra FRC khác được tạo ra trong thập kỷ vừa qua: hợp nhất các dạng cầu với các dạng xoắn định hướng ngược lại (tham chiếu, ví dụ ấn phẩm: Y. Ono, M. Inomoto, Y. Ueda, T. Matsuyama, and T. Okazaki, Nucl. Fusion 39, 2001 (1999)) và bởi dòng điều khiển với từ trường quay (RMF) (tham chiếu, ví dụ ấn phẩm: I. R. Jones, Phys. Plasmas 6, 1950 (1999)) mà cũng tạo ra độ ổn định bổ sung.

Hiện nay, kỹ thuật hợp nhất va chạm (collision-merging), đã được đề xuất từ lâu (tham chiếu, ví dụ, ấn phẩm: D. R. Wells, Phys. Fluids 9, 1010 (1966)) đã được phát triển một cách đáng kể hơn nữa: hai chỗ thắt theta riêng rẽ ở các đầu đối diện của buồng giam giữ đồng thời tạo ra hai plasmoit và tăng tốc plasmoit hướng về nhau ở tốc độ cao; chúng sau đó va chạm ở tâm của buồng giam giữ và hợp nhất để tạo ra FRC hỗn hợp. Trong việc tạo cấu trúc và vận hành thành công của một trong số các thử nghiệm FRC lớn nhất cho đến nay, phương pháp hợp nhất va chạm thông thường được thể hiện để tạo ra các FRC ổn định, tồn tại lâu dài, từ thông cao, nhiệt độ cao (tham chiếu, ví dụ ấn phẩm: M. Binderbauer, H.Y. Guo, M. Tuszewski và các đồng tác giả, Phys. Rev. Lett. 105, 045003 (2010)).

Các FRC được tạo thành từ hình xuyên của các đường trường đóng bên trong biên phân tách (separatrix), và của lớp biên hình khuyên trên các đường trường hở ở ngay bên ngoài biên phân tách. Lớp biên hợp lại thành một khối vào trong các vòi phun vượt ra ngoài độ dài FRC, tạo ra bộ chuyển hướng (divertor) tự nhiên. Topo FRC trùng với topo của plasma gương trường đảo (Field-Reversed-Mirror plasma). Tuy nhiên, sự khác biệt đáng kể là ở chỗ plasma FRC có β bằng khoảng 10. Từ trường trong thấp vốn có tạo ra một mật độ hạt động định xứ xác định, tức là các hạt với bán kính Larmor lớn, so với bán kính FRC nhỏ. Các hiệu quả động lực học mạnh này đóng góp ít nhất một phần vào độ ổn định chung của các FRC trong quá khứ và hiện tại, như là các FRC được tạo ra trong thử nghiệm hợp nhất va chạm.

Các thử nghiệm FRC trong quá khứ thông thường bị chi phối bởi các tổn thất đối lưu với sự giam giữ năng lượng được xác định phần lớn bởi sự vận chuyển hạt. Các hạt khuếch tán chủ yếu ra khỏi thể tích trong biên phân tách theo hướng kính, và sau đó mất đi theo hướng trục ở lớp biên. Do đó, việc giam giữ FRC phụ thuộc vào các đặc tính của cả hai vùng đường trường đóng và hở (h). Thời gian khuếch tán hạt ra ngoài biên phân tách cỡ bằng $\tau_{\perp} \sim a^2/D_{\perp}$ ($a \sim r_s/4$, ở đó r_s là bán kính biên phân tách trung tâm), và $D_{\perp}$ là hệ số khuếch tán FRC đặc hiệu, như là $D_{\perp} \sim 12,5 \rho_{ie}$, với ρ_{ie} là bán kính hồi chuyển ion, được đánh giá ở từ trường được áp dụng bên ngoài. Thời gian giam giữ hạt ở lớp biên $\tau_{\parallel}$ về cơ bản là thời gian chuyển tiếp theo hướng trục trong các thử nghiệm FRC trong quá khứ. Ở trạng thái bền vững, sự cân bằng giữa các việc mất hạt theo hướng kính và theo hướng trục tạo ra độ dài gradien mật độ của biên phân tách $\delta \sim (D_{\perp}\tau_{\parallel})^{1/2}$. Thời gian giam giữ hạt FRC cỡ bằng $(\tau_{\perp}\tau_{\parallel})^{1/2}$ đối với FRC trong quá khứ mà có mật độ đáng kể ở biên phân tách (tham chiếu, ví dụ ấn phẩm: M. TUSZEWSKI, “Field Reversed Configurations”, Nucl. Fusion 28, 2033 (1988)).

Hạn chế khác nữa của thiết kế hệ thống FRC trước đó là cần phải sử dụng nhiều cực bên ngoài để kiểm soát các chế độ bất ổn định quay, chẳng hạn như các chế độ bất ổn định trao đổi $n=2$ phát triển nhanh. Theo cách này, trường tứ cực (quadrupole field) thường được áp dụng bên ngoài tạo ra áp suất phục hồi từ cần thiết làm giảm sự tăng trưởng của các chế độ bất ổn định này. Trong khi kỹ thuật này là thích hợp để kiểm soát độ ổn định của khối plasma nhiệt, nó có vấn đề nghiêm trọng đối với nhiều FRC động lực hoặc FRC lai được cải tiến, ở đó mật độ hạt quỹ đạo lớn động lực cao được kết hợp với plasma nhiệt thông thường. Trong các hệ thống này, sự méo của từ trường đối xứng theo hướng trục do các trường nhiều cực như vậy dẫn đến tổn thất hạt cực nhanh qua sự khuếch tán ngẫu nhiên không va chạm, một hệ quả của việc mất duy trì mômen góc chính tắc. Vì vậy, một giải pháp mới để tạo ra sự kiểm soát độ ổn định mà không cần tăng cường sự khuếch tán của các hạt bất kỳ là quan trọng để mang lại ưu điểm về tiềm năng hiệu năng cao hơn của các thiết kế FRC cải tiến chưa được khảo sát trước đây.

Do đó, có mong muốn là cải thiện sự giam giữ và độ ổn định của các FRC để sử dụng các FRC ở trạng thái ổn định để dẫn đường cho toàn bộ các ứng dụng đa dạng từ

các nguồn neutron nhỏ gọn (để tạo ra chất đồng vị dùng trong y học và xử lý chất thải hạt nhân), cho các hệ thống tách và làm giàu khối, và cho lõi lò phản ứng để tổng hợp hạt nhân nhẹ nhằm tạo ra năng lượng trong tương lai.

Mặt khác và ngoài ra, mong muốn ít nhất là tạo cho công chúng sự lựa chọn hữu ích.

Trong bản mô tả này, việc tham chiếu đến các bản mô tả sáng chế, các tài liệu bên ngoài khác, hoặc các nguồn thông tin khác, việc này nói chung là nhằm mục đích tạo ra nội dung để đề cập đến các dấu hiệu của sáng chế. Trừ khi được nêu một cách cụ thể theo cách khác, việc tham chiếu đến các tài liệu bên ngoài như vậy không được hiểu là sự thừa nhận rằng các tài liệu như vậy, hoặc các nguồn thông tin như vậy, theo phạm vi quyền hạn bất kỳ, là giải pháp kỹ thuật đã biết, hoặc tạo thành một phần kiến thức chung tổng quát trong lĩnh vực kỹ thuật tương ứng.

Bản chất kỹ thuật của sáng chế

Sáng chế đề cập đến hệ thống để tạo ra và duy trì từ trường với cấu hình trường đảo (FRC) bao gồm: buồng giam giữ, các khu vực tạo ra FRC đối diện hoàn toàn thứ nhất và thứ hai được ghép với buồng giam giữ, khu vực tạo ra bao gồm các hệ thống tạo ra được môđun hóa để tạo ra FRC và dịch chuyển nó về phía mặt phẳng giữa của buồng giam giữ, các bộ chuyển hướng thứ nhất và thứ hai được ghép với các khu vực tạo ra thứ nhất và thứ hai, các súng plasma theo hướng trục thứ nhất và thứ hai được ghép về mặt vận hành với các bộ chuyển hướng thứ nhất và thứ hai, các khu vực tạo ra thứ nhất và thứ hai và buồng giam giữ, nhiều đầu phun chùm nguyên tử trung tính được ghép với buồng giam giữ và được định hướng trục giao với trục của buồng giam giữ, hệ thống từ tính được ghép với buồng giam giữ, các khu vực tạo ra thứ nhất và thứ hai, các bộ chuyển hướng thứ nhất và thứ hai, hệ thống từ tính bao gồm các đầu cảm gương thứ nhất và thứ hai định vị giữa các khu vực tạo ra thứ nhất và thứ hai và các bộ chuyển hướng thứ nhất và thứ hai; hệ thống thu được ghép với buồng giam giữ và các bộ chuyển hướng thứ nhất và thứ hai, một hoặc nhiều điện cực định thiên để định thiên về mặt điện học bề mặt từ thông hở của FRC được tạo ra, một hoặc nhiều điện cực định thiên được định vị trong một hoặc nhiều buồng giam giữ, các khu vực tạo ra thứ nhất và thứ hai, và các bộ chuyển hướng thứ nhất và thứ hai, hai hoặc nhiều cuộn dây

hình yên ngựa được ghép với buồng giam giữ, và đầu phun hạt ion được ghép với buồng giam giữ.

Thuật ngữ ‘bao gồm’ như được sử dụng trong bản mô tả này và bộ yêu cầu bảo hộ có nghĩa là ‘bao gồm ít nhất là một phần’. Khi hiểu các phần trình bày trong bản mô tả và bộ yêu cầu bảo hộ mà chứa thuật ngữ ‘bao gồm’, thường cũng có thể có các dấu hiệu khác bên cạnh các dấu hiệu được bắt đầu bởi thuật ngữ này trong mỗi phần trình bày. Các thuật ngữ liên quan chẳng hạn như ‘gồm có’ và ‘được chứa’ được hiểu theo cách tương tự.

Sáng chế còn đề cập đến hệ thống để tạo ra và duy trì từ trường với cấu hình trường đảo (FRC) bao gồm: buồng giam giữ, các khu vực tạo ra FRC đối diện hoàn toàn thứ nhất và thứ hai được ghép với buồng giam giữ, các bộ chuyển hướng thứ nhất và thứ hai được ghép với các khu vực tạo ra thứ nhất và thứ hai, các súng plasma thứ nhất và thứ hai được ghép về mặt vận hành với các bộ chuyển hướng thứ nhất và thứ hai, các khu vực tạo ra thứ nhất và thứ hai và buồng giam giữ, nhiều đầu phun chùm nguyên tử trung tính được ghép với buồng giam giữ và được định hướng trực giao với trục của buồng giam giữ, và hệ thống từ tính được ghép với buồng giam giữ, các khu vực tạo ra thứ nhất và thứ hai, và các bộ chuyển hướng thứ nhất và thứ hai, hệ thống từ tính này bao gồm các đầu cảm gương thứ nhất và thứ hai định vị giữa các khu vực tạo ra thứ nhất và thứ hai và các bộ chuyển hướng thứ nhất và thứ hai.

Sáng chế còn đề cập đến hệ thống để tạo ra và duy trì từ trường với cấu hình trường đảo (FRC) bao gồm: buồng giam giữ, các khu vực tạo ra FRC đối diện hoàn toàn thứ nhất và thứ hai được ghép với buồng giam giữ, các bộ chuyển hướng thứ nhất và thứ hai được ghép với các khu vực tạo ra thứ nhất và thứ hai, nhiều đầu phun chùm nguyên tử trung tính được ghép với buồng giam giữ và được định hướng trực giao với trục của buồng giam giữ, hệ thống từ tính được ghép với buồng giam giữ, các khu vực tạo ra thứ nhất và thứ hai, các bộ chuyển hướng thứ nhất và thứ hai, và một hoặc nhiều điện cực định thiên để định thiên về mặt điện các bề mặt từ thông hở của FRC được tạo ra, một hoặc nhiều điện cực định thiên được định vị trong một hoặc nhiều buồng giam giữ, các khu vực tạo ra thứ nhất và thứ hai, các bộ chuyển hướng thứ nhất và thứ hai.

Sáng chế còn đề cập đến hệ thống để tạo ra và duy trì từ trường với cấu hình trường đảo (FRC) bao gồm: buồng giam giữ, các khu vực tạo ra FRC đối diện hoàn toàn thứ nhất và thứ hai được ghép với buồng giam giữ, các bộ chuyển hướng thứ nhất và thứ hai được ghép với các khu vực tạo ra thứ nhất và thứ hai, các súng plasma theo hướng trục thứ nhất và thứ hai được ghép về mặt vận hành với các bộ chuyển hướng thứ nhất và thứ hai, các khu vực tạo ra thứ nhất và thứ hai và buồng chuyển hướng, nhiều đầu phun chùm nguyên tử trung tính được ghép với buồng giam giữ và được định hướng trục giao với trục của buồng giam giữ, hệ thống từ tính được ghép với buồng giam giữ, các khu vực tạo ra thứ nhất và thứ hai, các bộ chuyển hướng thứ nhất và thứ hai.

Sáng chế còn đề cập đến hệ thống để tạo ra và duy trì từ trường với cấu hình trường đảo (FRC) bao gồm: buồng giam giữ, các khu vực tạo ra FRC đối diện hoàn toàn thứ nhất và thứ hai được ghép với buồng giam giữ, các bộ chuyển hướng thứ nhất và thứ hai được ghép với các khu vực tạo ra thứ nhất và thứ hai, nhiều đầu phun chùm nguyên tử trung tính được ghép với buồng giam giữ và được định hướng trục giao với trục của buồng giam giữ, hệ thống từ tính được ghép với buồng giam giữ, các khu vực tạo ra thứ nhất và thứ hai, các bộ chuyển hướng thứ nhất và thứ hai, hệ thống thu được tạo kết cấu để phủ các bề mặt hướng plasma của buồng giam giữ và các bộ chuyển hướng thứ nhất và thứ hai với lớp thu vật chất.

Sáng chế còn đề cập đến hệ thống để tạo ra và duy trì từ trường với cấu hình trường đảo (FRC) bao gồm: buồng giam giữ, các khu vực tạo ra FRC đối diện hoàn toàn thứ nhất và thứ hai được ghép với buồng giam giữ, các bộ chuyển hướng thứ nhất và thứ hai được ghép với các khu vực tạo ra thứ nhất và thứ hai, nhiều đầu phun chùm nguyên tử trung tính được ghép với buồng giam giữ và được định hướng trục giao với trục của buồng giam giữ, và hệ thống từ tính được ghép với buồng giam giữ, các khu vực tạo ra thứ nhất và thứ hai, và các bộ chuyển hướng thứ nhất và thứ hai, hệ thống từ tính này bao gồm hai hoặc nhiều cuộn dây hình yên ngựa được ghép với buồng giam giữ ở mỗi bên của mặt phẳng giữa của buồng giam giữ.

Các phương án theo sáng chế hướng đến các hệ thống và các phương pháp mà tạo điều kiện thuận lợi cho việc tạo thành và duy trì cấu hình trường đảo hiệu năng cao

mới (FRC). Theo mô hình FRC hiệu năng cao mới này, hệ thống theo sáng chế kết hợp một loạt các ý tưởng và phương tiện mới để cải thiện rõ rệt việc giam giữ các hạt, năng lượng và từ thông cũng như đề xuất việc kiểm soát độ ổn định mà không có các tác dụng phụ bất lợi.

Hệ thống FRC được đề xuất ở đây bao gồm bể giam giữ trung tâm được bao quanh bởi hai khu vực tạo ra việc thất theta trường đảo đổi diện hoàn toàn và, tùy theo các khu vực tạo ra, hai buồng của bộ chuyển hướng để kiểm soát mật độ trung tính và sự nhiễm tạp. Hệ thống từ tính bao gồm một dây cuộn dây tựa như là dc (quasi-dc) mà được đặt ở các vị trí theo hướng trục theo các bộ phận cấu thành của hệ thống FRC, cuộn dây gương tựa như là dc giữa đầu của buồng giam giữ và các khu vực tạo ra liên kề, và các đầu cảm gương bao gồm các cuộn dây gương tựa như là dc nhỏ gọn giữa từng khu vực trong số các khu vực tạo ra và các bộ chuyển hướng mà tạo ra các trường dẫn hướng bổ sung để tập trung vào các bề mặt từ thông hướng về bộ chuyển hướng. Các khu vực tạo ra bao gồm các hệ thống tạo ra năng lượng được tạo xung theo môđun mà cho phép các FRC cần phải được tạo ra tại chỗ và sau đó tăng tốc và phun (= sự tạo ra tĩnh) hoặc được tạo ra và tăng tốc một cách đồng thời (= sự tạo ra động).

Hệ thống FRC bao gồm các đầu phun chùm nguyên tử trung tính và đầu phun hạt. Hệ thống thu cũng bao gồm các súng plasma theo hướng trục. Các điện cực định thiên còn được đề xuất để làm lệch điện áp cho các bề mặt từ thông hở.

Hệ thống, phương pháp, các đặc tính và các ưu điểm theo sáng chế sẽ là hoặc sẽ trở nên rõ ràng hơn đối với người có hiểu biết trung bình về lĩnh vực khi xem xét các hình vẽ và phần mô tả chi tiết dưới đây. Dự định rằng tất cả các phương pháp, các đặc tính và các ưu điểm bổ sung thuộc phần mô tả này là thuộc phạm vi sáng chế, và được bảo hộ bởi yêu cầu bảo hộ kèm theo. Cũng dự định rằng, sáng chế không chỉ giới hạn ở các phương án cụ thể được đưa ra làm ví dụ.

Trong phần mô tả của bản mô tả này, cũng có thể tham chiếu đến đối tượng mà không nằm trong phạm vi các điểm yêu cầu bảo hộ kèm theo. Đối tượng này cần phải được hiểu bởi người có hiểu biết trung bình về lĩnh vực kỹ thuật tương ứng và có thể hỗ trợ trong việc đưa vào thực tế sáng chế như được xác định trong các điểm yêu cầu bảo hộ kèm theo của sáng chế.

Mô tả vắn tắt các hình vẽ

Các hình vẽ kèm theo, mà là một phần của bản mô tả này, minh họa phương án được ưu tiên và, cùng với phần mô tả chung được đưa ra trên đây và phần mô tả chi tiết về phương án được ưu tiên được đưa ra dưới đây, dùng để giải thích và đề cập đến các nguyên lý của sáng chế.

Fig.1 minh họa việc giam giữ hạt trong hệ thống FRC theo sáng chế theo chế độ FRC hiệu năng cao (High Performance FRC - HPF) so với theo chế độ FRC thông thường (Conventional FRC Regime - CR), và so với các thử nghiệm FRC thông thường khác.

Fig.2 minh họa các bộ phận cấu thành của hệ thống FRC theo sáng chế và topo từ thông của FRC tạo ra được trong hệ thống FRC theo sáng chế.

Fig.3 minh họa sơ đồ cơ sở của hệ thống FRC theo sáng chế khi nhìn từ phía trên, bao gồm cách bố trí được ưu tiên của các chùm trung tính, các điện cực, các súng plasma, các đầu cảm gương và đầu phun hạt.

Fig.4 minh họa sơ đồ của các bộ phận cấu thành của hệ thống năng lượng được tạo xung cho các khu vực tạo ra.

Fig.5 minh họa hình chiếu trực đo của tấm trượt tạo ra năng lượng được tạo xung độc lập.

Fig.6 minh họa hình chiếu trực đo của cụm ống tạo ra.

Fig.7 minh họa hình chiếu trực đo mặt cắt một phần của hệ thống chùm trung tính và các bộ phận cấu thành chủ đạo.

Fig.8 minh họa hình chiếu trực đo của việc bố trí chùm trung tính ở buồng giam giữ.

Fig.9 minh họa hình chiếu trực đo mặt cắt một phần về việc bố trí được ưu tiên của các hệ thống thu Ti và Li.

Fig.10 minh họa hình chiếu trực đo mặt cắt một phần của súng plasma được thiết lập trong buồng của bộ chuyển hướng. Hình vẽ này còn thể hiện đầu cảm gương từ tính và cụm điện cực của bộ chuyển hướng kết hợp.

Fig.11 minh họa sơ đồ được ưu tiên của điện cực định thiên dạng vòng ở đầu trục của buồng giam giữ.

Fig.12 minh họa sự tiến triển của bán kính từ thông được loại bỏ trong hệ thống FRC thu được từ một dây vòng nghịch từ bên ngoài ở hai khu vực tạo ra việc thất theta trường đảo và các cực dò từ tính được đưa vào bên trong buồng giam giữ kim loại trung tâm. Thời gian được đo từ lúc trường đảo được tạo đồng bộ trong các nguồn tạo ra, và khoảng cách z được cho liên quan đến mặt phẳng giữa theo hướng trục của thiết bị.

Các hình vẽ từ Fig.13(a) đến Fig.13(d) minh họa dữ liệu từ sự phóng điện không được duy trì, không HPF đại diện trên hệ thống FRC theo sáng chế. Được thể hiện dưới dạng hàm số theo thời gian là (a) bán kính từ thông được loại bỏ ở mặt phẳng giữa, (b) 6 sợi mật độ được tích hợp trên đường từ giao thoa kế CO₂ ở mặt phẳng giữa, (c) các biên dạng theo hướng kính trục mật độ đảo ngược Abel từ dữ liệu giao thoa kế CO₂, và (d) tổng nhiệt độ plasma từ sự cân bằng áp suất.

Fig.14 minh họa các biên dạng theo hướng trục của từ thông được loại bỏ ở các thời điểm lựa chọn đối với cùng sự phóng điện của hệ thống FRC theo sáng chế được thể hiện trên Fig.13.

Fig.15 minh họa hình chiếu trục đo của các cuộn dây hình yên ngựa được gắn bên ngoài buồng giam giữ.

Fig.16 minh họa sự tương quan giữa thời gian tồn tại FRC và chiều dài xung của các chùm trung tính được phun. Như được thể hiện, các chùm xung dài hơn tạo ra các FRC tồn tại lâu hơn.

