



(19) 대한민국특허청(KR)
(12) 공개특허공보(A)

(11) 공개번호 10-2008-0071493
(43) 공개일자 2008년08월04일

(51) Int. Cl.

H01L 21/3065 (2006.01)

(21) 출원번호 10-2008-0007052

(22) 출원일자 2008년01월23일

심사청구일자 2008년01월23일

(30) 우선권주장

11/733,913 2007년04월11일 미국(US)

60/898,632 2007년01월30일 미국(US)

(71) 출원인

어플라이드 머티어리얼스, 인코포레이티드

미국 95054 캘리포니아 산타 클라라 바우어스 애브뉴 3050

(72) 발명자

콜린즈, 케네쓰 에스.

미국 95120 캘리포니아 샌어제이 글렌뷰 드라이브 7214

하나와, 히로지

미국 94086 캘리포니아 써니베일 스피루스 드라이브 696

(뒷면에 계속)

(74) 대리인

남상선

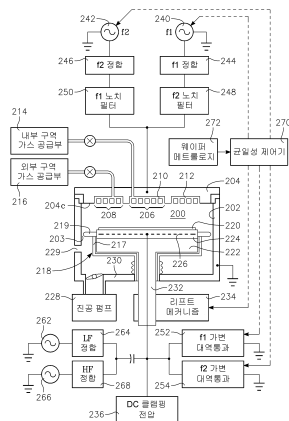
전체 청구항 수 : 총 15 항

(54) 다수의 VHF 소스들을 이용하는 이온 분포 균일성제어기를 갖는 플라즈마 반응기

(57) 요약

플라즈마 반응기는 소재 지지 페데스털을 면하는 천정 전극 및 페데스털의 페데스털 전극, 및 천정 전극과 페데스털 전극의 전극들중 동일한 전극 또는 상이한 전극과 결합되는 상이한 주파수들의 제 1 및 제 2 VHF 전력 소스를 포함한다. 제 1 및 제 2 VHF 전력 소스들은 챔버 내에서 각각 중심부가 높은 플라즈마 분포 불균일성 및 중심부가 낮은 플라즈마 분포 불균일성을 생성하도록, 각각 충분히 높은 주파수 및 충분히 낮은 주파수를 갖는다. 또한 반응기는 (a) 플라즈마 이온 분포가 주도적으로 에지가 높은 불균일성을 갖는 경우 제 1 VHF 전력 소스의 상대 출력 전력 레벨을 증가시키고, (b) 플라즈마 이온 분포가 주도적으로 중심부가 높은 불균일성을 갖는 경우 제 2 VHF 전력 소스의 상대 출력 전력 레벨을 증가시키도록, 제 1 및 제 2 VHF 전력 소스들의 상대적 출력 전력 레벨들을 변화시키도록 프로그램된 제어기를 포함한다.

대표도 - 도1a



(72) 발명자

라마스와미, 칼티크

미국 95124 캘리포니아 샌어제이 타우니게이트 웨이 1646

부치버거, 더글러스 에이., 주니어.

미국 94550 캘리포니아 리버모어 빈타지 레인 2076

라우프, 사히드

미국 94566 캘리포니아 플레산톤 콜테 파드레 6167

베라, 칼룰

미국 95128 캘리포니아 샌어제이 프룻데일 애브뉴 #6 2100

웅, 로렌스

미국 94539 캘리포니아 프레몬트 파크메도우 코트 45587

메리, 왈터 알.

미국 94086 캘리포니아 씨니베일 웨스트 로와 애브뉴 982

밀러, 매튜 엘.

미국 94555 캘리포니아 프레몬트 살리즈버리 코트 3114

샤논, 스티븐 씨.

미국 94401 캘리포니아 산 마테오 트롤만 1501

뉴엔, 앤드류

미국 95132 캘리포니아 샌어제이 호스트터 로드 3148

크루즈, 제임스 피.

미국 95073 캘리포니아 소퀼 로렐 글렌 로드 2323

카두치, 제임스

미국 94086 캘리포니아 씨니베일 게일 애브뉴 731

데트릭, 트로이 에스.

미국 94024 캘리포니아 로스 알토스 라벤우드 드라이브 1482

데쉬무크, 수브하시

미국 95138 캘리포니아 샌어제이 아페니스 씨클 5280

선, 제니퍼 와이.

미국 94086 캘리포니아 씨니베일 알파인 테라스 9964

특허청구의 범위

청구항 1

반응기의 챔버내에서 소재(workpiece) 지지 페데스털 상에 있는 소재를 처리하는 플라즈마 반응기로서,

상기 페데스털을 면하는 천정 전극 및 상기 페데스털내의 페데스털 전극;

상기 천정 전극 및 상기 페데스털 전극 중 동일한 또는 상이한 전극에 결합되는 상이한 주파수들의 제 1 및 제 2 VHF 전력 소스들; 및

(a) 플라즈마 이온 분포가 주도적으로 에지가 높은 불균일성을 갖는 경우 제 1 VHF 전력 소스의 상대 출력 전력 레벨을 증가시키고,

(b) 플라즈마 이온 분포가 주도적으로 중심부가 높은 불균일성을 갖는 경우 제 2 VHF 전력 소스의 상대 출력 전력 레벨을 증가시키도록,

제 1 및 제 2 VHF 전력 소스들의 상대적 출력 전력 레벨들을 변화시키도록 프로그램된 제어기

을 포함하며, 상기 제 1 및 제 2 VHF 전력 소스들은 각각 상기 챔버내에서 중심부가 높은 플라즈마 분포 불균일성 및 중심부가 낮은 플라즈마 분포 불균일성이 생성되도록 각각 충분히 높은 주파수 및 충분히 낮은 주파수인, 플라즈마 반응기.

청구항 2

제 1 항에 있어서,

소재-대-천정 갭을 변화시키는 소재 리프트 메커니즘을 더 포함하며, 상기 리프트 메커니즘은 상기 제어기와 결합되며, 상기 제어기는 상기 분포가 주도적으로 중심부가 높은 불균일성을 가질 때 상기 갭을 감소시키고 상기 분포가 주도적으로 중심부가 낮은 불균일성을 가질 때 상기 갭을 증가시키도록 프로그램되는 것을 특징으로 하는 플라즈마 반응기.

청구항 3

제 1 항에 있어서,

상기 챔버에서 처리되는 소재 상에서 프로세싱 결과들에 대한 불균일성 분포를 확인하는 메트롤로지 툴을 더 포함하며, 상기 툴은 상기 제어기와 접속되는 것을 특징으로 하는 플라즈마 반응기.

청구항 4

제 1 항에 있어서,

상기 제 1 VHF 전력 소스와 결합되는 것과 마주하는 상기 천정 전극 및 상기 페데스털 전극중 하나의 전극과 RF 접지 사이에 결합되는 제 1 가변 리액턴스를 더 포함하며, 상기 제어기는 플라즈마 이온 분포의 중심부가 높은 불균일성이 생성되도록 상기 제 1 VHF 전력 소스의 성향을 강화시키기 위해 상기 제 1 가변 리액턴스의 임피던스를 변화시키도록 프로그램되는 것을 특징으로 하는 플라즈마 반응기.

청구항 5

제 4 항에 있어서,

RF 접지 리턴 전위와 결합되는 상기 챔버의 측벽을 더 포함하는 것을 특징으로 하는 플라즈마 반응기.

청구항 6

제 1 항에 있어서,

상기 제 2 VHF 전력 소스와 결합되는 것과 마주하는 상기 천정 전극 및 상기 페데스털 전극중 하나의 전극과 RF 접지 사이에 결합되는 제 2 가변 리액턴스를 더 포함하며, 상기 제어기는 플라즈마 이온 분포의 에지가 높은 불균일성이 생성되도록 상기 제 1 VHF 전력 소스의 성향을 강화시키기 위해 상기 제 2 가변 리액턴스의 임피던스를 변화시키도록 프로그램되는 것을 특징으로 하는 플라즈마 반응기.

청구항 7

제 1 항에 있어서,

상기 제 1 VHF 전력 소스와 결합되는 것과 마주하는 상기 페데스털 전극 및 상기 천정 전극중 하나의 전극과 RF 접지 사이에 결합되는 제 1 가변 리액턴스를 더 포함하며, 상기 제어기는 플라즈마 이온 분포의 중심부가 높은 불균일성이 생성되도록 상기 제 1 VHF 전력 소스의 성향을 강화시킴으로써 플라즈마 이온 분포에서 에지가 높은 불균일성이 감소되도록, 상기 제 1 가변 리액턴스의 임피던스를 변화시키도록 프로그램되는 것을 특징으로 하는 플라즈마 반응기.

청구항 8

제 1 항에 있어서,

상기 제 2 VHF 전력 소스와 결합되는 것과 마주하는 상기 페데스털 전극 및 상기 천정 전극중 하나의 전극과 RF 접지 사이에 결합되는 제 2 가변 리액턴스를 더 포함하며, 상기 제어기는 플라즈마 이온 분포의 에지가 높은 불균일성이 생성되도록 상기 제 2 VHF 전력 소스의 성향을 강화시킴으로써 플라즈마 이온 분포에서 중심부가 높은 불균일성이 감소되도록, 상기 제 2 가변 리액턴스의 임피던스를 변화시키도록 프로그램되는 것을 특징으로 하는 플라즈마 반응기.

청구항 9

제 1 항에 있어서,

상기 제 1 VHF 전력 소스의 주파수는 110MHz 이상이며 상기 제 2 VHF 전력 소스의 주파수는 90MHz 미만인 것을 특징으로 하는 플라즈마 반응기.

청구항 10

제 1 항에 있어서,

상기 제 1 VHF 전력 소스는 기본 주파수를 플라즈마 이온 밀도 분포에서 중심부가 높은 불균일성이 생성되도록 충분히 높은 상기 주파수로 상향-변환시키기 위해 상기 챔버내에서 플라즈마와 결합된 공명기를 포함하는 것을 특징으로 하는 플라즈마 반응기.

청구항 11

반응기의 챔버내에서 소재(workpiece) 지지 페데스털 상에 있는 소재를 처리하는 플라즈마 반응기로서,

상기 페데스털을 면하는 천정 전극 및 상기 페데스털내의 페데스털 전극;

상기 천정 전극 및 상기 페데스털 전극 중 동일한 또는 상이한 전극에 결합되는 상이한 주파수들의 제 1 및 제 2 VHF 전력 소스들;

상기 제 1 VHF 전력 소스와 결합된 것과 마주하는 상기 천정 전극 및 상기 페데스털 전극중 하나의 전극과 RF 접지 사이에 결합된 제 1 가변 리액턴스; 및

(a) 플라즈마 이온 분포의 중심부가 높은 불균일성을 생성하도록 상기 제 1 VHF 전력 소스의 성향을 강화시킴으로써 플라즈마 이온 밀도 분포에서 에지가 높은 불균일성의 검출에 응답하고,

(b) 플라즈마 이온 분포의 중심부가 높은 불균일성을 생성하도록 상기 제 1 VHF 전력 소스의 성향을 감소시킴으로써 플라즈마 이온 밀도 분포에서 중심부가 높은 불균일성의 검출에 응답하도록,

상기 제 1 가변 리액턴스의 임피던스를 변화시키도록 프로그램된 제어기

를 포함하는, 플라즈마 반응기.

청구항 12

제 11 항에 있어서,

상기 제 2 VHF 전력 소스와 결합되는 것과 마주하는 상기 천정 전극 및 상기 페데스털 전극 중 하나와 RF 접지

사이에 결합되는 제 2 가변 리액턴스를 더 포함하며,
상기 제어기는,

(a) 플라즈마 이온 분포의 에지가 높은 불균일성을 생성하도록 상기 제 2 VHF 전력 소스의 성향을 강화 시킴으로써 플라즈마 이온 밀도 분포에서 중심부가 높은 불균일성의 검출에 응답하고,

(b) 플라즈마 이온 분포의 에지가 높은 불균일성을 생성하도록 상기 제 2 VHF 전력 소스의 성향을 감소 시킴으로써 플라즈마 이온 밀도 분포에서 에지가 높은 불균일성의 검출에 응답하도록,

상기 가변 리액턴스의 임피던스를 변화시키도록 프로그램되는 것을 특징으로 하는 플라즈마 반응기.

청구항 13

제 11 항에 있어서,

소재-대-제품 껍을 변화시키는 소재 리프트 메커니즘을 더 포함하며, 상기 리프트 메커니즘은 상기 제어기와 결합되며, 상기 제어기는 상기 분포가 주도적으로 중심부가 높은 불균일성을 가질 때 상기 껍을 감소시키고 상기 분포가 주도적으로 중심부가 낮은 불균일성을 가질 때 상기 껍을 증가시키도록 프로그램되는 것을 특징으로 하는 플라즈마 반응기.

청구항 14

제 11 항에 있어서,

상기 챔버에서 처리되는 소재 상에서 프로세싱 결과들에 대한 불균일성 분포를 확인하는 메트롤로지 툴을 더 포함하며, 상기 툴은 상기 제어기와 접속되는 것을 특징으로 하는 플라즈마 반응기.

청구항 15

제 11 항에 있어서,

RF 접지 리턴 전위와 결합되는 상기 챔버의 측벽을 더 포함하는 것을 특징으로 하는 플라즈마 반응기.

명세서

발명의 상세한 설명

기술분야

<1> 본 출원은 2007년 1월 30일자로 출원된 미국 가출원 번호 60/898,632호 및 2007년 4월 11일자로 출원된 미국 실용 출원 번호 11/733,764호의 우선권을 청구한다.

배경기술

<2> 본 발명의 실시예들은 반도체 웨이퍼와 같은 소재를 처리하도록 용량성 결합된 플라즈마 소스에 관한 것이다. 용량성 결합된 플라즈마 소스는 비교적 낮은 전압에서 고밀도 플라즈마를 생성할 수 있는 110MHz 이상의 매우 높은 주파수(VHF)에서 구동되는 천정 전극을 포함한다. 또한 용량성 결합된 플라즈마 소스는 낮은 전극 부식을 위해 낮은 전극 전위를 생성할 수 있고 (매우 높은 플라즈마 이온 밀도에 비해 매우 낮은) 광범위한 플라즈마 밀도에 대해 동작하면서, 웨이퍼 표면에서의 이온 에너지를 원하는 경우 낮은 레벨로 제한할 수 있다. 이러한 플라즈마 소스에서의 고유한 문제점중 하나는 천정 전극이 방사상 전송 선로 작용 및 플라즈마의 유효 유전 상수로 인한 로딩을 나타낸다는 것이다. 예를 들어, 150MHz에서, 자유-공간 1/4 파장은 약 20인치로, 이는 천정 전극 직경(약 15인치)과 비슷하다. 따라서, 천정 전극의 표면에 대해 RF 필드가 상당히 변화되어, 웨이퍼 표면에서 프로세스 불균일성을 야기시킨다. 1 이상의 유효 유전 상수를 갖는 플라즈마에 대해, 유효 파장은 천정 전극 직경 미만으로 감소되어, RF 필드의 불균일성을 악화시키고, 웨이퍼 표면에 대한 프로세싱 불균일성을 더욱 더 악화시킨다. 이는 에칭 프로세스에 있어, 웨이퍼 표면에 대해 낮은 에지 에칭률 분포 불균일성을 산출할 수 있다.

