



(19) 대한민국특허청(KR)
(12) 등록특허공보(B1)

(45) 공고일자 2017년11월23일
 (11) 등록번호 10-1800623
 (24) 등록일자 2017년11월17일

(51) 국제특허분류(Int. Cl.)
 H01J 37/32 (2006.01) G01N 27/06 (2006.01)
 H01J 37/08 (2006.01)
 (52) CPC특허분류
 H01J 37/32917 (2013.01)
 G01N 27/06 (2013.01)
 (21) 출원번호 10-2015-7007516
 (22) 출원일자(국제) 2013년08월26일
 심사청구일자 2016년01월22일
 (85) 번역문제출일자 2015년03월25일
 (65) 공개번호 10-2015-0046275
 (43) 공개일자 2015년04월29일
 (86) 국제출원번호 PCT/US2013/056634
 (87) 국제공개번호 WO 2014/035889
 국제공개일자 2014년03월06일
 (30) 우선권주장
 13/597,093 2012년08월28일 미국(US)
 (56) 선행기술조사문헌
 US20120052599A1*
 (뒷면에 계속)

(73) 특허권자
 어드밴스드 에너지 인더스트리즈 인코포레이티드
 미국 콜로라도 80525 포트 콜린즈 샤프 포인트 드
 라이브 1625
 (72) 발명자
 카터 다니엘
 미국 콜로라도 80525 포트 콜린즈 실크 오크 드라
 이브 1436
 브룩 빅터
 미국 콜로라도 80525 포트 콜린즈 케이프 코드 써
 클 4336
 호프만 다니엘 제이.
 미국 콜로라도 80528 포트 콜린즈 볼드 이글 레인
 3700
 (74) 대리인
 특허법인코리아나

전체 청구항 수 : 총 33 항


심사관 : 김주승

(54) 발명의 명칭 스위칭 모드 이온 에너지 분포 시스템의 고장, 비정상 및 다른 특성들을 모니터링하기 위한 시스템 및 방법

(57) 요약

플라즈마 챔버에 있어서 이온 에너지를 조정하고 기관 지지부에 대해 기관을 적킹하기 위한 시스템, 방법 및 장치가 기재된다. 예시적 방법은, 플라즈마 챔버에 기관을 배치시키는 단계, 상기 플라즈마 챔버에 플라즈마를 형성하는 단계, 기관에 주기 전압 함수(또는 변조된 주기 전압 함수)를 인가하도록 기관에 대한 파워를 제어가능하게 스위칭하는 단계, 및 주기 전압 함수의 다중 사이클에 걸쳐, 시간 평균 방식으로 규정된 이온 에너지 분포를 야기하도록 기관의 표면에서 규정된 이온 에너지 분포에 응답하여 주기 전압 함수를 변조하는 단계를 포함한다.

대표도 - 도12



(52) CPC특허분류

H01J 37/08 (2013.01)

H01J 37/32944 (2013.01)

H01J 37/3299 (2013.01)

(56) 선행기술조사문헌

JP2003133404A*

US6201208B1*

KR1020100034703A

US06201208 B1*

US20120052599 A1*

JP2003133404 A*

*는 심사관에 의하여 인용된 문헌

명세서

청구범위

청구항 1

플라즈마 처리 챔버를 모니터링하기 위한 시스템으로서,

플라즈마를 포함하도록 구성된 플라즈마 처리 챔버;

상기 플라즈마 처리 챔버 내에 위치되고 또한 기관을 지지하도록 배치되는 기관 지지부,

이온-에너지 제어부로서, 기관의 표면에서의 미리 규정된 이온 에너지 분포를 나타내는 적어도 하나의 이온-에너지 분포 설정에 응답하여 적어도 하나의 이온-에너지 제어 신호를 제공하는 이온-에너지 제어부;

상기 기관 지지부 및 상기 이온-에너지 제어부에 결합되는 스위칭-모드 파워 서플라이로서, 기관에 주기 전압 함수로서 파워를 인가하도록 구성되는 하나 이상의 스위칭 부재를 포함하는 스위칭-모드 파워 서플라이;

상기 기관 지지부에 결합되는 이온 전류 보상 부재로서, 변조된 주기 전압 함수를 형성하도록 주기 전압 함수에 이온 보상 전류를 부가하는 이온 전류 보상 부재; 및

상기 기관 지지부에 결합되는 제어부로서, 이온 보상 전류로부터 플라즈마 처리 챔버 내의 이온 전류를 측정하고 이온 전류를 기준 전류 파형과 비교하여 플라즈마 처리 챔버 내부에 프로브(probe) 없이 플라즈마 처리 챔버 내의 플라즈마의 작동 특성을 확인하는 제어부를 포함하는, 시스템.

청구항 2

제1항에 있어서, 상기 제어부는, 변조된 주기 전압 함수와 기준 전압 파형을 비교하는, 시스템.

청구항 3

제2항에 있어서, 상기 제어부는, 플라즈마 처리 챔버 내부에 프로브(probe) 없이 플라즈마 처리 챔버의 작동 특성을 확인하는 시스템.

청구항 4

제2항에 있어서, 상기 제어부는, 플라즈마 처리 챔버 내부에 프로브 없이 플라즈마를 접화하고 유지하도록 구성되는 플라즈마 소스의 작동 특성을 확인하는 시스템.

청구항 5

제1항에 있어서, 상기 제어부는, 추가로 이온 전류에 기초하여 시스 용량을 측정하도록 구성되는, 시스템.

청구항 6

제5항에 있어서, 상기 제어부는, 추가로 디바이 시스(Debye sheath) 거리, 플라즈마 밀도, 플라즈마에서 유효 밀도, 및 플라즈마에서 이온의 이온 에너지로 이루어진 군에서 선택된 플라즈마 파라미터를 측정하도록 구성되는, 시스템.

청구항 7

플라즈마 처리 챔버 및 관련 시스템을 모니터링 하기 위한 시스템으로서,

플라즈마 처리 챔버의 기관 지지부에 결합하고 기관 지지부에 변조된 주기 전압 함수를 제공하도록 구성된 전기적 노드로서, 상기 변조된 주기 전압 함수는 이온 보상 전류에 의해 변조된 주기 전압 함수를 포함하는 전기적 노드;

전기적 노드에 주기 전압 함수를 제공하도록 구성된 스위칭 모드 파워 서플라이;

전기적 노드에 이온 보상 전류를 제공하도록 구성된 이온 전류 보상 부재;

전기적 노드에서 2회 이상 전압을 샘플링하고, 전기적 노드에서 샘플링된 전압을 기초로 플라즈마 처리 챔버 내의 이온 전류를 확인하도록 구성된 제어부를 포함하고,

상기 제어부는, 이온 전류를 기준 전류 파형과 비교하여 플라즈마 처리 챔버 내부에 프로브 없이 플라즈마 처리 챔버 내의 플라즈마의 작동 특성을 확인하도록 구성되는, 시스템.

청구항 8

제7항에 있어서, 변조된 주기 전압 함수의 연속 사이클들은 실질적으로 동일한, 시스템.

청구항 9

제8항에 있어서, 변조된 주기 전압 함수가 펄스들 및 펄스들 사이에서의 부분을 포함하고, 전압 스텝, ΔV 가 플라즈마 처리 챔버에서의 이온 에너지에 대응하며, 펄스 사이에서의 부분의 기울기가 플라즈마 내에서 이온의 이온 에너지 분포 함수에 대응하는, 시스템.

청구항 10

제8항에 있어서, 상기 제어부는, 펄스들 및 펄스들 사이에서의 부분을 분리할 수 있는 샘플링 속도에서 샘플링하도록 구성되는, 시스템.

청구항 11

제10항에 있어서, 상기 샘플링은 400 kHz보다 높게 수행되는, 시스템.

청구항 12

제9항에 있어서, 상기 제어부는 펄스들 사이에서의 일부분의 기울기를 측정하는, 시스템.

청구항 13

제12항에 있어서, 상기 제어부는 기울기의 표준 편차를 측정하는, 시스템.

청구항 14

제9항에 있어서, 상기 제어부는, 변조된 주기 전압 함수의 각 사이클에 대한 전압 스텝(ΔV)을 측정하는 시스템.

청구항 15

플라즈마 처리 챔버 및 관련 시스템을 모니터링하기 위한 방법으로서,

플라즈마 처리 챔버의 기판 지지부에 변조된 주기 전압 함수를 제공하는 단계;

전압 데이터를 생성하도록 적어도 일부의 변조된 주기 전압 함수를 샘플링하는 단계;

전압 데이터와 적어도 일부의 기준 파형을 비교하는 단계; 및

상기 비교를 기초로, 플라즈마 처리 챔버 내부에 프로브 없이 플라즈마 처리 챔버 내의 플라즈마를 특정하기 위하여 기준 파형의 적어도 일부분과 전압 데이터 사이의 적어도 하나의 차이를 확인하는 단계를 포함하는, 방법.

청구항 16

제15항에 있어서,

전류 데이터를 생성하도록 적어도 일부의 변조된 주기 전압 함수를 샘플링하는 단계;

전류 데이터와 적어도 일부의 기준 파형을 비교하는 단계; 및

상기 비교를 기초로, 플라즈마 처리 챔버, 플라즈마 소스, 또는 플라즈마 바이어스 파워 서플라이의 작동을 특정함에 있어서 기준 파형의 적어도 일부분과 변조된 주기 전압 함수의 적어도 일부분 사이의 적어도 하나의 차이를 확인하는 단계를 추가로 포함하는, 방법;

청구항 17

제15항에 있어서, 상기 비교 단계는, 제1 주기의 시간에서의 변조된 주기 전압 함수 및 제2 주기의 시간에서의 변조된 주기 전압 함수를 비교하는 것을 포함하는, 방법.

청구항 18

제15항에 있어서, 상기 기준 파형의 부분이 기준 파형의 제2 부분인 방법.

청구항 19

제15항에 있어서, 상기 파형의 부분이 기준 파형의 제4 부분인, 방법.

청구항 20

제19항에 있어서, 상기 비교 단계는, 변조된 주기 전압 함수의 적어도 2개의 사이클 사이에서의 제4 부분의 기울기의 비교를 포함하는, 방법.

청구항 21

제15항에 있어서, 상기 비교 단계는, 시간에 따른 파형에서의 변화를 관찰하는, 방법.

청구항 22

제15항에 있어서, 상기 비교 단계는, 변조된 주기 전압 함수 부분의 표준 편차를 관찰하는, 방법.

청구항 23

제22항에 있어서, 상기 비교 단계는, 소정 사이클에서 편차의 위치를 관찰하는, 방법.

청구항 24

제15항에 있어서, 상기 비교 단계는 전압 스텝(ΔV)을 관찰하는, 방법.

청구항 25

제15항에 있어서, 상기 비교 단계는, 시간의 함수로서 샘플링된 전압을 주파수 영역으로 변환하는 단계를 수반하는, 방법.

청구항 26

제15항에 있어서, 상기 비교 단계는, 변조된 주기적 파형에서 비선형성을 관찰하는, 방법.

청구항 27

제15항에 있어서, 상기 비교 단계는, 이온 보상 전류를 이온 전류로 변환하는 단계 및 시간에 따른 이온 전류를 비교하는 단계를 포함하는, 방법.

청구항 28

제27항에 있어서, 상기 비교 단계는, 처리 파라미터의 함수로서 이온 전류의 변동을 관찰하는, 방법.

청구항 29

제27항에 있어서, 상기 비교 단계는, 이온 전류의 평균에서의 증가를 관찰하는, 방법.

청구항 30

제15항에 있어서, 상기 관련 시스템은, 플라즈마를 점화하고 유지하기 위한 파워를 제공하는 소스 전극 및 전기적 시스템을 포함하는, 방법.

청구항 31

제15항에 있어서, 상기 기준 파형은, 이전의 시간 기간에서 변조된 주기 전압 함수로부터 선택되는, 방법.

청구항 32

제15항에 있어서, 상기 확인 단계는, 플라즈마 처리 챔버 및 관련 시스템의 작동에 있어서 고장 또는 비정상을 특정하기 위하여 수행되는, 방법.

청구항 33

제15항에 있어서, 상기 변조된 주기 전압 함수는,
주기 전압 함수; 및
이온 보상 전류를 포함하는, 방법.

발명의 설명

기술 분야

[0001] 본 발명은 일반적으로 플라즈마 처리에 관한 것이다. 특히, 이에 한정되지 않으나, 본 발명은 플라즈마-기반 에칭, 증착, 및/또는 기타 플라즈마-기반 처리를 위한 방법 및 장치에 관한 것이다.

배경 기술

[0002] 많은 형태의 반도체 장치는 플라즈마-기반 에칭 기술을 사용하여 제조된다. 에칭되는 도체인 경우, 기판 도체의 표면에 걸쳐 실질적으로 균일한 음(negative) 전압을 생성하도록 그라운드에 대한 음 전압이 도전성 기판에 인가될 수 있으며, 이는 양(positive)으로 대전된 이온을 도체를 향해 흡인하고, 그에 따라 도체에 충돌하는 양 이온은 실질적으로 동일한 에너지를 갖는다.

[0003] 그러나, 기판이 유전체인 경우, 기판의 표면에 걸쳐 전압을 놓이게 하기 위해 불변 전압은 비효과적이다. 그러나, AC 전계가 기판에 표면상에 전압을 유지하도록 AC 전압(예컨대, 고주파)이 도전성 플레이트(또는 척)에 인가될 수 있다. AC 사이클의 양의 반 사이클 동안, 기판은 양 이온의 질량에 비해 가벼운 전자를 흡인하며; 이에 따라 많은 전자가 사이클의 양의 반 사이클 부분 동안 기판의 표면에 흡인된다. 따라서, 기판의 표면은 음으로 대전되며, 이는 음으로 대전된 표면을 향해 이온이 흡인되도록 한다. 이온이 기판의 표면에 충돌할 때, 그 충돌은 기판의 표면으로부터 물질을 벗어나게 하며, 이는 에칭에 영향을 미친다.

발명의 내용

해결하려는 과제

[0004] 많은 예에서, 좁은 이온 에너지 분포를 갖는 것이 바람직하지만, 기판에 정현파를 인가하는 것은 넓은 분포의 이온 에너지를 유지하며, 이는 소망 에칭 프로파일을 행하기 위한 플라즈마 공정의 성능을 제한한다. 좁은 이온 에너지 분포를 달성하기 위한 공지 기술은 고가이고, 비효율적이며, 제어하기가 어려우며, 이는 플라즈마 밀도에 악 영향을 줄 수 있다. 따라서, 이들 공지 기술은 상업적으로 채용되지 않고 있다. 이에 따라, 현재 기술의 단점을 보완하고 다른 새롭고 혁신적인 특징을 제공할 필요가 있다.

과제의 해결 수단

[0005] 도면에 도시된 본 발명의 예시적 실시예는 다음과 같이 요약된다. 이들 및 다른 실시예는 상세한 설명란에서 보다 완전히 기술된다. 그러나, 본 발명이 발명의 개요 또는 상세한 설명란에 기술된 형태로 제한된다는 뜻은 아님을 이해하여야 할 것이다. 당업자라면 본 청구범위에 나타낸 발명의 정신 및 범주 안에 있는 많은 변형, 균등 및 대체 구성을 인식할 수 있을 것이다.

[0006] 일 실시예에 의하면, 본 발명은 하나 이상의 플라즈마 시스 전압을 구현하기 위한 방법으로 특정될 수 있다. 상기 방법은 변조된 주기 전압 함수를 플라즈마 챔버의 기판 지지부에 제공하는 것을 포함한다. 상기 기판 지지부는 플라즈마에서 처리를 위해 구성되는 기판에 결합될 수 있다. 또한, 상기 변조된 주기 전압 함수는 이온 전류 보상 I_c 에 의해 변조된 주기 전압 함수를 포함할 수 있다. 상기 변조된 주기 전압 함수는 펄스들 및 펄스들 사이의 부분들을 포함할 수 있다. 또한, 상기 펄스는 주기 전압 함수의 함수일 수 있고, 펄스 사이에서의 부분

의 기울기는 이온 전류 보상, I_c 의 함수일 수 있다. 상기 방법은 적어도 기관 지지부의 용량을 나타내는 유효 용량 값, C_1 에 접근하는 것을 추가로 포함할 수 있다. 상기 방법은 기관의 표면에 도달하는 이온의 규정된 이온 에너지 분포 함수를 야기하는 이온 전류 보상, I_c 의 값을 최종적으로 확인할 수 있으며, 상기 확인은 펄스 사이에서의 부분의 기울기, dV_0/dt , 유효 용량, C_1 의 함수이다.

[0007] 다른 실시예에 따르면, 본 발명은 플라즈마 처리 챔버 내의 기관의 표면에 규정된 이온 에너지를 달성하도록 플라즈마를 바이어스 하기 위한 방법으로 기술될 수 있다. 상기 방법은 기관 지지부에 이온 전류 보상에 의해 변조된 주기 전압 함수를 포함하는 변조된 주기 전압 함수를 인가하는 것을 포함할 수 있다. 상기 방법은 전압 데이터 포인트를 생성하도록 변조된 주기 전압 함수의 적어도 하나의 사이클을 샘플링하는 것을 추가로 포함할 수 있다. 상기 방법은 전압 데이터 포인트로부터 기관 표면에서 제1 이온 에너지의 값을 평가하는 것을 추가로 포함할 수 있다. 또한, 상기 방법은 제1 이온 에너지가 규정된 이온 에너지와 동일할 때까지 상기 변조된 주기 전압 함수를 조정하는 것을 포함할 수 있다.

[0008] 다른 실시예에 따르면, 본 발명은 이온 에너지 분포 함수 폭을 얻기 위한 방법으로 특정될 수 있다. 상기 방법은 플라즈마 처리 챔버의 기관 지지부에 변조된 주기 전압 함수를 제공하는 것을 포함할 수 있다. 상기 방법은 제1 시간 및 제2 시간에서 비-정현파로부터 적어도 2개의 전압을 샘플링하는 것을 추가로 포함할 수 있다. 상기 방법은 dV/dt 로서 적어도 2개의 전압의 기울기를 계산하는 것을 부가적으로 포함할 수 있다. 또한, 상기 방법은 상기 기울기를 이온 에너지 분포 함수 폭에 대응하는 것으로 알려진 기준 기울기와 비교하는 것을 포함할 수 있다. 최종적으로, 상기 방법은 상기 기울기가 기준 기울기에 접근하도록 상기 변조된 주기 전압 함수를 조정하는 것을 포함할 수 있다.

[0009] 본 발명의 다른 양상은 파워 서플라이, 이온 전류 보상 부재, 및 제어부를 포함하는 기구로서 특정될 수 있다. 상기 파워 서플라이는 펄스들 및 펄스들 사이에서의 부분을 갖는 주기 전압 함수를 제공할 수 있다. 상기 이온 전류 보상 부재는 변조된 주기 전압 함수를 형성하도록 펄스 사이에서의 부분의 기울기를 변조할 수 있다. 상기 변조된 주기 전압 함수는 플라즈마 처리 챔버 내에서 처리하기 위하여 기관 지지부에 제공하도록 구성될 수 있다. 상기 제어부는 스위칭 모드 파워 서플라이 및 이온 전류 보상 부재에 결합될 수 있다. 또한, 상기 제어부는 기관 지지부에 제공되는 경우 기관의 표면에 도달하는 이온의 규정된 이온 에너지 분포 함수를 제공하게 되는 이온 전류 보상의 값을 확인하도록 구성될 수 있다.

[0010] 본 발명의 다른 양상은 기관을 처리하도록 구성된 플라즈마의 이온 전류를 모니터링하기 위한 방법을 수행하기 위하여, 프로세서 판독가능한 명령으로 암호화된, 비-일시적, 유형의(tangible) 컴퓨터 판독가능한 저장 매체로서 특정될 수 있다. 상기 방법은 제1 값을 갖는 이온 전류 보상이 주어지면 변조된 주기 전압 함수를 샘플링하고, 제2 값을 갖는 이온 전류 보상이 주어지면 변조된 주기 전압 함수를 샘플링하는 것을 포함할 수 있다. 상기 방법은 상기 제1 및 제2 샘플링을 기초로 시간의 함수로서 상기 변조된 주기 전압 함수의 기울기를 측정하는 것을 추가로 포함할 수 있다. 상기 방법은 또한 제1 및 제2 샘플링을 기초로 시간의 함수로서 상기 변조된 주기 전압 함수의 기울기를 측정한다. 상기 방법은 최종적으로 변조된 주기 전압 함수의 적어도 하나의 사이클이 존재하게 되는 기관 상에서의 일정한 전압에서, 기울기를 기초로, 이온 전류 보상의 제3 값을 계산하는 것을 포함할 수 있다.

[0011] 이들 및 다른 실시예는 후에 상세히 기술된다.

도면의 간단한 설명

[0012] 본 발명의 각종 목적과 이점 및 더욱 완전한 이해를 위해 첨부 도면을 참조하여 발명의 상세한 설명 및 특허청구범위와 관련하여 이하에 상세히 설명한다.

도 1은 본 발명의 일 구체예에 따른 플라즈마 처리 시스템의 블록도를 도시한다.

도 2는 도 1에 도시된 스위칭 모드 파워 시스템의 예시적 실시예를 도시한 블록도이다.

도 3은 도 2를 참조하여 기술된 스위칭 모드 바이어스 서플라이를 실현하도록 이용될 수 있는 부재의 개략도이다.

도 4는 두 개의 구동 신호 파형을 도시한 타이밍도이다.

도 5는 특정 이온 에너지에 집중되는 이온 에너지 분포를 야기하는 스위칭 모드 바이어스 서플라이의 단일 동작 모드의 그래프도이다.

- 도 6은 이온 에너지 분포에서 두 개의 별도의 피크가 생성되는 이중 모드 방식의 동작 모드를 도시한 그래프이다.
- 도 7a 및 7b는 플라즈마에서 행해지는 실제의 직접 이온 에너지 측정을 도시한 그래프이다.
- 도 8은 본 발명의 다른 실시예를 도시한 블록도이다.
- 도 9a는 정현파 변조 함수에 의해 변조되는 예시적 주기적 함수를 도시한 그래프이다.
- 도 9b는 도 9a에 도시된 주기 전압 함수의 일부의 분해도이다.
- 도 9c는 시간 평균 방식으로, 주기 전압 함수의 정현파 변조로부터 비롯되는 결과적 이온 에너지 분포를 도시한다.
- 도 9d는 주기 전압 함수가 정현파 변조 함수에 의해 변조될 때 결과적인, 시간 평균화된 IEDF의 플라즈마에서 행해지는 실제의 직접 이온 에너지 측정을 도시한다.
- 도 10a는 주기 전압 함수가 톱니파 변조 함수에 의해 변조되는 것을 도시한다.
- 도 10b는 도 10a에 도시된 주기 전압 함수의 일부의 분해도이다.
- 도 10c는 시간 평균 방식으로, 도 10a 및 도 10b에 있어서의 주기 전압 함수의 정현파 변조로부터 비롯되는 결과적 이온 에너지 분포를 도시한 그래프이다.
- 도 11은 우측에 IEDF 함수를 나타내고, 좌측에 관련된 변조 함수를 나타낸 그래프이다.
- 도 12는 이온 전류 보상 부재가 플라즈마 챔버에서 이온 전류를 보상하는 실시예를 도시한 블록도이다.
- 도 13은 예시적 이온 전류 보상 부재를 도시한 블록도이다.
- 도 14는 도 13에 도시된 노드 V_0 에서의 예시적 전압을 도시한 그래프이다.
- 도 15-15c는 보상 전류에 응답하여 기관 또는 웨이퍼의 표면에 나타나는 전압 파형이다.
- 도 16은 도 13을 참조하여 기술된 전류원을 실현하기 위해 구현될 수 있는 전류원의 예시적 실시예이다.
- 도 17a 및 17b는 본 발명의 다른 실시예를 도시한 블록도이다.
- 도 18은 본 발명의 또 다른 실시예를 도시한 블록도이다.
- 도 19는 본 발명의 또 다른 실시예를 도시한 블록도이다.
- 도 20은 도 1-19를 참조하여 기술된 실시예와 관련하여 이용될 수 있는 입력 파라미터 및 제어 출력의 블록도이다.
- 도 21은 본 발명의 또 다른 실시예를 도시한 블록도이다.
- 도 22는 본 발명의 또 다른 실시예를 도시한 블록도이다.
- 도 23은 본 발명의 또 다른 실시예를 도시한 블록도이다.
- 도 24는 본 발명의 또 다른 실시예를 도시한 블록도이다.
- 도 25는 본 발명의 또 다른 실시예를 도시한 블록도이다.
- 도 26은 본 발명의 또 다른 실시예를 도시한 블록도이다.
- 도 27은 본 발명의 또 다른 실시예를 도시한 블록도이다.
- 도 28은 본 발명의 일 실시예에 따른 방법을 도시한다.
- 도 29는 본 발명의 일 실시예에 따른 다른 방법을 도시한다.
- 도 30은 기관의 표면에 충돌하는 이온의 이온 에너지 분포를 제어하는 방법의 일 실시예를 도시한다.
- 도 31은 IEDF 및 이온 에너지를 설정하기 위한 방법을 도시한다.
- 도 32는 본 발명의 일 실시예에 따른 기관 지지부에 전달되는 2개의 변조된 주기 전압 함수 파형을 도시한다.

- 도 33은 플라즈마 밀도에서의 플라즈마 소스 불안정성 또는 변화를 나타낼 수 있는 이온 전류 파형을 도시한다.
- 도 34는 비-사이클릭 형상을 갖는 변조된 주기 전압 함수 파형의 이온 전류, I_1 을 도시한다.
- 도 35는 바이어스 서플라이 내에서 고장을 나타낼 수 있는 변조된 주기 전압 함수 파형을 도시한다.
- 도 36은 시스템 용량 내에서 동적 변화를 나타낼 수 있는 변조된 주기 전압 함수 파형을 도시한다.
- 도 37은 플라즈마 밀도의 변화를 나타낼 수 있는 변조된 주기 전압 함수 파형을 도시한다.
- 도 38은 이온 전류에서의 드리프트가 시스템 드리프트를 나타낼 수 있는 다른 프로세스 실행(process runs)에 대한 이온 전류의 샘플링을 도시한다.
- 도 39는 다른 처리 파라미터에 대한 이온 전류의 샘플링을 도시한다.
- 도 40은 챔버 내에서 플라즈마 없이 변조된 2개의 바이어스 파형을 도시한다.
- 도 41은 플라즈마 처리를 확인하기 위해 사용될 수 있는 2개의 바이어스 파형을 도시한다.
- 도 42는 파워 서플라이 전압 및 이온 에너지 사이의 관계를 나타내는 파워 서플라이 전압 및 이온 에너지 플롯의 수를 도시한다.
- 도 43은 기관 표면에 충돌하는 이온의 이온 에너지 분포를 제어하는 방법의 일 실시예를 도시한다.
- 도 44는 본 발명에 도시된 시스템에서 다른 지점에서의 다양한 파형을 도시한다.
- 도 45는 이온 전류 I_1 에 매칭하기 위한 이온 전류 보상, I_c 에서의 최종 증분 변화가 생기는 효과를 도시한다.
- 도 46은 이온 에너지의 선택을 도시한다.
- 도 47은 이온 에너지 분포 함수 폭의 선택 및 확장을 도시한다.
- 도 48은 각각의 이온 에너지 레벨이 좁은 IEDF 폭을 갖는 하나 이상의 이온 에너지 레벨을 얻기 위해 사용될 수 있는 파워 서플라이 전압, V_{ps} 의 하나의 패턴을 도시한다.
- 도 49는 각각의 이온 에너지 레벨이 좁은 IEDF 폭을 갖는 하나 이상의 이온 에너지 레벨을 얻기 위해 사용될 수 있는 파워 서플라이 전압, V_{ps} 의 다른 패턴을 도시한다.
- 도 50은 규정된 IEDF를 생성하도록 사용될 수 있는 파워 서플라이 전압, V_{ps} , 및 이온 전류 보상, I_c 의 하나의 조합을 도시한다.

발명을 실시하기 위한 구체적인 내용

- [0013] 플라즈마 처리 시스템의 예시적인 실시예를 일반적으로 도 1에 도시하였다. 도시된 바와 같이, 플라즈마 파워 서플라이(102)가 플라즈마 처리 챔버(104)에 결합되고 스위칭 모드 파워 서플라이(106)가 지지부(108)에 결합되며 그 위의 기관(110)이 챔버(104) 내에 놓인다. 또한, 스위칭 모드 파워 서플라이(106)에 결합된 제어부(112)가 도시되어 있다.
- [0014] 이 예시적 실시예에 있어서, 플라즈마 처리 챔버(104)는, (예컨대, (도시되지 않은) 펌프 또는 펌프에 의해 진공처리된 진공 인클로저를 포함하는)) 실질적으로 통상적인 구조의 챔버에 의해 실현될 수 있다. 또한, 당업자는, 챔버(104)에서의 플라즈마 동작이, 리액터에 있어서 플라즈마(114)를 점화하고 유지하도록 자기 코일과 안테나를 포함하는 예컨대, 헬리콘형 플라즈마 소스를 포함하는 다양한 소스의 하나로 될 수 있고, 챔버(104) 내로 가스의 도입을 위해 가스 유입구가 제공될 수 있음을 이해할 것이다.
- [0015] 도시된 바와 같이, 예시적 플라즈마 챔버(104)는 기관(110)의 에너지 이온 충돌을 이용한 재료의 플라즈마 기반 에칭 및 다른 플라즈마 처리(예컨대, 플라즈마 증착 및 플라즈마 기반 이온 착상)을 행하도록 배치되고 구성된다. 이 실시예의 플라즈마 파워 서플라이(102)는 플라즈마(114)를 점화하고 유지하도록 챔버(104)에 대해 하나 이상의 주파수(예컨대, 13.56 MHz)로 (도시되지 않은) 매칭 네트워크를 통해 파워(예컨대, RF 파워)를 인가하도록 구성된다. 본 발명은 챔버(104)에 파워를 결합하기 위해 임의의 특정 형태의 플라즈마 파워 서플라이(102)에 한정되지 않으며, 다양한 주파수 및 파워 레벨이 플라즈마(114)에 용량적으로 또는 유도적으로 결합될 수 있음을 이해해야 할 것이다.

