



(19) 대한민국특허청(KR)

(12) 등록특허공보(B1)

(45) 공고일자 2015년12월15일

(11) 등록번호 10-1577196

(24) 등록일자 2015년12월08일

(51) 국제특허분류(Int. Cl.)

H01L 21/00 (2006.01)

(21) 출원번호 10-2010-7010152

(22) 출원일자(국제) 2008년10월03일

심사청구일자 2013년10월02일

(85) 번역문제출일자 2010년05월07일

(65) 공개번호 10-2010-0080608

(43) 공개일자 2010년07월09일

(86) 국제출원번호 PCT/US2008/078704

(87) 국제공개번호 WO 2009/048804

국제공개일자 2009년04월16일

(30) 우선권주장

11/868,933 2007년10월08일 미국(US)

(56) 선행기술조사문헌

US05048163 A*

US4007430 A

JP평성10041094 A

JP평성04158331 A

*는 심사관에 의하여 인용된 문헌

(73) 특허권자

어플라이드 머티어리얼스, 인코포레이티드

미국 95054 캘리포니아 산타 클라라 바우어스 애브뉴 3050

(72) 발명자

제닝스, 딘

미국 01915 매사추세츠 베버리 토로우 씨클 6

아담스, 브루스 이.

미국 97239 오리건 포트랜드 싸우쓰웨스트 13 애브뉴 3411

(뒷면에 계속)

(74) 대리인

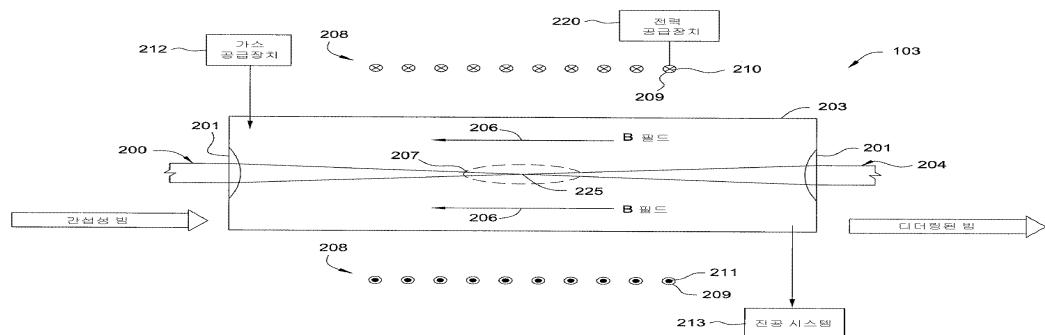
특허법인 남엔드남

전체 청구항 수 : 총 15 항

심사관 : 계원호

(54) 발명의 명칭 **플라즈마를 이용한 간접성 빔의 고속 위상 스크램블링****(57) 요약**

레이저 빔은 열처리 동안 기판 표면 처리 영역 상에서 균일한 복사 플럭스(radiant flux) 밀도를 만들도록 매우 높은 주파수에서 조절된다. 빔 조절은 플라즈마를 통해 레이저를 통과시킴에 의해 얻어지고, 이러한 플라즈마는 레이저 빔 내에서 위상 랜덤화(phase randomization)를 야기한다. 이러한 방법은 강하고 균일한 조명이 요구되는 임의의 분야에서 이용될 수 있는데, 예를 들어 펄스된 레이저 어닐링, 삭마(ablating), 및 웨이퍼 스텝퍼 조명(wafer stepper illuminating)과 같은 것이다.

대표 도

(72) 발명자

토마스, 티모시 엔.

미국 97229 오리건 포트랜드 노쓰웨스트 밸리뷰 코
트 11555

모팻트, 스티븐

영국 제이이3 1엘엘 세인트 로렌스 밀브룩 유케이
채널 아이슬랜드 저지 시필드 코치 하우스

명세서

청구범위

청구항 1

빔 조절기를 통과하는 펄스 간섭성 광 빔(pulsed coherent light beam)을 처리하기 위한 빔 조절기로서,
 8 내지 10 나노초(ns) 펄스 지속 시간 사이의 펄스 폭 및 1 내지 10 줄(Joules) 사이의 에너지에서 펄스 간섭성
 광 빔을 전달하기 위한 광 소스,
 상기 펄스 간섭성 광 빔을 포커싱하기 위한 제 1 렌즈 및 상기 펄스 간섭성 광 빔을 평행하게 하기 위한 제 2
 렌즈를 가진 인클로저(enclosure), 및
 상기 인클로저 내부에 자기장을 만들기 위한 자기장 장치를 포함하며,
 상기 인클로저는 상기 제 1 렌즈와 상기 제 2 렌즈 사이에 플라즈마를 형성하기 위한 비활성 가스를 보유하도록
 구성되고,
 상기 제 1 렌즈 및 상기 제 2 렌즈는 상기 인클로저의 대향 단부들에 배치되는,
 빔 조절기를 통과하는 펄스 간섭성 광 빔을 처리하기 위한 빔 조절기.

청구항 2

제 1 항에 있어서,
 상기 자기장 장치는 솔레노이드에 전류를 제공하는 전력 공급장치에 커플링된 솔레노이드를 포함하며,
 상기 전력 공급장치는 상기 자기장의 강도를 조절하도록 조절될 수 있는,
 빔 조절기를 통과하는 펄스 간섭성 광 빔을 처리하기 위한 빔 조절기.

청구항 3

삭제

청구항 4

빔 조절기를 통과하는 펄스 간섭성 광 빔(pulsed coherent light beam)을 처리하기 위한 빔 조절기로서,
 8 내지 10 나노초(ns) 펄스 지속 시간 사이의 펄스 폭 및 1 내지 10 줄(Joules) 사이의 에너지에서 펄스 간섭성
 광 빔을 전달하기 위한 광 소스,
 플라즈마 형성을 위한 가스를 보유하는 인클로저,
 플라즈마 소스, 및
 상기 인클로저 내부에 자기장을 만들기 위한 자기장 장치를 포함하며,
 상기 인클로저는 인클로저 내의 플라즈마를 통하여 펄스 간섭성 광 빔을 전달하기 위한 제 1 광학 요소 및 제 2
 광학 요소를 갖고, 상기 제 1 광학 요소는 펄스 간섭성 광 빔을 포커싱하기 위한 렌즈이고 상기 제 2 광학 요소
 는 펄스 간섭성 광 빔을 평행하게 하기 위한 렌즈이며,
 상기 플라즈마 소스는 제 1 광학 요소와 제 2 광학 요소 사이의 인클로저 내부에 플라즈마를 제공하기 위한 것
 인,
 빔 조절기를 통과하는 펄스 간섭성 광 빔을 처리하기 위한 빔 조절기.

청구항 5

제 4 항에 있어서,

상기 자기장 장치는 솔레노이드에 전류를 제공하는 전력 공급장치에 커플링된 솔레노이드를 포함하고,

상기 전력 공급장치는 자기장의 강도를 조절하기 위해 조절될 수 있는,

빔 조절기를 통과하는 펄스 간섭성 광 빔을 처리하기 위한 빔 조절기.

청구항 6

제 4 항에 있어서,

상기 플라즈마 소스는 용량성 커플링된 플라즈마 소스 또는 유도성 커플링된 플라즈마 소스인,

빔 조절기를 통과하는 펄스 간섭성 광 빔을 처리하기 위한 빔 조절기.

청구항 7

제 4 항에 있어서,

상기 제 1 및 제 2 광학 요소는 상기 인클로저의 대향 단부들에 배치되는,

빔 조절기를 통과하는 펄스 간섭성 광 빔을 처리하기 위한 빔 조절기.

청구항 8

제 5 항에 있어서,

상기 솔레노이드는 상기 인클로저의 외부에 배치되는,

빔 조절기를 통과하는 펄스 간섭성 광 빔을 처리하기 위한 빔 조절기.

청구항 9

빔 조절기를 통과하는 펄스 간섭성 광 빔(pulsed coherent light beam)을 처리하기 위한 방법으로서,

플라즈마 형성을 위한 가스를 보유하며, 제 1 광학 요소 및 상기 제 1 광학 요소의 대향 측에 배치되는 제 2 광학 요소를 갖는 인클로저를 제공하는 단계;

상기 제 1 광학 요소와 제 2 광학 요소 사이에 플라즈마를 형성하는 단계;

상기 제 1 광학 요소에서 펄스 간섭성 광 빔을 수용하는 단계-상기 펄스 간섭성 광 빔은 8 내지 10 나노초(ns) 펄스 지속 시간 사이의 펄스 폭 및 1 내지 10 줄(Joules) 사이의 에너지에서 제공됨-;

상기 펄스 간섭성 광 빔을 조절하기 위해 상기 플라즈마를 통해 상기 펄스 간섭성 광 빔을 통과시키는 단계; 및

상기 제 2 광학 요소에서 조절된 광 빔을 수용하는 단계를 포함하는,

빔 조절기를 통과하는 간섭성 광 빔을 처리하기 위한 방법.

청구항 10

제 9 항에 있어서,

상기 펄스 간섭성 광 빔을 수용하는 단계가 상기 펄스 간섭성 광 빔을 포커싱하는 단계를 더 포함하고,

상기 조절된 광 빔을 수용하는 단계가 상기 조절된 광 빔을 평행하게 하는 단계를 더 포함하는,
빔 조절기를 통과하는 간섭성 광 빔을 처리하기 위한 방법.

청구항 11

제 10 항에 있어서,

상기 펄스 간섭성 광 빔은 제 1 광학 요소를 통해 지향되고 제 1 광학 요소의 초점 근처의 영역 내에 강한 광
필드를 만들도록 포커스 다운되고,

상기 광 필드는 플라즈마를 만들도록 가스를 이온화할 수 있는 세기를 갖는,
빔 조절기를 통과하는 간섭성 광 빔을 처리하기 위한 방법.

청구항 12

제 9 항에 있어서,

상기 펄스 간섭성 광 빔을 조절하기 위해 상기 플라즈마를 통해 상기 펄스 간섭성 광 빔을 통과시키는 단계 이
후에 상기 플라즈마에 외부 자기장을 인가하는 단계를 더 포함하는,
빔 조절기를 통과하는 간섭성 광 빔을 처리하기 위한 방법.

청구항 13

열처리 시스템으로서,

8 내지 10 나노초(ns) 펄스 지속 시간 사이의 펄스 폭 및 1 내지 10 줄(Joules) 사이의 에너지에서 펄스 간섭성
광(pulsed coherent light)을 제공하기 위한 레이저 소스;

상기 펄스 간섭성 광을 포커싱하기 위한 제1 광학 요소;

상기 펄스 간섭성 광이 통과하는 플라즈마 생성 모듈;

상기 플라즈마 생성 모듈을 통과하는 상기 펄스 간섭성 광을 이용하여 처리될 기판들을 수용하기 위한 열처리
챔버;

상기 플라즈마 생성 모듈 내부에 자기장을 만들기 위한 자기장 장치; 및

상기 플라즈마 생성 모듈 내부의 상기 자기장을 통해 통과하는 상기 펄스 간섭성 광을 평행하게 하기 위한 제2
광학 요소;를 포함하는,

열처리 시스템.