<3> 이러한 바람직하지 못한 효과를 감소시키기 위해 다양한 방안들이 사용되었다. 하나의 방안에서, 다소 평탄한 분포를 산출하기 위해 이를 테면, 플라즈마 이온 밀도의 중심부가 높은 불균일성을 감소시키기 위해 플라즈마

이온 밀도 분포를 변경하는데 마그네틱 스티어링(magnetic steering)이 이용될 수 있다. 이러한 방안이 갖는 문제점은 소스의 중심부가 높은 불균일성이 마그네틱 스티어링의 교정 능력의 한계를 넘을 수 있다는 것이다. 이러한 방안이 갖는 또 다른 문제점은 자속(magnetic flux) 밀도가 너무 높은 경우 소재의 전하가 손상될 수 있다는 것이다. 또 다른 방안에서는, 보다 많은 플라즈마 RF 바이어스 전력을 웨이퍼에 인가함으로써 플라즈마 시스(sheath)(또는 바이어스) 전압이 증가된다. 이는 플라즈마 시스 두께를 증가시킨다는 효과를 가져, 결국 천정-플라즈마 시스에 대한 캐패시턴스 및 웨이퍼-플라즈마 시스에 대한 캐패시턴스가 감소되어, 천정 시스 캐패시턴스, 플라즈마 캐패시턴스 및 웨이퍼 시스 캐패시턴스를 포함하는, 3개의 직렬 캐패시터가 형성된다. 궁극적 효과는 플라즈마의 유전 상수 효과를 감소시켜, RF 필드의 불균일성을 감소시키는 것이다. 일부 산화물 에칭 플라즈마 프로세스 레시피에서 요구되는 높은 바이어스 전압은 상기 후자의 방안과 호환될 수 있다. 그러나, 높은 플라즈마 바이어스 전압은 일부 다른 형태의 플라즈마 프로세스에서는 바람직하지 않다. 가장 낮은 플라즈마 바이어스 전압을 이용하는 프로세스에서 최악의 불균일성이 나타난다.

<4> 이러한 방안들은 프로세스 레시피에 의해 지정된 다른 프로세스 조건들이 플라즈마 분포에 따른 효과가 클수록 마그네틱 스티어링 또는 바이어스(시스) 전압중 하나를 갖는다는 사실로 인해 문제시된다. 예를 들어, 챔버 압력 증가는 중심부가 덜 높고 중심부가 낮은 플라즈마 이온 분포를 산출하는 반면, 챔버 압력 감소는 중심부가 보다 높은 분포를 산출한다. 플라즈마 분포에서의 다른 변화들은 소스 전력(플라즈마 밀도), 가스 화학작용(chemistry), 가스 혼합물의 전기음성도, 펌핑 속도, 가스 유량 및 프로세스 레시피에 의해 지시되는 다른 파라미터들에 의해 야기된다.

발명의 내용

<5> 반응기의 챔버 내의 소재 지지 페데스털 상에서 소재를 처리하기 위해 플라즈마 반응기가 제공된다. 반응기는 페데스털을 면하는 천정 전극과 페데스털에 있는 페데스털 전극, 및 천정 전극 및 페데스털 전극중 동일한 전극 또는 상이한 전극에 결합되는 상이한 주파수들의 제 1 및 제 2 VHF 전력 소스들을 포함한다. 제 1 및 제 2 VHF 전력 소스들은 챔버 내에서 각각 중심부가 높은 플라즈마 분포 불균일성과 중심부가 낮은 플라즈마 분포 불균일성이 생성되도록, 각각 충분히 높은 주파수 및 충분히 낮은 주파수를 갖는다. 또한 반응기는 (a) 플라즈마 이온 분포가 주도적으로 에지가 높은 불균일성을 갖는 경우 제 1 VHF 전력 소스의 상대 출력 전력 레벨을 증가시키고, (b) 플라즈마 이온 분포가 주도적으로 중심부가 높은 불균일성을 갖는 경우 제 2 VHF 전력 소스의 상대 출력 전력 레벨을 증가시키도록, 제 1 및 제 2 VHF 전력 소스들의 상대적 출력 전력 레벨들을 변화시키도록 프로그래밍된 제어기를 포함한다.

<6> 일 실시예에서, 반응기는 소재-대-천정 갭을 변화시키는 소재 리프트 메커니즘을 더 포함하며, 리프트 메커니즘은 제어기와 결합되며, 제어기는 상기 분포가 주도적으로 중심부가 높은 불균일성을 갖는 경우 갭을 감소시키고, 상기 분포가 주도적으로 중심부가 낮은 불균일성을 갖는 경우 갭을 증가시키도록 프로그래밍된다.

<7> 또 다른 실시예에서, 반응기는 챔버에서 처리되는 소재 상에 처리 결과들에 대한 불균일성 분포를 확인하는 메트론펠로지 틀을 더 포함하며, 상기 틀은 제어기와 결합된다.

<8> 또 다른 실시예에서, 반응기는 제 1 VHF 전력 소스에 결합되는 것과 마주하는 천정 전극 및 페데스털 전극중 하나의 전극과 RF 접지 사이에 결합되는 제 1 가변 리액턴스를 포함하며, 제어기는 플라즈마 이온 분포의 중심부가 높은 불균일성을 생성하도록 제 1 VHF 전력 소스의 성향을 강화시키기 위해 제 1 가변 리액턴스의 임피던스를 변화시키도록 프로그래밍된다. 일 면에서, 본 실시예는 제 2 VHF 저력 소스에 결합되는 것과 상반되는 천정 전극 및 페데스털 전극중 하나의 전극과 RF 접지 사이에 결합되는 제 2 가변 리액턴스를 더 포함할 수 있고, 제어기는 플라즈마 이온 분포의 에지가 높은 불균일성을 생성하도록 제 1 VHF 전력 소스의 성향을 강화시키기 위해 제 2 가변 리액턴스의 임피던스를 변화시키도록 프로그래밍된다.

<9> 본 발명의 앞서 언급된 특징들을 본 발명의 보다 상세한 설명, 상기 간략한 설명을 통해 이해할 수 있도록, 첨부되는 도면에 도시된 몇 가지 실시예를 참조한다. 그러나 첨부되는 도면은 단지 본 발명의 전형적인 실시예만을 나타내는 것으로, 본 발명의 범주를 제한하고자 하는 것은 아니며, 본 발명은 등가적인 다른 실시예를 구현할 수 있다는 것을 주지해야 한다.

<10> 발명의 이해를 돕기 위해 도면에서 공통되는 동일한 부재들을 나타내는데 가능한 동일한 참조번호를 사용했다. 도면의 이미지들은 도시를 위해 간략화된 것이며 실제크기대로 도시된 것은 아니다.

발명의 실시를 위한 구체적인 내용

<11> 도 1a는 상이한 소스 전력 주파수들 중에 용량성 결합된 플라즈마 소스 전력을 할당함으로써 플라즈마 이온 밀도의 방사상 분포를 제어할 수 있는 플라즈마 반응기의 간략화된 개략도이다. 반응기는 실린더형 측벽(202)과 디스크형 천정(204)으로 둘러싸인 진공 챔버(200)를 갖는다. 천정(204)은 전도성 천정 전극 및 가스 분배 샤워 헤드 또는 플레이트이며, 본 발명에서는 천정 전극(204)으로 간주된다. 천정 전극은 선택적으로 전도성 물질, 반도체 물질 또는 절연 물질로 커버될 수 있다. 천정 전극(204)은 바닥 표면(204c) 상에서 각각 안쪽 및 바깥쪽 내부 가스 매니폴드(210, 212)와 결합되는 가스 주입 오리피스들의 내부 및 외부 구역(206, 208)을 포함한다. 내부 및 외부 구역 프로세스 가스 공급부(214, 216)는 내부 및 외부 매니폴드(210, 212)에 프로세스 가스를 공급한다. 웨이퍼 지지 페데스털(218)은 반도체 웨이퍼(220)와 같은 소재를 지지할 수 있다. 페데스털(218)은, 전도성 베이스층(222) 및 내부 전극(226)을 둘러싸는 절연 상부층(224)을 포함하는 정전기 척의 구조를 갖는다. 진공 펌프(228)는 챔버(200)의 플로어(floor)(230)를 통해 결합된다. 페데스털(218)은 페데스털(218)의 레벨을 상승 및 하강시킬 수 있는 리프트 메커니즘(234)과 결합되는 레그(232) 상에서 지지된다. 일 구현예에서, 리프트 메커니즘(234)은 약 0.3 인치 내지 약 6 인치의 웨이퍼-대-천정 갭 범위를 제공한다. 웨이퍼는 D.C.공급부(236)로부터 전극(226)으로 D.C. 클램핑 전압을 인가함으로써 페데스털 상에 고정된다. 통상적으로, D.C.공급부(236)는 DC 공급부를 전극(226) 상에 제공되는 RF 전압과 절연시키는 저주파 통과 필터를 포함한다. RF 바이어스 전력은 내부 전극(226)에 직접 결합되거나, 또는 전도성 베이스층(222)을 통해 간접적으로 결합될 수 있다. 통상적으로, 페데스털(218)은 석영, 세라믹 또는 플라스틱과 같은 절연 물질에 의해 전도성 베이스층(222) 및 내부 전극(226)과 절연되는 전도성 접지 하우스(217)를 포함한다. 선택적으로, 전도성 베이스층(218)은 접지될 수 있다.

<12> 챔버(200)에 대한 플라즈마 이온 방사상 분포의 균일성은 한 쌍의 VHF 플라즈마 소스 전력 생성기들(240, 242)을 제공함으로써 제어된다. 일 면에서, RF 생성기(240)는 110 내지 250MHz 정도의 VHF 범위 상위 부분에서, 공칭적으로는 약 162MHz의 주파수를 갖는 반면 다른 RF 생성기는 약 40-90MHz 정도의 VHF 범위 하위 부분에서, 공칭적으로는 약 60MHz의 주파수를 갖는다. 본 발명자들은 생성기(240)(단독으로 적용될 경우)로부터의 상위 VHF 주파수는 중심부가 높고 에지가 낮은 플라즈마 이온 밀도 방사상 분포를 산출하는 경향이 있는 반면, 생성기(242)(단독으로 적용될 경우)로부터의 하위 VHF 주파수는 중심부가 낮고 에지가 높은 플라즈마 이온 밀도 방사상 분포를 산출하는 경향이 있다는 것을 발견했다. 이와 관련하여, 2개의 생성기는 동시적으로 사용될 경우 서로 보완된다. 일 실시예에서, 생성기들(240, 242) 중 하나의 출력 전력은 중심부가 낮은 패턴과 중심부가 높은 패턴 간의 플라즈마 이온 밀도 방사상 분포가 변화되도록 서로를 기준으로 조절된다. 2개 생성기들(240, 242)의 RF 전력(또는 전압 또는 전류) 레벨 비율의 선택은 중심부가 높은 그리고 중심부가 낮은 불균일성들이 최소화되고 양자 형태의 불균일성들이 거의 없는 보다 거의 균일한 플라즈마 이온 분포가 제공되어, 거의 또는 실질적으로 균일해지도록 선택된다. 이러한 균일성은 웨이퍼 또는 소재에 대한 에칭률의 방사상 분포를 측정함으로써 결정될 수 있다. 이러한 분포의 변화는 균일성이 증가됨에 따라 감소된다. 에칭률의 보다 균일한 방사상 분포를 위한 변화는 예를 들어 4% 이하로 낮을 수 있다.

<13> 일 실시예에서, 상위 VHF 주파수 생성기(240)는 고정적이거나 또는 동적일 수 있으며 다발형(lumped) 또는 분산형(distributed) 부재들로 형성될 수 있는 임피던스 정합 네트워크(244)를 통해 천정 전극(204)과 결합된다. 하위 VHF 주파수 생성기(242)는 다발형 또는 분산형 부재들로 형성되며 고정적이거나 또는 동적일 수 있는 임피던스 정합 네트워크(246)를 통해 천정 전극(204)과 결합된다. 상위 VHF 정합 네트워크(244)의 출력은 하위 VHF 생성기(242)의 주파수(f2) 부근에서 중심설정되는 협대역(narrow band)을 차단하도록 조절된 노치 필터(248)에 의해, 또는 선택적으로 하위 VHF 생성기(242)의 주파수(f2)를 차단하도록 조절된 고주파 통과 필터(high-pass filter)에 의해 하위 VHF 생성기(242)의 출력으로부터 보호된다. 하위 VHF 정합 네트워크(246)의 출력은 상위 VHF 생성기(240)의 주파수(f1) 부근에서 중심설정된 협대역을 차단하도록 조절된 노치 필터(250)에 의해, 또는 상위 VHF 생성기(240)의 주파수(f1)를 차단하도록 조절된 저주파 통과 필터에 의해 상위 VHF 생성기(240)의 출력으로부터 보호된다. 필터 회로들은 요구되는 주파수 절연을 갖는 원하는 정합 범위를 달성하기 위해, 정합 네트워크들과 조합되어 종래 방식에 따라 설계된다.

<14> 2개의 RF 리턴 경로들이 VHF 주파수들(f1, f2) 각각에 제공된다. 챔버(200)의 측면을 따른 경로는 도면에 도시된 것처럼, 측벽(202)을 접지시킴으로써 제공된다. 이 경로를 따르는 VHF 경로는 챔버의 중심부를 지나는 RF 접지 리턴 경로를 기준으로 에지가 높고 중심부가 낮은 플라즈마 이온 방사상 분포, 또는 적어도 덜한 중심부가 높은 플라즈마 이온 방사상 분포를 조장한다. 챔버(200)의 중심부를 지나는 경로는 서로 독립적으로 제어되는 각각 조절가능(가변) 대역통과 필터들(252, 254)을 통해 페데스털 전극(226)(또는 베이스층(222))을 접지와 결합시킴으로써 선택적으로 제공된다. 가변 대역통과 필터(252)는 상위 VHF 생성기(240)의 주파수(f1)를 포함하

는(또는 주파수(f1)에 적어도 대략적으로 집중되는) 협소(narrow) 통과 대역을 갖는다. 가변 대역통과 필터(254)는 하위 VHF 생성기(242)의 주파수(f2)를 포함하는(또는 주파수(f2)에 적어도 대략적으로 집중되는) 협소 통과 대역을 갖는다. 이들 대역통과 필터들(252, 254)은 이들 각각의 대역통과 주파수들(f1, f2)에서 접지로 각각의 임피던스를 제공한다. 이러한 임피던스들은 페데스털 전극(226)과 측벽(202) 사이에서 각각의 생성기들(240, 242)로부터의 RF 전류의 분할이 결정되도록 제어기(270)에 의해 변한다. 이러한 전류의 할당은 각각의 대역통과 필터들(252, 254)의 리액턴스를 변화시킴으로써 제어된다. 용량성 및 유도성 성분들의 종래의 RF 필터 회로들은 가변 대역통과 필터들(252, 254)을 구현하는데 이용될 수 있다. 종래의 방식에 따라, 이들 필터는 용량성 및 유도성 성분들의 다발형 부재들 또는 동축 동조가능 부재들 또는 스타브들과 같은 분산형 부재들로 구현될 수 있다. 예를 들어, 도 1b는 도 1a의 반응기에서 사용될 수 있는 형태의 가변 대역통과 필터의 간략화된 개략도이다. 도 1b의 가변 대역통과 필터는 션트(shunt) 캐패시터(256), 인덕터(258) 및 로드 캐패시터(260)를 포함할 수 있으며, 캐패시터들(256, 260)중 하나 또는 둘다는 가변적이다. 일 면에 따라, 필터들(252, 254)이 대역통과 필터일 필요가 없거나 또는 대역통과 필터의 주파수 응답을 가질 수 있다. 예를 들어, 필터들(252, 254)중 하나 또는 둘다는 고주파 통과 필터 또는 저주파 통과 필터, 또는 임의의 형태의 필터로서 작용하도록 응답이 변하는 반응성 부재일 수 있다. 선택적으로, 챔버(200)의 중심부를 지나는 RF 접지 리턴 경로는 페데스털 전극(226)을 접지시킴으로써 제공된다. 이는 RF 바이어스의 효율적 절연이 허용되도록 고주파 통과 필터를 통해 이루어진다.

<15> LF 임피던스 정합부(264)를 통한 저주파수 RF 전력 생성기(262)로부터의 LF 전력(예를 들어, 약 2MHz) 및 HF 임피던스 정합부(268)를 통한 고주파수 RF 전력 생성기(266)로부터의 HF 전력(예를 들어, 약 13.56MHz)을 포함하는 ESC 전극(226)에 RF 바이어스 전력이 인가된다. 통상적으로, RF 바이어스 주파수들은 LF 전력 레벨이 피크 이온 에너지를 제어하는 반면, HF 전력 레벨은 이온 에너지 분포의 중심 폭을 제어하도록 선택된다. RF 전류 접지 경로는 ESC 전극(226)에 인가되는 RF 바이어스 소스들 각각에 제공될 수 있다. 천정(204)을 지나는 경로는 대역통과 또는 저주파 통과 필터를 통해 천정을 접지에 결합시킴으로써 선택적으로 제공된다. 또한, 다른 표면들에 대해 바이어스 리턴 전류를 기준으로 천정에 대한 바이어스 리턴 전류, 즉, 벽(202) 및 링(219)에 대한 전류를 제어하기 위해 가변 리액턴스가 경로에 삽입될 수 있다. 삽입 리액턴스 또는 임피던스는 에지가 높은 플라즈마 이온 밀도 균일성 조건을 조장하는 경향이 있는 많은 바이어스 리턴 전류를 에지(링(219) 또는 벽(202))로 가압하기 위해 삽입될 수 있다. 선택적으로, 삽입 리액턴스 또는 임피던스는 중심부가 높은 플라즈마 이온 밀도 균일성 조건을 조장하는 경향이 있는 보다 적은 바이어스 리턴 전류를 에지(링(219) 또는 벽(202))로 가압하기 위해 감소될 수 있다.

