



(19) 대한민국특허청(KR)
(12) 등록특허공보(B1)

(45) 공고일자 2025년03월11일
(11) 등록번호 10-2778989
(24) 등록일자 2025년03월05일

(51) 국제특허분류(Int. Cl.)
H05H 1/06 (2006.01) G21B 1/05 (2006.01)
H05H 3/02 (2025.01)
(52) CPC특허분류
H05H 1/06 (2013.01)
G21B 1/05 (2013.01)
(21) 출원번호 10-2023-7020976(분할)
(22) 출원일자(국제) 2018년02월23일
심사청구일자 2023년06월21일
(85) 번역문제출일자 2023년06월21일
(65) 공개번호 10-2023-0093551
(43) 공개일자 2023년06월27일
(62) 원출원 특허 10-2019-7027848
원출원일자(국제) 2018년02월23일
심사청구일자 2021년02월16일
(86) 국제출원번호 PCT/US2018/019364
(87) 국제공개번호 WO 2018/156860
국제공개일자 2018년08월30일
(30) 우선권주장
62/462,779 2017년02월23일 미국(US)
(56) 선행기술조사문헌
박사학위 논문, Michael Patrick Ross,
“Exploring plasma stability and confinement
with high resolution density measurements on
the ZAP-HD Flow Z-Pinch” (2016. 12. 31.) 1
부.*
*는 심사관에 의하여 인용된 문헌

(73) 특허권자
유니버시티 오브 워싱턴
미국 98105-4721 워싱턴주 시애틀 스위트 400 루
즈벨트 웨이 노쓰이스트 4545
(72) 발명자
슈움말크, 우리
미국 98105-4721 워싱턴주 시애틀 스위트 400 루
즈벨트 웨이 노쓰이스트 4545 유니버시티 오브 워
싱턴 내
넬슨, 브라이언, 에이
미국 98105-4721 워싱턴주 시애틀 스위트 400 루
즈벨트 웨이 노쓰이스트 4545 유니버시티 오브 워
싱턴 내
콜링고, 레이몬드
미국 98105-4721 워싱턴주 시애틀 스위트 400 루
즈벨트 웨이 노쓰이스트 4545 유니버시티 오브 워
싱턴 내
(74) 대리인
특허법인에이아이피

전체 청구항 수 : 총 15 항

심사관 : 이민형

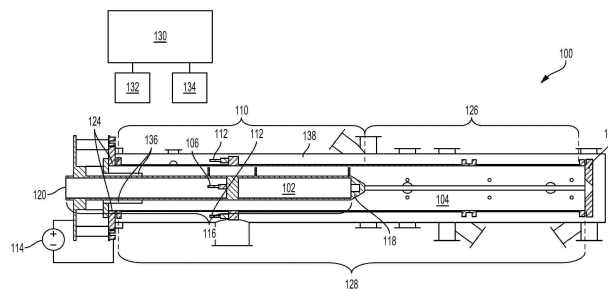
(54) 발명의 명칭 플라즈마 감금 시스템 및 사용 방법

(57) 요약

예제 방법은 내부 전극 내에서부터 내부 전극과 내부 전극을 실질적으로 둘러싸는 외부 전극 사이의 가속 영역으
로 하나 이상의 제 1 밸브를 통해 가스를 보내는 단계, 상기 외부 전극의 외측으로부터 가속 영역으로 둘 이상의
제 2 밸브를 통해 가스를 보내는 단계, 파워 서플라이를 통해 내부 전극과 외부 전극 사이에 전압을 인가함으로

(뒷면에 계속)

대표도



써, 보내진 가스의 적어도 일부를 실질적으로 환형 단면을 갖는 플라즈마로 변환시키는 단계로서, 플라즈마는 내부 전극 제 1 단부와 외부 전극 제 1 단부를 향해 가속 영역 내에서 축 방향으로 흐르고, 그 후에, 외부 전극의 제 1 단부와 내부 전극의 제 1 단부 사이에 흐르는 Z-핀치 플라즈마를 수립하는, 상기 변화시키는 단계를 포함한다. 관련 플라즈마 감금 시스템 및 방법이 또한 본 출원에 개시된다.

(52) CPC특허분류

H05H 3/02 (2025.01)

Y02E 30/10 (2020.08)

명세서

청구범위

청구항 1

플라즈마 감금 시스템(plasma confinement system)으로서,

외부 전극;

내부 전극으로서, 상기 내부 전극의 제1 단부는 상기 외부 전극의 제1 단부와 상기 외부 전극의 제2 단부 사이에 있고, 상기 내부 전극과 상기 외부 전극은 동일축에 대하여 방사상 대칭을 이루는, 상기 내부 전극;

상기 내부 전극과 상기 외부 전극의 제2 단부 사이의 절연체;

상기 내부 전극 및 상기 외부 전극을 적어도 부분적으로 둘러싸는 진공 챔버;

상기 외부 전극의 외측으로부터 가스를 보내도록 구성된 2개 이상의 밸브; 및

상기 내부 전극과 상기 외부 전극 사이에 전압을 인가하여 상기 내부 전극과 상기 외부 전극 사이에 축대칭 플라즈마 프론트(axisymmetric plasma front)를 전개시킴으로써 전단 축 흐름(sheared axial flow)을 갖는 Z-핀치 플라즈마(Z-pinch plasma)가 수립되도록 구성된 파워 서플라이(power supply)를 포함하는, 플라즈마 감금 시스템.

청구항 2

제1항에 있어서, 상기 파워 서플라이는 50 내지 $400\mu\text{s}$ 범위 내의 지속 시간 동안 상기 전압을 인가하도록 구성된, 플라즈마 감금 시스템.

청구항 3

제1항에 있어서, 상기 2개 이상의 밸브는 상기 외부 전극의 제2 단부에 위치되는, 플라즈마 감금 시스템.

청구항 4

제1항에 있어서, 상기 내부 전극 및 상기 외부 전극은 동심(concentric)인, 플라즈마 감금 시스템.

청구항 5

제1항에 있어서, 상기 외부 전극은 상기 내부 전극에 의해 점유된 체적의 적어도 일부를 둘러싸는, 플라즈마 감금 시스템.

청구항 6

제1항에 있어서, 상기 외부 전극은 상기 내부 전극을 실질적으로 둘러싸는, 플라즈마 감금 시스템.

청구항 7

제1항에 있어서, 상기 내부 전극 및 상기 외부 전극 각각은 실질적으로 원통형 바디(body)를 갖는, 플라즈마 감금 시스템.

청구항 8

제1항에 있어서, 상기 외부 전극의 제1 단부는 상기 외부 전극의 제2 단부에 대향하는, 플라즈마 감금 시스템.

청구항 9

제1항에 있어서, 상기 전단 축 흐름은 동일한 축에 대해 방사상으로 전단되는, 플라즈마 감금 시스템.

청구항 10

제1항에 있어서,
 상기 절연체는 세라믹 재료를 포함하고;
 상기 진공 챔버는 스테인레스 스틸 용기(stainless steel vessel)이고; 및
 상기 2개 이상의 밸브는 전기적으로 작동되는, 플라스마 감금 시스템.

청구항 11

제1항 내지 제10항 중 어느 한 항의 플라스마 감금 시스템을 작동하기 위한 방법으로서,
 상기 외부 전극의 외측으로부터 상기 2개 이상의 전기적으로 작동되는 밸브를 통해 보내진 가스를 가속 영역 내에서 그리고 상기 내부 전극의 제1 단부 및 상기 외부 전극의 제1 단부를 향하여 축방향으로 흐르는 플라스마로 변환하는 단계로서, 상기 가속 영역은 상기 외부 전극의 제2 단부와 상기 내부 전극의 제1 단부 사이에 있는, 상기 변환하는 단계; 및
 상기 파워 서플라이를 통해 상기 내부 전극과 상기 외부 전극 사이에 전압을 인가하여 상기 내부 전극과 상기 외부 전극 사이에 상기 Z-핀치 플라스마를 수립하는 단계를 포함하되,
 상기 Z-핀치 플라스마는 상기 외부 전극 내의 어셈블리 영역에서 상기 내부 전극의 제1 단부와 상기 외부 전극의 제1 단부 사이에서 흐르는, 방법.

청구항 12

제11항에 있어서, 상기 가속 영역은 실질적으로 환형 단면을 갖는, 방법.

청구항 13

제11항에 있어서, 상기 어셈블리 영역은 상기 외부 전극에 의해 둘러싸인 원통형 체적인, 방법.

청구항 14

제11항에 있어서, 상기 파워 서플라이는 50 μ s 내지 400 μ s 범위 내의 지속 시간 동안 전압을 인가하는, 방법.

청구항 15

제11항에 있어서, 인가된 상기 전압은 30 kV/m 내지 500 kV/m 범위 내의 상기 가속 영역 내에서 방사상 전기장(radial electric field)을 생성하는, 방법.

발명의 설명

기술 분야

- [0001] 관련 출원에 대한 상호-참조
- [0002] 본 출원은 2017년 2월 23일에 출원된 U.S. 가특허 출원 62/462,779의 이익을 주장하고, 이의 내용은 전체가 참조로서 본 출원에 통합된다.
- [0003] 연방 후원 연구 또는 개발에 관한 진술
- [0004] 본 발명은 에너지부 [DOE]에 의해 수여된 승인 번호 DE-AR0000571, DE-FG02-04ER54756 및 DE-NA0001860 하에서 정부의 지원으로 이루어졌다. 정부는 본 발명에서 특정 권리를 가진다.

배경 기술

- [0005] 본 출원에서 달리 지시되지 않는 한, 본 섹션에 설명된 내용은 본 출원의 청구 범위에 대한 선행 기술이 아니며 본 섹션에 포함됨으로써 선행 기술인 것으로 인정되지 않는다.
- [0006] 핵융합은 두개의 핵을 결합하는 프로세스이다. 철의 원자 번호보다 작은 원자 번호를 갖는 원소의 두 개의 핵이 융합되면 에너지가 방출된다. 에너지 방출은 반응물과 융합 반응 생성물 사이의 질량의 약간의 차이로 인한 것이며 $\Delta E = \Delta mc^2$ 에 따른다. 에너지의 방출은 또한 반응 핵 사이의 반발 정전기력을 극복하는 반응 핵 사이의

매력적인 강한 핵력에 의존한다.

[0007] 최저의 플라즈마 온도를 필요로 하는 융합 반응은 중수소 (하나의 양성자와 하나의 중성자를 갖는 수소 핵)와 삼중 수소 (하나의 양성자와 2 개의 중성자를 갖는 수소 핵) 사이에서 발생한다. 이 반응은 헬륨-4 핵 및 중성자를 생성한다.

[0008] 핵 융합을 달성하기 위한 한가지 접근법은 반응기 챔버 내부에서 융합 반응물을 함유하는 가스를 활성화시키는 것이다. 활성화된 가스는 이온화를 통해 플라즈마가 된다. 융합을 위해 충분한 온도와 밀도를 가진 조건을 달성하기 위해, 플라즈마는 감금되어야 할 필요가 있다.

발명의 내용

과제의 해결 수단

[0009] 본 개시의 제 1 양태는 플라즈마 감금 시스템이며, 상기 플라즈마 감금 시스템은 내부 전극, 상기 내부 전극을 실질적으로 둘러싸는 외부 전극, 상기 내부 전극 내에서부터 상기 내부 전극과 상기 외부 전극 사이의 가속 영역으로 가스를 보내도록 구성된 하나 이상의 제 1 밸브, 상기 외부 전극 외측으로부터 상기 가속 영역으로 가스를 보내도록 구성된 둘 이상의 제 2 밸브, 및 상기 내부 전극과 상기 외부 전극 사이에 전압을 인가하도록 구성된 파워 서플라이를 포함한다.

[0010] 본 개시의 제 2 양태는 플라즈마 감금 시스템을 작동시키기 위한 방법이다. 방법은 내부 전극 내에서부터 내부 전극과 상기 내부 전극을 실질적으로 둘러싸는 외부 전극 사이의 가속 영역으로 하나 이상의 제 1 밸브를 통해 가스를 보내는 단계, 상기 외부 전극의 외측으로부터 상기 가속 영역으로 둘 이상의 제 2 밸브를 통해 가스를 보내는 단계, 파워 서플라이를 통해 상기 내부 전극과 상기 외부 전극 사이에 전압을 인가함으로써, 보내진 가스의 적어도 일부를 실질적으로 환형 단면을 갖는 플라즈마로 변환시키는 단계로서, 상기 플라즈마는 상기 내부 전극 제 1 단부와 상기 외부 전극 제 1 단부를 향해 상기 가속 영역 내에서 축 방향으로 흐르고, 그 후에, 상기 외부 전극의 제 1 단부와 상기 내부 전극의 제 1 단부 사이에 흐르는 Z-핀치 플라즈마를 수립하는, 상기 변화시키는 단계를 포함한다.

[0011] 본 개시의 제 3 양태는 플라즈마 감금 시스템이며, 상기 플라즈마 감금 시스템은 내부 전극, 상기 내부 전극을 실질적으로 둘러싸는 중간 전극, 상기 중간 전극을 실질적으로 둘러싸는 외부 전극, 상기 내부 전극 내에서부터 상기 내부 전극과 상기 중간 전극 사이의 가속 영역으로 가스를 보내도록 구성된 하나 이상의 제 1 밸브, 상기 중간 전극 외측으로부터 상기 가속 영역으로 가스를 보내도록 구성된 둘 이상의 제 2 밸브, 상기 내부 전극과 상기 중간 전극 사이에 전압을 인가하도록 구성된 제 1 파워 서플라이, 및 상기 내부 전극과 상기 외부 전극 사이에 전압을 인가하도록 구성된 제 2 파워 서플라이를 포함한다.

[0012] 본 개시의 제 4 양태는 플라즈마 감금 시스템을 작동시키기 위한 방법이다. 방법은 내부 전극 내에서부터 내부 전극과 상기 내부 전극을 실질적으로 둘러싸는 중간 전극 사이의 가속 영역으로 하나 이상의 제 1 밸브를 통해 가스를 보내는 단계, 상기 중간 전극의 외측으로부터 상기 가속 영역으로 둘 이상의 제 2 밸브를 통해 가스를 보내는 단계, 제 1 파워 서플라이를 통해 상기 내부 전극과 상기 중간 전극 사이에 전압을 인가함으로써, 보내진 가스의 적어도 일부를 실질적으로 환형 단면을 갖는 플라즈마로 변환하는 단계로서, 상기 플라즈마는 상기 내부 전극의 제 1 단부 및 상기 외부 전극의 제 1 단부를 향하여 상기 가속 영역 내에서 축 방향으로 흐르는, 상기 변환하는 단계, 및 상기 외부 전극의 제 1 단부와 상기 내부 전극의 제 1 단부 사이에 흐르는 Z-핀치 플라즈마를 수립하기 위해 상기 내부 전극과 상기 외부 전극 사이에 전압을 제 2 파워 서플라이를 통해 인가하는 단계를 포함한다.

[0013] 본 개시의 제 5 양태는 플라즈마 감금 시스템이며, 상기 플라즈마 감금 시스템은 내부 전극, 상기 내부 전극을 실질적으로 둘러싸는 외부 전극, 상기 내부 전극을 마주하는 중간 전극, 상기 내부 전극 내에서부터 상기 내부 전극과 상기 외부 전극 사이의 가속 영역으로 가스를 보내도록 구성된 하나 이상의 제 1 밸브, 상기 외부 전극 외측으로부터 상기 가속 영역으로 가스를 보내도록 구성된 둘 이상의 제 2 밸브, 상기 내부 전극과 상기 외부 전극 사이에 전압을 인가하도록 구성된 제 1 파워 서플라이, 및 상기 내부 전극과 상기 중간 전극 사이에 전압을 인가하도록 구성된 제 2 파워 서플라이를 포함한다.

[0014] 본 개시의 제 6 양태는 플라즈마 감금 시스템을 작동시키기 위한 방법이다. 방법은 내부 전극 내에서부터 내부 전극과 상기 내부 전극을 실질적으로 둘러싸는 외부 전극 사이의 가속 영역으로 하나 이상의 제 1 밸브를 통해 가스를 보내는 단계, 상기 외부 전극의 외측으로부터 상기 가속 영역으로 둘 이상의 제 2 밸브를 통해 가스를

보내는 단계, 제 1 파워 서플라이를 통해 상기 내부 전극과 상기 외부 전극 사이에 전압을 인가함으로써, 보내진 가스의 적어도 일부를 실질적으로 환형 단면을 갖는 플라즈마로 변환하는 단계로서, 상기 플라즈마는 상기 내부 전극의 제 1 단부 및 상기 외부 전극의 제 1 단부를 향하여 상기 가속 영역 내에서 축 방향으로 흐르는, 상기 변환하는 단계, 및 상기 중간 전극과 상기 내부 전극의 제 1 단부 사이에 흐르는 Z-핀치 플라즈마를 수립하기 위해 상기 내부 전극과 상기 중간 전극 사이에 전압을 제 2 파워 서플라이를 통해 인가하는 단계를 포함하고, 상기 중간 전극은 상기 외부 전극의 제 1 단부에 위치된다.