청구항 14

제 13 항에 있어서,

상기 열처리 시스템이 펄스된 레이저 어닐링 시스템인,
열처리 시스템.

청구항 15

제 13 항에 있어서,

상기 플라즈마 생성 모듈을 통과할 때 상기 펄스 간섭성 광이 플라즈마를 생성하는,
열처리 시스템.

청구항 16

제 5항에 있어서,

상기 솔레노이드는 자기장의 단부들에서 보다 중심 영역에서 더 퍼져있는 자기장 라인을 포함하는 자기장을 발
생시키도록 작동되는,

빔 조절기를 통과하는 펄스 간섭성 광 빔을 처리하기 위한 빔 조절기.

발명의 설명

기술 분야

[0001] 본 발명의 실시예들은 일반적으로 레이저들과 같은 간섭성 광 소스(coherent light source)들에 관한 것이다. 특히, 본 발명은 펄스 간섭성 광 소스(pulsed coherent light source)를 이용하여 짧은 시간 간격들 동안 강하고 균일한 조명을 제공하기 위한 방법 및 장치에 관한 것이다.

배경 기술

[0002] 직접 회로(IC) 시장은 계속하여 더 큰 메모리 용량, 더 빠른 스위치 속도, 그리고 더 작은 피쳐 크기를 요구하고 있다. 이러한 요구를 다루도록 산업이 취한 주요한 단계들 중 하나는 큰 퍼니스(furnace)들에서의 배치 처리 실리콘 웨이퍼들로부터 작은 챔버에서의 단일 웨이퍼 처리로 변하도록 한 것이다.

[0003] 이러한 단일 웨이퍼 처리 동안, 웨이퍼는 통상적으로 고온으로 가열되고, 이에 의해 다양한 화학적 그리고 물리적 반응들이 웨이퍼에 형성된 다수의 IC 소자들에서 일어날 수 있다. 특히 흥미롭게도, IC 소자들의 유리한 전 기적 성능은 어닐링되는 주입된 영역(implanted region)들을 필요로 한다. 어닐링은 미리 비정질로 만들어진 웨이퍼의 영역들로부터 더욱 결정질의 구조를 재생성하고, 기판 또는 웨이퍼의 결정질 층(cycle) 안으로 도편트들의 원자들을 통합시킴에 의해 도편트들을 활성화시킨다. 어닐링과 같은 열처리들은 짧은 양의 시간에 비교적 많은 양의 열 에너지를 웨이퍼에 제공하는 것을 필요로 하고, 이후 열처리를 종결하도록 웨이퍼를 빠르게 냉각시키는 것을 필요로 한다. 현재 이용 중인 열처리의 예들은 빠른 열처리(Rapid Thermal Processing; RTP) 및 임펄스(스파이크) 어닐링(impulse(spike) annealing)을 포함한다.

[0004] RTP 처리들의 단점은 IC 소자들이 통상적으로 실리콘 웨이퍼의 상부의 수 마이크론에만 오직 존재하더라도 전체 웨이퍼를 가열한다는 점이다. 이는 얼마나 빨리 웨이퍼를 가열 및 냉각시키는지를 제한한다. 또한, 일단 전체 웨이퍼가 상승 온도에 있다면, 열은 단지 주위 공간 또는 구조들 안으로만 산란될 수 있다. 결과적으로, 이 기술의 RTP 시스템들의 오늘날의 상태는 400°C/s 램프-업 속도(ramp-up rate) 및 150°C/s의 램프-다운 속도를 얻도록 노력 중이다. RTP 및 스파이크 어닐링 처리들이 널리 이용되지만, 현재 기술은 이상적이지 않고, 열처리 동안 너무나 느리게 웨이퍼 온도를 램프(ramp)하는 경향이 있으며, 따라서 너무 긴 시간 주기 동안 상승된 온도에 웨이퍼를 노출시키는 경향이 있다. 이러한 열 예산 유형의 문제들은 웨이퍼 크기가 커지고, 스위칭 속도가 증가하며 및/또는 피쳐 크기가 감소함에 따라 더욱 심각해진다.

[0005] 종래의 RTP 유형 처리들에서 발생된 문제들의 일부를 해결하기 위해, 다양한 스캐닝 레이저 어닐링 기술들이 기판의 표면(들)을 어닐링하는데 이용되었다. 일반적으로, 이러한 기술들은 기판이 작은 영역으로 전달된 에너지에 대해 이동되거나 또는 스캔되는 동안 기판의 표면 상의 작은 영역으로 일정한 에너지 플러스를 전달한다. 기판 표면에 걸친 스캔된 영역들의 겹침을 최소화하는 복잡성 및 업격한 균일성 요구 사항들 때문에, 이러한 유형들의 처리들은 기판 표면 상에 형성된 열처리 접촉 레벨 소자들에 대해 효과적이지 않다.

[0006] 펄스 레이저(pulsed laser) 어닐링 기술들은 기판 표면 상의 한정된 영역들을 어닐링하는데 이용되어왔고, 이에 의해 기판 표면 상에 잘 형성된 어닐링된 및/또는 재용융된 영역들을 제공한다. 일반적으로, 펄스 레이저 어닐링 처리 동안, 기판 표면 상의 다양한 영역들은 기판의 원하는 영역들의 우선적 가열을 야기하도록 레이저로부터 전달된 원하는 양의 에너지에 노출된다. 펄스 레이저 어닐링 기술들은 기판 표면에 걸쳐 레이저 에너지를

스윕하는(sweep) 종래의 처리들에 대한 장점을 갖는데, 왜냐하면 기판의 원하는 영역들에 걸친 균일한 어닐링을 보장하도록 인접하게 스캔된 영역들 사이의 겹침을 단단히 제어할 필요는 문제가 아니기 때문이며, 기판의 노출 영역들의 겹침은 다이 또는 "절단(kerf)" 라인들 사이의 이용되지 않는 공간으로 통상적으로 제한되기 때문이다.

[0007] 줄어드는 반도체 소자 크기 및 업격한 소자 처리 특성들 때문에, 기판 표면 상에 형성된 상이한 소자들로 각각의 펄스 동안 전달된 에너지의 양의 변화의 공차는 매우 낮다. 이러한 소자 요구 사항들은 기판의 노출 표면에 걸쳐 전달된 에너지에서의 변화들에 대한 공차를 다소 작게 만들었다(즉, <5% 변화). 그러나, 레이저와 같은 간섭성 광 소스의 이용은 스펙클 및 회절 프린지들과 같은 간섭 효과들을 유도할 수 있고, 이는 기판 표면의 작은 영역 상에 입사되는 복사 에너지에서의 불균일성을 야기할 수 있다.

[0008] 다양한 광학 소자들이 특별한 레이저 어닐링 응용을 위한 빔을 변경하도록 기판과 레이저 소스 사이에 삽입될 수 있다. 이러한 소자들은 광학 조정 시스템들, 펄스 스트레처들, 빔 스프레더(spreaders)들, 빔 균질화기들 및 다른 소자들을 포함할 수 있다. 간섭성 레이저 광이 이러한 소자들을 통과할 때, 광은 비균질 매체 또는 거친 표면들로부터 산란될 수 있어서, 이는 산란 위치들로부터 방출되는 많은 간섭성 파면들을 만들며 위상차들 및/또는 강도 변동들을 겪는다. 간섭성 파면들은 다수의 작고 밝으며 어두운 포인트들 또는 지점들에 의해 특징지어진 랜덤 강도 패턴을 만드는 것을 방해할 수 있고, 여기서 밝은 지점들은 건설적으로 방해된 산란된 광장들에 대응하고, 어두운 지점은 파괴적으로 방해된 광장들에 대응한다. 이러한 강도 패턴은 또한 스펙클로서 알려져 있고, 간섭성 광이 거친 표면들 또는 비균질 매체로부터 산란될 때 공통적인 현상이다. 스펙클 뿐만 아니라, 불투명한 물체들에 의해 또는 예를 들어 구멍들 및 렌즈들을 통해 레이저 광이 통과할 때 회절 프린지들이 또한 형성될 수 있다.

[0009] 레이저 어닐링 동안 기판 표면에서 더욱 균일한 조명 또는 복사 플러스 밀도를 만들기 위해, 스펙클 및 회절 프린지들과 같은 간섭 효과들을 제거 또는 최소화하는 것이 바람직하다. 이러한 한가지 방법은 회전하는 확산기들을 이용하는 것이고, 이러한 확산기들은 타겟 구역의 표면에서 더욱 균일한 복사 플러스를 만들도록 다수의 스펙클 패턴들을 통합하는 효과를 나타낸다. 그러나, 이러한 접근은 오직 회전 속도가 해당 처리 시간보다 상당히 빠른 경우에만 유효하다. 예를 들면, 처리 시간이 펄스 레이저에 대해 50나노초(ns) 펄스 폭(또한 펄스 지속 시간이라고도 불림)에 의해 나타나고 회전하는 확산기가 kHz 타임스케일의 회전 주파수를 갖는다면, 회전하는 확산기는 레이저에 의해 "스트로보브렐(strobed)" 것이고, 기판은 스펙클 패턴을 "나타낼 것이다(will see)". 펄스 레이저의 이용은 간섭 효과들이 레이저의 펄스 폭 내에서 잘 제거되는 것을 필요로 한다. 일반적으로, 나노세컨드 타임스케일들에 걸친 간섭 효과들을 제거하기 위한 확산기들 및/또는 렌즈들의 기계적 움직임의 이용은 비실용적이다.

[0010] 따라서, 짧은 타임스케일들에 걸쳐 스펙클 및 회절 프린지들과 같은 간섭 효과들을 감소시키며 레이저 어닐링 동안 기판 표면에 더욱 균일한 조명을 제공하는 방법 및 장치에 대한 요구가 있다.

발명의 내용

[0011] 본 발명의 실시예들은 레이저 어닐링 동안 기판 상에 강하고 균일한 조명을 제공하도록 레이저 빔의 간섭 효과들을 감소시킨다. 레이저 빔은 플라즈마를 통해 레이저 빔을 통과시키는 것에 의해 매우 높은 주파수에서 공간적으로 조절된다.