- [0016] 도시된 바와 같이, 처리될 유전체 기관(110)(예컨대, 반도체 웨이퍼)은 (예컨대, 반도체 웨이퍼 처리를 위해) 통상적인 웨이퍼 척의 일부를 포함할 수 있는 지지부(108)에 의해 적어도 부분적으로 지지된다. 지지부(108)는, 이 지지부(108)와 기관(110) 사이에 절연층을 갖도록 형성될 수 있으며 이때 상기 기관(110)은 플랫폼에 용량적으로 결합될 수 있으나 지지부(108)와 상이한 전압으로 플로팅될 수도 있다.
- [0017] 상기에 기술된 바와 같이, 기관(110) 및 지지부(108)가 도체인 경우, 지지부(108)에 불변(non-varying) 전압을 인가할 수 있으며, 기관(110)을 통한 전기적 도통에 따라, 지지부(108)에 인가되는 전압 역시 기관(110)의 표면에 인가된다.
- [0018] 그러나, 기관(110)이 유전체인 경우, 지지부(108)에 대한 불변 전압의 인가는 기관(110)의 처리된 표면에 걸쳐 전압을 인가하는 것이 비효과적이다. 따라서, 기관(110)의 예칭 및/또는 증착, 및/또는 기타 플라즈마-기반 처리를 행하기 위해 기관(110)과 충돌하도록 플라즈마(114)에 있어서의 이온을 흡인할 수 있는 기관(110)의 표면에 전압을 생성시키기 위해 스위칭 모드 파워 서플라이(106)가 제어되도록 구성된다.
- [0019] 또한, 후술되는 바와 같이, 플라즈마 파워 서플라이(102)에 의해 (플라즈마 114에) 인가되는 파워와 스위칭 모드 파워 서플라이(106)에 의해 기관(110)에 인가되는 파워 사이에 소량의 상호작용이 존재하도록, 스위칭 모드 파워 서플라이(106)의 실시예가 작동하도록 구성된다. 예컨대, 플라즈마(114)의 밀도에 실질적으로 영향을 미치지 않고 이온 에너지의 제어가 가능하도록 스위칭 모드 파워 서플라이(106)에 의해 인가되는 파워를 제어할 수 있다.
- [0020] 또한, 도 1에 도시된 예시적 스위칭 모드 서플라이(106)의 많은 실시예는 비교적 단순한 제어 알고리즘에 의해 제어될 수 있는 비교적 저렴한 부품으로 실현된다. 또한, 종래 접근 방법에 비해, 스위칭 모드 파워 서플라이(106)의 많은 실시예는 매우 효율적이며; 이에 따라 파잉 열 에너지를 제거하여 관련된 에너지 비용 및 고가의 재료를 감소시킨다.
- [0021] 유전체 기관에 전압을 인가하기 위한 하나의 공지 기술은, 기관의 표면에 전압을 유기하는 기관 지지부에 파워를 인가하기 위해 복잡한 제어 구조와 관련한 고 출력 선형 증폭기를 이용하는 것이다. 그러나, 이 기술은 상업적 측면에서 채용되지 않고 있는데 그 이유는 이 기술이 비용 면에서 효과적이지 않고 충분히 다를 수도 없기 때문이다. 특히, 이용되는 선형 증폭기는 일반적으로 크고, 매우 비싸고, 비효율적이며, 제어하기가 어렵다. 또한, 선형 증폭기는 원래 AC 커플링(예컨대, 블로킹 커패시터)을 필요로 하고, 척킹과 같은 보조 기능이 척에 의해 소스에 대한 시스템의 AC 스펙트럼 순도를 훼손하는 병렬 급송 회로로 달성된다.
- [0022] 고려되고 있는 다른 기술은 기관에 (하나 이상의 선형 증폭기로) 고주파 파워를 인가하는 것이다. 그러나, 이 기술은, 기관에 인가되는 고주파 파워가 플라즈마의 밀도에 영향을 미치기 때문에 플라즈마 밀도에 악영향을 주는 것으로 밝혀졌다.
- [0023] 어떤 실시예에 있어서, 도 1에 도시된 스위칭 모드 파워 서플라이(106)는 벡(buck), 부스트(boost), 및/또는 벡-부스트형 파워 기술에 의해 실현될 수 있다. 이들 실시예에 있어서, 스위칭 모드 파워 서플라이(106)는 기관(110)의 표면에 전위를 유기하도록 펄스형 파워의 레벨을 가변시킴으로써 제어될 수 있다.
- [0024] 다른 실시예에 있어서, 스위칭 모드 파워 서플라이(106)는 다른 복잡한 스위칭 모드 파워 및 제어 기술에 의해 실현된다. 다음, 도 2를 참조하면, 예컨대, 도 1을 참조하여 기술된 스위칭 모드 파워 서플라이(106)는 기관(110)에 충돌하는 이온의 하나 이상의 소망 에너지를 생성시키기 위해 기관(110)에 파워를 인가하도록 이용되는 스위칭 모드 바이어스 서플라이(206)에 의해 실현된다. 또한, 이온 에너지 제어 부재(220), 아크 검출 부재(222), 및 스위칭 모드 파워 서플라이(206)와 파형 메모리(224) 모두에 결합된 제어부(212)가 도시되어 있다.
- [0025] 이들 부재의 도시된 구성은 논리적인 것이며, 이에 따라 그 부재는 실제 실행에서는 결합 또는 더 분리될 수 있고, 또한 그 부재는 시스템의 기본 동작을 변경하지 않고 다양한 방법으로 연결될 수 있다. 예컨대, 어떤 실시예에서, 하드웨어, 소프트웨어, 또는 이들의 결합에 의해 실현될 수 있는 제어부(212)는 파워 서플라이(202) 및 스위칭 모드 바이어스 서플라이(206) 모두를 제어하도록 이용될 수 있다. 그러나, 다른 실시예에서, 파워 서플라이(202) 및 스위칭 모드 바이어스 서플라이(206)는 완전하게 분리된 기능적 단위로 실현된다. 다른 실시예에서, 파형 메모리(224), 이온 에너지 제어부(220) 및 스위칭 모드 바이어스 서플라이(206)는 (예컨대, 공통 하우징에 놓이는) 단일 부품으로 통합될 수 있고 또는 개별 부품 중에 분산될 수도 있다.
- [0026] 이 실시예의 스위칭 모드 바이어스 서플라이(206)는, 기관의 표면에 충돌하는 이온의 에너지의 소망(또는 규정된) 분포를 야기하도록 제어가능한 상태로 지지부(208)에 전압을 인가하기 위해 일반적으로 구성된다. 보다 구

체적으로, 스위칭 모드 바이어스 서플라이(206)는, 특정 파워 레벨로 하나 이상의 특정 파형을 기관에 인가함으로써 소망(또는 규정된) 이온 에너지 분포를 생성하도록 구성된다. 특히, 이온 에너지 제어부(220)로부터의 입력에 응답하여, 스위칭 모드 바이어스 서플라이(206)는 특정 이온 에너지를 생성하도록 특정 파워 레벨을 인가하고, 파형 메모리(224)에 있어서 파형 데이터에 의해 규정된 하나 이상의 전압 파형을 사용하여 특정 파워 레벨을 인가한다. 따라서, 기관의 제어된 에칭(또는 다른 형태의 플라즈마 처리)를 행하기 위해 하나 이상의 특정 이온 충돌 에너지가 이온 제어부에 의해 선택될 수 있다.

[0027] 도시된 바와 같이, 스위칭 모드 파워 서플라이(206)는, 대응하는 구동 부재(228', 228")로부터의 구동 신호에 응답하여 기관(210)의 지지부(208)에 대한 파워를 스위칭하기에 적합한 스위칭 부재(226', 226")(예컨대, 고풍력 전계 효과 트랜지스터)을 포함한다. 구동 부재(228', 228")에 의해 발생하는 구동 신호(230', 230")은 파형 메모리(224)의 콘텐츠에 의해 규정되는 타이밍에 기초하여 제어부(212)에 의해 제어된다. 예컨대, 많은 실시예에 있어서의 제어부(212)는 파형 메모리(224)의 콘텐츠를 해석하기에 적합하며 스위칭 부재(226', 226")에 대한 구동 신호(230', 230")를 제어하도록 구동 부재(228', 228")에 의해 이용되는 구동 제어 신호(232', 232")를 발생한다. 비록 하프 브리지 구성으로 배치될 수 있는 두 개의 스위칭 부재(226', 226")만 예시적 목적을 위해 도시되었으나, 보다 적거나 부가적인 스위칭 부재가 다양한 아키텍처(예컨대, H 브리지 구성)로 구현될 수 있을 것으로 생각된다.

[0028] 많은 작동 모드에 있어서, (예컨대, 파형 데이터를 사용하여) 제어부(212)는 기관(210)의 지지부(208)에서 소망 파형을 생성하도록 구동 제어 신호(232', 232")의 타이밍을 변조한다. 또한, 스위칭 모드 바이어스 서플라이(206)는, DC 신호 또는 시간에 따라 변하는 파형으로 될 수 있는 이온 에너지 제어 신호(234)에 기초하여 기관(210)에 파워를 공급하기에 적합하다. 이에 따라, 본 실시예는, 스위칭 부재에 대한 타이밍 신호를 제어하고 스위칭 부재(226', 226")에 의해 인가되는 (이온 에너지 제어부 220에 의해 제어되는) 파워를 제어함으로써 이온 분포 에너지의 제어를 가능케 한다.

[0029] 또한, 이 실시예의 제어부(212)는, 아크 검출 부재(222)에 의해 검출되는 플라즈마 챔버(204)에 있어서의 아크에 응답하여, 아크 처리 기능을 행하도록 구성된다. 어떤 실시예에서, 아크의 검출 시, 제어부(212)는, 스위칭 모드 바이어스 서플라이(206)의 출력(236)에서 인가되는 파형이 플라즈마(214)에 있어서의 아크를 소멸시키도록 구동 제어 신호(232', 232")를 변경한다. 다른 실시예에서, 제어부(212)는, 스위칭 모드 바이어스 서플라이(206)의 출력(236)에서 인가되는 파워가 중단되도록 구동 제어 신호(232', 232")의 인가를 간단히 중단함으로써 아크를 소멸시킨다.

[0030] 도 3을 참조하면, 도 2를 참조하여 기술된 스위칭 모드 바이어스 서플라이(206)를 실현하도록 이용될 수 있는 부재의 개략도이다. 도시된 바와 같이, 이 실시예의 스위칭 부재 T1 및 T2는 하프 브리지(또는 토탈 풀이라고도 지칭)형 구성으로 배치된다. 집합적으로, R2, R3, C1 및 C2는 플라즈마 부하를 나타내고, C10은 유효 용량(직렬 용량 또는 척 용량으로도 지칭됨)이며, C3는 정전 척(도시되지 않은)의 전압으로부터 또는 기관의 표면에 유기되는 전압으로부터 DC 전류가 회로를 통해 흐르는 것을 방지하기 위한 선택적인 물리적 커패시터이다. C10은 유효 용량으로 지칭되는데, 그 이유는 기관 지지부의 직렬 용량(또는 척 용량으로도 지칭됨) 및 정전 척(또는 e-척킹) 뿐만 아니라 절연체 및 기관과 같은 바이어스의 적용에 따른 다른 용량을 포함하기 때문이다. 도시된 바와 같이, L1은 스트레이 인덕턴스(예컨대, 부하에 파워를 공급하는 도체의 자연 인덕턴스)이다. 또한, 이 실시예에서, 3개의 입력, 즉, Vbus, V2 및 V4가 있다.

[0031] V2 및 V4는 구동 신호(예컨대, 도 2를 참조하여 기술된 구동 부재 228', 228")에 의해 출력되는 구동 신호 230', 230")을 나타내고, 이 실시예에서 V2 및 V4는, T1 및 T2의 종료가, 기관 지지부에 인가되는 Vout에서 출력되는 전압의 형상을 제어하도록 변조될 수 있도록 타이밍(예컨대, 펄스 및/또는 상호 지연의 길이)될 수 있다. 많은 구체예에서, 스위칭 부재 T1, T2를 실현하기 위해 사용되는 트랜지스터는 이상적인 스위치가 아니며, 소망의 파형에 달하기 위해서는, 트랜지스터-특정 특성이 고려된다. 많은 동작 모드에 있어서, V2 및 V4의 타이밍을 간단히 변경하여 Vout로 인가되는 소망 파형을 가능케 한다.

[0032] 예컨대, 스위치 T1, T2는, 기관(110, 210)의 표면에서의 전압이 일반적으로 양의 전압 기준에 접근 및/또는 약간 초과하는 주기 전압 펄스를 갖는 음극성으로 되도록 동작될 수 있다. 기관(110, 210)의 표면에서의 전압의 값은, 이온의 에너지를 규정한 것으로, 이는 이온 에너지 분포 함수(IEDF)의 측면에서 특정될 수 있다. 기관(110, 210)의 표면에서 소망 전압을 생성시키기 위해, Vout에서의 펄스는 일반적으로 사각형이며, 소망 전압 및 대응하는 이온 에너지를 달성하기 위해 기관(110, 210)의 표면으로 충분한 전자를 흡입하도록 기관(110, 210)의 표면에서 짧은 양 전압을 유기하기에 충분히 긴 폭을 갖는다.

- [0033] 양의 전압 기준을 약간 초과하거나 및/또는 접근하는 상기 주기 전압 펄스는 스위치 T1, T2의 스위칭 성능에 의해 제한되는 최소 시간을 가질 수 있다. 일반적으로 상기 전압의 음의 부분은 스위치를 손상시키는 수준까지 전압이 형성(build) 되지 않을 정도로 길게 확장할 수 있다. 동시에, 상기 전압의 음의 부분의 길이는 이온 천이(transit) 시간을 초과해야 한다.
- [0034] 이 실시예에서 Vbus는 기판의 표면에서의 전압, 따라서 이온 에너지를 규정하는, Vout에 측정되는 펄스의 진폭을 규정한다. 다시 도 2를 간단히 언급하면, Vbus는 이온 에너지 제어부에 결합될 수 있으며, 이온 에너지 제어부는 DC 신호 또는 시간에 따라 변하는 파형을 Vbus에 인가하기에 적합한 DC 파워 서플라이에 의해 실현될 수 있다.
- [0035] 두 개의 신호 V2, V4의 펄스 폭, 펄스 형상 및/또는 상호 지연은 Vout에서 소망 파형에 달하도록 변조될 수 있고(또한 본원에서 변조된 주기 전압 함수로 지칭됨), Vbus에 인가되는 전압은 펄스의 특성에 영향을 미칠 수 있다. 환언하면, 전압 Vbus는 신호 V2, V4의 펄스 폭, 펄스 형상 및/또는 관련 위상에 영향을 줄 수 있다. 예컨대, 도 4를 간단히 참조하면, 도 4에 도시된 바와 같이 Vout에서 주기 전압 함수를 생성하도록 (V2 및 V4로서) T1 및 T2에 인가될 수 있는 두 개의 구동 신호 파형을 도시한 타이밍도이다. (예컨대, Vout에서 펄스에 대한 최단 시간을 달성하고, 또한 펄스의 피크 치에 달하도록) Vout에서 펄스의 형상을 변조하기 위해, 두 개의 게이트 구동 신호 V2, V4의 타이밍이 제어될 수 있다.
- [0036] 예컨대, 두 개의 게이트 구동 신호 V2, V4는 스위칭 부재 T1 및 T2에 인가될 수 있으며 이에 의해 펄스의 각각이 Vout에서 인가되는 시간이 펄스 간의 시간 T에 비해 짧아질 수 있으나, 기판(110, 210)의 표면으로 전자를 흡입하도록 기판(110, 210)의 표면에 양극성의 전압을 유지하기에는 충분히 길다. 또한, 펄스 간에 게이트 전압 레벨을 변경함으로써, (예컨대, 펄스 간에 기판의 표면에 실질적으로 일정한 전압을 달성하도록) 펄스 간에 Vout에 인가되는 전압의 기울기를 제어할 수 있는 것으로 밝혀졌다. 어떤 동작 모드에 있어서, 게이트 펄스의 반복률은 약 400 kHz이나, 이 비율은 응용 분야에 따라 임의로 변경될 수 있다.
- [0037] 비록 반드시 필요하지는 않지만, 실제로, 실제 실행시의 모델링 및 미세조정에 기초하여, 소망의(또는 규정된) 이온 에너지 분포를 생성하도록 사용될 수 있는 파형이 규정될 수 있으며, 그 파형은 (예컨대, 전압 레벨의 시퀀스로서 도 1을 참고하여 기술된 파형 메모리부에) 저장될 수 있다. 또한, 많은 구체예에서, 상기 파형은 (예컨대, Vout로부터의 피드백 없이) 직접 발생될 수 있으며; 그에 따라, (예컨대, 설정 시간과 같은) 피드백 제어 시스템의 바람직하지 않은 거동을 회피한다.
- [0038] 다시 도 3을 참조하면, Vbus는 이온의 에너지를 제어하기 위해 변조될 수 있고, 저장된 파형은 펄스 폭을 최소화하면서 Vout에서 소망하는 펄스 진폭을 달성하도록 게이트 구동 신호 V2, V4를 제어하기 위해 사용될 수 있다. 다시, 이는 트랜지스터의 특정한 특성에 따라 행해지며, 이는 모델링 또는 실행 및 실증적으로 설정될 수 있다. 예컨대, 도 5를 참조하면, Vbus 대 시간, 기판(110)의 표면에서의 전압 대 시간, 및 대응하는 이온 에너지 분포를 나타낸 그래프가 도시되어 있다.
- [0039] 도 5의 그래프는 특정 이온 에너지에 집중되는 이온 에너지 분포를 야기하는 스위칭 모드 바이어스 서플라이(106, 206)의 단일 모드 동작을 도시한다. 도시된 바와 같이, 이 실시예에서 이온 에너지의 단일 집중을 야기하기 위해, Vbus에서 인가되는 전압은 일정하게 유지되며 그동안에 V2, V4에 인가되는 전압은 (예컨대, 도 3에 도시된 구동 신호를 사용하여) 제어되어 스위칭 모드 바이어스 서플라이(106, 206)에서 펄스를 생성하도록 하며, 이는 도 5에 도시된 대응하는 이온 에너지 분포를 야기한다.
- [0040] 도 5에 도시된 바와 같이, 기판(110, 210) 표면에서의 전위는 기판(110, 210) 표면에 충돌하고 예칭하는 이온을 흡입하도록 일반적으로 음극성을 갖는다. (Vout에 펄스를 인가함으로써) 기판(110, 210)에 인가되는 주기적인 짧은 펄스는 Vbus에 인가되는 전위에 의해 규정되는 크기를 갖고, 이들 펄스는 (예컨대, 양전위 또는 거의 양전위에 가까운) 기판(110, 210)의 전위의 짧은 변화를 야기하며, 이는 기판의 표면에 전자를 흡입하여 기판(110, 210)의 표면을 따라 일반적으로 음극성의 전위를 달성하도록 한다. 도 5에 도시된 바와 같이, Vbus에 인가되는 정전압은 특정 이온 에너지로 이온 플럭스의 단일 집중을 야기하며, 이에 따라, Vbus를 특정 전위로 간단히 설정함으로써 특정 이온 충돌 에너지가 선택될 수 있다. 다른 동작 모드에 있어서, 둘 이상의 별도의 이온 에너지의 집중이 생성될 수도 있다(도 49 참조).
- [0041] 당업자는 파워 서플라이가 스위칭 모드 파워 서플라이로 제한될 필요는 없으며, 파워 서플라이의 출력도 특정 이온 에너지를 야기하기 위해서 제어될 수 있다는 것을 이해할 것이다. 따라서, 파워 서플라이의 출력은, 이온 전류 보상 또는 이온 전류와 조합되지 않는 것을 고려할 때, 스위칭 모드이거나 다른 것이라도, 파워 서플라이

전압, V_{ps} 로도 지칭될 수 있다.

- [0042] 다음, 도 6을 참조하면, 이온 에너지 분포에서 두 개의 별도의 피크가 생성되는 이중 모드 방식의 동작 모드를 도시한 그래프가 도시된다. 도시된 바와 같이, 이 모드에 동작에 있어서, 기관은 두 개의 별도 레벨의 전압 및 주기적 펄스를 나타내며, 그에 따라 두 개의 별도의 이온 에너지의 집중이 생성된다. 도시된 바와 같이, 두 개의 별도의 이온 에너지 집중을 야기하기 위해, V_{bus} 로 인가되는 전압은 두 레벨 간에 교번하며, 각 레벨은 두 이온 에너지 집중의 에너지 레벨을 규정한다.
- [0043] 비록 도 6은 모든 펄스 후에 교번하는 것으로 기관(110, 210)에서의 두 전압을 도시했지만(예컨대, 도 48), 이는 반드시 요구되는 것은 아니다. 예컨대, 다른 동작 모드에서, V_2 및 V_4 로 인가되는 전압은, V_{out} 에 인가되는 전압에 대해 (예컨대, 도 3에 도시된 구동 신호를 사용하여) 스위칭되며, 이에 따라 기관 표면에 유기된 전압이 둘 이상의 펄스 후에 제1 전압으로부터 제2 전압으로(또는 그 반대) 교번하도록 한다(예컨대, 도 49).
- [0044] 종래 기술에 있어서, 다수의 이온 에너지를 생성시키기 위해 (파형 발생기에 의해 발생된) 두 파형의 결합을 선형 증폭기에 인가하고 또한 두 파형의 증폭된 결합을 기관에 인가하는 시도가 행해지고 있다. 그러나, 이 방법은 도 6을 참고하여 기술된 방법보다 매우 복잡하며 고가의 선형 증폭기, 및 파형 발생기를 필요로 한다.
- [0045] 도 7a 및 7b를 참조하면, 각각 V_{bus} 에 인가되는 DC 전압의 단일 에너지 및 듀얼 레벨 레귤레이션에 대응하는 플라즈마에서 행해지는 실제의 직접 이온 에너지 측정을 도시한 그래프이다. 도 7a에 도시된 바와 같이, 이온 에너지 분포는 (예컨대, 도 5에 도시된 바와 같이) V_{bus} 에 대한 불변 전압의 인가에 따라 80 eV 부근에 집중된다. 또한 도 7b에 있어서, 두 개의 분리된 이온 에너지의 집중은, (예컨대, 도 6에 도시된 바와 같이) V_{bus} 의 듀얼 레벨 레귤레이션에 따라 85 eV 및 115 eV 부근에 존재한다.
- [0046] 도 8을 참조하면, 본 발명의 다른 실시예를 나타낸 블록도가 도시된다. 도시된 바와 같이, 스위칭 모드 파워 서플라이(806)는 아크 검출 부재(822)를 통해 제어부(812), 이온 에너지 제어부(820), 및 기관 지지부(808)에 결합된다. 상기 제어부(812), 스위칭 모드 서플라이(806), 및 이온 에너지 제어부(820)는 함께 기관 지지부(808)에 파워를 인가하도록 동작하여, 시간 평균 방식으로, 기관(810)의 표면에 소망(또는 규정된) 이온 에너지 분포를 야기하도록 한다.
- [0047] 예컨대, 도 9a를 참조하면, 주기 전압 함수의 다중 사이클에 걸쳐 약 5 kHz의 정현파 변조 함수에 의해 변조되는 약 400 kHz의 주파수를 갖는 주기 전압 함수가 도시되어 있다. 도 9b는 도 9a에 도시된 주기 전압 함수의 일부의 분해도이고 도 9c는 시간 평균 방식으로, 주기 전압 함수의 정현파 변조로부터 비롯되는 결과적 이온 에너지 분포를 도시한다. 또한, 도 9d는 주기 전압 함수가 정현파 변조 함수에 의해 변조될 때 결과적인, 시간 평균화된 IEDF의 플라즈마에서 행해지는 실제의 직접 이온 에너지 측정을 도시한다. 다시 기술되는 바와 같이, 시간 평균 방식으로 소망의(또는 규정된) 이온 에너지 분포를 달성하는 것은 주기 전압에 인가되는 변조 함수를 간단히 변경함으로써 달성될 수 있다.
- [0048] 다른 예로서 도 10a 및 10b를 참조하면, 400 kHz의 주기 전압 함수가 시간 평균 방식으로 도 10c에 도시된 이온 에너지의 분포에 달하도록 약 5 kHz의 톱니파 변조 함수에 의해 변조된다, 도시된 바와 같이, 도 10과 관련되어 이용되는 주기 전압 함수는, 도 10의 주기 전압 함수가 정현파 함수 대신 톱니파 함수로 변조되는 것을 제외하고, 도 9에 도시된 것과 동일하다.
- [0049] 도 9c 및 10c에 도시된 이온 에너지 분포 함수가 기관(810)의 표면에서 순간적인 이온 에너지 분포를 나타내지 않고, 이온 에너지의 시간 평균을 나타내는 것을 인식해야 한다. 예컨대, 도 9c를 참고하면, 시간상 특정 예에서, 이온 에너지의 분포는 변조 함수의 전체 사이클의 코스에 걸쳐 존재하는 도시된 이온 에너지 분포의 서브셋으로 된다.
- [0050] 또한, 변조 함수는 고정 함수로 될 필요도 없고 고정 주파수로 될 필요도 없다는 것을 인식해야 할 것이다. 예컨대, 어떤 예에서, 시간 평균화된 이온 에너지 분포를 야기하도록 특정 변조 함수의 하나 이상의 사이클을 갖는 주기 전압 함수를 변조한 다음, 다른 시간 평균화된 이온 에너지 분포를 야기하도록 다른 변조 함수의 하나 이상의 사이클을 갖는 주기 전압 함수를 변조하는 것이 바람직할 수 있다. (주기 전압 함수를 변조하는) 이와 같은 변조 함수에 대한 변경은 많은 예에서 유익할 수 있다. 예컨대, 이온 에너지의 특정 분포가 특정 기하학적 구조를 에칭하거나 또는 특정 재료를 통해 에칭할 필요가 있는 경우, 제1 변조 함수가 사용된 다음, 다른 에칭 기하학적 구조를 야기하거나 또는 다른 재료를 통해 에칭하기 위해 다른 변조 함수가 사용될 수 있다.
- [0051] 비슷하게, 주기 전압 함수(예컨대, 도 9a, 9b, 10a 및 10b에서 400 kHz 부재 및 도 4에서 V_{out})는 확실히 고정

될 필요가 없으나(예컨대, 주기 전압 함수의 형상 및 주파수는 가변적이다), 일반적으로 그의 주파수는, 챔버 내의 이온이 기관(810)에 인가되는 전압에 의해 영향을 받도록 챔버 내의 이온의 친이 시간에 의해 설정된다.

- [0052] 다시 도 8을 참조하면, 제어부(812)는, 스위칭 모드 서플라이(806)가 주기 전압 함수를 생성하도록 스위칭 모드 서플라이(806)에 구동 제어 신호(832', 832'')를 제공한다. 스위칭 모드 서플라이(806)는 (예컨대, 도 4에 도시된 주기 전압 함수를 생성하도록) 도 3에 도시된 부재에 의해 실현될 수 있으나, 임의의 다른 스위칭 구성이 이용될 수도 있다.
- [0053] 일반적으로, 이온 에너지 제어부(820)는 (스위칭 모드 파워 서플라이 806와 관련하여 제어부 812에 의해 발생되는) 주기 전압 함수에 변조 함수를 인가하도록 작용한다. 도 8에 도시된 바와 같이, 이온 에너지 제어부(820)는 커스텀 IEDF부(850)와 통신하는 변조 제어부(840), IEDF 함수 메모리(848), 유저 인터페이스(846), 및 파워부(844)를 포함한다. 이들 부재의 도시는 기능적 부재를 나타내기 위한 것으로, 실제로는 공통적이거나 전혀 다른 부재로 이루어질 수도 있다.
- [0054] 이 실시예의 변조 제어부(840)는 일반적으로 변조 함수를 규정하는 데이터에 기초하여 파워부(844)(및 그의 출력 834)를 제어하고, 파워부(844)는 스위칭 모드 서플라이(806)에 의해 발생하는 주기 전압 함수에 인가되는 (변조 제어부 840으로부터의 제어 신호 842에 기초하여) 변조 함수(834)를 발생한다. 이 실시예의 유저 인터페이스(846)는, 사용자가 IEDF 함수 메모리(848)에 저장된 소정의 IEDF 함수를 선택할 수 있도록 구성되거나, 또는 커스텀 IEDF부(850)와 관련하여, 커스텀 IEDF를 규정할 수 있도록 구성된다.
- [0055] 많은 구체예에서, 파워부(844)는 DC 파워 서플라이(예컨대, DC 스위칭 모드 파워 서플라이 또는 선형 증폭기)를 포함하며, 이는 변조 함수(예컨대, 가변 DC 전압)를 스위칭 모드 파워 서플라이(예컨대, 도 3에 도시된 스위칭 모드 파워 서플라이의 Vbus)에 인가한다. 이들 구체예에서, 변조 제어부(840)는, 파워부(844)가 변조 함수에 따르는 전압을 인가하도록, 파워부(844)에 의해 출력되는 전압 레벨을 제어한다.
- [0056] 어떤 구체예에서, IEDF 함수 메모리(848)는 복수의 IEDF 분포 함수의 각각에 대응하는 복수의 데이터 세트를 포함하며, 유저 인터페이스(846)는 사용자가 소망(또는 규정된) IEDF 함수를 선택할 수 있도록 한다. 예컨대, 도 11을 참조하면, 우측에 사용자가 선택할 수 있는 예시적 IEDF 함수가 도시되어 있다. 또한, 좌측에, 대응하는 IEDF를 생성하도록 파워부(844)와 관련하여 변조 제어부(840)가 주기 전압 함수에 인가하는 조합된 변조 함수를 도시한다. 도 11에 도시된 IEDF 함수는 단지 예시적으로 다른 IEDF 함수가 선택적으로 이용될 수 있음을 인식해야 한다.
- [0057] 커스텀 IEDF부(850)는 일반적으로, 유저 인터페이스(846)를 통해, 사용자가 소망(또는 규정된) 이온 에너지 분포 함수를 규정하도록 작용한다. 예컨대, 어떤 구체예에서, 커스텀 IEDF부(850)는, 사용자가, 이온 에너지의 분포를 규정하는 특정 파라미터에 대한 값을 설정하도록 한다.
- [0058] 예컨대, 커스텀 IEDF부(850)는, 이들 에너지 레벨 사이에 IEDF를 규정하는 함수와 관련하여, 하이 레벨(IF-high), 미드 레벨(IF-mid) 및 로우 레벨(IF-low)로 플릭스의 상대 레벨의 측면에서(예컨대, 플릭스의 백분율로 환산하여) IEDF 함수가 규정되도록 할 수 있다. 많은 예에서, IF-high, IF-low만, 이들 레벨 간의 IEDF 함수가 IEDF 함수를 규정하기에 충분하다. 특정 예로서, 사용자는 20% 기여 레벨(전체 IEDF에 대한 기여)로 1200 eV, 이들 두 개의 레벨 간에 정현파 IEDF를 갖는 30% 기여 레벨로 700 eV를 요구할 수 있다.
- [0059] 또한, 커스텀 IEDF부(850)는, 하나 이상의 (예컨대 다수) 에너지 레벨 및 IEDF에 대한 각 에너지 레벨의 대응하는 백분율 기여의 리스트를 갖는 테이블을 사용자가 실장하도록 할 수 있는 것이 고려된다. 또 다른 실시예에서, 유저 인터페이스(846)와 관련한 커스텀 IEDF부(850)는, 사용자가 소망의(또는 규정된) IEDF를 인출할 수 있도록 사용자에게 그래픽 도구를 제공함으로써 사용자가 소망의(또는 규정된) IEDF를 그래프적으로 생성할 수 있도록 하는 것이 고려된다.
- [0060] 또한, IEDF 함수 메모리(848) 및 커스텀 IEDF부(850)는, 사용자가 소정의 IEDF 함수를 선택한 다음 소정의 IEDF 함수로부터 유도되는 커스텀 IEDF 함수를 생성하기 위해 소정의 IEDF 함수를 변경할 수 있도록 상호동작할 수 있다.
- [0061] 일단 IEDF 함수가 규정되면, 변조 제어부(840)는 소망의(또는 규정된) IEDF 함수를 규정하는 데이터를 제어 신호(842)로 바꾸며, 상기 제어 신호는 파워부(844)를 제어하여 파워부(844)가 소망의(또는 규정된) IEDF에 대응하는 변조 함수를 생성하도록 한다. 예컨대, 제어 신호(842)는 파워부(844)가 변조 함수에 의해 규정되는 전압을 출력하도록 파워부(844)를 제어한다.

- [0062] 도 12는 이온 전류 보상 부재(1260)가 플라즈마 챔버(1204)에서 이온 전류를 보상하는 실시예를 도시한 블록도이다. 본 출원인은, 높은 에너지 레벨에서, 챔버 내의 이온 전류의 보다 높은 레벨이 기관의 표면에서 전압에 영향을 미치고, 그에 따라, 이온 에너지 분포 역시 영향을 받는 것을 밝혀내었다. 예컨대, 도 15a-15c를 간단히 참조하면, 전압 파형이 기관(1210)의 표면에 나타날 때의 전압 파형 및 그들과 IEDF의 관계를 도시한다.
- [0063] 보다 구체적으로, 도 15a는 이온 전류(I_i)가 보상 전류(I_c)와 동일할 때 기관(1210)의 표면에서의 주기 전압 함수를 도시하고; 도 15b는 이온 전류(I_i)가 보상 전류(I_c)보다 클 때 기관(1210)의 표면에서의 전압 파형을 도시하고; 도 15c는 이온 전류가 보상 전류(I_c)보다 적을 때 기관의 표면에서의 전압 파형을 도시한다.
- [0064] 도 15a에 도시된 바와 같이, $I_i = I_c$ 일 때의 이온 에너지(1570)의 확산은, 도 15b에 도시된 바와 같이 $I_i > I_c$ 일 때의 이온 에너지의 균일한 확산(1572) 또는 도 15c에 도시된 바와 같이 $I_i < I_c$ 일 때의 이온 에너지의 균일한 확산(1574)에 비해 비교적 좁다. 이에 따라, 이온 전류 보상 부재(1260)는, (예컨대, 이온 전류의 효과를 보상함으로써) 이온 전류가 높을 때 이온 에너지의 좁은 확산을 가능케 하며 또한 (예컨대, 이온 에너지의 확산을 갖는 것이 바람직할 때) 균일한 이온 에너지의 확산 폭(1572, 1574)이 제어되도록 한다.
- [0065] 도 15b에 도시된 바와 같이, ($I_i > I_c$ 일 때) 이온 전류의 보상 없이, 주기 전압 함수의 양극성 부분 간의 기관의 표면에서의 전압은 램프(ramp)형 상태로 덜 음극성으로 되며, 이는 이온 전류의 보다 넓은 확산(1572)을 야기한다. 유사하게, 도 15c에 도시된 바와 같이 이온 전류를 초과하는($I_i < I_c$) 레벨까지 보상 전류의 레벨을 증가시키도록 이온 전류 보상이 이용될 때, 기관의 표면에서의 전압은 주기 전압 함수의 양극성 부분 간에 램프형 상태로 보다 큰 음극성으로 되며, 균일한 이온 전류의 보다 넓은 확산(1574)이 생성된다.
- [0066] 도 12를 참조하면, 이온 전류 보상 부재(1260)는, 스위칭 모드 파워 서플라이(1206) 및 제어부(1212)에 선택적으로 부가될 수 있는 별도의 부가적 부재로서 실현될 수 있다. 다른 실시예에서, (예컨대, 도 13에 도시된 바와 같이), 이온 전류 보상 부재(1260)는 공통 하우징(1366)에 본원에 기술된 다른 부재(예컨대, 스위칭 모드 파워 서플라이 106, 206, 806, 1206 및 이온 에너지 제어부 220, 820)을 공유할 수 있다. 이 실시예에서, 플라즈마 챔버(1204)에 제공된 주기 전압 함수는 이온 전류 보상 부재(1260)로부터 이온 전류 보상에 의해 변조된 주기 전압 함수를 포함하기 때문에 변조된 주기 전압 함수로 호칭될 수 있다. 제어부(1212)는 스위칭 모드 파워 서플라이(1206)의 출력과 이온 전류 보상(1260)이 조합하는 전기적 노드에서 다른 시간에서의 전압을 샘플링할 수 있다.
- [0067] 도 13에 도시된 바와 같이, 예시적 이온 전류 보상 부재(1360)는 스위칭 모드 파워 서플라이의 출력(1336)에 결합된 전류원(1364) 및 전류원(1364)과 출력(1336) 모두에 결합된 전류 제어부(1362)를 포함한다. 또한, 도 13에는 플라즈마 챔버(1304)가 도시되어 있고, 플라즈마 챔버 내에는 용량성 소자(C_1 , C_2) 및 이온 전류(I_i)가 존재한다. 도시된 바와 같이, C_1 은 챔버(1304)와 관련된 부재의 고유 용량(유효 용량으로도 칭함)을 나타내며, 상기 챔버는 예시적으로 절연체, 기관, 기관 지지부 및 이척(echuck)을 포함할 수 있으며, C_2 는 시스(sheath) 용량 및 스트레이(stray) 용량을 나타낸다. 이 실시예에서, 플라즈마 챔버(1304)에 제공되고 V_0 에서 측정가능한 주기 전압 함수는 이온 전류 보상, I_c 에 의해 변조된 주기 전압 함수를 포함하기 때문에 변조된 주기 전압 함수로 지칭될 수 있다.
- [0068] 시스(플라즈마 시스로도 지칭됨)는 고밀도의 양 전하 및 그로 인해 전체적으로 과량의 양 전하를 갖는 플라즈마 처리 챔버의 가능한 벽 및 기관 표면 근처의 플라즈마에서의 층이다. 시스와 접촉하고 있는 표면은 전형적으로 우세한 음 전하를 갖는다. 시스는 양이온보다 더 빠른 속도의 전자로 인해 발생하기 때문에 더 많은 비율의 전자가 기관 표면 및 벽에 도달하게 되어, 전자가 고갈된 시스가 남게된다. 시스 두께, λ_{sheath} 는 플라즈마 밀도 및 플라즈마 온도와 같은 플라즈마 특성의 함수이다.
- [0069] 이 실시예에서 C_1 은 챔버(1304)와 관련된 부재의 고유(또한 본원에서 유효로도 지칭됨) 용량이기 때문에, 이는 처리의 제어를 위해 부가되는 접근가능한 용량이 아니다. 예컨대, 일부 종래 기술은 기관에 대한 바이어스 파워를 블로킹 커패시터와 결합하는 선형 증폭기를 이용한 다음, 그 선형 증폭기를 제어하기 위해 피드백으로 블로킹 커패시터에 걸쳐 모니터링된 전압을 이용하는 해결책을 제시한다. 비록 커패시터는 본원에 기술된 많은 실시예에 있어서 기관 지지부에 스위칭 모드 파워 서플라이를 결합할 수는 있으나, 이는 본 발명의 몇몇 실시예에 있어서 블로킹 커패시터를 사용한 피드백 제어가 요구되지 않기 때문에 그렇게 할 필요가 없다.