<16> 2개의 VHF 소스 전력 생성기들(240, 242)은 연속파(CW) 모드에서 동작하거나 또는 서로에 대해 동기식으로 또는 비동기식으로 펄싱될 수 있다. 또한, 바이어스 전력 생성기(262, 266) 중 하나 또는 둘다는 CW 모드에서 또는 펄스형 모드에서 동작할 수 있다. 펄스형 모드에서, 이들의 듀티 사이클은 웨이퍼 표면에서의 전압(및 이온 에너지) 또는 시간-평균 RF 바이어스 전력 제어를 위해 제어될 수 있다. 바이어스 생성기들(262, 266)의 펄싱은 서로를 기준으로 및/또는 소스 전력 생성기들(240, 242)을 기준으로 동기화 또는 비동기화될 수 있다. 펄스형 모드에서, 서로 동기식으로 펄싱되는 임의의 생성기들의 쌓은 시간에 따른 또는 시간에 따라 치우친(offset) RF 인벨로프(envelope)를 가질 수 있고 오버랩핑되거나 오버랩핑되지 않을 수 있다.

<17> 웨이퍼(220) 표면에 대한 가스 흐름 균일성 및 웨이퍼 에지 부근의 RF 필드의 균일성은 페데스털(218)의 웨이퍼 지지 표면 아래 레벨에서 페데스털(218)의 측면으로부터 방사상 바깥방향으로 연장되는 웨이퍼 하부(below-wafer) 접지 리턴(219)을 제공함으로써 개선된다. 통상적으로 웨이퍼 하부 접지 리턴(219)은 웨이퍼 상부의 프로세스 영역으로부터 진공 펌프(228)에 의해 배기되는 웨이퍼 하부의 펌핑 고리(annulus)로 부분적으로 가스 흐름을 제한하는 갭(203)을 형성하기 위해 측벽(202)을 향해 연장되는 실린더형 또는 평탄한 환형 링으로 형성화된다. 웨이퍼 하부 접지 경로의 레벨은 가스 흐름 패턴 또는 정전기장 또는 전자기장에서 바람직하지 않은 비대칭성을 산출하는 펌핑 포트 또는 웨이퍼 슬릿 밸브(229)와 같은 구조물(feature) 위쪽에 있다. 웨이퍼 하부 접지 리턴(219)의 외부 에지와 측벽 사이의 좁은 갭은 부분적으로 가스 흐름을 제한하여, 웨이퍼(220) 상부 영역은 이러한 비대칭성을 면하게 되어, 프로세스 균일성이 개선된다. 일 구현예에서, 웨이퍼 하부 접지 평면(219)은 전도성 물질로 형성되며 접지와 접촉된다. 따라서, 전기장이 보다 균일해져 챔버 내부에서 전도성 표면의 분배시 비대칭성에 덜 민감해져 웨이퍼 에지에서 보다 균일한 접지 기준(reference)이 제공된다. 링(219)은 링(219) 위쪽의 챔버 영역에 대한 플라즈마 볼륨 제한을 보조하는 플라즈마 경계부 역할을 할 수 있다. 선택적 구현예에서, 링(219)은 접지 평면으로서 작용하지 않고, 대신 비전도성 물질로 형성된다. 또 다른 선택적 실시예에서, 접지 리턴 링(또는 실린더)(219)은 소재 또는 웨이퍼 레벨에 또는 소재 레벨 위쪽에 있다. 이는 천정 레벨에 또는 천정 레벨 부근에 있을 수 있고 천정 전극(204)을 동심원적으로 에워쌀 수 있다. 또 다른

실시예에서, 접지 리턴 링(219)의 레벨은 리프트 메커니즘을 이용하여 소재 레벨을 기준으로 선택적으로 조절될 수 있다. 예를 들어, 페데스털(218) 외측에 링(219)을 부착시킴으로써, 링(219)은 페데스털 리프트 메커니즘에 의해 상승 및 하강된다. 접지 리턴 링(219)은 (ESC 베이스층(224)과 같이) 챔버에 있는 다른 접지된 표면과 절연되어 접지와 직접 결합되지 않고, 대신 가변 반응성 부재(예를 들면, 가변 필터(252))를 통해 접지와 결합된다. 이 경우, 접지 리턴 링(219)은 VHF 주파수(f2)에 대한 에지 접지 리턴 경로로서 작용한다. 따라서 이러한 에지 접지 리턴 경로의 높이는 가변적이며 반응기의 조절가능한 파라미터들중 하나로서 작용한다.

<18> 균일성 제어기(270)는 2개의 VHF 생성기들(240, 242)의 상대적 전력 출력 레벨 및 가변 대역통과 필터들(252, 254)의 임피던스를 선택적으로 제어한다. 제어기(270)는 상위 VHF 주파수(f1)에서 측벽(202)을 통해서라기 보다는 웨이퍼(220)를 통해 접지에 하부 임피던스 리턴 경로가 제공되도록 상위 VHF 주파수(f1) 대역통과 필터의 임피던스를 설정할 수 있어, f1 생성기(240)로부터의 전력은 보다 중심부가 높은 방사상 분포를 산출한다. 또한, 제어기(270)는 하위 VHF 주파수(f2)에서 측벽(202)을 통해서라기 보다는 웨이퍼(220)를 통해 접지에 높은 임피던스 리턴 경로가 제공되도록 하위 VHF 주파수(f2) 대역통과 필터의 임피던스를 설정할 수 있어, f2 생성기(242)로부터의 전력은 보다 중심부가 낮고 에지가 높은 방사상 분포를 산출한다. 제어기(270)는 (하위 VHF 주파수 생성기(242)의 전력 출력을 증가시킴으로써) 에칭물 분포시 중심부가 높은 불균일성이 완화되도록, 또는 (상위 VHF 주파수 생성기(240)의 전력 출력을 증가시킴으로써) 에칭물 분포시 에지가 높은 불균일성이 완화되도록 높은 및 하위 VHF 주파수 생성기들(240, 242)의 상대적 전력 출력 레벨을 할당한다. 제어기(270)는 다운스트림 또는 인-라인 메트롤로지 툴(272)에 의해 앞서 처리된 웨이퍼 상에서 측정되는 불균일성 패턴에 응답하여 이러한 조절을 가능케할 수 있다. 연속적으로 웨이퍼를 처리하는 동안, 제어기(270)내의 프로그램된 알고리즘으로서 구현되는 표준 피드백 제어 교정 기술이 이용되어, 메트롤로지 툴(272)에 의해 감지되는 에칭물 분포의 불균일성이 최소화되도록 균일성 제어기(270)에 의한 연속적 교정이 수행될 수 있다. 메트롤로지 툴(272)은 플라즈마 이온 밀도 분포가 우세하게 중심부가 높은 불균일성을 갖는지 또는 우세하게 에지가 높은 불균일성을 갖는지를 제어기(270)에 알리도록 프로그램될 수 있다. 선택적으로, 메트롤로지 툴(272)은 제어기(270)로 실시간 신호를 제공할 수 있는 인-시튜(in-situ) 센서로 구현될 수 있다. OES(광학 발광 분광법) 센서들은 방사상 플라즈마 여기 중 밀도의 표시를 제공하는 다양한 반경들에서 천정(204)상에 위치될 수 있다. 플라즈마 자체가 광원으로 이용되거나, 또는 외부 광원이 사용될 수 있다. 선택적으로, 간섭 센서들이 반경의 함수로서 소재 막 두께의 변화율 표시를 제공하는 다양한 반경들에서 천정(204) 상에 위치될 수 있다. 선택적으로, 이온 플럭스 센서들은 방사상 플라즈마 이온 밀도의 표시를 제공하는 다양한 반경들에서 천정(204) 상에 위치될 수 있다. 선택적으로, 전압 센서들은 방사상 전극 전압의 표시를 제공하는 다양한 반경들에서 천정(204) 상에 위치될 수 있다. 선택적으로, 절연된 전압 센서들은 방사상 플라즈마 부유 전위의 표시를 제공하는 다양한 반경들에서 천정(204) 상에 위치될 수 있다. 플라즈마 균일성의 실시간 제어는 센서 입력을 이용하는 제어기(270) 및 종래의 기술들에 의해 수행될 수 있다.

<19> 또한 균일성 제어기는 플라즈마 이온 분포의 균일성(또는 에칭물 분포의 균일성)을 개선시키는 다른 제어 치수를 제공하기 위해, 리프트 메커니즘(234)을 제어할 수 있다. 천정 전극(204)을 향해 페데스털(218)을 상승시킴으로써, 웨이퍼-대-천정 갭이 감소되어, 웨이퍼의 중심부 부근의 플라즈마 이온 밀도가 완화되고 웨이퍼 에지 부근의 플라즈마 이온 밀도가 강화된다. 반대로, 천정 전극(204)으로부터 페데스털(218)을 하강시킴으로써, 웨이퍼-대-천정 갭은 증가되어, 웨이퍼 에지에서 플라즈마 이온 밀도는 감소되면서 웨이퍼 중심부 상에서의 플라즈마 이온 밀도는 강화된다. 따라서, 각각 페데스털(218)을 상승 또는 하강시킴으로써 플라즈마 분포가 보다 중심부가 높아지게 또는 보다 중심부가 낮아지게 할 수 있다. 앞서 개시된 것처럼, 상위 VHF 주파수 전력 대 하위 VHF 주파수 전력의 비율을 각각 증가 또는 감소시킴으로써 플라즈마 분포가 보다 중심부가 높아지게 또는 보다 중심부가 낮아지게 할 수 있다. 따라서, 페데스털 높이 및 VHF 전력 비율은 플라즈마 이온 분포에 영향을 미치는 2개의 다른 제어요인이다. 균일성 제어기(270)는 플라즈마 이온 분포 균일성이 최적화되도록 이러한 제어요인들 모두를 동시에 사용할 수 있다. 예를 들어, 에지가 높은 플라즈마 불균일성은 상위 VHF 주파수 생성기(240)의 출력 전력을 증가시킴으로써 감소될 수 있으며, 이는 플라즈마 이온 분포에서 중심부가 높은 피크를 증가시킬 수 있다. 이러한 중심부가 높은 피크의 증가는 최적의 플라즈마 분포가 구현될 때까지, 웨이퍼-천정 갭이 감소되도록 페데스털(218)을 상승시킴으로써, VHF 전력 할당에서의 추가적 변화없이 완화될 수 있다. 이는 플라즈마 이온 분포에서 중심부가 높은 피크가 특히 두드러지는 낮은 RF 바이어스 및 낮은 챔버 압력을 요구하는 프로세스 레시피에서 이용될 수 있다. 웨이퍼-천정 갭의 제어와 함께 VHF 주파수 할당 모두의 제어는 제어기(270)가 반작용할 수 있는 불균일성 범위로 연장된다. 예를 들어, 강하게 중심부가 높은 불균일성에 대해, 제어기(270)는 높은-대-하위 VHF 주파수 전력 할당의 증가 및 좁은 웨이퍼-천정 갭 모두를 요구할 수 있다.

<20> 가변 웨이퍼-대-천정 갭은 특정한 VHF 주파수(예를 들어, f1 또는 f2)가 불균일한 플라즈마 이온 밀도 분포 피

크를 갖는 경우 영향을 미친다. 따라서, 제어기(270)는 주도적으로 중심부가 높은 불균일한 플라즈마 이온 밀도 분포를 생성하는 f1 선택 및 주도적으로 에지가 높은 불균일한 플라즈마 이온 밀도 분포를 생성하는 f2 선택이 최적화되도록 갭을 설정할 수 있다. 예를 들어, 제어기(270)는 상이한 불균일한 패턴을 생성하는 f1 및 f2의 선택이 최적화되도록 웨이퍼-천정 갭을 설정하며 제어기(270)는 플라즈마 이온 분포를 제어하고 플라즈마 이온 분포의 불균일성을 감소시키기 위해 상이한 주파수들(f1, f2)에서 RF 전력(또는 전류 또는 전압)의 비율을 변화시킨다.

- <21> 제어기(270)는 불균일성을 감소시키기 위해, (a) 주파수들(f1, f2)에서 RF 전압 비율; (b) 주파수들(f1, f2)에서 RF 전류 비율; 또는 (c) 주파수들(f1, f2)에서 RF 전력 비율 중 임의의 하나를 측정 및 제어(변화)함으로써 플라즈마 이온 밀도 분포에서 주도적으로 중심부가 높은 또는 에지가 높은 불균일성에 대한 메트롤로지 툴(272)로부터의 표시에 응답할 수 있다. 이러한 측정은 예를 들어 각각의 전극에서 또는 다른 적절한 위치에서 이루어질 수 있다.
- <22> 선택적 모드에서, 제어기(270)는 높은(f1) 및 낮은(f2) VHF 생성기들(240, 242)에서 전력의 할당을 반드시 변화시키지 않고도 플라즈마 이온 밀도 분포를 변화시킨다. 대신, 플라즈마 이온 밀도 분포는 f1 및 f2 가변 대역통과 필터들(252, 254)에 의해 표시되는 중심부 접지 리턴 경로로 임피던스를 변화시킴으로써 제어기(270)에 의해 변한다. 예를 들어, 플라즈마 밀도 분포에서 중심부 피크를 생성하거나 또는 에지 피크를 완화시키는 높은 주파수(f1) VHF 전력의 성향은 가변 대역통과 필터(252)에 의해 f1 전력에 제공되는 임피던스를 변화시킴으로써 증가 또는 감소될 수 있다. 마찬가지로, 플라즈마 이온 밀도분포에서 에지 피크를 생성하거나 또는 중심부 피크를 완화시키는 낮은 주파수(f2) VHF 전력의 성향은 가변 대역통과 필터(254)에 의해 f2 전력에 제공되는 임피던스를 변화시킴으로써 증가 또는 감소될 수 있다. 이러한 변화는 중심부 접지 리턴 경로(천정-대-웨이퍼)와 (측벽(202)을 통하는) 측면 접지 리턴 경로 사이에서 각각의 주파수들(f1, f2)에서 VHF 전류의 할당에 영향을 미친다. 중심부 접지 리턴 경로로 보다 많은 f1 전력을 지향시킴으로써, 중심부가 높은 분포를 생성하는 상위 VHF 주파수(F1) 전력의 성향이 증가된다. 측면 접지 리턴 경로로 보다 많은 f2 전력을 지향시킴으로써, 에지가 높은 분포를 생성하는 하위 VHF 주파수(f2) 전력의 성향이 증가된다. 일부 경우, 제어기는 2개의 주파수들(f1, f2)중 하나에 대해서만 접지 리턴 경로 할당을 변화시킬 수 있다.
- <23> 도 1의 반응기의 또 다른 선택적 모드에서, VHF 생성기들 중 단지 하나(예를 들면, 단지 생성기(240))만이 RF 전력을 제공하며, 다른 생성기(예를 들면, 생성기(242))는 사용되지 않거나 또는 제거된다. 균일성 제어기(270)는 ESC 전극(226)을 통해 접지 리턴 경로의 임피던스를 제어하기 위해, f1 대역통과 필터(252)를 가변시킴으로써 플라즈마 이온 방사상 분포를 변화시킨다. 이에 ESC 전극(226)을 지나는 중심부 경로와 측벽(202)을 지나는 측면 경로 사이에 접지 리턴 경로가 할당된다. 결과적으로, 이러한 제어기(270) 특성은 균일성이 최적화되도록 플라즈마 이온 분포에서 중심부가 높은 불균일성 및 중심부가 낮은 불균일성을 변화시킨다.
- <24> 단지 2개의 VHF 생성기들(240, 242)만이 도 1a에 도시되었지만, 더 많은 VHF 생성기가 상이한 주파수들에 이용될 수 있다. 예를 들어, 2개의 VHF 생성기들(240, 242)중 하나 보다 높은 주파수를 갖는 제 3의 VHF 생성기가 이용될 수 있다. 앞서 개시된 것처럼, 상위 VHF 주파수 생성기(예를 들어, 162 MHz)는 플라즈마 이온 분포에서 중심부 피크를 생성하는 반면 하위 VHF 주파수 생성기(242)(60MHz)는 에지 피크를 생성한다. 불균일성은 플라즈마 이온 밀도 방사상 분포에서 최소점을 채우는 중심부와 에지 사이에 피크를 생성하는 높은 주파수를 갖는 제 3의 VHF 생성기를 도입함으로써 개선될 수 있다.
- <25> 도 1a의 반응기는 플라즈마 이온을 생성하고 웨이퍼 상의 바이어스 전압을 제어하기 위해 통상적으로 단일 HF(13.56MHz) 주파수로 생성되는 매우 낮은 밀도의 바이어스만의 플라즈마의 플라즈마 프로세스 조건 특성을 재현하는데 이용될 수 있다. 이러한 시뮬레이션은 원하는 낮은 플라즈마 이온 밀도를 설정하기 위해 생성기(264)로부터 LF(예를 들어, 2MHz) 바이어스 전력만을 인가하고, 2개의 생성기들(240, 242) 각각의 출력 전압을 매우 낮은 레벨(예를 들어, 10와트)로 설정함으로써 구현될 수 있다. 이러한 구현의 장점은 2개의 생성기들(240, 242)이 출력 전력에서의 미세한 변화로 조절될 수 있어, 단일의 HF(13.56MHz) 주파수 소스로 달성될 수 있는 것보다 훨씬 광범위한 범의 프로세스 조건 변화에 대한 플라즈마 균일성을 유지할 수 있다는 것이다.
- <26> 도 2는 도 1a 반응기의 변형을 나타내며, 하위 VHF 주파수(f2) 생성기(242) 및 정합부(246) 및 노치 필터(250)는 천정 전극(204) 보다는 ESC 전극(226)에 결합된다. 이 경우, f2 접지 리턴 경로는 천정 전극(204)을 지난다. 따라서, f2 가변 대역통과 필터(254)는 ESC 전극(226) 보다는 천정 전극(204)과 결합된다. 상위 VHF 주파수(f1) 생성기(240)로부터의 RF 전류를 차단하도록 조정되는 노치 필터(255)는 f2 대역통과 필터(254)와 접속될 수 있다. 마찬가지로, 하위 VHF 주파수(f2) 생성기(242)로부터 RF 전류를 차단하도록 조정되는 노치 필터