[0012] 본 발명의 일 실시예는 간섭성 광 빔의 간섭 효과들을 감소시키기 위한 장치를 제공한다. 이 장치는 간섭성 광 빔을 포커싱 하기 위한 제 1 렌즈와 광 빔을 평행하게 하기 위한 제 2 렌즈를 가진 인클로저를 포함하고, 인클로저는 플라즈마 형성을 위한 가스를 보유하도록 적응된다. 간섭성 광 빔은 광 빔을 조절하는 플라즈마를 만들도록 가스를 이온화시킨다.

[0013] 본 발명의 다른 실시예는 간섭성 광 빔의 간섭 효과들을 감소시키기 위한 장치를 제공한다. 이 장치는 인클로저를 통해 광 빔을 전달하기 위한 제 1 광학 요소 및 제 2 광학 요소를 가진 인클로저와, 인클로저 내부에 플라즈마를 제공하기 위한 플라즈마 소스를 포함한다. 인클로저는 플라즈마 형성을 위한 가스를 포함하도록 적응된다. 간섭성 광 빔은 빔을 조절하는 플라즈마를 통과한다.

[0014] 본 발명의 다른 실시예는 간섭성 광 빔의 간섭 효과들을 감소시키기 위한 방법을 제공한다. 이 방법은 일반적으로 제 1 광학 요소 및 제 2 광학 요소를 가지며 가스를 보유한 인클로저를 제공하는 단계; 제 1 광학 요소에

서 간섭성 광 빔을 수용하는 단계; 가스로부터 플라즈마를 형성하는 단계; 플라즈마를 통해 간섭성 광 빔을 통과시키는 단계; 간섭성 광 빔을 조절하는 단계; 및 제 2 광학 요소에서 조절된 광 빔을 수용하는 단계를 포함한다.

[0015] 본 발명의 다른 실시예에서, 열처리 시스템은 간섭성 광 빔의 간섭 효과들을 감소시키기 위해 제공된다. 이 시스템은 간섭성 광을 제공하기 위한 레이저 소스, 간섭성 광이 통과하는 플라즈마-생성 모듈, 및 플라즈마-생성 모듈을 통과하는 간섭성 광을 이용하여 처리되는 기판을 수용하기 위한 열처리 챔버를 포함한다.

도면의 간단한 설명

[0016] 본 발명의 상기 언급된 특징들이 더욱 자세히 이해될 수 있는 방식으로, 상기 간략히 요약된 본 발명의 더욱 특별한 설명은 실시예를 참고로 하여 설명될 수 있으며, 그의 일부는 첨부된 도면들에 도시된다. 그러나, 첨부된 도면들은 본 발명의 오직 전형적인 실시예들만을 도시하고 따라서 그 범위를 제한하려고 하는 것이 아니라는 것에 주의해야 하는데, 그 이유는 본 발명은 다른 동등하게 효과적인 실시예들을 허용할 수 있기 때문이다.

도 1은 본 발명의 실시예에 따른 레이저 어닐링 시스템의 개략도이다.

도 2a는 본 발명의 일 실시예에 따른 빔 조절기의 개략도를 도시한다.

도 2b는 여기서 설명된 빔 조절 플라즈마 내의 플라즈마 영역의 개략도이다.

도 3a-3f는 여기서 설명된 추가적인 자기장 실시예들을 위한 개략도를 도시한다.

도 4a-4c는 여기서 설명된 빔 조절기를 위한 추가적인 실시예들의 개략도이다.

이해를 돋기 위해, 도면들에서 공통적인 동일한 요소들을 지칭하기 위해 가능한 동일한 도면 부호들이 이용되었다. 일 실시예의 특징들은 추가적인 인용 없이 다른 실시예들에 통합될 수 있는 것이 고려된다.

발명을 실시하기 위한 구체적인 내용

[0017] 본 발명의 실시예들은 매우 높은 주파수에서 레이저 빔을 공간적으로 조절하거나 또는 "디더링(dithering)" 함에 의해 기판 상에 레이저 빔의 간섭 효과들을 감소시킨다. 이러한 문구에서, 디더링이란 용어는 작은 스케일 상에서 광 빔의 경로를 랜덤화하는 것을 지칭한다. 레이저 빔의 매우 높은 주파수 디더링은 플라즈마를 통해 레이저 빔을 통과시킴에 의해 완수된다.

[0018] 도 1은 레이저 어닐링 시스템(100)을 개략적으로 도시한다. 레이저 어닐링 시스템(100)은 레이저 어닐링 처리 챔버(121), 시스템 제어기(130), 및 조절된 광 빔(21)을 만드는 광학 시스템(120)을 포함한다. 레이저 어닐링 처리 챔버(121)는 광학적으로 투명한 원도우(128) 및 하나 또는 그 이상의 챔버 벽(126)들을 가진 에워싸인 처리 영역(127)을 포함할 수 있다. 또한, 레이저 어닐링 처리 챔버(121)는 기판 지지대(114) 및 기판(10)을 지지하기 위한 기판 지지면(116)을 포함할 수 있다.

[0019] 조정된 광 빔(21)은 기판(10)의 표면보다 획단면적이 실질적으로 더 작기 때문에, 기판 지지대(114)는 조절된 광 빔(21)에 대해 기판(10)을 이동시키도록 적응될 수 있고, 이에 의해 기판(10)의 모든 표면들은 조절된 광 빔(21)으로 처리될 수 있다. 또한, 빔은 기판 지지대(114)에 대해 이동될 수 있거나, 또는 조절된 광 빔(21) 및 기판 지지대(114) 모두는 조절된 빔(21)이 기판(10)의 표면에서 예정된 어닐링 영역에 걸쳐 스캔될 수 있도록 이동하는 것이 고려된다.

[0020] 처리 동안, 처리 영역(127)은 산소와 같은 바람직하지 않은 가스들의 부분 압력을 감소시키기 위해 비활성 가스 소스(125)를 이용하여 정화되고 및/또는 진공 펌프(124)를 이용하여 비워질 수 있다. 또한, 기판(10)의 표면을 열교환 장치(115) 및 기판 지지대(114)의 기판 지지면(116)과 열접촉식으로 위치시킴에 의해 열처리 동안 기판의 온도를 제어하는 것이 바람직할 수 있다. 열교환 장치(115)는 일반적으로 어닐링 처리 이전에, 동안, 또는 그 이후에 기판 지지대(114) 및 기판(10)을 가열 및/또는 냉각시키도록 적응된다.

[0021] 시스템 제어기(130)는 일반적으로 여기서 논의되는 레이저 어닐링 처리 챔버(121) 및 광학 시스템(120) 내에 보유된 다양한 구성요소들을 제어하도록 적응된다. 시스템 제어기(130)는 일반적으로 여기서 설명된 열처리 기술들의 제어 및 자동화를 용이하게 하도록 설계되고, 통상적으로 중앙 처리 유닛(CPU)(미도시), 메모리(미도시), 및 지지 회로(또는 I/O)(미도시)들을 포함할 수 있다. 소프트웨어 명령들 및 데이터는 CPU에 명령하기 위해 메

모리 내에 코딩되고 저장될 수 있다. 제어기에 의해 관독 가능한 프로그램(또는 컴퓨터 명령들)은 기판 상에서 어떠한 작업들이 수행 가능한지를 결정한다. 바람직하게, 프로그램은 제어기에 의해 관독 가능한 소프트웨어이고, 이는 레이저의 출력에 대한 기판 지지대들 위치, 각각의 레이저 펄스에서 전달되는 에너지의 양, 하나 또는 그 이상의 레이저 펄스들의 타이밍, 각각의 펄스에 대한 시간에 따른 강도, 기판의 온도, 각각의 레이저 소스로부터 기판으로 전달된 각각의 펄스의 파장, 및 임의의 이들의 조합을 모니터하고 제어하는 코드를 포함한다.

[0022] 또한, 도 1은 광학 시스템(120)을 개략적으로 도시하고, 이 광학 시스템은 광 소스(102)(예를 들어 펄스 레이저), 빔 조절기(103), 조사량 제어 시스템(104), 펄스 스트레처 어셈블리(106), 빔 균질화기 어셈블리(108), 및 릴레이 옵틱스 어셈블리(110)를 포함한다. 이 광학 시스템(120)은 균일한 양의 에너지를 또는 기판(10)의 표면 상에서 어닐링 영역들을 가로지르는 바람직한 2차원 형태를 갖는 "이미지"를 전달하거나 또는 투영하도록 이루어질 수 있고, 이에 의해 이러한 영역들 내에서 바람직한 구역들을 우선적으로 어닐링 및/또는 녹인다.

[0023] 여기서 설명된 반도체 기판 상에서 레이저 어닐링 처리를 수행하는데 필요한 에너지의 양은 아주 클 수 있다. 예를 들면, 광 소스(102)로부터 전달된 에너지의 조사량은 8 내지 10 나노초(ns) 펄스 기간에 걸쳐 약 1 내지 약 10 줄(Joules)일 수 있고, 이는 각각의 펄스에서 어닐링 영역으로 약 100MW 내지 약 1250MW의 평균 총 전력을 전달하는 것과 동등하다. 어닐링 영역들이 약 4mm^2 내지 약 1000mm^2 의 면적을 갖는다면, 평균 에너지 밀도는 약 0.1MW/mm^2 내지 약 313MW/mm^2 일 것이다. 각각의 펄스 동안 임의의 시간에서 전달되는 순간적인 전력은 에너지 펄스의 프로파일에서의 변화들에 의한 평균보다 훨씬 높거나 또는 낮을 수 있다는 것에 주의해야 한다.

[0024] 광 소스(102)는 일반적으로 펄스 레이저 어닐링 처리를 수행하는데 이용되는 전자기 에너지를 전달하도록 적응된다. 레이저 어닐링 처리의 효과는 어닐링되는 재료에 의해 광 소스(102)로부터 전달된 에너지의 전달, 흡수 및 반사에 의존하기 때문에, 전달된 에너지의 파장(λ) 또는 파장들은 조정될 수 있으며 이에 의해 기판 내에서 원하는 깊이까지 원하는 양의 에너지를 전달한다. 또한, 광의 각각의 광자에 의해 전달된 에너지의 양은 파장에 따라 변하고($E=hc/\lambda$), 따라서 파장이 짧을수록 광의 각각의 광자에 의해 전달되는 에너지는 커진다는 것에 주의해야 한다. 그러나, 몇몇의 경우들에서, 실리콘과 같은 기판 재료는 두께 및 파장에 따라 변하는 흡수 엣지(absorption edge)를 갖고, 이는 기판 재료에 의해 흡수되는 파장들을 제한한다. 따라서, 기판이 제조되는 재료의 두께 및 유형에 따라, 방출되는 복사의 파장(들)은 기판의 노출 영역의 균일한 가열을 촉진시키고 손상을 최소화하기 위해 기판으로의 원하는 에너지 전달을 달성하도록 변경될 수 있다.