[0015] 용어 "실질적으로" 또는 "약"이 본 출원에서 사용될 때, 지칭된 특성, 파라미터 또는 값이 정확하게 달성될 필요는 없지만, 예를 들어 허용 오차, 측정 오차, 측정 정확도 한계를 포함하는 편차 또는 변동이 있다는 것을 의미하고, 당업자에게 공지된 다른 요인은 특성이 제공하고자 하는 효과를 배제하지 않는 양으로 발생할 수 있다. 본 출원에 개시된 일부 예에서, "실질적으로" 또는 "약"은 지칭된 값의 $\pm 5\%$ 이내를 의미한다.

[0016] 이들 뿐만 아니라 다른 측면, 장점 및 대안은 첨부 도면에 적절한 경우에 이하의 상세한 설명을 읽음으로써 당업자에게 명백해질 것이다. 더구나, 본 출원에 제공된 본 요약 및 다른 설명 및 도면은 단지 예로서 본 발명을 설명하기 위한 것이며, 그에 따라 수많은 변형이 가능하다는 것을 이해해야 한다.

도면의 간단한 설명

[0017] 도 1은 예시적인 실시예에 따른 플라즈마 감금 시스템(plasma confinement system)의 개략적인 단면도이다.
 도 2는 예시적인 실시예에 따른 플라즈마 감금 시스템의 개략적인 단면도이다.
 도 3은 예시적인 실시예에 따른 플라즈마 감금 시스템의 개략적인 단면도이다.
 도 4는 예시적인 실시예에 따른 플라즈마 감금 시스템을 작동시키기 위한 방법의 블록도이다.
 도 5a는 예시적인 실시예에 따른 플라즈마 감금 시스템 및 작동 방법의 일부 양태를 예시한다.
 도 5b는 예시적인 실시예에 따른 플라즈마 감금 시스템 및 작동 방법의 일부 양태를 예시한다.
 도 5c는 예시적인 실시예에 따른 플라즈마 감금 시스템 및 작동 방법의 일부 양태를 예시한다.
 도 5d는 예시적인 실시예에 따른 플라즈마 감금 시스템 및 작동 방법의 일부 양태를 예시한다.
 도 5e는 예시적인 실시예에 따른 플라즈마 감금 시스템 및 작동 방법의 일부 양태를 예시한다.
 도 5f는 예시적인 실시예에 따른 플라즈마 감금 시스템 및 작동 방법의 일부 양태를 예시한다.
 도 6은 예시적인 실시예에 따른 플라즈마 감금 시스템을 작동시키기 위한 방법과 관련된 전압 파형을 예시한다.
 도 7은 예시적인 실시예에 따른 플라즈마 감금 시스템을 작동시키기 위한 방법과 관련된 가스 압력 프로파일을 예시한다.
 도 8은 예시적인 실시예에 따른 플라즈마 감금 시스템을 작동시키기 위한 방법의 블록도이다.
 도 9a는 예시적인 실시예에 따른 플라즈마 감금 시스템 및 작동 방법의 일부 양태를 예시한다.
 도 9b는 예시적인 실시예에 따른 플라즈마 감금 시스템 및 작동 방법의 일부 양태를 예시한다.
 도 9c는 예시적인 실시예에 따른 플라즈마 감금 시스템 및 작동 방법의 일부 양태를 예시한다.
 도 9d는 예시적인 실시예에 따른 플라즈마 감금 시스템 및 작동 방법의 일부 양태를 예시한다.
 도 9e는 예시적인 실시예에 따른 플라즈마 감금 시스템 및 작동 방법의 일부 양태를 예시한다.
 도 9f는 예시적인 실시예에 따른 플라즈마 감금 시스템 및 작동 방법의 일부 양태를 예시한다.
 도 10은 예시적인 실시예에 따른 플라즈마 감금 시스템을 작동시키기 위한 방법과 관련된 전압 파형을 예시한다.
 도 11은 예시적인 실시예에 따른 플라즈마 감금 시스템을 작동시키기 위한 방법과 관련된 가스 압력 프로파일을 예시한다.
 도 12는 예시적인 실시예에 따른 플라즈마 감금 시스템을 작동시키기 위한 방법의 블록도이다.

도 13a는 예시적인 실시예에 따른 플라즈마 감금 시스템 및 작동 방법의 일부 양태를 예시한다.

도 13b는 예시적인 실시예에 따른 플라즈마 감금 시스템 및 작동 방법의 일부 양태를 예시한다.

도 13c는 예시적인 실시예에 따른 플라즈마 감금 시스템 및 작동 방법의 일부 양태를 예시한다.

도 13d는 예시적인 실시예에 따른 플라즈마 감금 시스템 및 작동 방법의 일부 양태를 예시한다.

도 13e는 예시적인 실시예에 따른 플라즈마 감금 시스템 및 작동 방법의 일부 양태를 예시한다.

도 13f는 예시적인 실시예에 따른 플라즈마 감금 시스템 및 작동 방법의 일부 양태를 예시한다.

도 14는 예시적인 실시예에 따른 플라즈마 감금 시스템을 작동시키기 위한 방법과 관련된 전압 과정을 예시한다.

도 15는 예시적인 실시예에 따른 플라즈마 감금 시스템을 작동시키기 위한 방법과 관련된 가스 압력 프로파일을 예시한다.

발명을 실시하기 위한 구체적인 내용

- [0018] 플라즈마 감금 시스템 및 그 사용 방법의 다양한 실시예가 본 출원에 개시된다. 개시된 실시예는 기존 시스템들 및 방법들과 비교하면, 증가된 플라즈마의 안정성, 보다 강건한 전단(sheared) 플라즈마 흐름, 작은 Z-핀치(pinch) 플라즈마 반경, 더 높은 자계(magnetic field), 및/또는 더 높은 플라즈마 온도를 가능하게 할 수 있다. 개시된 실시예들 중 일부는 플라즈마 가속 및 플라즈마 압축의 독립적인 제어를 나타낸다.
- [0019] 도 1은 플라즈마 감금 시스템(100)의 개략적인 단면도이다. 플라즈마 감금 시스템(100)은 내부 전극(102) 및 내부 전극(102)을 실질적으로 둘러싸는 외부 전극(104)을 포함한다. 플라즈마 감금 시스템(100)은 또한 내부 전극(102) 내로부터 가스를 내부 전극(102)과 외부 전극(104) 사이의 가속 영역(110)으로 보내도록 구성된 하나 이상의 제 1 밸브(106) 및 가스를 외부 전극(104)의 외측으로부터 가속 영역(110)으로 보내도록 구성된 둘 이상의 제 2 밸브(112)를 포함한다. 플라즈마 감금 시스템(100)은 또한 내부 전극(102)과 외부 전극(104) 사이에 전압을 인가하도록 구성된 파워 서플라이(114)를 포함한다.
- [0020] 내부 전극(102)은 실질적으로 원통형 바디(116)를 갖는 전기 전도성 (예를 들어, 스테인레스 스틸) 셸(shell)의 형태를 전체적으로 취한다. 내부 전극(102)은 제 1 단부(118) (예를 들어, 둥근 단부) 및 대향하는 제 2 단부(120) (예를 들어, 실질적으로 원형 단부)를 포함한다. 보다 구체적으로, 제 1 단부(118)는 둥근 팁을 갖는 원뿔 형상을 가질 수 있다. 내부 전극(102)은 하나 이상의 제 1 밸브(106)로부터 가속 영역(110)으로 가스를 라우팅하기 위한 하나 이상의 도관 또는 채널 (미도시)을 포함할 수 있다.
- [0021] 외부 전극(104)은 또한 실질적으로 원통형 바디(128)를 갖는 전기 전도성 (예를 들어, 스테인레스 스틸) 셸의 형태를 전체적으로 취한다. 외부 전극(104)은 제 1 단부(122) (예를 들어, 실질적으로 디스크 형상 단부) 및 대향하는 제 2 단부(124) (예를 들어, 실질적으로 원형 단부)를 포함한다. 도 1에 도시된 바와 같이, 내부 전극(102)의 제 1 단부(118)는 외부 전극(104)의 제 1 단부(122)와 외부 전극(104)의 제 2 단부(124) 사이에 있다. 외부 전극(104)은 내부 전극(102)의 대부분을 둘러싸고 있다. 내부 전극(102)과 외부 전극(104)은 동심일 수 있고, 동일한 축에 대해 방사상 대칭을 가질 수 있다. 외부 전극(104)은 둘 이상의 제 2 밸브(112)로부터 가속 영역(110)으로 가스를 라우팅하기 위한 하나 이상의 도관 또는 채널 (미도시)을 포함할 수 있다.
- [0022] 하나 이상의 제 1 밸브(106)는 "퍼프 밸브(puff valve)"의 형태를 취할 수 있지만, 내부 전극(102) 내에서부터 내부 전극(102)과 외부 전극(104) 사이의 가속 영역(110)으로 가스 (예를 들어, 수소 또는 중수소)를 보내도록 구성된 임의의 유형의 밸브를 포함할 수 있다. 도 1에 도시된 바와 같이, 하나 이상의 제 1 밸브(106)는 내부 전극(102)의 제 1 단부(118)와 내부 전극(102)의 제 2 단부(120) 사이에 축 방향으로 위치된다. 대안적으로, 하나 이상의 제 1 밸브는 내부 전극(102)의 제 1 단부(118) 또는 제 2 단부(120)에 위치될 수 있다. 도 1에서, 하나 이상의 제 1 밸브(106)는 내부 전극(102) 내에 위치 되지만, 다른 예들이 가능하다. 하나 이상의 제 1 밸브(106)는 후술하는 바와 같이 하나 이상의 제 1 밸브(106)에 제어 전압을 제공함으로써 작동될 수 있다.
- [0023] 가속 영역(110)은 내부 전극(102) 및 외부 전극(104)의 형상에 의해 정의된 실질적인 환형 단면을 갖는다.
- [0024] 둘 이상의 제 2 밸브(112)는 "퍼프 밸브 (puff valve)"의 형태를 취할 수 있지만, 외부 전극(104) 외측으로부터 가속 영역(110)으로 가스 (예를 들어, 수소 또는 중수소)를 보내도록 구성된 임의의 유형의 밸브를 포함할 수 있다. 도 1에 도시된 바와 같이, 둘 이상의 제 2 밸브(112)는 외부 전극(104)의 제 1 단부(122)와 외부 전극

(104)의 제 2 단부(124) 사이에 축 방향으로 위치된다. 대안적으로, 둘 이상의 제 2 밸브는 제 2 단부(124) 또는 제 1 단부(122)에 위치될 수 있다. 둘 이상의 제 2 밸브(112)는 일반적으로 외부 전극(104) 주위에 배열될 것이다. 도 1에 도시된 바와 같이, 하나 이상의 제 1 밸브(106)는 둘 이상의 제 2 밸브(112)와 축 방향으로 정렬되지만, 다른 예도 가능하다. 둘 이상의 제 1 밸브(112)는 후술하는 바와 같이 둘 이상의 제 2 밸브(112)에 제어 전압을 제공함으로써 작동될 수 있다.

[0025] 파워 서플라이(114)는 일반적으로 예를 들어, 최대 500kJ 또는 최대 3-4MJ 를 저장할 수 있는 커패시터 뱅크의 형태를 취할 것이다. 파워 서플라이(114)의 양극(positive) 단자는 내부 전극(102) 또는 대안적으로 외부 전극(104)에 결합될 수 있다.

[0026] 플라즈마 감금 시스템(100)은 내부 전극(102)의 제 1 단부(118)와 외부 전극(104)의 제 1 단부(122) 사이에 외부 전극(104)내의 어셈블리 영역(126)을 포함한다. 플라즈마 감금 시스템(100)은 후술하는 바와 같이 어셈블리 영역(126) 내에서 Z-핀치 플라즈마를 유지하도록 구성된다.

[0027] 플라즈마 감금 시스템(100)은 또한 가스 소스(130) (예를 들어, 가압 가스 탱크) 및 개개의 하나 이상의 제 1 밸브(106)를 통해 가스 소스(130)로부터 가스 흐름을 제어하도록 구성된 하나 이상의 제 1 레귤레이터(132)를 포함한다. 하나 이상의 제 1 레귤레이터(132)와 하나 이상의 제 1 밸브(106) 사이의 연결부(예를 들어, 배관(piping))은 명확성을 위해 도 1에서 생략되어 있다.

[0028] 플라즈마 감금 시스템(300)은 또한 개개의 둘 이상의 제 2 밸브(312)를 통해 가스 소스(330)로부터 가스 흐름을 제어하도록 구성된 둘 이상의 제 2 레귤레이터(334)를 포함한다. 하나 이상의 제 2 레귤레이터(334)와 둘 이상의 제 2 밸브(312) 사이의 연결부(예를 들어, 배관)는 명확성을 위해 도 1에서 생략되어 있다.

[0029] 플라즈마 감금 시스템(100)은 또한 내부 전극(102)과 외부 전극(104) 사이의 전기 절연을 유지하기 위해 외부 전극(104)의 제 2 단부(124)와 내부 전극(102) 사이에 절연체(136)를 포함한다. 절연체(136) (예를 들어, 세라믹 재료)는 일반적으로 환형 단면을 갖는다.

[0030] 플라즈마 감금 시스템은 또한 도 1에 도시된 바와 같이 내부 전극(102) 및 외부 전극(104)을 적어도 부분적으로 둘러싸는 진공 챔버(138) (예를 들어, 스테인레스 스틸 용기)를 포함한다.

[0031] 도 2는 플라즈마 감금 시스템(200)의 개략적인 단면도이다. 플라즈마 감금 시스템(200)은 내부 전극(202), 내부 전극(202)를 실질적으로 둘러싸는 중간 전극(203), 및 중간 전극(203)을 실질적으로 둘러싸는 외부 전극(204)을 포함한다. 플라즈마 감금 시스템(200)은 또한 내부 전극(202)내에서부터 내부 전극(202)과 중간 전극(203) 사이의 가속 영역(210)으로 가스를 보내도록 구성된 하나 이상의 제 1 밸브(206)를 포함한다. 플라즈마 감금 시스템(200)은 또한 중간 전극(203)의 외측으로부터 가속 영역(210)으로 가스를 보내도록 구성된 둘 이상의 제 2 밸브(212)를 포함한다. 플라즈마 감금 시스템(200)은 내부 전극(202)과 중간 전극(203) 사이에 전압을 인가하도록 구성된 제 1 파워 서플라이(214) 및 내부 전극(202)과 외부 전극(204) 사이에 전압을 인가하도록 구성된 제 2 파워 서플라이(215)를 포함한다.

[0032] 내부 전극(202)은 실질적으로 원통형 바디(216)를 갖는 전기 전도성 (예를 들어, 스테인레스 스틸) 쉼의 형태를 전체적으로 취한다. 내부 전극(202)은 제 1 단부(218) (예를 들어, 둥근 단부) 및 대향하는 제 2 단부(220) (예를 들어, 실질적으로 원형 단부)를 포함한다. 보다 구체적으로, 제 1 단부(218)는 둥근 팁을 갖는 원뿔 형상을 가질 수 있다. 내부 전극(202)은 일반적으로 상기에서 논의된 내부 전극(102)과 유사하다. 내부 전극(202)은 하나 이상의 제 1 밸브(206)로부터 가속 영역(210)으로 가스를 라우팅하기 위한 하나 이상의 도관 또는 채널 (미도시)을 포함할 수 있다.

[0033] 외부 전극(204)은 또한 실질적으로 원통형 바디(228)를 갖는 전기 전도성 (예를 들어, 스테인레스 스틸) 쉼의 형태를 전체적으로 취한다. 외부 전극(204)의 제 1 단부(222)는 실질적으로 디스크 형상이고, 외부 전극의 제 2 단부(224)는 실질적으로 원형이다. 외부 전극(204)은 내부 전극(202)의 대부분 및 중간 전극(203)의 대부분을 둘러싸고 있다. 내부 전극(202), 중간 전극(203) 및 외부 전극(204)은 동심일 수 있고, 동일 축에 대해 방사상 대칭을 가질 수 있다.

[0034] 중간 전극(203)은 실질적으로 원통형 바디(229)를 갖는 전기 전도성 (예를 들어, 스테인레스 스틸)의 형태를 전체적으로 취한다. 중간 전극(203)은 실질적으로 원형인 제 1 단부(219) 및 실질적으로 원형인 제 2 대향 단부(221)를 포함한다. 중간 전극(203)은 둘 이상의 제 2 밸브(212)로부터 가속 영역(210)으로 가스를 라우팅하기 위한 하나 이상의 도관 또는 채널 (미도시)을 포함할 수 있다.