Fig.17 minh họa các hiệu quả độc lập và kết hợp của các bộ phận cấu thành khác nhau của hệ thống FRC trên hiệu năng FRC và việc đạt được chế độ HPF.

Các hình vẽ từ Fig.18(a) đến Fig.18(d) minh họa dữ liệu từ sự phóng điện không được duy trì, HPF đại diện trên hệ thống FRC theo sáng chế. Được thể hiện dưới dạng hàm số theo thời gian là (a) bán kính từ thông được loại bỏ ở mặt phẳng giữa, (b) 6 sợi mật độ được tích hợp trên đường từ giao thoa kế CO₂ ở mặt phẳng giữa,

(c) các biên dạng theo hướng kính mật độ đảo ngược Abel từ dữ liệu giao thoa kế CO₂, và (d) tổng nhiệt độ plasma từ sự cân bằng áp suất.

Fig.19 minh họa việc giam giữ từ thông dưới dạng hàm số của nhiệt độ điện tử (T_e), hình vẽ này là sự thể hiện dưới dạng đồ thị của chế độ đo tốt hơn được thiết lập mới đối với các sự phóng điện HPF.

Cần lưu ý rằng, các hình vẽ không nhất thiết được vẽ theo tỷ lệ và các chi tiết có các kết cấu hoặc chức năng tương tự nói chung là được thể hiện bởi các số tham chiếu tương tự nhằm mục đích minh họa suốt toàn bộ các hình vẽ. Cũng cần lưu ý rằng, các hình vẽ chỉ nhằm tạo điều kiện thuận tiện cho việc mô tả các phương án khác nhau được mô tả ở đây. Các hình vẽ không nhất thiết mô tả từng khía cạnh của phần mô tả được mô tả ở đây và không giới hạn phạm vi của yêu cầu bảo hộ.

Mô tả chi tiết sáng chế

Các phương án theo sáng chế đề cập đến các hệ thống và các phương pháp mà tạo điều kiện thuận tiện cho việc tạo ra và duy trì cấu hình trường đảo (FRC) hiệu năng cao với độ ổn định rất tốt cũng như việc giam giữ hạt, năng lượng và từ thông ở mức độ cao hơn so với các FRC thông thường. Các hệ thống và các chế độ vận hành phụ khác nhau đã được khảo sát để đánh giá có chế độ giam giữ rất tốt trong các FRC hay không. Các nỗ lực này dẫn đến việc tạo ra các phát kiến và sự phát triển mô hình FRC hiệu năng cao được mô tả trong bản mô tả này. Theo mô hình mới này, các hệ thống và các phương pháp theo sáng chế kết hợp một loạt của các ý tưởng mới và phương tiện mới để cải thiện mạnh việc giam giữ FRC như được minh họa trên Fig.1 cũng như tạo ra việc kiểm soát độ ổn định mà không có các tác dụng phụ tiêu cực. Như được trình bày chi tiết hơn dưới đây, Fig.1 mô tả việc giam giữ hạt trong hệ thống FRC 10 được mô tả dưới đây (tham chiếu đến Fig.2 và Fig.3), sự vận hành theo chế độ FRC hiệu năng cao (HPF) để tạo ra và duy trì FRC so với sự vận hành theo chế độ thông thường CR (Conventional Regime - CR) để tạo ra và duy trì FRC, và so với việc giam giữ hạt theo chế độ thông thường để tạo ra và duy trì FRC được sử dụng trong các thử nghiệm khác. Phần mô tả sẽ phác thảo và mô tả chi tiết các bộ phận cấu thành độc lập sáng tạo của hệ thống FRC 10 và các phương pháp cũng như hiệu quả tổng thể của chúng.

Mô tả hệ thống FRC

Hệ thống chân không

Fig.2 và Fig.3 mô tả sơ đồ hệ thống FRC 10 theo sáng chế. Hệ thống FRC 10 bao gồm bể giam giữ trung tâm 100 được bao quanh bởi hai khu vực tạo ra việc thất theta trường đảo đối diện hoàn toàn 200 và, tùy theo các khu vực tạo ra 200, hai buồng của bộ chuyển hướng 300 để kiểm soát mật độ trung tính và sự nhiễm tạp chất. Hệ thống FRC theo sáng chế 10 được xây dựng để làm cho hợp với chân không cực cao và vận hành ở áp suất cơ sở thông thường là 10^{-8} torr ($133,32 \times 10^{-8}$ N/m²). Các áp suất chân không như vậy đòi hỏi việc sử dụng các mặt bích khớp nhau được bơm kép giữa các bộ phận cấu thành khớp nhau, các vòng chữ O bằng kim loại, các thành trong có độ tinh khiết cao, cũng như việc định hình bề mặt ban đầu cẩn thận của tất cả các phần trước cụm, chẳng hạn như việc làm sạch vật lý và hóa học sau khoảng 24 giờ nung trong chân không ở 250°C và việc làm sạch sự phóng điện phát sáng hydro.

Khu vực tạo ra việc thất theta trường đảo 200 là các chỗ thất theta trường đảo tiêu chuẩn (Field-Reversed-Theta-Pinch - FRTP), mặc dù hệ thống tạo ra năng lượng được tạo xung được cải thiện được trình bày chi tiết dưới đây (tham chiếu các hình vẽ từ Fig.4 đến Fig.6). Từng khu vực tạo ra 200 được tạo ra từ các ống thạch anh loại công nghiệp mờ đục tiêu chuẩn có đặc tính là lớp lót bên trong 2mm bằng thạch anh siêu tinh khiết. Buồng giam giữ 100 được tạo thành từ thép không gỉ để cho phép vô số lỗ thông theo hướng kính và tiếp tuyến; nó còn được dùng làm phương tiện bảo tồn từ thông dựa trên thang thời gian của các thử nghiệm được mô tả dưới đây và giới hạn các sự chuyển tiếp từ tính nhanh. Các chân không được tạo ra và được duy trì trong hệ thống FRC 10 với bộ bơm khô cuộn thô, bơm phân tử kiểu tuabin và bơm lạnh (cryo).

Hệ thống từ tính

Hệ thống từ tính 400 được minh họa trên Fig.2 và Fig.3. Fig.2, trong số các đặc tính khác, minh họa từ thông FRC và các đường viền mật độ (dưới dạng hàm của các tọa độ theo hướng kính và theo hướng trục) gắn liền với FRC 450 tạo ra được bởi hệ thống FRC 10. Các đường viền này thu được nhờ sự mô phỏng theo số Hall-MHD kháng trở 2-D bằng cách sử dụng mã được phát triển để mô phỏng các hệ thống và các phương pháp tương ứng với hệ thống FRC 10, và phù hợp với các dữ liệu thử nghiệm

đo được. Như thấy được trên Fig.2, FRC 450 bao gồm vành xuyên các đường trường đóng ở phần trong 453 của FRC 450 bên trong biên phân tách 451, và của lớp biên hình khuyên 456 trên các đường trường hở 452 ở ngay bên ngoài biên phân tách 451. Lớp biên 456 kết hợp thành một khối vào trong các vòi phun 454 quá độ dài FRC, tạo ra bộ chuyển hướng tự nhiên.

Hệ thống từ tính chính 410 bao gồm dây cuộn dây tựa như là dc 412, 414, và 416 mà được nằm ở các vị trí theo hướng trục cụ thể dọc theo các bộ phận cấu thành, tức là, dọc theo buồng giam giữ 100, các khu vực tạo ra 200 và các bộ chuyển hướng 300, của hệ thống FRC 10. Các cuộn dây tựa như là dc 412, 414 và 416 được nạp bởi các nguồn cấp năng lượng chuyển mạch tựa như là dc và tạo ra từ trường định thiên cơ sở bằng khoảng 0,1T trong buồng giam giữ 100, các khu vực tạo ra 200 và các bộ chuyển hướng 300. Ngoài các cuộn dây tựa như là dc 412, 414 và 416, hệ thống từ tính chính 410 bao gồm các cuộn dây gương tựa như là dc 420 (được nạp bởi các nguồn cấp chuyển mạch) giữa đầu của buồng giam giữ 100 và các khu vực tạo ra liền kề 200. Các cuộn dây gương tựa như là dc 420 tạo ra các tỷ lệ gương từ tính lên đến 5 và có thể được cung cấp năng lượng một cách độc lập để kiểm soát việc tạo dạng cân bằng. Ngoài ra, các đầu cắm gương 440, được định vị giữa từng khu vực trong số các khu vực tạo ra 200 và các bộ chuyển hướng 300. Các đầu cắm gương 440 bao gồm các cuộn dây gương tựa như là dc nhỏ gọn 430 và các cuộn dây đầu cắm gương 444. Cuộn dây gương tựa như là dc 430 bao gồm ba cuộn dây 432, 434 và 436 (được nạp bởi các nguồn cấp chuyển mạch) mà tạo ra trường dẫn hướng bổ sung để tập trung vào các bề mặt từ thông 455 hướng về đường đi đường kính nhỏ 442 qua các cuộn dây đầu cắm gương 444. Các cuộn dây đầu cắm gương 444, mà bọc quanh đường đi đường kính nhỏ 442 và được nạp bởi mạch năng lượng được tạo xung LC, tạo ra các trường gương từ tính mạnh lên đến 4 T. Mục đích của toàn bộ việc bố trí cuộn này là bó chặt và dẫn hướng các bề mặt từ thông 455 và các vòi phun plasma dòng kết thúc 454 vào trong các buồng ở xa 310 của các bộ chuyển hướng 300. Cuối cùng, bộ “anten” cuộn dây hình yên ngựa 460 (tham chiếu Fig.15) được định vị bên ngoài buồng giam giữ 100, hai bộ “anten” cuộn dây hình yên ngựa 460 ở mỗi bên của mặt phẳng giữa, và được nạp bởi các nguồn cấp năng lượng dòng một chiều. Các anten cuộn dây hình yên ngựa 460 có thể được tạo cấu hình để tạo ra trường hai cực hoặc bốn cực từ tính gần như

tĩnh bằng khoảng 0,01T để kiểm soát các sự bất ổn định quay và/hoặc kiểm soát dòng điện tử. Các anten cuộn dây hình yên ngựa 460 có thể tạo ra một cách linh hoạt các từ trường mà đối xứng hoặc không đối xứng quanh mặt phẳng giữa của thiết bị, phụ thuộc vào hướng của các dòng điện được áp dụng.

Các hệ thống tạo ra năng lượng được tạo xung

Các hệ thống tạo ra năng lượng được tạo xung 210 vận hành dựa trên nguyên lý thất theta được biến đổi. Có hai hệ thống mà từng hệ thống tạo năng lượng cho một trong số các khu vực tạo ra 200. Các hình vẽ từ Fig.4 đến Fig.6 minh họa các khối tạo thành chính và việc bố trí các hệ thống tạo ra 210. Hệ thống tạo ra 210 được tạo thành từ việc bố trí năng lượng được tạo xung theo môđun mà bao gồm các bộ phận độc lập (= các bàn trượt) 220 mà từng bộ phận cung cấp năng lượng cho tập hợp con của các cuộn dây 232 của cụm bản giăng 230 (= các bản giăng) mà bọc quanh các ống thạch anh tạo ra 240. Từng bàn trượt 220 được tạo thành từ các tụ điện 221, các phần cảm điện 223, các bộ chuyển mạch dòng điện nhanh và cao 225 và kết hợp bộ khởi động 222 và mạch lật 224. Về tổng thể, từng hệ thống tạo ra 210 lưu trữ giữa 350 đến 400kJ điện dung, mà tạo ra lên đến 35 GW năng lượng để tạo ra và tăng tốc các FRC. Việc vận hành theo tọa độ của các bộ phận cấu thành này đạt được qua bộ khởi động và hệ thống kiểm soát 222 và 224 theo kỹ thuật đã biết mà cho phép việc định thời một cách đồng bộ giữa các hệ thống tạo ra 210 trên từng khu vực tạo ra 200 và giảm thiểu hiện tượng chập chờn của việc chuyển mạch đến hàng chục nano giây. Ưu điểm của thiết kế môđun này là sự vận hành linh hoạt của nó: Các FRC có thể được tạo ra tại chỗ và sau đó tăng tốc và phun (= sự tạo ra tĩnh) hoặc được tạo ra và tăng tốc ở cùng thời điểm (= sự tạo ra động).

Các đầu phun chùm trung tính

Các chùm nguyên tử trung tính được triển khai trên hệ thống FRC 10 để tạo ra sự gia nhiệt và sự dẫn dòng điện cũng như để phát triển áp suất hạt nhanh. Như được thể hiện trên Fig.3 và Fig.8, các đường chùm độc lập bao gồm các hệ thống đầu phun chùm nguyên tử trung tính 610 và 640 được định vị quanh buồng giam giữ trung tâm 100 và phun các hạt nhanh một cách tiếp tuyến với plasma FRC (và vuông góc với

trục của buồng giam giữ 100) với thông số tác động sao cho vùng bắn đích nằm hoàn chỉnh trong biên phân tách 451 (tham chiếu Fig.2). Từng hệ thống đầu phun 610 và 640 có khả năng nhô ra lên đến 1 MW năng lượng của chùm trung tính vào trong plasma FRC với các năng lượng hạt nằm trong khoảng từ 20 đến 40 keV. Các hệ thống 610 và 640 dựa trên các nguồn trích xuất nhiều lỗ hờ ion dương và sử dụng việc tập trung hình học, làm mát theo quán tính các lưới trích xuất ion và bơm khác nhau. Khác với việc sử dụng các nguồn plasma khác nhau, các hệ thống 610 và 640 khác nhau chủ yếu bởi thiết kế vật lý của chúng để đáp ứng các vị trí gắn tương ứng của chúng, tạo ra các khả năng phun sang bên và lên đỉnh. Các bộ phận cấu thành thông thường của các đầu phun chùm trung tính này được minh họa một cách cụ thể trên Fig.7 đối với các hệ thống đầu phun sang bên 610. Như được thể hiện trên Fig.7, từng hệ thống chùm trung tính độc lập 610 bao gồm nguồn plasma RF 612 ở đầu vào (đầu này được thay thế bởi nguồn hồ quang trong các hệ thống 640) với màn chắn từ tính 614 phủ đầu đó. Nguồn quang ion và các lưới tăng tốc 616 được ghép với nguồn plasma 612 và van cổng 620 được định vị giữa nguồn quang ion và các lưới tăng tốc 616 và bộ trung hòa 622. Nam châm uốn 624 và bộ lặt ion 628 được định vị giữa bộ trung hòa 622 và thiết bị ngắt 630 ở đầu ra. Hệ thống làm mát bao gồm hai bộ làm lạnh 634, hai tấm lạnh 636 và vành đai LN2 638. Thiết kế linh hoạt này cho phép vận hành khắp khoảng rộng các thông số FRC.

Đầu phun hạt

Để tạo ra phương tiện phun các hạt mới và kiểm soát tốt hơn danh mục hạt FRC, đầu phun hạt 12 bình 700 (tham chiếu, ví dụ ấn phẩm: I. Vinyar et al., “Pellet Injectors Developed at PELIN for JET, TAE, and HL-2A”, Proceedings of the 26th Fusion Science and Technology Symposium, 09/27 to 10/01 (2010)) được sử dụng trên hệ thống FRC 10. Fig.3 minh họa sơ đồ đầu phun hạt 700 trên hệ thống FRC 10. Các hạt trụ (D khoảng 1mm, L khoảng từ 1 đến 2 mm) được phun vào trong FRC với tốc độ nằm trong khoảng từ 150 đến 250 km/giây. Từng hạt độc lập bao gồm khoảng 5×10^{19} nguyên tử hydro, mà tương thích với danh mục hạt FRC.

Các hệ thống thu

Đã biết rõ rằng, khí halo trung tính là vấn đề nghiêm trọng trong tất cả các hệ thống giam giữ. Các quy trình trao đổi điện tích và quay vòng (giải phóng tạp chất lạnh khỏi thành) có thể có hiệu quả lớn trên việc cung cấp năng lượng và giam giữ hạt. Ngoài ra, mật độ lớn bất kỳ của khí trung tính ở hoặc gần biên sẽ dẫn đến các tổn thất hoặc ít nhất rút ngắn đi nhiều thời gian tồn tại của các hạt có quỹ đạo phun lớn (năng lượng cao) (quỹ đạo lớn đề cập đến các hạt có các quỹ đạo trên thang đo topo FRC hoặc ít nhất bán kính quỹ đạo lớn hơn nhiều so với thang đo độ dài gradient từ trường đặc trưng) - thực tế đó là bất lợi cho tất cả các ứng dụng plasma năng lượng, bao gồm sự nóng chảy qua sự gia nhiệt chùm hỗ trợ.

Việc điều hòa bề mặt là phương tiện nhờ đó các ảnh hưởng bất lợi của khí trung tính và các tạp chất có thể được kiểm soát hoặc được giảm bớt trong hệ thống giam giữ. Với mục đích này, hệ thống FRC 10 được đề xuất trong bản mô tả này dùng các hệ thống lắng đọng titan và liti 810 và 820 mà phủ các bề mặt hướng về plasma của buồng giam giữ (hoặc ống) 100 và các bộ chuyển hướng 300 với các màng (dày hàng chục micrômet) của Ti và/hoặc Li. Các lớp phủ đạt được nhờ các kỹ thuật lắng đọng hơi. Li và/hoặc Ti rắn được làm bay hơi và/hoặc được làm thăng hoa và được phun lên không xa các bề mặt để tạo ra các lớp phủ. Các nguồn là các lò nguyên tử với các vòi dẫn (trong trường hợp của Li) 822 hoặc các khối cầu rắn được gia nhiệt với đai dẫn (trong trường hợp của Ti) 812. Các hệ thống bay hơi Li thường vận hành trong chế độ liên tục trong khi các cơ cấu thăng hoa Ti hầu hết được vận hành không liên tục ở giữa sự vận hành plasma. Các nhiệt độ vận hành của các hệ thống này cao hơn 600°C để thu được các tốc độ lắng đọng nhanh. Để đạt được việc bao phủ thành tốt, nhiều hệ thống bay hơi/thăng hoa được định vị một cách chiến lược là cần thiết. Fig.9 thể hiện chi tiết cách bố trí được ưu tiên của các hệ thống lắng đọng thu 810 và 820 trong hệ thống FRC 10. Các lớp phủ hoạt động dưới dạng các bề mặt thu và bơm một cách hiệu quả các loại hydro nguyên tử và phân tử (H và D). Các lớp phủ còn làm giảm các tạp chất thông thường khác chẳng hạn như cacbon và oxy đến các mức không đáng kể.

Các đầu cảm gương

Như được nêu ở trên, hệ thống FRC 10 dùng các bộ cuộn dây gương 420, 430, và 444 như được thể hiện trên Fig.2 và Fig.3. Bộ cuộn dây gương thứ nhất 420 được

định vị ở hai đầu theo hướng trục của buồng giam giữ 100 và được cung cấp năng lượng một cách độc lập từ các cuộn dây giam giữ 412, 414 và 416 của hệ thống từ tính chính 410. Bộ cuộn dây gương thứ nhất 420 giúp chủ yếu cho việc lái và bao gồm theo hướng trục FRC 450 trong quá trình hợp nhất và tạo ra việc kiểm soát việc tạo dạng cân bằng trong quá trình duy trì. Bộ cuộn dây gương thứ nhất 420 tạo ra theo danh nghĩa các từ trường cao hơn (nằm trong khoảng từ 0,4 đến 0,5 T) so với 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, mà bao gồm ba cuộn dây gương tựa như là dc nhỏ gọn 432, 434 và 436, được định vị giữa các khu vực tạo ra 200 và các bộ chuyển hướng 300 và được dẫn động bởi nguồn năng lượng đóng ngắt mạch thông thường. Các cuộn dây gương 432, 434 và 436, cùng với các cuộn dây đầu cắm gương được tạo xung nhỏ gọn hơn 444 (được nạp bởi nguồn cấp năng lượng điện dung) và phần thất vật lý 442 tạo ra các đầu cắm gương 440 mà tạo ra đường dẫn khí nhỏ hẹp với từ trường rất cao (giữa 2 đến 4T với thời gian tăng đến khoảng từ 10 đến 20 miligiây). Cuộn dây gương được tạo xung nhỏ gọn nhất 444 là các kích cỡ theo hướng kính nhỏ gọn, lỗ khoan 20cm và độ dài tương tự, so sánh với lỗ khoan thang đo mét cộng thiết kế dạng bánh kẹp của các cuộn dây giam giữ 412, 414 và 416. Mục đích của các đầu cắm gương 440 là nhiều kiểu: (1) Các cuộn dây 432, 434, 436 và 444 bó chặt và dẫn các bề mặt từ thông 452 và các vòi phun dòng plasma kết thúc 454 vào trong các buồng chuyển hướng ở xa 300. Điều này đảm bảo rằng các hạt cận kiệt đi tới các bộ chuyển hướng 300 một cách thích hợp và có các bề mặt từ thông liên tục 455 mà tạo vết từ vùng đường trường hở 452 của FRC trung tâm 450 theo tất cả các cách đến các bộ chuyển hướng 300. (2) Phần thất vật lý 442 trong hệ thống FRC 10, qua đó các cuộn dây 432, 434, 436 và 444 tạo khả năng cho đường đi của các bề mặt từ thông 452 và các vòi phun plasma 454, tạo ra chướng ngại đến dòng khí trung tính từ các súng plasma 350 mà được đặt trong các bộ chuyển hướng 300. Trong cùng mạch, các phần thất lại 442 ngăn ngừa dòng khí ngược từ các khu vực tạo ra 200 vào các bộ chuyển hướng 300 nhờ đó làm giảm số lượng các hạt trung tính mà phải được đưa vào trong toàn bộ hệ thống FRC 10 khi bắt đầu khởi động FRC. (3) Các gương theo hướng trục mạnh được tạo ra bởi các cuộn dây 432, 434, 436 và 444 làm giảm sự tổn thất hạt theo hướng trục và nhờ đó làm giảm hệ số khuếch tán hạt song song trên các đường trường hở.