[0070] 도 13, 동시에 유사한 참조 부호로 도 14에 대해 설명하면, 도 13에 도시된 V_0 에서 하나의 예시적 전압(예컨대, 변조된 주기 전압 함수)를 도시한 그래프이다. 동작에 있어서, 전류 제어부(1362)는 V_0 에서 전압을 모니터링 하고, 이온 전류는 다음과 같이 (도 14에 도시된 바와 같이) 시간간격 t 에 걸쳐 계산된다:

$$I_I = C_1 \frac{dV_0}{dt}$$

[0071] (식 1)

[0072] 이온 전류, I_I , 및 고유 용량(유효 용량으로도 지칭됨), C_1 은 어느 하나 또는 양자가 시간에 따라 변할 수 있다. C_1 은 소정 톨에 대해 실질적으로 일정하고 측정가능하기 때문에, V_0 만 보상 전류의 진행중인 제어를 가능하게 하도록 모니터링될 필요가 있다. 상기한 바와 같이, (도 15a에 도시된 바와 같이), 이온 에너지의 더 많은 단일 에너지적(mono-energetic) 분포를 얻기 위해, 전류 제어부가 전류원(1364)을 제어하여 I_c 가 실질적으로 I_I 과 같아진다(또는 대안으로 식 2와 관련된다). 이와 같이, 이온 전류가 기관의 표면에서의 전압에 영향을 미치는 레벨에 달할 때에도 이온 에너지의 좁은 확산이 유지될 수 있다. 또한, 필요한 경우, 부가적인 이온 에너지가 기관의 표면에서 실현되도록 도 15b 및 15c에 도시된 바와 같이 이온 에너지의 확산이 제어될 수 있다.

[0073] 또한 도 13은 이온 에너지 분포의 제어와 관련하여 이용될 수 있는 피드백 라인(1370)이 도시되어 있다. 예컨대, 도 14에 도시된 ΔV 의 값(전압 스텝 또는 제3 부분 1406으로도 지칭됨)은 순간 이온 에너지를 나타내며 또한 피드백 콘트롤 루프의 일부로서 많은 실시예에서 사용될 수 있다. 하나의 구체예에서, 전압 스텝(ΔV)은 식 4에 따른 이온 에너지에 관련된다. 다른 구체예에서, 첨두 대 첨두 전압, V_{pp} 는 순간 이온 에너지에 관련될 수 있다. 대안으로, 첨두 대 첨두 전압, V_{pp} 및 제4 부분(1408)의 기울기, dV_0/dt 와 시간, t 의 곱하기의 차(예컨대, $V_{pp}-dV_0/dt \cdot t$)는 순간 이온 에너지에 상호관련된다.

[0074] 다시 도 16을 참조하면, 도 13을 참조하여 기술된 전류원(1364)을 실현하기 위해 구현될 수 있는 전류원(1664)의 예시적 실시예이다. 이 실시예에서, 직렬 인덕터 L2와 관련하여, 제어가능한 음극성 DC 전압원은 전류원으로 기능하나, 당업자는, 본원의 관점에서, 전류원이 다른 부재 및/또는 구성으로 실현될 수 있음을 이해할 것이다.

[0075] 도 43은 기관의 표면에 충돌하는 이온의 이온 에너지 분포를 제어하는 방법의 일 실시예를 도시한다. 상기 방법(4300) 플라즈마 처리 챔버 내에서 기관을 지지하는 기관 지지부에 변조된 주기 전압 함수(4302)(도 44에서 변조된 주기 전압 함수 4402 참조)를 인가하는 것에 의해 개시된다. 상기 변조된 주기 전압 함수는 이온 전류 보상, I_c (도 44에서 I_c 4404 참조) 및 파워 서플라이 전압, V_{ps} (도 44에서 파워 서플라이 전압 4406 참조)와 같은 적어도 2개의 'knobs'를 통해 제어될 수 있다. 파워 서플라이 전압을 생성하기 위한 예시적인 부재는 도 1에서 스위칭 모드 파워 서플라이(106)이다. 파워 서플라이 전압, V_{ps} 을 설명하는 것을 돕기 위하여, 본원에서는 이온 전류 및 이온 전류 보상에 결합되지 않고 측정된 것으로 도시된다. 이어서, 상기 변조된 주기 전압 함수는 이온 전류 보상, I_c 의 제1 및 제2 값에서 샘플링(4304)된다. 상기 변조된 주기 전압 함수의 전압의 적어도 2개의 샘플은 각각의 이온 전류 보상, I_c 에서 선택된다. 상기 샘플링(4304)는 이온 전류, I_I , 및 시스 용량, C_{sheath} 의 계산(4306)(또는 측정)을 가능하게 하기 위해서 수행된다. 그러한 측정은 기관 지지부에 인가되는 경우(또는 기관 지지부에 인가될 때) 좁은(예컨대, 최소) 이온 에너지 분포 함수(IEDF) 폭을 생성하는 이온 전류 보상, I_c 을 밝혀내는 것을 포함할 수 있다. 또한 상기 계산(4306)은 변조된 주기 전압 함수의 파형의 샘플링(4304)을 기초로 하는 전압 스텝(ΔV)(또한, 변조된 주기 전압 함수 1406의 제3 부분으로 알려짐)을 측정하는 것을 선택적으로 포함할 수 있다. 전압 스텝(ΔV)은 기관 표면에 도달하는 이온의 이온 에너지에 관련될 수 있다. 제1 시간에 대해서 이온 전류, I_I 를 밝혀내면, 전압 스텝(ΔV)은 무시될 수 있다. 샘플링(4304) 및 계산(4306)의 상세 내용은 이하 도 30에 대한 설명에서 제공될 것이다.

[0076] 일단 이온 전류, I_I 및 시스 용량, C_{sheath} 이 알려지면, 상기 방법(4300)은 IEDF의 형상(예컨대, 폭) 및 이온 에너지를 모니터링하고 설정하는 것을 포함하는 도 31의 방법(3100)으로 이동할 수 있다. 예컨대, 도 46은 파워 서플라이 전압에서의 변화가 어떻게 이온 에너지에서의 변화에 영향을 줄 수 있는지를 도시한다. 특히, 도시된 파워 서플라이 전압의 크기(magnitude)가 감소되면 이온 에너지의 크기가 감소된다. 부가적으로, 도 47은 좁은 IEDF (4714)가 주어지는 경우, IEDF가 이온 전류 보상, I_c 을 조정하는 것에 의해 확대될 수 있는 것을

도시한다. 대안으로 또는 동등하게, 상기 방법(4300)은 이온 전류, I_1 , 시스 용량, C_{sheath} 및 변조된 주기 전압 함수의 파형의 다른 양상을 이용하고 있는 도 32-41을 참고하여 기술된 바와 같이 다양한 매트릭(metrics)을 수행할 수 있다.

[0077] 이온 에너지 및/또는 IEDF 폭을 설정하는 것에 더하여, 상기 방법(4300)은 이온 에너지 및 IEDF 폭을 유지하기 위해 변조된 주기 전압 함수를 조정(4308)할 수 있다. 특히, 이온 전류 보상 부재에 의해 제공된 이온 전류 보상, I_c 의 조정 및 파워 서플라이 전압의 조정(4308)이 수행될 수 있다. 일부 구체예에서, 파워 서플라이 전압이 파워 서플라이의 버스 전압 V_{bus} (예컨대, 도 3의 버스 전압 V_{bus})에 의해 제어될 수 있다. 이온 전류 보상, I_c 은 IEDF 폭을 제어하고, 파워 서플라이 전압은 이온 에너지를 제어한다.

[0078] 이러한 조정(4308) 이후에, 변조된 주기 전압 함수는 다시 샘플링(4304)되고, 이온 전류, I_1 , 시스 용량, C_{sheath} 및 전압 스텝(ΔV)의 계산(4306)이 다시 수행될 수 있다. 이온 전류, I_1 , 또는 전압 스텝(ΔV)이 규정된 값(또는, 대안으로 소망하는 값)과 다른 경우, 이온 전류 보상, I_c , 및/또는 파워 서플라이 전압이 조정(4308)될 수 있다. 이온 에너지, eV, 및/또는 IEDF 폭을 유지하기 위하여, 샘플링(4304), 계산(4306) 및 조정(4308)의 반복 실행이 수행될 수 있다.

[0079] 도 30은 기관의 표면에 충돌하는 이온의 이온 에너지 분포를 제어하는 방법의 다른 실시예를 도시한다. 일부 구체예에서, 상기에서 기술된 바와 같이, 좁은 IEDF 폭(예컨대, 최소 IEDF 폭 또는 대안으로, ~6% 반치전폭(full-width half maximum))을 얻는 것이 바람직하다. 따라서, 상기 방법(3000)은 일정한 기관 전압, 그로 인해 시스 전압이 기관 표면에 존재하도록 변조된 주기 전압 함수를 챔버 및 기관 지지부에 제공할 수 있다. 이것은 실질적으로 일정한 전압에서 시스를 가로지르는 이온을 차례로 가속화시킴으로써 실질적으로 동일한 이온 에너지로 이온이 기관에 충돌할 수 있게 함으로써 좁은 IEDF 폭을 제공한다. 예컨대 도 45에서 이온 전류 보상, I_c 의 조정이 펄스 사이에서 기관 전압, V_{sub} 을 일정하게 하거나 또는 그에 따라 실질적으로 일정한 전압이 IEDF를 좁게 하는 것이 도시되어 있다.

[0080] 그러한 변조된 주기 전압 함수는 스트레이 용량이 없는 것으로 가정하고 이온 전류 보상, I_c 이 이온 전류, I_1 과 동일할 때 얻어진다(도 45에서 주기 전압 함수(V_0)의 마지막 5개 사이클 참조). 대안으로, 스트레이 용량, C_{stray} 을 고려하는 경우, 이온 전류 보상, I_c 는 식 2에 따라 이온 전류, I_1 에 관련된다.

$$I_1 = I_c \frac{C_1}{C_1 + C_{stray}}$$

[0081] (식 2)

[0082] 여기서, C_1 은 유효 용량(예컨대, 도 3 및 13을 참고로 기술된 고유 용량)이다. 유효 용량, C_1 은 시간에 따라 변하거나 또는 일정할 수 있다. 좁은 IEDF 폭은 $I_1 = I_c$ 또는, 대안으로 식 2를 만족할 때 존재할 수 있다. 도 45-50은 용어(nomenclature) $I_1 = I_c$ 를 사용하지만, 이러한 등식은 식 2를 단순히 간이화한 것임을 이해해야 하고, 따라서 식 2는 도 45-50에서 사용된 등식을 위해 치환할 수 있다. 스트레이 용량, C_{stray} 은 파워 서플라이에 의해 도시되는 플라즈마 챔버의 누적 용량이다. 도 45에 도시된 8개의 사이클이 있다.

[0083] 상기 방법(3000)은 기관 지지부(3002)(예컨대, 도 1에서 기관 지지부 108)에 변조된 주기 전압 함수(예컨대, 도 14에서 변조된 주기 전압 함수 또는 도 44에서 변조된 주기 전압 함수 4402)를 인가하는 것으로부터 시작할 수 있다. 상기 변조된 주기 전압 함수의 전압은 2번 이상 샘플링(3004)될 수 있고, 이러한 샘플링으로부터, 변조된 주기 전압 함수의 사이클의 적어도 일부분에 대한 기울기 dV_0/dt 가 계산(3006)(예컨대, 펄스 사이에서의 부분 또는 제4 부분 1408의 기울기)될 수 있다. 결정(3010) 전 일부 지점에서, 소정 값의 유효 용량 C_1 (예컨대, 도 13에서 고유 용량 C_1 , 및 도 3에서 고유 용량 C_{10})이 (예컨대, 메모리로부터 또는 사용자 입력으로부터) 접근(3008)될 수 있다. 기울기, dV_0/dt , 유효 용량, C_1 , 및 이온 전류 보상, I_c 을 기초로, 함수 f (식 3)은 하기와 같이 이온 전류 보상, I_c 의 각각의 값에 대하여 구할 수 있다.

$$f(I_c) = \frac{dV_0}{dt} - \frac{I_c}{C_1} = 0$$

[0084] (식 3)

[0085] 만일 함수 f 가 참(true) 이면, 이온 전류 보상, I_c 은 이온 전류, I_1 와 동일하거나 또는 대안으로 식 2가 참이 되게 하고, 좁은 IEDF 폭이 얻어진다(3010)(예컨대, 도 45 참조). 만일 함수 f 가 참이 아니면, 이온 전류 보상, I_c 는 함수 f 가 참이 될 때까지 추가로 조정(3012)될 수 있다. 이것을 관찰하기 위한 다른 방법은 이온 전류 보상, I_c 가 이온 전류, I_1 와 매칭(또는 대안으로, 식 2의 관계를 만족)될 때까지 조정될 수 있고, 이 지점에서 좁은 IEDF 폭이 존재할 것이다. 그러한 이온 전류 보상, I_c 에 대한 조정 및 그로 인한 좁은 IEDF이 도 45에 도시되어 있다. 이온 전류, I_1 , 및 그에 대응하는 이온 전류 보상, I_c 은 저장 동작(3014)에서 (예컨대, 메모리 내에서) 저장될 수 있다. 이온 전류, I_c 는 유효 용량, C_1 과 같이 시간에 따라 변할 수 있다.

[0086] 식 3을 만족할 때, 이온 전류, I_1 가 공지된다($I_c = I_1$ 이거나 또는 식 2가 참이므로). 따라서, 상기 방법(3000)은 플라즈마에 영향을 미치지 않고 실시간으로 이온 전류, I_1 의 원격 및 비-국부적(non-invasive) 측정을 가능하게 한다. 도 32-41을 참고로 기술되는 것과 같은 많은 신규한 매트릭을 야기한다(예컨대, 플라즈마 밀도의 원격 모니터링 및 플라즈마 소스의 원격 고장 검출).

[0087] 보상 전류, I_c 를 조정(3012)하는 동안 이온 에너지는 델타 함수 보다 더 넓어지고, 이온 에너지는 도 15b, 15c, 또는 44 중 어느 것과 유사하게 된다. 그러나, 일단 보상 전류, I_c 가 식 2를 만족하는 것으로 밝혀지면, IEDF는 도 15a 또는 좁은 IEDF 폭(예컨대, 최소 IEDF 폭)을 갖는 도 45의 우측에 도시된 바와 같이 나타난다. 이것은 $I_c = I_1$ (또는 대안으로 식 2가 참인 경우)일 때 변조된 주기 전압 함수의 펄스 사이에서의 전압이 실질적으로 일정한 시스 또는 기관 전압 그에 따라 이온 에너지를 야기하기 때문이다. 도 46에서, 기관 전압(4608)은 일정한 전압 부분 사이에서 펄스를 포함한다. 이러한 펄스는 이온 에너지 및 IEDF에 대한 그의 영향이 무시될 정도로 매우 짧게 존재하기 때문에 기관 전압(4608)은 실질적으로 일정한 것으로 지칭된다.

[0088] 하기에 도 30에 도시된 방법 단계의 각각에 대하여 보다 상세하게 설명한다. 하나의 구체예에서, 변조된 주기 전압 함수는 도 14에 도시된 바와 같은 파형을 가질 수 있고, 제1 부분(예컨대, 제1 부분 1402), 제2 부분(예컨대, 제2 부분1404), 제3 부분 (예컨대, 제3 부분 1406), 및 제4 부분(예컨대, 제4 부분 1408)을 포함할 수 있으며, 여기서 제3 부분은 전압 스텝(ΔV)을 가질 수 있고, 제4 부분은 기울기 dV_0/dt 를 가질 수 있다. 기울기 dV_0/dt 는 양, 음, 또는 제로일 수 있다. 또한 변조된 주기 전압 함수(1400)은 제1 부분(1402), 제2 부분(1404), 및 제3 부분(1406)을 포함하는 펄스, 및 이러한 펄스 사이의 부분(제4 부분 1408)을 갖는 것으로 기술될 수 있다.

[0089] 변조된 주기 전압 함수는 도 3에서 V_0 로서 측정될 수 있고 도 44에서 변조된 주기 전압 함수(4402)로서 나타날 수 있다. 변조된 주기 전압 함수(4402)는 파워 서플라이 전압(4406)(주기 전압 함수로도 알려짐)과 이온 전류 보상(4404)을 조합하는 것에 의해 얻어진다. 파워 서플라이 전압(4406)은 변조된 주기 전압 함수(4402)의 펄스를 정형하고 생성시키는데 매우 중요한 원인이 되고, 또 이온 전류 보상(4404)은 종종 선형 기울기 전압인 펄스 사이에서의 부분을 정형하고 생성시키는데 매우 중요한 원인이 된다. 이온 전류 보상, I_c 을 증가시키는 것은 도 45에 도시된 바와 같이 펄스 사이에서의 부분의 기울기의 크기 감소를 야기한다. 파워 서플라이 전압(4606)의 크기의 감소는 도 46에 도시된 바와 같이, 변조된 주기 전압 함수(4602)의 침두 대 침두 전압 및 펄스의 진폭의 크기 감소를 야기한다.

[0090] 파워 서플라이가 스위칭 모드 파워 서플라이인 경우, 제1 스위치 T1 및 제2 스위치 T2의 스위칭 다이어그램(4410)이 적용될 수 있다. 예컨대, 제1 스위치 T1은 도 3에서 스위치 T1으로 실행될 수 있고, 제2 스위치 T2는 도 3에서 제2 스위치 T2로 실행될 수 있다. 2개의 스위치는 동일한 스위칭 시간을 갖지만, 180° 위상이 다른(out of phase) 것으로 도시되어 있다. 다른 구체예에서, 상기 스위치는 도 4에 도시된 바와 같은 미세한 위상 오프셋(phase offset)을 가질 수 있다. 제1 스위치 T1이 온(on)일 때, 파워 서플라이 전압은 최대 크기로 되고, 파워 서플라이가 음의 버스(bus) 전압을 갖기 때문에 도 44에서 음의 값이 된다. 제2 스위치 T2는 이러한 주기가 진행되는 동안 오프되어서 파워 서플라이 전압(4406)이 그라운드로부터 절연된다. 스위치가 반대로 될 때, 파워 서플라이 전압(4406)은 그라운드를 조금 통과하거나 접근하게 된다. 도시된 구체예에서, 2개의 펄스 폭이

존재하지만, 이것이 요구되는 것은 아니다. 다른 구체예에서, 상기 펄스 폭은 모든 사이클에 대해서 동일할 수 있다. 다른 구체예에서, 펄스 폭은 시간에 따라 변경되거나 변조될 수 있다.

- [0091] 변조된 주기 전압 함수가 기관 지지부에 도달하기 전에(예컨대, 스위칭 모드 파워 서플라이 및 유효 용량 사이), 변조된 주기 전압 함수가 기관 지지부(3002)에 인가되고, 최종 접근가능한 지점에서 V_0 로서 샘플링(3004)될 수 있다. 비변조된 주기 전압 함수(또는 도 44에서 파워 서플라이 전압 4406)는 도 12에서 스위칭 모드 파워 서플라이(1206)와 같이 파워 서플라이로부터 공급될 수 있다. 도 44에서 이온 전류 보상(4404)은 도 12에서 이온 전류 보상 부재(1260) 또는 도 13에서 (1360)과 같이 전류원으로부터 공급될 수 있다.
- [0092] 변조된 주기 전압 함수의 전체 또는 일부가 샘플링(3004)될 수 있다. 예컨대, 제4 부분(예컨대, 제4 부분 1408)이 샘플링될 수 있다. 샘플링(3004)은 파워 서플라이 및 기관 지지부 사이에서 수행될 수 있다. 예컨대, 도 1에서 샘플링(3004)은 스위칭 모드 파워 서플라이(106) 및 지지부(108) 사이에서 수행될 수 있다. 도 3에서, 샘플링(3004)은 인덕터 L1과 고유 용량 C10 사이에서 수행될 수 있다. 하나의 구체예에서, 샘플링(3004)은 용량 C3와 고유 용량 C10 사이에서 V_0 에서 수행될 수 있다. 고유 용량 C10 및 플라즈마를 나타내는 부재(R2, R3, C1, 및 C2)는 실시간 측정할 수 없기 때문에, 샘플링(3004)은 전형적으로 도 3에서 고유 용량 C10의 좌측에서 수행된다. 비록 고유 용량 C10은 전형적으로 처리되는 동안 측정되지 않지만, 전형적으로 일정한 것으로 알려져 있으며, 그에 따라 제조되는 동안 고정될 수 있다. 동시에, 어떤 경우, 고유 용량 C10은 시간에 따라 변할 수 있다.
- [0093] 일부 구체예에서 변조된 주기 전압 함수의 단지 2개의 샘플이 요구되지만, 다른 경우, 수백, 수천, 수만 개의 샘플이 변조된 주기 전압 함수의 각각의 사이클로부터 선택될 수 있다. 예컨대, 샘플링 레이트는 400 kHz을 초과할 수 있다. 이러한 샘플링 속도는 변조된 주기 전압 함수 및 그의 형상에 대해 더욱 정확하고 상세한 모니터링을 가능하게 한다. 유사하게, 주기 전압 함수의 더욱 상세한 모니터링은 사이클 사이에, 다른 처리 조건 사이에, 다른 처리 사이에, 다른 챔버 사이에, 다른 소스 사이에 등에서 파형의 더욱 정확한 비교를 가능하게 한다. 예컨대, 이러한 속도에서 통상적인 샘플링 속도에서 가능하지 않을 수 있는 도 14에 도시된 주기 전압 함수의 제1, 제2, 제3 및 제4 부분 1402, 1404, 1406, 1408이 구별될 수 있다. 일부 구체예에서, 더 높은 샘플링 속도는 당업계에서 가능하지 않은, 전압 스텝(ΔV), 및 기울기, dV_0/dt 의 분석(resolving)를 할 수 있게 한다. 일부 구체예에서, 변조된 주기 전압 함수의 일 부분이 샘플링되고, 나머지 부분이 샘플링되지 않을 수 있다.
- [0094] 기울기, dV_0/dt 의 계산(3006)은 시간 t에 걸쳐 이루어진 복수 개의 V_0 측정을 기초로(예컨대, 제4 부분 1408) 수행될 수 있다. 예컨대, 라인의 기울기가 기울기, dV_0/dt 을 제공하는 V_0 값에 라인이 맞추어지도록 선형 맞춤(linear fit)이 수행될 수 있다. 다른 예에서, 도 14에서 시간 t의 출발점과 종착점에서 V_0 값(예컨대, 제4 부분 1408)이 확인될 수 있고, 라인의 기울기가 dV_0/dt 로서 제공되는 2개의 지점에서 라인이 맞추어질 수 있다. 이것은 펄스 사이의 부분의 기울기, dV_0/dt 가 계산될 수 있는 많은 방법 중에서 단지 2가지일 뿐이다.
- [0095] 결정(3010)은 IEDF를 좁은 폭(예컨대, 최소 폭, 또는 대안으로, 6% 반치전폭)으로 턴(turn) 하기 위해 사용되는 반복 실행의 일 부분일 수 있다. 식 3은 단지 일정한 기관 전압과 그로 인해 일정하고 실질적인 단일 이온 에너지(좁은 IEDF 폭)가 있을 때만 발생하는, 이온 전류 보상, I_c 가 이온 전류, I_1 와 동일할 때(또는 대안으로 식 2에 따른 I_1 와 관련될 때) 참이다. 일정한 기관 전압(4608)(V_{sub})은 도 46에 도시될 수 있다. 따라서, 이온 전류, I_1 , 또는 대안으로 이온 전류 보상, I_c 가 식 3에서 사용될 수 있다.
- [0096] 대안으로, 제4 부분(1408)(펄스 사이에서의 부분으로도 지칭됨)을 따르는 2개의 값은 제1 사이클 및 제2 사이클에 대해서 샘플링될 수 있고, 제1 및 제2 기울기는 각각의 사이클에 대해서 측정될 수 있다. 이러한 2개의 기울기로부터, 제3의 아직 측정되지 않은 기울기에 대해서 식 3이 참인 것으로 예상되는 이온 전류 보상, I_c 가 측정될 수 있다. 따라서, 좁은 IEDF 폭에 대응하는 것으로 예상되는 이온 전류, I_1 가 계산될 수 있다. 이것은 좁은 IEDF 폭이 측정될 수 있는 많은 방법 중에서 단지 2개일 뿐이고, 대응하는 이온 전류 보상, I_c 및/또는 대응하는 이온 전류, I_1 가 밝혀질 수 있다.
- [0097] 이온 전류 보상, I_c (3012)에 대한 조정은 이온 전류 보상, I_c 에서의 증가 또는 감소를 포함할 수 있고, 각각의 조정에 대한 스텝 크기에 대해서는 제한이 없다. 일부 구체예에서, 식 3에서 함수 f의 표시가 이온 전류 보상의 증가 또는 감소를 측정하기 위해 사용될 수 있다. 만일 표시가 음이면, 이온 전류 보상, I_c 는 감소될 수 있는

반면, 양의 표시는 이온 전류 보상, I_c 을 증가할 필요가 있다는 것을 나타낼 수 있다.

[0098] 일단 이온 전류 보상, I_c 이 이온 전류, I_1 과 동일(또는 대안으로 식 2에 관련됨)한 것으로 확인되면, 상기 방법(3000)은 추가로 설정 포인트 동작(도 31 참조) 또는 원격 챔버 및 소스 모니터링 동작으로 진행할 수 있다(도 32-41 참조). 추가의 설정 포인트 동작은 이온 에너지(도 46 참조) 및 이온 에너지 또는 IEDF 폭의 분포(도 47 참조)를 설정하는 것을 포함할 수 있다. 소스 및 챔버 모니터링은 플라즈마 밀도, 소스 서플라이 비정상, 플라즈마 아크 및 다른 것을 모니터링하는 것을 포함할 수 있다.

[0099] 또한, 상기 방법(3000)은 연속적으로 (또는, 대안으로 주기적으로) 이온 전류 보상, I_c 를 업데이트 하기 위하여 선택적으로 샘플링(3004)으로 되돌아가서 다시 반복 실행될 수 있다. 예컨대, 샘플링(3004), 계산(3006), 결정(3010), 및 조정(3012)은, 식 3이 계속 만족하도록 하기 위해 소정 이온 전류 보상, I_c 에서 주기적으로 수행될 수 있다. 동시에, 만일 식 3을 만족하는 이온 전류 보상, I_c 이 업데이트 되면, 이온 전류, I_1 도 업데이트 될 수 있고, 업데이트 된 값은 저장(3014)될 수 있다.

[0100] 상기 방법(3000)은 이온 전류, I_1 와 동일 하거나 또는 대안으로 식 2를 만족하도록 이온 전류 보상, I_c 을 찾아 설정할 수 있지만, 좁은 IEDF 폭을 얻기 위해 필요한 이온 전류 보상, I_c 의 값은 이온 전류, I_c 를 그 값에 설정함이 없이(또는 대안으로 그 이전에) 측정될 수 있다. 예컨대, 제1 사이클에 대해 제1 이온 전류 보상, I_{c1} 을 인가하고 펄스 사이에서의 전압의 제1 기울기, dV_{01}/dt 를 측정하는 것에 의해, 또 제2 사이클에 대해서 제2 이온 전류 보상, I_{c2} 을 인가하고 펄스 사이에서의 전압의 제2 기울기, dV_{02}/dt 를 측정하는 것에 의해, 제3 이온 전류 보상, I_{c3} 과 관련된 제3 기울기, dV_{03}/dt 가 식 3이 참인 것으로 예상되는 위치에서 측정될 수 있다. 제3 이온 전류 보상, I_{c3} 은 인가되는 경우 좁은 IEDF 폭을 야기하는 것일 수 있다. 따라서, 식 3을 만족하고, 그에 따라 이온 전류, I_1 에 대응하는 이온 전류 보상, I_c 는 이온 전류 보상의 단일 조정만으로 측정될 수 있다. 이어서 상기 방법(3000)은 이온 전류, I_c 를 좁은 IEDF 폭을 얻기 위해 필요한 값에 설정함이 없이 도 31 및/또는 도 32-41에 개시된 방법으로 이동할 수 있다. 그러한 구체에는 튜닝(tuning) 속도를 증가시키기 위해 수행될 수 있다.

[0101] 도 31은 IEDF 폭 및 이온 에너지를 설정하기 위한 방법을 도시한다. 상기 방법은 도 30에 도시된 방법(3000)으로부터 유래하고 각각 IEDF 폭 및 이온 에너지의 설정을 수반하는 좌측 경로(3100)(IEDF 브랜치로도 지칭됨) 또는 우측 경로(3101)(이온 에너지 브랜치로도 지칭됨)로 이루어질 수 있다. 이온 에너지, eV는 전압 스텝(ΔV), 또는 도 14의 변조된 주기 전압 함수(1400)의 제3 부분(1406)에 비례한다. 이온 에너지, eV, 및 전압 스텝(ΔV) 사이의 관계는 식 4로 표시될 수 있다:

$$eV = \Delta V \frac{C_1}{C_2 + C_1} \quad (\text{식 4})$$

[0102] 여기서, C_1 은 유효 용량 (예컨대, 도 3에서 척 용량; 고유 용량, C_{10} ; 또는 도 13에서 고유 용량, C_1)이고, C_2 는 시스 용량(예컨대, 도 3에서 시스 용량 C_4 또는 도 13에서 시스 용량 C_2)이다. 시스 용량, C_2 는 스트레이 용량을 포함하고 이온 전류, I_1 에 의존할 수 있다. 전압 스텝(ΔV)은 변조된 주기 전압 함수(1400)의 제4 부분(1408)과 제2 부분(1404) 사이에서 전압의 차이로서 측정될 수 있다. 전압 스텝(ΔV)(도 3에서 bus 전압, V_{bus} 와 같은 bus 전압 또는 파워 서플라이 전압의 함수임)을 모니터링 하고 제어하는 것에 의해, 이온 에너지, eV가 제어되고 공지될 수 있다.

[0104] 동시에, IEDF 폭은 식 5에 따라 계산될 수 있다:

$$IEDF \text{ 폭} = V_{PP} - \Delta V - \frac{It}{C} \quad (\text{식 5})$$

[0105] 여기서, C 가 C_{series} 일 때, I 는 I_1 이고, 또는 C 가 $C_{effective}$ 일 때, I 는 I_c 이며, 시간, t 는 펄스 사이에서의 시간이고, V_{PP} 는 첨두 대 첨두 전압이며, 또 ΔV 는 전압 스텝이다.