- [0035] 내부 전극(202)의 제 1 단부(218)는 외부 전극(204)의 제 1 단부(222)와 외부 전극(204)의 제 2 단부(224) 사이에 있다. 중간 전극(203)의 제 1 단부(219)는 외부 전극(204)의 제 1 단부(222)와 외부 전극(204)의 제 2 단부(224) 사이에 있다.
- [0036] 하나 이상의 제 1 밸브(206)는 "퍼프 밸브"의 형태를 취할 수 있지만, 내부 전극(202) 내에서부터 내부 전극(202)과 중간 전극(203) 사이의 가속 영역(210)으로 가스 (예를 들어, 수소 또는 중수소)를 보내도록 구성된 임의의 유형의 밸브를 포함할 수 있다. 도 2에 도시된 바와 같이, 하나 이상의 제 1 밸브(206)는 내부 전극(202)의 제 1 단부(218)와 내부 전극(202)의 제 2 단부(220) 사이에 축 방향으로 위치된다. 대안적으로, 하나 이상의 제 1 밸브는 내부 전극(202)의 제 1 단부(218) 또는 제 2 단부(220)에 위치될 수 있다. 도 2에서, 하나 이상의 제 1 밸브(206)는 내부 전극(202) 내에 위치되지만, 다른 예도 가능하다. 하나 이상의 제 1 밸브(206)는 후술하는 바와 같이 하나 이상의 제 1 밸브(206)에 제어 전압을 제공함으로써 작동될 수 있다.
- [0037] 가속 영역(210)은 내부 전극(202) 및 중간 전극(203)의 형상에 의해 정의되는 실질적으로 환형의 단면을 갖는다.
- [0038] 둘 이상의 제 2 밸브(212)는 "퍼프 밸브"의 형태를 취할 수 있지만, 중간 전극(203) 외측으로부터 가속 영역(210)으로 가스 (예를 들어, 수소 또는 중수소)를 보내도록 구성된 임의의 유형의 밸브를 포함할 수 있다. 도 2에 도시된 바와 같이, 둘 이상의 제 2 밸브(212)는 중간 전극(203)의 제 2 단부(221)에 위치되지만, 다른 예도 가능하다. 둘 이상의 제 2 밸브(212)는 예를 들어, 외부 전극(204)의 외측 및 중간 전극(203)의 외측에 배열된다. 다른 예에서, 둘 이상의 제 2 밸브는 외부 전극 내측 및 중간 전극 외측에 위치될 수 있다. 둘 이상의 제 2 밸브(212)는 제 1 절연체(236) 및 제 2 절연체(237) 사이에 가스를 보내도록 구성된다. 둘 이상의 제 1 밸브(212)는 후술하는 바와 같이 둘 이상의 제 2 밸브(212)에 제어 전압을 제공함으로써 작동될 수 있다.
- [0039] 제 1 파워 서플라이(214) 및 제 2 파워 서플라이(215)는 일반적으로 예를 들어, 최대 100-200kJ 또는 3-4MJ 를 저장할 수 있는 개개의 커패시터 뱅크의 형태를 취할 것이다.
- [0040] 플라즈마 감금 시스템(200)은 내부 전극(202)의 제 1 단부(218)와 외부 전극(204)의 제 1 단부(222) 사이에 외부 전극(204)내의 어셈블리 영역(226)을 포함한다. 플라즈마 감금 시스템(200)은 후술하는 바와 같이 어셈블리 영역(226) 내에서 Z-핀치 플라즈마를 유지하도록 구성된다.
- [0041] 플라즈마 감금 시스템(200)은 또한 가스 소스(230) (예를 들어, 가압 가스 탱크) 및 개개의 하나 이상의 제 1 밸브(206)를 통해 가스 소스(230)로부터 가스 흐름을 제어하도록 구성된 하나 이상의 제 1 레귤레이터(232)를 포함한다. 하나 이상의 제 1 레귤레이터(232)와 하나 이상의 제 1 밸브(206) 사이의 연결부(예를 들어, 배관)은 명확성을 위해 도 2에서 생략되어 있다.
- [0042] 플라즈마 감금 시스템(200)은 또한 가스 소스(230)로부터 개개의 둘 이상의 제 2 밸브(212)를 통한 가스 흐름을 제어하도록 구성된 둘 이상의 제 2 레귤레이터(234)를 포함한다. 둘 이상의 제 2 레귤레이터(234)와 둘 이상의 제 2 밸브(212) 사이의 연결부(예를 들어, 배관)는 명확성을 위해 도 2에서 생략되어 있다.
- [0043] 플라즈마 감금 시스템(200)은 또한 외부 전극(204)의 제 2 단부(224)와 중간 전극(203) 사이에 제 1 절연체(236)를 포함한다. 제 1 절연체(236)는 일반적으로 환형 단면을 갖는다.
- [0044] 플라즈마 감금 시스템(200)은 또한 중간 전극(203)의 제 2 단부(221)와 내부 전극(202) 사이에 제 2 절연체(237)를 포함한다. 제 2 절연체(237)는 일반적으로 환형 단면을 갖는다.
- [0045] 플라즈마 감금 시스템(200)은 또한 도 2에 도시된 바와 같이 내부 전극(202), 중간 전극(203) 및 외부 전극(204)을 적어도 부분적으로 둘러싸는 진공 챔버(238) (예를 들어, 스틸 용기)를 포함한다.
- [0046] 도 3은 플라즈마 감금 시스템(300)의 개략적인 단면도이다. 플라즈마 감금 시스템(300)은 내부 전극(302), 내부 전극(302)을 실질적으로 둘러싸는 외부 전극(304), 및 내부 전극(302)을 마주하는 중간 전극(303)을 포함한다. 플라즈마 감금 시스템 (300)은 또한 내부 전극 (302) 내로부터 가스를 내부 전극 (302)과 외부 전극 (304) 사이의 가속 영역 (310)으로 보내도록 구성된 하나 이상의 제 1 밸브 (306) 및 가스를 외부 전극 (304)의 외측으로부터 가속 영역 (310)으로 보내도록 구성된 둘 이상의 제 2 밸브 (312)를 포함한다. 플라즈마 감금 시스템(300)은 또한 내부 전극 (302)과 외부 전극 (304) 사이에 전압을 인가하도록 구성된 제 1 파워 서플라이(314) 및 내부 전극 (302)과 중간 전극 (303) 사이에 전압을 인가하도록 구성된 제 2 파워 서플라이(315)을 포함한다.
- [0047] 내부 전극(302)은 실질적으로 원통형 바디(316)를 갖는 전기 전도성 (예를 들어, 스테인레스 스틸) 쉼의 형태를 전체적으로 취한다. 내부 전극(302)은 제 1 단부(318) (예를 들어, 둥근 단부) 및 대향하는 제 2 단부(320) (예

를 들어, 실질적으로 원형 단부)를 포함한다. 보다 구체적으로, 제 1 단부(318)는 둥근 팁을 갖는 원뿔 형상을 가질 수 있다. 내부 전극(302)은 전반적으로 전술한 내부 전극(102) 및 내부 전극(202)과 유사하다. 내부 전극(302)은 하나 이상의 제 1 밸브(306)로부터 가속 영역(310)으로 가스를 라우팅하기 위한 하나 이상의 도관 또는 채널 (라벨링되지 않음)을 포함할 수 있다.

[0048] 외부 전극(304)는 또한 실질적으로 원통형 바디(328)를 갖는 전기 전도성 (예를 들어, 스테인레스 스틸) 쉘의 형태를 전체적으로 취한다. 외부 전극(304)의 제 1 단부(322)는 실질적으로 원형이고, 외부 전극의 제 2 단부(324)는 실질적으로 원형이다. 외부 전극(304)은 내부 전극(302)의 대부분을 둘러싸고 있다. 내부 전극(302)과 외부 전극(304)은 동심일 수 있고, 동일한 축에 대해 방사상 대칭을 가질 수 있다. 내부 전극(302)의 제 1 단부(318)는 외부 전극(304)의 제 1 단부(322)와 외부 전극(304)의 제 2 단부(324) 사이에 있다. 외부 전극(304)은 둘 이상의 제 2 밸브(312)로부터 가속 영역(310)으로 가스를 라우팅하기 위한 하나 이상의 도관 또는 채널 (미도시)을 포함할 수 있다.

[0049] 중간 전극(303)은 또한 실질적으로 디스크 형상이고, 전기 전도성 재료(예를 들어, 스테인레스 스틸)의 형태를 전체적으로 취한다.

[0050] 하나 이상의 제 1 밸브(306)는 "퍼프 밸브"의 형태를 취할 수 있지만, 내부 전극(302) 내에서부터 내부 전극(302)과 외부 전극(304) 사이의 가속 영역(310)으로 가스 (예를 들어, 수소 또는 중수소)를 보내도록 구성된 임의의 유형의 밸브를 포함할 수 있다. 도 3에 도시된 바와 같이, 하나 이상의 제 1 밸브(306)는 내부 전극(302)의 제 1 단부(318)와 내부 전극(302)의 제 2 단부(320) 사이에 축 방향으로 위치된다. 대안적으로, 하나 이상의 제 1 밸브는 내부 전극(302)의 제 1 단부(318) 또는 제 2 단부(320)에 위치될 수 있다. 도 3에서, 하나 이상의 제 1 밸브(306)는 내부 전극(302) 내에 위치 되지만, 다른 예들이 가능하다. 하나 이상의 제 1 밸브(306)는 후술하는 바와 같이 하나 이상의 제 1 밸브(306)에 제어 전압을 제공함으로써 작동될 수 있다.

[0051] 가속 영역(310)은 내부 전극(302) 및 외부 전극(304)의 형상에 의해 정의된 실질적인 환형 단면을 갖는다.

[0052] 둘 이상의 제 2 밸브(312)는 "퍼프 밸브"의 형태를 취할 수 있지만, 외부 전극(304) 외측으로부터 가속 영역(310)으로 가스 (예를 들어, 수소 또는 중수소)를 보내도록 구성된 임의의 유형의 밸브를 포함할 수 있다. 도 3에 도시된 바와 같이, 둘 이상의 제 2 밸브(312)는 외부 전극(304)의 제 1 단부(322)와 외부 전극(304)의 제 2 단부(324) 사이에 축 방향으로 위치된다. 대안적으로, 둘 이상의 제 2 밸브는 제 2 단부(324) 또는 제 1 단부(322)에 위치될 수 있다. 둘 이상의 제 2 밸브(312)는 전반적으로 외부 전극(304) 주위에 (예를 들어, 외측에) 배열될 것이다. 도 3에 도시된 바와 같이, 하나 이상의 제 1 밸브(306)는 둘 이상의 제 2 밸브(312)와 축 방향으로 정렬되지만, 다른 예도 가능하다. 둘 이상의 제 1 밸브(312)는 후술하는 바와 같이 둘 이상의 제 2 밸브(312)에 제어 전압을 제공함으로써 작동될 수 있다.

[0053] 제 1 파워 서플라이(314) 및 제 2 파워 서플라이(315)는 일반적으로 예를 들어, 최대 100-200kJ 또는 3-4MJ 를 저장할 수 있는 개개의 커패시터 뱅크의 형태를 취할 것이다.

[0054] 플라즈마 감금 시스템(300)은 내부 전극(302)의 제 1 단부(318)와 중간 전극(303) 사이에 외부 전극(304)내의 어셈블리 영역(326)을 포함한다. 플라즈마 감금 시스템(300)은 후술하는 바와 같이 어셈블리 영역(326) 내에서 Z-핀치 플라즈마를 유지하도록 구성된다.

[0055] 플라즈마 감금 시스템(300)은 또한 가스 소스(330) (예를 들어, 가압 가스 탱크) 및 개개의 하나 이상의 제 1 밸브(306)를 통해 가스 소스(330)로부터 가스 흐름을 제어하도록 구성된 하나 이상의 제 1 레귤레이터(332)를 포함한다. 하나 이상의 제 1 레귤레이터(332)와 하나 이상의 제 1 밸브(306) 사이의 연결부(예를 들어, 배관)은 명확성을 위해 도 3에서 생략되어 있다.

[0056] 플라즈마 감금 시스템(300)은 또한 가스 소스(330)로부터 개개의 둘 이상의 제 2 밸브(312)를 통한 가스 흐름을 제어하도록 구성된 둘 이상의 제 2 레귤레이터(334)를 포함한다. 하나 이상의 제 2 레귤레이터(334)와 둘 이상의 제 2 밸브(312) 사이의 연결부(예를 들어, 배관)는 명확성을 위해 도 3에서 생략되어 있다.

[0057] 플라즈마 감금 시스템(300)은 또한 내부 전극(302)과 외부 전극(304) 사이의 전기 절연을 유지하기 위해 외부 전극(304)과 내부 전극(302) 사이에 제 1 절연체(336)(예를 들어, 환형 단면을 갖는)를 포함한다.

[0058] 플라즈마 감금 시스템(300)은 또한 중간 전극(303)과 외부 전극(304) 사이의 전기 절연을 유지하기 위해 외부 전극(304)의 제 2 단부(322)와 중간 전극(303) 사이에 제 2 절연체(337)(예를 들어, 환형 단면을 갖는)를 포함한다.

- [0059] 플라즈마 감금 시스템 (300)은 또한 내부 전극 (302), 중간 전극 (303) 및/또는 외부 전극 (304)을 적어도 부분적으로 둘러싸는 진공 챔버(338)를 포함한다.
- [0060] 도 4는 플라즈마 감금 시스템 (예를 들어, 플라즈마 감금 시스템(100))을 작동시키기 위한 방법(400)의 블록도이다. 도시된 도 1, 도 5a-f, 6 및 7는 후술하는 바와 같이 방법(400)의 일부 양태들을 함께 예시한다. 도 5a 내지 도 5f는 플라즈마 감금 시스템(100)의 일부의 개략도를 포함할 뿐만 아니라 플라즈마 감금 시스템(100)의 기능을 예시한다.
- [0061] 블록(402)에서, 방법(400)은 내부 전극 내에서부터 내부 전극과 내부 전극을 실질적으로 둘러싸는 외부 전극 사이의 가속 영역으로 하나 이상의 제 1 밸브를 통해 가스를 보내는 단계를 포함한다.
- [0062] 예를 들어, 하나 이상의 제 1 밸브(106)는 내부 전극(102)내에서부터 내부 전극(102)과 내부 전극(102)를 실질적으로 둘러싸는 외부 전극(104) 사이에 가속 영역(110)에 가스(412)를 (도면들 5a-b참조)를 보낼 수 있다. 도 5a는 가속 영역(110)으로 진입은 초기 가스량(412)을 도시하고, 도 5b는 가속 영역(110)으로 진입하는 추가 량의 가스(412)를 도시한다.
- [0063] 도 6은 방법(400)의 일부 다른 가능한 특징을 도시한다. 도 6에 도시된 전압, 파형 및 시간이 반드시 축척에 맞게 도시된 것은 아니다. 일부 실시예에서, 하나 이상의 제 1 밸브(106)를 통해 가스(412)를 보내는 것은 (미도시된 커패시터 뱅크와 같은 파워 서플라이를 통해) 하나 이상의 제 1 밸브(106)(예를 들어, 하나 이상의 제 1 밸브(106)의 제어 단자)에 제 1 밸브 전압(420)을 제공하는 단계 이어서 하나 이상의 제 1 밸브(106)에 제 2 밸브 전압(422) (예를 들어, DC 파워 서플라이를 통해)을 제공하는 단계를 포함한다.
- [0064] 이런 상황에서, 제 1 밸브 전압(420)은 전반적으로 270 내지 330 볼트 범위, 290 내지 310 볼트 범위, 또는 295 내지 305 볼트 범위 내에 있다. 본 출원에 지칭된 전압은 달리 명시되지 않는 한 일반적으로 DC 전압이다. 제 1 밸브 전압(420)은 지속 시간(duration)(424) 동안 90 내지 110 μ s 범위, 95 내지 105 μ s 범위, 또는 98 내지 102 μ s 범위 내에서 제공될 수 있다. 제 1 밸브 전압(420) 및 제 2 밸브 전압(422)의 개별 파형은 실제로 구형파의 형태를 취하지 않지만, 일반적으로 RLC 회로의 제 1 밸브 전압(420)과 제 2 밸브 전압(422) 특성 사이에서 보다 매끄러운 파형 및 전이를 가질 것이라는 점에 유의해야 한다.
- [0065] 제 2 밸브 전압(422)은 13.5 내지 16.5 볼트 범위, 14 내지 16 볼트 범위, 또는 14.5 내지 15.5 볼트 범위일 수 있다. 예를 들어, 제 2 밸브 전압(422)은 0.5 내지 5ms의 범위, 0.65 내지 3.5ms의 범위, 또는 0.75 내지 2ms의 지속 시간(426) 동안 제공될 수 있다. 전형적으로, 제 1 밸브 전압(420)은 제 2 밸브 전압(422)보다 크고, 제 2 밸브 전압(422)은 제 1 밸브 전압(420)을 제공한 직후에 제공된다.
- [0066] 하나 이상의 제 1 밸브(106)의 작동 후, 내부 전극(102)과 외부 전극(104) 사이에 전압(414) (도 6 참조)이 파워 서플라이(114)을 통해 인가되기 전에 하나 이상의 제 1 밸브(106)에 인접한 가스 압력(428) (도 7 참조)은 1000 내지 5800 Torr (예를 들어, 5450 내지 5550 Torr)의 범위 내에 있을 수 있다.
- [0067] 하나 이상의 제 1 밸브(106)를 통해 가스(412)를 보내는 것은 1.1 내지 2 밀리 초 (ms) 범위 내 또는 1.3 내지 1.5ms 범위 내의 지속 시간 동안 하나 이상의 제 1 밸브(106)를 개방하는 단계를 포함할 수 있다. 추가적으로, 하나 이상의 제 1 밸브(106)를 통해 가스(412)를 보내는 것은 내부 전극(102)과 외부 전극(104) 사이에 전압(414)을 파워 서플라이(114)를 통해 인가하기 전에 하나 이상의 제 1 밸브(106)를 1.0 내지 1.6ms 또는 1.3 내지 1.5ms로 개방하는 단계를 포함할 수 있다.
- [0068] 블록(404)에서, 방법(400)은 둘 이상의 제 2 밸브를 통해 외부 전극 외측으로부터 가속 영역으로 가스를 보내는 단계를 포함한다. 예를 들어, 둘 이상의 제 2 밸브(112)는 도 5a 및 도 5b에 도시된 바와 같이 가스(412)의 일부를 가속 영역(110)으로 보낼 수 있다.
- [0069] 일부 실시예에서, 둘 이상의 제 2 밸브(112)를 통해 가스(412)를 보내는 것은 (미도시된 커패시터 뱅크와 같은 파워 서플라이를 통해) 둘 이상의 제 2 밸브(112)(예를 들어, 둘 이상의 제 2 밸브(112)의 제어 단자)에 제 3 밸브 전압(430)(도 6참조)을 제공하는 단계 이어서 둘 이상의 제 2 밸브(112)에 제 4 밸브 전압(432) (예를 들어, DC 파워 서플라이를 통해)을 제공하는 단계를 포함한다.
- [0070] 이런 상황에서, 제 3 밸브 전압(430)은 전반적으로 270 내지 330 볼트 범위, 290 내지 310 볼트 범위, 또는 295 내지 305 볼트 범위 내에 있다. 제 3 밸브 전압(430)은 지속 시간(434) 동안 90 내지 110 μ s 범위, 95 내지 105 μ s 범위, 또는 98 내지 102 μ s 범위 내에서 제공될 수 있다. 제 3 밸브 전압(430) 및 제 4 밸브 전압(432)의 개별 파형은 실제로 구형파의 형태를 취하지 않지만, 일반적으로 RLC 회로의 제 3 밸브 전압(430)과 제 4 밸브 전

압(432) 특성 사이에서 보다 매끄러운 파형 및 전이를 가질 것이라는 점에 유의해야 한다.