[0025] 광 소스(102)는 예를 들어 주로 실리콘 보유 기판으로 약 1064nm 미만의 파장에서 에너지를 전달하도록 적응될 수 있다. 다른 예에서, 레이저 어닐링 처리들은 약 800나노미터(nm) 미만인 파장들에서 전달되는 복사를 이용하여 실리콘 보유 기판 상에서 수행될 수 있다. 대안적으로, 광 소스(102)로부터 전달된 광학 에너지의 파장은 주로 실리콘을 보유한 기판에 대해 약 532nm일 수 있다. 다른 예에서, 에너지 소스로부터 전달된 광학 에너지의 파장은 주로 실리콘을 보유한 기판으로 약 216nm 또는 약 193nm이다. 추가적인 예에서, 광 소스(102)는 이용되는 약 266nm 내지 약 1064nm의 파장에서 에너지를 전달하도록 적응되는 Nd:YAG(네오디뮴 도핑된 이트륨 알루미늄 가넷(garnet))을 포함할 수 있다.

[0026] 일반적으로, 현재 상업적인 레이저들은 바람직한 펄스 레이저 어닐링 에너지 레벨(예를 들어 2줄보다 큼)의 높은 단부 근처의 에너지들을 전달할 수 없고, 따라서 일 실시예에서 광 소스(102)는 기판의 표면으로 원하는 양의 에너지를 전달하도록 그 출력들이 조합되는 다수의 레이저들을 포함한다. 그러나, 어닐링 처리에서 이용된 에너지 펄스의 특성들이 최적화되거나 또는 제어되지 않는다면, 기판에 대한 손상이 일어날 수 있다. 통상적으로, 에너지 펄스 특성들은 에너지의 총량, 에너지 플럭스, 에너지 밀도, 및/또는 펄스의 지속기간을 포함할 수 있으나 이에 제한되지는 않는다. 에너지 펄스 특성들이 최적화되지 않는다면, 기판에 대한 손상은 일반적으로 기판의 표면 상의 녹은 영역들의 빠른 가열에 의해 야기된 응력에 의해 만들어진다. 빠른 가열은 기판에서 음파 쇼크 웨이브(acoustic shock wave)를 생성할 수 있고, 이는 크랙들을 야기하거나 응력을 유도하며 그렇지 아니하면 기판의 다양한 영역들에 손상을 입힐 수 있다.

[0027] 일례에서, 광 소스(102)는 532nm와 같은 바람직한 파장에서 약 6ns 내지 약 80ns의 펄스 폭에서 약 1 내지 10 줄의 에너지를 전달하도록 적응된다. 다른 실시예에서 532nm와 같은 바람직한 파장에서 약 20ns 내지 약 30ns의 펄스 폭에서 약 1 내지 10 줄의 에너지를 전달하도록 적응될 수 있다. 대안적으로, 광 소스(102)는 748nm 및/또는 1064nm와 같은 파장들에서 약 8ns 내지 약 80ns의 펄스 폭에서 약 1 내지 10 줄의 에너지를 전달하도록

적용될 수 있다.

[0028] 광학 시스템(120)의 광 소스(102)에 부가하여, 조사량 제어 시스템(104)은 광 소스(102) 및 레이저 어닐링 처리 챔버(121) 사이에 위치되어 레이저 어닐링 처리 동안 기판(10)의 표면으로 전달된 에너지의 타이밍 및 그 양을 제어한다. 일반적으로, 광 소스(102)의 펄스 레이저 유형으로부터 전달된 에너지의 반복성 및 신뢰성을 향상시키기 위해, 펄스 레이저 소스의 출력은 바람직한 주파수에서 연속적으로 펄스되고, 오직 전달된 펄스들의 일부만이 조사량 제어 시스템(104)을 통과하고 기판(10)의 표면으로 나아가도록 허용된다. 따라서, 조사량 제어 시스템(104)은 광학 시스템(120)의 다른 구성요소들로 바람직한 시간에서 에너지의 펄스의 전달을 제어할 수 있다.

[0029] 대부분의 종래 레이저들은 바람직한 프로파일을 가진 펄스를 전달할 수 없고, 따라서 광학 시스템(120)으로부터 기판으로 전달된 펄스들의 각각은 기판에 대한 손상을 막고 및/또는 펄스 레이저 어닐링 처리 결과들을 최적화하도록 조정될 필요가 있다. 또한, 광학 시스템(120)은 펄스 레이저 어닐링 처리 동안 기판의 표면으로 전달되는 시간에 따라 전달된 광 에너지의 프로파일 또는 형상을 최적화시키는데 이용되는 펄스 스트레치 어셈블리(106)를 포함할 수 있다.

[0030] 또한, 광학 시스템(120)은 기판의 표면 상의 어닐링 영역 내에 투영되는 사각형, 직사각형 또는 다른 형태의 "이미지"에 걸쳐 에너지의 퍼짐의 균일성을 향상시키는데 이용된 범 균질화기 어셈블리(108)를 포함할 수 있다. 일반적으로, 범 균질화기 어셈블리(108)는 "이미지"의 불균일한 요소들을 수정하고 따라서 기판의 표면 상의 어닐링 영역으로 에너지의 더욱 균일한 분포를 제공하는데 이용되는 렌즈들, 구멍들, 또는 다른 광학적 구성요소들과 같은 다양한 광학적 구성요소들을 포함한다. 일 실시예에서, 범 균질화기 어셈블리(108)는 광학 시스템(120) 내에 위치하고, 이에 의해 펄스 스트레치 어셈블리(106)로부터 전달된 복합 에너지 펄스(composite energy pulse)를 균질화시킬 것이다.

[0031] 광학 시스템(120)은 레이저 어닐링 처리 챔버(121)에 위치한 기판 지지면(116)(도 1) 상에 위치한 기판(10)의 표면으로 광학 시스템(120)에서의 상류 구성요소들로부터 통과된 이미지를 지향하도록 이용되는 광학 구성요소들의 그룹을 포함한 텔레이 옵틱스 어셈블리(110)를 또한 포함할 수 있다. 일반적으로 텔레이 옵틱스 어셈블리(110)는 복수의 미리들, 렌즈들 그리고 다른 공통 광학 구성요소들을 포함하고, 이는 이미지의 위치, 방향 및 크기를 설정함으로써 기판(10)의 표면 상의 어닐링 영역을 채우는 것을 가능하게 한다.

[0032] 상기 언급된 범 균질화기 어셈블리(108)는 가우시안(gaussian) 범 프로파일과 같은 레이저들에 의해 만들어진 비평면 범 프로파일들로부터 균질한 범 프로파일, 즉 평면 상부 범 프로파일(flat-top beam profile)을 만들도록 적응된다. 비간섭성 광 소스에 대해 범 균질화기 어셈블리(108)는 보통, 높은 전력의 광 소스로부터의 타겟 구역의 균일한 조명을 보장하는데 적절할 것이다. 그러나, 범 균질화기는 간섭성 광 범의 타겟 구역에 대한 스펙클 또는 회절 프린지들과 같은 간섭성 효과들을 방지하지 않는다.

[0033] 고속 범 조절기(103)는 나노초 시간 스케일로 간섭성 광 소스의 간섭 효과들을 감소시키도록 광학 시스템(120)에 포함될 수 있다. 본 발명의 일 실시예에서, 범 조절기(103)는 간섭성 광 소스(102) 이후에 그리고 조사량 제어 시스템(104) 이전에 위치한다. 다른 실시예에서, 범 조절기(103)는 조사량 제어 시스템(104) 이후에 그리고 펄스 스트레치 어셈블리(106) 이전에 위치한다. 또 다른 실시예에서, 범 조절기(103)는 펄스 스트레치 어셈블리(106) 이후에 그리고 범 균질화기 어셈블리(108) 이전에 위치한다. 그러나, 범 조절기(103)는 또한 광 소스(102) 및 텔레이 옵틱스 어셈블리(110) 사이의 임의의 위치에 위치할 수 있다.

[0034] 도 2a는 나노초 시간 스케일로 간섭성 광 펄스를 공간적으로 조절할 수 있는 범 조절기(103) 장치의 일 실시예를 도시한다. 범 조절기(103)는 인클로저(203), 가스 공급장치(212), 진공 시스템(213), 자기장을 생성하기 위한 솔레노이드(208) 및 솔레노이드(208)로 전류를 제공하기 위한 전력 공급장치(220)를 포함한다. 다른 실시예에서, 솔레노이드(208)는 하나 또는 그 이상의 링 차석들에 의해 교체될 수 있다. 또 다른 실시예에서, 범 조절기(103)는 솔레노이드를 갖지 않을 수 있다.

[0035] 인클로저(203)는 인클로저(203)에 커플링된 두 개의 렌즈(201)들을 포함한다. 렌즈(201)들은 인클로저(203)를 통과하는 광 범을 포커싱 및 다시 평행하게 하기 위한 인클로저(203)의 대향 단부들에 배치된다. 각각의 렌즈(201)는 광 범의 포커싱 및 다시 평행하게 하는 것을 허용하는 수렴 및 발산 렌즈들과 같은 하나 또는 그 이상의 렌즈들의 조합들을 포함할 수 있다. 일 실시예에서, 각각의 렌즈(201)는 광 범의 포커싱 및 다시 평행하게 하는 것을 가능하게 하도록 적절하게 선택된 수렴 렌즈(예를 들어 평칠, 양칠(兩凸))이다. 렌즈(201)들은 진공 밀봉을 형성하도록 인클로저(203)에 커플링된다. 인클로저(203)는 튜브의 형태를 가질 수 있지만 다른 형태들

로도 이용될 수 있고, 인클로저(203)는 유리, 석영, 금속 또는 다른 적절한 재료들로 만들어질 수 있다. 일 실시예에서, 인클로저(203)는 진공 챔버로서 기능하도록 적응되고, 렌즈(201)들은 진공 밀봉을 형성하도록 인클로저(203)에 커플링된다.

[0036] 가스 공급장치(212)는 인클로저(203)와 유체 소통하고 인클로저(203)에 커플링된다. 가스 공급장치(212)는 질소(N_2), 헬륨(He), 아르곤(Ar) 또는 다른 가스들 그리고 이의 조합들과 같은 비활성 가스 또는 노블 가스를 제공할 수 있고, 이에 의해 인클로저(203) 내에서 플라즈마의 형성을 가능하게 한다. 비활성 또는 노블 가스들은 화학적 화합물들의 합성을 방지하는데 이용될 수 있고, 화학적 화합물들은 그렇지 아니하면 플라즈마 형성을 위한 다른 가스들을 이용하여 생성될 수 있으며, 이는 범 조절기(103)의 광학적 및/또는 플라즈마 특성들에 악영향을 미칠 수 있다. 가스 공급장치(212)는 또한 가스 유동 속도들을 제어하기 위한 질량 유동 제어기 또는 다른 적절한 수단을 포함할 수 있다.