[0107] 부가적으로, 시스 용량, C_2 은 다양한 계산 및 모니터링 동작에 사용될 수 있다. 예컨대, 디바이 시스 거리 (Debye sheath distance), λ_{sheath} 는 하기 식과 같이 계산될 수 있다:

$$\lambda_{sheath} = \frac{\epsilon A}{C_2}$$

[0108] (식 6)

[0109] 여기서, ϵ 은 진공 유전율(vacuum permittivity)이고, A는 기관의 면적(또는 대안으로 기관 지지부의 표면적)이다. 일부 고 전압 인가에서는, 식 6이 식 7로 기재된다:

$$\lambda_{sheath} = \sqrt{\frac{T_e \cdot \epsilon_0}{n_e q}} \cdot \left(\frac{V}{2 T_e}\right)^{.75}$$

[0110] (식 7)

[0111] 부가적으로, 시스 내에서의 e-필드(e-field)는 시스 용량, C_2 , 시스 거리, λ_{sheath} , 및 이온 에너지, eV의 함수로서 구할 수 있다. 또한 이온 전류, I_1 와 함께 시스 용량, C_2 은 포화 전류, I_{sat} 가 단일 이온화된 플라즈마에 대하여 보상 전류, I_c 에 선형적으로 관계되는 경우 식 8로부터 플라즈마 밀도, n_e 를 측정하도록 사용될 수 있다.

$$I_{sat} = \sum n_i q_i \sqrt{\frac{kT_e}{m_i}} A \approx n_e q \sqrt{\frac{kT_e}{\langle m \rangle}} A$$

[0112] (식 8)

[0113] 기관 표면에서의 이온의 유효 질량은 시스 용량, C_2 및 포화 전류, I_{sat} 를 사용하여 계산될 수 있다. 플라즈마 밀도, n_e , 시스에서의 전기장, 이온 에너지, eV, 이온의 유효 질량, 및 기관의 DC 전위, V_{DC} 는 당업계에서 전형적으로 간접적인 방법을 통해서만 모니터링 되는 기본적인 플라즈마 파라미터이다. 상기 기술 내용은 이러한 파라미터의 직접 측정을 가능하게 하여 실시간으로 플라즈마 특성을 보다 정확하게 모니터링 할 수 있게 한다.

[0114] 식 4에 도시된 바와 같이, 시스 용량, C_2 도 도 31의 이온 에너지 브랜치(3101)에 도시된 바와 같이, 이온 에너지, eV를 모니터링하고 제어하기 위해 사용될 수 있다. 이온 에너지 브랜치(3101)는 이온 에너지(3102)의 사용자 선택을 수용하는 것에 의해 출발한다. 이어서 이온 에너지 브랜치(3101)는 주기 전압 함수(3104)을 제공하는 스위칭 모드 파워 서플라이에 대한 초기 파워 서플라이 전압을 설정할 수 있다. 또한 주기 전압을 샘플링하는 동작(3108) 이전의 일부 지점에서, 이온 전류가 접근될 수 있다(3106)(예컨대, 메모리로부터 접근됨). 주기 전압은 샘플링(3108)될 수 있고 변조된 주기 전압 함수의 제3 부분의 측정(3110)이 수행될 수 있다. 이온 에너지, I_1 는 변조된 주기 전압 함수의 전압 스텝(ΔV), (또한 제3 부분으로도 지칭됨(예컨대, 제3 부분 1406))으로부터 계산(3112)될 수 있다. 이어서 이온 에너지 브랜치(3101)는 이온 에너지가 규정된 이온 에너지와 동일한지 측정할 수 있고(3114), 만약 그런 경우 이온 에너지는 소망하는 설정 지점에 있게 되고, 이온 에너지 브랜치(3101)는 끝나게 된다. 만일, 이온 에너지가 규정된 이온 에너지와 동일하지 않은 경우, 이온 에너지 브랜치(3101)는 파워 서플라이 전압을 조정(3116)할 수 있고, 주기 전압을 다시 샘플링(3108)할 수 있다. 이어서, 이온 에너지 브랜치(3101)는 이온 에너지가 규정된 이온 에너지와 동일할 때까지 샘플링(3108), 측정(3110), 계산(3112), 결정(3114), 및 설정(3116)을 통해 반복 실행할 수 있다.

[0115] IEDF 폭을 제어하고 모니터링 하기 위한 방법이 도 31의 IEDF 브랜치(3100)에 도시되어 있다. IEDF 브랜치(3100)은 IEDF 폭의 사용자 선택을 수용(3150)하는 것과 현재 IEDF 폭을 샘플링(3152)하는 것을 포함한다. 이어서 결정(3154)은 규정된 IEDF 폭이 현재 IEDF 폭과 동일한지 측정하고, 결정(3152)이 만족하면, 이어서 IEDF 폭은 소망하는(또는 규정된) 바와 같이 되고, IEDF 브랜치(3100)는 끝나게 된다. 그러나, 만일 현재 IEDF 폭이 규정된 IEDF 폭과 동일하지 않은 경우, 이어서 이온 전류 보상, I_c 는 조정(3156)될 수 있다. 이러한 측정(3154) 및 조정(3156)은 현재 IEDF 폭이 규정된 IEDF 폭과 동일할 때까지 반복 실행 방법으로 연속할 수 있다.

[0116] 일부 구체예에서, 또한 IEDF 브랜치(3100)는 규정된 IEDF 형상을 보장하기 위해서 실행될 수 있다. 다양한 IEDF 형상이 생성될 수 있고, 각각은 다른 이온 에너지 및 IEDF 폭과 연관될 수 있다. 예컨대, 제1 IEDF 형상은 델타

함수이지만 제2 IEDF 형상은 사각형 함수일 수 있다. 다른 IEDF 형상은 컵형상(cupped)일 수 있다. 다양한 IEDF 형상의 예가 도 11에 도시되어 있다.

- [0117] 이온 전류, I_1 및 전압 스텝(ΔV) 값을 알면, 식 4에서 이온 에너지, eV를 구할 수 있다. 전압 스텝(ΔV)은 파워 서플라이 전압을 변경하는 것에 의해 전압 스텝, ΔV 가 변경되도록 제어될 수 있다. 더 큰 파워 서플라이 전압은 전압 스텝, ΔV 에서의 증가를 야기하고, 파워 서플라이 전압에서의 감소는 전압 스텝, ΔV 에서의 감소를 야기한다. 환언하면, 파워 서플라이 전압을 증가시키면 더 큰 이온 에너지, eV를 야기한다.
- [0118] 또한, 상기 시스템 및 방법은 연속적으로 가변하는 피드백 반복 실행으로 작동하기 때문에, 플라즈마 소스 또는 챔버 조건에 대한 의도적 조정 또는 변형으로 인한 플라즈마 내에서의 변경에도 불구하고 소망하는(또는 규정된) 이온 에너지 및 IEDF 폭이 유지될 수 있다.
- [0119] 비록 도 30-41이 단일 이온 에너지에 대해 기술되었지만, 당업자는 소망의(또는 규정된) IEDF 폭(또는 IEDF 형상) 및 이온 에너지를 모니터링 하고 생성하는 상기 방법이 각각 자신의 IEDF 폭(또는 IEDF 형상)을 갖는 2 이상의 이온 에너지를 모니터링하고 생성하기 위해 추가로 이용될 수 있다는 것을 이해할 것이다. 예컨대, 제1, 제3, 및 제5 사이클에서 제1 파워 서플라이 전압, V_{PS} 을 제공하고 제2, 제4, 및 제6 사이클에서 제2 파워 서플라이 전압을 제공하는 것에 의해, 2개의 구별되는 좁은 이온 에너지가 기관의 표면에 도달하는 이온에 대해 얻어질 수 있다(예컨대, 도 42A). 3개의 다른 파워 서플라이 전압을 사용하는 것은 3개의 다른 이온 에너지를 야기한다(예컨대, 도 42B). 각각의 다중 파워 서플라이 전압이 인가되는 동안 시간을 변경하는 것에 의해, 또는 각각의 파워 서플라이 전압 레벨이 인가되는 동안 사이클의 수를 변경하는 것에 의해, 다른 이온 에너지의 이온 플럭스가 제어될 수 있다(예컨대, 도 42C).
- [0120] 상기 기술 내용은 파워 서플라이에 의해 제공되는 주기 전압 함수와 이온 전류 보상 부재에 의해 제공된 이온 전류 보상을 조합이 플라즈마 처리가 진행되는 동안 기관 표면에 도달하는 이온의 이온 에너지 및 IEDF 폭 및/또는 IEDF 형상을 제어하는데 어떻게 사용될 수 있는지를 나타낸다.
- [0121] 상기에 기술된 제어의 일부는 하기의 일부 조합을 사용하는 것에 의해 달성될 수 있다: (1) 고정 파형(파형의 연속 사이클이 동일함); (2) 이온 에너지 및 IEDF에 비례하는 적어도 2개 부분을 갖는 파형(예컨대, 도 14에 도시된 제3 및 제 4 부분 1406 및 1408); 및 (3) 파형의 구별되는 특징을 정확하게 모니터링 할 수 있는 높은 샘플링 속도(예컨대, 125 MHz). 예컨대, 선형 증폭기와 같은 종래 기술이 변조된 주기 전압 함수와 유사하게 기관에 파형을 보내는 경우, 사이클 사이에서의 바람직하지 않은 변형은 이온 에너지 또는 IEDF 폭(또는 IEDF 형상)을 특정하기 위해 종래 기술의 파형을 사용하는 것을 어렵게 만든다.
- [0122] 기관 지지부를 바이어스 하기 위해 선형 증폭기가 사용되는 경우, 파형이 사이클 마다 일정하기 않기 때문에 높은 속도로 샘플링할 필요성이 없고, 그에 따라 파형의 특징(예컨대, 펄스 사이에서의 부분의 기울기)을 분리하는 것은 전형적으로 유용한 정보를 제공하지 않을 것이다. 그러한 유용한 정보는 본원에 개시되어 있는 바와 같이 고정된 파형이 사용될 때 발생한다.
- [0123] 본원에 개시된 고정된 파형 및 높은 샘플링 레이트는 추가로 보다 정확한 통계적 관측이 가능하게 한다. 이러한 증가된 정확성 때문에, 변조된 주기 전압 함수의 다양한 특성을 모니터링하는 것을 통해 챔버 내에서의 플라즈마 및 플라즈마 소스의 특성을 처리하고 작동하는 것이 모니터링 될 수 있다. 예컨대, 변조된 주기 전압 함수의 측정은 시스 용량 및 이온 전류의 원격 모니터링을 가능하게 하고 챔버 처리 또는 다른 챔버 상세 내용에 대한 정보 없이 모니터링 될 수 있다. 하기에 기술되는 많은 실시예는 상기 시스템 및 방법이 챔버 및 소스의 비-국부적 모니터링 및 고장 검출을 위해 사용될 수 있는 다양한 예시 중 일부만을 설명한 것이다.
- [0124] 모니터링의 실시예로서, 도 14를 참고하면, 파형(1400)의 DC 옵셋은 플라즈마 소스(이하에서 "소스"로 지칭됨)의 상태를 나타낼 수 있다. 다른 예에서, 변조된 주기 전압 함수의 펄스의 상부 부분(1404)(제2 부분)의 기울기는 소스 내에서 감쇠 효과(damping effect)와 상관 관계를 가질 수 있다. 수평에서부터 상부 부분(1404)의 기울기의 표준 편차(0과 동일한 기울기를 갖는 것으로 도시됨)는 파형(1400)의 거동을 기초로 소스 상태를 모니터링 하기 위한 다른 방법이다. 다른 양상은 변조된 주기 전압 함수의 제4 부분(1408)을 따라 샘플링된 V_0 지점의 표준편차를 측정하고 챔버 링잉(ringing)에 대한 표준 편차와 상관 관계를 갖도록 하는 것을 포함한다. 예컨대, 이러한 표준 편차가 연속 펄스 사이에서 모니터링 되고 표준 편차가 시간에 따라 증가하는 경우, 이것은 예컨대 e-척징 내, 챔버 내에서 링잉이 있다는 것을 나타낼 수 있다. 링잉은 챔버 또는 그 내부에 불량한 전기적 접촉 또는 원하지 않는 인덕턴스 또는 용량이 있다는 표시일 수 있다.

- [0125] 도 32는 본 발명의 하나의 구체예에 따라 기관 지지부에 2개의 변조된 주기 전압 함수가 전달되는 것을 도시한다. 비교되는 경우, 2개의 변조된 주기 전압 함수가 챔버 매칭 또는 챔버 자체(in situ) 비정상 또는 고장 검출을 위해 사용될 수 있다. 예컨대, 2개의 변조된 주기 전압 함수 중 하나는 기준 파형일 수 있고, 두 번째는 교정(calibration)이 진행되는 동안 플라즈마 처리 챔버로부터 선택될 수 있다. 2개의 변조된 주기 전압 함수의 차이(예컨대, 첨두 대 첨두 전압, V_{pp} 에서의 차이)는 플라즈마 처리 챔버를 교정하기 위해 사용될 수 있다. 대안으로, 두 번째 변조된 주기 전압 함수는 처리가 진행되는 동안 기준 파형과 비교될 수 있고, 파형 특성에서의 임의의 차이점(예컨대, 시프트)은 고장을 나타낼 수 있다(예컨대, 변조된 주기 전압 함수의 제4 부분 3202의 기울기에서의 차이).
- [0126] 도 33은 플라즈마 밀도에서의 변화 및 플라즈마 소스 불안정성을 나타낼 수 있는 이온 전류 파형을 도시한다. 도 33에 도시된 바와 같이, 이온 전류, I_1 에서의 파동이 시스템 내에서 고장 및 비정상을 확인하기 위해 분석될 수 있다. 예컨대, 도 33에서 주기적 파동은 플라즈마 소스(예컨대, 플라즈마 파워 서플라이 102)에서의 저-주파수 불안정성을 나타낼 수 있다. 또한 이온 전류, I_1 에서의 그러한 파동은 플라즈마 밀도에서의 사이클릭(cyclical) 변화를 나타낼 수 있다. 이러한 표시 및 그것이 나타낼 수 있는 가능한 고장 또는 비정상은 이온 전류, I_1 의 원격 모니터링이 특정 이점에 사용될 수 있는 많은 방법 중 단지 한 가지일 뿐이다.
- [0127] 도 34는 비-사이클릭 형상을 갖는 변조된 주기 전압 함수의 이온 전류, I_1 를 도시한다. 이러한 구체예의 이온 전류, I_1 는 플라즈마 밀도에서의 변화 및 플라즈마 불안정성과 같은 비-주기적 파동을 나타낼 수 있다. 또한 그러한 파동은 플라즈마 밀도에서 드리프트 또는 기생(parasitic) 플라즈마의 형성, 아크와 같은 다양한 플라즈마 불안정성을 나타낸다.
- [0128] 도 35는 바이어스 서플라이 내에서의 고장을 나타낼 수 있는 변조된 주기 전압 함수를 도시한다. 도시된 제3 사이클의 상부 부분(제2 부분으로도 지칭됨) 바이어스 서플라이(예컨대, 도 12에서 파워 서플라이 1206) 내에서의 링잉을 나타낼 수 있는 비정상 양태(anomalous behavior)를 나타낸다. 이러한 링잉은 바이어스 서플라이 내에서의 고장을 나타낼 수 있다. 링잉의 추가 분석은 파워 시스템 내에서의 고장을 확인하는데 도움을 주는 특성을 확인할 수 있다.
- [0129] 도 36은 시스템의 용량(capacitance) 내에서 동적(또는 비선형) 변화를 나타낼 수 있는 변조된 주기 전압 함수를 도시한다. 예컨대, 전압에 비선형적으로 의존하는 스트레이 용량은 그러한 변조된 주기 전압 함수를 야기할 수 있다. 다른 실시예에서, 플라즈마 브레이크다운(breakdown) 또는 척 내에서의 고장도 그러한 변조된 주기 전압 함수를 야기할 수 있다. 각각의 3개의 도시된 사이클에서 각각의 사이클의 제4 부분(3602)에서의 비선형성은 시스템 용량에서 동적 변화를 나타낼 수 있다. 예컨대, 상기 비선형성은 시스템 용량의 다른 성분이 대체로 고정되기 때문에 시스템 용량에서의 변화를 나타낼 수 있다.
- [0130] 도 37은 플라즈마 밀도에서 변화를 나타낼 수 있는 변조된 주기 전압 함수를 도시한다. 도시된 변조된 주기 전압 함수는 기울기 dV_0/dt 에서의 단조로운 시프트를 나타내고, 이것은 플라즈마 밀도에서의 변화를 나타낼 수 있다. 이러한 단조로운 시프트는 프로세스 에칭 종말점(process etch end point)과 같이, 예상되는 이벤트의 직접적인 표시를 제공할 수 있다. 다른 구체예에서, 이러한 단조로운 시프트는 예상되는 이벤트가 존재하지 않는 처리에서의 고장을 나타낸다.
- [0131] 도 38은 이온 전류에서의 드리프트가 시스템 드리프트를 나타낼 수 있는, 다른 프로세스 실행(process runs)에 대한 이온 전류의 샘플링을 도시한다. 각각의 데이터 포인트는 허용가능한 한계가 사용자-정의되거나 또는 허용가능한 이온 전류를 규정하는 자동화된 한계인, 소정의 런에 대한 이온 전류를 나타낼 수 있다. 허용가능한 한계를 넘어 이온 전류를 점차적으로 밀어내는 이온 전류에서 드리프트는 기관 손상이 가능하다는 것을 나타낼 수 있다. 또한 이러한 종류의 모니터링은 광학적 오MISSION(optical omission), 두께 측정 등과 같은 많은 수의 다른 통상의 모니터와 조합될 수 있다. 이온 전류 드리프트를 모니터링 하는 것에 더하여 이러한 통상의 모니터는 현재의 모니터링 및 통계적 제어를 향상시킬 수 있다.
- [0132] 도 39는 다른 처리 파라미터에 대한 이온 전류를 샘플링하는 것을 도시한다. 이러한 도시예에서, 이온 전류는 다른 처리 및 다른 처리 특성을 구별하기 위한 이점으로 사용될 수 있다. 그러한 데이터는 플라즈마 레시피 및 프로세스의 개발에 사용될 수 있다. 예컨대, 11개의 처리 조건이 테스트되어 11개 도시된 이온 전류 데이터 포인트를 발생시킬 수 있고, 바람직한 이온 전류를 발생시키는 처리가 이상적인 처리 또는 대안으로 바람직한 처리로서 선택될 수 있다. 예컨대, 가장 낮은 이온 전류가 이상적인 처리로서 선택될 수 있고, 이어서 바람직한

처리와 관련된 이온 전류가 바람직한 처리 조건으로 수행되고 있는지를 판단하기 위한 매트릭으로서 사용될 수 있다. 이러한 이점은 몇 가지 비제한적인 예로서 예컨대, 속도, 선택성 및 프로파일 각도(profile angle)와 같은 유사한 전통적인 이점에 더하여 또는 대안으로 사용될 수 있다.

- [0133] 도 40은 챔버 내에서 플라즈마 없이 모니터링 되는 2개의 변조된 주기 전압 함수를 도시한다. 이러한 2개의 변조된 주기 전압 함수는 플라즈마 챔버를 특징화하는데 사용되고 비교될 수 있다. 하나의 구체예에서, 제1 변조된 주기 전압 함수는 기준 파형일 수 있지만, 제2 변조된 주기 전압 함수는 현재 모니터링 되는 파형일 수 있다. 이러한 파형은 예컨대 챔버 정리 또는 예방적 보수 이후에 처리 챔버 내에서 플라즈마 없이 취해질 수 있으며, 이후에 챔버를 제조하기 이전 챔버의 전기적 상태를 확인하기 위해 제2 파형이 사용될 수 있다.
- [0134] 도 41은 플라즈마 처리를 확인하는데 사용될 수 있는 2개의 변조된 주기 전압 함수를 도시한다. 제1 변조된 주기 전압 함수는 기준 파형일 수 있지만, 제2 변조된 주기 전압 함수는 현재 모니터링 되는 파형일 수 있다. 현재 모니터링 되는 파형은 기준 파형과 비교될 수 있고, 어떠한 차이점들은 전통적인 모니터링 방법을 사용해서는 검출가능하지 않은 기생 및/또는 비용량성(non-capacitive) 임피던스 문제를 나타낼 수 있다. 예컨대, 도 35의 파형에서 나타나는 링잉이 검출될 수 있고 파워 서플라이에서의 링잉을 나타낼 수 있다.
- [0135] 도 32-41에 도시된 임의의 매트릭은 상기 방법(3000)이 이온 전류 보상, I_c , 이온 전류, I_1 및/또는 시스 용량, C_{sheath} 을 업데이트하기 위하여 반복되는 동안 모니터링될 수 있다. 예컨대, 각각의 이온 전류, I_1 이후에, 도 38에서 샘플이 선택되고, 상기 방법(3000)은 업데이트된 이온 전류, I_1 를 측정하기 위하여, 샘플링(3004)로 되돌아갈 수 있다. 다른 실시예에서, 모니터링 동작의 결과로서, 이온 전류, I_1 , 이온 에너지, eV 또는 IEDF 폭의 정정이 바람직할 수 있다. 그에 대응하는 정정이 수행되고 상기 방법(3000)은 식 3을 만족하는 새로운 이온 전류 보상, I_c 을 찾기 위해 샘플링(3004)으로 되돌아갈 수 있다.
- [0136] 당업자는 도 30, 31, 및 43에 도시된 방법이 특정 또는 기술된 순서의 동작을 요구하지 않는다거나 또는 도면에 함축되거나 도면에 의해 도시된 임의의 순서로 제한되지 않는다는 것을 이해할 것이다. 예컨대, 매트릭(도 32-41)은 IEDF 폭 및/또는 이온 에너지, eV를 모니터링하고 설정하기 이전, 도중 또는 이후에 모니터링될 수 있다.
- [0137] 도 44는 본 발명에서 도시된 시스템 중 다른 지점에서의 다양한 파형을 도시한다. 스위칭 모드 파워 서플라이의 스위칭 부재에 대해서 도시된 스위칭 패턴(4410), 파워 서플라이 전압, V_{ps} (4406)(본 발명에서 주기 전압 함수로도 지칭됨), 이온 전류 보상, I_c (4404), 변조된 주기 전압 함수(4402), 및 기관 전압, V_{sub} (4412)이 주어지는 경우, IEDF는 도시된 폭(4414)(정확한 축척으로 도시될 수 없는) 또는 IEDF 형상(4414)을 갖는다. 이러한 폭은 본 발명에서 "좁은 폭"으로 지칭된 것 보다 더 넓다. 도시된 바와 같이, 이온 전류 보상, I_c (4404)가 이온 전류, I_1 보다 큰 경우, 기관 전압, V_{sub} (4412)는 일정하지 않다. IEDF 폭(4414)은 기관 전압, V_{sub} (4412)의 펄스 사이에서 기울어진 부분의 전압 차이에 비례한다.
- [0138] 좁지 않은(non-narrow) IEDF 폭(4414)이 주어지는 경우, 본 발명에서 상기 방법은 이온 전류 보상, I_c 이 $I_c = I_1$ (또는 대안으로 식 2와 관련)될 때까지 조정되는 것을 필요로 한다. 도 45는 이온 전류 I_1 에 매칭하기 위하여 이온 전류 보상, I_c 에서의 최종 증분 변화가 생기는 효과를 도시한다. $I_c = I_1$ 일 때, 기관 전압, V_{sub} (4512)은 실질적으로 일정해지고, IEDF 폭(4514)은 좁지 않음에서 좁음으로 이동한다.
- [0139] 일단 좁은 IEDF가 얻어지는 경우, 도 46에 도시된 바와 같은 소망하는 또는 규정된 값으로 이온 에너지를 조정할 수 있다. 여기서, 파워 서플라이 전압(또는, 대안으로 스위칭 모드 파워 서플라이의 버스 전압, V_{bus})의 크기가 감소된다(예컨대, 파워 서플라이 전압 4606 펄스의 최대 음극성 진폭이 감소됨). 그 결과, ΔV_1 는 ΔV_2 로 감소하고 첨두 대 첨두 전압은, V_{pp1} 로부터 V_{pp2} 로 감소한다. 실질적으로 일정한 기관 전압, V_{sub} (4608)의 크기가 결과적으로 감소하게 되고, 그에 따라 이온 에너지의 크기가 (4615)에서 (4614)로 감소하는 반면 좁은 IEDF 폭이 유지된다.
- [0140] 이온 에너지가 조정되거나 그렇지 않은 경우, IEDF 폭은 도 47에서 도시된 바와 같이 좁은 IEDF 폭이 얻어진 이후에 확대될 수 있다. 여기서, $I_1 = I_c$ (또는 대안으로, I_1 및 I_c 사이에 관계를 제공하는 식 2)인 경우, I_c 는 조정될 수 있고, 그에 따라 변조된 주기 전압 함수(4702)의 펄스 사이에서의 부분의 기울기를 변경할 수 있다. 이온 전류 보상, I_c , 및 이온 전류, I_1 가 동일하지 않은 결과, 기관 전압은 실질적으로 일정(constant)에서 비-

일정(non-constant)으로 이동한다. 추가적인 결과는 IEDF 폭(4714)이 좁은 IEDF(4714)로부터 좁지 않은 IEDF(4702)으로 확장한다. I_c 가 I_1 로부터 더 멀어지도록 조정될수록 IEDF(4714) 폭이 더 커진다.

- [0141] 도 48은 각각의 이온 에너지 레벨이 좁은 IEDF(4814) 폭을 갖는 경우 하나 이상의 이온 에너지 레벨을 얻기 위해 사용될 수 있는 파워 서플라이 전압의 패턴을 도시한다. 파워 서플라이 전압(4806)의 크기는 각 사이클을 교번한다. 이것은 변조된 주기 전압 함수(4802)의 각 사이클에 대한 첨두 대 첨두 전압 및 ΔV 의 교번을 야기한다. 기관 전압(4812)은 교대로 기관 전압의 펄스 사이에서 교번하는 2개의 실질적인 일정한 전압을 갖는다. 이것은 좁은 IEDF(4814) 폭을 갖는 각각의 2개의 다른 이온 에너지를 야기한다.
- [0142] 도 49는 각각의 이온 에너지 레벨이 좁은 IEDF(4914) 폭을 갖는 경우 하나 이상의 이온 에너지 레벨을 얻기 위해 사용될 수 있는 파워 서플라이 전압의 다른 패턴을 도시한다. 여기서, 파워 서플라이 전압(4906)은 2개의 다른 크기 사이에서 교번하지만 교번 이전에 한번에 2개의 사이클을 갖는다. 도시된 바와 같이, V_{ps} (4906)이 모든 사이클 교번되어 평균 이온 에너지가 동일하다. 이것은 얼마나 다양한 다른 패턴의 V_{ps} (4906)이 동일한 이온 에너지를 얻기 위하여 사용될 수 있는지를 보여주는 단지 하나의 예이다.
- [0143] 도 50은 규정된 IEDF(5014)을 생성하기 위해 사용될 수 있는 파워 서플라이 전압, V_{ps} (5006) 및 이온 전류 보상, I_c (5004)의 조합을 도시한다. 여기서, 파워 서플라이 전압(5006)을 교번하는 것은 2개의 다른 이온 에너지를 야기한다. 부가적으로, 이온 전류, I_1 로부터 멀어지도록 이온 전류 보상(5004)을 조정하는 것은 각 이온 에너지에 대한 IEDF(5014) 폭이 확장될 수 있게 한다. 만일 이온 에너지가 충분히 근접하는 경우, 도시된 구체예와 같이, 양쪽 이온 에너지에 대한 IEDF(5014)은 하나의 큰 IEDF(5014)를 야기하도록 중첩될 것이다. 또한, 다른 변형예도 가능하지만, 이 실시예는 V_{ps} (5006) 및 I_c (5004)에 대한 조정의 조합이 규정된 이온 에너지 및 규정된 IEDFs(5014)을 얻기 위하여 어떻게 사용될 수 있는지를 나타낸다.
- [0144] 다음, 도 17a 및 17b를 참조하면, 본 발명의 다른 실시예를 나타낸 블록도가 도시된다. 도시된 바와 같이, 이들 실시예의 기관 지지부(1708)는 정전 척(1782)을 포함하고, 정전 척(1782)에 파워를 인가하기 위해 정전 척 서플라이(1780)가 이용된다. 어떤 변형예에서, 도 17a에 도시된 바와 같이, 상기 정전 척 서플라이(1780)는 기관 지지부(1708)에 직접 파워를 인가하도록 위치되며, 다른 변형예에서, 상기 정전 척 서플라이(1780)는 스위칭 모드 파워 서플라이와 관련하여 파워를 인가하도록 위치된다. 정미(net) DC 척킹 기능을 행하도록 별도의 전원 또는 제어부의 사용에 의해 직렬 척킹이 행해질 수 있음을 유의해야 한다. (예컨대, 블로킹 커패시터가 없는) 이 DC 결합 직렬 척킹 기능에 있어서, 다른 RF 소스와는 바람직하지 않은 간섭이 최소화될 수 있다.
- [0145] 도 18에는 본 발명의 또 다른 실시예를 나타낸 블록도가 도시되어 있으며, 플라스마 밀도를 생성하도록 일반적으로 기능하는 플라스마 파워 서플라이(1884)가 스위칭 모드 파워 서플라이(1806) 및 정전 척 서플라이(1880) 축을 따라 기관 지지부(1808)를 구동하도록 구성된다. 이 구체예에서, 각각의 플라스마 파워 서플라이(1884), 정전 척 서플라이(1880) 및 스위칭 모드 파워 서플라이(1806)는 별도의 조립체로 위치될 수 있거나, 또는 2 이상의 전원(1806, 1880, 1884)이 동일한 물리적 조립체로 놓이도록 구성될 수 있다. 바람직하게는, 도 18에 도시된 실시예는, 전기적 대칭 및 줄어든 아크 발생으로 인해 감소된 레벨을 얻기 위해 상부 전극(1886)(예컨대, 샤워 헤드)이 전기적으로 접지되도록 한다.
- [0146] 도 19를 참조하면, 본 발명의 또 다른 실시예를 나타낸 블록도가 도시된다. 도시된 바와 같이, 이 실시예의 스위칭 모드 파워 서플라이(1906)는, 부가적 플라스마 파워 서플라이에 대한 필요성 없이(예컨대, 플라스마 파워 서플라이 102, 202, 1202, 1702, 1884 없이) 플라스마를 점화(및 유지)함과 동시에 기관을 바이어스하도록 챔버(1904) 및 기관 지지부에 파워를 인가하도록 구성된다. 예컨대, 스위칭 모드 파워 서플라이(1806)는 기관 지지부에 바이어스를 제공하면서 플라스마를 점화하고 유지하기에 충분한 듀티 사이클로 동작될 수 있다.
- [0147] 도 20은 도 1-19를 참조하여 기술된 실시예와 관련하여 이용될 수 있는 제어부의 입력 파라미터 및 제어 출력의 블록도이다. 제어부의 도시는, 본원에 기술된 실시예와 관련하여 이용될 수 있는 예시적 제어 입력 및 출력의 간이화된 도시를 제공하기 위한 것이며, 이는 하드웨어 도면을 의도하는 것이 아니다. 실제 구현에 있어서, 도시된 제어부는 하드웨어, 소프트웨어, 펌웨어 또는 이들의 조합으로 실현될 수 있는 몇 개의 개별 소자 중에 분포될 수 있다.
- [0148] 상기한 실시예를 참조하면, 도 20에 도시된 제어부는 도 1을 참조하여 기술된 제어부(112); 도 2를 참조하여 기술된 제어부(212) 및 이온 제어부(220); 도 8을 참조하여 기술된 제어부(812) 및 이온 제어부(820); 도 12를 참조하여 기술된 이온 보상부(1260); 도 13을 참조하여 기술된 전류 제어부(1362); 각각, 도 17a 및 17b를 참조하

여 기술된 제어부(1712A, 1712B); 및 각각, 도 18 및 19를 참조하여 기술된 제어부(1812, 1912)의 하나 이상의 기능을 제공할 수 있다.

[0149] 도시된 바와 같이, 제어부에 대한 입력으로 이용될 수 있는 파라미터는 dV_0/dt 및 ΔV 를 포함하며, 이들은 도 13 및 도 14를 참조하여 더욱 상세히 기술된다. 기술된 바와 같이, dV_0/dt 는, 도 12, 도 13, 도 14, 도 15a-c 및 도 16을 참조하여 기술된 이온 에너지 분포 확산의 폭을 제어하는 제어 신호(I_{CC})를 제공하도록 이온 에너지 분포 확산 입력(ΔE)과 관련하여 이용될 수 있다. 또한, 선택적 피드백(ΔV)과 관련하여 이온 에너지 제어 입력(E_i)이, 도 1-11을 참조하여 보다 상세히 기술된 바와 같이 소망(또는 규정된) 이온 에너지 분포를 야기하도록 (도 3에 기술된 V_{bus} 에 영향을 미치는) 이온 에너지 제어 신호를 생성하기 위해 이용될 수 있다. 그리고, 많은 이-척킹(e-chucking) 실시예와 관련하여 이용될 수 있는 다른 파라미터는 DC 읍셋 입력이며, 이는 효율적 열 제어를 위해 척에 웨이퍼를 지지하도록 정전력을 제공한다.