- [0071] 제 4 밸브 전압(432)은 일반적으로 13.5 내지 16.5 볼트 범위, 14 내지 16 볼트 범위, 또는 14.5 내지 15.5 볼트 범위 내에 있다. 제 4 밸브 전압(432)은 0.5 내지 5ms의 범위, 0.65 내지 3.5ms의 범위, 또는 0.75 내지 2ms 범위의 지속 시간(436) 동안 제공될 수 있다. 제 3 밸브 전압(430)은 전형적으로 제 4 밸브 전압(432)보다 크다. 제 4 밸브 전압(432)은 일반적으로 제 3 밸브 전압(430)이 제공된 직후에 제공된다.
- [0072] 둘 이상의 제 2 밸브(112)의 작동 후, 내부 전극(102)과 외부 전극(104) 사이에 전압(414)이 파워 서플라이(114)을 통해 인가되기 전에 둘 이상의 제 2 밸브(112)에 인접한 가스 압력(438) (도 7 참조)은 1000 내지 5800 Torr (예를 들어, 5450 내지 5550 Torr)의 범위 내에 있을 수 있다.
- [0073] 둘 이상의 제 2 밸브(112)를 통해 가스(412)를 보내는 것은 0.75 내지 1 밀리 초 (ms) 범위 내 또는 0.8 내지 0.95ms 범위 내의 지속 시간 동안 둘 이상의 제 2 밸브(112)를 개방하는 단계를 포함할 수 있다.
- [0074] 추가적으로, 둘 이상의 제 2 밸브(112)를 통해 가스(412)를 보내는 것은 내부 전극(102)과 외부 전극(104) 사이에 전압(414)을 파워 서플라이(114)를 통해 인가하기 전에 둘 이상의 제 2 밸브(112)를 0.6 내지 1.2ms 또는 0.7 내지 0.9ms로 개방하는 단계를 포함할 수 있다.
- [0075] 하나 이상의 제 1 밸브(106) 및 둘 이상의 제 2 밸브(112)의 작동 후, 내부 영역(102)과 외부 전극(104) 사이의 전압(414)이 파워 서플라이(114)을 통해 인가되기 전에 가속 영역(110) 내의 가스 압력(440) (도 7 참조)은 1000 내지 5800 Torr (예를 들어, 5450 내지 5550 Torr)의 범위 내에 있을 수 있다. 가속 영역 내의 가스 압력은 일반적으로 가스 삽입 지점으로부터의 거리가 증가함에 따라 그리고 가스가 더 이상 가속 영역으로 유입되지 않는 이후의 시간 경과에 따라 감소할 것이다.
- [0076] 블록(406)에서, 방법(400)은 파워 서플라이를 통해 내부 전극과 외부 전극 사이에 전압을 인가함으로써, 보내진 가스의 적어도 일부를 실질적으로 환형 단면을 갖는 플라스마로 변환하는 단계를 포함하고, 플라스마는 내부 전극의 제 1 단부 및 외부 전극의 제 1 단부를 향한 가속 영역 내에서 축 방향으로 흐르고, 그 후에, 외부 전극의 제 1 단부와 내부 전극의 제 1 단부 사이에 흐르는 Z-핀치 플라스마를 수립한다.
- [0077] 예를 들어, 파워 서플라이(114)은 내부 전극(102)과 외부 전극(104) 사이에 전압(414)을 인가 함으로써, 보내진 가스(412)의 적어도 일부를 실질적으로 환형 단면을 갖는 플라스마(416) (도면들 5c-d 참조)로 변환할 수 있다. 자체 전류에 의해 생성된 자기장으로 인해, 플라스마 (416)는 도 5c 내지도 5d에 도시된 바와 같이 내부 전극(102)의 제 1 단부 (118) 및 외부 전극 (104)의 제 1 단부 (122)를 향해 가속 영역 (110) 내에서 축 방향으로 흐를 수 있다. 플라스마 (416)가 가속 영역 (110)을 넘어 이동할 때, Z-핀치 플라스마 (418) (도 5e-f 참조)가 수립되고 외부 전극 (104)의 제 1 단부 (122)와 내부 전극 (102)의 제 1 단부 (118) 사이에서 흐른다.
- [0078] Z-핀치 플라스마 (418)는 일반적으로 내부 전극 (102)의 제 1 단부 (118)와 외부 전극 (104)의 제 1 단부 (122) 사이의 외부 전극 (104) 내의 어셈블리 영역 (126)에서 흐른다.
- [0079] 내부 전극 (102)과 외부 전극 (104) 사이의 파워 서플라이 (114)에 의해 인가되는 전압 (414)은 2 kV 내지 30 kV의 범위 내에 있을 수 있다. 전압(414)은 50 내지 400 μ s 범위 내에서 지속 시간(442) (도 6 참조) 동안 인가될 수 있다.
- [0080] 내부 전극(102)과 외부 전극(104) 사이에 인가된 전압(414)은 30 kV/m 내지 500 kV/m 범위 내의 가속 영역(110) 내에서 방사상 전기장을 야기할 수 있다.
- [0081] Z-핀치 플라스마 (418)는 전단 축 흐름(sheared axial flow)을 나타낼 수 있고, 0.1 mm 내지 5 mm의 반경, 900 내지 2000 eV의 이온 온도, 500 eV 초과와 전자 온도, 1×10^{23} 이온/ m^3 초과와 이온 수 밀도 또는 1×10^{23} 전자/ m^3 초과와 전자 수 밀도, 8 T를 초과하는 자기장, 및/또는 적어도 10 μ s 동안 안정할 수 있다.
- [0082] 도 8은 플라스마 감금 시스템 (예를 들어, 플라스마 감금 시스템(200))을 작동시키기 위한 방법(800)의 블록도이다. 도 2, 9a-f, 10 및 11은 아래에 설명된 바와 같은 방법(800)의 일부 양태를 예시한다. 도 9a 내지 도 9f는 플라스마 감금 시스템(200)의 일부의 개략도를 포함할 뿐만 아니라 플라스마 감금 시스템(200)의 기능을 도시한다.
- [0083] 블록(802)에서, 방법(800)은 내부 전극 내에서부터 내부 전극과 내부 전극을 실질적으로 둘러싸는 중간 전극 사이의 가속 영역으로 하나 이상의 제 1 밸브를 통해 가스를 보내는 단계를 포함한다.
- [0084] 예를 들어, 하나 이상의 제 1 밸브(206)은 또한 내부 전극(202)내에서부터 내부 전극(202)과 내부 전극(202)를

실질적으로 둘러싸는 중간 전극(203) 사이의 가속 영역(210)으로 가스(812)를 보낼 수 있다. 도 9a는 가속 영역(210)으로 진입는 초기 가스량(812)을 도시하고, 도 9b는 가속 영역(210)으로 진입하는 추가 량의 가스(812)를 도시한다.

- [0085] 도 10은 방법(800)의 일부 다른 가능한 특징을 도시한다. 도 10에 도시된 전압, 파형 및 시간이 반드시 축척에 맞게 도시된 것은 아니다. 일부 실시예에서, 하나 이상의 제 1 밸브(206)를 통해 가스(812)를 보내는 것은 (미도시된 커패시터 뱅크와 같은 파워 서플라이를 통해) 하나 이상의 제 1 밸브(206)(예를 들어, 하나 이상의 제 1 밸브(206)의 제어 단자에)에 제 1 밸브 전압(820)을 제공하는 단계 이어서 하나 이상의 제 1 밸브(206)에 제 2 밸브 전압(822) (예를 들어, DC 파워 서플라이를 통해)을 제공하는 단계를 포함한다.
- [0086] 이런 상황에서, 제 1 밸브 전압(820)은 전반적으로 270 내지 330 볼트 범위, 290 내지 310 볼트 범위, 또는 295 내지 305 볼트 범위 내에 있다. 본 출원에 지칭된 전압은 달리 명시되지 않는 한 DC 전압이다. 제 1 밸브 전압(820)은 지속 시간(824) 동안 90 내지 110 μ s 범위, 95 내지 105 μ s 범위, 또는 98 내지 102 μ s 범위 내에서 제공될 수 있다. 제 1 밸브 전압(820) 및 제 2 밸브 전압(822)의 개별 파형은 실제로 구형파의 형태를 취하지 않지만, 일반적으로 RLC 회로의 제 1 밸브 전압(820)과 제 2 밸브 전압(822) 특성 사이에서 보다 매끄러운 파형 및 전이를 가질 것이라는 점에 유의해야 한다.
- [0087] 제 2 밸브 전압(822)은 13.5 내지 16.5 볼트 범위, 14 내지 16 볼트 범위, 또는 14.5 내지 15.5 볼트 범위일 수 있다. 예를 들어, 제 2 밸브 전압(822)은 0.5 내지 5ms의 범위, 0.65 내지 3.5ms의 범위, 또는 0.75 내지 2ms의 지속 시간(826) 동안 제공될 수 있다. 전형적으로, 제 1 밸브 전압(820)은 제 2 밸브 전압(822)보다 크고 제 2 밸브 전압(822)은 제 1 밸브 전압(820)을 제공한 직후에 제공된다.
- [0088] 하나 이상의 제 1 밸브(206)의 작동 후, 내부 전극(202)과 중간 전극(203) 사이에 전압(814) (도 10 참조)이 파워 서플라이(214)을 통해 인가되기 전에 하나 이상의 제 1 밸브(206)에 인접한 가스 압력(828) (도 11 참조)은 1000 내지 5800 Torr (예를 들어, 5450 내지 5550 Torr)의 범위 내에 있을 수 있다.
- [0089] 하나 이상의 제 1 밸브(206)를 통해 가스(812)를 보내는 것은 1.1 내지 2 밀리 초 (ms) 범위 내 또는 1.3 내지 1.5ms 범위 내의 지속 시간 동안 하나 이상의 제 1 밸브(206)를 개방하는 단계를 포함할 수 있다. 추가적으로, 하나 이상의 제 1 밸브(206)를 통해 가스(812)를 보내는 것은 내부 전극(202)과 중간 전극(203) 사이에 전압(814)을 파워 서플라이(214)를 통해 인가하기 전에 하나 이상의 제 1 밸브(206)를 1.0 내지 1.6ms 또는 1.3 내지 1.5ms로 개방하는 단계를 포함할 수 있다.
- [0090] 블록(804)에서, 방법(800)은 둘 이상의 제 2 밸브를 통해 가스를 중간 전극 외측으로부터 가속 영역으로 보내는 단계를 포함한다. 예를 들어, 둘 이상의 제 2 밸브(212)는 도 9a 및 도 9b에 도시된 바와 같이 가스(812)의 일부를 가속 영역(210)으로 보낼 수 있다.
- [0091] 일부 실시예에서, 둘 이상의 제 2 밸브(212)를 통해 가스(812)를 보내는 것은 (미도시된 커패시터 뱅크와 같은 파워 서플라이를 통해) 둘 이상의 제 2 밸브(212)(예를 들어, 둘 이상의 제 2 밸브(212)의 제어 단자에)에 제 3 밸브 전압(830)을 제공하는 단계 이어서 둘 이상의 제 2 밸브(212)에 제 4 밸브 전압(832) (예를 들어, DC 파워 서플라이를 통해)을 제공하는 단계를 포함한다.
- [0092] 이와 관련하여, 제 3 밸브 전압(830)은 일반적으로 270 내지 330 볼트 범위, 290 내지 310 볼트 범위, 또는 295 내지 305 볼트 범위 내에 있다. 제 3 밸브 전압(830)은 90 내지 110 μ s 범위, 95 내지 105 μ s 범위, 또는 98 내지 102 μ s 범위 내에서 지속 시간(834) 동안 제공될 수 있다. 제 3 밸브 전압(830) 및 제 4 밸브 전압(832)의 개별 파형은 실제로 구형파의 형태를 취하지 않지만, 일반적으로 RLC 회로의 제 3 밸브 전압(830)과 제 4 밸브 전압(832) 특성 사이에서 보다 매끄러운 파형 및 전이를 가질 것이라는 점에 유의해야 한다.
- [0093] 제 4 밸브 전압(832)은 일반적으로 13.5 내지 16.5 볼트 범위, 14 내지 16 볼트 범위, 또는 14.5 내지 15.5 볼트 범위 내에 있다. 제 4 밸브 전압(832)은 0.5 내지 5ms의 범위, 0.65 내지 3.5ms의 범위, 또는 0.75 내지 2ms범위의 지속 시간(836) 동안 제공될 수 있다. 제 3 밸브 전압(830)은 전형적으로 제 4 밸브 전압(832)보다 크다. 제 4 밸브 전압(832)은 일반적으로 제 3 밸브 전압(830)을 제공한 직후에 제공된다.
- [0094] 둘 이상의 제 2 밸브(212)의 작동 후, 내부 전극(202)과 중간 전극(203) 사이에 전압(814)이 파워 서플라이(214)을 통해 인가되기 전에 둘 이상의 제 2 밸브(212)에 인접한 가스 압력(838) (도 11 참조)은 1000 내지 5800 Torr (예를 들어, 5450 내지 5550 Torr)의 범위 내에 있을 수 있다.
- [0095] 둘 이상의 제 2 밸브(212)를 통해 가스(812)를 보내는 것은 0.75 내지 1 밀리 초 (ms) 범위 내 또는 0.8 내지

0.95ms 범위 내의 지속 시간 동안 둘 이상의 제 2 밸브(212)를 개방하는 단계를 포함할 수 있다.