(253)는 f1 대역통과 필터(252)와 접속될 수 있다.

- <27> 도 2의 반응기의 선택적 모드에서, 상부(천정 전극(204)) 및 바닥(ESC 전극(226))에 인가되는 VHF 주파수들(f1, f2)은 각각 동일한 주파수이다(f1=f2). 이 경우, 제어기(270)는 천정 전극(204)과 ESC 전극(226)에서의 전압들(또는 전류들) 간의 위상을 변화시킴으로써 이온 밀도(또는 에칭률)의 방사상 분포를 변화시킨다. 천정 전극(204)과 ESC 전극(226) 간의 위상은 예를 들어, 대역통과 필터들(252, 254)의 리액턴스를 변화시킴으로써 제어될 수 있다. 선택적으로, 위상은 생성기들(240, 242) 중 하나 또는 둘 다에서 제어될 수 있다. 예를 들어, 대역 통과 필터들(252, 254)의 리액턴스가 동일한 경우(및 다른 차이점이 없는 경우), 천정 및 ESC 전극들(204, 226)에서 RF 전류들 간의 위상 각도는 제로이다. 180도 위상에서, 본질적으로 모든 전류는 천정 전극(204)과 ESC 전극(226) 사이를 흘러, 플라즈마 이온 밀도 또는 에칭률의 중심부가 높은 분포를 생성한다. 0도 위상에서, 본질적으로 모든 전류는 천정 전극(204) 또는 ESC 전극(226)중 하나로부터 측벽(202)으로 흘러, 중심부가 낮고 에지가 높은 분포를 생성한다. 따라서, 제어기(270)는 광범위한 결과를 얻기 위해 위상 각도를 0도 내지 180도 사이에서 가변시킬 수 있다.
- <28> 도 2의 또 다른 선택적인 반응기 모드에서는, 단지 하나의 VHF 생성기(즉, 단지 f2 생성기(242))만이 RF 전력을 제공하며, 다른 생성기(240)는 사용되지 않거나 또는 제거된다. 균일성 제어기(270)는 천정 전극(204)을 통해 접지 리턴 경로의 임피던스를 제어하기 위해 f2 대역통과 필터(254)를 변화시킴으로써 플라즈마 이온 방사상 분포를 변화시켜, 측벽(202)을 통한 접지 리턴 경로의 (고정) 임피던스를 기준으로 임피던스를 증가 및 감소시킬 수 있다. 이로 인해 측벽(202)을 통한 측면 경로 및 천정 전극(204)을 통한 중심부 경로 사이에 접지 리턴 경로가 할당된다. 결과적으로, 이러한 제어기(270) 특성은 균일성을 최적화시키기 위해 플라즈마 이온 분포에서(또는 동등한 에칭률 분포에서) 중심부가 높은 불균일성 및 중심부가 낮은 불균일성을 변화시킨다.
- <29> 도 2 반응기의 또 다른 선택적 모드에서, 단지 하나의 VHF 생성기(즉, 단지 f1 생성기(240))만이 RF 전력을 제공하며, 다른 생성기(242)는 사용되지 않거나 제거된다. 균일성 제어기(270)는 ESC 전극(226)을 통한 접지 리턴 경로의 임피던스를 제어하기 위해 f2 대역통과 필터(252)를 변화시킴으로써 플라즈마 이온 방사상 분포를 변화시켜, 임피던스가 측벽(202)을 통한 접지 리턴 경로의 (고정) 임피던스를 기준으로 증가 또는 감소될 수 있다. 이로 인해 측벽(202)을 통한 측면 경로 및 ESC 전극(226)을 통한 중심부 경로 사이에 접지 리턴 경로가 할당된다. 결과적으로, 이러한 제어기(270) 특성은 균일성을 최적화시키기 위해 플라즈마 이온 분포에서(또는 동등한 에칭률 분포에서) 중심부가 높은 불균일성 및 중심부가 낮은 불균일성을 변화시킨다.
- <30> 도 3a 및 도 3b는 도 1 반응기의 변형을 나타내며, 천정 전극(204)은 서로 전기적으로 절연된 방사상 내부 및 외부 섹션(204a, 204b)으로 나뉘며, 생성기들(240, 242) 각각의 하나에 의해 개별적으로 구동된다. 하나의 생성기는 외부 전극(204b)을 구동시키기 위해 다른 것은 남겨두고 내부 전극(204a)이 구동되도록 선택될 수 있는 반면, 상위 VHF 주파수 생성기(240)는 내부 전극(204a)과 결합되고 하위 VHF 주파수 생성기(242)는 외부 전극(204b)과 결합되어, 중심부가 높은 이온 분포가 전개되도록 높은 주파수 성향이 강화되고 중심부가 낮은 이온 분포가 전개되도록 낮은 주파수 성향이 강화될 수 있다.
- <31> 도 4는 도 1 반응기의 변형을 나타내며, 접지 리턴 대역통과 필터들(252, 254)이 천정 전극(204)과 결합되는 동안 VHF 생성기들(240, 242) 모두는 ESC 전극(226)을 구동시킨다.
- <32> 도 5는 도 2 반응기의 변형을 나타내며, 2개의 주파수들(f1, f2)은 모두 VHF 대역의 하위 부분이다. 예를 들어, f1 및 f2는 각각 54MHz 및 60MHz일 수 있다. 이는 대략 20MHz 또는 150MHz 이상의 출력 주파수를 갖는 상위 VHF 주파수 생성기에 대한 요구조건을 소거시킴으로써 효과적인 비용 절감을 나타낸다. 도 5의 반응기에서, 중심부가 높은 응답을 제공하는 상위 VHF 주파수(예를 들어, 162MHz) 제거는 천정 전극(204)(또는 선택적으로 f1 생성기(240)의 출력)에 결합된 상위 VHF 주파수(예를 들어, 162MHz) 공명기(274)로 산출된다. 바람직하게, 공명기(274)는 제 3 고조파(harmonic)와 같은 f1의 홀수 고조파에서 공명되도록 조정된다. 예를 들어, f1=54MHz인 경우, 공명기(274)에서 생성된 제 3 고조파는 162MHz일 수 있다. 높은 고조파 생성은 공명기(274)와 협력하는 주파수 공급기로서 기능하는 반응기 챔버에서 플라즈마의 비선형 응답에 의해 제조된다. 가변 대역통과 필터(252)는 f1에서 생성기(240)로부터의 일부 RF 전력이 f1의 제 3 고조파로 변환되도록 제 3 고조파로 조절된다.
- <33> 도 5 반응기의 또 다른 선택적 모드에서, 단지 하나의 VHF 생성기(즉, 단지 생성기(240))만이 RF 전력을 제공하며, 다른 생성기(242)는 사용되지 않거나 제거된다. 균일성 제어기(270)는 천정 전극(204)을 통해 접지 리턴 경로의 임피던스를 제어하기 위해 f1 대역통과 필터(252)를 변화시킴으로써 플라즈마 이온 방사상 분포를 변화시켜, 측벽(202)을 통한 접지 리턴 경로의 (고정) 임피던스를 기준으로 임피던스가 증가 또는 감소될 수 있다.

이로 인해 천정 전극(204)을 지나는 중심부 경로와 측벽(202)을 지나는 측면 경로 사이에 접지 리턴 전류가 할당된다. 결과적으로, 이러한 제어기(270) 특성은 균일성을 최적화시키기 위해 플라즈마 이온 분포에서(또는 동등한 에칭률 분포에서) 중심부가 높은 불균일성 및 중심부가 낮은 불균일성을 변화시킨다.

<34> 도 6은 상당한 비용 절감을 달성하기 위해 단일의 하위 VHF 주파수 생성기만을 사용하나 동시에 높고 하위 VHF 주파수들을 사용하는 반응기의 변형을 나타낸다. 하위 VHF 생성기(240)는 가변 주파수 발전기(VFO)로, 주파수는 제어기(270)에 의해 기본 주파수 f 와 $f \pm \Delta f$ 사이에서 가변하며, Δf 는 f 로부터의 작은 편차이다. 공명기(274)는 기본 주파수(f)의 제 3 고조파, $F=3 \cdot f$ 로 조정된다. 생성기(240)의 주파수를 변화시킴으로써, 제 3 고조파(F)로 변환되는 생성기의 출력 전력의 비율은 생성기 출력 주파수($f \pm \Delta f$)와 기본 주파수(f) 간의 차에 반비례하게 증가 또는 감소되며, 제 3 고조파는 공명기(274)의 공명 주파수이다. 2개의 주파수들, 즉, 생성기 출력 주파수($f \pm \Delta f$) 및 고조파 주파수(F) 모두는 플라즈마와 결합되고 이들의 상대 전력 레벨은 생성기(240)의 출력 주파수를 변화시킴으로써 제어된다. 생성기 출력 주파수와 기본 주파수(f) 간의 차를 감소시킴으로써, 제 3 고조파에서 플라즈마와 결합된 전력은 증가하는 반면 기본 주파수(f)에서의 전력은 감소되어, 중심부가 높은 불균일성이 증가되거나 또는 에지가 높은 불균일성이 감소된다. 반대로, 생성기 출력 주파수와 기본 주파수(f) 간의 차를 증가시킴으로써, 제 3 고조파에서 플라즈마에 결합된 전력은 감소되는 반면 기본 주파수(f)에서 전력은 증가되어, 에지가 높은 불균일성이 증가되거나 또는 중심부가 높은 불균일성은 감소된다. 따라서, 플라즈마 균일성은 VFO 또는 생성기(240)의 주파수를 가변시킴으로써 제어기(270)에 의해 조절된다. 2개의 가변 대역통과 필터들(252, 254)은 각각 기본 주파수(f), 및 제 3 고조파(F)에 집중된 통과대역을 갖는다.

<35> 일 면에서, 내부 챔버 부재는 알루미늄과 같은 금속으로 형성된다. 플라즈마 프로세싱 동안 금속 오염을 방지 또는 최소화시키기 위해, 측벽(202)의 내부 표면 및 페데스탈(218)의 노출된 표면과 같이, 플라즈마에 노출될 수 있는 금속 챔버 부재들의 표면은 예를 들어, 이트리아와 같은 프로세스-호환 물질의 막으로 코팅된다. 막은 플라즈마-스프레이-코팅 이트리아일 수 있다. 선택적으로, 이트리아와 같은 벌크 세라믹 물질은 하부에 놓인 금속 내부 챔버 부재들과 결합될 수 있다. 예를 들어, 천정(204)은 플라즈마에 노출된 측면 상에 결합된 세라믹 플레이트를 가질 수 있다. 측벽(202)은 플라즈마에 노출된 측면 상에 결합된 세라믹 실린더를 포함할 수 있고, 링(219)은 플라즈마에 노출된 측면 상에 결합된 세라믹 링을 포함할 수 있다. 세라믹 물질은 이들의 전기적 비저항이 ESC 전극(226)에 인가된 ESC 클램핑 전압에 대한 DC 전류 리턴 경로를 제공하는 반도체성 범위(예를 들어, 10^8 내지 10^{12} 옴*cm 범위의 비저항)에 있도록 도핑되거나 또는 다르게 제조될 수 있다. 이들 챔버 표면은 원치않는 증착 또는 예를 들어, 폴리머와 같은 물질의 축적이 최소화되도록 가열되거나 또는 에칭을 최소화 또는 제거하기 위해 냉각되거나 또는 가열 및 냉각 모두를 이용하여 온도가 제어될 수 있다. 챔버의 내부 표면은 적절한 화학작용을 이용함으로써 플라즈마 에칭 프로세스에서 세정될 수 있다. 예를 들어, 건식 세정 단계에서, 산소 또는 산소-함유, 또는 염소 또는 염소-함유 가스가 챔버로 주입되고 VHF 소스 전력 생성기(240, 242) 및/또는 바이어스 전력 생성기(262, 266)을 사용하여 플라즈마가 생성될 수 있다.

<36> 도 7은 도 1의 반응기를 사용하여 수행될 수 있는 프로세스를 나타낸다. 도 7의 블록(300)에서, RF 플라즈마 소스 전력은 동시에 2개의 상이한 VHF 주파수들(f_1, f_2)에서 전극(천정 또는 웨이퍼)을 통해 용량성 결합되며, f_1 은 높은 범위의 VHF 대역(예를 들어 162MHz)이며 f_2 는 낮은 범위의 VHF 대역(예를 들어, 50-60MHz)이다. 블록(302)에서, 개별 중심부 접지 리턴 경로는 도 1에 도시된 것처럼 접지에 대역통과 필터들(252, 254)을 제공함으로써, 카운터 전극(웨이퍼 또는 천정)을 통해 주파수들(f_1, f_2) 각각에 대해 제공된다. 도 7의 블록(304)에서, 에지 리턴 경로는 도 1에 도시된 것처럼 측벽(202)을 접지시킴으로써 측벽을 통해 주파수들(f_1, f_2) 각각에 대해 제공된다. 블록(306)에서, f_1 중심부 리턴 경로의 임피던스는 f_1 에지 리턴 경로의 임피던스를 기준으로 대역통과 필터(252)를 조절함으로써 조절되어, f_1 주파수에서의 전류 흐름이 중심부 리턴 경로로 조장된다. 블록(308)에서, f_2 에지 리턴 경로의 임피던스는 f_2 중심부 리턴 경로의 임피던스를 기준으로 대역통과 필터(254)를 조절함으로써 조절되어, f_2 주파수에서 전류 흐름이 측벽으로 조장된다. 블록(310)에서, 균일성 제어기(270)는 f_1 주파수에서 VHF 주파수 대 f_2 주파수에서 VHF 주파수의 비율을 선택함으로써 방사상 플라즈마 이온 밀도 분포의 균일성이 개선된다. 블록(310)의 단계는 f_2 주파수에서의 VHF 전력을 기준으로 f_1 주파수에서의 VHF 전력의 비율을 감소시킴으로써 중심부가 높은 플라즈마 이온 밀도 분포 감소가 수행될 수 있다(블록(312)). 또한, 블록(310)의 단계는 f_1 주파수에서 VHF 전력을 기준으로 f_2 주파수에서의 VHF 전력의 비율을 감소시킴으로써 에지가 높은 플라즈마 이온 밀도 분포 불균일성을 감소시키도록 수행될 수 있다(블록(314)). 이온 밀도 분포에 영향을 미치거나 또는 개선시킬 수 있는 다른 방법으로서, 제어기(270)는 f_1 및 f_2 중 하나 또는 둘다의 중심부 및 에지 리턴 경로들의 임피던스를, (a) 중심부가 높은 불균일성이 완화되도록 많은 전류가 에지를 향하는 채널, 또는 (b) 에지가 높은 불균일성이 완화되도록 많은 전류가 중심부를 향하는 채널로 조절할 수

있다(블록(316)).