[0037] 인클로저(203) 내의 가스 압력은 인클로저(203)에 커플링되며 이와 유체 소통하는 진공 시스템(213)에 포함된 벨브(미도시)들에 의해 조절될 수 있다. 가스 압력은 플라즈마를 통과하는 광 범의 조절 및 플라즈마 밀도를 제어하는 것을 돋도록 조절될 수 있다. 일 실시예에서, 가스 압력은 약 50milliTorr 내지 약 760Torr의 범위일 수 있다.

[0038] 범 조절기(103)는 인클로저(203) 외부에 배치된 솔레노이드(208)를 또한 포함할 수 있다. 도 2a는 인클로저(203)를 둘러싸는 솔레노이드 와인딩(209)들의 횡단면들을 도시한다. 전력 공급장치(220)는 인클로저(203) 내부에 그리고 솔레노이드(208) 내에 자기장을 생성하도록 와인딩(209)들에 전류를 제공한다. 전류 방향(210)(“x”로 표시됨)은 페이지의 평면 안으로 이동하고, 전류 방향(211)(점으로 표시됨)은 평면으로부터 밖으로 나와서 도시된 방향을 가진 자기장 라인(206)들을 생성한다. 다른 실시예에서, 전류 방향은 자기장 라인(206)들의 방향을 뒤바꾸도록 뒤바뀔 수 있다. 일 실시예에서, 전력 공급장치(220)는 DC 전력 공급장치이고, 이는 상이한 전류값들을 제공하고 따라서 상이한 자기장 강도들을 제공하도록 조절될 수 있다. 다른 실시예에서, 전력 공급장치(220)는 펄스된 DC 전류를 제공할 수 있다. 또 다른 실시예에서, 전력 공급장치(220)는 AC 전력 공급장치일 수 있다.

[0039] 시스템 제어기(130)는 범 조절기(103)와 소통할 수 있고, 그 내부의 구성요소들의 제어를 용이하게 하도록 적응될 수 있다. 예를 들면, 시스템 제어기(130)는 범 조절기(103)에 대한 가스 유동 속도, 가스 압력, 솔레노이드 전류 및 자기장 강도와 같은 그러한 범 조절기(103) 파라미터들을 제어하기 위해, 가스 공급장치(212), 진공 시스템(213) 및 전력 공급장치(220)와 소통할 수 있다. 시스템 제어기(130)는 또한 다양한 변환기들, 센서들, 및 광학 모니터들과 소통할 수 있고, 이러한 것들은 범 조절기(103) 성능을 최적화시키도록 설계될 수 있는 예정된 소프트웨어 명령들에 따라 범 조절기(103)의 자동 제어를 가능하게 하도록 범 조절기(103) 파라미터들 및/또는 조절된 범(204)을 모니터하기 위해 범 조절기(103) 및/또는 광학 시스템(120)에 또한 포함될 수 있다.

[0040] 도 2a에서 도시된 범 조절기(103)는 조절되는 레이저 범에 의해 “자체-생성”되는 레이저 생성 플라즈마(laser produced plasma; LPP)를 이용한다. 인클로저(203)는 진공 시스템(213)에 의해 예정된 압력으로 비워지고, 비활성 또는 노블 가스는 가스 공급장치(212)로부터 인클로저(203) 안으로 유입된다. 비활성 가스 유동 속도 및 진공 펌핑 속도는 이후 조절되어 플라즈마 점화 이전에 인클로저(203) 내에 적절한 가스 압력을 제공한다. 펄스된 레이저에 의해 생산될 수 있는 것과 같은 평행한 간섭성 광 범(collimated, coherent light beam; 200)은 제 1 렌즈(201)를 통해 인클로저(203) 안으로 지향되고 포커스 다운(focused down)되어, 렌즈(201)의 초점(225) 근처의 작은 영역 내에 강한 광 필드(field)를 만든다. 광 필드의 강도가 충분히 높을 때, 가스는 이온화되고 범 조절 플라즈마(207)가 애벌런치 처리(avalanche process)를 통해 만들어지고, 이에 의해 자유 전자들은 입사광 필드에 의해 가속되어 가스 원자들(또는 분자들)의 충격 이온화 및 전자 밀도의 캐스케이드 성장(cascade growth)을 야기한다. 전자 밀도 성장은 식 (1)에 의해 근사될 수 있다.

$$\frac{dN}{dt} = v_i N \quad (1)$$

[0041]

[0042] N 은 전자 밀도이고 v_i 는 레이저 밀도에 비례한 이온화 속도이다. 일 실시예에서 초점(225) 근처에서 간섭성 광 범(200)의 복사 풀러스 밀도는 약 10^7 W/cm^2 내지 약 $3.1 \times 10^{10} \text{ W/cm}^2$ 의 범위이다. 간섭성 광 범(200)은 범 조절

플라즈마(207)를 통과하고 그와 상호작용하기 때문에, 간섭성 광 빔(200)은 조절된 빔(204)을 만들도록 공간적으로 조절되거나 또는 디더링될 수 있으며, 이후 조절된 빔은 제 2 렌즈(201)를 통과하고 다시 평행하게 되며 광학 시스템(120)의 다른 구성요소로 지향된다.

[0043] 빔 조절 플라즈마(207)에 의한 간섭성 광 빔(200)의 공간적 조절은 식 (2)에 의해 근사될 수 있는 플라즈마에 대한 회절률에 의해 설명될 수 있다.

$$n^2 = 1 - \frac{\omega_p^2}{\omega^2} \quad (2)$$

[0044] 여기서, n 은 플라즈마의 회절률이고, ω 는 플라즈마를 통과하는 광의 주파수이며, ω_p 는 식 (3)에서 도시된 전자 플라즈마 주파수이다.

$$\omega_p = (Ne^2 / \epsilon_0 m_e)^{1/2} \quad (3)$$

[0045] N 은 플라즈마의 전자 밀도(이후 플라즈마 밀도라고 지칭됨)이고, e 는 전자의 전하이며, m_e 는 전자 질량이고, ϵ_0 은 자유 공간의 유전율(permittivity)이다. 식 (2)는 플라즈마에 대한 회절률이 플라즈마를 통과하는 광(ω)의 주파수에 의존함을 도시한다. 식 (3)은 식 (4)를 얻기 위해 식 (2)와 조합될 수 있다.

$$n^2 = 1 - \frac{Ne^2}{\epsilon_0 m_e \omega^2} \quad (4)$$

[0046] 식 (4)는 플라즈마 밀도가 변함에 따라 플라즈마의 회절률이 변화될 것을 도시한다. 임계 플라즈마 밀도(N_c)는 식 (4)의 우측 편 상에서 2차 항(second term)을 설정함에 의해 1로 정의될 수 있고, 이는 식 (5)를 초래한다.

$$N_c = \frac{\omega^2 m_e \epsilon_0}{e^2} \quad (5)$$

[0047] 예를 들면, 간섭성 광 빔(200)이 532nm의 파장을 갖는다면, 임계 밀도는 약 $3.95 \times 10^{21} \text{ cm}^{-3}$ 이다. 식 (4)는 $N > N_c$ 일 때 플라즈마에 대한 회절률이 허수이고 플라즈마는 플라즈마에 입사되는 임의의 광에 대해 거의 모두가 반사됨을 나타낸다. $N < N_c$ 라면, 이후 회절률은 실수(real)이지만 1보다는 작고(자기장이 없는 경우), 입사광은 플라즈마를 통해 전달될 수 있다.

[0048] 플라즈마 밀도는 플라즈마를 통해 일 위치로부터 다른 위치로 시간에 걸쳐 변할 수 있고, 플라즈마 밀도의 국부적인 변화들은 예를 들어 플라즈마와 상호작용하는 전기장들 및 자기장들에서의 국부적인 변화들에 의해 야기될 수 있다. 도 2b는 시간에서의 짧은 시간에서 빔 조절 플라즈마(207)의 작은 플라즈마 영역(237)의 개략도이다. 빔 조절 플라즈마(207)는 다수의 플라즈마 영역(237)들을 포함한다. 주파수(ω)를 가진 광선(230)들은 플라즈마 영역(237) 상에 입사되는 평행한 간섭성 광 빔(200)의 인접한 부분들을 나타낸다. 광선(230)들은 플라즈마 영역(237)들을 통과하고, 빔 조절 플라즈마(207)로부터 나와서 조절된 빔(204)의 인접한 부분들을 형성한다.

[0049] 플라즈마 영역(237)은 경계(221)들을 가진 셀(236)들로 분할되고, 각각의 셀(236)은 각각의 인접한 셀(236)의 회절률 및 플라즈마 밀도와 상이할 수 있는 대응하는 회절률 및 플라즈마 밀도를 갖는다. 플라즈마 밀도 및 회

절률은 경계(221)들에 걸쳐 그리고 빔 조절 플라즈마(207)를 통해 점진적으로 변할 수 있지만, 필수적 결과들을 유지하면서 논의를 간단하게 하기 위해서 경계(221)들은 상이한 회절률들 사이의 계면들로서 처리되는 것이 이해되어야 한다.

[0054] 광선(230)들이 플라즈마 영역(237)으로 들어갈 때, 각각의 광선(230)은 다수의 셀(236)들을 통과하고 각각의 경계(221)에서 반사되고 회절될 수 있다. 오직 회절된 광선(230)들 만이 도시되는데 왜냐하면 이들은 조절된 빔(204)을 형성하도록 플라즈마를 통해 전달되기 때문이다. 각각의 광선(230)의 다수의 회절들은 각각의 광선(230)의 광학 경로 길이 및 방향을 랜덤화하는 효과를 갖는다. 이러한 랜덤화 처리는 각각의 광선(230)이 빔 조절 플라즈마(207)에서 다수의 플라즈마 영역(237)들을 통과하기 때문에 반복된다. 광학적 경로 길이들의 랜덤화는 인접한 광선(230)들 및 결과적인 조절된 빔(204)의 인접한 부분들 사이에서의 위상 관계(phase relationship)들을 "스크램블(scramble)" 한다.