- [0096] 추가적으로, 둘 이상의 제 2 밸브(212)를 통해 가스(812)를 보내는 것은 내부 전극(202)과 중간 전극(203) 사이에 전압(814)을 파워 서플라이(214)를 통해 인가하기 전에 둘 이상의 제 2 밸브(212)를 0.6 내지 1.2ms 또는 0.7 내지 0.9ms로 개방하는 단계를 포함할 수 있다.
- [0097] 하나 이상의 제 1 밸브(206) 및 둘 이상의 제 2 밸브(212)의 작동 후, 내부 영역(102)과 중간 전극(203) 사이의 전압(814)이 파워 서플라이(214)을 통해 인가되기 전에 가속 영역(210) 내의 가스 압력(840) (도 11 참조)은 1000 내지 5800 Torr (예를 들어, 5450 내지 5550 Torr)의 범위 내에 있을 수 있다. 가속 영역 내의 가스 압력은 일반적으로 가스 삼입 지점으로부터의 거리가 증가함에 따라 그리고 가스가 더 이상 가속 영역으로 유입되지 않는 이후의 시간 경과에 따라 감소할 것이다.
- [0098] 블록(806)에서, 방법(800)은 제 1 파워 서플라이를 통해 내부 전극과 중간 전극 사이에 전압을 인가함으로써, 보내진 가스의 적어도 일부를 실질적으로 환형 단면을 갖는 플라즈마로 변환하는 단계를 포함하고, 플라즈마는 내부 전극의 제 1 단부 및 외부 전극의 제 1 단부를 향한 가속 영역 내에서 축 방향으로 흐른다.
- [0099] 예를 들어, 제 1 파워 서플라이(214)은 내부 전극(202)과 외부 전극(204) 사이에 전압(814)(도 10 참조)을 인가함으로써, 보내진 가스(812)의 적어도 일부를 실질적으로 환형 단면을 갖는 플라즈마(816) (도면들 9c-d 참조)로 변환할 수 있다. 자체 전류에 의해 생성된 자기장으로 인해, 플라즈마 (816)는 도 9c 내지도 9d에 도시된 바와 같이 내부 전극 (202)의 제 1 단부 (218) 및 외부 전극 (204)의 제 1 단부 (222)를 향해 가속 영역 (210) 내에서 축 방향으로 흐를 수 있다.
- [0100] 내부 전극 (202)과 중간 전극 (203) 사이의 파워 서플라이 (214)에 의해 인가되는 전압 (814)은 2 kV 내지 30 kV의 범위 내에 있을 수 있다. 전압(814)은 50 내지 400 μ s 범위 내에서 지속 시간(842) (도 10 참조) 동안 인가될 수 있다.
- [0101] 내부 전극(202)과 중간 전극(203) 사이에 인가된 전압(814)은 30 kV/m 내지 500 kV/m 범위 내의 가속 영역 (210) 내에 방사상 전기장을 야기할 수 있다.
- [0102] 블록 (808)에서, 방법(800)은 외부 전극의 제 1 단부와 내부 전극의 제 1 단부 사이에 흐르는 Z-핀치 플라즈마를 수립하기 위해 내부 전극과 외부 전극 사이에 전압을 제 2 파워 서플라이를 통해 인가하는 단계를 포함한다.
- [0103] 예를 들어, 제 2 파워 서플라이(215)은 내부 전극(202)과 외부 전극(204) 사이에 전압(815) (도 10 참조)을 인가하여 외부 전극(204)의 제 1 단부(222)와 내부 전극(202)의 제 1 단부(218) 사이에 흐르는 Z-핀치 플라즈마 (818) (도 9e-f 참조)를 수립할 수 있다. 플라즈마(816)가 가속 영역(210)을 넘어 이동할 때, Z-핀치 플라즈마 (818)은 내부 전극(202)의 제 1 단부(218)와 외부 전극(204)의 제 1 단부(222) 사이에 외부 전극(204)내의 어셈블리 영역(226)에 수립된다.
- [0104] 블록들(806 및 808)은 또한 당업자라면 인식할 바와 같이, (a) 내부 전극(202)과 중간 전극(203) 사이의 전압 및 (b) 중간 전극(203)과 외부 전극(204) 사이의 전압을 제어하는 다른 수단에 의해 구현될 수 있음에 유의해야 한다. 예를 들어, 파워 서플라이는 내부 전극과 외부 전극 사이가 아닌 중간 전극(203)과 외부 전극(204) 사이에 전압을 제공할 수 있다.
- [0105] 내부 전극(202)과 외부 전극(204) 사이에 전압을 인가하는 단계는 내부 전극(202)과 중간 전극(203) 사이에 전압을 인가한 후에 내부 전극(202)과 외부 전극(204) 사이에 17-27 μ s 또는 19-22 μ s 전압을 인가하는 것을 시작하는 단계를 포함할 수 있다.
- [0106] 내부 전극(202)과 외부 전극(204) 사이의 파워 서플라이(215)에 의해 인가되는 전압(815)은 일반적으로 2 kV 내지 30 kV의 범위 내에 있다. 전압(815)은 50 - 400 μ s 범위 내에서 지속 시간(844) 동안 인가될 수 있다.
- [0107] Z-핀치 플라즈마 (418)는 전단 축 흐름(sheared axial flow)을 나타낼 수 있고, 0.1 mm 내지 5 mm의 반경, 900 내지 2000 eV의 이온 온도, 500 eV 초과의 전자 온도, 1×10^{23} 이온/ m^3 초과의 이온 수 밀도 또는 1×10^{23} 전자/ m^3 초과의 전자 수 밀도, 8 T를 초과하는 자기장, 및/또는 적어도 10 μ s 동안 안정할 수 있다.
- [0108] 도 12는 플라즈마 감금 시스템 (예를 들어, 플라즈마 감금 시스템(300))을 작동시키기 위한 방법(900)의 블록도이다. 도 3, 13a-f, 14 및 15은 아래에 설명된 바와 같은 방법(900)의 일부 양태를 예시한다. 도 13a 내지 도 13f는 플라즈마 감금 시스템(300)의 일부의 개략도를 포함할 뿐만 아니라 플라즈마 감금 시스템(300)의 기능을 도시한다.

- [0109] 블록(902)에서, 방법(900)은 내부 전극 내에서부터 내부 전극과 내부 전극을 실질적으로 둘러싸는 외부 전극 사이의 가속 영역으로 하나 이상의 제 1 밸브를 통해 가스를 보내는 단계를 포함한다.
- [0110] 예를 들어, 하나 이상의 제 1 밸브(306)는 내부 전극(302)내에서부터 내부 전극(302)과 내부 전극(302)를 실질적으로 둘러싸는 외부 전극(304) 사이에 가속 영역(310)에 가스(912)를 (도면들 13a-b참조)를 보낼 수 있다. 도 13a는 가속 영역(310)으로 진입하는 초기 양의 가스(912)를 도시하고 도 13b는 가속 영역(310)으로 진입하는 추가 양의 가스(912)를 도시한다.
- [0111] 도 14는 방법(900)의 일부 다른 가능한 특징을 예시한다. 도 14에 도시된 전압, 파형 및 시간이 반드시 축척에 맞게 도시된 것은 아니다. 일부 실시예에서, 하나 이상의 제 1 밸브(306)를 통해 가스(912)를 보내는 것은 (미도시된 커패시터 बैं크와 같은 파워 서플라이를 통해) 하나 이상의 제 1 밸브(306)(예를 들어, 하나 이상의 제 1 밸브(306)의 제어 단자에)에 제 1 밸브 전압(920)을 제공하는 단계 이어서 하나 이상의 제 1 밸브(306)에 제 2 밸브 전압(922) (예를 들어, DC 파워 서플라이를 통해)을 제공하는 단계를 포함한다.
- [0112] 이런 상황에서, 제 1 밸브 전압(920)은 전반적으로 270 내지 330 볼트 범위, 290 내지 310 볼트 범위, 또는 295 내지 305 볼트 범위 내에 있다. 본 출원에 지칭된 전압은 달리 명시되지 않는 한 일반적으로 DC 전압이다. 제 1 밸브 전압(920)은 지속 시간(924) 동안 90 내지 110 μ s 범위, 95 내지 105 μ s 범위, 또는 98 내지 102 μ s 범위 내에서 제공될 수 있다. 제 1 밸브 전압(920) 및 제 2 밸브 전압(922)의 개별 파형은 실제로 구형파의 형태를 취하지 않지만, 일반적으로 RLC 회로의 제 1 밸브 전압(920)과 제 2 밸브 전압(922) 특성 사이에서 보다 매끄러운 파형 및 전이를 가질 것이라는 점에 유의해야 한다.
- [0113] 제 2 밸브 전압(922)은 13.5 내지 16.5 볼트 범위, 14 내지 16 볼트 범위, 또는 14.5 내지 15.5 볼트 범위일 수 있다. 예를 들어, 제 2 밸브 전압(922)은 0.5 내지 5ms의 범위, 0.65 내지 3.5ms의 범위, 또는 0.75 내지 2ms의 지속 시간(926) 동안 제공될 수 있다. 일반적으로 제 1 밸브 전압(920)은 제 2 밸브 전압(922)보다 크고 제 2 밸브 전압(922)은 제 1 밸브 전압(920)을 제공한 직후에 제공된다.
- [0114] 하나 이상의 제 1 밸브(306)의 작동 후, 내부 전극(302)과 외부 전극(304) 사이에 전압(914) (도 14 참조)이 파워 서플라이(314)을 통해 인가되기 전에 하나 이상의 제 1 밸브(306)에 인접한 가스 압력(928) (도 15 참조)은 1000 내지 5800 Torr (예를 들어, 5450 내지 5550 Torr)의 범위 내에 있을 수 있다.
- [0115] 하나 이상의 제 1 밸브(306)를 통해 가스(912)를 보내는 것은 1.1 내지 2 밀리 초 (ms) 범위 내 또는 1.3 내지 1.5ms 범위 내의 지속 시간 동안 하나 이상의 제 1 밸브(306)를 개방하는 단계를 포함할 수 있다. 추가적으로, 하나 이상의 제 1 밸브(306)를 통해 가스(912)를 보내는 것은 내부 전극(302)과 외부 전극(304) 사이에 전압(914)을 파워 서플라이(314)를 통해 인가하기 전에 하나 이상의 제 1 밸브(306)를 1.0 내지 1.6ms 또는 1.3 내지 1.5ms로 개방하는 단계를 포함할 수 있다.
- [0116] 블록(904)에서, 방법(900)은 둘 이상의 제 2 밸브를 통해 외부 전극 외측으로부터 가속 영역으로 가스를 보내는 단계를 포함한다. 예를 들어, 둘 이상의 제 2 밸브(312)는 도 13a 및 도 13b에 도시된 바와 같이 가스(912)의 일부를 가속 영역(310)으로 보낼 수 있다.
- [0117] 일부 실시예에서, 둘 이상의 제 2 밸브(312)를 통해 가스(912)를 보내는 것은 (미도시된 커패시터와 같은 파워 서플라이를 통해) 둘 이상의 제 2 밸브(312)(예를 들어, 둘 이상의 제 2 밸브(112)의 제어 단자에)에 제 3 밸브 전압(930)(도 14참조)을 제공하는 단계 이어서 둘 이상의 제 2 밸브(312)에 제 4 밸브 전압(932) (예를 들어, DC 파워 서플라이를 통해)을 제공하는 단계를 포함한다.
- [0118] 이런 상황에서, 제 3 밸브 전압(930)은 전반적으로 270 내지 330 볼트 범위, 290 내지 310 볼트 범위, 또는 295 내지 305 볼트 범위 내에 있다. 제 3 밸브 전압(930)은 90 내지 110 μ s 범위, 95 내지 105 μ s 범위, 또는 98 내지 102 μ s 범위 내에서 지속 시간(934) 동안 제공될 수 있다. 제 3 밸브 전압(930) 및 제 4 밸브 전압(932)의 개별 파형은 실제로 구형파의 형태를 취하지 않지만, 일반적으로 RLC 회로의 제 3 밸브 전압(930)과 제 4 밸브 전압(932) 특성 사이에서 보다 매끄러운 파형 및 전이를 가질 것이라는 점에 유의해야 한다.
- [0119] 제 4 밸브 전압(932)은 일반적으로 13.5 내지 16.5 볼트 범위, 14 내지 16 볼트 범위, 또는 14.5 내지 15.5 볼트 범위 내에 있다. 제 4 밸브 전압(932)은 0.5 내지 5ms의 범위, 0.65 내지 3.5ms의 범위, 또는 0.75 내지 2ms 범위의 지속 시간(936) 동안 제공될 수 있다. 제 3 밸브 전압(930)은 전형적으로 제 4 밸브 전압(932)보다 크다. 제 4 밸브 전압(932)은 일반적으로 제 3 밸브 전압(930)을 제공한 직후에 제공된다.
- [0120] 둘 이상의 제 2 밸브(312)의 작동 후, 내부 전극(302)과 외부 전극(304) 사이에 전압(914)이 파워 서플라이

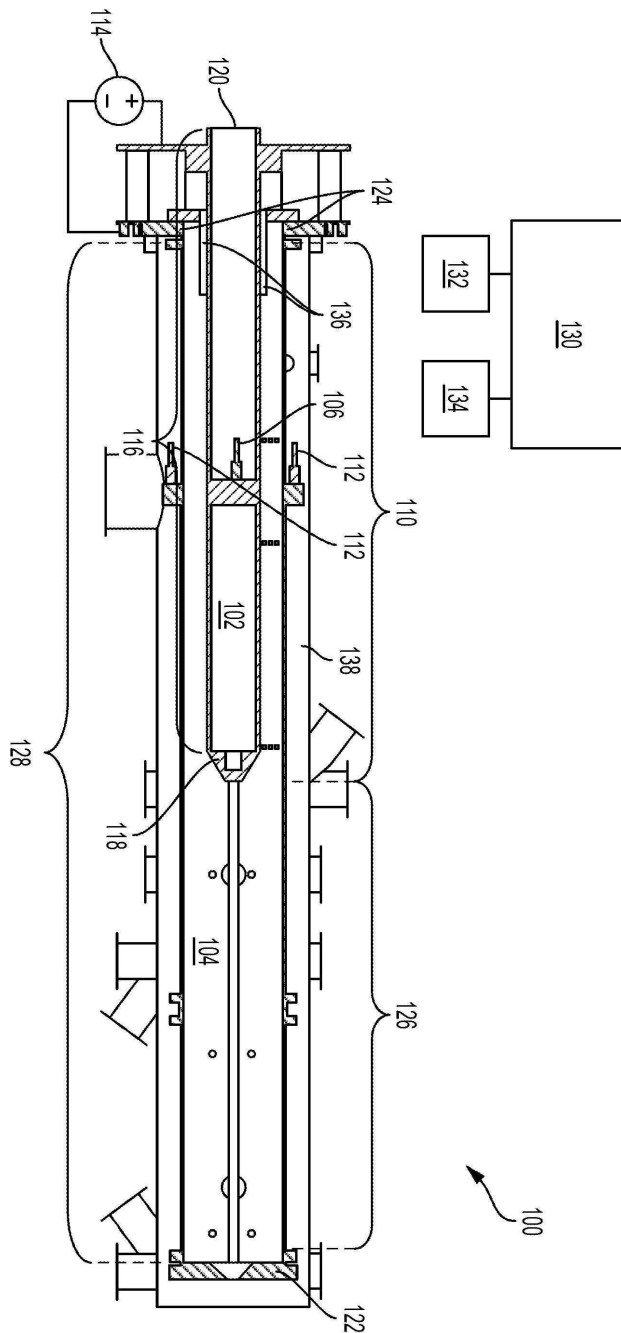
(314)을 통해 인가되기 전에 둘 이상의 제 2 밸브(312)에 인접한 가스 압력(938) (도 15 참조)은 1000 내지 5800 Torr (예를 들어, 5450 내지 5550 Torr)의 범위 내에 있을 수 있다.