- <37> 여기서, 균일성은 방사상 플라즈마 이온 밀도 분포를 기준으로 참조된다. 이러한 분포는 반응기에서의 플라즈마 에칭 프로세스에 의해 처리되는 웨이퍼 표면에 대해 측정될 수 있는 에칭률 방사상 분포로부터 추측되거나 또는 이와 동일한 것으로 이해된다.
- <38> 도 8은 도 2 반응기를 이용하여 수행될 수 있는 프로세스를 나타낸다. 도 8의 블록(318) 단계에서, RF 플라즈마 소스 전력은 상위 VHF 주파수(f1)(예를 들어, 약 162MHz)에서 하나의 전극(천정 또는 웨이퍼)를 통해 용량성 결합되는 반면 RF 플라즈마 소스 전력은 하위 VHF 주파수(f2)(예를 들어, 약 50-60MHz)에서 카운터전극(웨이퍼 또는 천정)을 통해 용량성 결합된다. 블록(320)에서, 중심부 리턴 경로가 카운터전극을 통해 주파수(f1)에 대해 제공된다. 블록(322)에서, 중심부 리턴 경로가 전극을 통해 주파수(f2)에 대해 제공된다. 블록(324) 단계에서, 에지 리턴 경로가 측벽을 통해 주파수들(f1, f2) 각각에 대해 제공된다. 블록(326) 단계에서, f1 중심부 리턴 경로의 임피던스는 f1 에지 리턴 경로의 임피던스를 기준으로 가변 대역통과 필터(252)를 조절함으로써 조절되어, f1 주파수에서의 전류 흐름이 중심부 리턴 경로로 조장된다. 블록(328)의 단계에서, f2 측면 리턴 경로 임피던스는 f2 중심부 리턴 경로의 임피던스를 기준으로 가변 대역통과 필터(254)를 조절함으로써 조절되어, f2 주파수에서의 전류 흐름이 측벽으로 조장된다. 블록(330)의 단계에서, 제어기(270)는 f1 주파수에서 VHF 전력 대 f2 주파수에서 VHF 전력의 비율을 선택함으로써 방사상 플라즈마 이온 밀도 분포의 균일성을 개선시킨다. 이러한 단계는 f2 주파수에서 VHF 전력을 기준으로 f1 주파수에서 VHF 전력의 비율을 감소시킴으로써 중심부가 높은 플라즈마 이온 밀도 분포 감소를 수행할 수 있다(블록(332)). 이러한 단계는 f1 주파수에서 VHF 전력을 기준으로 f2 주파수에서 VHF 전력 비율을 감소시킴으로써 에지가 높은 플라즈마 이온 밀도 분포 불균일성 감소를 수행할 수 있다(블록(334)). 블록(330)의 단계에 대해 선택적으로 또는 부가적으로, 제어기(270)는 f1 및 f2중 하나 또는 둘다의 중심부 및 에지 리턴 경로들의 임피던스를, (a) 중심부가 높은 불균일성이 완화되도록 많은 전류가 에지를 향하는 채널, 또는 (b) 에지가 높은 불균일성이 완화되도록 많은 전류가 중심부를 향하는 채널로 조절함으로써 균일성을 개선시킬 수 있다(도 8의 블록(336)).
- <39> 도 9는 도 3a 반응기를 사용하여 수행될 수 있는 프로세스를 나타낸다. 도 9의 프로세스에서, RF 플라즈마 소스 전력의 상위 VHF 주파수(f1)에서 내부 천정 전극을 통한 RF 플라즈마 소스 전력은 하위 VHF 주파수(f2)에서 외부 천정 전극을 통해 용량성 결합된다(도 9의 블록(338)). 블록(340)에서, 중심부 리턴 경로는 접지와 결합되는 대역통과 필터(252)를 제공함으로써 웨이퍼를 통해 주파수(f1)에 대해 제공된다. 블록(342)에서, 웨이퍼를 통한 중심부 리턴 경로는 접지와 결합되는 대역통과 필터(254)를 제공함으로써 주파수(f2)에 대해 제공된다. 도 9의 블록(344)에서, 에지 리턴 경로는 도 3a에 도시된 것처럼, 측벽(202)을 접지시킴으로써 측벽(202)을 통해 주파수들(f1, f2) 각각에 대해 제공된다. 블록(346)의 단계에서, f1 중심부 리턴 경로의 임피던스는 대역통과 필터(252)의 리액턴스를 조절함으로써 f1 에지 리턴 경로의 임피던스를 기준으로 조절되어 f1 주파수에서 전류 흐름을 중심부 리턴 경로로 조장한다. 블록(348)의 단계에서, f2 에지 리턴 경로의 임피던스는 대역통과 필터(254)의 리액턴스를 조절함으로써 f2 중심부 리턴 경로의 임피던스를 기준으로 조절되어 f2 주파수에서 보다 많은 전류 흐름을 측벽으로 조장한다. 블록(350)에서, 제어기(270)는 f1 주파수에서 VHF 전력 대 f2 주파수에서 VHF 전력의 비율을 선택함으로써 방사상 플라즈마 이온 밀도 분포(또는 웨이퍼 상에서의 에칭률 분포)의 균일성을 개선시킨다. 이러한 단계는 f2 주파수에서 VHF 전력의 기준으로 f1 주파수에서 VHF 전력의 비율을 감소시킴으로써 중심부가 높은 플라즈마 이온 밀도 분포 감소를 수행할 수 있다(블록(352)). 또는, 이 단계는 f1 주파수에서의 VHF 전력을 기준으로 f2 주파수에서 VHF 전력의 비율을 감소시킴으로써 에지가 높은 플라즈마 이온 밀도 분포 불균일성 감소를 수행할 수 있다(블록(354)). 블록(350)의 단계에 대해 선택적으로, 또는 부가적으로, 제어기(270)는 f1 및 f2중 하나 또는 둘다의 중심부 및 에지 리턴 경로들의 임피던스를, (a) 중심부가 높은 불균일성이 완화되도록 많은 전류가 에지를 향하는 채널, 또는 (b) 에지가 높은 불균일성이 완화되도록 많은 전류가 중심부를 향하는 채널로 조절함으로써 균일성을 개선시킬 수 있다(도 9의 블록(356)).
- <40> 도 10은 서로 동일한(또는 적어도 서로 거의 동일한) 2개의 VHF 주파수들(f1, f2)을 설정함으로써 도 2의 반응기에서 수행될 수 있는 프로세스를 나타낸다. 이 경우, 대역통과 필터들(252, 254)은 천정 및 웨이퍼에서 VHF 전압들(또는 전류들) 간의 위상을 제어 또는 변화시킬 수 있는 가변 리액턴스로서 사용된다. 도 10의 블록(358) 단계에서, RF 플라즈마 소스 전력은 VHF 주파수에서 하나의 전극(천정 또는 웨이퍼)을 통해 용량성 결합되는 반면 동일한 VHF 주파수에서 카운터전극(웨이퍼 또는 천정)을 통해 RF 플라즈마 소스 전력과 용량성 결합된다. 블록(360)에서, 가변 리액턴스와 같은 제어 부재(예를 들어, 가변 대역통과 필터(252))는 위상 제어를 위해 도 2의 카운터전극(226)에 제공된다. 블록(362)에서, 가변 리액턴스와 같은 제어 부재(예를 들어, 가변 대역통과 필터(254))는 위상 제어를 위해 전극(204)에 제공된다. 블록(364)의 단계에서, 에지 리턴 경로는 측

벽(202)을 접지시킴으로써 제공된다. 블록(366)의 단계에서, 제어기(270)는 전극과 카운터전극에서의 VHF 전류들 간의 위상차를 제어함으로써 방사상 플라즈마 이온 밀도 분포의 균일성을 개선시킨다. 이러한 단계는 위상차를 180도를 향해 이동시킴으로써 중심부가 높은 플라즈마 이온 밀도 분포 감소를 수행할 수 있다(도 10의 블록(367)). 또는, 블록(368)의 단계는 위상차를 0도를 향해 이동시킴으로써 에지가 높은 플라즈마 이온 밀도 분포 감소를 수행할 수 있다.

<41> 도 11은 도 5 반응기를 사용하여 수행될 수 있는 프로세스를 나타낸다. 도 11의 블록(370)에서, 모두 VHF 대역의 하위 영역에 있는 2개의 유사한 VHF 주파수들(f_1 , f_2)에서 RF 플라즈마 소스 전력은 각각 전극(도 5의 204) 및 카운터전극(도 5의 206)과 용량성 결합된다. 이는 상위 VHF 주파수(예를 들어, 160-200MHz) 생성기의 비용을 감소시킴으로써 상당한 비용 절감을 나타낸다. 도 11의 블록(372)에서, 전극(204)은 f_1 의 홀수(예를 들어, 제 3) 고조파인 공명 주파수를 갖는 공명기(도 5의 274)에 결합되며, 홀수(예를 들어, 제 3) 고조파(예를 들어, 162MHz)에서 VHF 전력을 생성하기 위해, VHF 대역의 높은 영역에 놓인다. 블록(374)에서, 개개의 중심부 리턴 경로는 예를 들어, 대역통과 필터(252)를 제공함으로써, 카운터 전극(도 5의 266)을 통해 f_1 의 제 3 고조파에 대해 제공된다. 블록(376)에서, 개개의 중심부 리턴 경로는 예를 들어, 대역통과 필터(254)를 제공함으로써 전극(204)을 통해 VHF 주파수(f_2)에 대해 제공된다. 블록(378)에서, 에지 리턴 경로는 측벽(도 5의 202)을 접지시킴으로써, 측벽을 통해 f_1 의 홀수 고조파 및 f_2 에 대해 제공된다. 블록(380)의 단계에서, 조절기(270)는 f_1 에서의 전류 흐름을 중심부 리턴 경로로 조장하기 위해 대역통과 필터(252)의 리액턴스를 조절함으로써 f_1 고조파 에지 리턴 경로의 임피던스를 기준으로 f_1 고조파 중심부 리턴 경로의 임피던스를 조절한다. 블록(382)의 단계에서, 제어기(270)는 f_2 에서의 전류 흐름을 측벽으로 조장하기 위해 대역통과 필터(254)의 리액턴스를 조절함으로써 f_2 중심부 리턴 경로의 임피던스를 기준으로 f_2 에지 리턴 경로의 임피던스를 조절한다. 제어기(270)는 플라즈마와 결합된 f_2 전력과 f_1 고조파 전력 간의 비율을 조절하기 위해, f_1 및 f_2 생성기들 간의 VHF 전력 비율을 선택함으로써 방사상 플라즈마 이온 밀도 분포의 균일성을 개선시킨다(블록(384)). 이 단계는 f_2 주파수에서 VHF 전력을 기준으로 f_1 주파수에서 생성된 VHF 전력 비율을 감소시킴으로써 중심부가 높은 플라즈마 이온 밀도 분포 감소를 수행할 수 있다(블록(386)). 또한, 이 단계는 f_1 주파수에서 생성된 VHF 전력을 기준으로 f_2 주파수에서의 VHF 전력의 비율을 감소시킴으로써 에지가 높은 플라즈마 이온 밀도 분포 균일성 감소를 수행할 수 있다(도 11의 블록(388)). 블록(384) 단계에 대해 선택적으로 또는 부가적으로, 제어기(270)는 f_2 및 f_1 의 고조파중 하나 또는 둘 다의 중심부 및 에지 리턴 경로들의 임피던스를, (a) 중심부가 높은 불균일성이 완화되도록 많은 전류가 에지를 향하는 채널, 또는 (b) 에지가 높은 불균일성이 완화되도록 많은 전류가 중심부를 향하는 채널로 조절함으로써 플라즈마 이온 밀도 분포의 균일성을 개선시킬 수 있다(도 9의 블록(356)).

<42> 도 12는 도 5의 변형 반응기에서 수행될 수 있는 프로세스를 나타내며, f_2 대역통과 필터(254)와 f_2 생성기 및 정합부(242, 246)의 위치가 교체되어, 주파수들(f_1 , f_2)이 천정 전극(204)을 구동시킨다. 블록(392)에서, RF 플라즈마 소스 전력은 2개의 유사한 하위 VHF 주파수들(f_1 , f_2)에서 전극에 동시적으로 용량성 결합된다. 블록(394)에서, 공명기(도 5의 274)는 전극(204)에 결합되며, 상기 공명기는 f_1 의 홀수 고조파인 공명 주파수를 가져 홀수 고조파에서 VHF 전력이 생성된다. 이러한 주파수 상향-변환(up-conversion)은 주파수-배중(frequency-multiplying) 효과를 제공하는 플라즈마의 비선형 응답에 의해 용이해진다. 도 12의 블록(396)에서, 개개의 중심부 리턴 경로는 카운터 전극(도 5의 226)을 통해 접지에 결합된 대역통과 필터(252)를 제공함으로써 f_1 의 고조파에 대해 제공된다. 도 12의 블록(398)에서, 개개의 중심부 접지 리턴 경로는 카운터전극을 통해 접지에 결합된 도 5의 대역통과 필터(254)를 제공함으로써 VHF 주파수(f_2)에 대해 제공된다. 블록(400)에서, 에지 리턴 경로들은 측벽을 통해 도 5의 측벽(202)을 접지시킴으로써, f_1 의 고조파 및 f_2 에 대해 제공된다. 블록(402)에서, 제어기(270)는 중심부 리턴 경로를 통해 f_1 고조파에서 전류 흐름이 조장되도록, 도 5의 대역통과 필터(252)를 조절함으로써 f_1 고조파 에지 리턴 경로의 임피던스를 기준으로 f_1 고조파 중심부 리턴 경로의 임피던스를 조절한다. 도 12의 블록(404)에서, 제어기(270)는 f_2 주파수에서 전류 흐름이 측벽으로 조장되도록, 도 5의 대역통과 필터(254)의 리액턴스를 조절함으로써, f_2 중심부 리턴 경로의 임피던스를 기준으로 f_2 에지 리턴 경로의 임피던스를 조절한다. 블록(406)에서, 제어기(270)는 플라즈마에 결합된 f_1 고조파 전력과 f_2 전력 간의 비율이 제어되도록, f_1 생성기와 f_2 생성기 간의 VHF 전력 비율을 선택함으로써 방사상 플라즈마 이온 밀도 분포의 균일성을 개선한다. 이 단계는 f_2 주파수에서 VHF 전력을 기준으로 f_1 고조파에서 VHF 전력의 비율을 감소시킴으로써 중심부가 높은 플라즈마 이온 밀도 분포 감소를 수행할 수 있다(블록(408)). 또는, 이 단계는 f_1 고조파에서 VHF 전력을 기준으로 f_2 주파수에서 VHF 전력의 비율을 감소시킴으로써 에지가 높은 플라즈마 이온 밀도 분포 감소를 수행할 수 있다(블록(410)). 블록(408)에서의 프로세스에 대해 선택적으로 또는 부가적으로, 제어기(270)는 f_1 고조파 및 f_2 중 하나 또는 둘다의 중심부 및 에지 리턴 경로들의 임피던스를, (a) 중심부가 높은 불균일성이 완화되도록 많은 전류가 에지를 향하는 채널, 또는 (b) 에지가 높은 불균일성이 완화되도록

많은 전류가 중심부를 향하는 채널로 조절함으로써 균일성을 개선시킬 수 있다(도 12의 블록(412)).