Các súng plasma theo hướng trục

Các dòng plasma từ các súng 350 được gắn trong các buồng chuyển hướng 310 của các bộ chuyển hướng 300 có xu hướng cải thiện độ ổn định và hiệu năng chùm trung tính. Các súng 350 được gắn trên trục bên trong buồng 310 của các bộ chuyển hướng 300 như được minh họa trên Fig.3 và Fig.10 và tạo ra plasma chạy dọc theo các đường từ thông hở 452 trong bộ chuyển hướng 300 và hướng về tâm của buồng giam giữ 100. Súng 350 vận hành ở khí xả mật độ cao trong kênh rửa chồng và được thiết kế để tạo ra một vài kiloampe của plasma được ion hóa toàn bộ trong 5 đến 10 miligiây. Các súng 350 bao gồm cuộn từ được tạo xung mà ăn khớp với dòng plasma ra với kích cỡ mong muốn của plasma trong buồng giam giữ 100. Các thông số kỹ thuật của súng 350 khác biệt ở chỗ kênh có đường kính ngoài nằm trong khoảng từ 5 đến 13cm và đường kính trong lên đến khoảng 10cm và tạo ra dòng điện xả là từ 10 đến 15 kA ở khoảng từ 400 đến 600 V với từ trường trong của súng nằm trong khoảng từ 0,5 đến 2,3 T.

Các dòng plasma từ súng có thể thâm nhập vào các từ trường của các đầu cấm gương 440 và chảy vào trong khu vực tạo ra 200 và buồng giam giữ 100. Tính hiệu quả của việc chuyển plasma qua đầu cấm gương 440 tăng lên với khoảng cách giảm giữa súng 350 và đầu cấm 440 và bằng cách khiến cho đầu cấm 440 rộng hơn và ngắn hơn. Ở các điều kiện hợp lý, các súng 350 có thể tăng trường hợp phân phối khoảng 10^{22} proton/giây qua các đầu cấm gương 440 ở mức 2 đến 4T với các độ ion và điện tử cao bằng khoảng 150 đến 300 eV và khoảng 40 đến 50 eV, một cách tương ứng. Các súng 350 tạo ra việc tái sinh nhiên liệu đáng kể của lớp biên FRC 456, và việc giam giữ hạt FRC tổng thể được cải thiện.

Để làm tăng hơn nữa mật độ plasma, hộp khí có thể được sử dụng để thổi khí bổ sung vào trong dòng plasma từ các súng 350. Kỹ thuật này cho phép tăng một vài lần về mật độ plasma được phun. Trong hệ thống FRC 10, hộp khí được thiết lập ở phía bộ chuyển hướng 300 của các đầu cấm gương 440 cải thiện việc tái sinh nhiên liệu của lớp biên FRC 456, việc tạo ra FRC 450, và việc làm thất đường plasma.

Đưa ra tất cả các thông số điều chỉnh được trình bày trên đây và còn xét đến, việc vận hành với một hoặc cả hai súng là có thể, rõ ràng là có thể đạt được phổ rộng các phương thức vận hành.

Các điện cực định thiên

Việc định thiên điện cho các bề mặt từ thông hở có thể tạo ra các điện thế theo hướng kính mà dẫn đến việc dịch chuyển $E \times B$ góc phương vị mà tạo ra chế độ kiểm soát, tương tự với việc xoay núm (nút bấm), để kiểm soát việc quay của plasma trên đường trường hở cũng như lõi FRC thực 450 qua sự thay đổi tốc độ. Để hoàn thiện việc kiểm soát này, hệ thống FRC 10 dùng các điện cực khác nhau được đặt một cách chiến lược trong các phần khác nhau của thiết bị. Fig.3 mô tả các điện cực định thiên được định vị ở các vị trí được ưu tiên trong phạm vi hệ thống FRC 10.

Theo nguyên lý, có bốn loại điện cực: (1) các điện cực điểm 905 trong buồng giam giữ 100 mà tiếp xúc với các đường trường hở cụ thể 452 ở biên của FRC 450 để tạo ra việc nạp điện cục bộ, (2) các điện cực hình khuyên 900 giữa buồng giam giữ 100 và các khu vực tạo ra 200 để nạp điện các lớp từ thông biên xa 456 theo cách đối xứng phương vị, (3) các chồng điện cực đồng tâm 910 trong các bộ chuyển hướng 300 để nạp điện cho nhiều lớp từ thông đồng tâm 455 (nhờ đó việc lựa chọn các lớp có thể kiểm soát được bằng cách điều chỉnh các cuộn dây 416 để điều chỉnh từ trường bộ chuyển hướng sao cho kết thúc các lớp từ thông mong muốn 456 trên các điện cực thích hợp 910), và cuối cùng (4) các anot 920 (tham chiếu Fig.10) của chính các súng plasma 350 (mà chặn các bề mặt từ thông hở bên trong 455 gần biên phân tách của FRC 450). Fig.10 và Fig.11 thể hiện một vài thiết kế thông thường trong số các thiết kế này.

Trong tất cả các trường hợp, các điện cực này được dẫn động bởi các nguồn được tạo xung hoặc các nguồn năng lượng dc ở điện áp lên đến khoảng 800 V. Phụ thuộc vào kích cỡ điện cực và các bề mặt từ thông nào được cắt ngang, các dòng điện có thể được kéo trong khoảng giá trị kiloampe.

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

Việc tạo ra plasma tiêu chuẩn trên hệ thống FRC 10 tuân thủ kỹ thuật thất theta trường đảo đã được phát triển tốt. Quy trình thông thường để khởi động FRC bắt đầu bằng cách dẫn động các cuộn dây tựa như là dc 412, 414, 416, 420, 432, 434 và 436 đến trạng thái vận hành ổn định. Các mạch năng lượng được tạo xung RFTP của các hệ thống tạo ra năng lượng được tạo xung 210 sau đó dẫn động các cuộn dây từ trường đảo nhanh được tạo xung 232 để tạo ra việc định thiên đảo tạm thời bằng khoảng $-0,05T$ trong các khu vực tạo ra 200. Ở thời điểm này, lượng được xác định trước của khí trung tính ở 9-20 psi ($0,062-0,138 \text{ N/mm}^2$) được phun vào trong hai thể tích tạo ra được xác định bởi các buồng ống thạch anh 240 của các khu vực tạo ra 200 (bắc và nam) nhờ bộ các van thổi được định hướng theo góc phương vị ở các bích được định vị trên các đầu ngoài của các khu vực tạo ra 200. Tiếp theo, trường RF nhỏ (khoảng vài trăm kilohec) được tạo ra từ bộ các anten trên bề mặt của các ống thạch anh 240 để tạo ra việc ion hóa trước ở dạng các vùng ion hóa hạt cục bộ trong phạm vi các cột khí trung tính. Sau đó là áp dụng việc tạo môđun vòng theta trên dòng điện dẫn động các cuộn dây từ trường đảo nhanh được tạo xung 232, mà dẫn đến việc ion hóa sơ bộ tổng quan hơn của các cột khí. Cuối cùng, các dải năng lượng được tạo xung chính của các hệ thống tạo ra năng lượng được tạo xung 210 được đốt để dẫn động các cuộn dây từ trường đảo nhanh được tạo xung 232 để tạo ra trường định thiên hướng về phía trước lên đến $0,4 \text{ T}$. Bước này có thể định trình tự thời gian sao cho trường định thiên hướng về phía trước được tạo ra một cách đồng nhất qua độ dài của các ống tạo ra 240 (việc tạo ra tĩnh) hoặc sao cho việc tạo môđun trường nhu động liên tiếp đạt được dọc theo trục của các ống tạo ra 240 (việc tạo ra động).

Trong toàn bộ quy trình tạo ra này, việc trường đảo thực tế trong plasma xuất hiện nhanh, trong khoảng 5 microgiây. Năng lượng được tạo xung nhiều gigaoat được phân phối đến plasma tạo ra tạo ra một cách dễ dàng các FRC nóng, mà sau đó được phun ra từ các khu vực tạo ra 200 nhờ ứng dụng môđun tạo trình tự theo thời gian của từ trường hướng về phía trước (sự nhu động từ) hoặc các dòng điện tăng lên một cách tạm thời trong các cuộn cuối của các bộ cuộn dây 232 gần các đầu ngoài theo hướng trục của các ống tạo ra 210 (tạo ra gradien từ trường theo hướng trục mà hướng theo hướng trục về buồng giam giữ 100). Hai FRC tạo ra (bắc và nam) vì vậy được tạo ra và tăng tốc sau đó kéo dài vào buồng giam giữ có đường kính lớn hơn 100, ở đó các

cuộn dây tựa như là dc 412 tạo ra trường xiên hướng về phía trước để kiểm soát sự giãn nở theo hướng kính và tạo ra từ thông bên ngoài cân bằng.

Khi các FRC tạo ra bắc và nam đi đến gần mặt phẳng giữa của buồng giam giữ 100, các FRC va chạm. Trong suốt quá trình va chạm, các động năng theo hướng trục của các FRC tạo ra bắc và nam được nhiệt hóa mạnh do các FRC hợp nhất cơ bản thành FRC đơn 450. Bộ dự đoán plasma lớn là sẵn có 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 hỗn hợp với bán kính biên phân tách bằng khoảng 0,4m và phạm vi theo hướng trục khoảng 3m. Các đặc tính khác nữa là các từ trường bên ngoài bằng khoảng 0,1 T, các mật độ plasma khoảng $5 \times 10^{19} \text{ m}^{-3}$ và tổng nhiệt độ plasma lên đến 1 keV. Không cần duy trì bất kỳ, tức là, không có sự gia nhiệt và/hoặc sự dẫn điện qua việc phun chùm trung tính hoặc các phương tiện hỗ trợ khác, thời gian tồn tại của các FRC này được giới hạn ở khoảng 1 miligiây, thời gian phân rã cấu hình đặc trưng bản xứ.

Dữ liệu thử nghiệm của sự vận hành không được duy trì - chế độ thông thường

Fig.12 thể hiện sự tiến triển thời gian thông thường của bán kính từ thông được loại bỏ, $r_{\Delta\Phi}$, mà xấp xỉ bán kính biên phân tách, r_s , để thể hiện các động lực của quy trình hợp nhất thất theta của FRC 450. Hai plasmoit độc lập (bắc và nam) được tạo ra đồng thời và sau đó được tăng tốc ra ngoài các khu vực tạo ra 200 tương ứng ở tốc độ siêu âm, v_z khoảng 250 km/giây, và va chạm gần mặt phẳng giữa ở $z = 0$. Trong suốt quá trình va chạm các plasmoit nén theo hướng trục, theo sau bởi sự giãn nở theo hướng kính và theo hướng trục nhanh, trước khi cuối cùng hợp nhất để tạo ra FRC 450. Cả hai động lực theo hướng kính và theo hướng trục của FRC hợp nhất 450 được làm sáng tỏ bởi các phép đo biên dạng mật độ chi tiết và sự chụp X quang dựa trên dụng cụ đo xạ năng.

Dữ liệu từ sự phóng điện không được duy trì đại diện của hệ thống FRC 10 được thể hiện dưới dạng hàm số theo thời gian trên Fig.13. FRC được bắt đầu ở $T = 0$. Bán kính từ thông được loại bỏ ở mặt phẳng giữa theo hướng trục của thiết bị được thể hiện trên Fig.13(a). Dữ liệu này thu được từ mạng các mẫu dò từ, được định vị chỉ bên trong thành thép không gỉ của buồng giam giữ, mà đo từ trường theo hướng trục.

Thành thép là dụng cụ bảo tồn từ thông tốt trên các thang đo thời gian của việc phóng điện này.

Các mật độ tích hợp đường được thể hiện trên Fig.13(b), từ giao thoa kế CO₂/He-Ne 6-sợi được định vị ở $z = 0$. Xét đến sự thay thế FRC theo phương thẳng đứng (y), được đo bởi sự chụp X quang dựa trên dụng cụ đo xạ năng, sự đảo Abel tạo ra các đường viền mật độ trên Fig.13(c). Sau khi một số đoạn lõm theo hướng trục và theo hướng kính trong 0,1miligiây thứ nhất, FRC giảm dần với biên dạng mật độ rỗng. Biên dạng này khá là phẳng, với mật độ đáng kể trên trục, như được yêu cầu bởi sự cân bằng FRC 2-D thông thường.

Tổng nhiệt độ plasma được thể hiện trên Fig.13(d), được xuất phát từ sự cân bằng áp suất và hoàn toàn đồng nhất với sự tán xạ Thomson và các phép đo quang phổ.

Việc phân tích từ toàn bộ mạng từ thông được loại bỏ chỉ ra rằng hình dạng của biên phân tách FRC (xấp xỉ bởi các đặc tính từ thông theo hướng trục được loại bỏ) tiến triển một cách dần dần từ đường đi có dạng elip. Sự tiến triển này, được thể hiện trên Fig.14, đồng nhất với sự nối lại từ dần dần FRC từ hai thành một. Quả thực, các sự ước lượng sơ bộ đề xuất rằng trong trường hợp cụ thể này, khoảng 10% trong số hai từ thông FRC ban đầu nối lại trong suốt quá trình va chạm.

Độ dài FRC co lại một cách ổn định từ 3 xuống khoảng 1m trong thời gian tồn tại FRC. Việc co lại này, thấy được trên Fig.14, thể hiện rằng hầu hết việc tổn thất năng lượng đối lưu vượt trội việc giam giữ FRC. Do áp suất plasma bên trong biên phân tách giảm nhanh hơn so với áp suất từ bên ngoài, ứng suất đường từ trường ở các vùng đầu cuối nén FRC theo hướng trục, phục hồi sự cân bằng theo hướng trục và theo hướng kính. Đối với việc phóng điện được trình bày trên các hình vẽ Fig.13 và Fig.14, từ thông FRC, dữ liệu hạt, và năng lượng nhiệt (lần lượt bằng khoảng 10 mWb, 7×10^{19} hạt, và 7 kJ) làm giảm nhiều bậc biên độ ở milligiây thứ nhất, khi sự cân bằng FRC cho thấy sự giảm.

Việc vận hành được duy trì - chế độ HPF

Các ví dụ trên các hình vẽ từ Fig.12 đến Fig.14 là các đặc tính của các FRC phân rã mà không có sự duy trì bất kỳ. Tuy nhiên, một số kỹ thuật được triển khai trên hệ thống FRC 10 để cải thiện hơn nữa việc giam giữ FRC (lõi bên trong và lớp biên) cho chế độ HPF và duy trì cấu hình.

Các chùm trung tính

Trước hết, các phần trung tính nhanh (H) được phun vuông góc với B_z trong các chùm từ tám đầu phun chùm trung tính 600. Các chùm của các phần trung tính nhanh được phun từ thời điểm các FRC tạo ra bắc và nam hợp nhất trong buồng giam giữ 100 thành một FRC 450. Các ion nhanh, được tạo ra một cách sơ bộ bằng cách trao đổi điện tích, có các quỹ đạo betatron (với bán kính sơ bộ trên thang đo của topo FRC hoặc ít nhất lớn hơn nhiều so với thang đo độ dài gradient từ trường đặc trưng) mà bổ sung vào dòng điện góc phương vị của FRC 450. Sau khi một số phản phóng điện (sau 0,5 đến 0,8 miligiây trong một lần phóng), mật độ ion nhanh lớn đủ cải thiện một cách đáng kể độ ổn định và các đặc tính giam giữ FRC bên trong (*tham chiếu, ví dụ ấn phẩm: M.W. Binderbauer and N. Rostoker, Plasma Phys. 56, part 3, 451 (1996)*). Hơn nữa, từ khía cạnh duy trì, các chùm từ các đầu phun chùm trung tính 600 còn là các phương tiện chủ yếu để dẫn động dòng điện và gia nhiệt cho plasma FRC.

Trong chế độ plasma của hệ thống FRC 10, các ion nhanh chậm lại trước hết trên các điện tử plasma. Trong quá trình phóng điện sớm, các thời gian chậm lại được lấy trung bình theo quỹ đạo thông thường của các ion nhanh là từ 0,3 đến 0,5 miligiây, mà dẫn đến việc gia nhiệt FRC đáng kể, chủ yếu là các điện tử. Các ion nhanh tạo ra sự đi lại theo hướng kính lớn bên ngoài của biên phân tách bởi vì từ trường FRC bên trong vốn thấp (khoảng trung bình là 0,03T đối với trường theo hướng trục bên ngoài 0,1T). Các ion nhanh sẽ không được bảo vệ với sự tổn thất trao đổi điện tích, nếu mật độ khí trung tính là quá cao bên ngoài biên phân tách. Do đó, việc thu trên thành và các kỹ thuật khác (chẳng hạn như là súng plasma 350 và các đầu cảm gương 440 mà góp phần, trong số các bộ phận khác, vào việc kiểm soát khí) được triển khai trên hệ thống FRC 10 có xu hướng giảm thiểu các phần trung tính biên và tạo khả năng tạo nên dòng ion nhanh theo yêu cầu.

Việc phun hạt

Khi mật độ ion nhanh đáng kể được tạo nên trong FRC 450, với các nhiệt độ điện tử cao hơn và các thời gian tồn tại FRC dài hơn, các hạt H hoặc D đóng băng được phun vào trong FRC 450 từ đầu phun hạt 700 để duy trì dữ liệu hạt FRC của FRC 450. Các thang đo thời gian cất bớt được dự kiến là đủ ngắn để tạo ra nguồn hạt FRC đáng kể. Tốc độ này có thể còn được làm tăng bằng cách mở rộng diện tích bề mặt của tấm phun bằng cách phá vỡ các hạt độc lập thành các phần nhỏ hơn trong khi trong các thùng hoặc các ống phun của đầu phun hạt 700 và trước khi đi vào buồng giam giữ 100, bước mà có thể đạt được bằng cách làm tăng ma sát giữa hạt và các thành của ống phun bằng cách siết chặt bán kính cong ở phần cuối cùng của ống phun ngay trước khi đi vào trong buồng giam giữ 100. Do sự thay đổi trình tự đốt và tốc độ của 12 bình (các ống phun) cũng như việc tạo các đoạn nhỏ, có thể hòa vào với hệ thống phun hạt 700 để tạo ra chỉ mức duy trì dữ liệu hạt mong muốn. Đến lượt, điều này giúp duy trì áp suất động lực bên trong ở FRC 450 và việc vận hành và thời gian tồn tại được duy trì của FRC 450.

Khi các nguyên tử được cất bỏ và chạm plasma đáng kể trong FRC 450, chúng trở nên được ion hóa toàn bộ. Bộ phận cấu thành plasma lạnh tạo thành sau đó được gia nhiệt va chạm bởi plasma FRC bản xứ. Năng lượng cần để duy trì nhiệt độ FRC mong muốn sau cùng được cung cấp bởi các đầu phun chùm 600. Trong trường hợp này, các đầu phun hạt 700 cùng với các đầu phun chùm trung tính 600 tạo ra hệ thống mà duy trì trạng thái ổn định và duy trì FRC 450.

Các cuộn dây hình yên ngựa

Để đạt được việc dẫn động dòng trạng thái ổn định và duy trì dòng ion cần thiết, mong muốn là ngăn ngừa hoặc làm giảm đáng kể điện tử quay do lực ma sát điện tử-ion (dẫn đến từ chuyển động lượng điện tử ion va chạm). Hệ thống FRC 10 sử dụng kỹ thuật theo sáng chế để tạo ra việc bẻ gãy điện tử nhờ từ trường hai cực hoặc bốn cực tĩnh được áp dụng ở bên ngoài. Điều này đạt được nhờ các cuộn dây hình yên ngựa bên ngoài 460 được mô tả trên Fig.15. Từ trường theo hướng kính được áp dụng ngang từ các cuộn dây hình yên ngựa 460 cảm ứng điện trường theo hướng trục trong plasma FRC quay. Dòng điện tử theo hướng trục tạo thành tương tác với từ trường theo hướng

kính để tạo ra lực bẻ gãy góc phương vị trên các điện tử, $F_\theta = -\sigma V_{e0} \langle |B_r|^2 \rangle$. Đối với các điều kiện thông thường trong hệ thống FRC 10, từ trường hai cực (hoặc tứ cực) được áp dụng được yêu cầu bên trong plasma cần chỉ ở khoảng 0,001T là đủ để bẻ gãy điện tử. Trường bên ngoài tương ứng bằng khoảng 0,015T là đủ nhỏ để không gây ra các sự tổn thất hạt nhanh đáng kể hoặc theo cách khác giam giữ ảnh hưởng bất lợi. Thực tế là, từ trường hai cực (hoặc tứ cực) được áp dụng đóng góp để ngăn chặn các sự bất ổn định. Trong việc kết hợp với việc phun chùm trung tính phun tiếp tuyến và plasma theo hướng trục, các cuộn dây hình yên ngựa 460 tạo ra mức kiểm soát bổ sung khi xét đến việc duy trì và ổn định dòng điện.

Các đầu cảm gương

Thiết kế của các cuộn dây được tạo xung 444 trong các đầu cảm gương 440 cho phép tạo ra cục bộ các từ trường cao (2 đến 4 T) với năng lượng điện dung vừa phải (khoảng 100 kJ). Để tạo ra các từ trường thông thường nhằm vận hành hệ thống FRC 10 theo sáng chế, tất cả các đường trường trong thể tích tạo ra đi qua các phần thất lại 442 ở các đầu cảm gương 440, như được thể hiện bởi các đường từ trường trên Fig.2 và việc tiếp xúc thành plasma không xảy ra. Hơn nữa, các đầu cảm gương 440 hoạt động nối tiếp với các nam châm bộ chuyển hướng tựa như là dc 416 có thể được điều chỉnh để dẫn các đường trường lên các điện cực của bộ chuyển hướng 910, hoặc làm loe ra các đường trường trong cấu hình đỉnh cuối (không được thể hiện trên hình vẽ). Cơ cấu sau cải thiện độ ổn định và ngăn chặn việc dẫn nhiệt điện tử song song.

