



(19) 대한민국특허청(KR)  
(12) 공개특허공보(A)

(11) 공개번호 10-2017-0044174  
(43) 공개일자 2017년04월24일

- (51) 국제특허분류(Int. Cl.)  
H01L 21/02 (2006.01) C23C 14/06 (2006.01)  
C23C 14/35 (2006.01) C23C 16/27 (2006.01)  
C23C 16/50 (2006.01) H01L 21/203 (2006.01)  
H01L 21/205 (2006.01) H01L 21/67 (2006.01)
- (52) CPC특허분류  
H01L 21/02266 (2013.01)  
C23C 14/0611 (2013.01)
- (21) 출원번호 10-2017-7007658  
(22) 출원일자(국제) 2015년08월14일  
심사청구일자 없음  
(85) 번역문제출일자 2017년03월20일  
(86) 국제출원번호 PCT/US2015/045318  
(87) 국제공개번호 WO 2016/028640  
국제공개일자 2016년02월25일
- (30) 우선권주장  
62/040,809 2014년08월22일 미국(US)  
14/820,152 2015년08월06일 미국(US)
- (71) 출원인  
어플라이드 머티어리얼스, 인코포레이티드  
미국 95054 캘리포니아 산타 클라라 바우어스 애  
브뉴 3050
- (72) 발명자  
스토월, 마이클 더블유.  
미국 80538 콜로라도 러브랜드 화이트 엘름 드라  
이브 809  
첸, 용메이  
미국 95132 캘리포니아 새너제이 스톤 크릭 드  
라이브 1438
- (74) 대리인  
특허법인 남앤드남

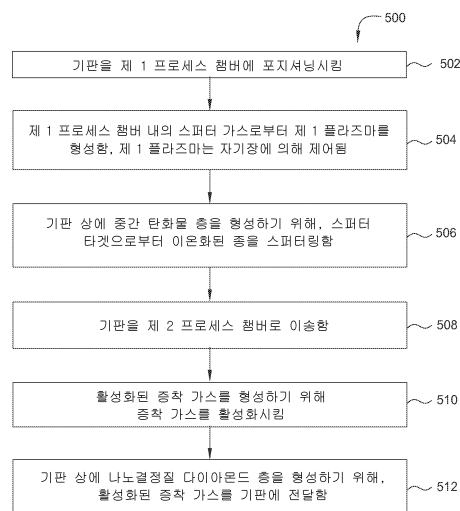
전체 청구항 수 : 총 15 항

(54) 발명의 명칭 고 밀도의 고 SP3 함유 층을 달성하기 위한 고 전력 임펄스 마그네트론 스퍼터링 프로세스

(57) 요약

나노결정질 다이아몬드 층을 증착하기 위한 방법들이 본원에서 개시된다. 방법은, 제 1 프로세스 챔버의 프로세싱 영역에 포지셔닝된 기판에 스퍼터 가스를 전달하는 단계 - 제 1 프로세스 챔버는 탄소-함유 스퍼터 타겟을 가짐 - ; 스퍼터링 플라즈마를 생성하기 위해 스퍼터 가스에 에너지 펄스를 전달하는 단계 - 스퍼터링 플라즈마는 스퍼터링 지속시간을 갖고, 에너지 펄스는,  $1 \text{ W/cm}^2$  내지  $10 \text{ W/cm}^2$ 의 평균 전력, 및  $100 \mu\text{s}$  미만의 그리고  $30 \mu\text{s}$  초과인 펄스 폭을 갖고, 스퍼터링 플라즈마는 자기장에 의해 제어되고, 자기장은 300 가우스(Gauss) 미만임 - ; 및 이온화된 층을 형성하기 위해 스퍼터 타겟에 스퍼터링 플라즈마를 전달하는 단계를 포함할 수 있으며, 이온화된 층은 기판 상에 결정질 탄소-함유 층을 형성한다.

대표도 - 도5



(52) CPC특허분류

*C23C 14/35* (2013.01)

*C23C 16/272* (2013.01)

*C23C 16/50* (2013.01)

*H01L 21/02115* (2013.01)

*H01L 21/02274* (2013.01)

*H01L 21/203* (2013.01)

*H01L 21/205* (2013.01)

*H01L 21/67098* (2013.01)

---

## 명세서

### 청구범위

#### 청구항 1

탄소-함유 층을 형성하는 방법으로서,

제 1 프로세스 챔버의 프로세싱 영역에 포지셔닝된 기관에 스퍼터 가스를 전달하는 단계 — 상기 제 1 프로세스 챔버는 탄소-함유 스퍼터 타겟을 가짐 — ;