<43> 도 13은 앞서 본 명세서에서 개시된 반응기들에서 2개의 생성기를 요구하는 기능을 구현시키기 위해 단지 하나의 하위 VHF 주파수 생성기(약 50-60MHz)를 이용하는, 도 6의 반응기에서 수행될 수 있는 프로세스를 나타낸다. 도 13의 블록(414)에서, RF 플라즈마 소스 전력은 기본 하위 VHF 주파수(f)를 포함하는 주파수 범위를 갖는 가변 주파수 VHF 생성기(240)로부터 전극(예를 들어, 도 6의 천정 전극(204))을 통해 용량성 결합된다. 블록(416)에서, 공명기(274)는 전극(204)에 결합되고, 상기 공명기는 비선형 혼합 부재로서 챔버내의 플라즈마를 이용하여, 홀수 고조파에서 VHF 전력이 생성되도록 기본 주파수(f)의 홀수 고조파인 공명 주파수(F)를 갖는다. 블록(418)에서, 개개의 중심부 리턴 경로는 접지에 결합된 대역통과 필터(252)를 제공함으로써 카운터전극(예를 들어, 도 6의 ESC 전극(226))을 통해 고조파 주파수(F)에 대해 제공된다. 블록(420)에서, 개개의 중심부 리턴 경로는 접지에 결합된 대역통과 필터(254)를 제공함으로써 카운터전극(도 6의 226)을 통해 기본 VHF 주파수(f)에 대해 제공된다. 도 12의 블록(422)에서, 에지 리턴 경로들은 도 6의 측벽(202)을 접지시킴으로써 측벽(202)을 통해 주파수들(f, F)에 대해 제공된다. 도 12의 블록(424)에서, 제어기(270)는 F에서 중심부 리턴 경로로 전류 흐름을 조장하기 위해, 가변 대역통과 필터(252)를 조절함으로써, F 에지 리턴 경로의 임피던스를 기준으로 F 중심부 리턴 경로의 임피던스를 조절한다. 블록(426)에서, 제어기(270)는 f 주파수에서 전류 흐름이 측벽으로 조장되도록, 가변 대역 통과 필터(254)를 조절함으로써, f 중심부 리턴 경로의 임피던스를 기준으로 f 에지 리턴 경로의 임피던스를 조절한다. 블록(428)에서, 제어기(270)는 기본 주파수(f)에서(또는 대략 기본 주파수(f)에서)의 VHF 전력 대 고조파 주파수(F)에서 VHF 전력의 비율을 조절함으로써, 플라즈마 이온 밀도 분포 균일성을 개선한다. 이는 f에서 F로 상향-변환된 전력의 비율을 제어함으로써 달성된다. 이러한 비율은 VHF 생성기의 가변 출력 주파수와 기본 주파수(f) 간의 차를 제어함으로써 제어된다. 예를 들어, 생성기 출력 주파수가 기본 주파수에 근접함에 따라, (제 3) 고조파 F로 변환되고 가변 주파수 생성기(240)에 의해 생성된 VHF 전력 비율은 증가한다. F에서 VHF 전력 대 f에서 VHF 전력의 최대 비율은 생성기 주파수가 기본 주파수(f)와 같을 때 얻어진다. 블록(428)의 단계는 f에서 VHF 전력을 기준으로 F에서 VHF 전력의 비율을 감소시킴으로써 중심부가 높은 플라즈마 이온 밀도 분포가 감소되도록 수행된다(도 13의 블록(430)). 또는, 블록(428)의 단계는 F에서 VHF 전력을 기준으로 f 주파수에서 VHF 전력의 비율을 감소시킴으로써 에지가 높은 플라즈마 이온 분포 밀도 불균일성이 감소되도록 수행된다(도 13의 블록(432)). 블록(428)의 단계에 대해 선택적으로 또는 부가적으로, 제어기(270)는 각각의 대역통과 필터들(252, 254)를 조절함으로써 F 및 f중 하나 또는 둘다의 중심부 및 에지 리턴 경로들의 임피던스를, (a) 중심부가 높은 불균일성이 완화되도록 많은 전류가 에지를 향하는 채널, 또는 (b) 에지가 높은 불균일성이 완화되도록 많은 전류가 중심부를 향하는 채널로 조절함으로써 균일성을 개선시킬 수 있다.

<44> 정전기 척(218)의 사용은 심지어 매우 낮은(mT) 챔버 압력에서도 웨이퍼(220)에 대한 높은 열전달 속도를 가능케 하며, 열 전달은 정전기 척 없이는 악화된다. 이러한 특징은 매우 강한 터보 펌프일 수 있는 진공 펌프(228)가 매우 낮은 챔버 압력에 대해 요구되는 챔버 레시피를 실행시키게 한다. 매우 낮은 플라즈마 이온 밀도에서 매우 높은 플라즈마 이온 밀도(예를 들어, 10^9 내지 10^{11} 이온/cc)를 생성할 수 있는 VHF 전력 소스와 관련되는 이러한 특징들은 완벽한 웨이퍼 온도 제어 및 플라즈마 이온 밀도 분포 균일성을 유지하면서 높은 바이어스 또는 높은 열 부하에서 낮은 챔버 압력(mT 범위)의 신규한 용량, 높은 플라즈마 이온 밀도(10^{10} 내지 10^{11} 이온/cc 범위)를 제공한다. 도 1-6의 반응기에 포함되는 이러한 특징들은 낮은 챔버 압력 및 높은 플라즈마 이온 밀도를 요구하면서 높은 열 부하를 부과하는 유전체 에칭 플라즈마 프로세스 및 플라즈마 침지 이온 주입 프로세스와 같은 소정의 프로세스들의 요구조건을 수행한다. 그러나, 이러한 반응기들은 광범위한 챔버 압력(mTorr 내지 Torr), 광범위한 웨이퍼 열 부하 및 광범위한 플라즈마 이온 밀도(예를 들어, 10^9 내지 10^{11} 이온/cc)에 대해 수행될 수 있다. 따라서, 도 1-6의 반응기들은 플라즈마 강화 화학적 기상 증착(PECVD), 플라즈마 강화 물리적 기상 증착(PECVD), 플라즈마 도핑 플라즈마 강화 물질 변형과 같은 높은 또는 낮은 플라즈마 이온 밀도 및 높은 또는 낮은 플라즈마 챔버 압력에서 다른 프로세스들의 수행시 이용될 수 있다.

<45> 지금까지는 본 발명의 실시예에 관한 것이었지만, 본 발명의 다른 및 추가적 실시예들이 하기 첨부되는 특허 청구항들에 의해 결정되는 본 발명의 기본 사상 및 범주를 이탈하지 않는 한 고안될 수 있다.

도면의 간단한 설명

<46> 도 1a는 천정 전극에 인가되는 다수의 VHF 소스 전력 주파수를 갖춘 플라즈마 반응기를 나타낸다.

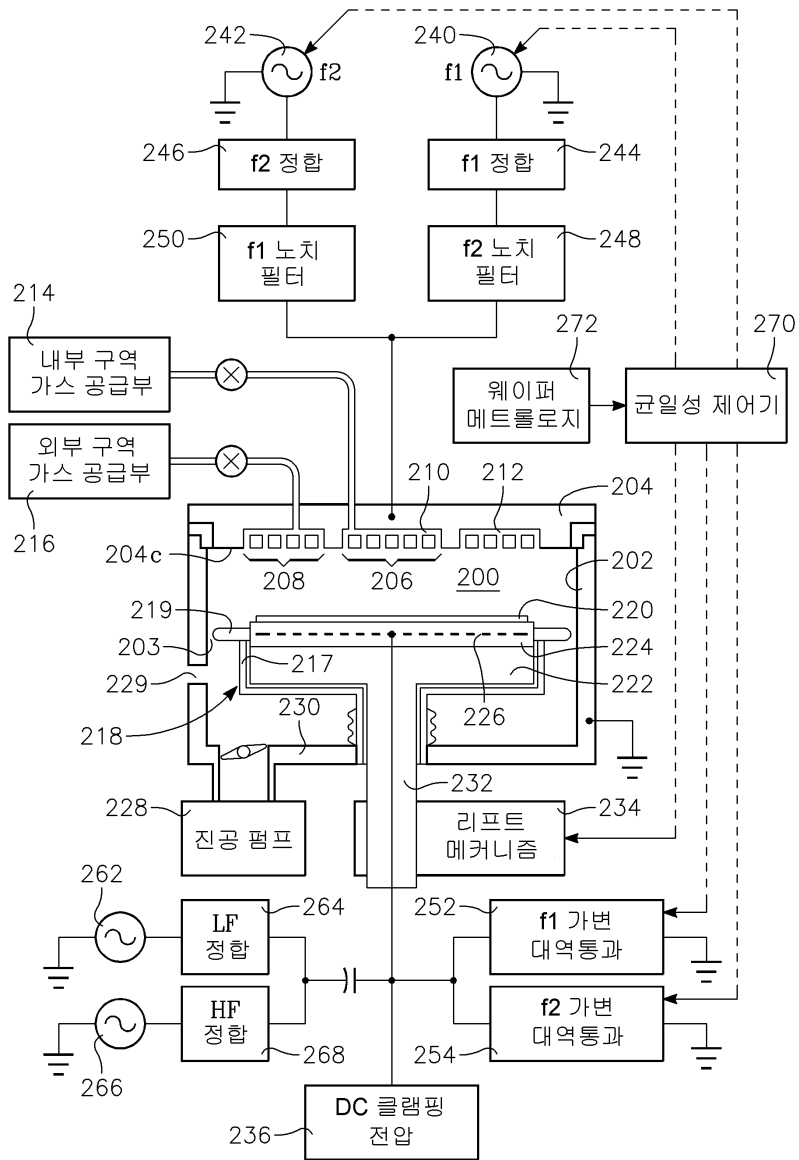
<47> 도 1b는 도 1a의 반응기에서 RF 접지 리턴 경로의 임피던스를 제어하는 가변 리액턴스 또는 대역통과 필터의 부

제들을 나타낸다.

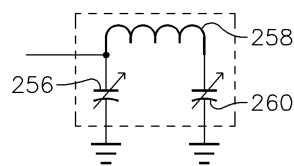
- <48> 도 2는 마주하는 전극들에 인가되는 상이한 VHF 주파수들을 가지는 플라즈마 반응기를 나타낸다.
- <49> 도 3a 및 도 3b는 각각의 중심 전극들에 인가되는 상이한 VHF 주파수들을 갖는 플라즈마 반응기를 나타낸다.
- <50> 도 4는 캐소드 전극에 인가되는 상이한 VHF 주파수들을 갖는 플라즈마 반응기를 나타낸다.
- <51> 도 5는 2개의 VHF 소스 전력 주파수를 갖는 플라즈마 반응기를 나타내며, 상위 VHF 소스 전력 주파수는 하위 VHF 주파수 생성기 및 제 3 고조파 공진기를 사용하여 생성된다.
- <52> 도 6은 생성기 출력 주파수를 변화시킴으로써 결정되는 전력 레벨에서 VHF 대역의 높은 부분(예를 들어, 100MHz 이상)에서 VHF 주파수 성분을 생성하기 위해 제 3 고조파 공진기로 VHF 대역의 낮은 부분(예를 들어, 50-60MHz)에서 단일 VHF 가변 주파수 생성기를 갖는 플라즈마 반응기를 나타낸다.
- <53> 도 7은 도 1의 반응기를 사용하여 수행될 수 있는 프로세스를 나타낸다.
- <54> 도 8은 도 2의 반응기를 사용하여 수행될 수 있는 프로세스를 나타낸다.
- <55> 도 9는 도 3a의 반응기를 사용하여 수행될 수 있는 프로세스를 나타낸다.
- <56> 도 10은 서로 동일한 2개의 VHF 주파수들(f_1 , f_2)을 설정함으로써 도 2의 반응기에서 수행될 수 있는 프로세스를 나타낸다.
- <57> 도 11은 도 5의 반응기를 사용하여 수행될 수 있는 프로세스를 나타낸다.
- <58> 도 12는 도 5의 반응기에서 수행될 수 있는 프로세스를 나타내며, f_2 대역통과 필터(254)와 f_2 생성기 및 정합부(242, 246)의 위치는 교환된다.
- <59> 도 13은 단지 하나의 하위 VHF 주파수 생성기를 사용하여, 도 6의 반응기에서 수행될 수 있는 프로세스를 나타낸다.