Các đầu cảm gương 440 chính chúng còn đóng góp cho việc kiểm soát khí trung tính. Các đầu cảm gương 440 cho phép sử dụng tốt hơn khí đơteri được thổi vào trong các ống thạch anh trong quá trình tạo ra FRC, do dòng khí ngược vào trong các bộ chuyển hướng 300 được giảm một cách đáng kể bởi việc dẫn khí nhỏ của các đầu cảm (chỉ có 500 L/s). Hầu hết khí được thổi còn lại bên trong các ống tạo ra 210 được ion hóa một cách nhanh chóng. Ngoài ra, dòng chảy plasma mật độ cao qua các đầu cảm gương 440 tạo ra việc ion hóa trung tính hiệu quả vì thế ngăn khí hiệu quả. Kết quả là, hầu hết các phần trung tính được quay vòng trong các bộ chuyển hướng 300 từ lớp biên FRC 456 không phải quay trở về buồng giam giữ 100. Ngoài ra, các phần

trung tính kết hợp với việc vận hành của các súng plasma 350 (như được trình bày dưới đây) sẽ hầu hết là được giữ vào các bộ chuyển hướng 300.

Cuối cùng, các đầu cắm gương 440 có xu hướng cải thiện việc giam giữ lớp biên FRC. Với các tỷ lệ gương (đầu cắm/các từ trường giam giữ) trong khoảng từ 20 đến 40, và với độ dài 15 m giữa các đầu cắm gương bắc và nam 440, thời gian giam giữ hạt ở lớp biên $\tau_{||}$ tăng lên đến thứ tự biên độ. Việc cải thiện $\tau_{||}$ làm tăng một cách dễ dàng việc giam giữ hạt FRC.

Giả sử rằng, việc tổn thất hạt khuếch tán theo hướng kính (D) từ thể tích biên phân tách 453 được cân bằng bởi sự tổn thất theo hướng trục ($\tau_{||}$) từ lớp biên 456, thu được $(2\pi r_s L_s)(Dn_s/\delta) = (2\pi r_s L_s \delta)(n_s/\tau_{||})$, từ đó độ dài gradien mật độ của biên phân tách có thể được viết lại là $\delta = (D\tau_{||})^{1/2}$. Trong bản mô tả này, r_s , L_s và n_s lần lượt là bán kính biên phân tách, độ dài biên phân tách và mật độ biên phân tách. Thời gian giam giữ hạt FRC là $\tau_N = [\pi r_s^2 L_s \langle n \rangle] / [(2\pi r_s L_s)(Dn_s/\delta)] = (\langle n \rangle / n_s)(\tau_{\perp} \tau_{||})^{1/2}$, trong đó $\tau_{\perp} = a^2/D$ với $a = r_s/4$. Về mặt vật lý, việc cải thiện $\tau_{||}$ dẫn đến δ được tăng lên (gradien mật độ biên phân tách và thông số dịch chuyển được làm giảm), và, do đó, việc tổn thất hạt FRC được giảm bớt. Việc cải thiện tổng thể trong việc giam giữ hạt FRC thường là phần xác định nhỏ hơn so với bậc hai bởi vì n_s tăng lên với $\tau_{||}$.

Việc cải thiện đáng kể về $\tau_{||}$ còn yêu cầu rằng lớp biên 456 duy trì độ ổn định tốt (tức là, không có $n = 1$ rãnh, ống vòi rồng, hoặc sự bất ổn định MHD khác thông thường của các hệ thống hở). Việc sử dụng các súng plasma 350 tạo ra cho độ ổn định biên được ưu tiên này. Theo ý nghĩa này, các đầu cắm gương 440 và súng plasma 350 tạo ra hệ thống kiểm soát biên hiệu quả.

Các súng plasma

Các súng plasma 350 cải thiện độ ổn định của các vòi phun cận kiệt FRC 454 bằng cách thất đường. Các plasma từ các súng plasma 350 được tạo ra mà không có mômen góc phương vị, mà chúng tỏ sự hữu ích trong việc kiểm soát các chế độ bất ổn định quay FRC. Do các súng 350 này là phương tiện hiệu quả để kiểm soát độ ổn định

FRC mà không cần kỹ thuật ổn định bốn cực trước đây. Kết quả là, các súng plasma 350 làm cho có thể nhận ưu điểm của các hiệu quả có lợi của các hạt nhanh hoặc đạt được chế độ FRC động lai được cải thiện như được phác thảo trong bản mô tả này. Do đó, các súng plasma 350 khiến cho hệ thống FRC 10 có thể vận hành được với các dòng điện cuộn dây hình yên ngựa chỉ đủ cho việc bẻ gãy điện tử nhưng dưới ngưỡng mà sẽ khiến tạo ra sự bất ổn định FRC và/hoặc dẫn đến sự khuếch tán hạt nhanh mạnh.

Như được đề cập trong phần trình bày về đầu cấm gương ở trên, nếu $\tau_{\parallel}$ có thể được cải thiện một cách đáng kể, plasma từ súng được cung cấp sẽ có thể so sánh được với tốc độ tổn thất hạt ở lớp biên (khoảng 10^{22} /giây). Thời gian tồn tại của plasma được tạo ra từ súng trong hệ thống FRC 10 ở khoảng giá trị miligiây. Thực tế, xem xét plasma từ súng với mật độ n_e khoảng 10^{13} cm^{-3} và nhiệt độ ion bằng khoảng 200 eV, được giữ giữa các đầu cấm gương cuối 440. Độ dài bẫy L và tỷ lệ gương R lần lượt là khoảng 15m và 20m. Đường tự do ở giữa ion do các sự va chạm Coulomb là λ_{ii} khoảng $6 \times 10^3 \text{ cm}$ và, do $\lambda_{ii} \ln R / R < L$, các ion được giữ ở chế độ khí động. Thời gian giam giữ plasma ở chế độ này là τ_{gd} khoảng $RL/2V_s$ khoảng 2 miligiây, trong đó V_s là tốc độ âm thanh ion. Để so sánh, thời gian giam giữ ion thông thường đối với các thông số plasma này sẽ là τ_c khoảng $0,5\tau_{ii}(\ln R + (\ln R)^{0,5})$ khoảng 0,7 miligiây. Sự khuếch tán ngang bất thường có thể, về nguyên lý, rút ngắn thời gian giam giữ plasma. Tuy nhiên, trong hệ thống FRC 10, nếu chúng ta giả sử tốc độ khuếch tán Bohm, thời gian giam giữ ngang được ước lượng đối với plasma từ súng là $\tau_{\perp} > \tau_{gd}$ khoảng 2 miligiây. Vì thế, các súng sẽ tạo ra việc tiếp nhiên liệu đáng kể của lớp biên FRC 456, và việc giam giữ hạt FRC tổng thể được cải thiện.

Hơn nữa, các dòng plasma từ súng có thể được bật lên ở khoảng 150 đến 200 microgiây, mà cho phép sử dụng trong việc khởi động, việc dịch chuyển, và việc hợp nhất FRC vào trong buồng giam giữ 100. Nếu được vận hành quanh giá trị T khoảng 0 (việc khởi đầu dải chính FRC), các plasma từ súng giúp duy trì FRC 450 được tạo ra và hợp nhất động theo sáng chế. Các dữ liệu hạt kết hợp từ các FRC tạo ra và từ các súng là đủ cho việc bắt chùm trung tính, việc gia nhiệt plasma, và việc duy trì dài. Nếu được vận hành ở T trong phạm vi từ -1 đến 0 miligiây, các plasma từ súng có thể điền đầy các ống thạch anh 210 với plasma hoặc ion hóa khí được thổi vào trong các ống

thạch anh, do đó cho phép tạo ra FRC với khí được thổi được giảm bớt hoặc thậm chí có thể bằng không. Cơ cấu sau có thể yêu cầu plasma tạo ra đủ lạnh để cho phép khuếch tán nhanh từ trường định thiên được đảo. Nếu được vận hành ở $T < -2$ miligiây, các dòng plasma có thể làm đầy thể tích đường trường khoảng 1 đến 3 m³ của các vùng tạo ra và giam giữ của các khu vực tạo ra 200 và buồng giam giữ 100 với mật độ plasma đích là vài 10^{13} cm⁻³, đủ để cho phép dựng lên chùm trung tính trước khi FRC đến. Các FRC tạo ra có thể sau đó được tạo ra và được dịch chuyển vào plasma trong bể giam giữ tạo thành. Theo cách này, các súng plasma 350 tạo khả năng ứng biến rộng của các điều kiện vận hành và các chế độ thông số.

Việc định thiên điện

Việc kiểm soát biên dạng điện trường theo hướng kính ở lớp biên 456 là có lợi theo nhiều mặt đối với việc ổn định và việc giam giữ FRC. Do các bộ phận cấu thành định thiên theo sáng chế được triển khai trong hệ thống FRC 10, có thể áp dụng nhiều kiểu phân bố khác nhau theo tính toán của các điện thế cho nhóm các bề mặt từ thông hở qua toàn bộ thiết bị từ các vùng thực sự ở bên ngoài vùng giam giữ trung tâm trong buồng giam giữ 100. Theo cách này, các điện trường theo hướng kính có thể được tạo ra ngang qua lớp biên 456 ở ngay bên ngoài FRC 450. Các điện trường theo hướng kính này sau đó biến đổi việc quay theo góc phương vị của lớp biên 456 và ảnh hưởng đến việc giam giữ của nó nhờ việc thay đổi tốc độ $E \times B$. Việc quay khác bất kỳ giữa lớp biên 456 và lõi FRC 453 có thể sau đó được chuyển vào bên trong của plasma FRC nhờ việc dịch chuyển. Kết quả là, việc kiểm soát lớp biên 456 tác động trực tiếp đến lõi FRC 453. Hơn nữa, do năng lượng tự do trong việc quay plasma có thể còn đáp ứng được đối với các chế độ bất ổn định, kỹ thuật này tạo ra phương tiện trực tiếp để kiểm soát sự bắt đầu và sự tăng trưởng của các sự bất ổn định. Trong hệ thống FRC 10, việc định thiên biên thích hợp tạo ra việc kiểm soát hiệu quả việc vận chuyển và việc quay đường trường hở cũng như việc quay lõi FRC. Vị trí và hình dạng của các điện cực được đề xuất khác nhau 900, 905, 910 và 920 cho phép kiểm soát các nhóm khác nhau của các bề mặt từ thông 455 và ở các điện thế khác nhau và độc lập. Theo cách này, chuỗi rộng của các cấu hình và các độ mạnh điện trường khác nhau có thể được thực hiện, từng loại với tác động đặc trưng khác nhau lên hiệu năng plasma.

Ưu điểm chính của tất cả các kỹ thuật định thiên theo sáng chế này thực tế là tác động plasma lõi và biên có thể có hiệu quả từ việc thực sự ở bên ngoài plasma FRC, tức là không có nhu cầu mang các bộ phận cấu thành vật lý bất kỳ chạm đến plasma nóng trung tâm (mà sẽ có các sự liên quan mật thiết đối với các sự tổn thất năng lượng, từ thông và hạt). Điều này có tác động có lợi chính trên hiệu năng và tất cả ứng dụng tiềm năng của khái niệm HPF.

Dữ liệu thử nghiệm – việc vận hành HPF

Việc phun các hạt nhanh nhờ các chùm từ các súng tạo chùm trung tính 600 đóng vai trò quan trọng trong việc tạo ra chế độ HPF. Fig.16 thể hiện thực tế này. Hình vẽ này mô tả bộ các đường cong thể hiện việc thời gian tồn tại FRC tương quan với độ dài của chùm xung như thế nào. Tất cả các điều kiện vận hành khác được giữ không đổi đối với tất cả các sự phóng điện bao gồm việc khảo sát này. Dữ liệu được lấy trung bình qua nhiều lần phóng và, do đó, đại diện cho tác động thông thường. Rất rõ là, khoảng thời gian chùm dài hơn tạo ra các FRC tồn tại lâu hơn. Nhìn vào dấu hiệu này cũng như các dự đoán khác trong quá trình nghiên cứu này, cho thấy rằng các chùm làm tăng độ ổn định và làm giảm sự tổn thất. Mỗi tương quan giữa độ dài chùm xung và thời gian tồn tại FRC là không hoàn hảo do việc bắn chùm trở nên không hiệu quả dưới kích cỡ plasma nhất định, tức là, do FRC 450 co lại theo kích cỡ vật lý không phải tất cả các chùm phun được chặn và được bắn. Việc co lại của FRC trước hết là do thực tế là sự tổn thất năng lượng thực (khoảng 4 MW) từ plasma FRC trong quá trình phóng điện là lớn hơn một chút so với tổng năng lượng được nạp vào FRC nhờ các chùm trung tính (khoảng 2,5 MW) đối với việc thiết lập thử nghiệm cụ thể. Việc định vị các chùm ở vị trí gần hơn với mặt phẳng giữa của thùng 100 sẽ có xu hướng làm giảm các tổn thất này và kéo dài thời gian tồn tại FRC.

Fig.17 minh họa hiệu quả của các bộ phận cấu thành khác nhau để đạt được chế độ HPF. Hình vẽ này thể hiện một họ các đường cong thông thường mô tả thời gian tồn tại của FRC 450 dưới dạng hàm số thời gian. Trong tất cả các trường hợp hằng số, lượng năng lượng chùm vừa phải (khoảng 2,5 MW) được phun trong toàn bộ khoảng thời gian của từng lần phóng điện. Từng đường cong là đại diện cho sự kết hợp các bộ phận cấu thành khác nhau. Ví dụ, việc vận hành hệ thống FRC 10 mà không cần các

đầu cảm gương 440 bất kỳ, các súng plasma 350 hoặc thu từ các hệ thống thu 800 dẫn đến việc bắt đầu nhanh sự bất ổn định quay và sự tổn thất của topo FRC. Việc bổ sung chỉ các đầu cảm gương 440 làm chậm việc bắt đầu các chế độ bất ổn định và làm tăng việc giam giữ. Việc sử dụng dạng kết hợp của các đầu cảm gương 440 và súng plasma 350 tiếp tục làm giảm các sự bất ổn định và làm tăng thời gian tồn tại FRC. Việc thu bổ sung cuối cùng (Ti trong trường hợp này) trên đỉnh của súng 350 và các đầu cảm gương 440 cho ra các kết quả tốt nhất - FRC tạo thành không phụ thuộc vào các sự bất ổn định và thể hiện thời gian tồn tại dài nhất. Từ thử nghiệm này thấy rõ rằng, việc kết hợp toàn diện của các bộ phận cấu thành 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, chế độ HPF mới được phát hiện ra thể hiện một cách đột ngột tác động vận chuyển được cải thiện. Fig.1 thể hiện sự thay đổi về thời gian giam giữ hạt trong hệ thống FRC 10 giữa chế độ thông thường và chế độ HPF. Có thể thấy rằng, nó cải thiện tốt đến 5 lần trong chế độ HPF. Ngoài ra, Fig.1 thể hiện chi tiết thời gian giam giữ hạt trong hệ thống FRC 10 so với thời gian giam giữ hạt trong các thử nghiệm FRC thông thường trước đó. Khi xét đến các thiết bị khác này, chế độ HPF của hệ thống FRC 10 có sự giam giữ được cải thiện với số lần là 5 và gần đến 20. Cuối cùng và quan trọng nhất là, bản chất của thang đo giam giữ của hệ thống FRC 10 trong chế độ HPF là khác nhiều so với tất cả các phép đo theo kỹ thuật trước đó. Trước khi thiết lập chế độ HPF trong hệ thống FRC 10, có các quy tắc về thang đo thử nghiệm khác nhau được đúc kết từ dữ liệu để đoán trước các thời gian giam giữ trong các thử nghiệm FRC theo kỹ thuật trước đó. Tất cả các quy tắc về thang đo phụ thuộc hầu hết vào tỷ lệ R^2/p_i , trong đó R là bán kính của từ trường vô hiệu (phép đo lòng của thang đo vật lý của thiết bị) và p_i là bán kính Larmor ion được đánh giá trong trường được áp dụng bên ngoài (phép đo lòng của từ trường được áp dụng). Rõ ràng từ Fig.1 là việc giam giữ lâu dài của các FRC thông thường chỉ có thể ở thiết bị cỡ lớn và/hoặc từ trường cao. Việc vận hành hệ thống FRC 10 trong chế độ FRC thông thường CR có xu hướng tuân thủ các quy tắc về thang đo đó, như được chỉ ra trên Fig.1. Tuy nhiên, chế độ HPF là cao hơn rất nhiều và thể hiện rằng việc giam giữ tốt hơn nhiều có thể đạt được mà không nhất thiết bị cỡ lớn hoặc các từ trường cao. Quan trọng hơn, cũng rõ ràng từ Fig.1 là chế độ HPF dẫn đến thời gian giam giữ được cải thiện với kích cỡ

plasma được giảm bớt khi so sánh với chế độ CR. Các xu hướng tương tự cũng thấy được đối với các thời gian giam giữ từ thông và năng lượng, như được mô tả dưới đây, mà làm tăng khoảng quá từ 3 đến 8 trong hệ thống FRC 10 nữa. Do đó, việc phá vỡ chế độ HPF tạo khả năng việc sử dụng năng lượng chùm vừa phải, các từ trường thấp hơn và kích thước nhỏ hơn để giữ được và duy trì sự cân bằng FRC trong hệ thống FRC 10 và các thiết bị năng lượng cao hơn trong tương lai. Nhờ các cải thiện này dẫn đến sự vận hành thấp và chi phí tạo nên cũng như độ phức tạp về thiết kế được giảm bớt.

Để tiếp tục so sánh, Fig.18 thể hiện dữ liệu từ sự phóng điện trong chế độ HPF đại diện trong hệ thống FRC 10 dưới dạng hàm số thời gian. Fig.18(a) mô tả bán kính từ thông được loại bỏ ở mặt phẳng giữa. Đối với các thang thời gian dài hơn này, thành thép dẫn điện không còn là phần bảo tồn từ thông tốt nữa và các đầu dò từ bên trong so với thành là tăng lên với các đầu dò bên ngoài thành để tính đúng đối với sự khuếch tán từ thông qua thép. So sánh với hiệu năng thông thường trong chế độ CR thông thường, như được thể hiện trên Fig.13, cách thức vận hành chế độ HPF thể hiện thời gian tồn tại dài hơn quá 400%.

Sợi đại diện của vết mật độ được tích hợp của đường được thể hiện trên Fig.18(b) với hệ số hỗ trợ được đảo ngược Abel của nó, các đường viền mật độ, trên Fig.18(c). So sánh với chế độ FRC thông thường CR, như được thể hiện trên Fig.13, plasma thụ động hơn qua toàn bộ xung, biểu lộ sự vận hành rất ổn định. Mật độ đỉnh (peak) cũng thấp hơn một chút trong trường hợp phóng HPF - đây là hệ quả của tổng nhiệt độ plasma nóng hơn (lên đến 2 lần) như được thể hiện trên Fig.18(d).

Đối với sự phóng điện tương ứng được thể hiện trên Fig.18, thời gian giam giữ năng lượng, hạt và từ thông lần lượt là 0,5 miligiây, 1 miligiây và 1 miligiây. Ở thời gian tham chiếu là 1 miligiây trong quá trình phóng điện, năng lượng plasma được lưu trữ là 2kJ trong khi các sự tổn thất là ở khoảng 4 MW, khiến cho mục tiêu này rất phù hợp cho việc duy trì chùm trung tính.

Fig.19 bao gồm tất cả các ưu điểm của chế độ HPF dưới dạng thang đo giam giữ từ thông HPF thử nghiệm được thiết lập mới. Có thể thấy được trên Fig.19, dựa trên các phép đo được thực hiện trước và sau $T = 0,5$ miligiây, tức là, $T \leq 0,5$ miligiây

và $T > 0,5$ miligiây, các thang đo giam giữ có dạng gần như là hình vuông của nhiệt độ điện tử. Thang đo mạnh này với năng lượng dương là T_e (và không phải là năng lượng âm) hoàn toàn ngược với phần được thể hiện bởi các dấu hiệu toko (tokomaks) thông thường, trong đó mức giam giữ thường là tỷ lệ nghịch với một ít năng lượng của nhiệt độ điện tử. Việc biểu hiện của thang đo này là hệ quả trực tiếp của trạng thái HPF và mật độ ion quỹ đạo lớn (tức là các quỹ đạo trên thang đo của topo FRC và/hoặc ít nhất thang đo độ dài gradien từ trường đặc trưng). Về cơ bản, thang đo mới này gần như là có lợi cho các nhiệt độ vận hành cao và tạo khả năng cho các bình phản ứng được định cỡ tương đối vừa phải.

Trong khi sáng chế dễ dàng có các dạng biến đổi khác nhau, và các dạng khác, các ví dụ cụ thể của nó được thể hiện trên các hình vẽ và được mô tả chi tiết trong bản mô tả này. Tuy nhiên cần phải hiểu rằng, sáng chế không chỉ giới hạn ở các dạng hoặc các phương pháp cụ thể được mô tả, mà ngược lại, sáng chế bao hàm tất cả các dạng biến đổi, các dạng tương đương và các dạng khác nằm trong nguyên lý và phạm vi của các điểm yêu cầu bảo hộ kèm theo.

Trong phần mô tả trên đây, chỉ nhằm mục đích giải thích, các thuật ngữ cụ thể được đưa ra để nhằm hiểu rõ phần mô tả. Tuy nhiên, sẽ là rõ ràng đối với người có hiểu biết trung bình về lĩnh vực kỹ thuật này là, các chi tiết cụ thể này không được yêu cầu để áp dụng thực tế kiến thức bản mô tả.