- [0121] 둘 이상의 제 2 밸브(312)를 통해 가스(912)를 보내는 것은 0.75 내지 1 밀리 초 (ms) 범위 내 또는 0.8 내지 0.95ms 범위 내의 지속 시간 동안 둘 이상의 제 2 밸브(312)를 개방하는 단계를 포함할 수 있다.
- [0122] 추가적으로, 둘 이상의 제 2 밸브(312)를 통해 가스(912)를 보내는 것은 내부 전극(302)과 외부 전극(304) 사이에 전압(914)을 파워 서플라이(314)를 통해 인가하기 전에 둘 이상의 제 2 밸브(312)를 0.6 내지 1.2ms 또는 0.7 내지 0.9ms로 개방하는 단계를 포함할 수 있다.
- [0123] 하나 이상의 제 1 밸브(306) 및 둘 이상의 제 2 밸브(312)의 작동 후, 내부 영역(302)과 외부 전극(304) 사이의 전압(914)이 파워 서플라이(314)을 통해 인가되기 전에 가속 영역(310) 내의 가스 압력(940) (도 15 참조)은 1000 내지 5800 Torr (예를 들어, 5450 내지 5550 Torr)의 범위 내에 있을 수 있다. 가속 영역 내의 가스 압력은 일반적으로 가스 삼입 지점으로부터의 거리가 증가함에 따라 그리고 가스가 더 이상 가속 영역으로 유입되지 않는 이후의 시간 경과에 따라 감소할 것이다.
- [0124] 블록(906)에서, 방법(900)은 제 1 파워 서플라이를 통해 내부 전극과 외부 전극 사이에 전압을 인가함으로써, 보내진 가스의 적어도 일부를 실질적으로 환형 단면을 갖는 플라즈마로 변환하는 단계를 포함하고, 플라즈마는 내부 전극의 제 1 단부 및 외부 전극의 제 1 단부를 향한 가속 영역 내에서 축 방향으로 흐른다.
- [0125] 예를 들어, 파워 서플라이(314)은 내부 전극(302)과 외부 전극(304) 사이에 전압(914)을 인가 함으로써, 보내진 가스(912)의 적어도 일부를 실질적으로 환형 단면을 갖는 플라즈마(916) (도면들 13c-d 참조)로 변환할 수 있다. 자체 전류에 의해 생성된 자기장으로 인해, 플라즈마 (916)는 도 13c 내지도 13d에 도시 된 바와 같이 내부 전극 (102)의 제 1 단부 (318) 및 외부 전극 (304)의 제 1 단부 (322)를 향해 가속 영역 (310) 내에서 축 방향으로 흐를 수 있다.
- [0126] 내부 전극(302)과 외부 전극(304) 사이에서 파워 서플라이(314)에 의해 인가되는 전압(914)은 2 kV 내지 30 kV의 범위 내에 있을 수 있다. 전압(914)은 50 내지 400 μ s 범위 내에서 지속 시간(942) (도 14 참조) 동안 인가될 수 있다.
- [0127] 내부 전극(302)과 외부 전극(304) 사이에 인가된 전압(914)은 30 kV/m 내지 500 kV/m 범위 내의 가속 영역(310) 내에 방사상 전기장을 야기할 수 있다.
- [0128] 블록 (908)에서, 방법(900)은 중간 전극과 내부 전극의 제 1 단부 사이에 흐르는 Z-핀치 플라즈마를 수립하기 위해 내부 전극과 중간 전극 사이에 전압을 제 2 파워 서플라이를 통해 인가하는 단계를 포함한다. 이와 관련하여, 중간 전극은 외부 전극의 제 1 단부에 위치된다.
- [0129] 예를 들어, 파워 서플라이(315)은 내부 전극(302)과 중간 전극(303) 사이에 전압(915)을 인가하여 중간 전극(303)과 내부 전극(302)의 제 1 단부(318) 사이에 흐르는 Z-핀치 플라즈마(918)를 수립할 수 있다. Z-핀치 플라즈마(918)는 플라즈마(916)가 가속 영역(310)을 넘어 이동할 때 수립된다. Z-핀치 플라즈마(918)는 내부 전극(302)의 제 1 단부(318)와 중간 전극(303) 사이에 외부 전극(304)내의 어셈블리 영역(326)에서 흐른다.
- [0130] 내부 전극(302)과 중간 전극(303) 사이에 전압을 인가하는 단계는 내부 전극(302)과 외부 전극(304) 사이에 전압을 인가한 후에 내부 전극(302)과 중간 전극(303) 17-27 μ s 또는 19-22 μ s 전압을 인가하는 것을 시작하는 단계를 포함할 수 있다.
- [0131] 블록(906 및 908)은 또한 당업자라면 인식할 바와 같이, (a) 내부 전극(302)과 외부 전극(304) 사이의 전압 및 (b) 내부 전극(302)과 중간 전극(303) 사이의 전압을 제어하는 다른 수단에 의해 구현될 수 있음에 유의해야 한다. 예를 들어, 파워 서플라이는 내부 전극과 중간 전극 사이가 아닌 중간 전극(303)과 외부 전극(304) 사이에 전압을 제공할 수 있다. 내부 전극(102)과 중간 전극(303) 사이에서 파워 서플라이(315)에 의해 인가되는 전압(915)은 2 kV 내지 30 kV의 범위 내에 있을 수 있다. 전압(915)은 50 내지 400 μ s 범위 내에서 지속 시간(942) 동안 인가될 수 있다 (도 14 참조).
- [0132] Z-핀치 플라즈마 (918)는 전단 축 흐름을 나타낼 수 있고, 0.1 mm 내지 5 mm의 반경, 900 내지 2000 eV의 이온 온도, 500 eV 초과인 전자 온도, 1×10^{23} 이온/ m^3 초과인 이온 수 밀도 또는 1×10^{23} 전자/ m^3 초과인 전자 수 밀도, 8 T를 초과하는 자기장, 및/또는 적어도 10 μ s 동안 안정할 수 있다.
- [0133] 다양한 예시적인 양태들 및 예시적인 실시예들이 여기에 개시되었지만, 다른 양태들 및 실시예들이 당업자에게

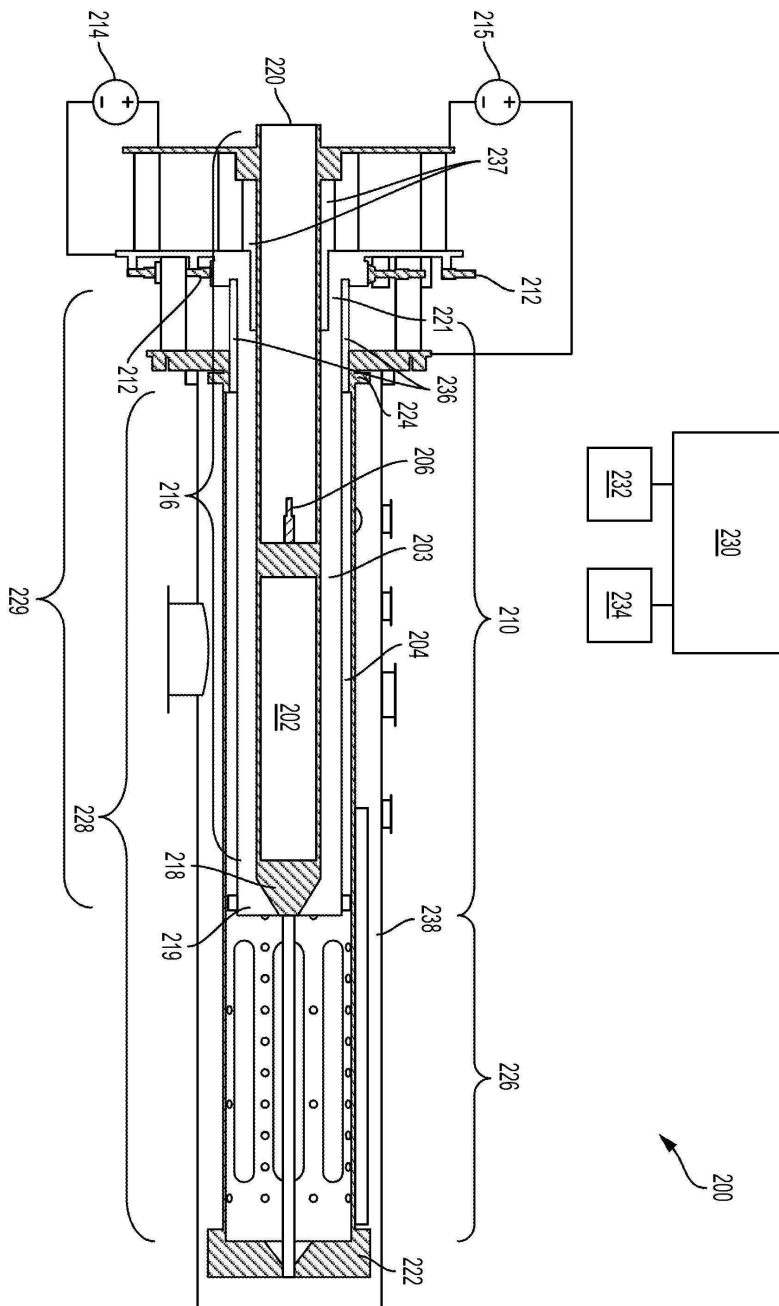
명백할 것이다. 본 출원에 개시된 다양한 예시적인 양태 및 예시적인 실시예는 예시를 위한 것이며 제한하기 위한 것이 아니며, 진정한 범위 및 사상은 다음의 청구 범위에 의해 표시된다.