도면

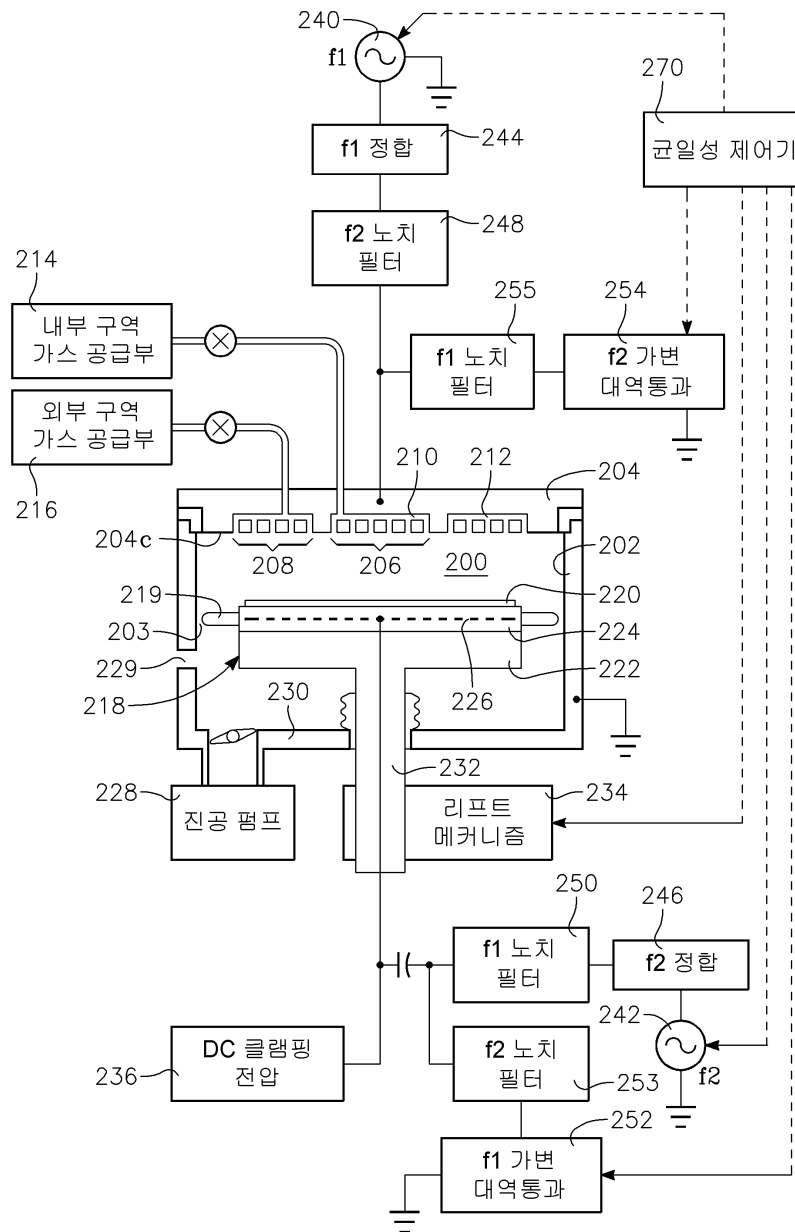
도면1a



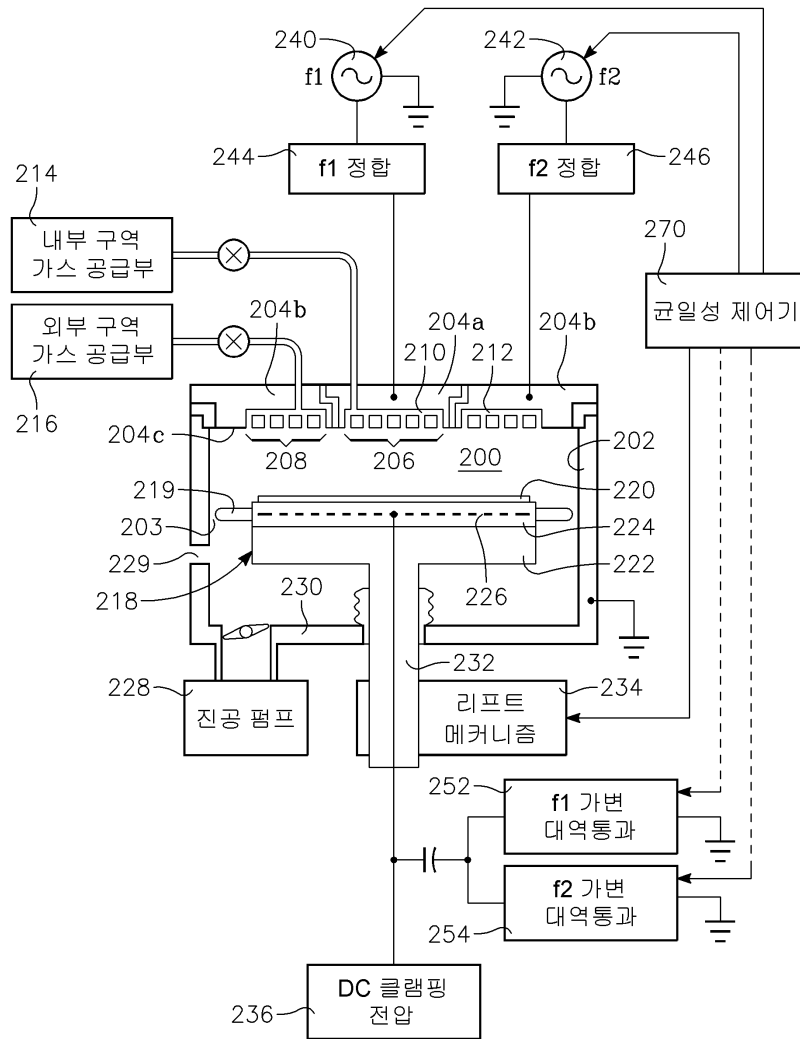
도면1b



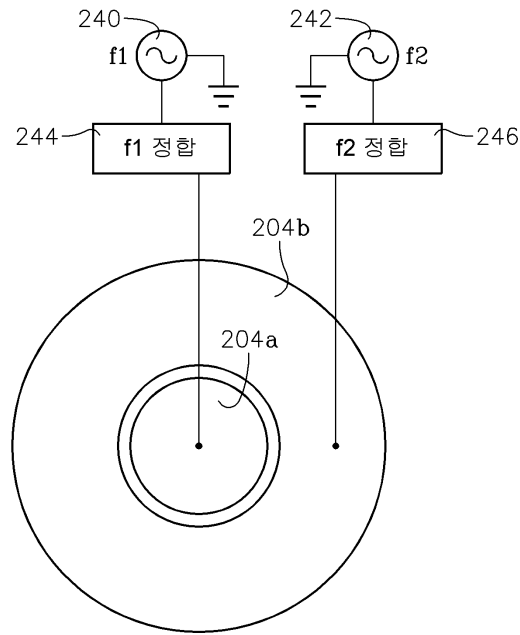
도면2



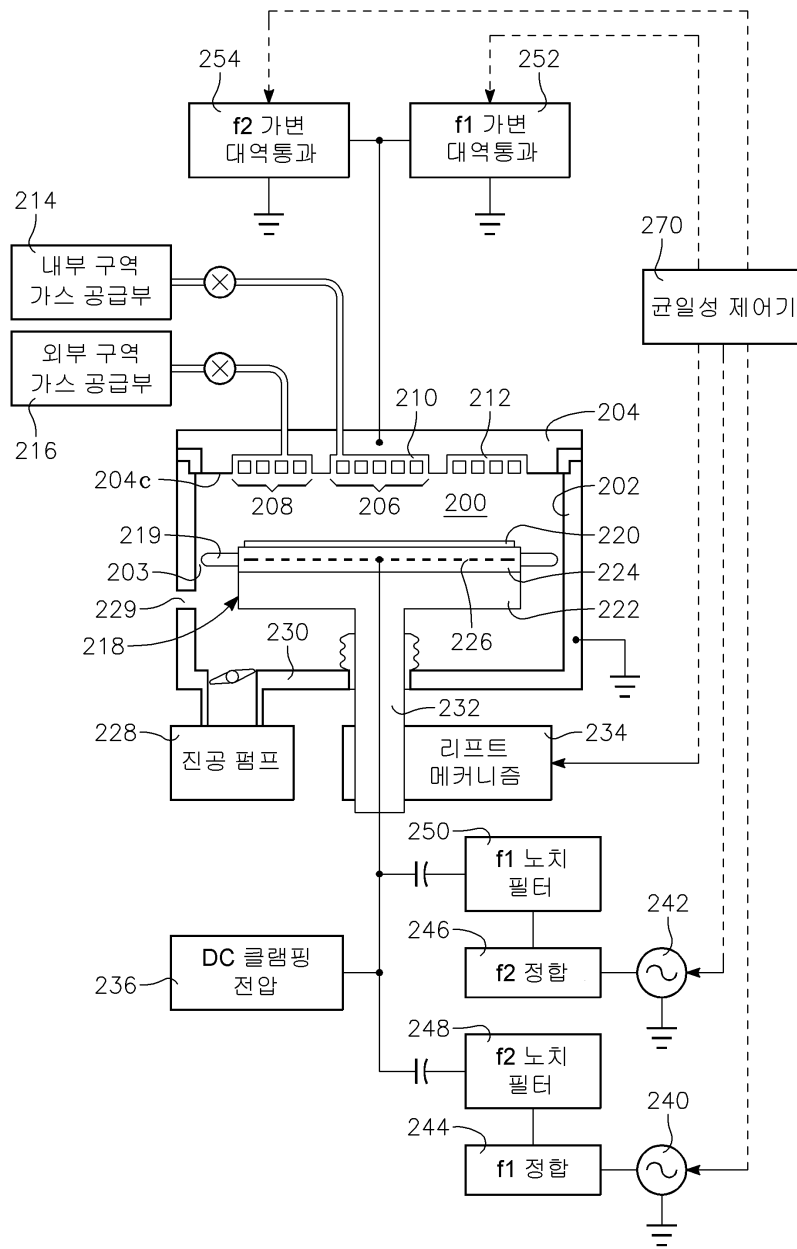
도면3a



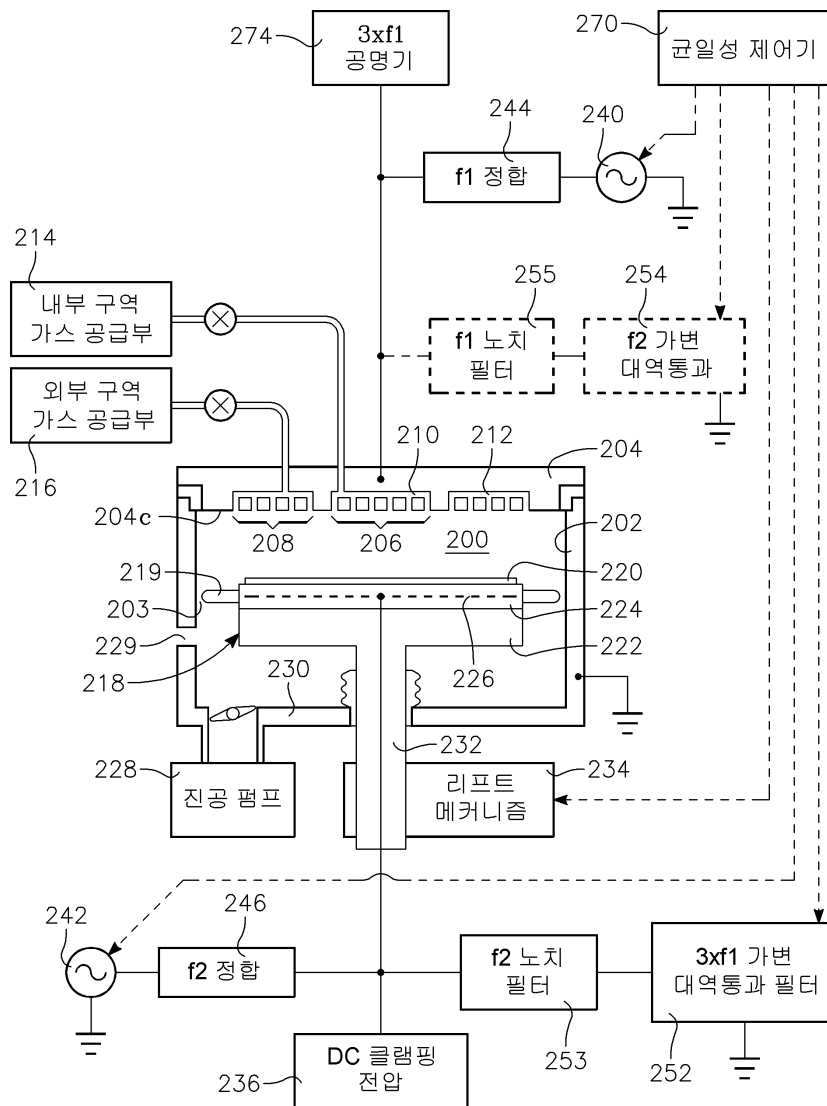
도면3b



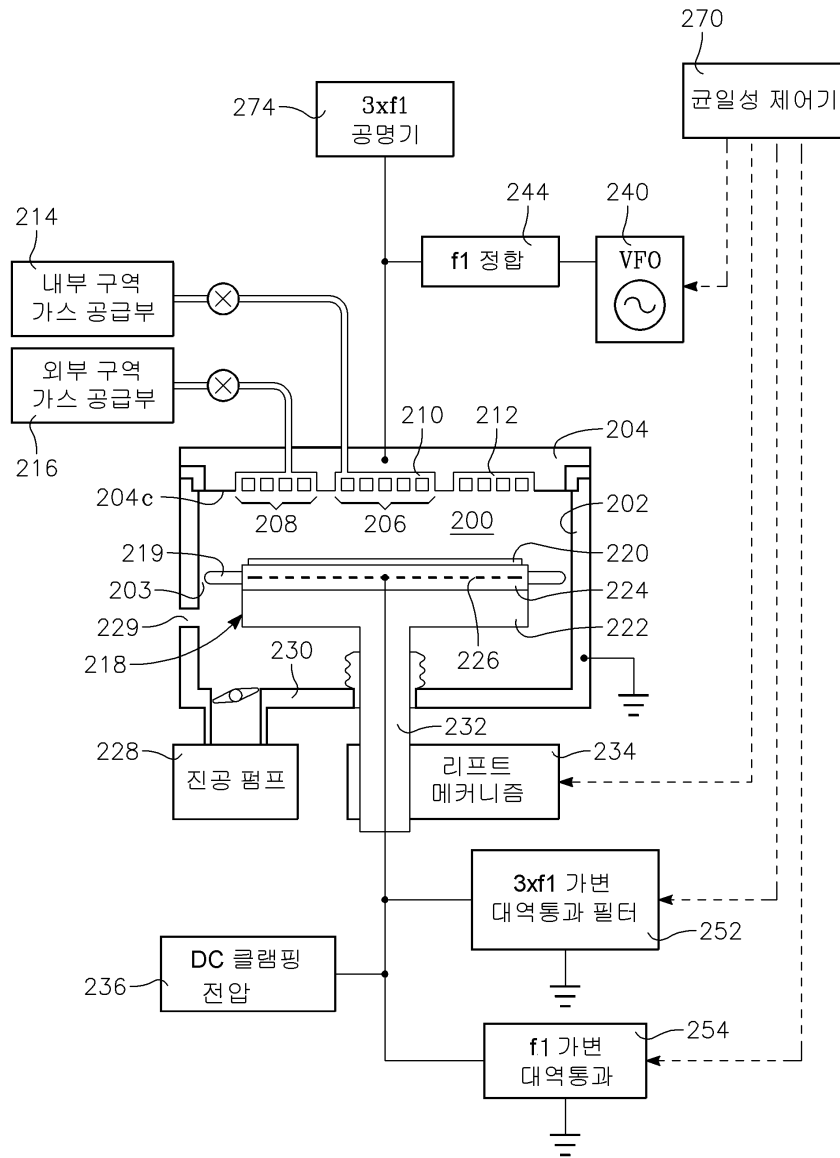
도면4