Các dấu hiệu khác nhau của các ví dụ đại diện và các điểm yêu cầu bảo hộ phụ thuộc có thể được kết hợp theo cách mà không được liệt kê cụ thể và rõ ràng để đề xuất các phương án hữu dụng bổ sung của bản mô tả này. Cần phải lưu ý một cách rõ ràng rằng, tất cả các khoảng giá trị hoặc các chỉ dẫn về các nhóm thực thể đã bộc lộ mọi giá trị trung gian có thể hoặc thực thể trung gian cho mục đích bộc lộ ban đầu, cũng như cho mục đích giới hạn đối tượng được yêu cầu bảo hộ.

Các hệ thống và các phương pháp để tạo ra và duy trì chế độ HPF FRC đã được bộc lộ. Cần phải hiểu rằng, các phương án được mô tả ở đây chỉ nhằm mục đích làm sáng tỏ và không được xem là giới hạn đối tượng của phần mô tả. Các dạng biến đổi, sử dụng, thay thế, kết hợp, cải thiện, các phương pháp tạo ra khác nhau mà không lệch khỏi phạm vi hoặc nguyên lý của sáng chế sẽ là rõ ràng đối với người có hiểu biết

trung bình về lĩnh vực kỹ thuật này. Ví dụ, người đọc dễ hiểu rằng trình tự và sự kết hợp cụ thể của các hoạt động quy trình được mô tả ở đây chỉ là để minh họa, trừ khi được nêu cụ thể khác, và sáng chế có thể được thực hiện bằng cách sử dụng các hoạt động xử lý khác nhau hoặc bổ sung, hoặc sự kết hợp hoặc trình tự khác nhau các hoạt động xử lý. Dưới dạng một ví dụ khác, từng đặc tính của một phương án có thể được trộn và được làm phù hợp với các dấu hiệu khác được thể hiện theo các phương án khác. Các dấu hiệu và các quy trình đã được biết đối với các người có hiểu biết trung bình về lĩnh vực kỹ thuật này có thể được kết hợp tương tự nếu muốn. Ngoài ra và rõ ràng, các dấu hiệu có thể được bổ sung hoặc loại bỏ nếu muốn. Do đó, sáng chế không bị hạn chế, ngoại trừ các điểm yêu cầu bảo hộ dưới đây và các dạng tương đương của chúng.

YÊU CẦU BẢO HỘ

1. Hệ thống tạo ra và duy trì từ trường với cấu hình trường đảo (Field Reversed Configuration - FRC), hệ thống này bao gồm:

buồng giam giữ,

các khu vực tạo ra FRC đối diện hoàn toàn thứ nhất và thứ hai được ghép với buồng giam giữ, khu vực tạo ra bao gồm các hệ thống tạo ra được tạo môđun để tạo ra FRC và dịch chuyển nó hướng về mặt phẳng giữa của buồng giam giữ,

các bộ chuyển hướng thứ nhất và thứ hai được ghép với các khu vực tạo ra thứ nhất và thứ hai,

các súng plasma theo hướng trục thứ nhất và thứ hai được ghép về mặt vận hành với các bộ chuyển hướng thứ nhất và thứ hai, các khu vực tạo ra thứ nhất và thứ hai và buồng giam giữ,

nhiều đầu phun chùm nguyên tử trung tính được ghép với buồng giam giữ và được định hướng trục giao với trục của buồng giam giữ,

hệ thống từ tính được ghép với buồng giam giữ, các khu vực tạo ra thứ nhất và thứ hai, và các bộ chuyển hướng thứ nhất và thứ hai, hệ thống từ tính này bao gồm các đầu cảm gương thứ nhất và thứ hai nằm giữa các khu vực tạo ra thứ nhất và thứ hai và các bộ chuyển hướng thứ nhất và thứ hai,

hệ thống thu được ghép với buồng giam giữ và các bộ chuyển hướng thứ nhất và thứ hai,

một hoặc nhiều điện cực định thiên để định thiên về mặt điện bề mặt từ thông hở của FRC được tạo ra, một hoặc nhiều điện cực định thiên được định vị trong một hoặc nhiều buồng giam giữ, các khu vực tạo ra thứ nhất và thứ hai, và các bộ chuyển hướng thứ nhất và thứ hai,

hai hoặc nhiều cuộn dây hình yên ngựa được ghép với buồng giam giữ, và

đầu phun hạt ion được ghép với buồng giam giữ.

2. Hệ thống theo điểm 1, trong đó hệ thống được tạo cấu hình để thích hợp với chân không có áp suất cơ sở là khoảng bằng hoặc nhỏ hơn 10^{-8} torr ($133,32 \times 10^{-8}$ N/m²).

3. Hệ thống theo điểm 1, trong đó các khu vực tạo ra thứ nhất và khu vực tạo ra thứ hai bao gồm ống kéo dài.

4. Hệ thống theo điểm 3, trong đó ống kéo dài là ống thạch anh với lớp lót.

5. Hệ thống theo điểm 4, trong đó lớp lót được làm bằng thạch anh siêu tinh khiết.

6. Hệ thống theo điểm 3, trong đó các hệ thống tạo ra là các hệ thống tạo ra năng lượng được tạo xung.

7. Hệ thống theo điểm 1, trong đó nhiều đầu phun chùm nguyên tử trung tính bao gồm một hoặc nhiều đầu phun chùm nguyên tử trung tính nguồn plasma RF và một hoặc nhiều đầu phun chùm nguyên tử trung tính nguồn hình cung.

8. Hệ thống theo điểm 1, trong đó:

nhiều đầu phun chùm nguyên tử trung tính được định hướng với đường phun tiếp tuyến với FRC với vùng bắn đích trong biên phân tách của FRC; và

đầu phun hạt là đầu phun hạt 12 bình được ghép với buồng giam giữ và định hướng để gửi các hạt ion vào FRC.

9. Hệ thống tạo ra và duy trì từ trường với cấu hình trường đảo (FRC) bao gồm:

buồng giam giữ,

các khu vực tạo ra FRC đối diện hoàn toàn thứ nhất và thứ hai được ghép với buồng giam giữ,

các bộ chuyển hướng thứ nhất và thứ hai được ghép với các khu vực tạo ra thứ nhất và thứ hai,

các súng plasma theo hướng trục thứ nhất và thứ hai được ghép về mặt vận hành với các bộ chuyển hướng thứ nhất và thứ hai, các khu vực tạo ra thứ nhất và thứ hai và buồng giam giữ,

nhiều đầu phun chùm nguyên tử trung tính được ghép với buồng giam giữ và được định hướng trục giao với trục của buồng giam giữ, và

hệ thống từ tính được ghép với buồng giam giữ, các khu vực tạo ra thứ nhất và thứ hai, các bộ chuyển hướng thứ nhất và thứ hai, hệ thống từ tính bao gồm các đầu

cắm gương thứ nhất và thứ hai định vị giữa các khu vực tạo ra thứ nhất và thứ hai và các bộ chuyển hướng thứ nhất và thứ hai.

10. Hệ thống theo điểm 1 hoặc 9, trong đó:

hệ thống từ tính bao gồm nhiều cuộn dây tựa như là dc (quasi-dc) được đặt cách một khoảng theo hướng trục ở các vị trí dọc theo buồng giam giữ, các khu vực tạo ra thứ nhất và thứ hai, và các bộ chuyển hướng thứ nhất và thứ hai;

hệ thống từ tính còn bao gồm bộ cuộn dây gương thứ nhất được định vị giữa các đầu của buồng giam giữ và các khu vực tạo ra thứ nhất và thứ hai; và

đầu cắm gương bao gồm bộ cuộn dây gương thứ hai giữa mỗi trong số các khu vực tạo ra thứ nhất và thứ hai và các bộ chuyển hướng thứ nhất và thứ hai.

11. Hệ thống theo điểm 10, trong đó đầu cắm gương còn bao gồm bộ các cuộn dây đầu cắm gương bọc quanh phần thất lại trên đường đi giữa mỗi khu vực trong số các khu vực tạo ra thứ nhất và thứ hai và các bộ chuyển hướng thứ nhất và thứ hai.

12. Hệ thống theo điểm 9, hệ thống này còn bao gồm một hoặc nhiều điện cực định thiên để định thiên về mặt điện bề mặt từ thông hở của FRC được tạo ra, một hoặc nhiều điện cực định thiên được định vị trong một hoặc nhiều buồng giam giữ, các khu vực tạo ra thứ nhất và thứ hai, và các bộ chuyển hướng thứ nhất và thứ hai.

13. Hệ thống theo điểm 9, trong đó khu vực tạo ra bao gồm các hệ thống tạo ra dưới dạng môđun để tạo thành FRC và dịch chuyển nó về phía mặt phẳng giữa của buồng giam giữ.

14. Hệ thống tạo ra và duy trì từ trường với cấu hình trường đảo (FRC) bao gồm:

buồng giam giữ,

các khu vực tạo ra FRC đối diện hoàn toàn thứ nhất và thứ hai được ghép với buồng giam giữ,

các bộ chuyển hướng thứ nhất và thứ hai được ghép với các khu vực tạo ra thứ nhất và thứ hai,

nhiều vòi phun chùm nguyên tử trung tính được ghép với buồng giam giữ và được định hướng trục giao với trục của buồng giam giữ,

hệ thống từ tính được ghép với buồng giam giữ, các khu vực tạo ra thứ nhất và thứ hai, và các bộ chuyển hướng thứ nhất và thứ hai, và

một hoặc nhiều điện cực định thiên để định thiên về mặt điện các bề mặt dòng hở của FRC được tạo ra, một hoặc nhiều điện cực định thiên được định vị trong một hoặc nhiều buồng giam giữ, các khu vực tạo ra thứ nhất và thứ hai, và các bộ chuyển hướng thứ nhất và thứ hai.

15. Hệ thống theo điểm bất kỳ trong số các điểm 1, 9, và 14, trong đó hệ thống từ tính bao gồm nhiều cuộn dây tựa như là dc được đặt cách một khoảng theo hướng trục ở các vị trí dọc theo buồng giam giữ, các khu vực tạo ra thứ nhất và thứ hai, và các bộ chuyển hướng thứ nhất và thứ hai.

16. Hệ thống theo điểm 15, trong đó hệ thống từ tính này còn bao gồm bộ cuộn dây gương thứ nhất được định vị giữa các đầu của buồng giam giữ và các khu vực tạo ra thứ nhất và thứ hai.

17. Hệ thống theo điểm 16, trong đó các đầu cắm gương thứ nhất và thứ hai còn bao gồm bộ các cuộn dây đầu cắm gương bọc quanh phần thắt lại trên đường đi giữa mỗi khu vực trong số các khu vực tạo ra thứ nhất và thứ hai và các bộ chuyển hướng thứ nhất và thứ hai.

18. Hệ thống theo điểm 11 hoặc 17, trong đó các cuộn dây đầu cắm gương là cuộn dây gương nhỏ gọn được tạo xung.

19. Hệ thống theo điểm 14, trong đó các khu vực tạo ra thứ nhất và thứ hai bao gồm ống thạch anh kéo dài.

20. Hệ thống theo điểm 19, trong đó khu vực tạo ra là các hệ thống tạo ra năng lượng được tạo xung được ghép cặp với ống thạch anh.

21. Hệ thống theo điểm 9 hoặc 14, trong đó hệ thống này còn bao gồm hệ thống thu được ghép cặp với buồng giam giữ và các bộ chuyển hướng thứ nhất và thứ hai.

22. Hệ thống tạo ra và duy trì từ trường với cấu hình trường đảo (FRC) bao gồm:

buồng giam giữ,

khu vực tạo ra FRC đối diện hoàn toàn thứ nhất và thứ hai được ghép với buồng giam giữ,

các bộ chuyển hướng thứ nhất và thứ hai được ghép với các khu vực tạo ra thứ nhất và thứ hai,

các súng plasma theo hướng trục thứ nhất và thứ hai được ghép về mặt vận hành với các bộ chuyển hướng thứ nhất và thứ hai, các khu vực tạo ra thứ nhất và thứ hai và buồng giam giữ,

nhiều vòi phun chùm nguyên tử trung tính được ghép với buồng giam giữ và được định hướng trục giao với trục của buồng giam giữ, và

hệ thống từ tính được ghép với buồng giam giữ, các khu vực tạo ra thứ nhất và thứ hai, và các bộ chuyển hướng thứ nhất và thứ hai.

23. Hệ thống theo điểm 22, trong đó các khu vực riêng rẽ của các khu vực tạo ra thứ nhất và thứ hai bao gồm ống kéo dài và hệ thống tạo ra năng lượng được tạo xung được ghép với ống kéo dài.

24. Hệ thống theo điểm bất kỳ trong số các điểm 3, 20 và 23, trong đó:

các hệ thống tạo ra bao gồm nhiều bộ phận năng lượng và kiểm soát được ghép với các cụm riêng rẽ trong số nhiều cụm bản giăng để kích hoạt bộ các cuộn dây của các cụm riêng rẽ trong số nhiều cụm bản giăng bọc quanh ống kéo dài của các khu vực tạo ra thứ nhất và thứ hai; và

các bộ phận riêng rẽ trong số nhiều bộ phận năng lượng và kiểm soát bao gồm bộ khởi động và hệ thống kiểm soát.

25. Hệ thống theo điểm 24, trong đó bộ khởi động và các hệ thống kiểm soát của các bộ phận riêng rẽ trong số nhiều bộ phận năng lượng và kiểm soát là đồng bộ được để cho phép tạo ra FRC tĩnh, trong đó FRC được tạo ra và sau đó được phun hoặc tạo ra FRC động, trong đó FRC được tạo ra và được dịch chuyển một cách đồng thời.

26. Hệ thống theo điểm 22, hệ thống này còn bao gồm một hoặc nhiều điện cực định thiên để định thiên về mặt điện các bề mặt dòng hở của FRC được tạo ra.

27. Hệ thống theo điểm 22, trong đó hệ thống từ tính bao gồm nhiều cuộn dây tựa như là dc được đặt cách một khoảng theo hướng trục ở các vị trí dọc theo các buồng giam giữ, các khu vực tạo ra thứ nhất và thứ hai, và các bộ chuyển hướng thứ nhất và thứ hai, và bộ các cuộn dây gương thứ nhất được định vị giữa các đầu của bộ chuyển hướng và các khu vực tạo ra thứ nhất và thứ hai.

28. Hệ thống theo điểm 16 khi phụ thuộc vào điểm 14, hoặc hệ thống theo điểm 27, trong đó hệ thống từ tính còn bao gồm các đầu cắm gương thứ nhất và thứ hai, trong đó các bộ đầu cắm gương thứ nhất và thứ hai bao gồm bộ cuộn dây gương thứ hai giữa mỗi trong số các khu vực tạo ra thứ nhất và thứ hai và các bộ chuyển hướng thứ nhất và thứ hai.

29. Hệ thống theo điểm 28 khi phụ thuộc vào điểm 27, trong đó đầu cắm gương còn bao gồm bộ các cuộn dây đầu cắm gương được tạo xung nhỏ gọn được quấn quanh phần thắt lại trên đường đi giữa mỗi trong số các khu vực tạo ra thứ nhất và thứ hai và các bộ chuyển hướng thứ nhất và thứ hai.

30. Hệ thống theo điểm bất kỳ trong số các điểm 7, 14 và 22, trong đó nhiều vòi phun chùm nguyên tử trung tính được định hướng với đường phun tiếp tuyến với FRC với vùng bẫy đích trong biên phân tách của FRC.

31. Hệ thống theo điểm bất kỳ trong số các điểm 7, 14 và 22, hệ thống này còn bao gồm đầu phun hạt ion được ghép với buồng giam giữ.

32. Hệ thống theo điểm bất kỳ trong số các điểm 7, 14 và 22, hệ thống này còn bao gồm hai hoặc nhiều cuộn dây hình yên ngựa được ghép với buồng giam giữ.

33. Hệ thống theo điểm 22, hệ thống này còn bao gồm hệ thống thu được tạo kết cấu để phủ các bề mặt hướng plasma của buồng giam giữ và các bộ chuyển hướng thứ nhất và thứ hai với lớp thu vật chất.

34. Hệ thống tạo ra và duy trì từ trường với cấu hình trường đảo (FRC) bao gồm:

buồng giam giữ,

các khu vực tạo ra FRC đối diện hoàn toàn thứ nhất và thứ hai được ghép với buồng giam giữ,

các bộ chuyển hướng thứ nhất và thứ hai được ghép với các khu vực tạo ra thứ nhất và thứ hai,

nhiều vòi phun chùm nguyên tử trung tính được ghép với buồng giam giữ và được định hướng trực giao với trục của buồng giam giữ,

hệ thống từ tính được ghép với buồng giam giữ, các khu vực tạo ra thứ nhất và thứ hai, và các bộ chuyển hướng thứ nhất và thứ hai, và

hệ thống thu được tạo kết cấu để phủ các bề mặt hướng plasma của buồng giam giữ và các bộ chuyển hướng thứ nhất và thứ hai với lớp thu vật chất.

35. Hệ thống theo điểm 1 hoặc 34, trong đó hệ thống thu bao gồm một hoặc nhiều hệ thống lắng đọng titan và một hệ thống lắng đọng liti mà phủ các bề mặt hướng plasma của buồng giam giữ và các bộ chuyển hướng thứ nhất và thứ hai.

36. Hệ thống theo điểm 35, trong đó các hệ thống lắng đọng áp dụng các kỹ thuật lắng đọng hơi.

37. Hệ thống theo điểm 35, trong đó hệ thống lắng đọng liti bao gồm nhiều lò nguyên tử với các vòi dẫn.

38. Hệ thống theo điểm 35, trong đó hệ thống lắng đọng titan bao gồm nhiều khối cầu rắn được gia nhiệt với đai dẫn.

39. Hệ thống theo điểm 34, trong đó các khu vực riêng rẽ trong số các khu vực tạo ra thứ nhất và thứ hai bao gồm ống kéo dài và hệ thống tạo ra năng lượng được tạo xung được ghép với ống kéo dài.

40. Hệ thống theo điểm bất kỳ trong số các điểm 3, 20, 23 và 39, trong đó các hệ thống tạo ra bao gồm nhiều bộ phận năng lượng và kiểm soát được ghép với các cụm riêng rẽ trong số nhiều cụm bản giăng để kích hoạt bộ các cuộn dây của các cụm riêng rẽ trong số nhiều cụm bản giăng bọc quanh ống kéo dài của các khu vực tạo ra thứ nhất và thứ hai.

41. Hệ thống theo điểm 34, hệ thống này còn bao gồm một hoặc nhiều điện cực định thiên để định thiên về mặt điện các bề mặt dòng hở của FRC được tạo ra.

42. Hệ thống tạo ra và duy trì từ trường với cấu hình trường đảo (FRC) bao gồm:

buồng giam giữ,

các khu vực tạo ra FRC đối diện hoàn toàn thứ nhất và thứ hai được ghép với buồng giam giữ,

các bộ chuyển hướng thứ nhất và thứ hai được ghép với các khu vực tạo ra thứ nhất và thứ hai,

nhiều đầu phun chùm nguyên tử trung tính được ghép với buồng giam giữ và được định hướng trực giao với trục của buồng giam giữ, và

hệ thống từ tính được ghép với buồng giam giữ, các khu vực tạo ra thứ nhất và thứ hai, và các bộ chuyển hướng thứ nhất và thứ hai, hệ thống từ tính bao gồm hai hoặc nhiều cuộn dây hình yên ngựa được ghép với buồng giam giữ ở mỗi bên của mặt phẳng giữa của buồng giam giữ.

43. Hệ thống theo điểm bất kỳ trong số các điểm 1, 9, 14, 22, 34 và 42, trong đó hệ thống được tạo kết cấu để tạo ra FRC có sự giam giữ hạt mà lớn bởi ít nhất một phần tử của hai độ lệch hơn sự giam giữ hạt của FRC có bán kính gần như là bằng với khoảng trống từ trường (R) và phạm vi giam giữ hạt mà gần như phụ thuộc vào tỷ lệ R^2/p_i , trong đó p_i là bán kính larmor ion được đánh giá trong trường áp dụng bên ngoài.

44. Hệ thống theo điểm bất kỳ trong số các điểm 9, 14, 34 và 42, hệ thống này còn bao gồm các súng plasma theo hướng trục thứ nhất và thứ hai được ghép về mặt vận hành với các bộ chuyển hướng thứ nhất và thứ hai, các khu vực tạo ra thứ nhất và thứ hai và buồng giam giữ.

45. Hệ thống theo điểm 42, trong đó các khu vực tạo ra riêng rẽ thứ nhất và thứ hai bao gồm ống kéo dài và các hệ thống tạo ra năng lượng được tạo xung được ghép với ống kéo dài.

46. Hệ thống theo điểm 42, hệ thống này còn bao gồm một hoặc nhiều điện cực định thiên để định thiên về mặt điện các bề mặt từ thông hở của FRC được tạo ra.

47. Hệ thống theo điểm bất kỳ trong số các điểm 1, 14, 26, 41 và 46, trong đó một hoặc nhiều điện cực định thiên bao gồm một hoặc nhiều trong số một hoặc nhiều điện cực điểm được định vị trong buồng chứa để tiếp xúc với các đường trường hở, bộ điện

cực hình khuyên giữa buồng giam giữ và các khu vực tạo ra thứ nhất và thứ hai để nạp điện cho các lớp từ thông biên xa theo cách đối xứng phương vị, nhiều điện cực xếp chồng đồng tâm được định vị trong các bộ chuyển hướng thứ nhất và thứ hai để nạp điện cho nhiều lớp từ thông đồng tâm, và các anot của các súng plasma để chặn từ thông hở.

48. Hệ thống theo điểm 34 hoặc 42, trong đó hệ thống từ tính bao gồm nhiều cuộn dây tựa như là dc được đặt cách một khoảng theo hướng trục ở các vị trí dọc theo buồng giam giữ, các khu vực tạo ra thứ nhất và thứ hai, và các bộ chuyển hướng thứ nhất và thứ hai, bộ cuộn dây gương thứ nhất được định vị giữa các đầu của buồng giam giữ và các khu vực tạo ra thứ nhất và thứ hai, và bộ cuộn dây gương thứ hai giữa mỗi khu vực trong số các khu vực tạo ra thứ nhất và thứ hai và các bộ chuyển hướng thứ nhất và thứ hai.