[0150] 도 21은 본 발명의 일 실시예에 따른 플라즈마 처리 시스템(2100)을 도시한다. 상기 시스템(2100)은 기관(2106)의 상면(2118)을 에칭하기 위한 플라즈마(2104)를 둘러싸는 플라즈마 처리 챔버(2102)를 포함한다. 상기 플라즈마는 플라즈마 파워 서플라이(2122)에 의해 전원이 공급되는 (예컨대, 계내 또는 원격 또는 돌출되는) 플라즈마 소스(2112)에 의해 생성된다. 플라즈마(2104)와 기관(2106)의 상면(2118) 사이에 측정되는 플라즈마 시스 전압(V_{sheath})은 플라즈마 시스(2115)를 가로질러 플라즈마(2104)로부터의 이온을 가속시키며, 이는 가속된 이온이 기관(2106)의 상면(2118)에 충돌하고 기관(2106)(또는 포토레지스트에 의해 보호되지 않는 기관 2106의 일부)을 에칭시킨다. 플라즈마(2104)는 그라운드(예컨대, 플라즈마 처리 챔버 2102의 벽)에 대한 플라즈마 전위(V_3)에 있다. 기관(2106)은, 기관(2106)과 정전 척(2111)의 상면(2121) 사이의 척킹 전위(V_{chuck}) 및 정전 척(2111)을 통해 지지부(2108)에 정전적으로 유지되는 저면(2120)을 갖는다. 기관(2106)은 유전체이기 때문에 상면(2118)에서의 제1 전위(V_1) 및 저면(2120)에서의 제2 전위(V_2)를 가질 수 있다. 정전 척의 상면(2121)은 기관의 저면(2120)과 접하며, 이에 따라 이들 두 개의 면(2120, 2121)은 동일한 전위, V_2 에 있다. 상기 제1 전위(V_1), 척킹 전위(V_{chuck}) 및 제2 전위(V_2)는 스위칭 모드 파워 서플라이(2130)에 의해 생성되고 제1 도체(2124)를 통해 정전 척(2111)에 제공되는 DC 바이어스 또는 읍셋을 갖는 AC 파형을 통해 제어된다. 선택적으로, 상기 AC 파형은 제1 도체(2124)를 통해 제공되고, DC 파형은 선택적인 제2 도체(2125)를 통해 제공된다. 스위칭 모드 파워 서플라이(2130)의 AC 및 DC 출력은 제어부(2132)를 통해 제어될 수 있으며, 이 제어부는 또한 스위칭 모드 파워 서플라이(2130)의 각종 거동을 제어하도록 구성된다.

[0151] 이온 에너지 및 이온 에너지 분포는 제1 전위(V_1)의 함수이다. 스위칭 모드 파워 서플라이(2130)는 소망의(또는 규정된) 이온 에너지 및 이온 에너지 분포를 생성하도록 소망의 제1 전위(V_1)를 야기하기 위해 형성된 AC 파형을 제공한다. AC 파형은 RF로 될 수 있으며 도 5, 6, 11, 14, 15a, 15b 및 15c에 도시된 바와 같은 비정현파 파형을 갖는다. 제1 전위(V_1)는 도 14에 도시된 바와 같이 전압 변경(ΔV)에 비례할 수 있다. 제1 전위(V_1)는 또한, 플라즈마 전압(V_3) - 플라즈마 시스 전압(V_{sheath})과 같다. 그러나, 플라즈마 전압(V_3)은 종종 플라즈마 시스 전압(V_{sheath})(예컨대, 50 V - 2000 V)에 비해 적기 때문에(예컨대, 20 V 미만), 제1 전위(V_1) 및 플라즈마 시스 전압(V_{sheath})은 거의 동일하며 구현의 목적을 위해 동일하게 처리될 수 있다. 이에 따라, 플라즈마 시스 전압(V_{sheath})은 이온 에너지에 영향을 주기 때문에, 제1 전위(V_1)는 이온 에너지 분포에 비례한다. 일정한 제1 전위(V_1)를 유지함으로써, 플라즈마 시스 전압(V_{sheath})은 일정하게 되며, 이에 따라 모든 이온이 동일한 에너지를 통해 가속되어, 좁은 이온 에너지 분포가 달성된다. 플라즈마 전압(V_3)은 플라즈마 소스(2112)를 통해 플라즈마(2104)에 전해지는 에너지로부터 비롯된다.

[0152] 기관(2106)의 상면(2118)에서의 제1 전위(V_1)는 정전 척(2111)으로부터의 용량성 대전과 시스(2115)를 통과하는 전자와 이온으로부터의 전하 형성의 조합을 통해 형성된다. 스위칭 모드 파워 서플라이(2130)로부터의 AC 파형은, 제1 전위(V_1)가 실질적으로 일정하도록 기관(2106)의 상면(2118)에서의 결과적 전하 형성 및 시스(2115)를 통한 이온 및 전자의 전달의 효과를 상쇄시키도록 형성된다.

[0153] 정전 척(2111)에 기관(2106)을 지지하는 척킹 힘은 척킹 전위(V_{chuck})의 함수이다. 스위칭 모드 파워 서플라이(2130)는, 제2 전위(V_2)가 제1 전위(V_1)와 다른 전위로 되도록 DC 바이어스 또는 DC 읍셋을 AC 파형에

제공한다. 이 전위차는 척킹 전위(V_{chuck})를 야기한다. 척킹 전위(V_{chuck})는 정전 척(2111)의 상면(2221)으로부터 기관(2106) 내측의 기준 층까지 측정될 수 있으며, 상기 기준 층은 (기준 층의 기관 2106 내의 정확한 위치가 변할 수 있는) 기관(2106)의 저면(2120)을 제외한 기관 내측의 임의의 용기부를 포함할 수 있다. 이에 따라, 척킹이 제2 전위(V_2)에 의해 그에 비례하여 제어된다.

[0154] 이 실시예에서, 제2 전위(V_2)는 AC 파형(환언하면, DC 옵션이 AC 파형의 첨두 대 첨두 전압보다 큰 DC 옵션을 갖는 AC 파형)에 의해 변조되는 스위칭 모드 파워 서플라이(2130)의 DC 옵션과 같다. 상기 DC 옵션은, 스위칭 모드 파워 서플라이(2130) 출력의 DC 성분이 제2 전위(V_2)보다 크고 AC 성분이 도외시 또는 무시될 수 있도록, AC 파형보다 실질적으로 더 클 수 있다.

[0155] 기관(2106) 내의 전위는 제1 전위(V_1)와 제2 전위(V_2) 사이에서 변동한다. 기관(2106)과 정전 척(2111) 간의 쿨롱 흡인력이 척킹 전위(V_{chuck}) 극성에 무관하게 존재하기 때문에 척킹 전위(V_{chuck})는 양극성 또는 음극성으로 될 수 있다(예컨대, $V_1 > V_2$ 또는 $V_1 < V_2$).

[0156] 제어부(2132)와 관련된 스위칭 모드 파워 서플라이(2130)는 결정적으로 또한 센서 없이 각종 전압을 모니터링 할 수 있다. 특히, 이온 에너지(예컨대, 평균 에너지 및 이온 에너지 분포)는 AC 파형의 파라미터(예컨대, 기울기 및 단차)에 기초하여 결정적으로 모니터링 된다. 예컨대, 플라즈마 전압(V_3), 이온 에너지 및 이온 에너지 분포는 스위칭 모드 파워 서플라이(2130)에 의해 발생하는 AC 파형의 파라미터에 비례한다. 특히, AC 파형의 하강 에지의 ΔV (예컨대, 도 14 참조)는 제1 전위(V_1) 및 그에 따라 이온 에너지에 비례한다. 제1 전위(V_1)를 일정하게 유지함으로써, 이온 에너지 분포가 깊고 좁게 될 수 있다.

[0157] 비록 제1 전위(V_1)가 직접 측정될 수 없고 스위칭 모드 파워 서플라이의 출력과 제1 전위(V_1) 간의 상관 관계가 기관(2106)의 용량 및 처리 파라미터에 기초하여 변할 수 있지만, ΔV 와 제1 전위(V_1) 사이의 비례 상수는 짧은 처리 시간이 경과된 후 실증적으로 결정될 수 있다. 예컨대, AC 파형의 하강 에지 ΔV 가 50 V이 경우, 비례 상수는 경험적으로 소정 기관 및 공정에 대해 2인 것이 발견되었으며, 제1 전위(V_1)는 100 V로 기대될 수 있다. 제1 전위 V_1 및 스텝 전압 ΔV 사이의 비례는(이온 에너지, eV) 식 4에 의해 도시된다. 이에 따라, 이온 에너지 및 이온 에너지 분포와 함께 제1 전위(V_1)는 플라즈마 처리 챔버(2102) 내의 어떠한 센서 없이 스위칭 모드 파워 서플라이의 AC 파형에 기초하여 결정될 수 있다. 부가적으로, 제어부(2132)와 관련한 스위칭 모드 파워 서플라이(2130)는, 척킹이 일어난 때 및 그 경우(예컨대, 기관 2106이 척킹 전위 V_{chuck} 를 통해 정전 척 2111에 지지되는지)를 모니터링 할 수 있다.

[0158] 척킹 전위(V_{chuck})를 제거 또는 감소시킴으로써 디척킹(dechucking)이 수행된다. 이는 제1 전위(V_1)와 동일한 제2 전위를 설정함으로써 행해질 수 있다. 환언하면, 척킹 전압(V_{chuck})를 0 V에 접근시키기 위해 DC 옵션 및 AC 파형이 조정될 수 있다. 종래의 디척킹 방법에 비해, 시스템(2100)은 더욱 빠른 디척킹 및 그에 따른 스루풋(throughput)을 달성하며, 그 이유는 디척킹을 달성하기 위해 DC 옵션 및 AC 파형 모두가 조정될 수 있기 때문이다. 또한, DC 및 AC 파워 서플라이가 스위칭 모드 파워 서플라이(2130)에 있을 때, 이들 회로는 (DC 및 AC 파워 서플라이의 통상적인 병렬 구성에 비해) 더 통합되고, 서로 근접되며, 단일 제어부(2132)를 통해 제어될 수 있으며, 더욱 신속히 출력을 변경시킬 수 있다. 본원에 기술된 실시예에 의해 가능한 디척킹의 속도는 또한, 플라즈마(2104)가 소멸된 후 또는 적어도 플라즈마 소스(2112)로부터의 파워가 오프된 후 디척킹을 가능케 한다.

[0159] 플라즈마 소스(2112)는 다양한 형태를 가질 수 있다. 예컨대, 일 실시예에서, 플라즈마 소스(2112)는, 플라즈마(2104)를 유지하고 점화하는 챔버(2102) 내에 RF 필드를 설정하는 플라즈마 처리 챔버(2102) 내측에 전극을 포함한다. 다른 실시예에서, 플라즈마 소스(2112)는, 이온화 전자장을 원격으로 발생하는 원격 돌출 플라즈마 소스를 포함하며, 이는 이온화 전자장을 사용하여 플라즈마 처리 챔버 내에 플라즈마(2104)를 유지하고 점화하는 플라즈마 처리 챔버(2102) 내로 이온화 전자장을 돌출 또는 연장한다. 또한, 상기 원격 돌출 플라즈마 소스는, 이온화 전자장이 플라즈마 처리 챔버(2102)로의 루트를 통과하는 필드 전달부(예컨대, 도전성 튜브)를 포함할 수 있으며, 상기 통과 시간 동안, 이온화 전자장은, 플라즈마 처리 챔버(2102) 내의 필드 강도가 필드가 원격 돌출 플라즈마 소스에서 먼저 발생되었을 때 필드 강도의 1/10 또는 1/100 또는 1/1000 또는 극히 작은 부분으로 되도록 감쇠된다. 상기 플라즈마 소스(2112)는 정확한 축적으로 도시하지 않았다.

- [0160] 상기 스위칭 모드 파워 서플라이(2130)는 플로팅 상태로 될 수 있기 때문에, 그라운드와 스위칭 모드 파워 서플라이(2130) 사이에 직렬로 접속된 (도시되지 않은) DC 전원에 의해 임의의 DC 오프셋으로 바이어스될 수 있다. 상기 스위칭 모드 파워 서플라이(2130)는, 스위칭 모드 파워 서플라이(2130) 내의 AC 및 DC 전원을 통해(예컨대, 도 22, 도 23, 도 26 참조), 또는 스위칭 모드 파워 서플라이(2130) 내의 AC 전원 및 스위칭 모드 파워 서플라이(2130) 외부의 DC 전원을 통해(예컨대, 도 24, 도 27 참조) DC 오프셋을 갖는 AC 파형을 제공할 수 있다. 일 실시예에서, 상기 스위칭 모드 파워 서플라이(2130)는 접지될 수 있고 또한 스위칭 모드 파워 서플라이(2130)와 정전 척(2111) 사이에 직렬로 결합된 플로팅 DC 전원에 직렬로 결합될 수 있다.
- [0161] 제어부(2132)는, 스위칭 모드 파워 서플라이(2130)가 AC 및 DC 전원을 모두 포함할 때 스위칭 모드 파워 서플라이의 AC 및 DC 출력을 제어할 수 있다. 스위칭 모드 파워 서플라이(2130)가 DC 전원에 직렬로 접속될 때, 제어부(2132)는 스위칭 모드 파워 서플라이(2130)의 AC 출력만 제어할 수 있다. 다른 실시예에서, 제어부(2132)는 스위칭 모드 파워 서플라이(2130)에 결합된 AC 파워 서플라이와 스위칭 모드 파워 서플라이(2130)를 모두 제어할 수 있다. 당업자는, 단일 제어부가 도시되어 있으나, 정전 척(2111)에 제공된 DC 오프셋 및 AC 파형을 제어하기 위해 다른 제어부가 구현될 수 있음을 인식할 것이다.
- [0162] 정전 척(2111)은 유전체(예컨대, 세라믹)로 될 수 있기 때문에 실질적으로 DC 전압의 차단 통로로 될 수 있으며, 또는 도핑된 세라믹과 같은 반도체 재료로 될 수 있다. 어느 경우에도, 정전 척(2111)은 제1 전위(V_1)를 형성하도록 기관(2106)(통상적으로 유전체)의 상면(2118)에 전압을 용량적으로 결합하는 정전 척(2111)의 상면(2121)에 제2 전위(V_2)를 가질 수 있다.
- [0163] 플라즈마의 형상 및 크기는 반드시 정확한 축적으로 나타낼 필요는 없다. 예컨대, 플라즈마(2104)의 에지는, 도시된 플라즈마(2104)가 임의의 특정한 플라즈마 밀도로 그려지지 않은 경우의 임의의 플라즈마 밀도에 의해 규정될 수 있다. 유사하게, 도시된 플라즈마(2104) 형상에도 불구하고 적어도 일부 플라즈마 밀도가 전체 플라즈마 처리 챔버(2102)를 채운다. 도시된 플라즈마(2104)의 형상은 일차적으로 시스(2115)를 나타내기 위한 의도로서, 상기 시스는 플라즈마(2104)보다 실질적으로 더 적은 플라즈마 밀도를 갖는다.
- [0164] 도 22는 플라즈마 처리 시스템(2200)의 다른 실시예를 도시한다. 도시된 실시예에서, 스위칭 모드 파워 서플라이(2230)는 직렬로 접속된 DC 전원(2234) 및 AC 전원(2236)을 포함한다. 제어부(2232)는, DC 전원(2234)과 AC 전원(2236) 파형의 바이어스 또는 오프셋을 모두 제어함으로써 스위칭 모드 파워 서플라이(2230)의 DC 오프셋 출력을 갖는 AC 파형을 제어하도록 구성된다. 이 실시예는 또한, 척(2211)에 내장된 그리드 또는 메쉬 전극(2210)을 갖는 정전 척(2211)을 포함한다. 스위칭 모드 파워 서플라이(2230)는 그리드 전극(2210)에 AC 및 DC 바이어스를 모두 제공한다. DC 바이어스보다 실질적으로 적고 그에 따라 무시될 수 있는 AC 성분과 함께 DC 바이어스는 그리드 전극(2210)에 제3 전위(V_4)를 설정한다. 제3 전위(V_4)가 (기관 2206의 저면 2220을 제외한) 기관(2206) 내의 임의의 기준 층에서의 전위와 다를 때, 척킹 전위(V_{chuck}) 및 쿨롱 척킹 힘이 설정되어 정전 척(2211)에 기관(2206)을 지지하도록 한다. 상기 기준 층은 그리드 전극(2210)에 평행한 가상 평면이다. AC 파형은, 기관(2206) 상면(2218)의 제1 전위(V_1)를 제어하기 위해 기관을 통해 또한 정전 척(2211)의 일부를 통해 그리드 전극(2210)으로부터 용량적으로 결합한다. 플라즈마 전위(V_3)는 플라즈마 시스 전압(V_{sheath})에 대해 무시할 수 있기 때문에, 제1 전위(V_1) 및 플라즈마 시스 전압(V_{sheath})은 거의 같으며, 실제로는 동일한 것으로 고려된다. 따라서, 제1 전위(V_1)는 시스(2215)를 통해 이온을 가속하도록 사용되는 전위와 같다.
- [0165] 일 실시예에서, 정전 척(2211)은, 이 척(2211)의 본체를 통한 임의의 전위차가 무시가능할 정도로 충분히 도전성으로 되도록 도핑될 수 있으며, 이에 따라 그리드 또는 메쉬 전극(2210)은 실질적으로 제2 전위(V_2)와 동일한 전압으로 될 수 있다.
- [0166] 그리드 전극(2210)은 기관(2206)에 평행하게 정전 척(2211)에 내장된 임의의 도전성 평면 장치로 될 수 있으며, 스위칭 모드 파워 서플라이(2230)에 의해 바이어스되고 척킹 전위(V_{chuck})를 설정하도록 구성된다. 상기 그리드 전극(2210)은 정전 척(2211)의 하부에 내장된 것으로 도시되었으나, 그리드 전극(2210)은 기관(2206)에 가까이 위치되거나 또는 멀리 떨어져 위치될 수 있다. 그리드 전극(2210)은 또한, 그리드 패턴을 갖도록 형성되지 않을 수 있다. 일 실시예에서, 그리드 전극(2210)은 그리드 형상이 아닌 솔리드 전극으로 될 수 있고 또는 비솔리드 구조(예컨대, 체커보드 패턴)를 가질 수 있다. 일 실시예에서, 정전 척(2211)은 세라믹 또는 다른 절연체로 되며, 이에 따라 그리드 전극(2210)상의 제3 전위(V_4)는 정전 척(2211)의 상면(2221)의 제1 전위(V_1)와 같지

않다. 다른 실시예에서, 정전 척(2211)은 약간 도전성의 도핑 세라믹이며, 이에 따라 그리드 전극(2210)상의 제 3 전위(V_4)는 정전 척(2211)의 상면(2221)의 제2 전위(V_2)와 같을 수 있다.

[0167] 스위칭 모드 파워 서플라이(2230)는 비정현파일 수 있는 AC 출력을 발생한다. 이 스위칭 모드 파워 서플라이(2230)는, DC 전원(2234)이 AC 도전성이고 AC 전원(2236)이 DC 도전성이기 때문에 직렬로 DC 및 AC 전원(2234, 2236)을 동작시킬 수 있다. DC 도전성이 아닌 예시적 AC 전원은, DC 전압 또는 전류가 제공되지 않을 때 훼손될 수 있는 임의의 선형 증폭기이다. AC 도전성 및 DC 도전성 전원의 사용은 스위칭 모드 파워 서플라이(2230)에 사용된 부품의 수를 감소시킨다. 예컨대, DC 전원(2234)이 AC 차단을 갖는 경우, AC 바이패스 또는 DC 차단 부재(예컨대, 커패시터)가 DC 전원(2234)과 병렬로 배치될 수 있다. AC 전원(2236)이 DC 차단을 갖는 경우, DC 바이패스 또는 AC 차단 부재(예컨대, 인덕터)가 AC 전원(2236)과 병렬로 배치될 수 있다.

[0168] 이 실시예에서, AC 전원(2238)은 일반적으로, 기관(2206)의 상면(2218)에 충돌하는 이온에 대한 소망(또는 규정된) 이온 에너지 분포를 야기하도록 제어가능한 방식으로 정전 척(2211)에 전압 바이어스를 인가하도록 구성된다. 보다 구체적으로, AC 전원(2236)은, 그리드 전극(2210)에 특정 파워 레벨로 하나 이상의 특정 파형을 인가함으로써 소망(또는 규정된) 이온 에너지 분포를 야기하도록 구성된다. 또한, 특히 AC 전원(2236)은, 특정 이온 에너지를 야기하도록 특정 파워 레벨을 인가하며, (도시되지 않은) 파형 메모리에 저장된 파형 데이터에 의해 규정된 하나 이상의 전압 파형을 사용하여 특정 파워 레벨을 인가한다. 따라서, 기관(2206)(또는 다른 플라즈마-기반 처리)의 제어된 예칭을 수행하기 위해 하나 이상의 특정 이온 충돌 에너지가 선택될 수 있다. 일 실시예에서, AC 전원(2236)은 스위칭 모드 구성을 사용할 수 있다(예컨대, 도 25-27 참조). 스위칭 모드 파워 서플라이(2230), 특히 AC 전원(2236)은, 본원에서 다양한 실시예로 기재된 AC 파형을 발생할 수 있다.

[0169] 당업자는 그리드 전극(2210)이 필요하지 않을 수도 있고 다른 실시예에서는 그리드 전극(2210) 없이 구현될 수 있음을 인식할 것이다. 당업자는 또한, 그리드 전극(2210)이, 척킹 전위(V_{chuck})를 설정하도록 사용될 수 있는 수많은 장치의 일례에 불과함을 인식할 것이다.

[0170] 도 23은 플라즈마 처리 시스템(2300)의 다른 실시예를 도시한다. 도시된 실시예는 정전 척(2311)에 AC 파형 및 DC 바이어스를 제공하기 위한 스위칭 모드 파워 서플라이(2330)를 포함한다. 상기 스위칭 모드 파워 서플라이(2330)는 DC 전원(2334) 및 AC 전원(2336)을 포함하며, 이들은 모두 접지될 수 있다. AC 전원(2336)은 제1 도체(2324)를 통해 정전 척(2311)에 내장된 제1 그리드 또는 메쉬 전극(2310)에 제공되는 AC 파형을 발생한다. 상기 AC 전원(2336)은 제1 그리드 또는 메쉬 전극(2310)상에 전위(V_4)를 설정한다. DC 전원(2334)은 제2 도체(2325)를 통해 정전 척(2311)에 내장된 제2 그리드 또는 메쉬 전극(2312)에 제공되는 DC 바이어스를 발생한다. 상기 DC 전원(2334)은 제2 그리드 또는 메쉬 전극(2312) 상에 전위(V_5)를 설정한다. 상기 전위(V_4 및 V_5)은 각각 AC 및 DC 전원(2336, 2334)을 통해 각각 제어될 수 있다. 그러나, 제1 및 제2 그리드 또는 메쉬 전극(2310, 2312)은 또한, 정전 척(2311)의 일부를 통해 그리드 또는 메쉬 전극(2310, 2312) 간에 용량적 결합 및/또는 DC 결합을 이룰 수 있다. AC 또는 DC 결합이 존재하면, 전위(V_4 및 V_5)가 결합될 수 있다. 당업자는, 제1 및 제2 그리드 또는 메쉬 전극(2310, 2312)이, 제2 그리드 전극(2312) 보다 기관에 가깝게 제1 그리드 전극(2310)의 배치를 포함하는 정전 척(2311)에 걸쳐 다양한 개소에 배치될 수 있음을 인식할 것이다.

[0171] 도 24는 플라즈마 처리 시스템(2400)의 다른 실시예를 도시한다. 이 실시예에서, 스위칭 모드 파워 서플라이(2430)는 정전 척(2144)에 AC 파형을 제공하며, 여기서 스위칭 모드 파워 서플라이(2430) 출력은 DC 전원(2434)에 의해 제공되는 DC 바이어스에 의해 상쇄된다. 스위칭 모드 파워 서플라이(2430)의 AC 파형은 좁은 이온 에너지 분포를 갖는 플라즈마(2404)로부터의 이온이 기관과 충돌하도록 제어부(2435)에 의해 선택되는 파형을 갖는다. 상기 AC 파형은 비정현파(예컨대, 사각형파 또는 펄스형)로 될 수 있고 스위칭 모드 파워 서플라이(2430)의 AC 전원(2436)을 통해 발생될 수 있다. 척킹은 제어부(2433)에 의해 제어되는 DC 전원(2434)으로부터의 DC 읍셋을 통해 제어된다. 상기 DC 전원(2434)은 그라운드와 스위칭 모드 파워 서플라이(2430) 사이에 직렬로 결합될 수 있다. 상기 스위칭 모드 파워 서플라이(2430)은, 그의 DC 바이어스가 DC 전원(2434)에 의해 설정될 수 있도록 플로팅된다.

[0172] 당업자는 도시된 실시예가 두 개의 독립적 제어부(2433, 2435)를 도시하고 있으나, 이들은 선택적 제어부(2432)와 같은 단일의 기능 유닛, 장치, 또는 시스템에 결합될 수 있음을 인식할 것이다. 또한, 제어부(2433, 2435)는 서로 통신하고 처리 자원을 공유하도록 결합될 수 있다.

[0173] 도 25는 플라즈마 처리 시스템(2500)의 다른 실시예를 도시한다. 도시된 실시예는 (도시되지 않은) DC 전원에 의해 제공되는 DC 읍셋을 가질 수 있는 AC 파형을 생성하는 스위칭 모드 파워 서플라이(2530)를 포함한다. 상기

스위칭 모드 파워 서플라이는, 전압 및 전류 제어부(2537, 2539)를 포함하는 선택적 제어부(2535)를 통해 제어될 수 있다. 상기 스위칭 모드 파워 서플라이(2530)는, 전압 제어부(2537)에 의해 제어되는 전압 출력을 갖는 제어가능한 전압원(2538), 및 전류 제어부(2539)에 의해 제어되는 전류 출력을 갖는 제어가능한 전류원(2540)을 포함할 수 있다. 상기 제어가능한 전압원(2538) 및 전류원(2540)은 병렬 구성으로 될 수 있다. 제어가능한 전류원(2540)은 플라즈마(2504)와 기관(2506) 사이에 이온 전류를 보상하도록 구성된다.

[0174] 상기 전압 및 전류 제어부(2537, 2539)는 서로 통신 가능하게 결합될 수 있다. 상기 전압 제어부(2537)는 또한, 제어가능한 전압원(2538)의 스위칭 출력(2539)을 제어할 수 있다. 상기 스위칭 출력(2539)은 도시된 바와 같이 병렬로 두 개의 스위치를 포함할 수 있고, 또는 제어가능한 전압원(2538)의 출력을 소망 AC 파형(예컨대, 비정현파)로 변환하는 임의의 회로를 포함할 수 있다. 이들 두 개의 스위치를 통해, 제어가능한 전압원(2538)으로부터의 제어된 전압 또는 AC 파형이 제어가능한 전류원(2540)의 제어된 전압 출력과 결합되어 스위칭 모드 파워 서플라이(2530)의 AC 파형 출력을 생성할 수 있도록 된다.

[0175] 상기 제어가능한 전압원(2538)은 소정의 극성을 갖는 것으로 도시되었으나, 당업자는 도시된 것에 대한 역극성도 동일하게 가능함을 인식할 것이다. 선택적으로, 스위칭된 출력(2539)과 함께 제어가능한 전압원 및 전류원(2538, 2540)은 AC 전원(2536)의 일부로 될 수 있으며 상기 AC 전원(2536)은 스위칭 모드 파워 서플라이(2530)의 내측 또는 외측에 있는 (도시되지 않은) DC 전원과 직렬로 배치될 수 있다.

[0176] 도 26은 플라즈마 처리 시스템(2600)의 또 다른 실시예를 도시한다. 이 도시된 실시예에서, 스위칭 모드 파워 서플라이(2630)는 정전 척(2611)에 DC 옵셋을 갖는 AC 파형을 제공한다. 상기 파형의 AC 성분은 스위칭된 출력(2539)을 통해 서로 접속된 제어가능한 전압원(2538) 및 제어가능한 전류원(2540)의 병렬 결합을 통해 발생된다. 상기 DC 옵셋은 그라운드와 제어가능한 전압원(2538) 사이에 직렬로 결합된 DC 전원(2634)에 의해 발생된다. 일 실시예에서, 상기 DC 전원(2634)은 접지가 아닌 플로팅 상태로 될 수 있다. 비슷하게, 스위칭 모드 파워 서플라이(2630)는 플로팅 또는 접지될 수 있다.

[0177] 상기 시스템(2600)은 스위칭 모드 파워 서플라이(2630)의 출력을 제어하기 위한 하나 이상의 제어부를 포함할 수 있다. 제1 제어부(2632)는 예컨대 제2 제어부(2633) 및 제3 제어부(2635)를 통해 스위칭 모드 파워 서플라이(2630)의 출력을 제어할 수 있다. 제2 제어부(2633)는, DC 전원(2634)에 의해 생성된 스위칭 모드 파워 서플라이(2630)의 DC 옵셋을 제어할 수 있다. 제3 제어부(2635)는, 제어가능한 전압원(2638) 및 제어가능한 전류원(2640)을 제어함으로써 스위칭 모드 파워 서플라이(2630)의 AC 파형을 제어할 수 있다. 일 실시예에서, 전압 제어부(2637)는 제어가능한 전압원(2638)의 전압 출력을 제어하고 전류 제어부(2639)는 제어가능한 전류원(2640)의 전류를 제어할 수 있다. 상기 전압 및 전류 제어부(2637, 2639)는 서로 통신할 수 있고 또한 제3 제어부(2635)의 일부로 될 수 있다.

[0178] 당업자는, 전원(2634, 2638, 2640)에 대한 각종 구성의 제어부를 기술한 상기 실시예가 제한되지 않는 것이고, 각종의 다른 실시예가 본 발명으로부터 벗어남이 없이 구현될 수 있음을 이해할 것이다. 예컨대, 제3 제어부(2635) 또는 전압 제어부(2637)는, 제어가능한 전압원(2638)과 제어가능한 전류원(2640) 사이의 스위칭 출력(2639)을 제어할 수 있다. 다른 예로서, 제2 및 제3 제어부(2633, 2635)는, (비록 상기와 같이 도시되지 않았지만) 서로 통신 상태로 될 수 있다. 또한, 상기 제어가능한 전압원(2638)과 제어가능한 전류원(2640)의 극성 역시 예시적인 것으로 제한적이지 않다.

[0179] 상기 스위칭 출력(2639)은 AC 파형을 형성하도록 두 개의 병렬 스위치를 번갈아 스위칭함으로써 동작할 수 있다. 상기 스위칭 출력(2639)은, 예시적으로, MOSFET 및 BJT를 포함하는 임의의 다양한 스위치를 포함할 수 있다. 하나의 변형예에서, DC 전원(2634)은 제어가능한 전류원(2640)과 정전 척(2611) 사이에 배치될 수 있고(요컨대, DC 전원 2634는 플로팅 상태로 될 수 있다), 스위칭 모드 파워 서플라이(2630)는 접지될 수 있다.

[0180] 도 27은 플라즈마 처리 시스템(2700)의 다른 실시예를 도시한다. 이 변형예에서, 스위칭 모드 파워 서플라이(2730)는 다시 접지될 수 있으나, 전원(2734)은, 스위칭 모드 파워 서플라이(2730) 내에 병합되는 대신, 별도의 부재로 되고 단지 스위칭 모드 파워 서플라이(2730) 내의 부재가 아닌 전체 스위칭 모드 파워 서플라이(2730)에 DC 옵셋을 제공한다.