[0055] 도 2b에서 도시된 플라즈마 영역(237)은 빔 조절 플라즈마(207)에 대해 시간에 따른 "스냅샷(snapshot)"을 나타낸다. 빔 조절 플라즈마(207)가 시간에 따라 변할 때, 광선(230)들의 방향들 및 상대적 위상 관계들은 또한 시간에 따라 변하여 진행중인 위상 "스크램블링" 및 광선(230)들의 방향 랜덤화에 영향을 미쳐 "디더링된" 또는 공간적으로 조절된 빔(204)을 만든다. 추가적으로, 간접성 광 빔(200)에 의해 만들어진 "자체-생성된" 플라즈마는 빔 조절 플라즈마(207)가 간접성 광 빔(200)의 펄스 폭 내에서 시간 스케일에 따라 변함을 의미한다. 예를 들면, 일 실시예에서, 간접성 광 빔(200)의 펄스 폭은 약 8ns이고, 그래서 빔 조절 플라즈마(207), 및 따라서 조절된 빔(204)은 8ns 시간 스케일 내에서 또한 변할 수 있다. 광선(230)은 간접성 광 빔(200)의 펄스 폭 내에서 여러번 방향들 및 위상 관계들을 변경할 수 있다. 광선(230)들의 매우 빠른 위상 "스크램블링" 및 방향 랜덤화는 기관(10)의 구역으로 투영될 수 있는 스펙터 또는 프린지 패턴의 위치(디더링)를 빠르게 그리고 랜덤하게 옮기는데 영향을 미치고, 이에 의해 펄스 폭과 같은 적절한 시간 간격에 대해 평균화될 때 기관의 조명은 균일할 수 있다.

[0056] 식 (4)는 플라즈마에 대한 회절률이 플라즈마 밀도에 의존적이고, 따라서 플라즈마에 대한 회절률이 허수이고 플라즈마가 거의 완전히 반사성인 경우를 피하도록 플라즈마 밀도를 제어하는 것이 바람직할 수 있음을 나타낸다. 추가적으로, 플라즈마에 대한 회절률이 실수인 경우에 대해, 산란을 통한 빔 에너지에서의 초과적인 손실들을 피하면서 간접성 광 빔(200)의 공간적 조절을 최적화하도록 플라즈마 밀도를 제어하는 것이 바람직할 수 있다.

[0057] 플라즈마 밀도는 예를 들어 플라즈마와 상호작용할 수 있는 임의의 전자기장들 및 플라즈마 형성을 위해 이용된 가스의 압력 및 온도에 의존할 수 있다. 인클로저(203) 내의 가스 압력은 진공 시스템(213) 내의 벨브들 및 가스 공급장치(212)로부터의 가스 유동 속도를 조절함에 의해 제어될 수 있다. 일반적으로, 플라즈마 밀도는 가스 압력과 함께 증가하는 경향이 있다. 플라즈마 밀도에서의 추가적인 조절 가능성은 자기장 라인들을 따라 전자들을 집중시키는 것을 도울 수 있는 외부 자기장에 의해 제공될 수 있다. 외부 자기장의 인가는 또한 짧은 시간 스케일 상에서 플라즈마 밀도에서의 변화들을 향상시키고 이에 의해 빔 조절을 용이하게 할 수 있는 플라즈마 내의 불안정성(instabilities)을 촉진시킬 수 있다. 여기서, "외부 자기장"이란 용어는 간접성 광 빔(200) 또는 빔 조절 플라즈마(207)에 의해 만들어진 것이 아니라 인클로저(203) 내에서 자기장을 생성할 수 있는 솔레노이드와 같은 다른 소스에 의해 만들어진 자기장을 표시하는데 이용된다.

[0058] 도 3a-3f는 여기서 설명된 실시예들에 대한 자기장의 개략도들을 도시한다. 도 3a는 빔 조절 플라즈마(207)와 상호작용하는 외부 자기장을 제공하기 위한 영구 자석(예를 들어 막대 자석(bar magnet)들)들을 이용하는 일 실시예를 도시한다. 제 1 자석(301) 및 제 2 자석(302)은 도시된 것과 같은 자기장 라인(206)들을 만들도록 인클로저(203) 주위에 배치된다.

[0059] 도 3b는 인클로저(203) 주위에 위치하고 전자석(303, 304)들에 의해 만들어진 자기장을 위한 다른 실시예를 도시한다. 전자석(303, 304)들의 와인딩(209)들은 도시된 자기장 라인(206)들을 만드는 전류 방향(210, 211)들을 갖는다. 전자석들은 예를 들어 철 또는 다른 강자성체 재료들과 같은 자화 가능한 재료들로 만들어진 코어들을 포함할 수 있다. 다른 실시예에서, 전자석(303, 304)들은 단일 전자석에 의해 교체될 수 있고, 이러한 단일 전자석은 도시된 자기장 라인(206)들을 만들도록 개방 링 또는 토로이드(toroid) 형상의 코어를 이용한다.

[0060] 도 3c 및 3d는 하나 또는 그 이상의 솔레노이드(208)들을 이용하는 자기장들을 위한 추가적인 실시예들을 도시한다. 도 3c는 병-형상의 자기장 라인(206)들을 초래하는 와인딩(209)들의 간격들에서 캡(305)을 가진 하나 또는 그 이상의 솔레노이드(208)들을 도시한다. 다른 실시예에서, 하나 이상의 캡(305)은 상이한 형상들을 가진 자기장들을 만들도록 다수의 솔레노이드(208)들과 함께 이용될 수 있다. 병 형상은 도 3d에서 도시된 것처럼

인클로저(203) 주위에 구-유형의 배열로 와인딩(209)들을 위치시킴에 의해 더욱 현저하게 만들어질 수 있다. 와인딩(209)들은 또한 자기장 형상을 바꾸도록 다른 비선형 배열들로 위치될 수 있다.

[0061] 플라즈마 가둠(confinement) 및 밀도는 사중극자 자기장 배열을 이용함에 의해 향상될 수 있다. 도 3e는 사중극자 필드의 자기장 라인(206)들을 만들도록 인클로저(203) 주위에 배치된 4개의 영구 자석(307, 308)들 및 인클로저(203)의 횡단면을 도시한다. 일 실시예에서, 4개의 영구 자석(307, 308)들은 인클로저(203)의 길이를 따라 연장한다. 다른 실시예에서, 4개의 영구 자석(307, 308)들의 각각은 전자석에 의해 교체될 수 있다. 또 다른 실시예에서, 4개의 영구 자석(307, 308)들의 각각은 인클로저(203)의 길이를 따라 배치된 4개의 전류 운반 와이어들 또는 봉들로 교체될 수 있고, 이 경우 전류들은 사중극자 필드를 만들도록 적응되는 방향들로 유동한다.

[0062] 도 3f는 반대 방향들로 유동하는 전류들을 가진 두 개의 솔레노이드(208)들을 이용하는 사중극자 자기장 배열의 다른 실시예를 도시한다. 오직 하나의 와인딩(209)이 각각의 솔레노이드(208)에 대해 도시되었지만, 다수의 와인딩(209)들이 각각의 솔레노이드(208)에 대해 이용될 수 있다. 솔레노이드(208)들의 전류는 자기장 강도를 조절하도록 조절될 수 있다. 이 실시예의 다른 태양에서, 솔레노이드(208)들은 인클로저(203)를 에워싸지는 않지만, 도 3e에서 도시된 것과 횡단면이 유사한 자기장을 만들도록 인클로저(203)의 외부로 지향된다. 도 3a-3f에서 도시되고 여기서 설명된 실시예들은 조합될 수 있고 빔 조절기(103)에 대해 여기서 설명된 다른 실시예들과 함께 이용될 수 있다.

[0063] 가스 압력 및 자기장을 조절함에 의해 플라즈마 밀도에서의 일부 조정 가능성을 제공하는 것에 부가하여, 빔 조절 플라즈마(207)를 생성하기 위한 외부 플라즈마 소스를 이용하는 것이 바람직할 수 있다. 도 4a-4c는 "자체 생성된" 플라즈마 대신 외부 플라즈마 소스를 이용하는 빔 조절기(103)의 상이한 실시예들의 개략도들이다.

[0064] 도 4a는 용량성 커플링된 플라즈마 소스를 이용하는 빔 조절기(103)를 도시한다. 일 실시예에서, 접지 전극(214) 및 전력 전극(215)은 인클로저(203) 외부에 배치되고, 전력 전극(215)은 DC 또는 RF 전력 공급장치일 수 있는 전력 소스(217)에 커플링된다. 당업자에 의해 이해될 수 있는 것처럼, 접지 전극(214) 및 전력 전극(215)은 용량성 커플링된 플라즈마를 제공하도록 많은 상이한 구성들을 가질 수 있다. RF 전력 공급장치는 약 1MHz 내지 약 40MHz의 주파수 범위에서 작동할 수 있지만, 다른 주파수들도 이용될 수 있다. 다른 실시예에서, 13.56MHz의 주파수가 이용된다. 전력 소스(217)는 빔 조절 플라즈마(207)로의 전력 전달을 최적화하는 정합 회로(미도시)를 포함할 수 있다. 인클로저(203)의 대향 단부들에는 인클로저(203)를 통해 광 빔의 전달을 허용하는 두 개의 투과성 광학 요소(202)들이 배치된다. 일 실시예에서, 광학 요소(202)들은 유리 또는 투명한 석영과 같은 적절하게 광학적으로 투명한 재료로 만들어진 플레이트들이다. 다른 실시예에서, 광학 요소(202)들은 레이저 빔을 포커싱하고 다시 평행하게 하는 렌즈(201)들이다. 광학 요소(202)들은 전공 밀봉을 형성하도록 인클로저(203)에 커플링된다. 인클로저(203)는 유리 또는 석영과 같은 유전체 재료로 만들어질 수 있고, 이에 의해 외부 접지 및 전력 전극(214, 215)들은 빔 조절 플라즈마(207)에 효과적으로 커플링될 수 있다.

[0065] 인클로저(203)는 예정된 압력으로 진공 시스템(213)에 의해 비워지고, 비활성 가스는 이후 가스 공급장치(212)로부터 인클로저(203) 안으로 유입될 수 있다. 비활성 가스 유동 속도 및 진공 펌핑 속도는 이후 인클로저(203) 내에서 적절한 가스 압력을 제공하도록 조절될 수 있다. 이후 전력은 빔 조절 플라즈마(207)를 점화하도록 전력 전극(215)에 공급된다. 펄스 레이저에 의해 만들어질 수 있는 것과 같은 평행한 간접성 광 빔(200)은 제 1 광학 요소(202)를 통해 인클로저(203) 안으로 지향되고, 이후 제 2 광학 요소(202)를 통과하는 조절된 빔(204)을 만들도록 빔 조절 플라즈마(207)를 통과한다. 도 4a-4c에서 도시된 실시예들에서, 광학 요소(202)들은 투명한 플레이트들이고, 이는 레이저 빔에 대해 원도우들로서 기능을 한다.

[0066] 도 4a에서 도시된 실시예의 다른 태양에서, 접지 및 전력 전극(214, 215)들은 인클로저(203) 내부에 배치될 수 있다. 예를 들면, 인클로저(203)는 금속과 같은 전도성 재료로 만들어질 수 있고 적절한 접지에 커플링될 수 있으며, 이에 의해 인클로저(203)의 내부벽들은 접지 전극(214)으로서 기능을 하고 전력 전극(215)은 인클로저(203) 내부에 배치될 수 있으나 전기적으로 인클로저(203)로부터 절연될 수 있다.