49. Hệ thống theo điểm 34 hoặc 48, hệ thống này còn bao gồm bộ cuộn dây gương được tạo xung nhỏ gọn bọc quanh phần thắt lại trên đường đi giữa mỗi khu vực trong số các khu vực tạo ra thứ nhất và thứ hai và các bộ chuyển hướng thứ nhất và thứ hai.

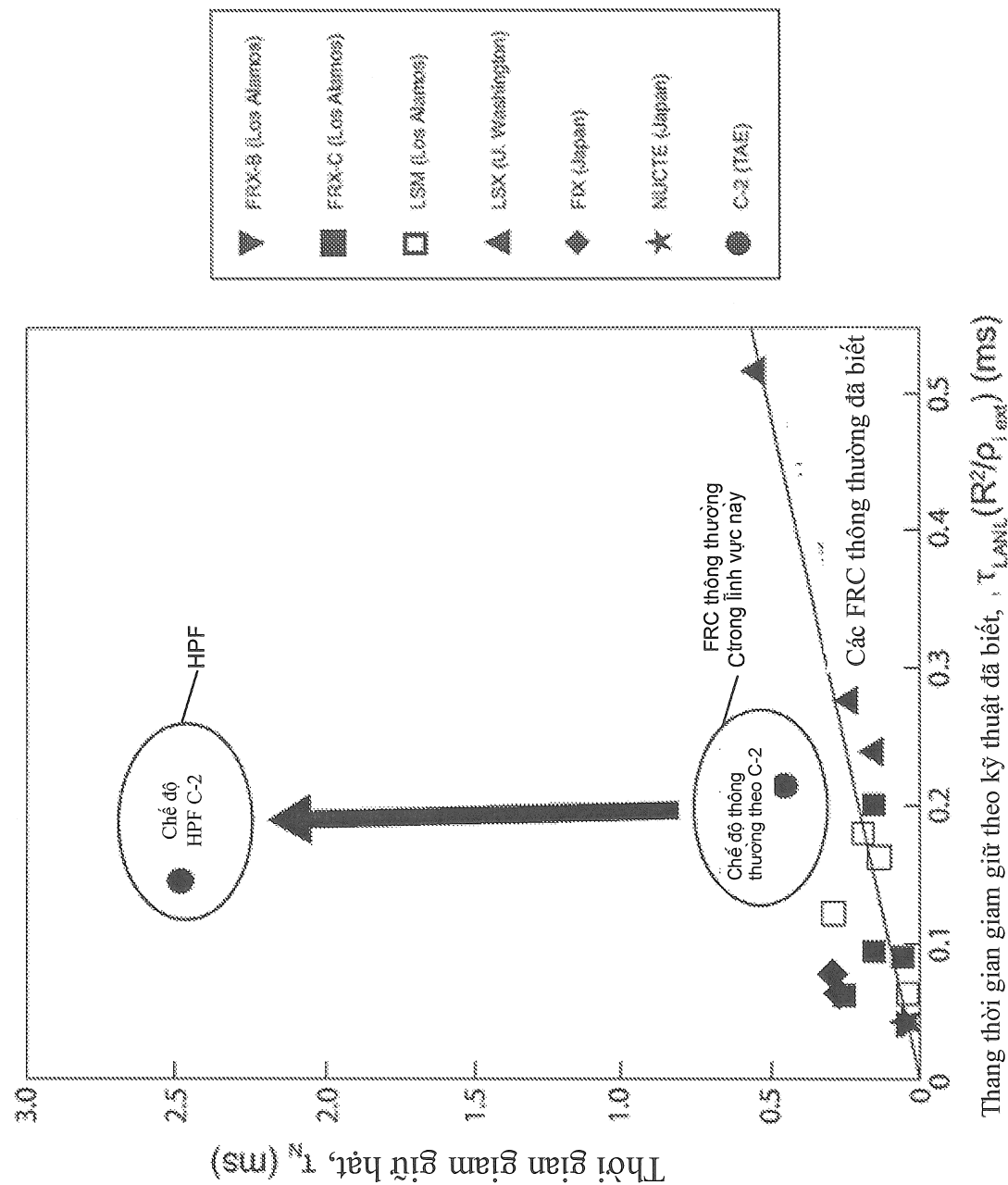


Fig.1

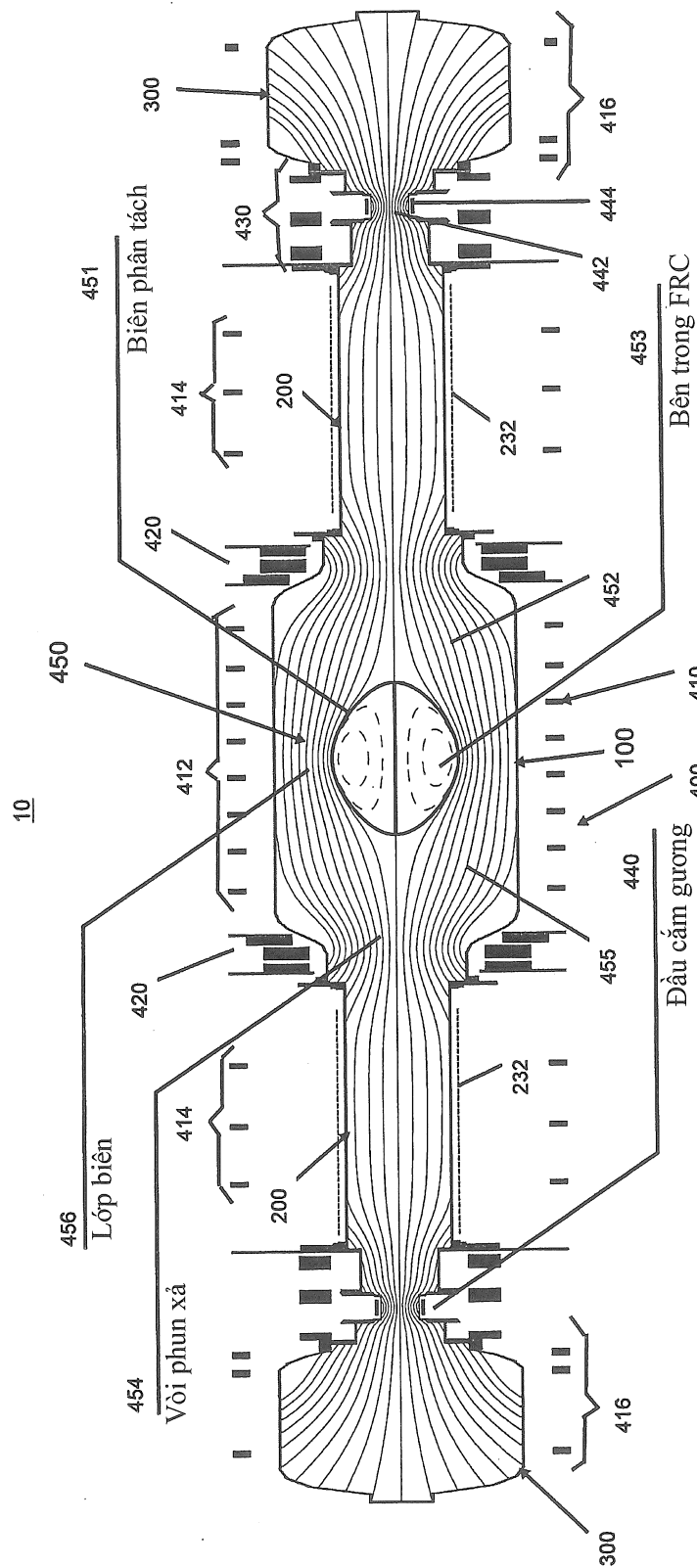
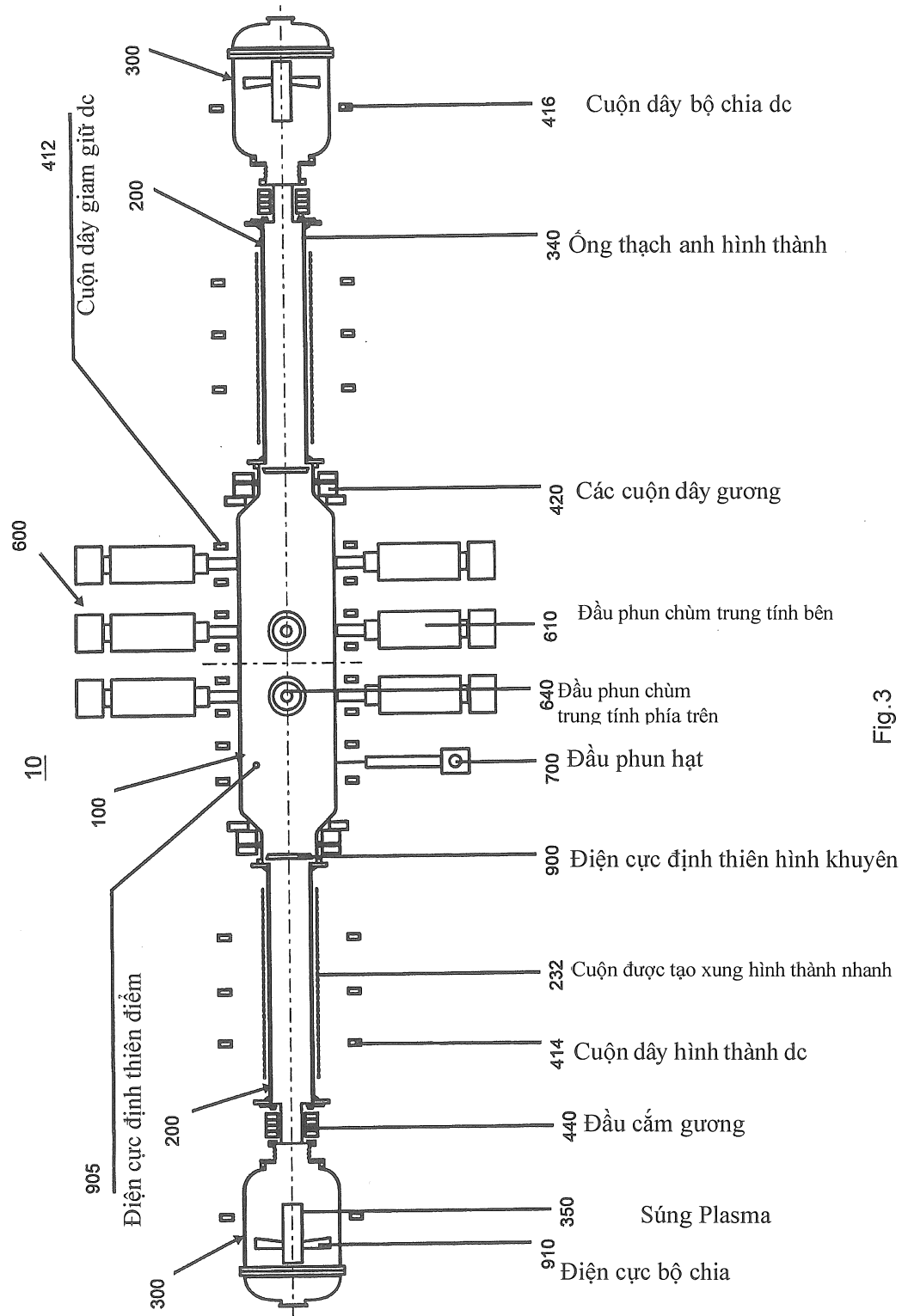
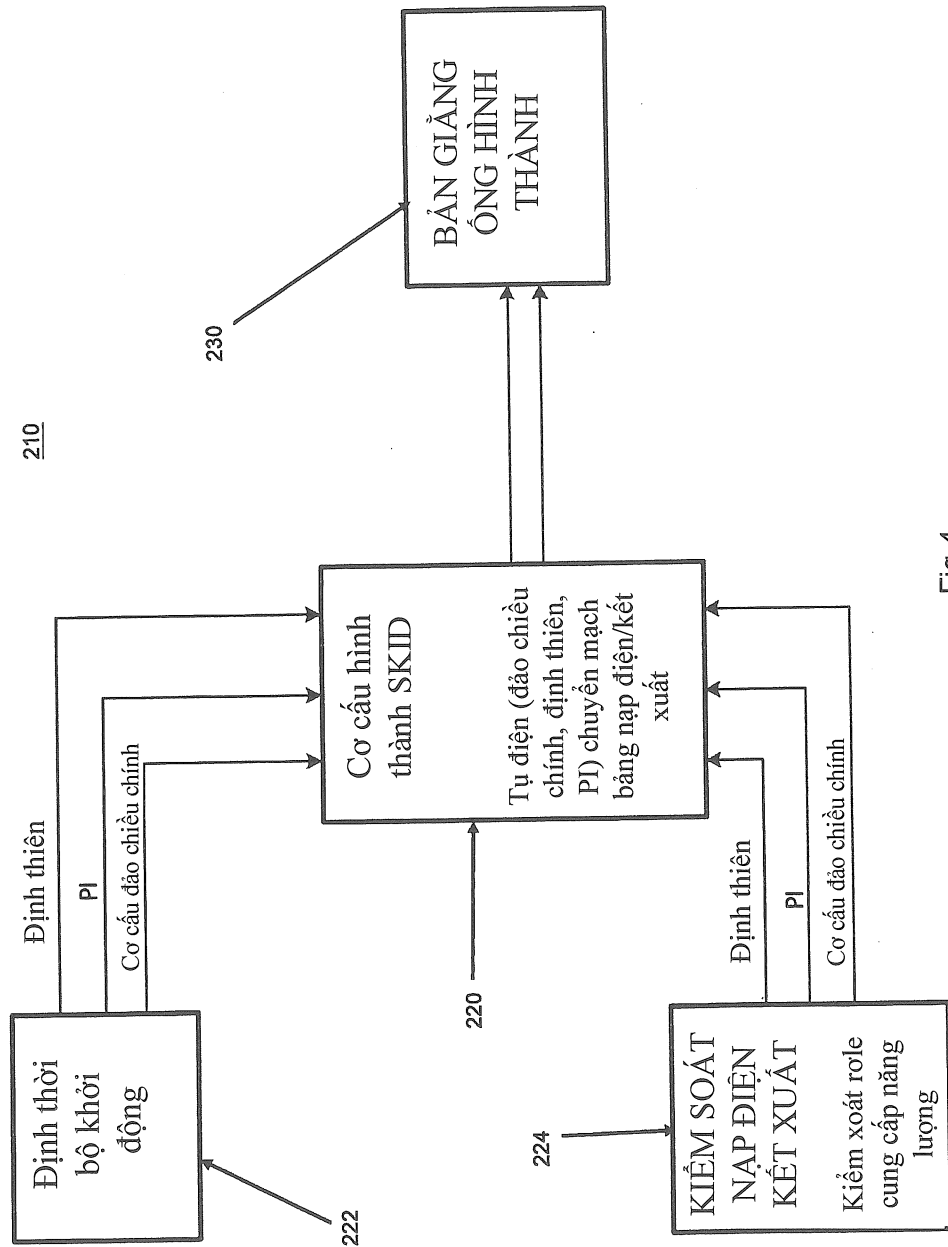