도면

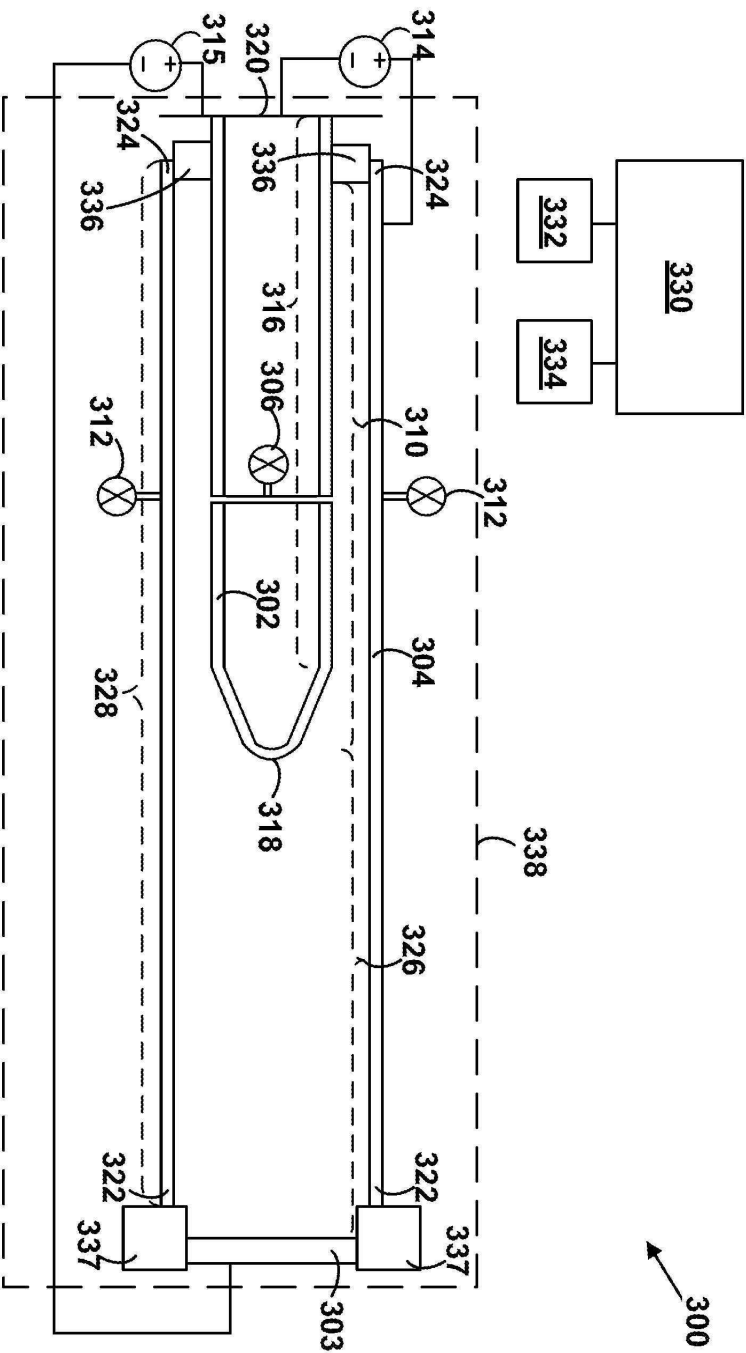
도면1



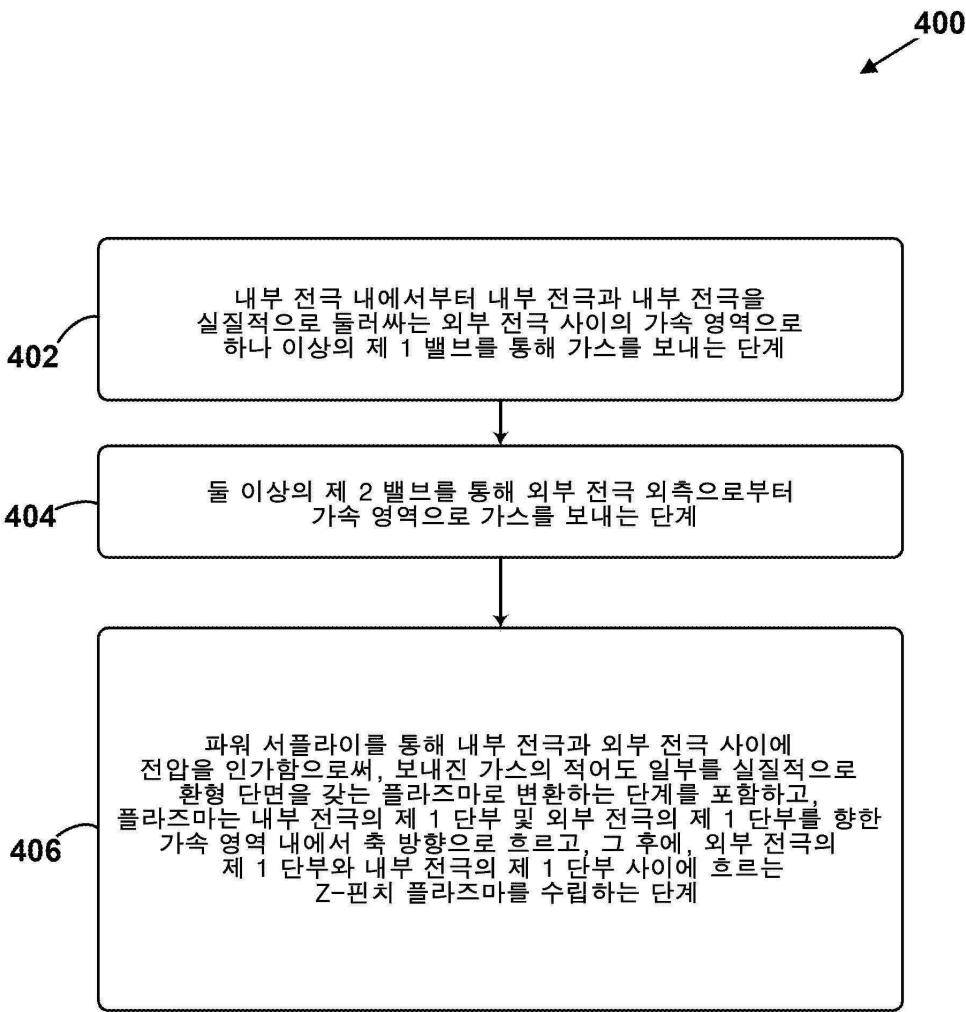
도면2



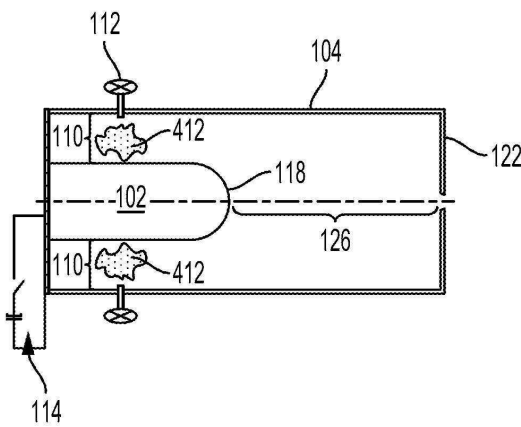
도면3



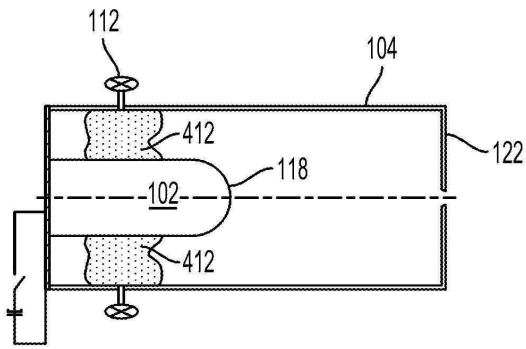
도면4



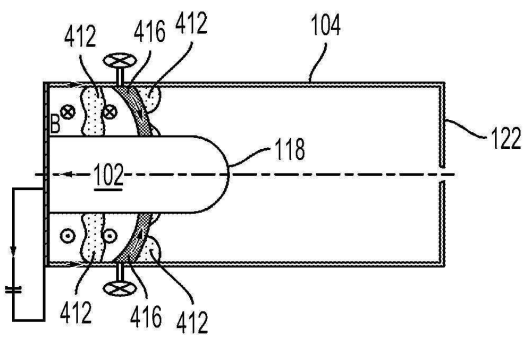
도면5a



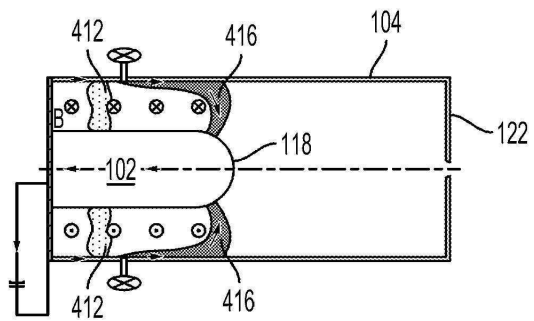
도면5b



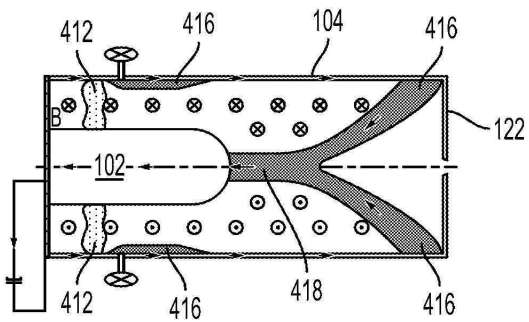
도면5c



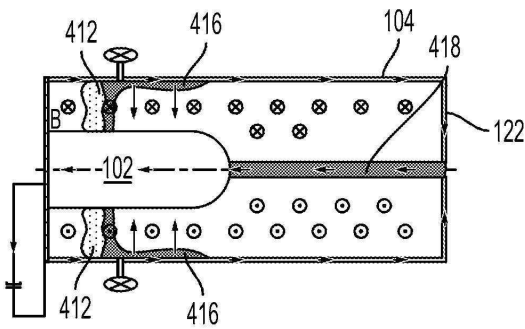
도면5d



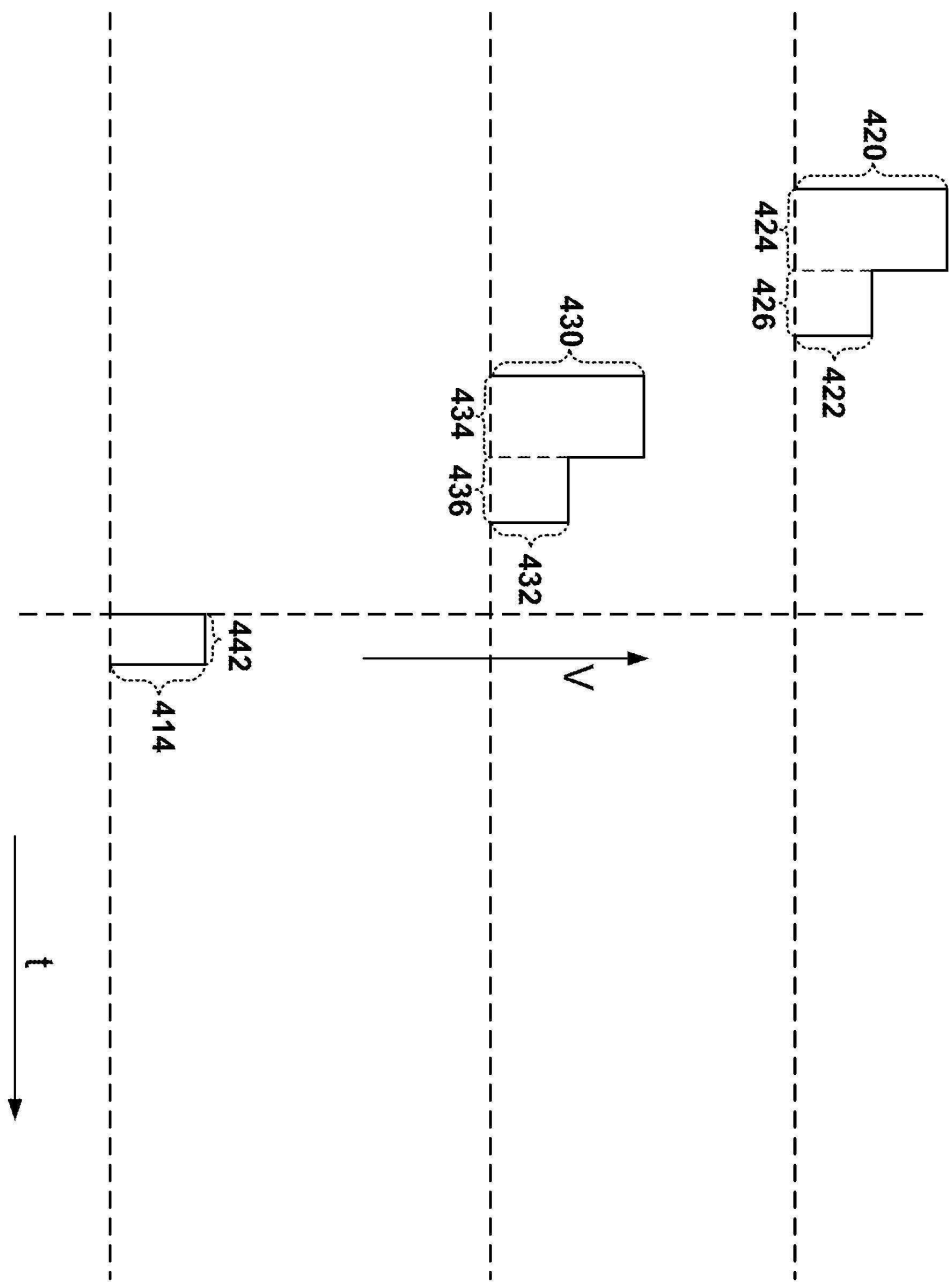
도면5e



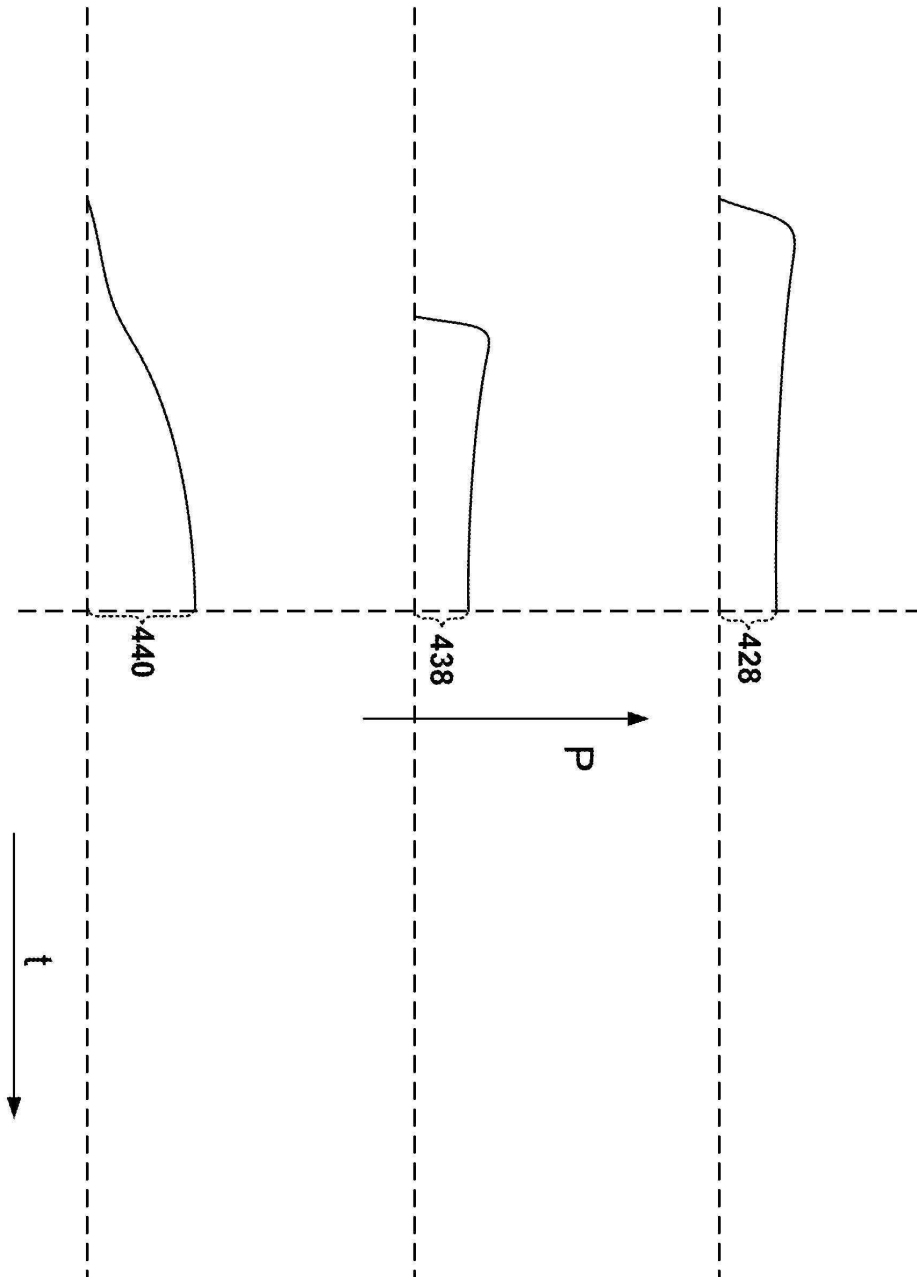
도면5f



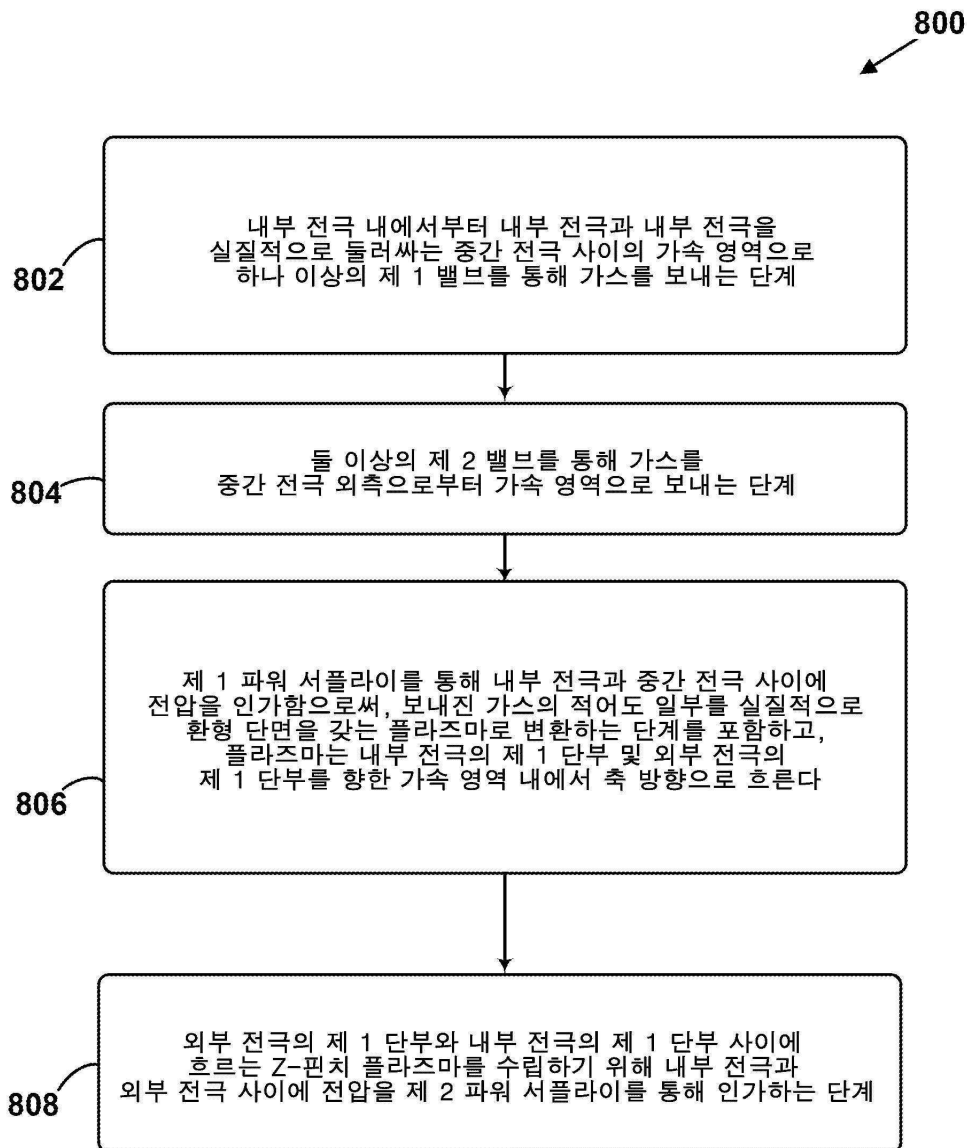
도면6



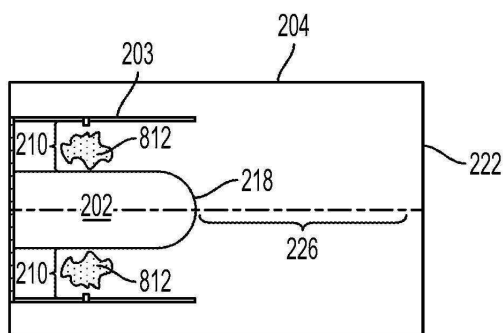
도면7



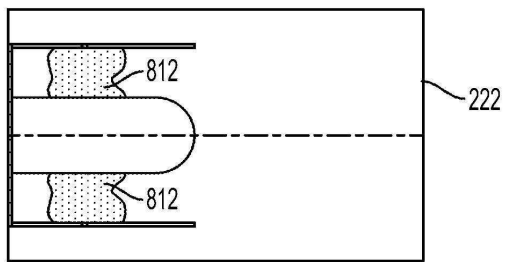
도면8



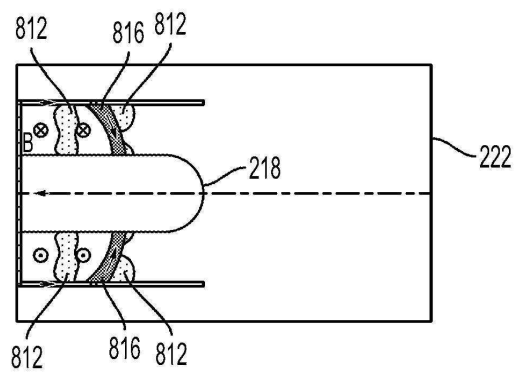