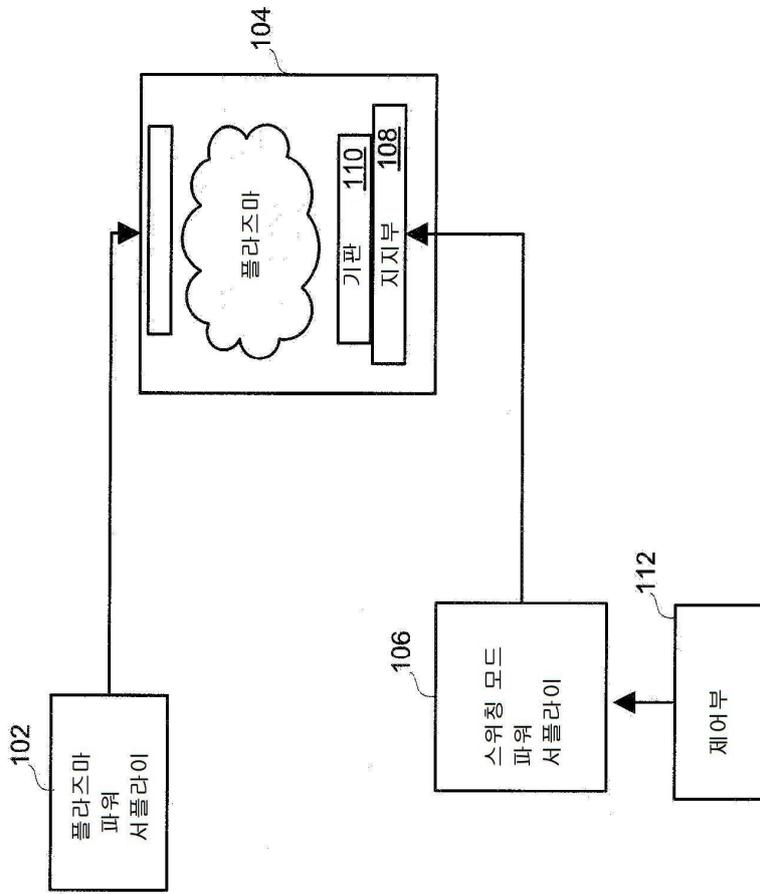
[0181] 도 28은 본 발명의 일 실시예에 따른 방법(2800)을 도시한다. 상기 방법(2800)은, 플라즈마 챔버에 기관을 위치시키는 동작(2802)을 포함한다. 상기 방법(2800)은 또한, 플라즈마 챔버에 플라즈마를 형성하는 동작(2804)을 포함한다. 이와 같은 플라즈마는 원격 돌출된 소스 내에 또는 그를 통해 형성될 수 있다. 상기 방법(2800)은 또한, 스위칭 파워 동작(2806)을 포함한다. 상기 스위칭 파워 동작(2806)은 기관에 주기 전압 함수를 인가하도록

기관에 대한 파워를 제어가능하게 스위칭하는 단계를 수반한다. 상기 주기 전압 함수는 펄스형태 파형(예컨대, 사각형 파) 또는 AC 파형인 것으로 고려되고 스위칭 모드 파워 서플라이와 직렬로 DC 전원에 의해 발생하는 DC 옵셋을 포함한다. 일 실시예에서, 상기 DC 전원은 스위칭 모드 파워 서플라이에 병합될 수 있으며 그에 따라 스위칭 모드 파워 서플라이의 AC 전원과 직렬로 될 수 있다. 상기 DC 옵셋은, 정전 척의 상면과 기관내의 기준 층간에 전위차를 발생하고 이 전위차는 척킹 전위로 지칭된다. 정전 척과 기관 간의 척킹 전위는 정전 척에 기관을 지지하여 처리 동안 기관이 움직이지 않도록 한다. 상기 방법(2800)은 또한, 주기 전압 함수가 다중 사이클에 걸쳐 변조되는 변조 동작(2808)을 포함한다. 상기 변조는, 시간 평균 방식으로 소망(또는 규정된) 이온 에너지 분포를 야기하도록 기관의 표면에서의 소망(또는 규정된) 이온 에너지 분포에 응답하여 수행된다.

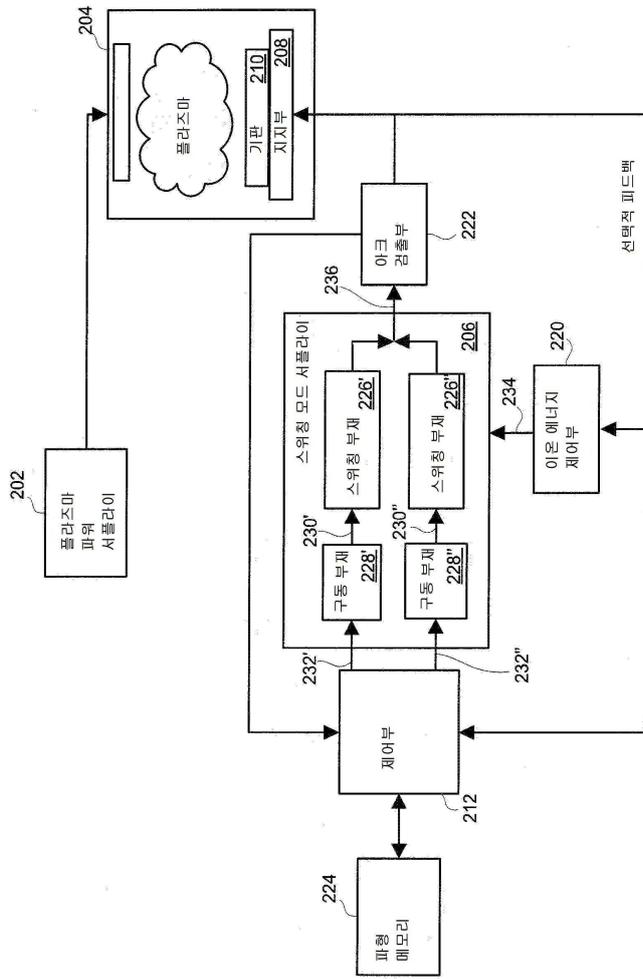
[0182] 도 29는 본 발명의 일 실시예에 따른 다른 방법(2900)을 도시한다. 상기 방법(2900)은, 플라즈마 챔버에 기관을 배치시키는 동작(2902)을 포함한다. 상기 방법(2900)은 또한, 플라즈마 챔버에 플라즈마를 형성하는 동작(2904)을 포함한다. 이와 같은 플라즈마는 원격 돌출된 소스 내에 또는 그를 통해 형성될 수 있다. 상기 방법(2900)은 또한, 적어도 하나의 이온 에너지 분포 설정의 수신 동작(2906)을 포함한다. 상기 수신 동작(2906)에서의 설정은 기관의 표면에서의 하나 이상의 이온 에너지를 나타낼 수 있다. 상기 방법(2900)은 또한, (1) 시간 평균 방식으로 소망의(또는 규정된) 이온 에너지 분포를 야기하고; 또한 (2) 시간 평균 방식으로 소망의 척킹 전위를 야기하도록, 기관에 대한 파워가 제어가능하게 스위칭되는 스위치 파워 동작(2908)을 더 포함한다. 상기 파워는 AC 파형 및 DC 옵셋을 가질 수 있다.

[0183] 결론적으로, 본 발명은, 무엇보다도, 스위칭 모드 파워 서플라이를 사용하여 소망의(또는 규정된) 이온 에너지를 선택적으로 발생하기 위한 방법 및 장치를 제공한다. 당업자는 본 발명, 본 발명의 사용 및 본 발명의 구성에서 다양한 변화 및 대체로 여기서 설명한 실시예에 의해 달성되는 것과 실질적으로 동일한 결과를 달성할 수 있음을 즉각적으로 인식할 수 있다. 따라서, 본 발명을 개시된 예시적인 형태로 한정하고자 하는 것이 아니다. 다양한 변화, 변형 및 대체적인 구성인 청구범위에 표현된 본 발명의 범위 및 사상 내에 있다.