Fig. 2





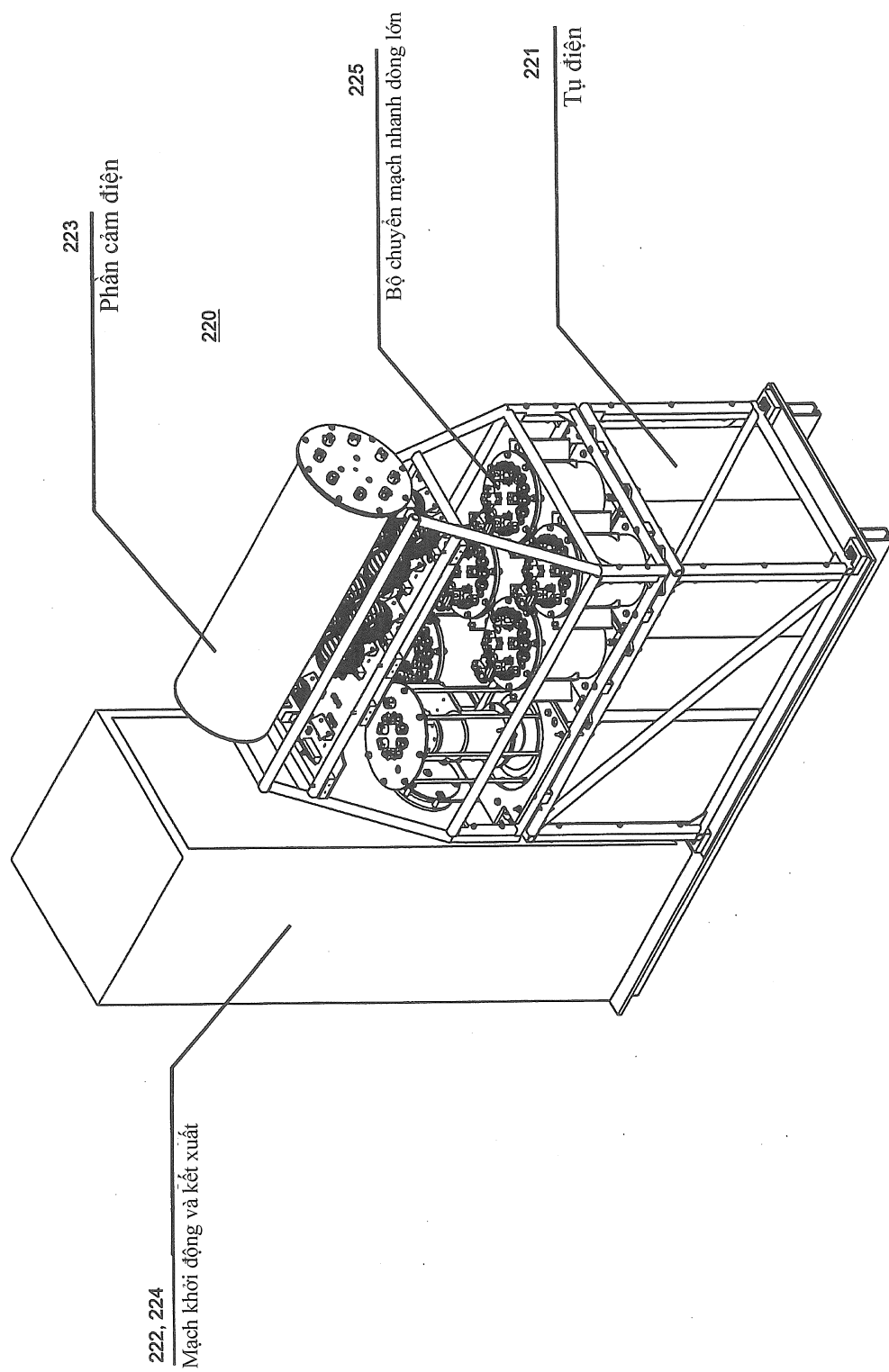


Fig. 5

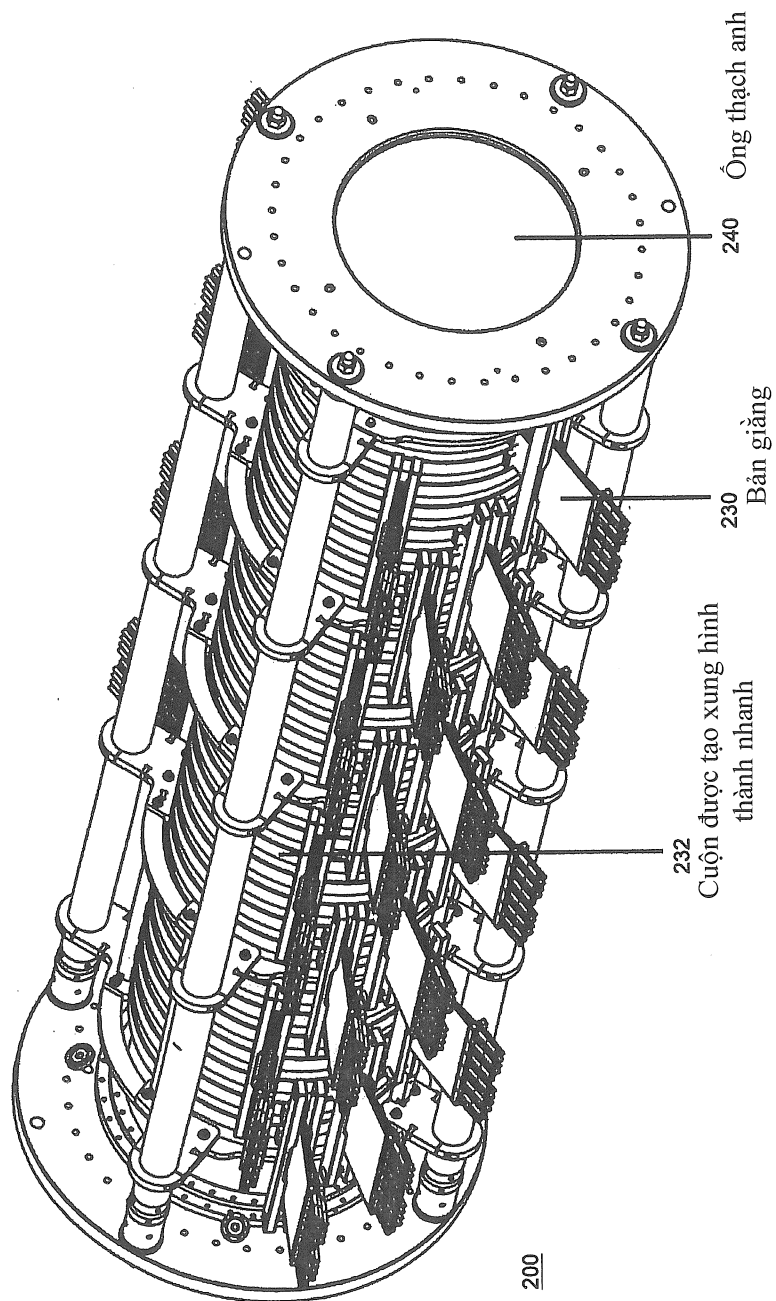


Fig.6

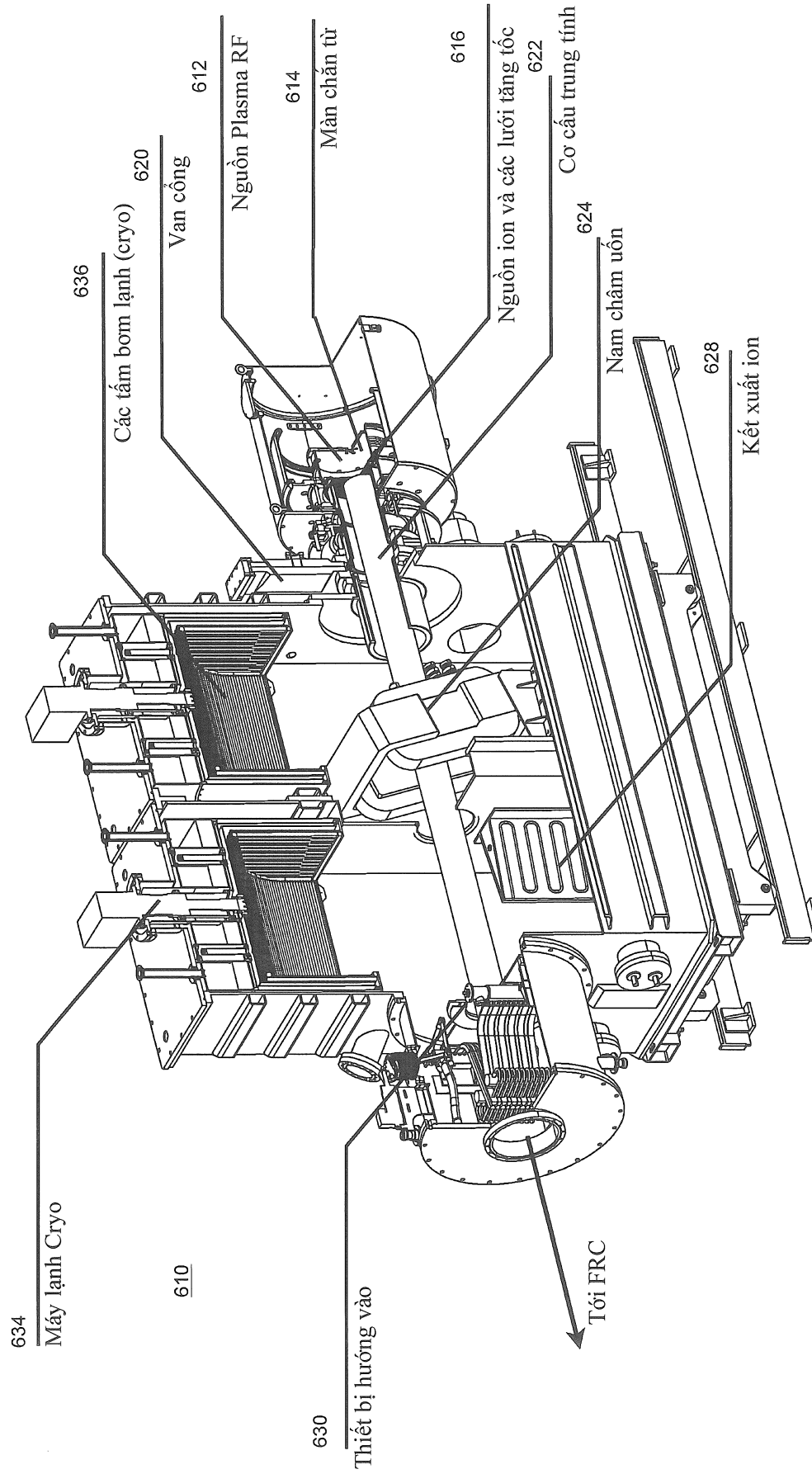


Fig. 7

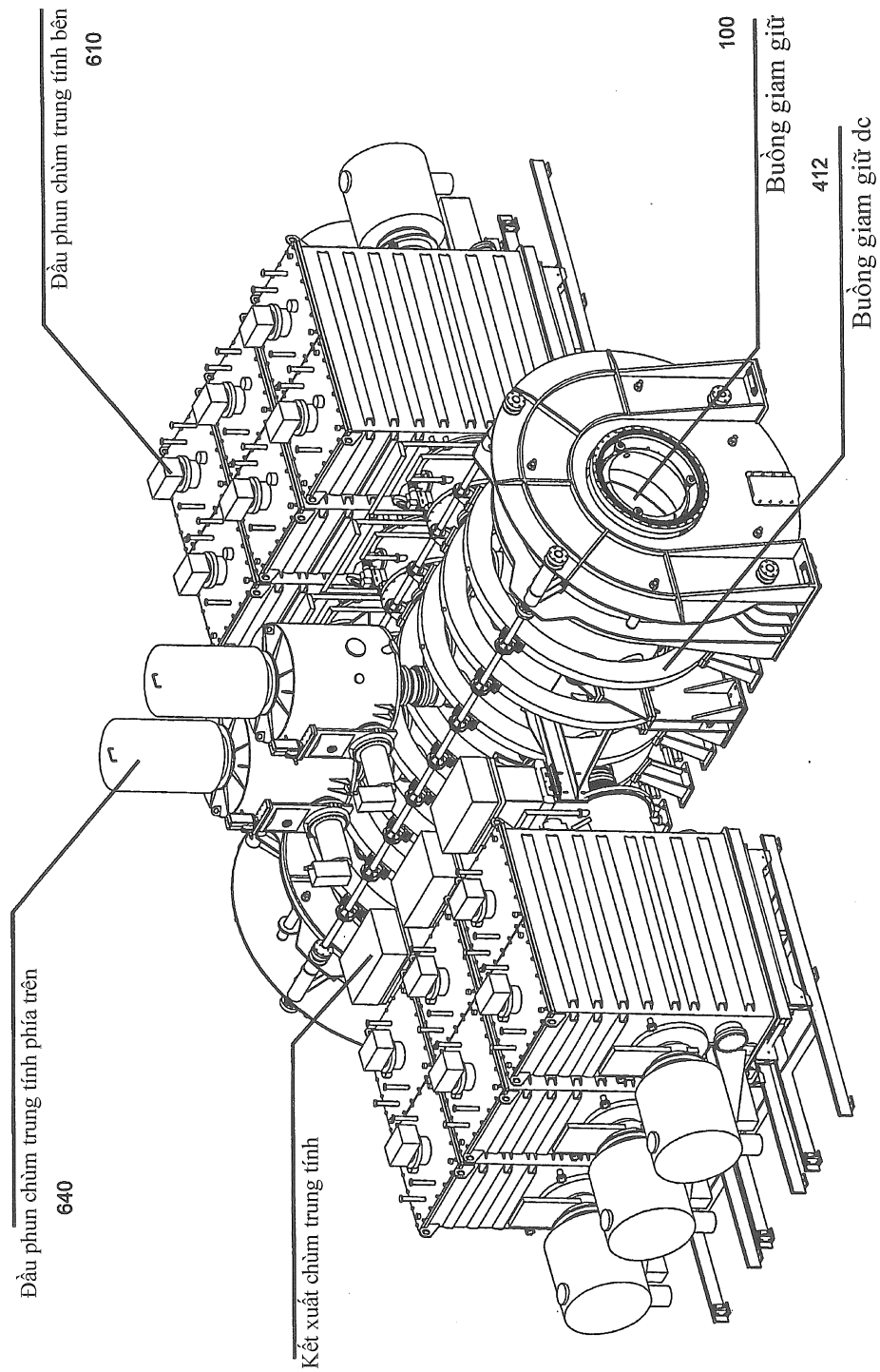


Fig.8

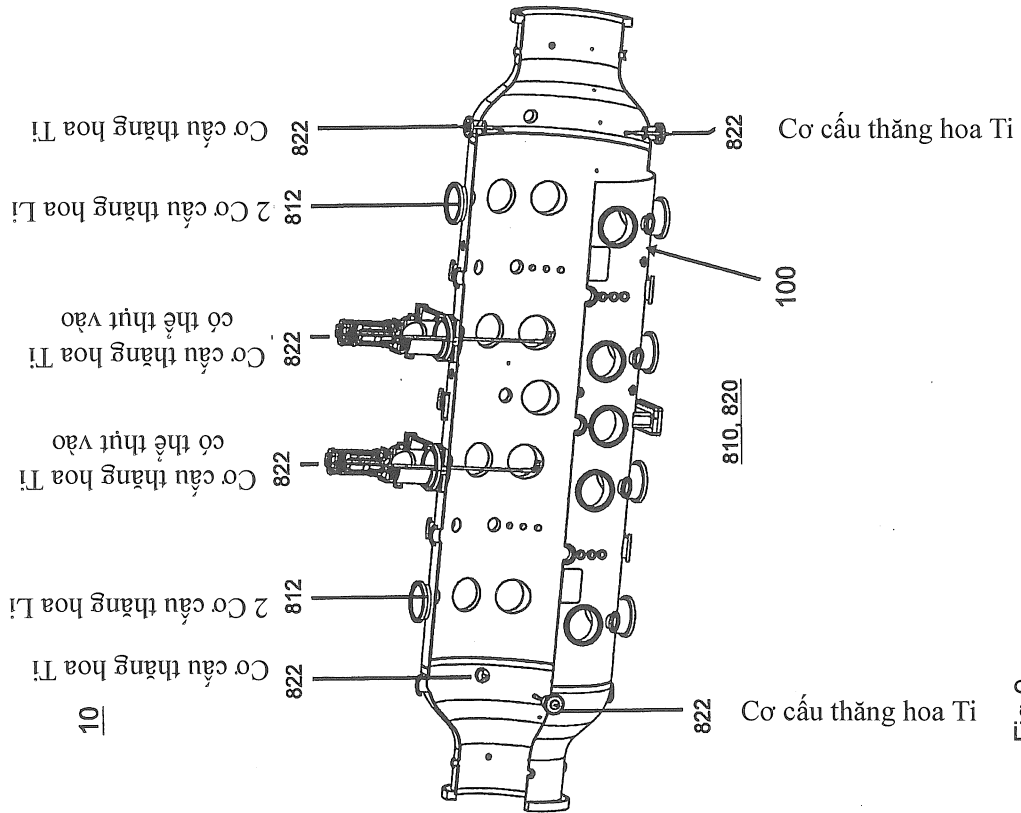
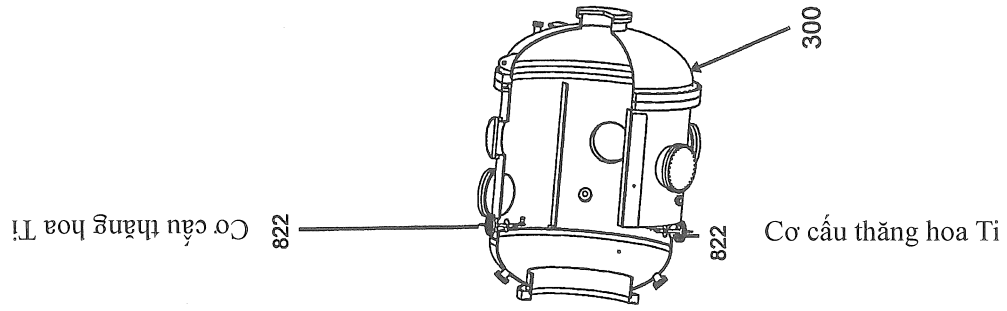
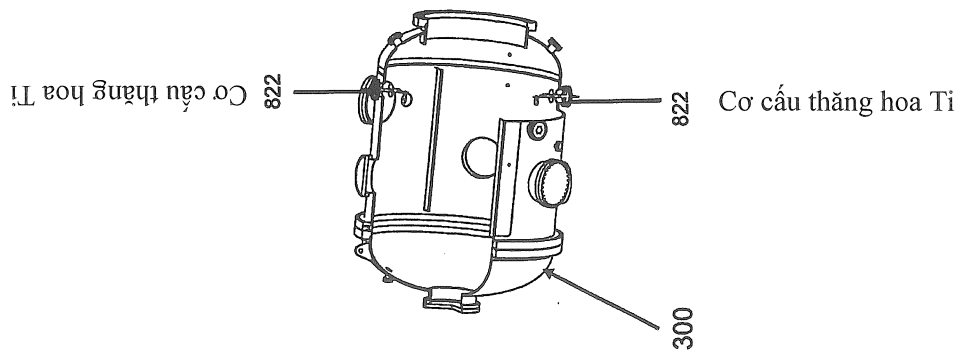