도면9a



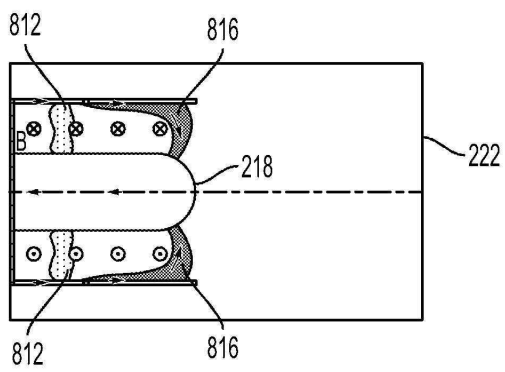
도면9b



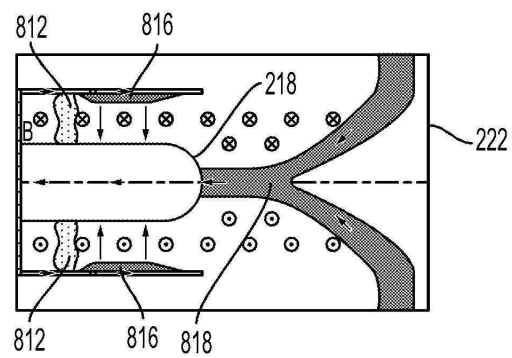
도면9c



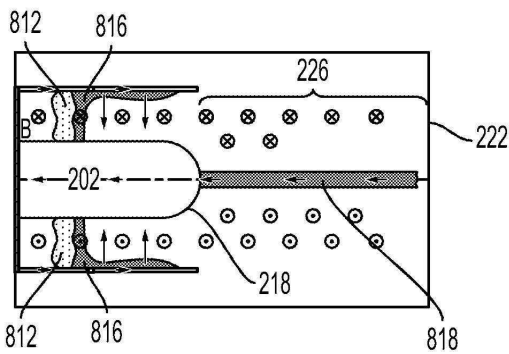
도면9d



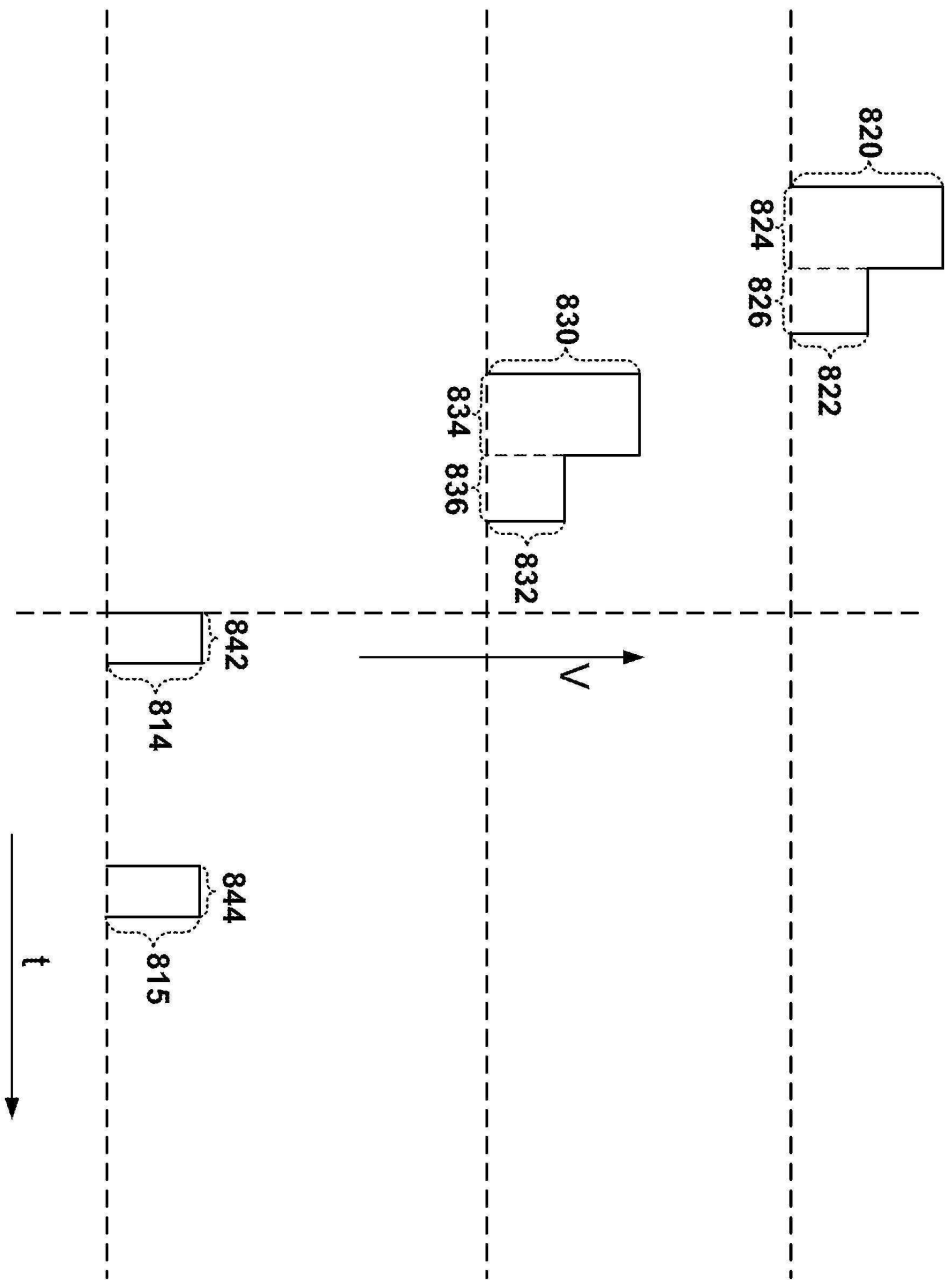
도면9e



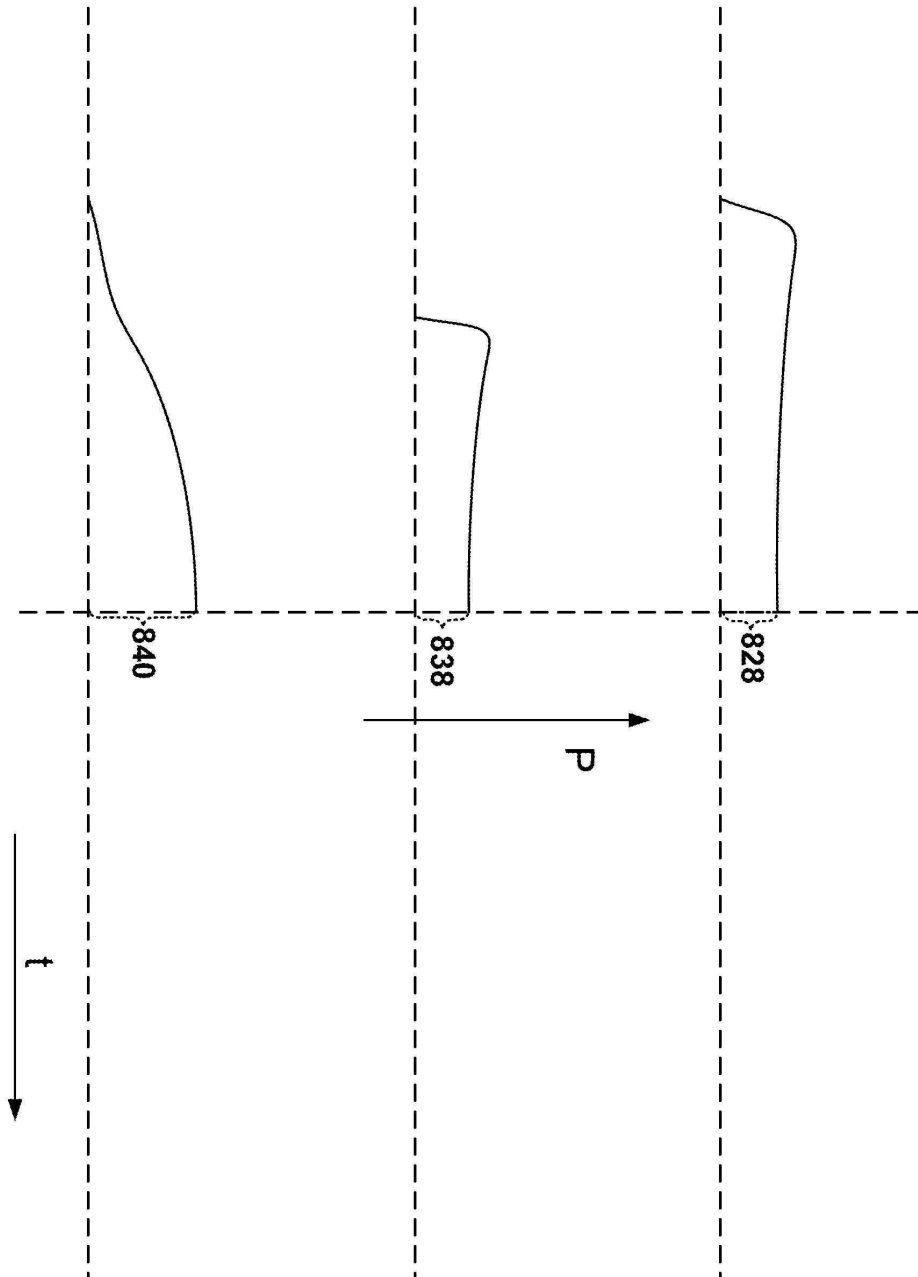
도면9f



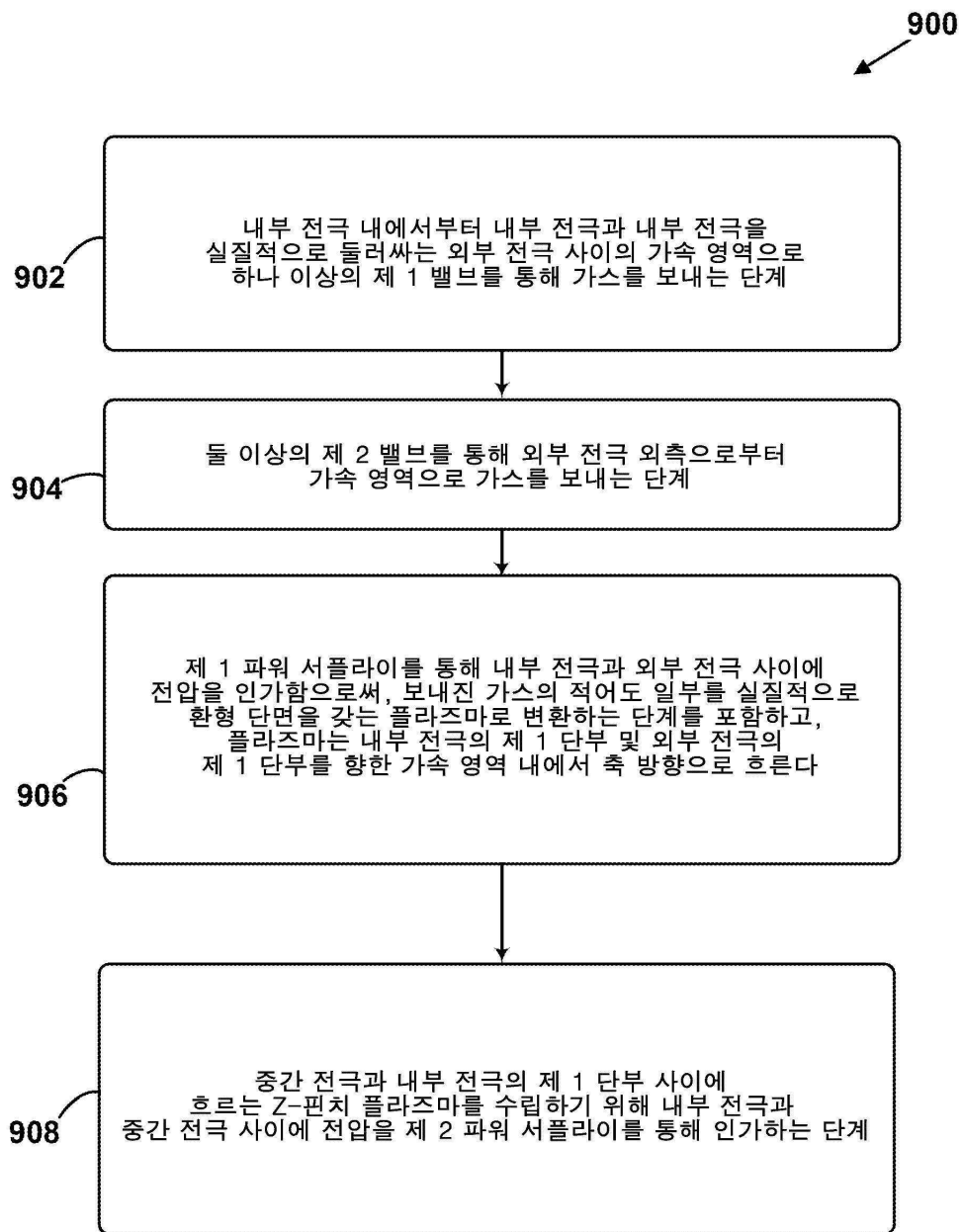
도면10



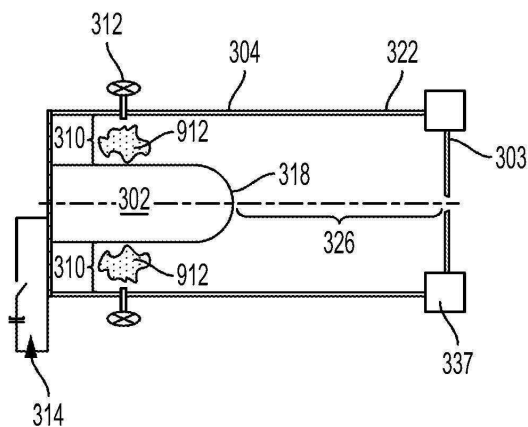
도면11



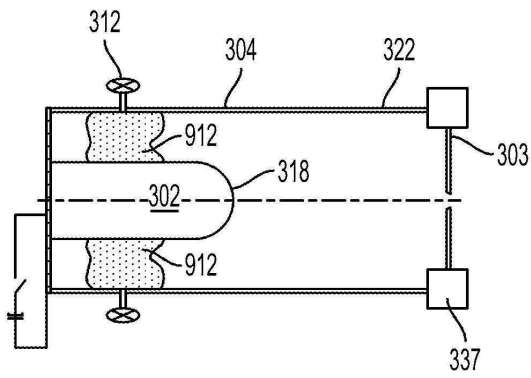
도면 12



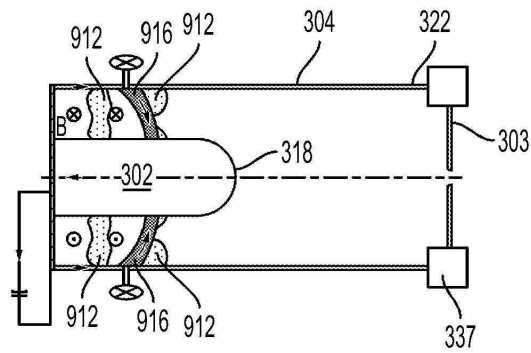
도면 13a



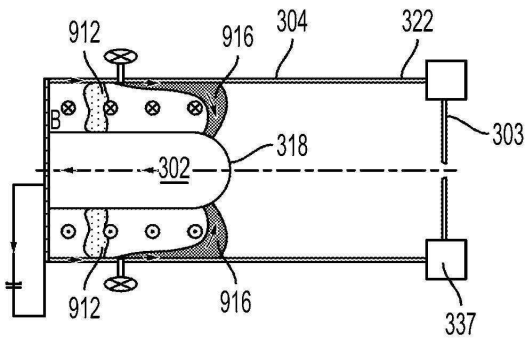
도면13b



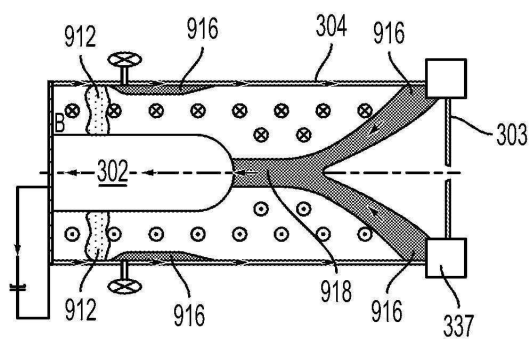
도면13c



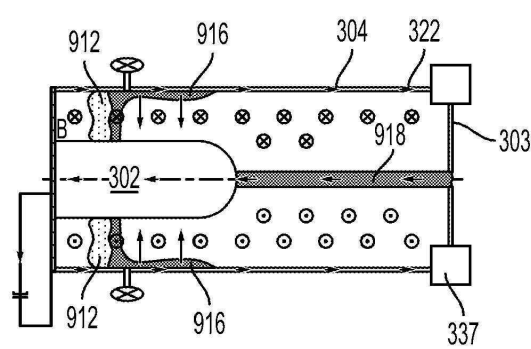
도면13d



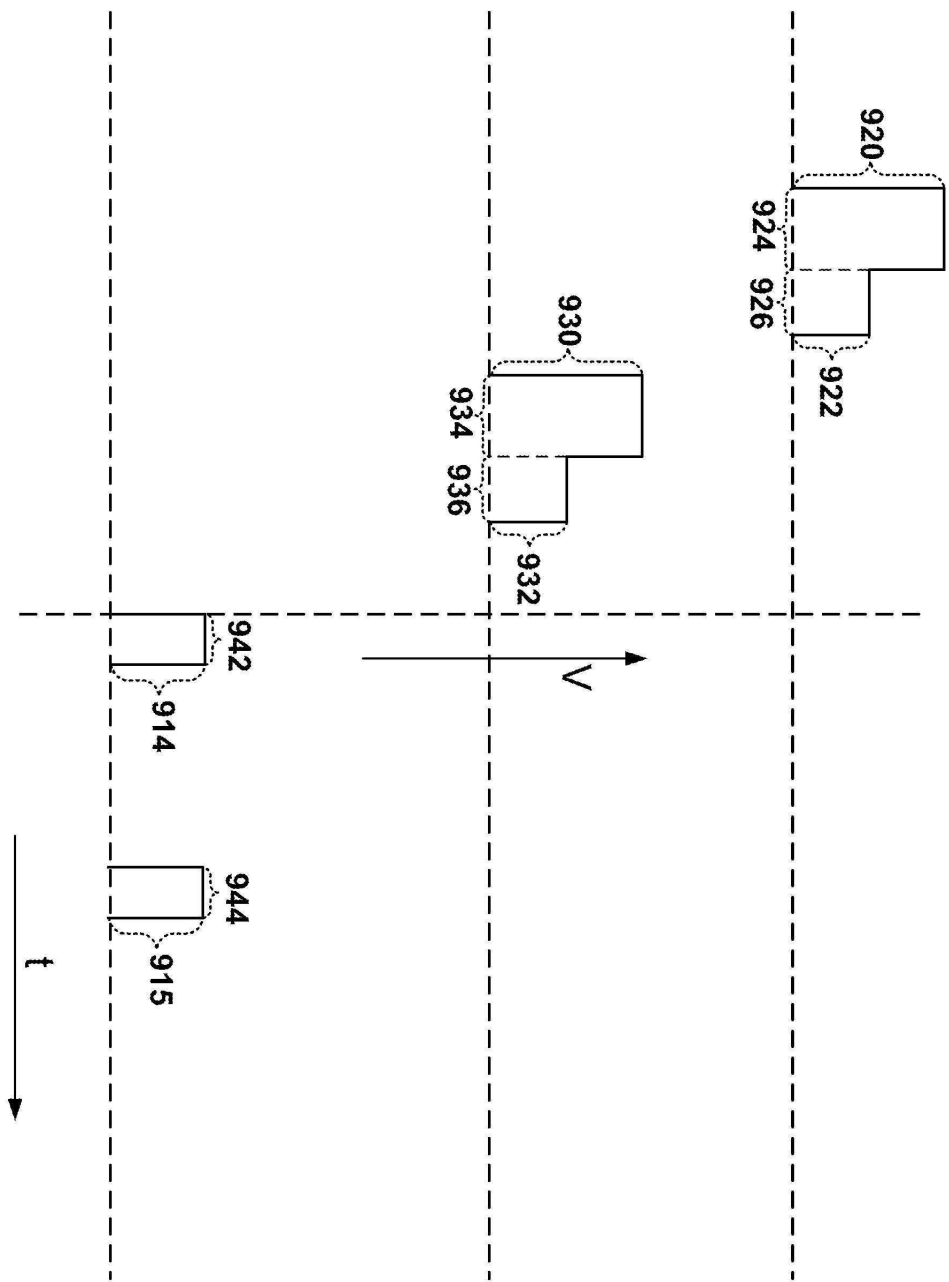
도면13e



도면13f



도면14



도면15