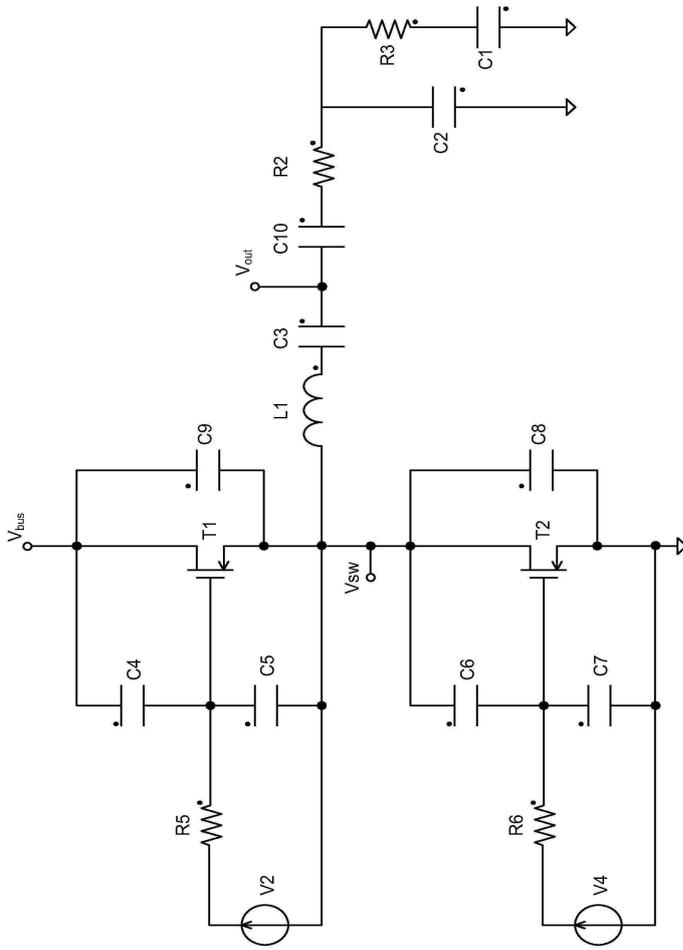
도면
도면1



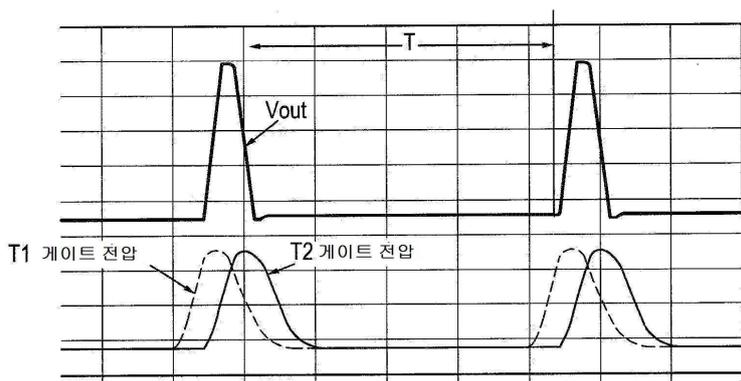
도면2



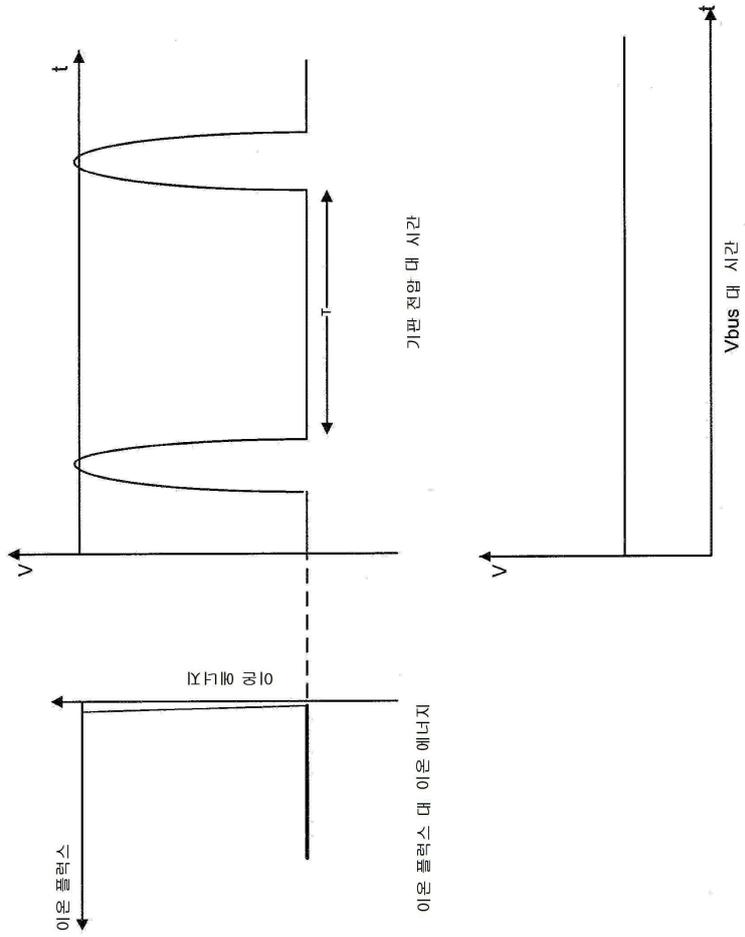
도면3



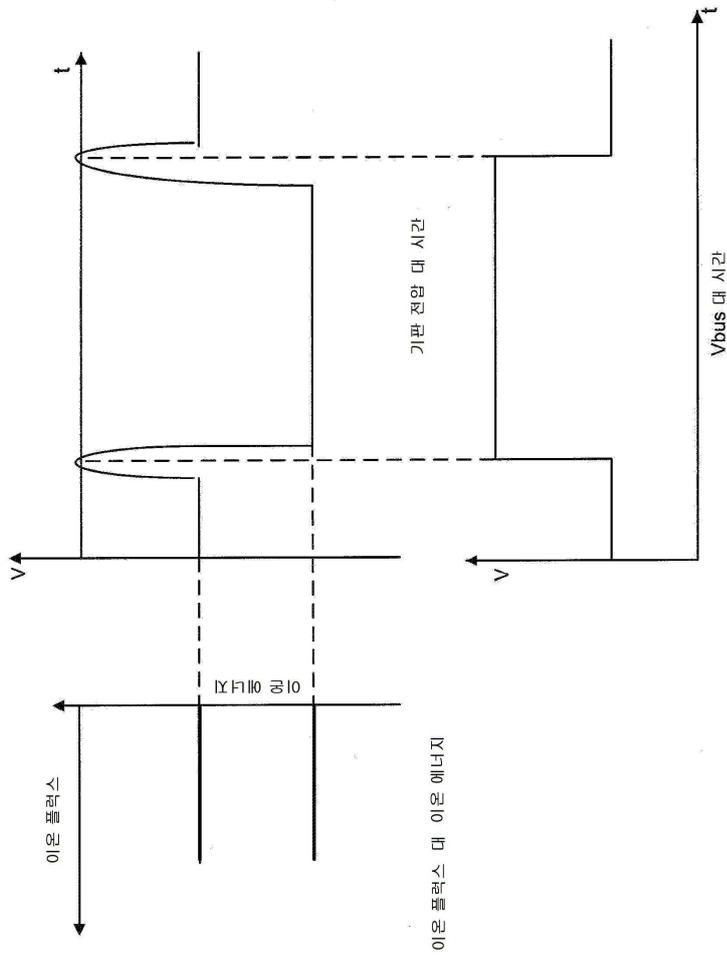
도면4



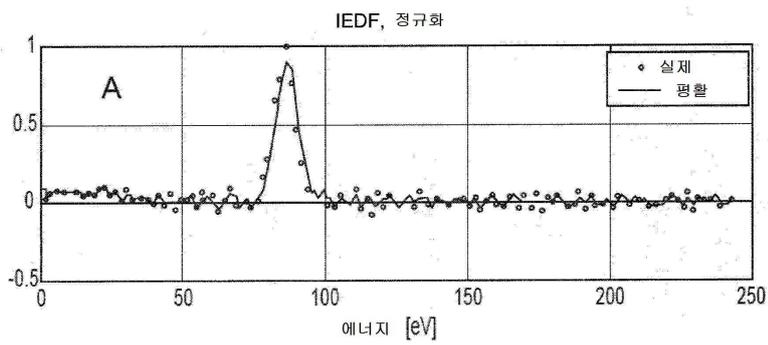
도면5



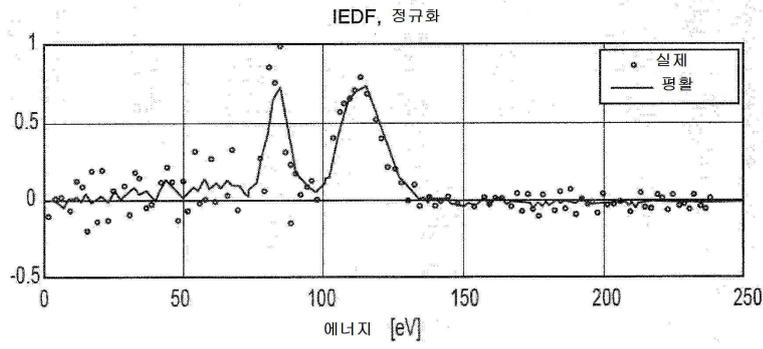
도면6



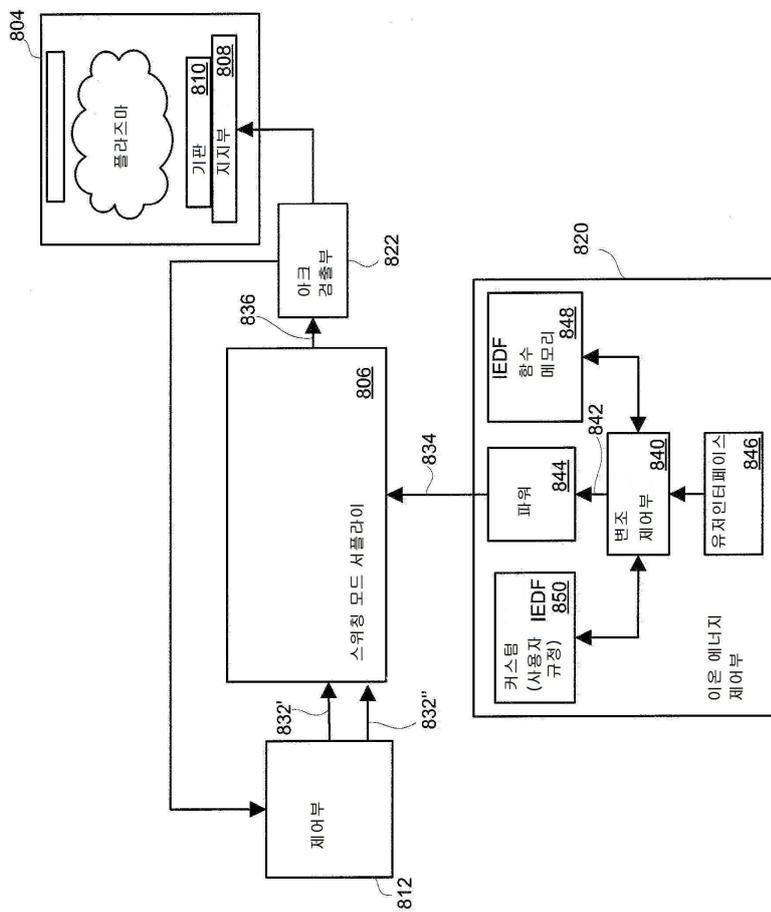
도면7a



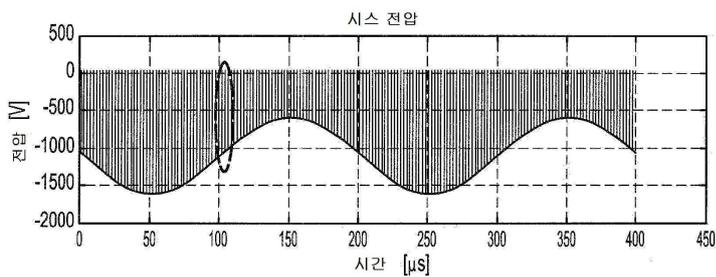
도면7b



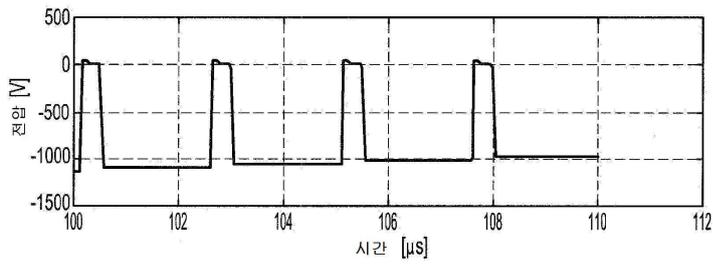
도면8



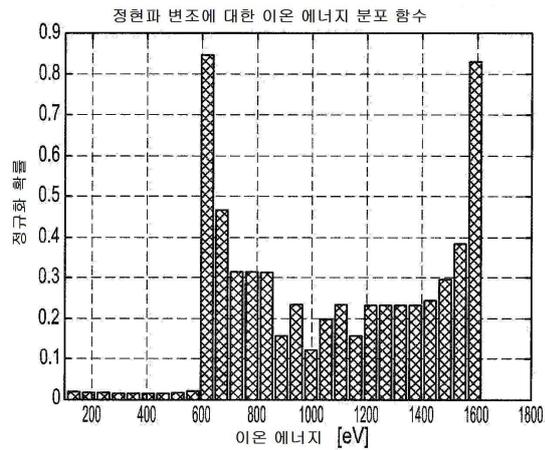
도면9a



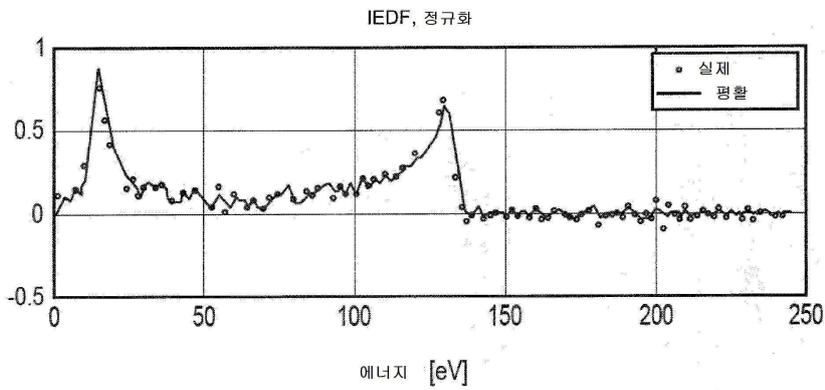
도면9b



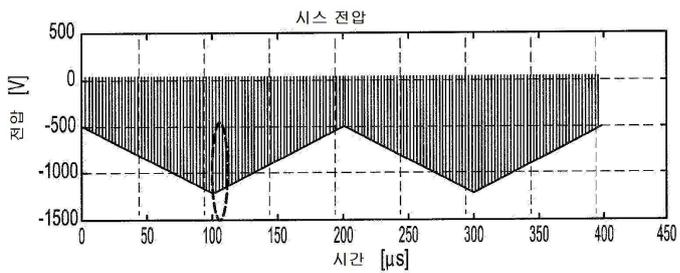
도면9c



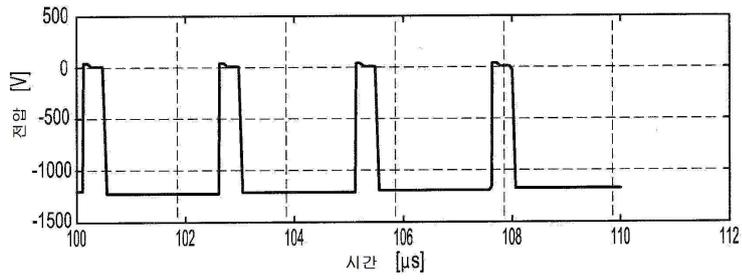
도면9d



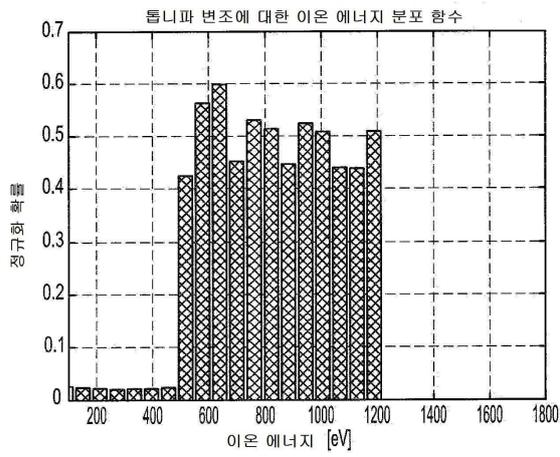
도면10a



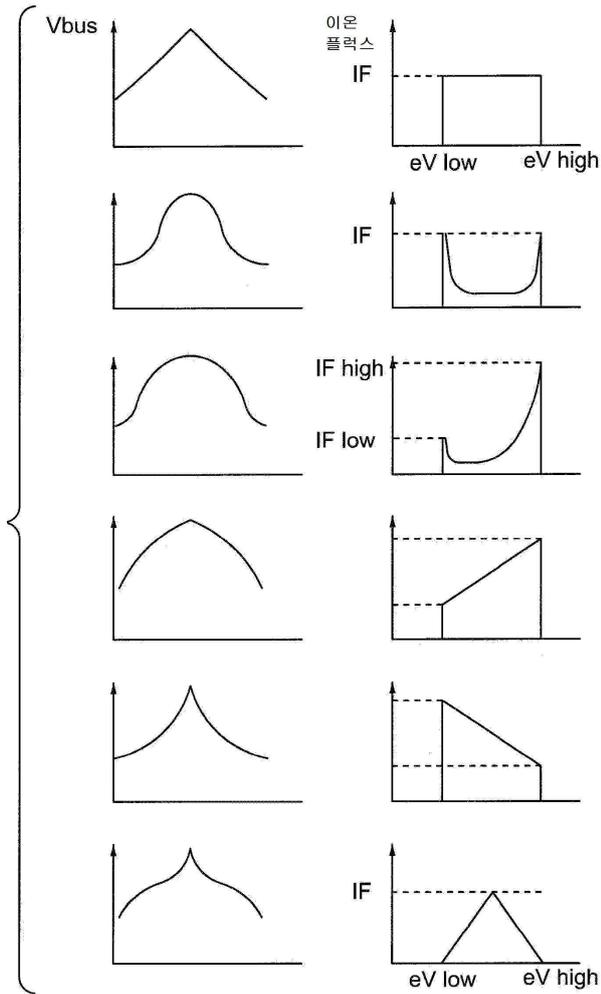
도면10b



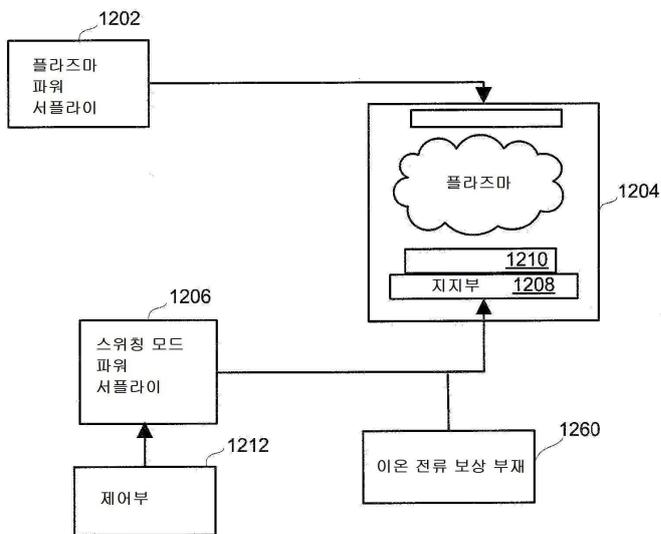
도면10c



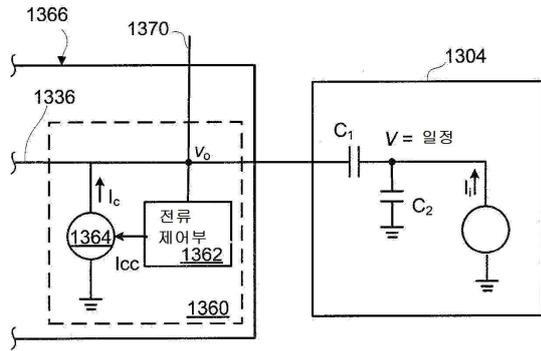
도면11



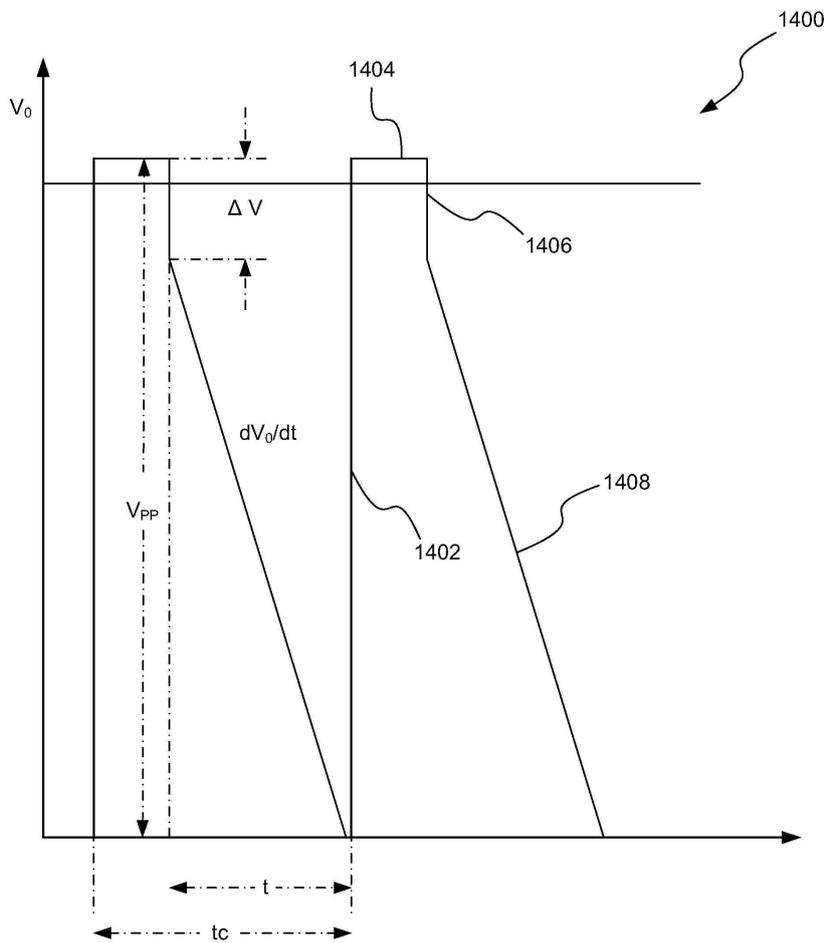
도면12



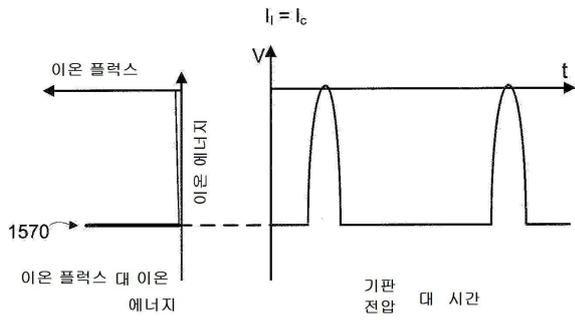
도면13



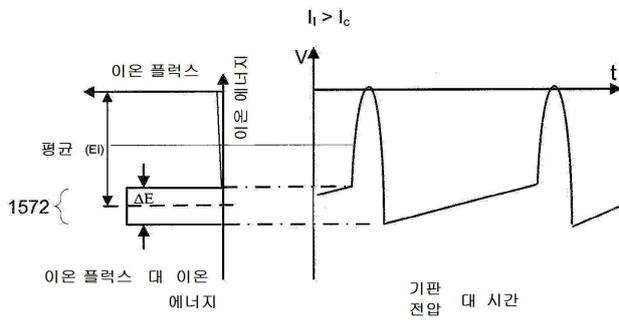
도면14



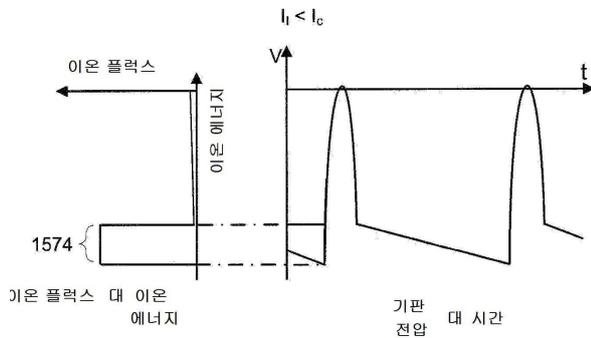
도면15a



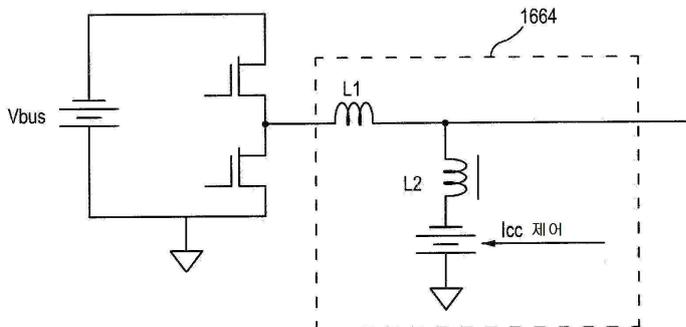
도면15b



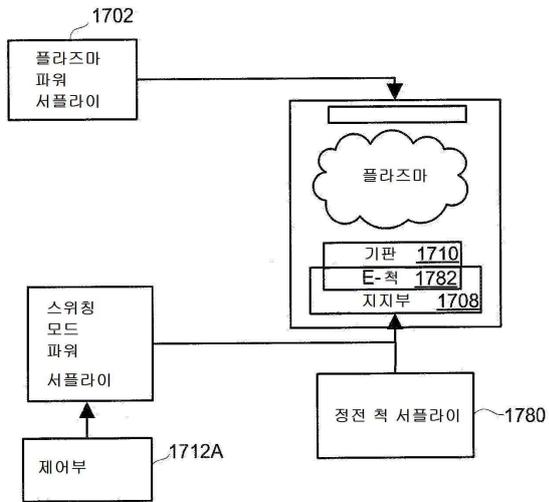
도면15c



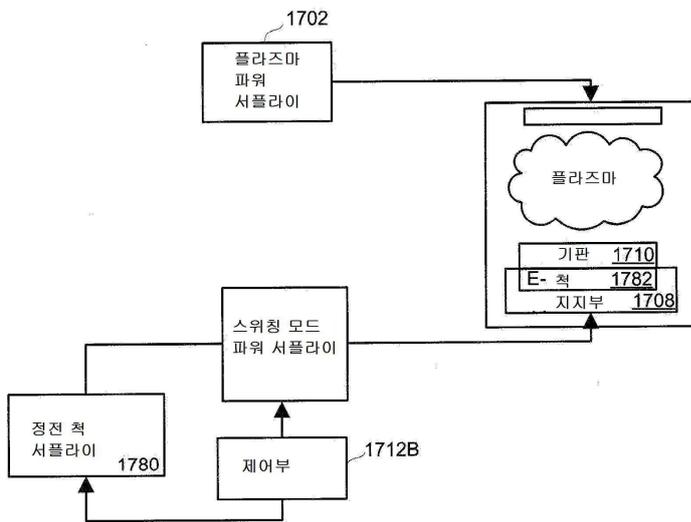
도면16



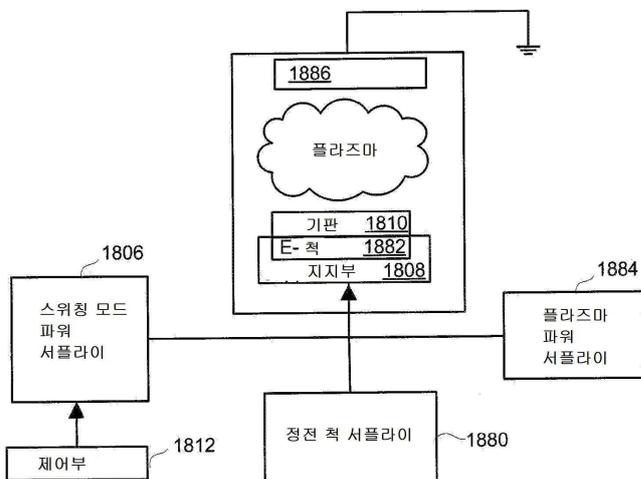
도면17a



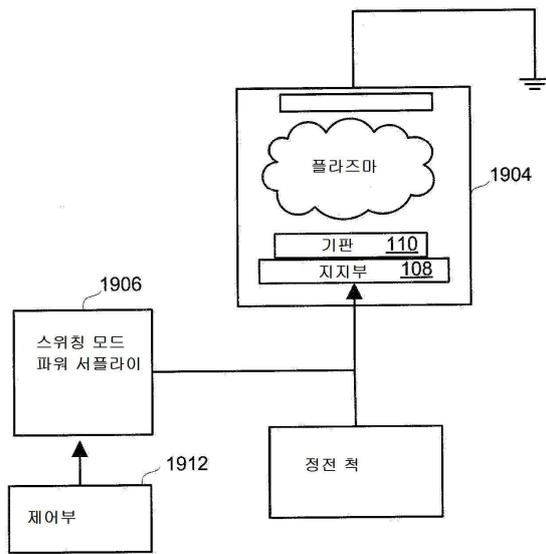
도면17b



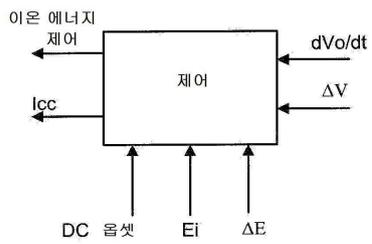
도면18



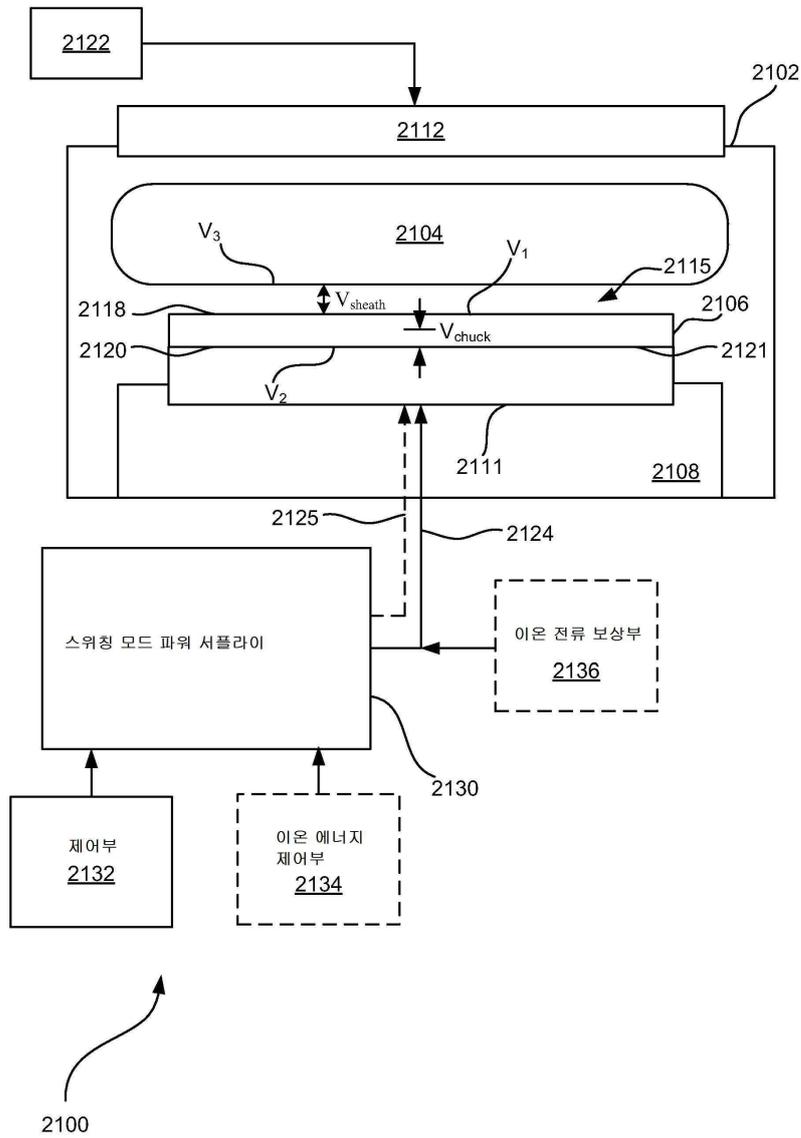
도면19



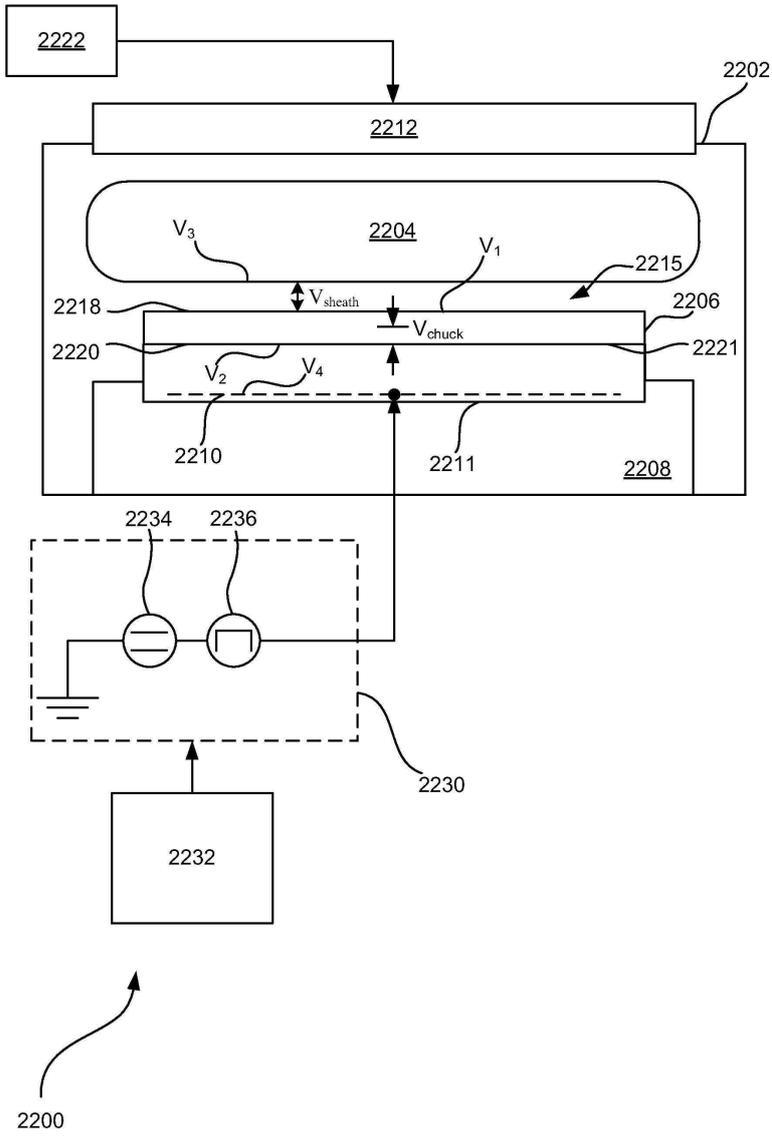
도면20