스퍼터링 플라즈마를 생성하기 위해 상기 스퍼터 가스에 에너지 펄스를 전달하는 단계 — 상기 스퍼터링 플라즈마는, 약  $1 \text{ W/cm}^2$  내지 약  $10 \text{ W/cm}^2$ 의 평균 전력 및  $100 \mu\text{s}$  미만의 그리고  $30 \mu\text{s}$  초과 펄스 폭을 갖는 에너지 펄스들에 의해 형성되고, 상기 스퍼터링 플라즈마는 300 가우스(Gauss) 미만의 자기장에 노출됨 — ; 및

상기 탄소-함유 스퍼터 타겟으로부터 스퍼터링되는 탄소-함유 재료를 포함하는 이온화된 종(ionized species)을 형성하는 단계를 포함하며,

상기 이온화된 종은 상기 기관 상에 결정질 탄소-함유 층을 형성하는,

탄소-함유 층을 형성하는 방법.

#### 청구항 2

제 1 항에 있어서,

상기 결정질 탄소-함유 층을 성장시키는 것은,

상기 기관에 바이어스를 제공하는 단계;

활성화된 증착 가스를 형성하기 위해, 증착 가스의 존재하에서 플라즈마를 형성하는 단계 — 상기 증착 가스는 탄소-함유 소스를 포함함 — ; 및

상기 결정질 탄소-함유 층 상에 나노결정질 다이아몬드 층을 형성하기 위해, 상기 기관에 상기 활성화된 증착 가스를 전달하는 단계를 더 포함하는,

탄소-함유 층을 형성하는 방법.

#### 청구항 3

제 2 항에 있어서,

상기 증착 가스는 수소 소스를 더 포함하는,

탄소-함유 층을 형성하는 방법.

#### 청구항 4

제 1 항에 있어서,

상기 스퍼터 타겟은 흑연질(graphitic) 타겟인,

탄소-함유 층을 형성하는 방법.

#### 청구항 5

제 1 항에 있어서,

상기 기관은 섭씨 100도 미만의 온도로 유지되는,

탄소-함유 층을 형성하는 방법.

#### 청구항 6

제 1 항에 있어서,  
상기 결정질 탄소-함유 층은 나노결정질 다이아몬드 층인,  
탄소-함유 층을 형성하는 방법.

#### 청구항 7

제 2 항에 있어서,  
상기 증착 가스는 마이크로파 소스를 사용하여 활성화되는,  
탄소-함유 층을 형성하는 방법.

#### 청구항 8

제 1 항에 있어서,  
상기 에너지 펄스는 약 10 마이크로초 내지 100 마이크로초인,  
탄소-함유 층을 형성하는 방법.

#### 청구항 9

제 1 항에 있어서,  
상기 자기장은 약 200 가우스 미만인,  
탄소-함유 층을 형성하는 방법.

#### 청구항 10

탄소-함유 층을 형성하기 위한 방법으로서,

제 1 프로세스 챔버의 프로세싱 영역에 포지셔닝된 기판에 스퍼터링 가스를 전달하는 단계 - 상기 제 1 프로세스 챔버는 흑연질 타겟을 가짐 - ;

스퍼터링 플라즈마를 생성하기 위해 상기 스퍼터 가스에 에너지 펄스를 전달하는 단계 - 상기 스퍼터링 플라즈마는, 약  $1 \text{ W/cm}^2$  내지 약  $10 \text{ W/cm}^2$ 의 평균 전력 및  $100 \mu\text{s}$  미만의 펄스 폭을 갖는 에너지 펄스에 의해 형성되고, 상기 스퍼터링 플라즈마는 자기장에 의해 제어되고, 상기 자기장은 300 가우스 미만임 - ;

상기 기판 상에 중간 탄화물 층이 형성되도록 상기 스퍼터링 플라즈마를 형성하는 단계;

상기 중간 탄화물 층을 갖는 기판을 제 2 프로세스 챔버로 이동하는 단계;

상기 제 2 프로세스 챔버에 증착 가스를 전달하는 단계;

활성화된 증착 가스를 생성하기 위해, 상기 증착 가스를 활성화시키는 단계 - 상기 증착 가스는  $\text{CH}_4$ ,  $\text{H}_2$ , Ar,  $\text{CO}_2$  또는 이들의 조합들을 포함함 - ;

상기 활성화된 증착 가스를 상기 기판에 전달하는 단계; 및

상기 기판의 표면 상에 나노결정질 다이아몬드 층을 성장시키는 단계를 포함하는,  
탄소-함유 층을 형성하기 위한 방법.