[0067] 도 4b는 용량성 커플링된 플라즈마 소스와 비교하여 더 높은 전자 밀도들을 제공할 수 있고 유도성 커플링된 플라즈마 소스를 이용하는 빔 조절기(103)의 다른 실시예이다. 유도 코일(216)들은 인클로저(203)를 에워싸고 RF 전력 공급장치(218)에 전기적으로 커플링된다. RF 전력 공급장치(218)는 약 1MHz 내지 약 100MHz의 주파수 범위 내에서 작동할 수 있지만 다른 주파수들이 이용될 수 있다. RF 전력 공급장치(218)는 빔 조절 플라즈마(207)로의 더욱 효율적인 전력 전달을 위해 정합 회로(미도시)를 포함할 수 있다.

[0068]

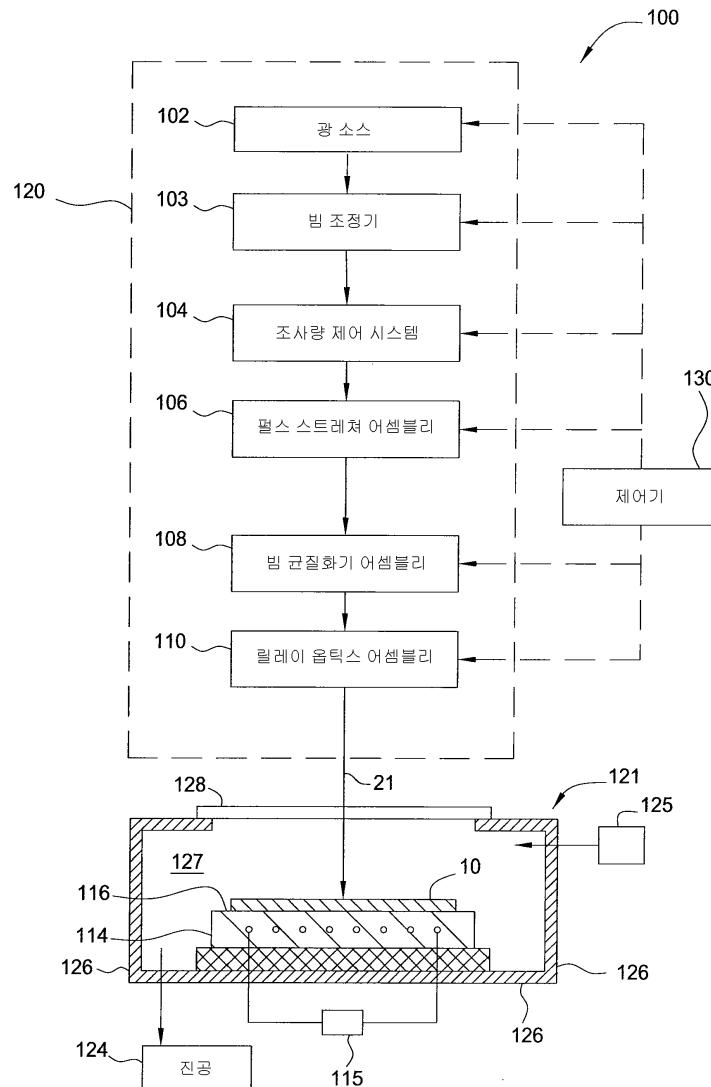
다른 외부 플라즈마 소스 실시예가 도 4c에서 도시된다. 마이크로파 전력 공급장치(219)는 도파관(wave guide; 240)에 의해 인클로저(203)에 커플링된다. 마이크로파 전력 공급장치(219)는 약 1GHz 내지 약 18GHz의 주파수 범위 내에서 작동할 수 있지만 다른 주파수들이 이용될 수 있다. 마이크로파 전력 공급장치(219)는 또한 범 조절 플라즈마(207)로의 더욱 효율적인 전력 전달을 위한 정합 회로(미도시)를 포함할 수 있다. 예를 들어 전자 사이클로트론 공명 생산된 플라즈마(electron cyclotron resonance produced plasma)들 또는 헬리콘 파 플라즈마 소스(helicon wave plasma source)들과 같은 다른 유형들의 외부 플라즈마 소스들이 이용될 수도 있다. 도 4a-4c에서 도시되며 여기서 설명된 실시예들은 범 조절기(103)에 대해 여기서 설명된 다른 실시예들과 함께 조합되고 이용될 수 있다.

[0069]

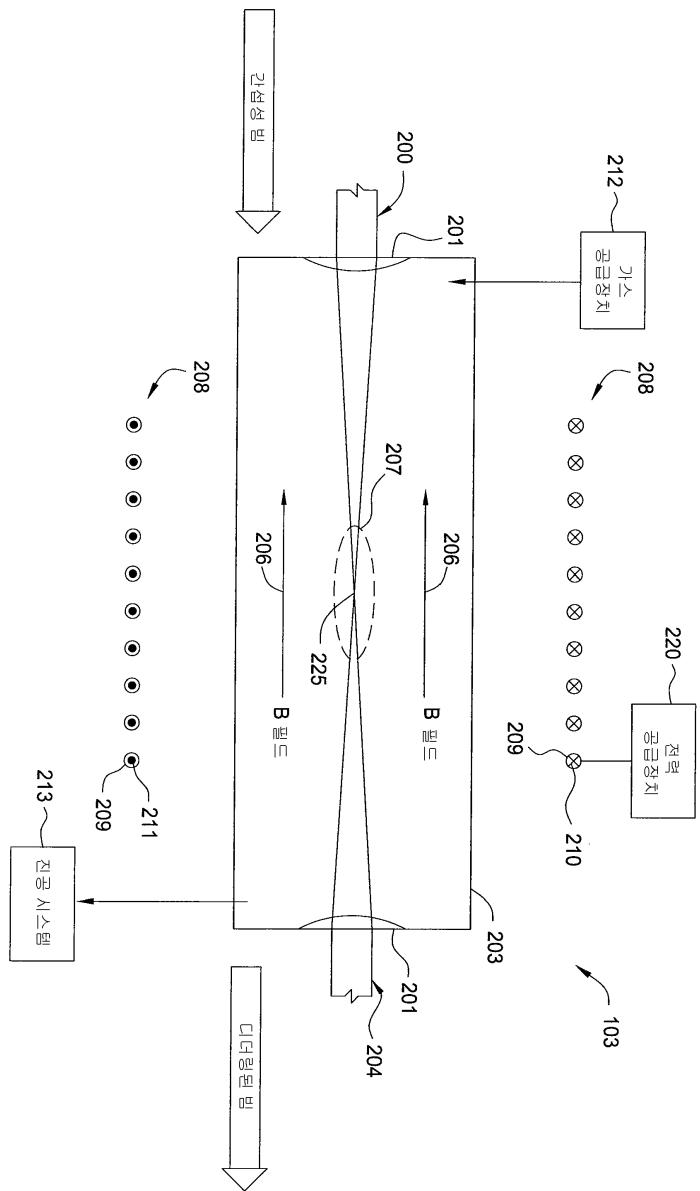
이전의 내용은 본 발명의 실시예들에 관한 것이지만, 본 발명의 다른 그리고 추가적인 실시예들이 본 발명의 기본 범위로부터 벗어나지 아니한 채로 고안될 수 있으며, 그 범위는 이하의 청구 범위에 의해 결정된다.