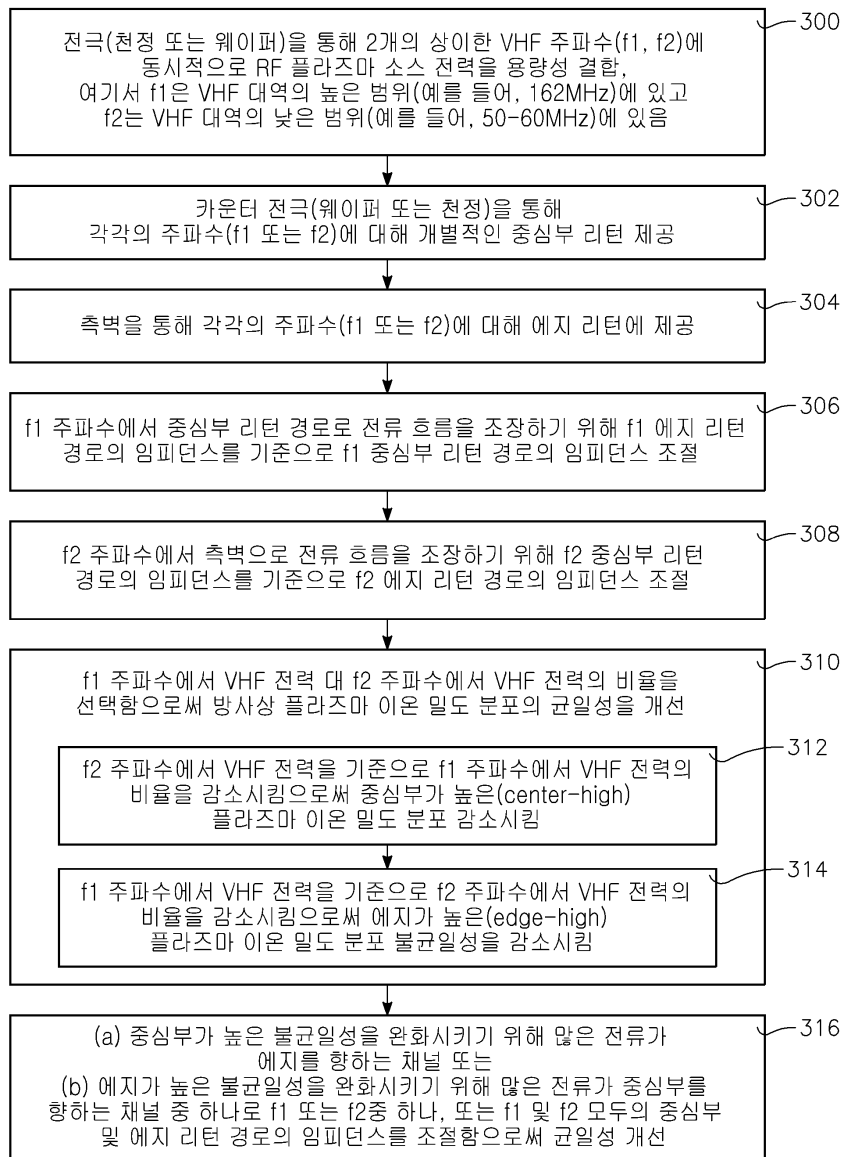
도면5



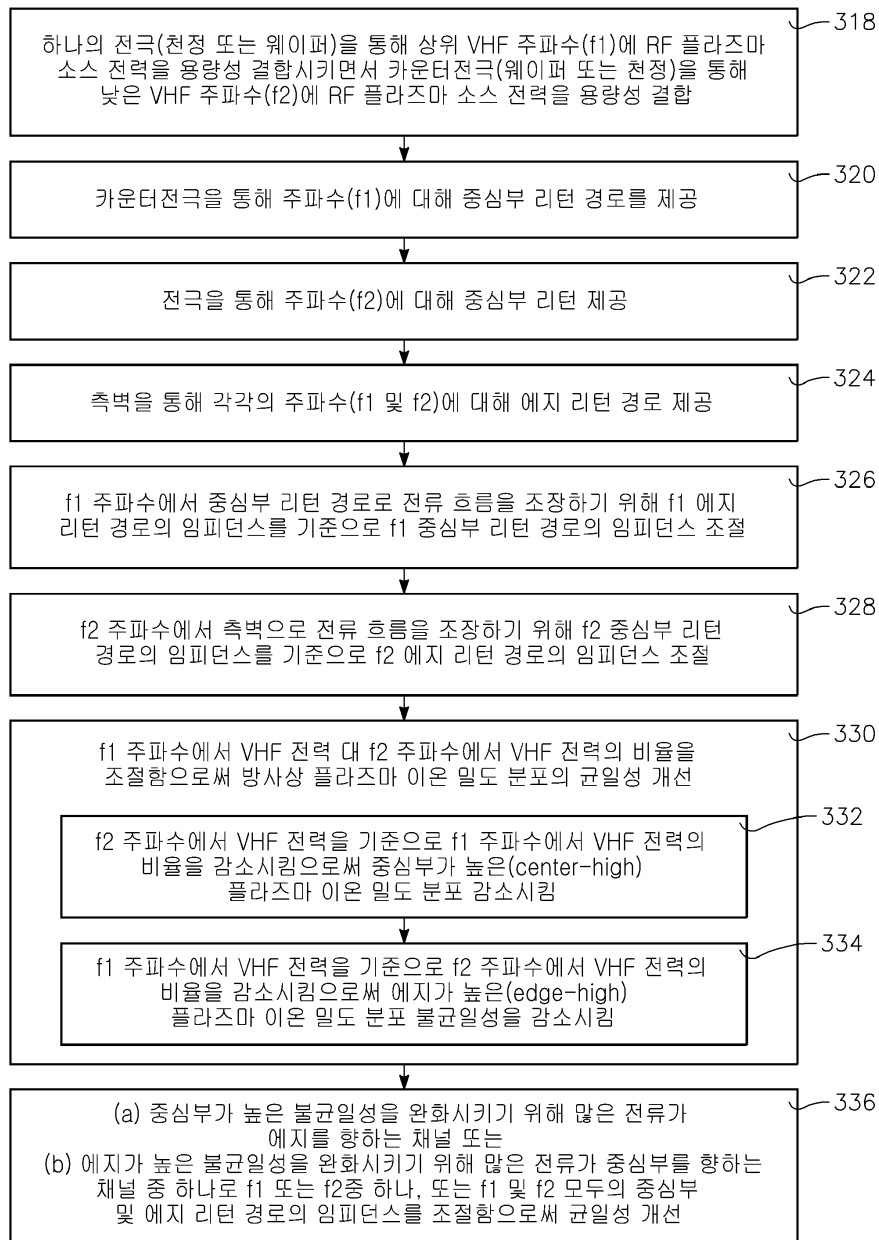
도면6



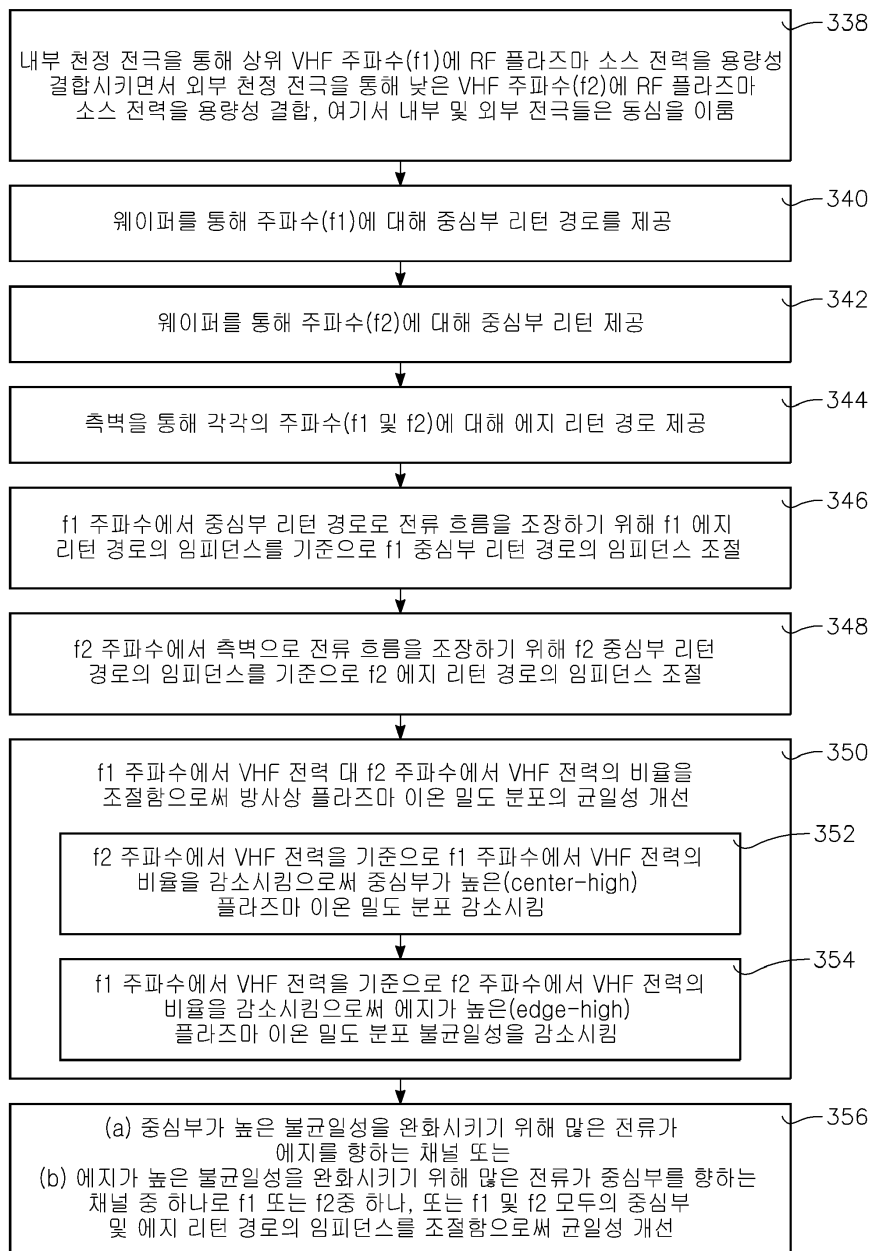
도면7



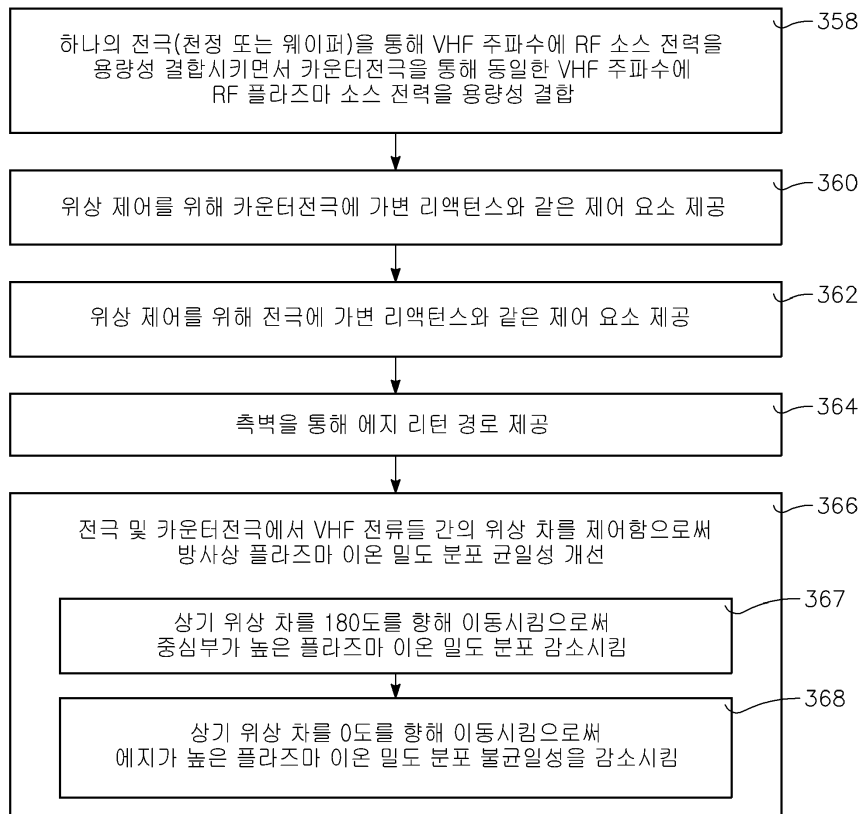
도면8



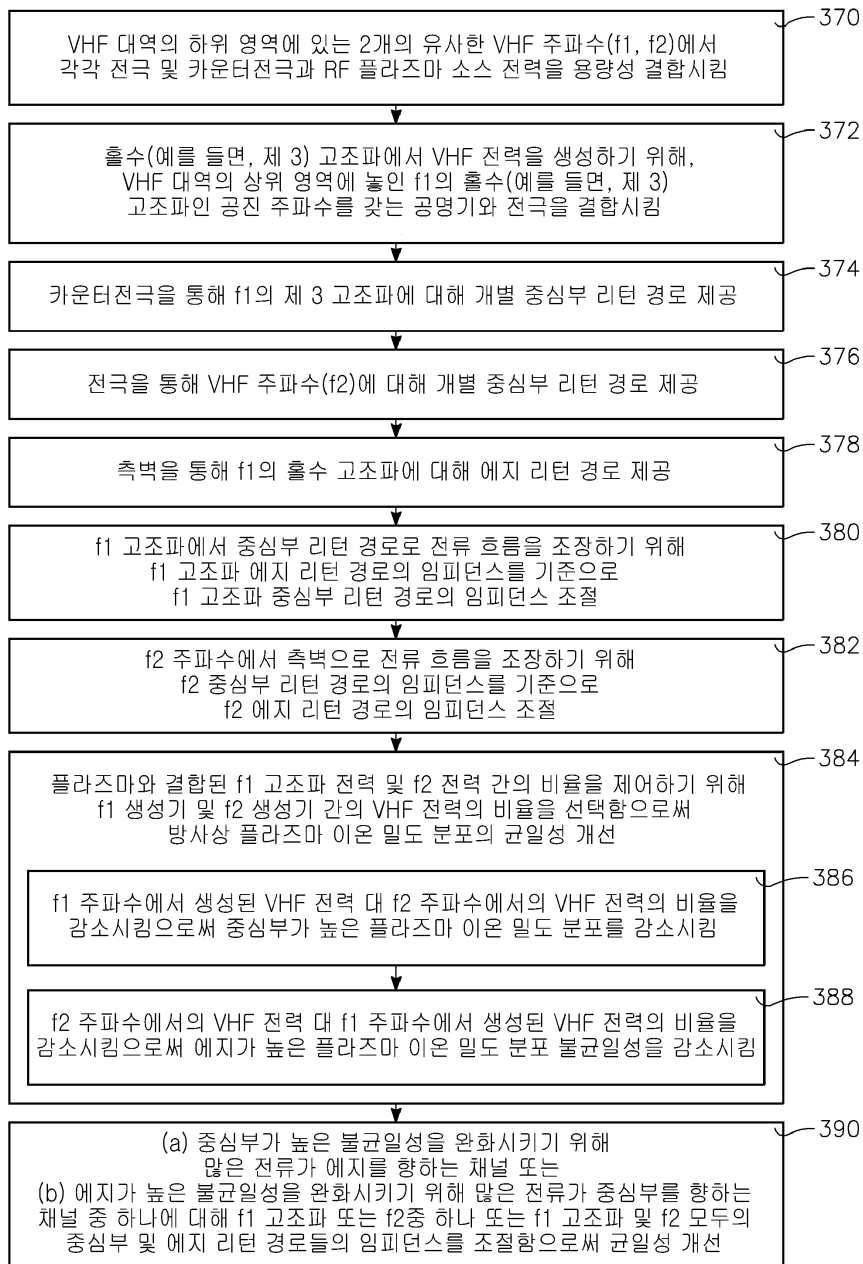
도면9



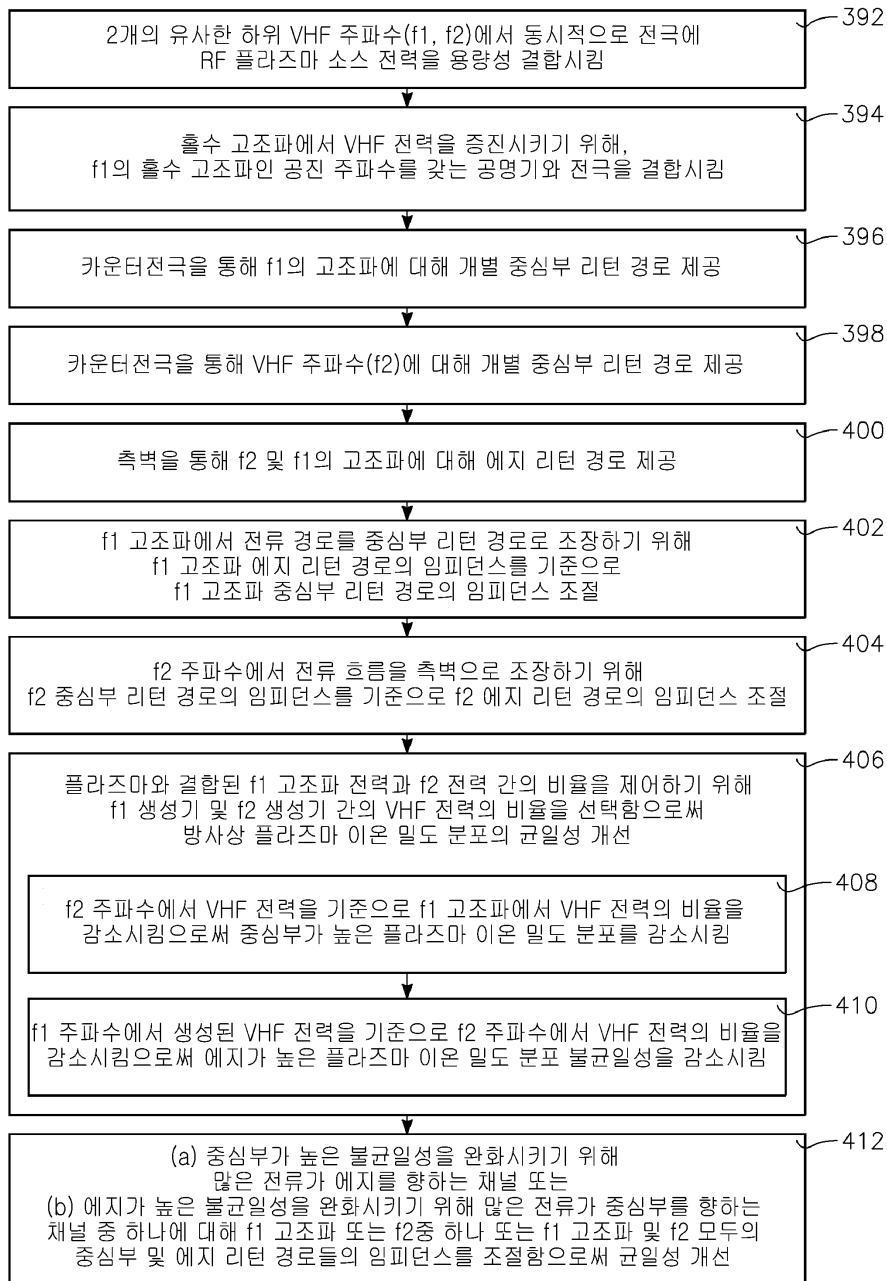
도면10



도면11



도면12



도면13