#### 청구항 11

제 10 항에 있어서,  
상기 기판은 약 2 mTorr 내지 약 20 mTorr의 압력으로 유지되는,  
탄소-함유 층을 형성하기 위한 방법.

## 청구항 12

제 10 항에 있어서,  
듀티 사이클은 스퍼터링 지속기간의 약 10 % 미만인,  
탄소-함유 층을 형성하기 위한 방법.

## 청구항 13

제 10 항에 있어서,  
상기 증착 가스는 마이크로파 소스를 사용하여 활성화되는,  
탄소-함유 층을 형성하기 위한 방법.

## 청구항 14

제 10 항에 있어서,  
상기 자기장은 약 200 가우스 미만인,  
탄소-함유 층을 형성하기 위한 방법.

## 청구항 15

탄소 함유 층을 형성하기 위한 방법으로서,  
PVD 프로세스 챔버의 프로세싱 영역에 포지셔닝된 기판에 비활성 가스를 전달하는 단계 - 상기 PVD 프로세스 챔버는 흑연질 스퍼터 타겟을 가짐 - ;  
상기 PVD 프로세스 챔버를 섭씨 100도 미만의 온도로 유지하는 단계;  
스퍼터링 플라즈마를 생성하기 위해, 스퍼터 가스에 에너지 펄스를 전달하는 단계 - 상기 스퍼터링 플라즈마는 스퍼터링 지속기간을 갖고, 상기 에너지 펄스는,  $1 \text{ W/cm}^2$  내지  $10 \text{ W/cm}^2$ 의 평균 전력, 상기 평균 전력보다 큰 펄스 전압, 및  $100 \mu\text{s}$  미만의 펄스 폭을 갖고, 상기 스퍼터링 플라즈마는 자기장에 의해 제어되고, 상기 자기장은 200 가우스와 같거나 또는 그 미만임 - ; 및  
상기 기판 상에 나노결정질 다이아몬드 층을 형성하기 위해, 상기 흑연질 스퍼터 타겟에 상기 스퍼터링 플라즈마를 전달하는 단계를 포함하는,  
탄소 함유 층을 형성하기 위한 방법.

## 발명의 설명

### 기술 분야

[0001] 본원에서 개시되는 실시예들은 일반적으로, 막의 증착을 위한 방법들에 관한 것이다. 보다 구체적으로, 실시예들은 반도체 디바이스들에서 사용하기 위한 나노결정질(nanocrystalline) 다이아몬드 막을 증착하는 장치 및 방법들에 관한 것이다.

### 배경 기술

[0002] 반도체 산업이 더 높은 성능 및 더 큰 기능성을 갖는 새로운 세대들의 집적 회로(IC)들을 도입함에 따라, 이러한 IC들을 형성하는 엘리먼트들의 밀도는 증가하는 한편, 개별적인 컴포넌트들 또는 엘리먼트들 간의 치수들, 크기 및 간격은 감소된다. 과거에 이러한 감소들은, 포토리소그래피를 사용하여 구조들을 정의하는 능력에 의해서만 제한되었지만, 마이크로미터( $\mu\text{m}$ ) 또는 나노미터(nm) 단위로 측정되는 치수들을 갖는 디바이스 기하형상들은 새로운 제한 팩터(limiting factor)들, 이를테면 전도성 인터커넥트들의 전도율, 인터커넥트들 사이에서 사용되는 절연 재료(들)의 유전 상수, 작은 구조들의 에칭, 또는 3D NAND 또는 DRAM 형성 프로세스들에서의 다른 과제들을 생성하였다. 이러한 제한들은, 보다 내구성이 있는, 더 높은 열 전도율 및 더 높은 경도의 하드마스크들에 의해 이득을 얻을 수 있다.

[0003] 두꺼운 탄소 하드마스크가 잘 알려져 있으며, POR 막으로서 일반적으로 사용된다. 하지만, 현재의 흑연 질(graphitic)의 Sp<sup>2</sup> 타입 또는 다른 탄소 하드마스크 조성(composition)들은, DRAM 및 NAND가 ~10 nm 아래의 레짐(regime)으로 계속해서 규모를 축소시킴에 따라 불충분할 것으로 예상된다. 이러한 규모 축소는 훨씬 더 높은 중형비의 깊은 컨택 홀 또는 트렌치 에칭을 요구할 것이다. 높은 중형비 에칭 문제들은, 일반적으로 이러한 애플리케이션에서 관찰되는, 막힘, 홀-형상 왜곡, 패턴 변형, 상부(top) 임계 치수 블로우업(blow up), 라인 벤딩(line bending), 및 프로파일 휨(profile bowing)을 포함한다. 많은 에칭 과제들은 하드마스크의 재료 특성에 의존한다. 깊은 컨택 홀 변형은, 더 낮은 하드마스크 밀도 및 불량한 열 전도율에 관련될 수 있다. 슬릿 패턴 변형 또는 라인 벤딩은, 하드마스크 재료의 보다 낮은 선택성 및 응력으로 인한 것이다. 따라서, 보다 높은 밀도, 보다 높은 에칭 선택성, 보다 낮은 응력 및 우수한 열 전도율을 갖는 에칭 하드마스크를 갖는 것이 바람직하다.