도면

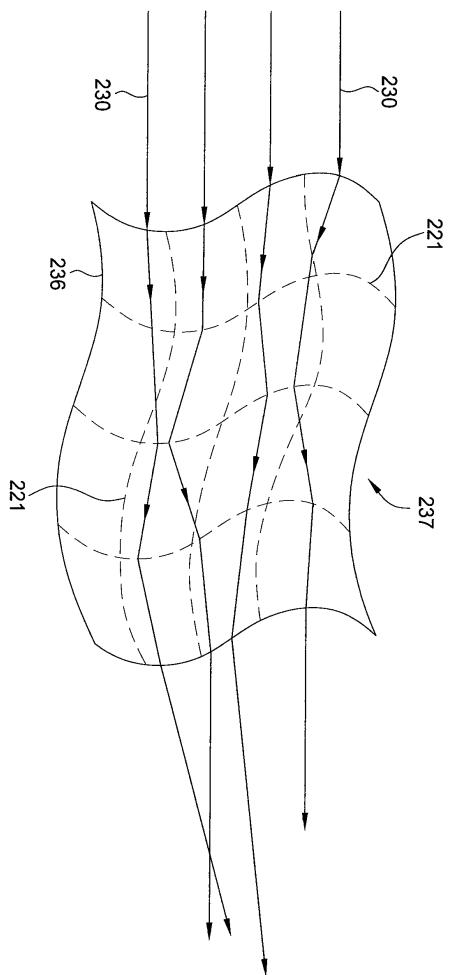
도면1



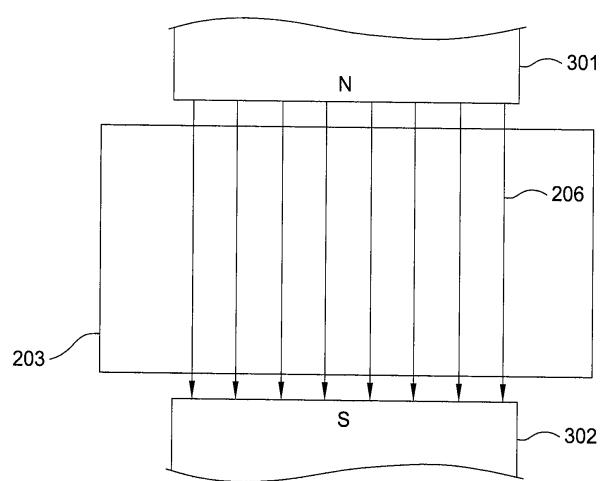
도면2a



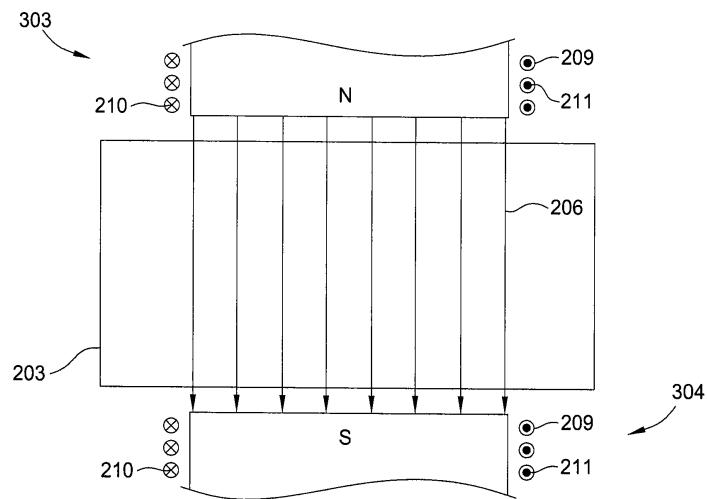
도면2b



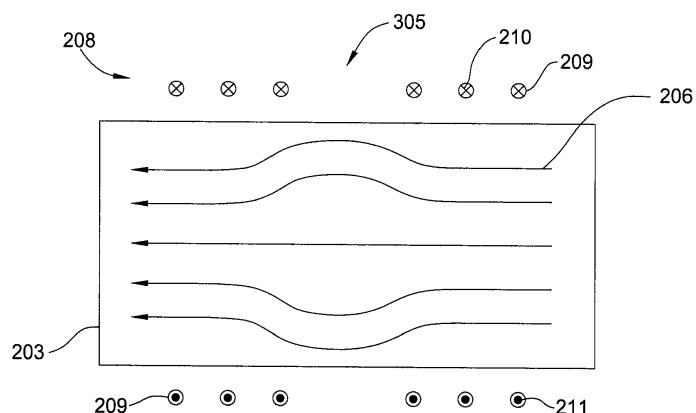
도면3a



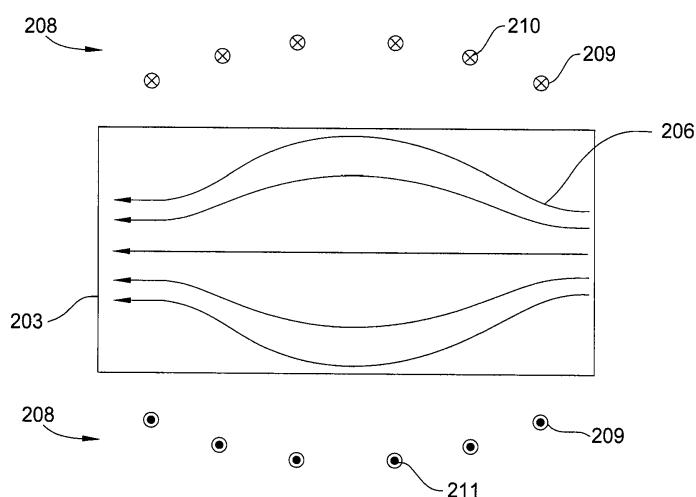
도면3b



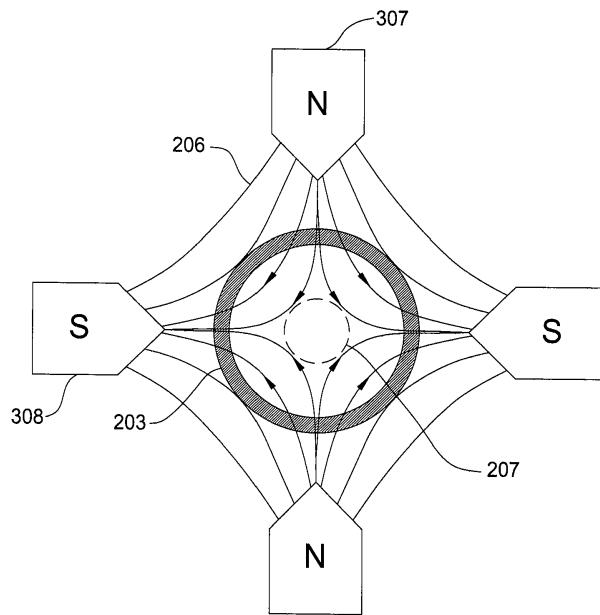
도면3c



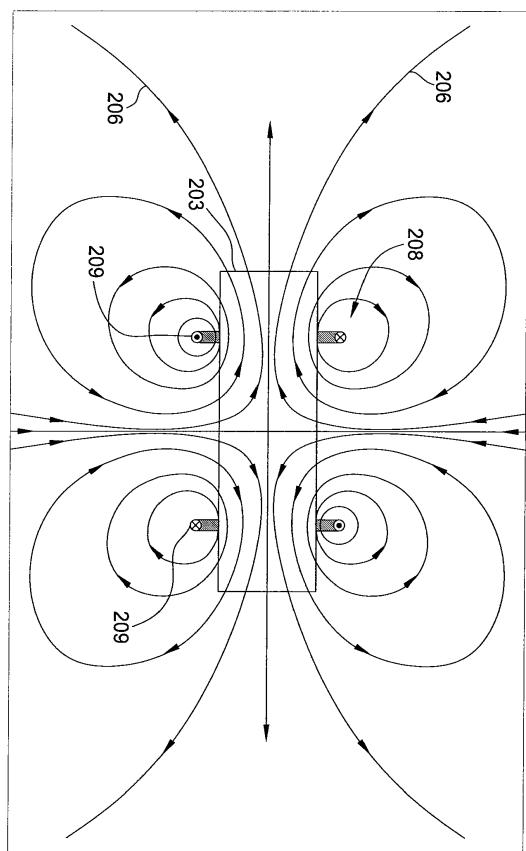
도면3d



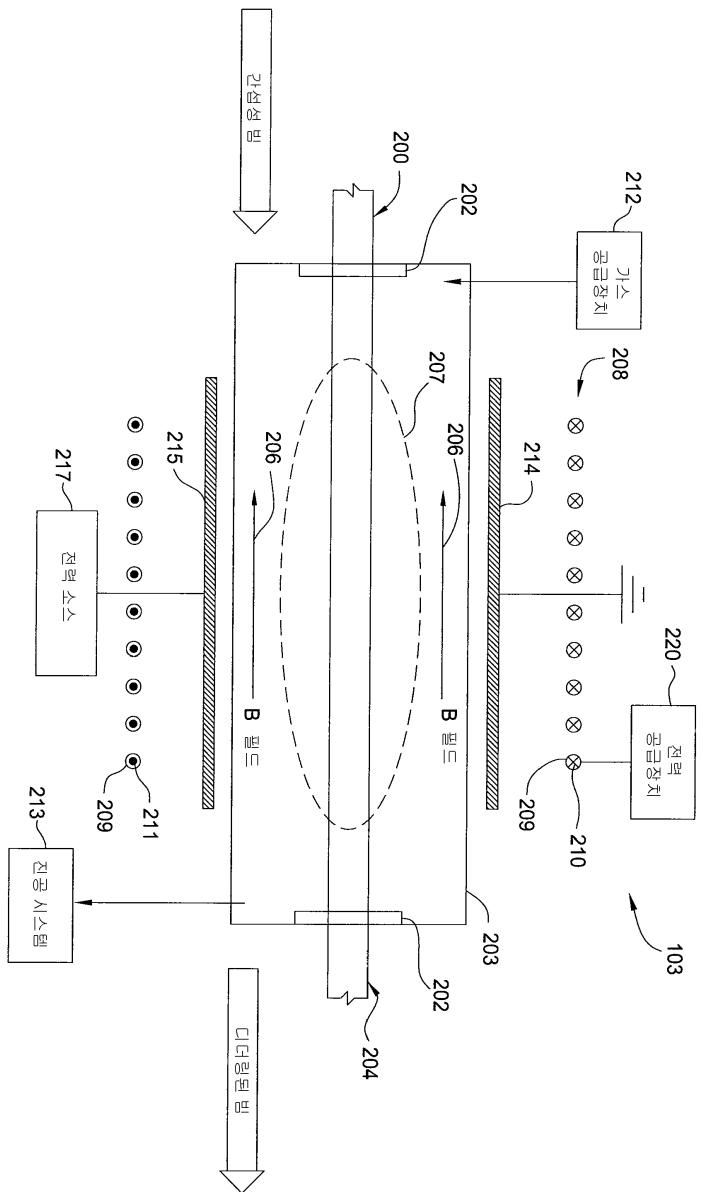
도면3e



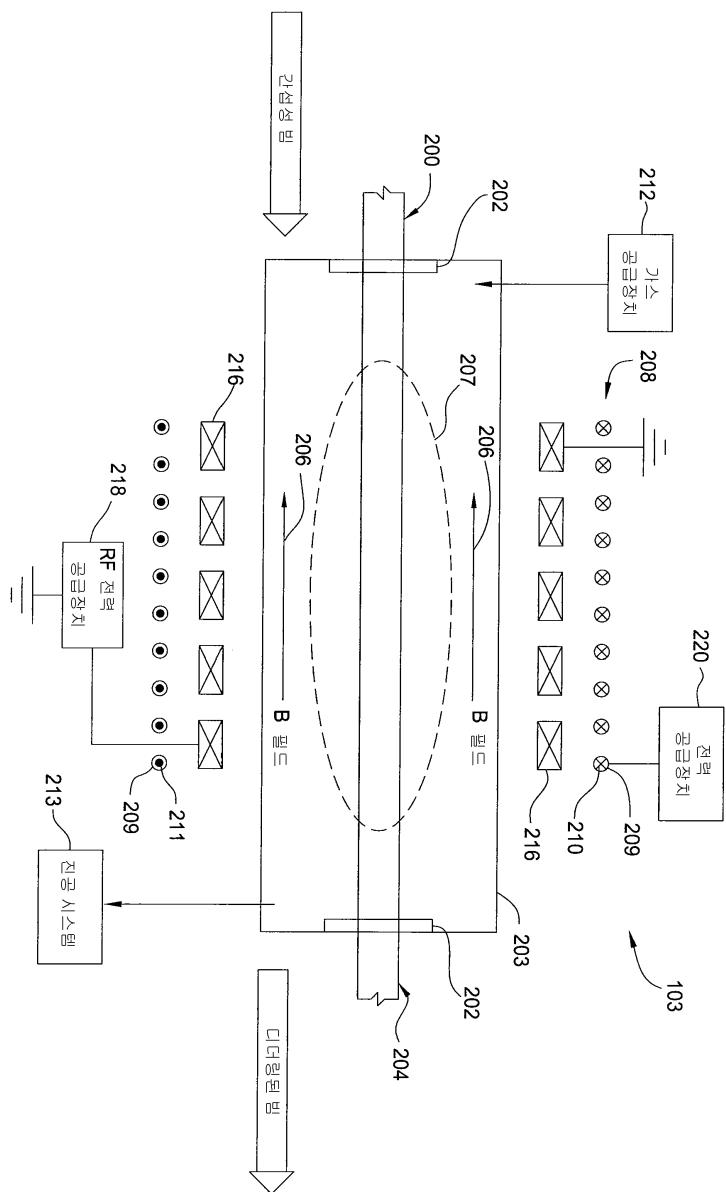
도면3f



도면4a



도면4b



도면4c