Fig.9



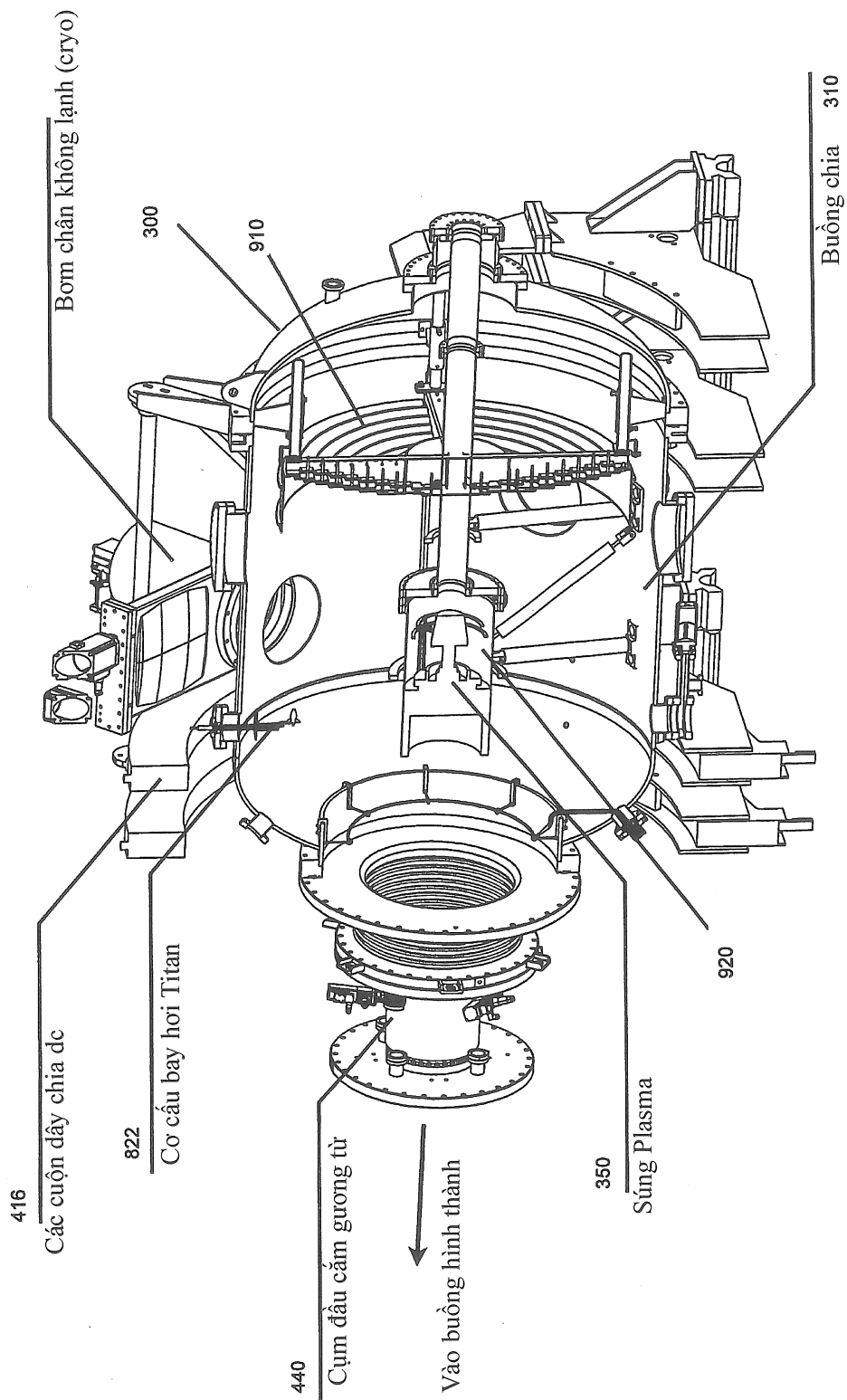


Fig.10

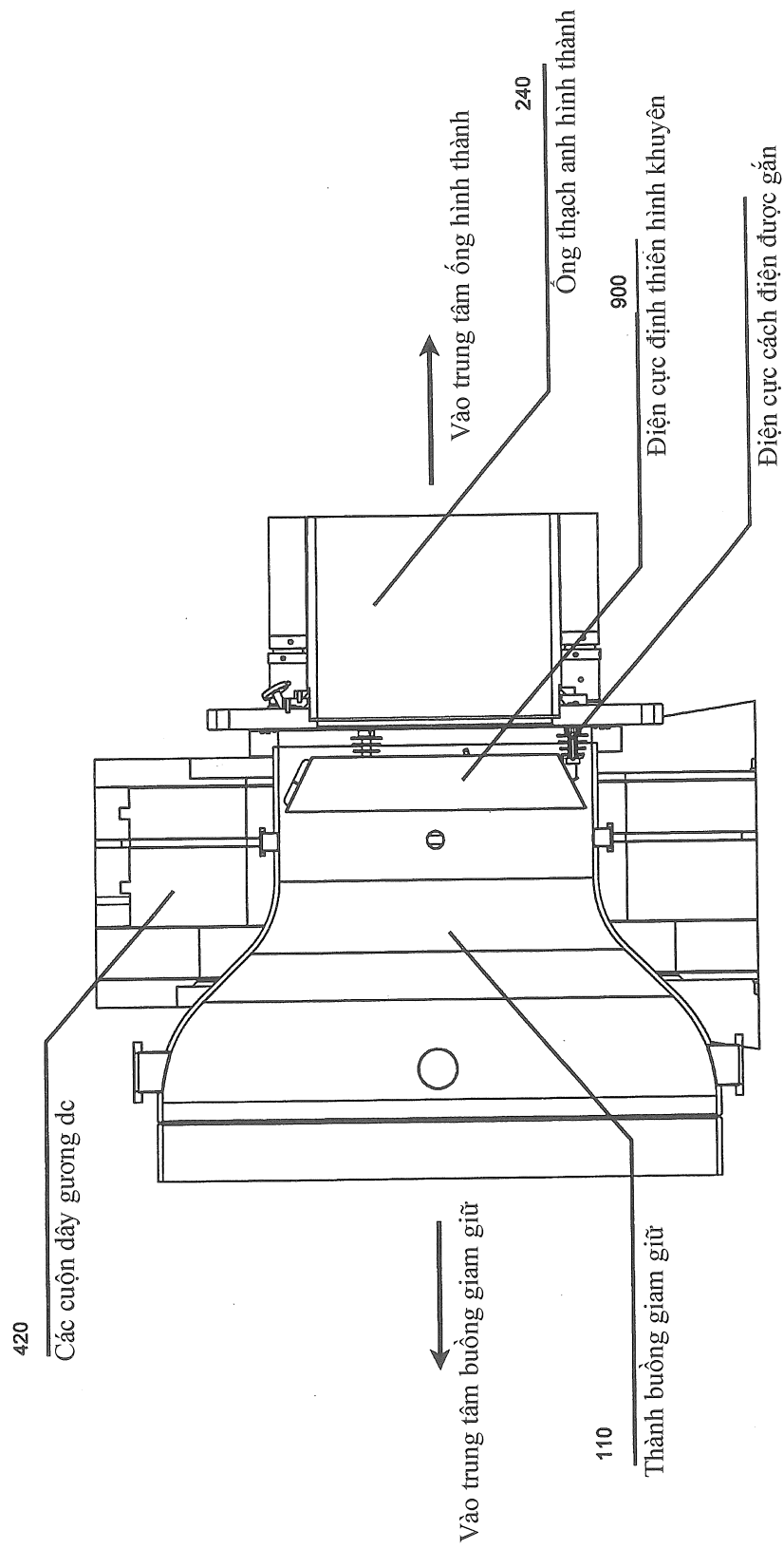


Fig. 11

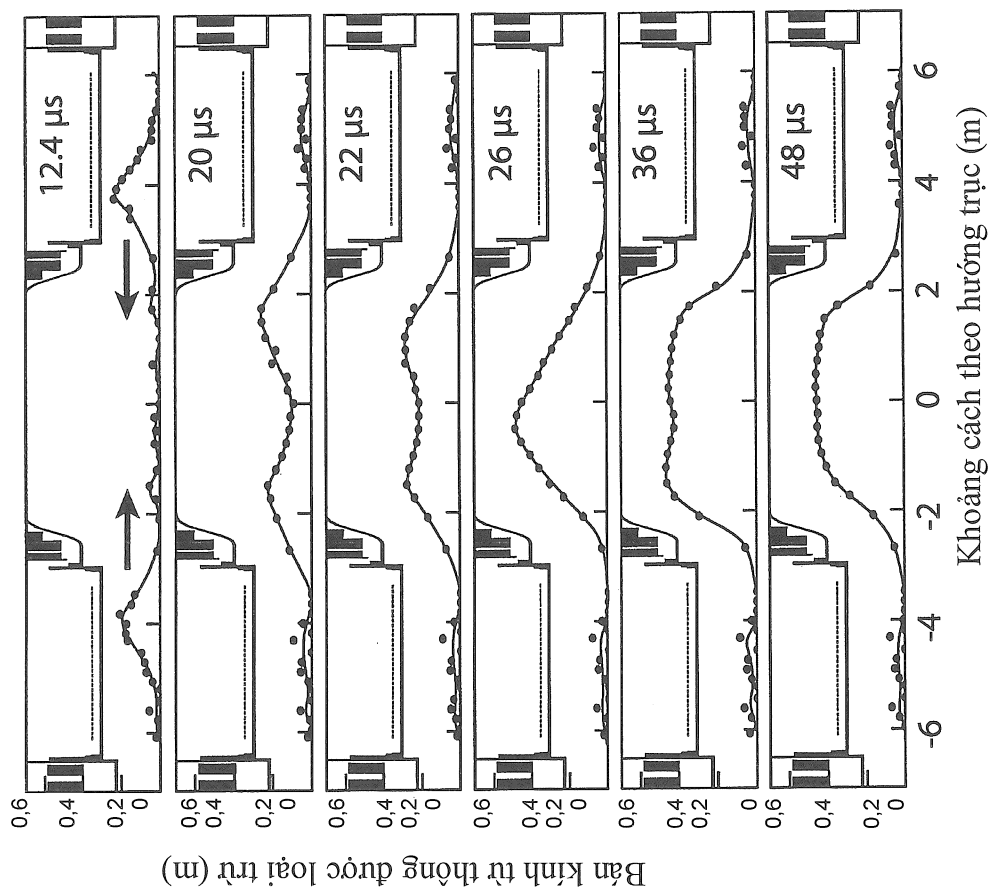


Fig.12

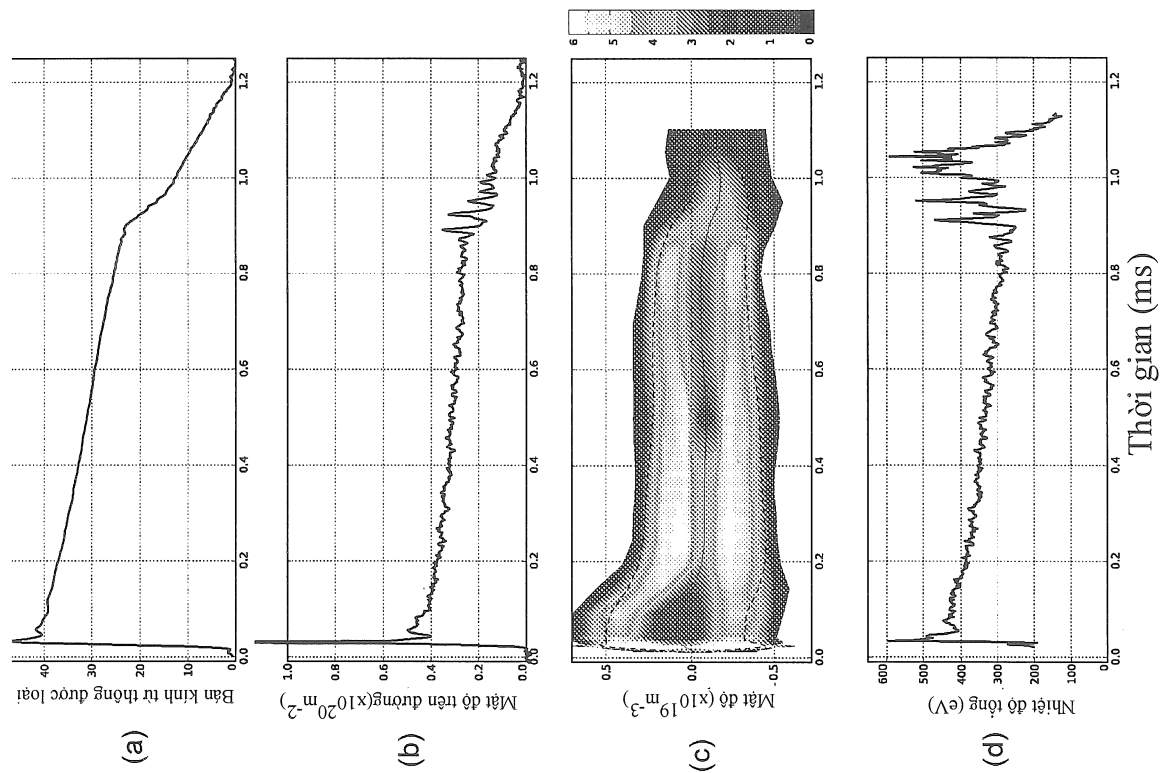


Fig.13

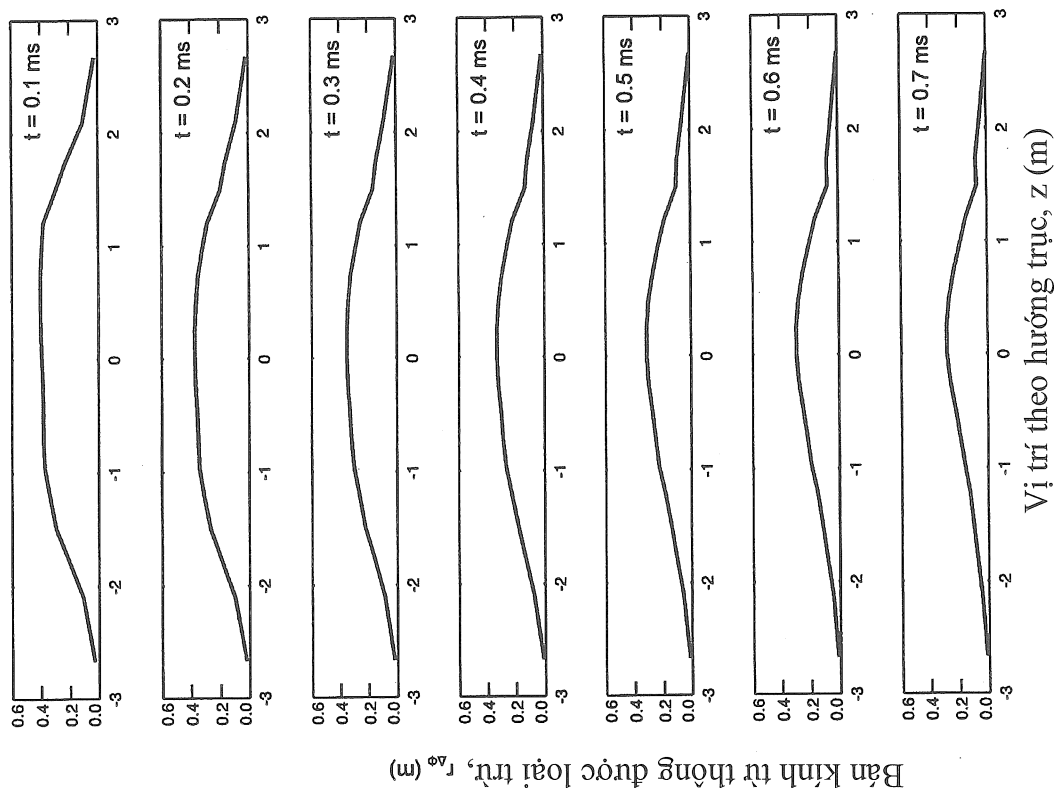


Fig. 14

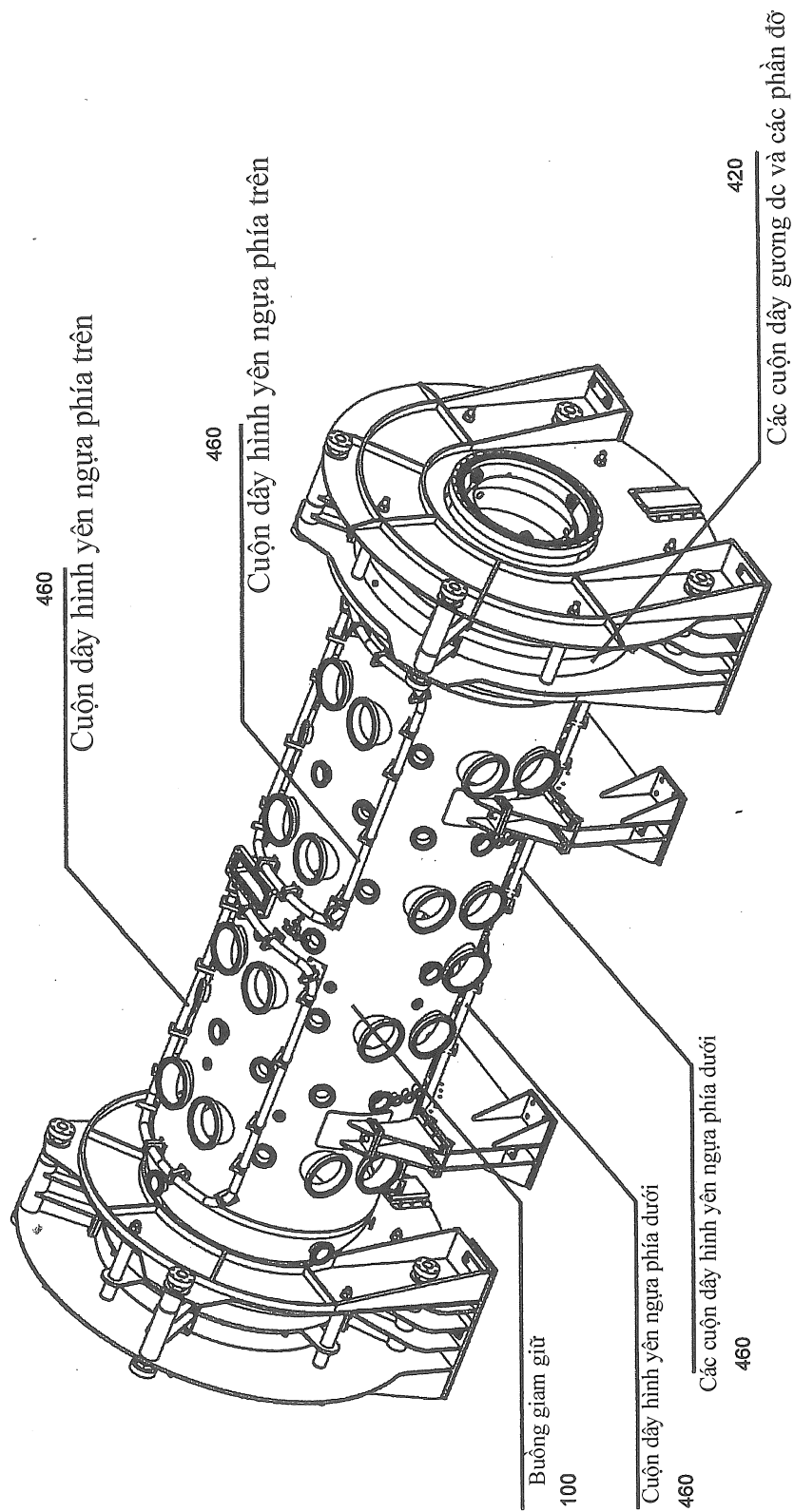


Fig.15

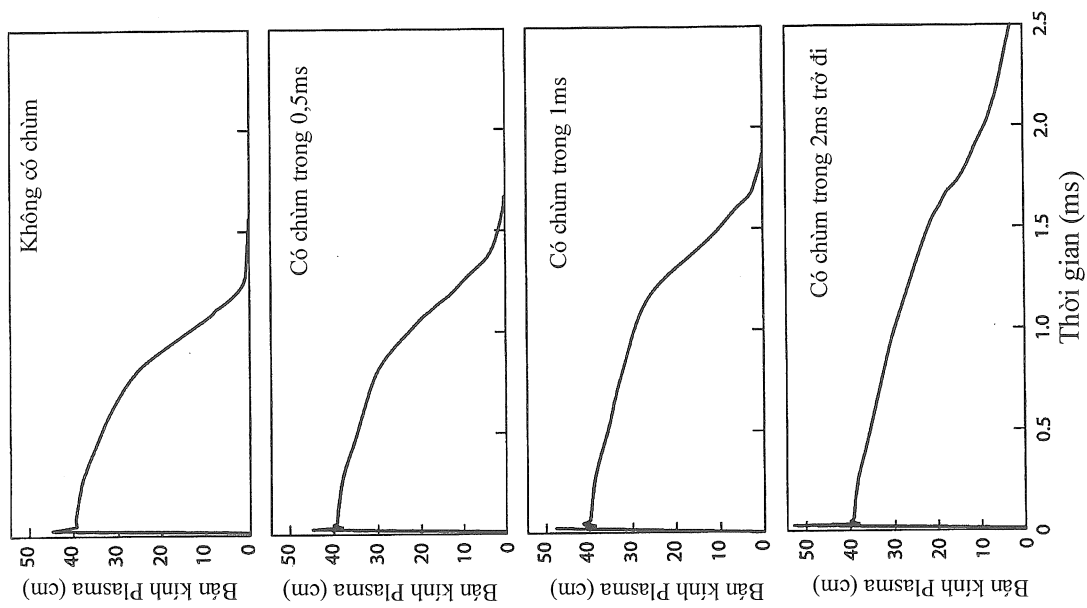


Fig.16

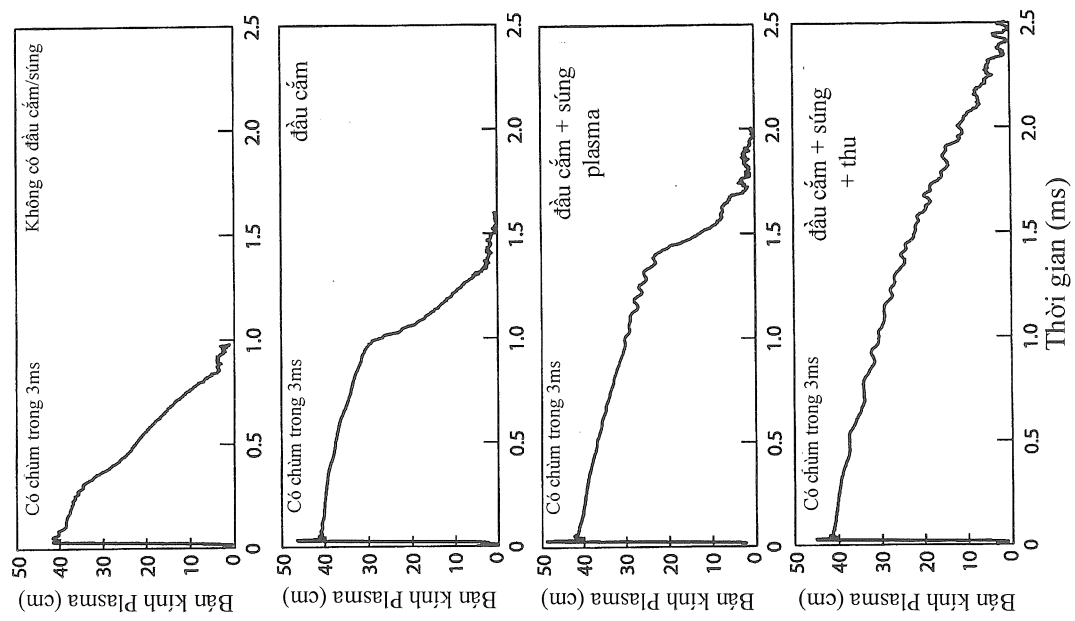


Fig.17

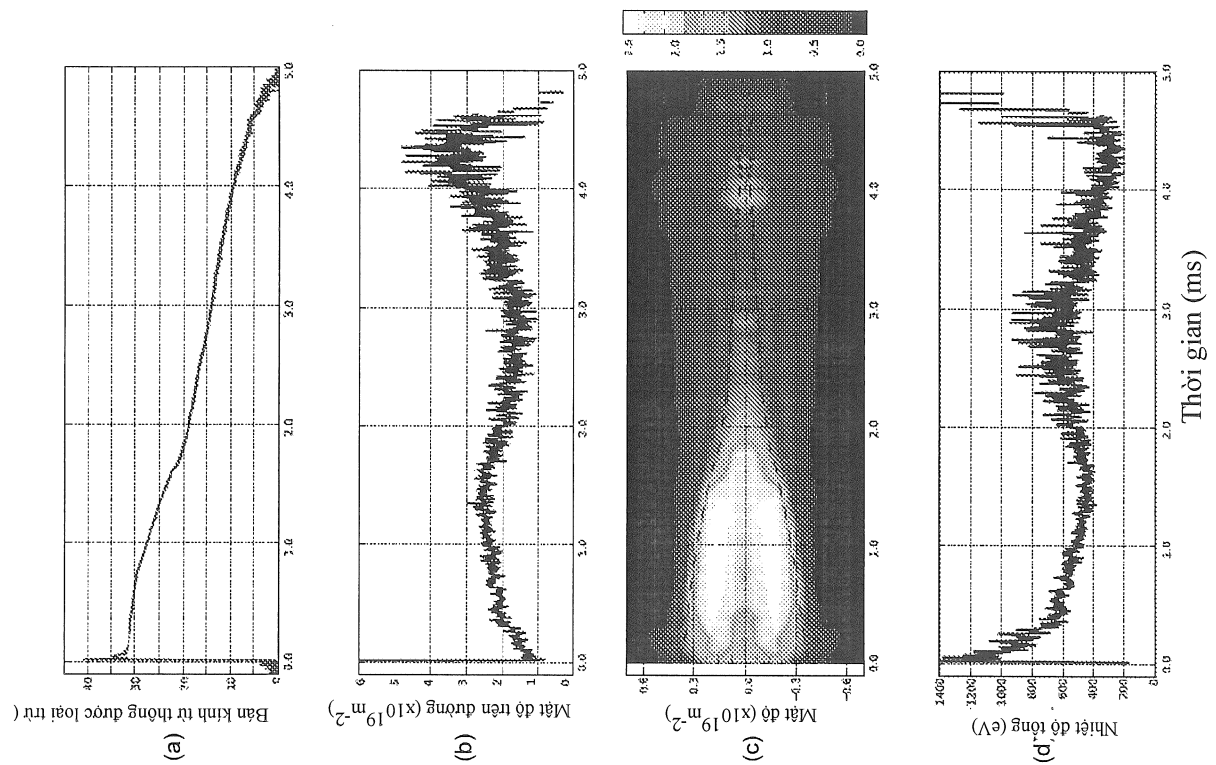


Fig. 18

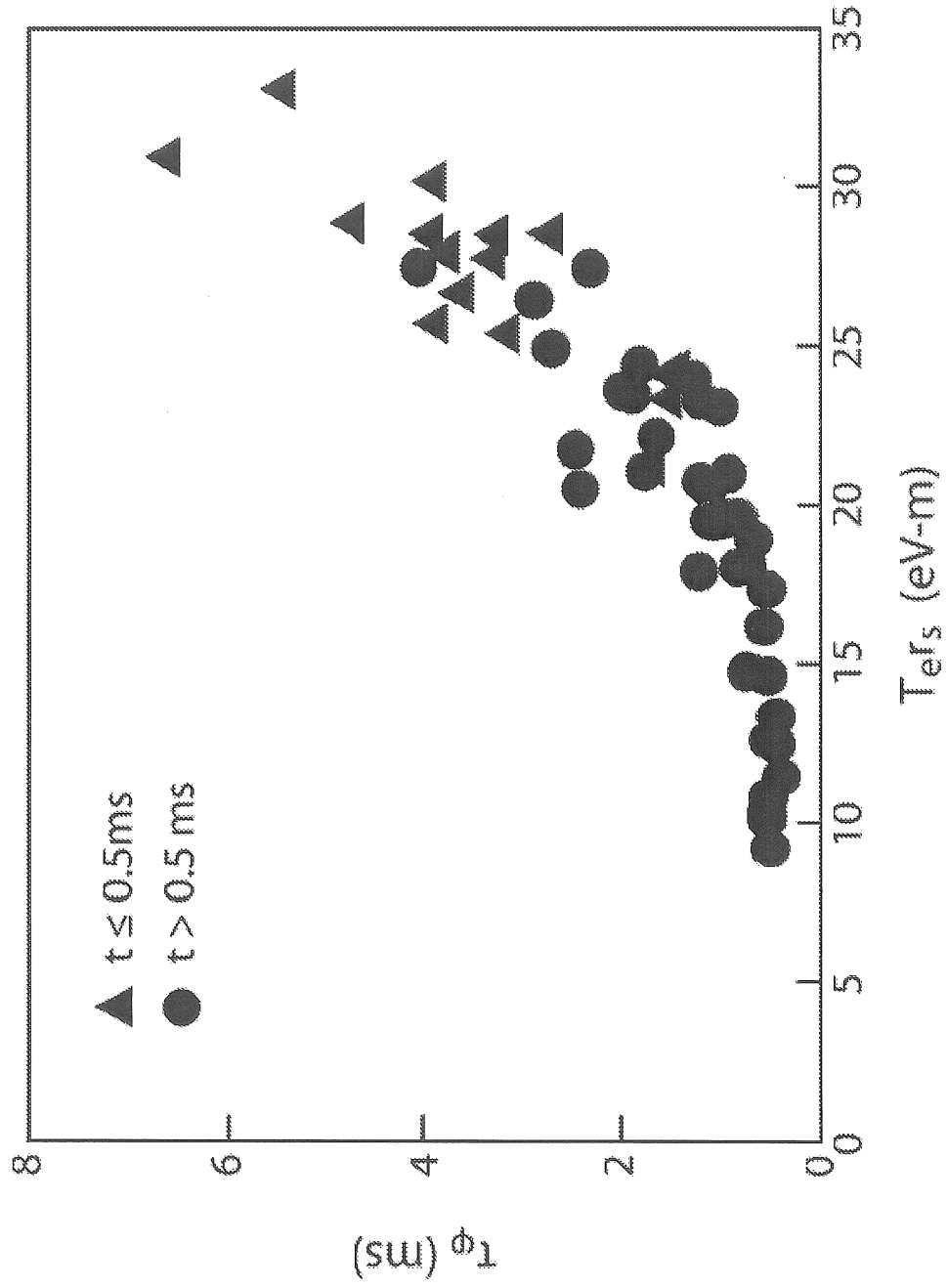


Fig.19