[0004] 다이아몬드 및 다이아몬드형(diamond like) 재료들이 고 경도 재료들로서 알려져 있다. 이들의 높은 경도, 표면 불활성(surface inertness) 및 낮은 마찰 계수로 인해, 합성 다이아몬드 재료들은, 다른 용도들 중에서 MEMS(microelectromechanical systems)에서 그리고 보호 코팅으로서 적용되어 왔다. 다이아몬드 막들, 이를테면 나노결정질 다이아몬드(nanocrystalline diamond, NCD)가 고온 필라멘트(hot filament) CVD 및 마이크로로와 CVD에 의해 합성되었다. 하지만, 나노결정질 다이아몬드 막들을 형성하기 위해 고온 필라멘트 CVD 및 마이크로로와 CVD 프로세스들을 사용하는 것과 관련하여 다양한 어려움이 존재한다.

[0005] 고온 필라멘트 CVD에서는, 금속 필라멘트가 증착을 위해 전구체 가스들을 활성화시키는 데에 사용된다. 예상되는 바와 같이, 금속 필라멘트는 막 형성 프로세스 동안 전구체 가스들에 노출된다. 결과적으로, 전구체 가스들이 금속 필라멘트와 반응하여, 최종 제품에서 금속 오염 문제들을 이룰 수 있다. 고온 필라멘트 CVD와 비교하여, 마이크로로와 CVD는 더 적은 오염 문제들을 갖는다. 하지만, 마이크로로와 CVD는 높은 프로세스 압력을 요구하며, 이는 막 균일성에 영향을 미칠 수 있다. 더욱이, 마이크로로와 CVD 하드웨어에 의해 생성되는 마이크로로와 발생 플라즈마가 비교적 낮은 이온 에너지들을 갖기는 하지만, 이러한 발생되는 이온들은 여전히 NCD 그레인 바운더리(grain boundary)를 공격하여, 그레인 구조 무질서(grain structure disorder)를 유도할 수 있다.

## 발명의 내용

### 해결하려는 과제

[0006] 따라서, 고 품질 다이아몬드 막들을 형성하기 위한 개선된 장치 및 방법들이 필요하다.

### 과제의 해결 수단

[0007] 본원에 개시되는 실시예들은 일반적으로, 반도체 디바이스들에 적용되는 나노결정질 다이아몬드 층들에 관한 것이다. 스퍼터링 타겟 근처에 포지셔닝된(positioned) 마그네트론에 의해 제공되는 자기장 세기, 스퍼터링 타겟에 인가되는 펄스들의 에너지의 양 및/또는 펄스 폭을 제어함으로써, 바람직한 특성들을 갖는 나노결정질 다이아몬드 막들이 저온들에서 기판 상에 형성될 수 있다. 이러한 나노결정질 다이아몬드 막들은 다양한 동작들에서 사용될 수 있는 바, 이를테면, 나노결정질 다이아몬드 층은 리소그래피 및 에칭 프로세스들 동안 하드마스크로서 작용한다. 일 실시예에서, 탄소-함유 층을 형성하는 방법은, 제 1 프로세스 챔버의 프로세싱 영역에 포지셔닝된 기판에 스퍼터 가스를 전달하는 단계 - 제 1 프로세스 챔버는 탄소-함유 스퍼터 타겟을 가짐 - ; 및 스퍼터링 플라즈마를 생성하기 위해 스퍼터 가스에 에너지 펄스를 전달하는 단계를 포함할 수 있고, 스퍼터링 플라즈마는, 약 1 W/cm<sup>2</sup> 내지 약 10 W/cm<sup>2</sup>의 평균 전력 및 100 μs 미만의 그리고 30 μs 초과인 펄스 폭을 갖는 에너지 펄스들에 의해 형성된다. 스퍼터링 플라즈마는 자기장에 의해 제어되고, 자기장은 300 가우스(Gauss) 미만이고, 방법은, 기판 상에 결정질 탄소-함유 층을 형성하기 위해 스퍼터링 플라즈마를 형성하는 단계를 포함한다.