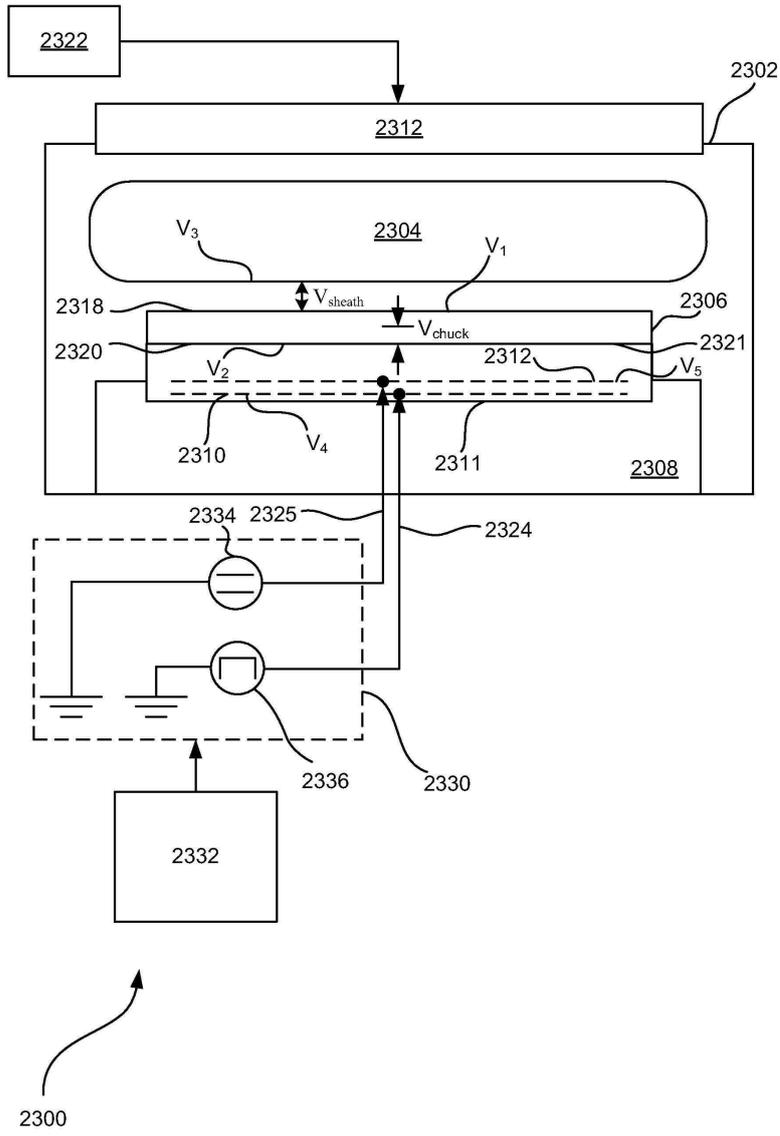
도면21



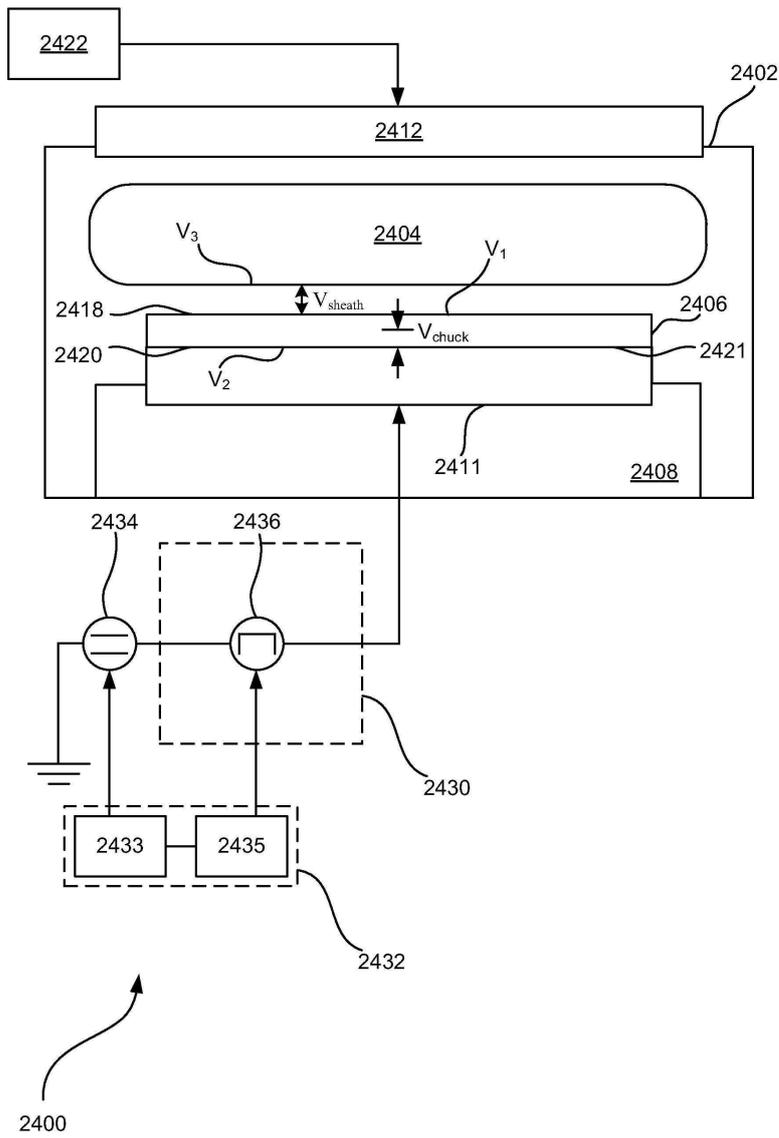
도면22



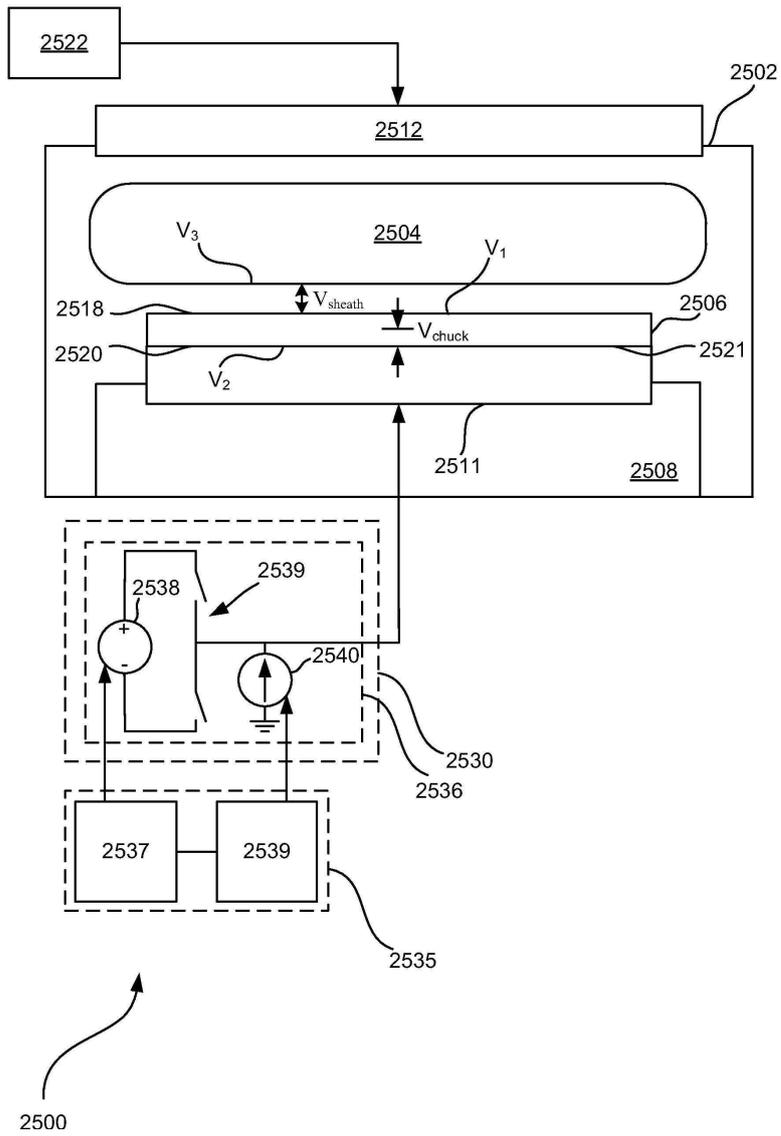
도면23



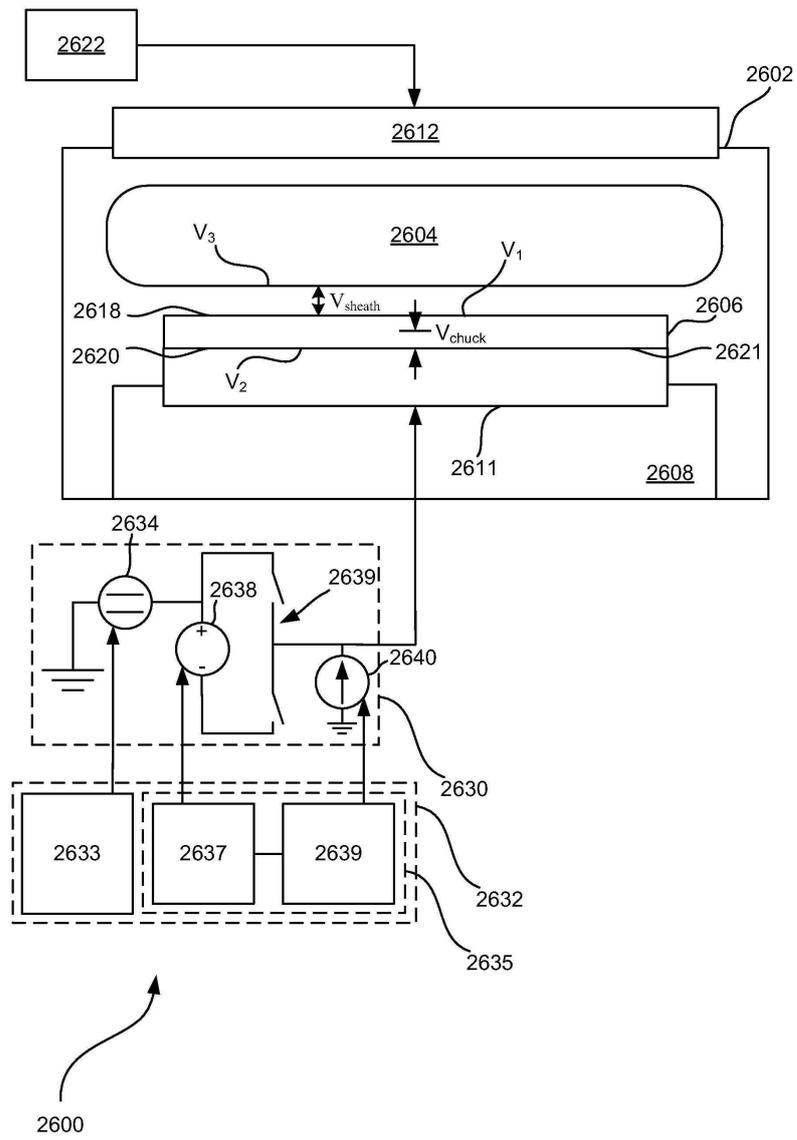
도면24



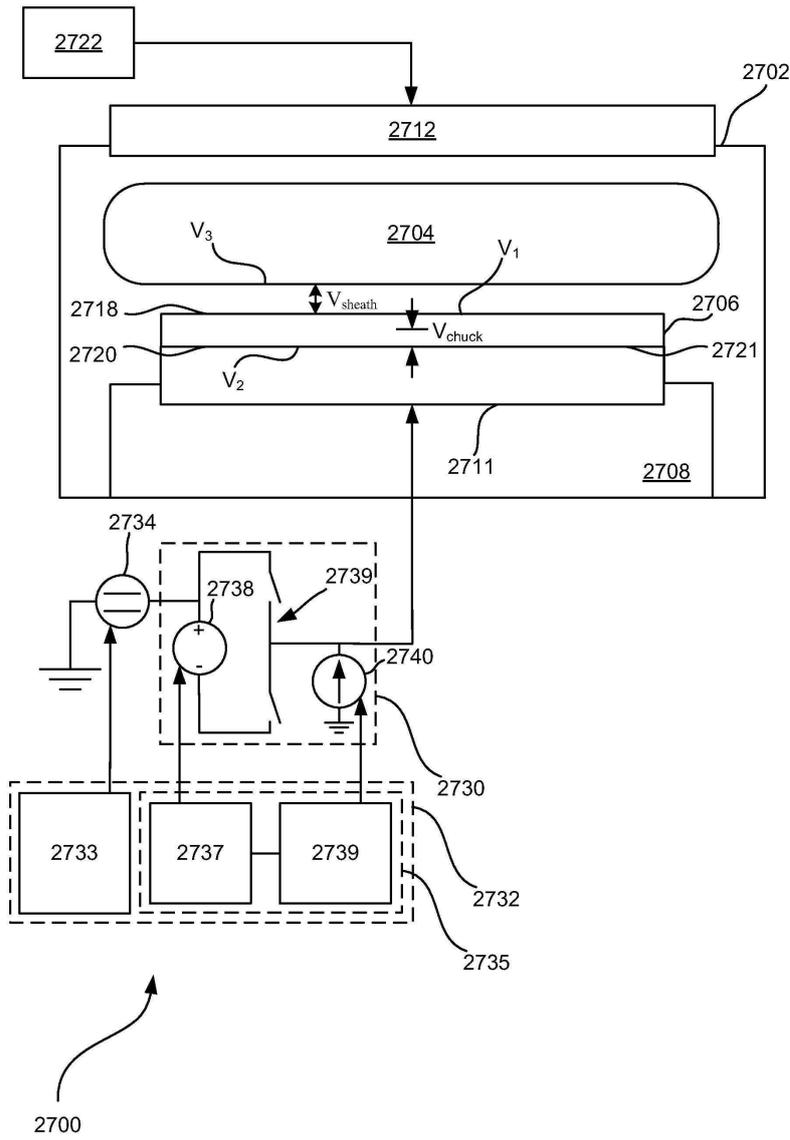
도면25



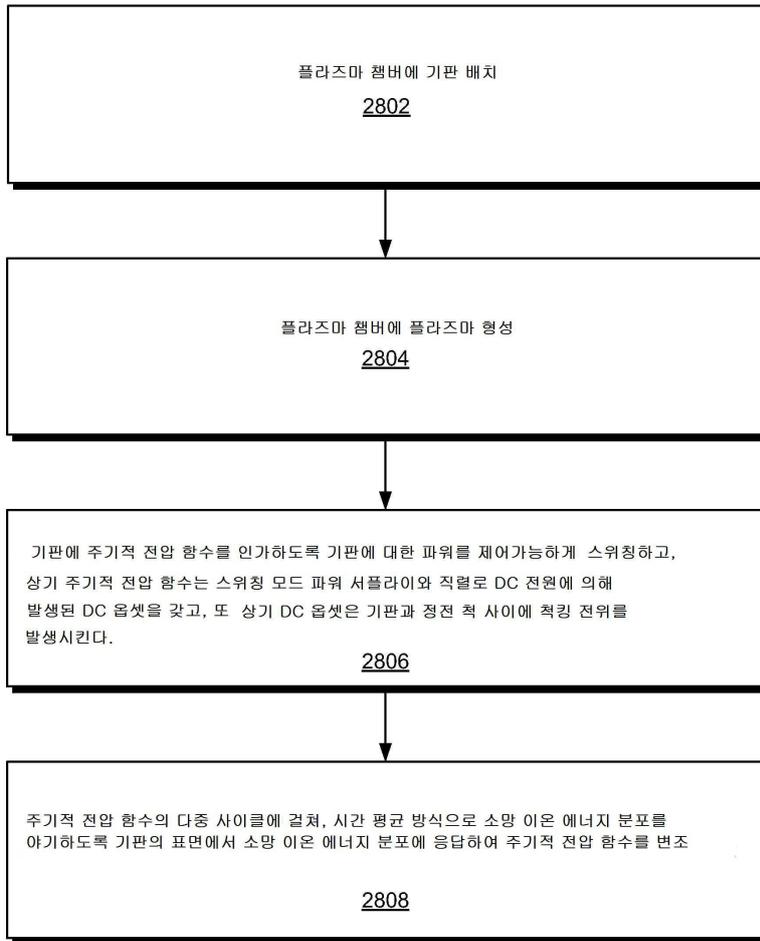
도면26



도면27

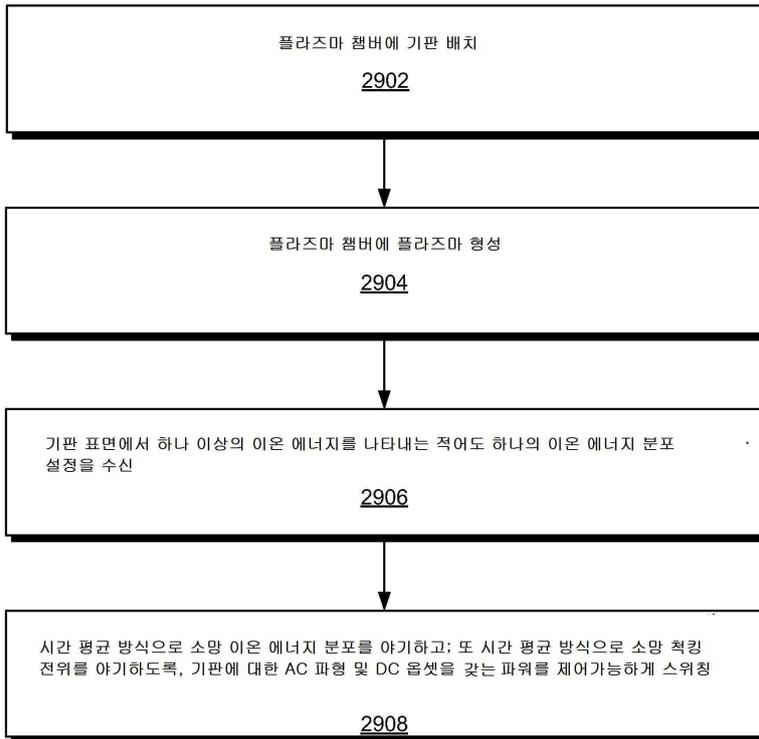


도면28



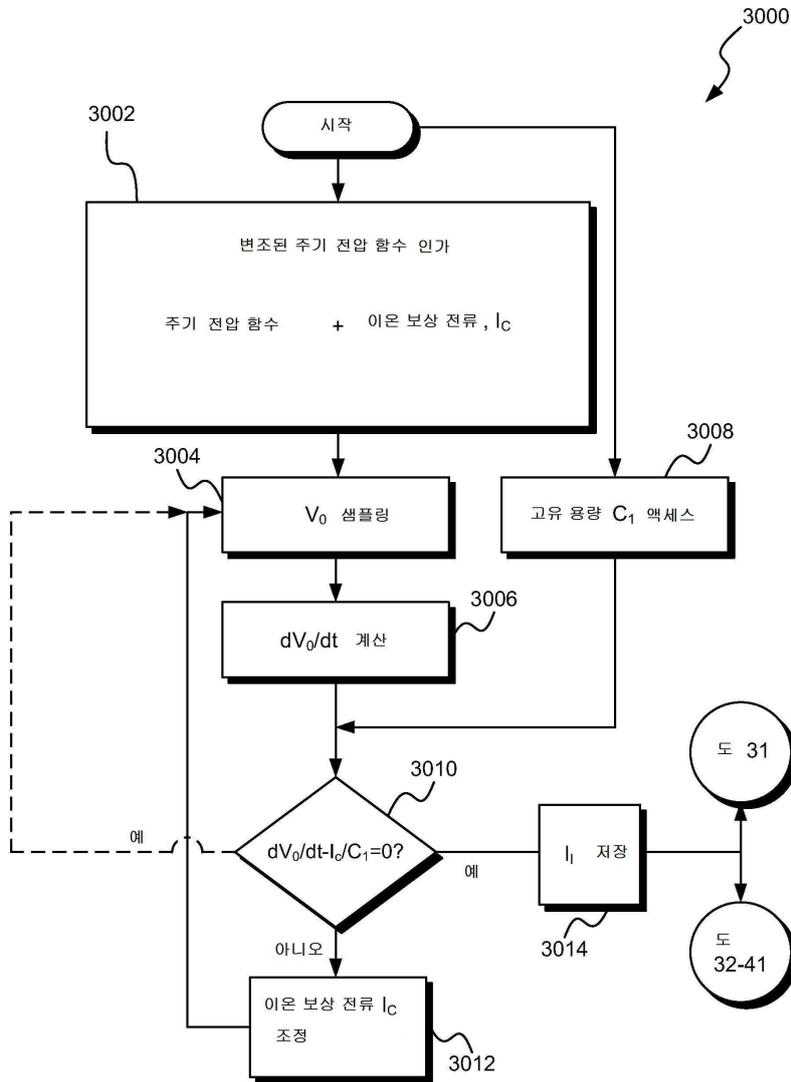
2800 ↗

도면29

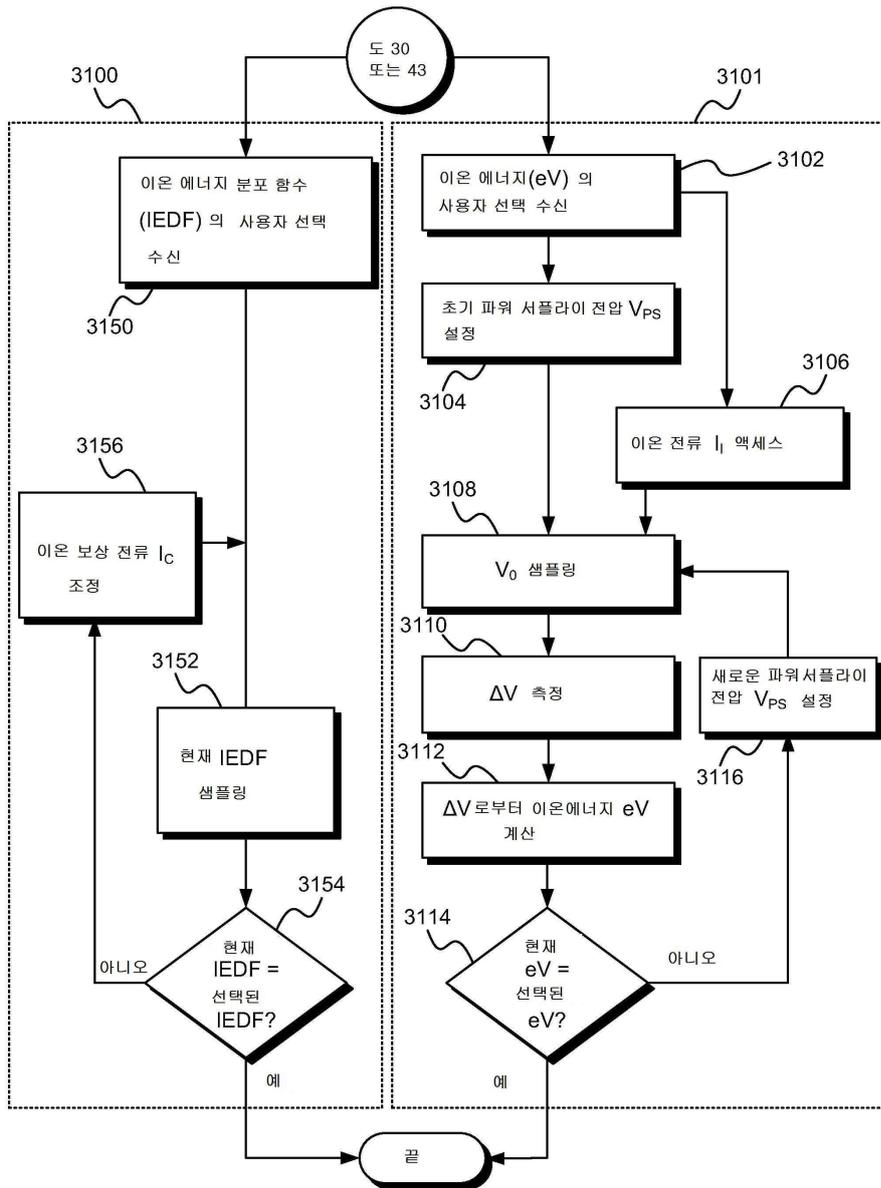


2900

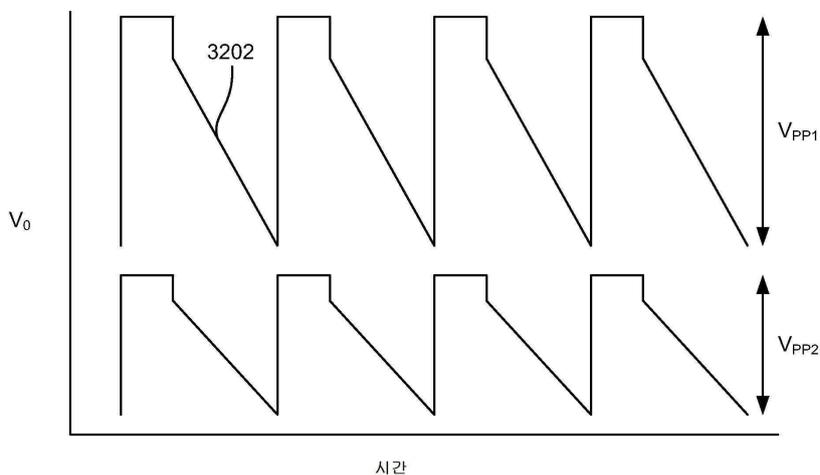
도면30



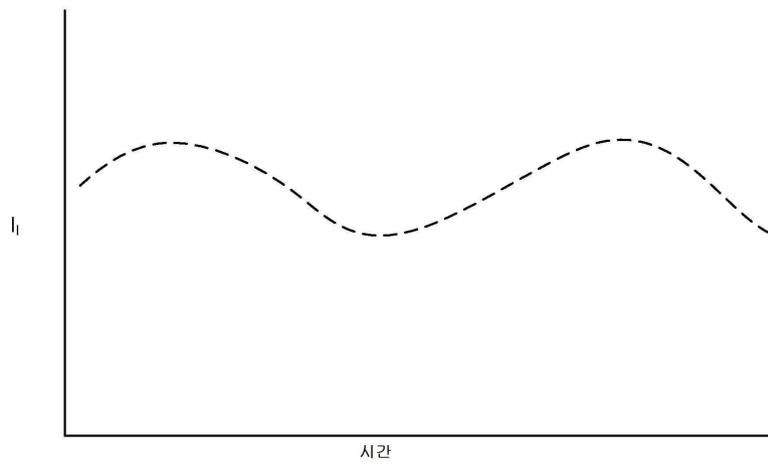
도면31



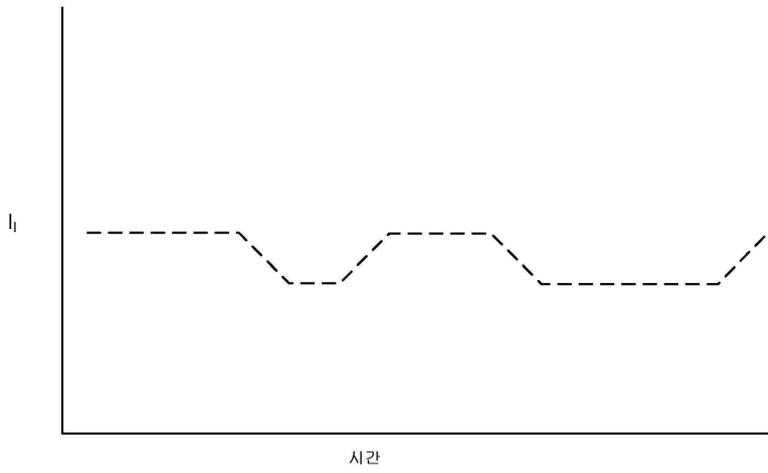
도면32



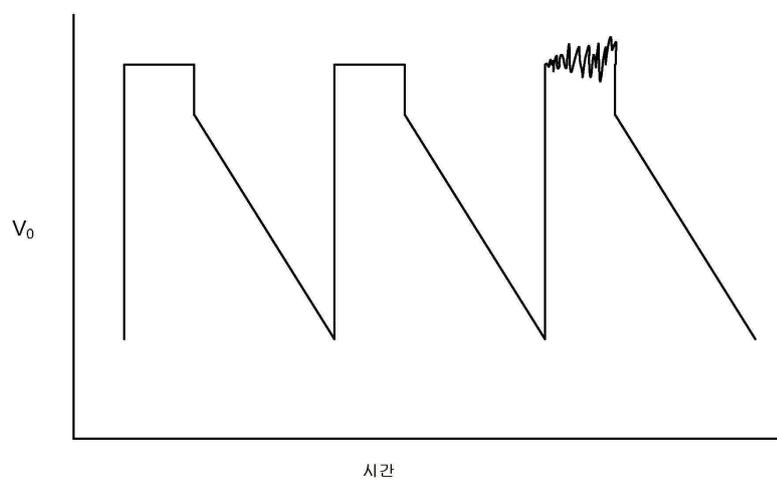
도면33



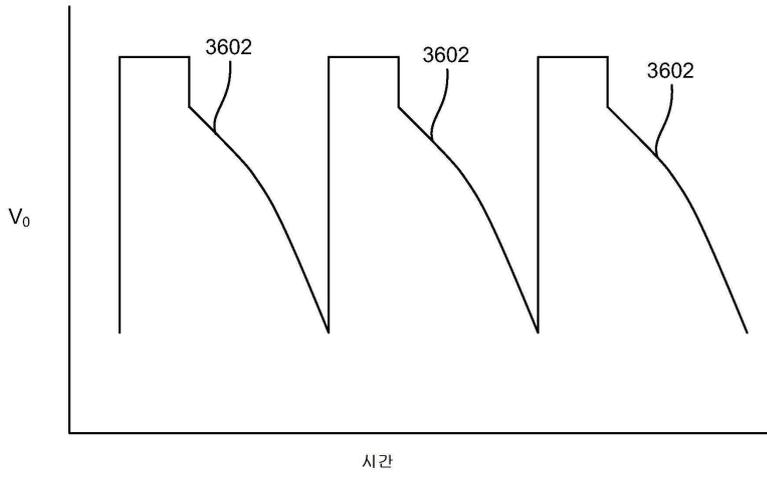
도면34



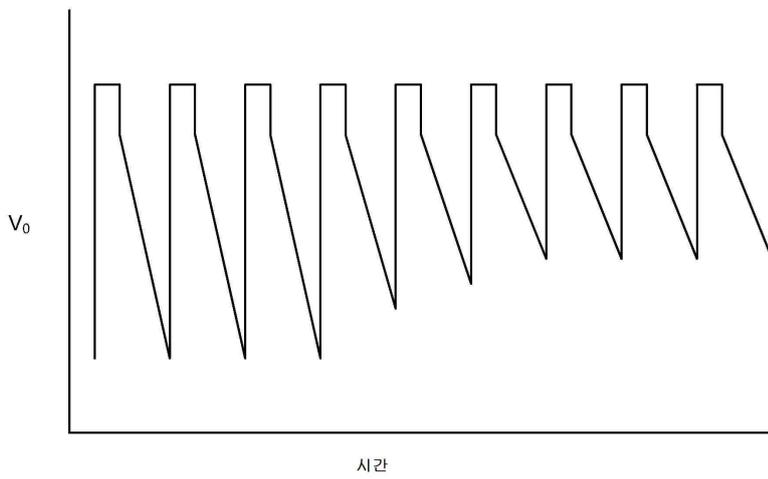
도면35



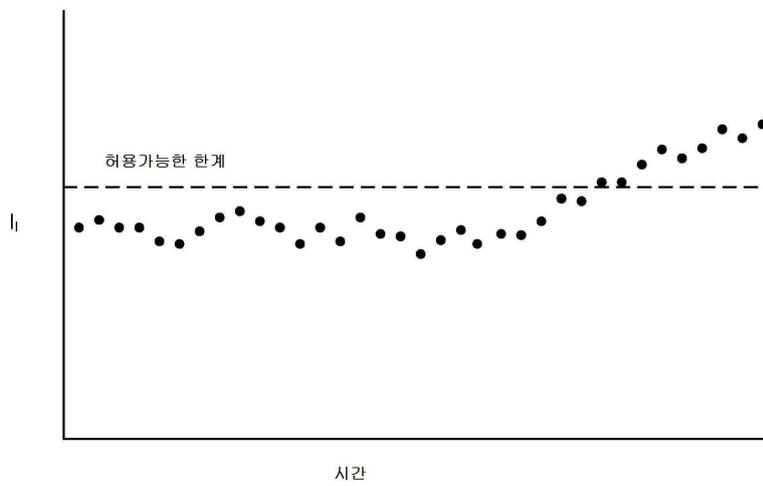
도면36



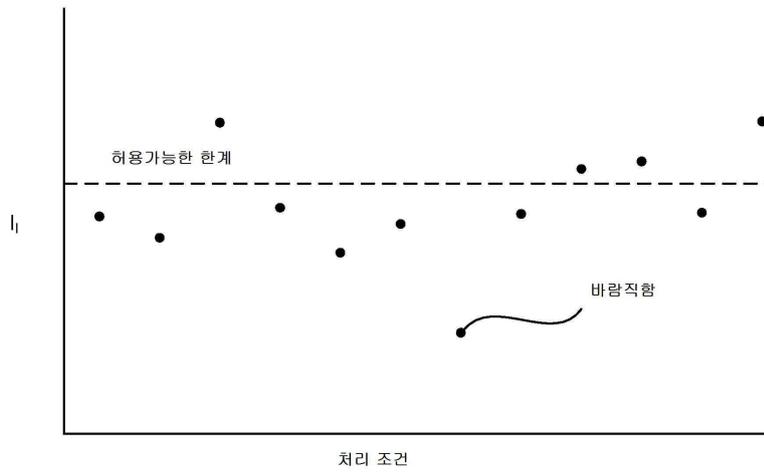
도면37



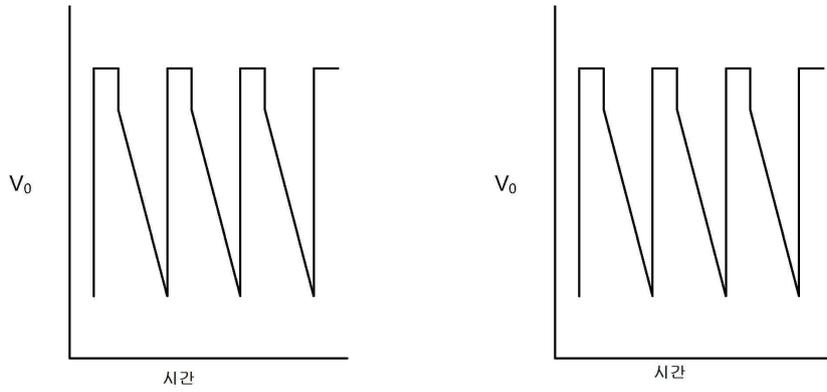
도면38



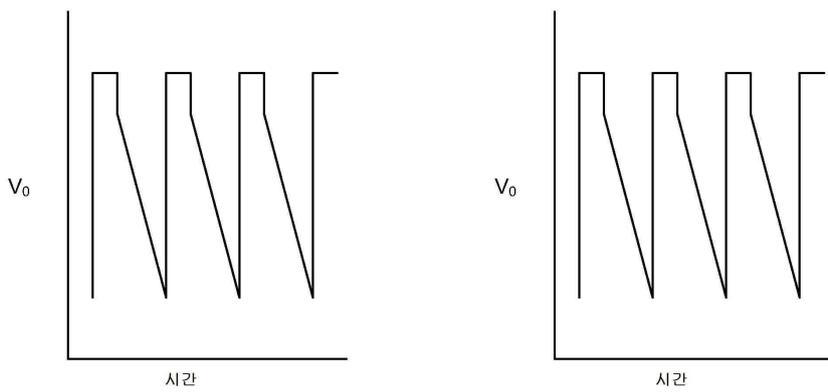
도면39



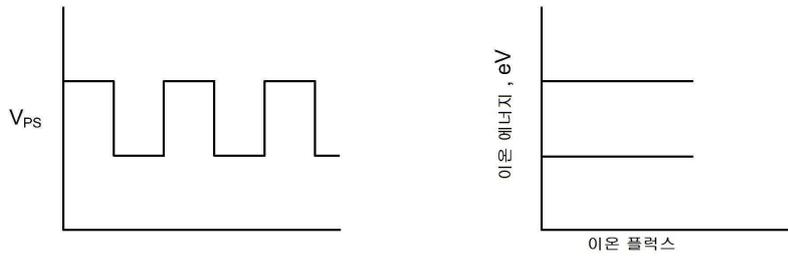
도면40



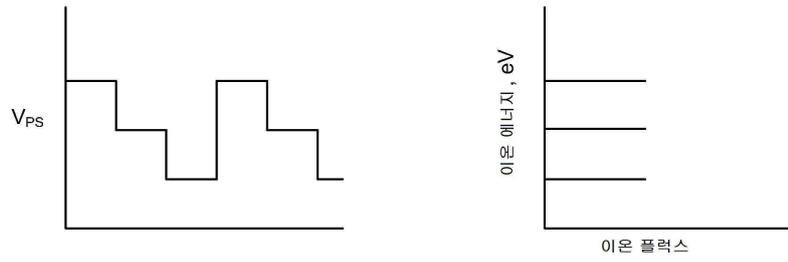
도면41



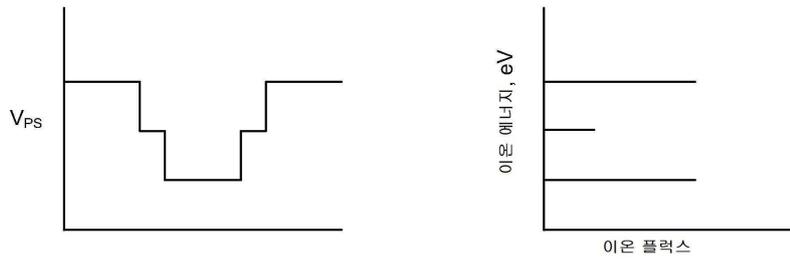
도면42a



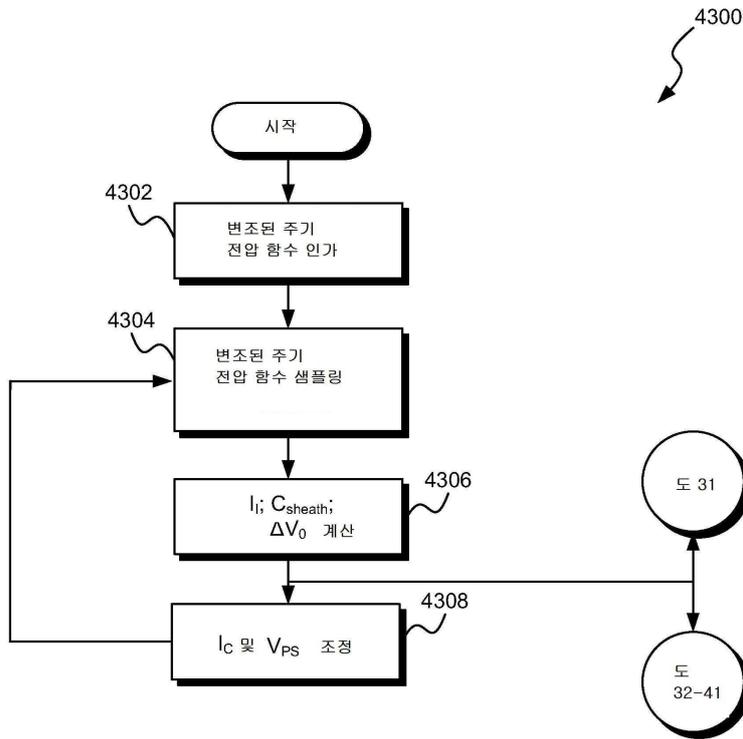
도면42b



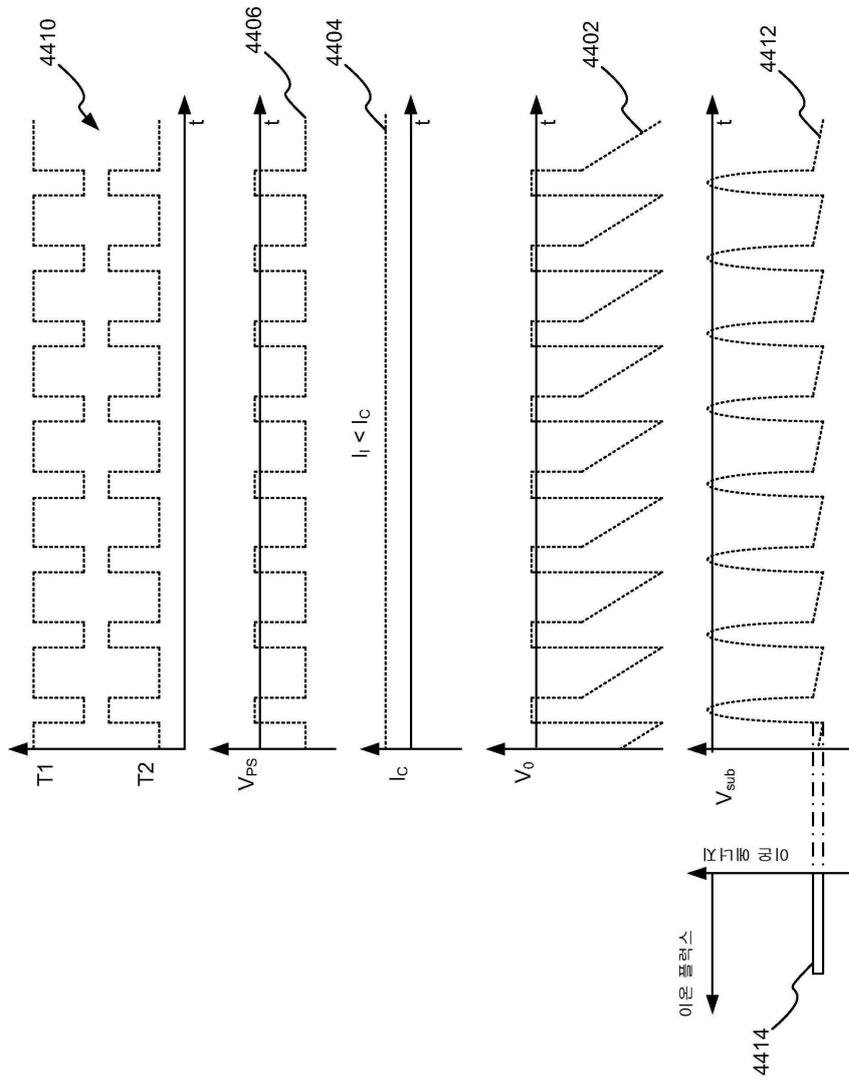
도면42c



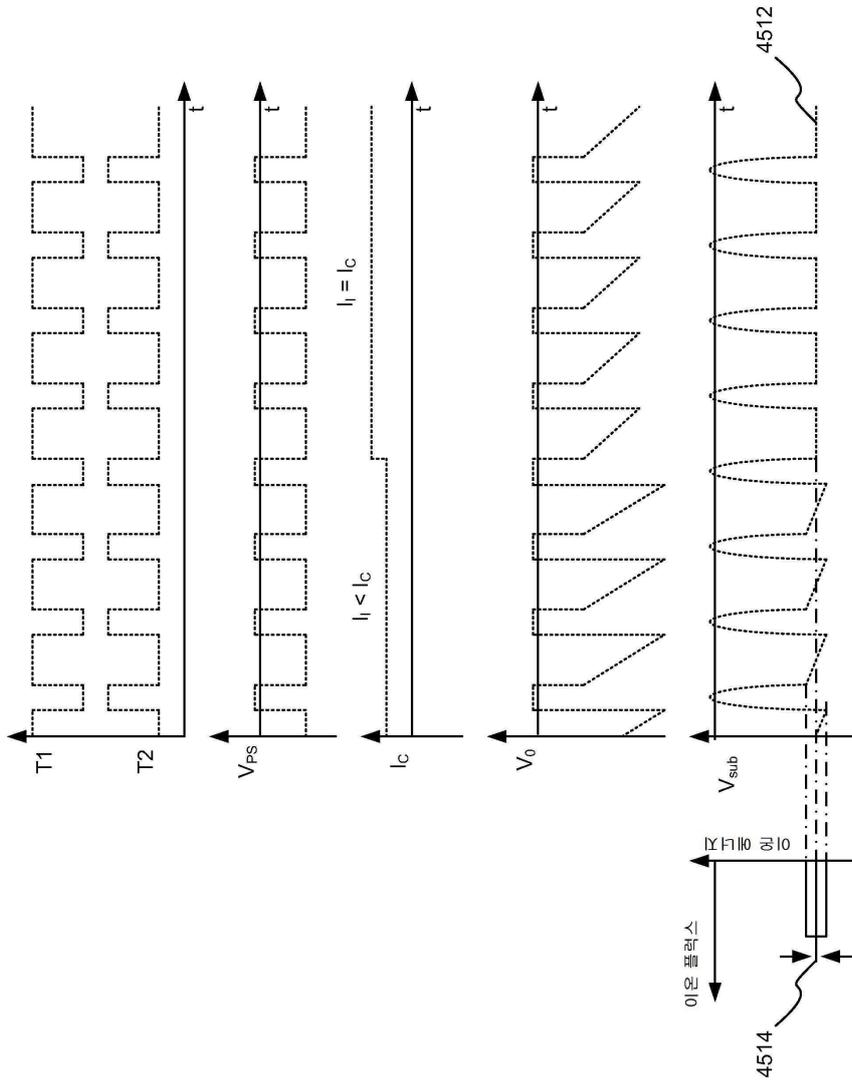
도면43



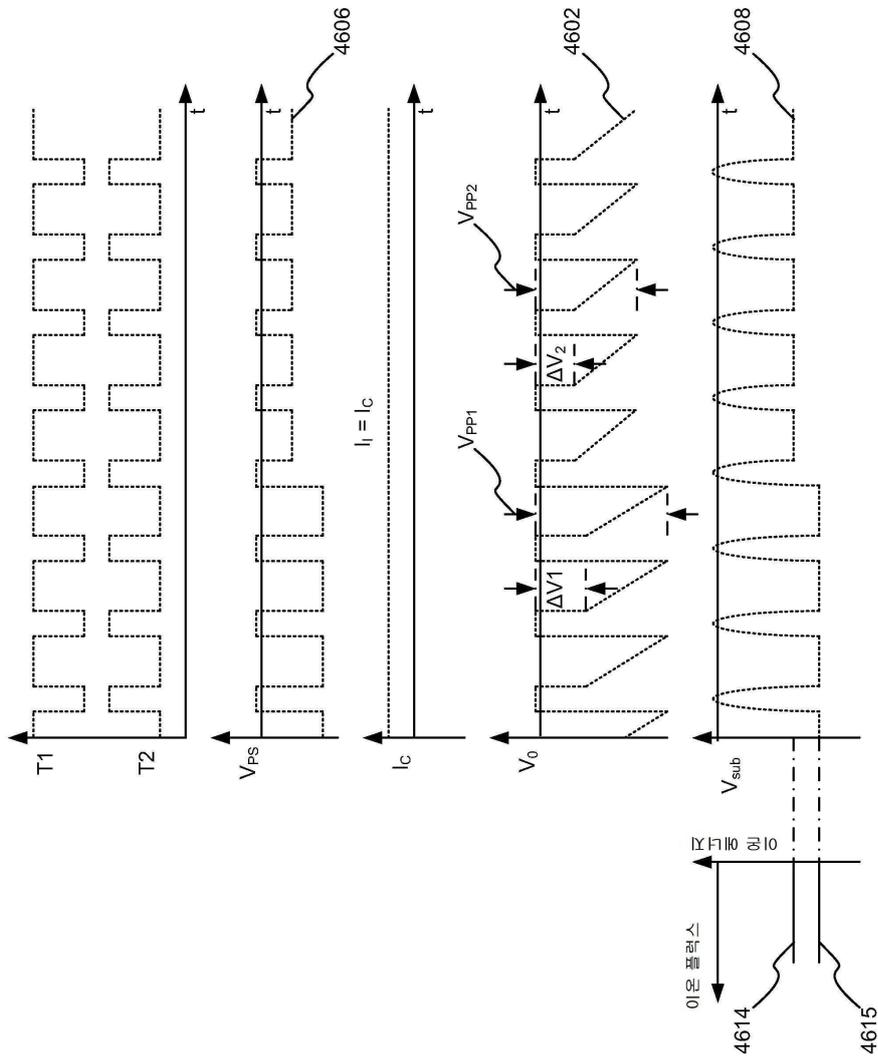
도면44



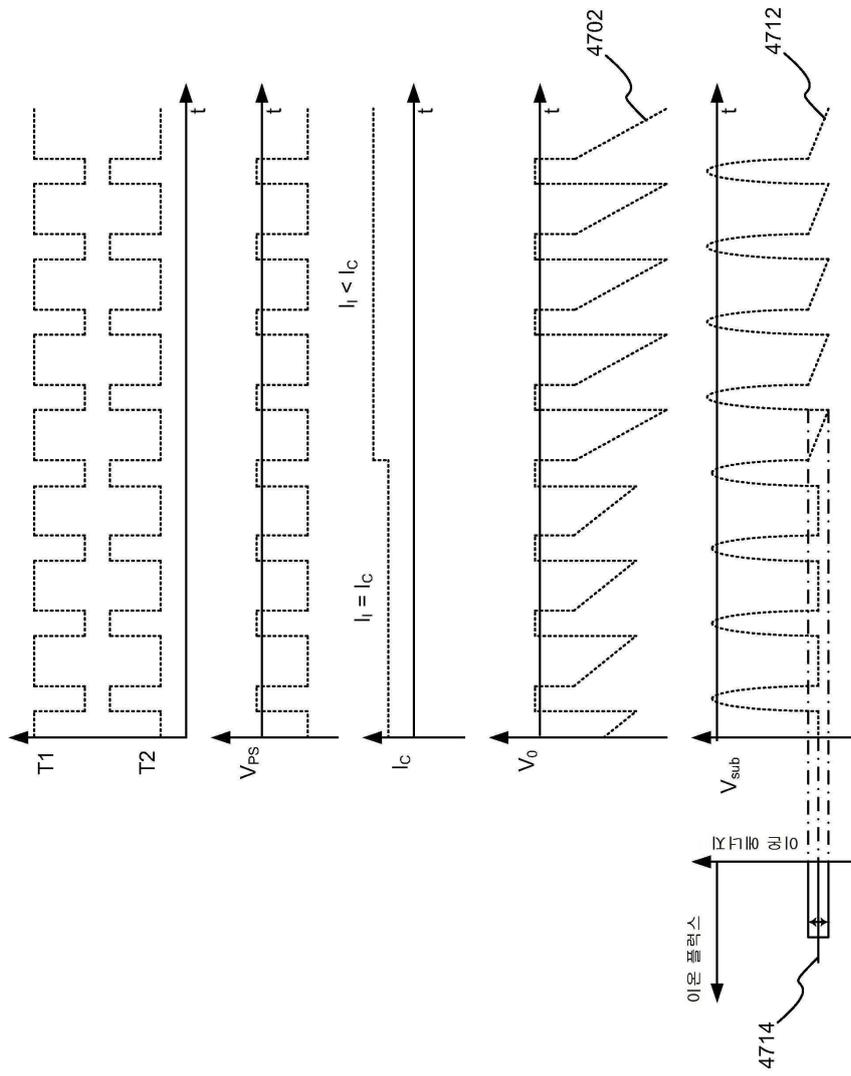
도면45



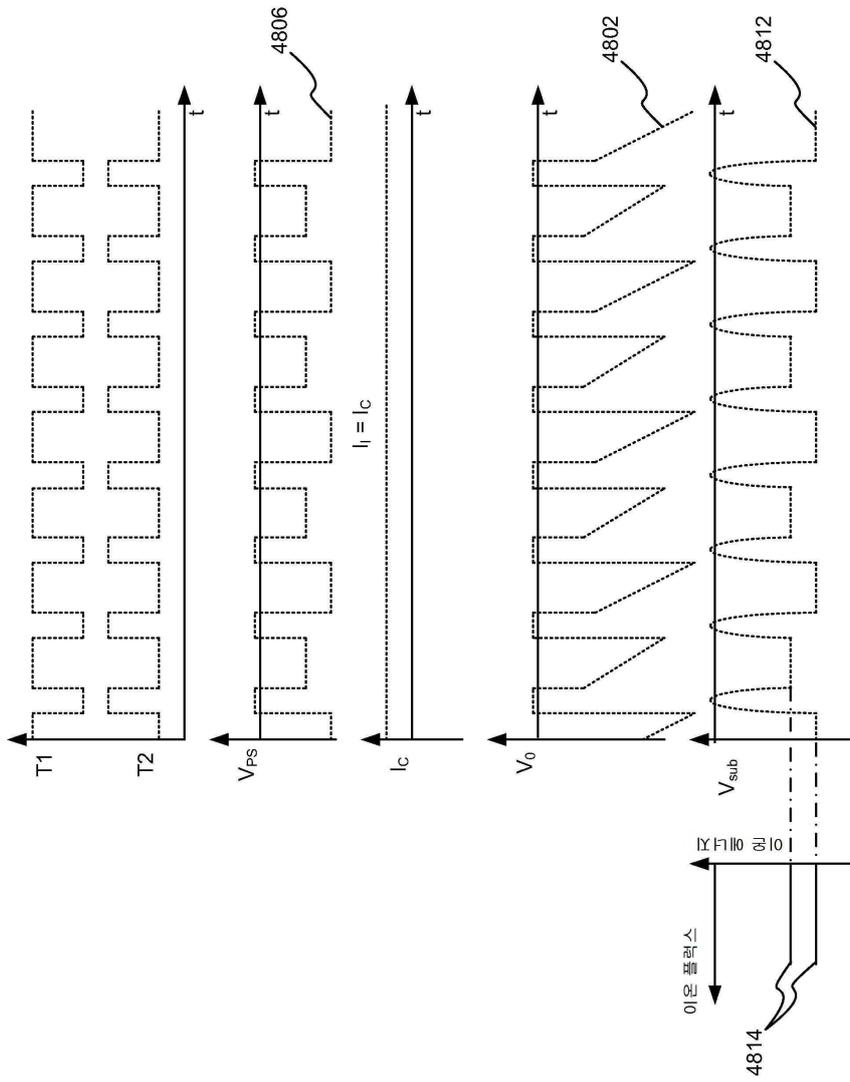
도면46



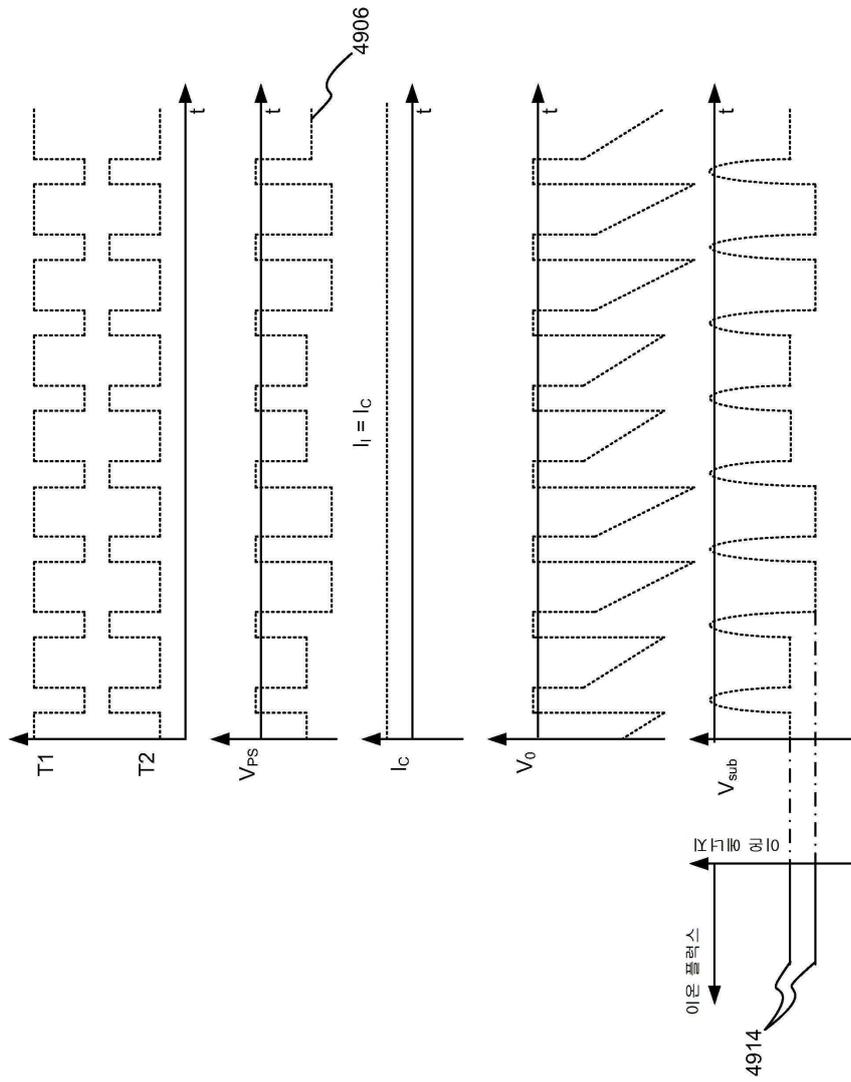
도면47



도면48



도면49



도면50