[0008] 다른 실시예에서, 탄소-함유 층을 형성하는 방법은, 타겟과 기판 사이에 형성된 영역에 스퍼터링 가스를 전달하는 단계 - 기판은 흑연질 타겟(graphitic target)을 갖는 제 1 프로세스 챔버의 프로세싱 영역에 포지셔닝됨 - ; 스퍼터링 플라즈마를 생성하기 위해 스퍼터 가스에 에너지 펄스를 전달하는 단계를 포함할 수 있고, 스퍼터링 플라즈마는, 약 1 W/cm<sup>2</sup> 내지 약 10 W/cm<sup>2</sup>의 평균 전력 및 100 μs 미만의 펄스 폭을 갖는 에너지 펄스에 의해 형성된다. 스퍼터링 플라즈마는 자기장에 의해 제어되고, 평균 자기장 세기는 300 가우스 미만이며, 방법은, 기판 상에 중간 탄화물 층이 형성되도록 스퍼터링 플라즈마를 형성하는 단계를 포함한다. 방법은

이후, 중간 탄화물 층을 갖는 기판을 제 2 프로세스 챔버로 이송하는 단계; 제 2 프로세스 챔버에 증착 가스를 전달하는 단계; 활성화된 증착 가스를 생성하기 위해, 증착 가스를 활성화시키는 단계 - 증착 가스는  $\text{CH}_4$ ,  $\text{H}_2$ ,  $\text{Ar}$ ,  $\text{CO}_2$  또는 이들의 조합들을 포함함 - ; 활성화된 증착 가스를 기판에 전달하는 단계; 및 기판의 표면 상에 나노결정질 다이아몬드 층을 성장시키는 단계를 포함한다.

[0009] 다른 실시예에서, 탄소 함유 층을 형성하기 위한 방법은, 흑연질 스퍼터 타겟을 갖는 PVD 프로세스 챔버의 프로세싱 영역에 포지셔닝된 기판에 비활성 가스를 전달하는 단계; 기판을 섭씨 100도 미만의 온도로 유지하는 단계; 및 스퍼터링 플라즈마를 생성하기 위해, 스퍼터 가스에 에너지 펄스를 전달하는 단계를 포함할 수 있고, 스퍼터링 플라즈마는, 약  $1 \text{ W/cm}^2$  내지 약  $10 \text{ W/cm}^2$ 의 평균 전력 및  $100 \mu\text{s}$  미만의 펄스 폭을 갖는 에너지 펄스에 의해 형성된다. 스퍼터링 플라즈마는 자기장에 의해 제어되고, 자기장은 200 가우스와 같거나 또는 그 미만이고, 방법은, 기판 상에 나노결정질 다이아몬드 층을 형성하기 위해, 스퍼터 타겟에 스퍼터링 플라즈마를 전달하는 단계를 포함한다.

### 도면의 간단한 설명

[0010] 본 발명의 상기 열거된 특징들이 상세히 이해될 수 있는 방식으로 앞서 간략히 요약된 본 발명의 보다 구체적인 설명이 실시예들을 참조로 하여 이루어질 수 있는데, 이러한 실시예들의 일부는 첨부된 도면들에 예시되어 있다. 그러나, 첨부된 도면들은 본 발명의 단지 전형적인 실시예들을 도시하는 것이므로 본 발명의 범위를 제한하는 것으로 간주되지 않아야 한다는 것이 주목되어야 하는데, 이는 본 발명이 다른 균등하게 유효한 실시예들을 허용할 수 있기 때문이다.

[0011] 도 1은 본원에서 설명되는 실시예들과 함께 사용가능한 PVD 프로세스 챔버의 개략적인 단면도이다.

[0012] 도 2는 본원에서 설명되는 실시예들과 함께 사용가능한 PVD 프로세스 챔버의 개략적인 단면도이다.

[0013] 도 3은 기판 상에 나노결정질 다이아몬드 층을 생성하는 데에 적합한 예시적인 클러스터 툴을 예시한다.

[0014] 도 4a는, 실시예에 따른, 내부에서 고 전력 임펄스 마그네트론 스퍼터링(high power impulse magnetron sputtering, HIPIMS) 프로세스를 생성하기 위해 프로세스 챔버에 제공되는 에너지 전달 프로세스 시퀀스를 예시한다.

[0015] 도 4b는 실시예에 따른, 나노결정질 다이아몬드 층을 증착하기 위한 방법의 흐름도이다.

[0016] 도 5는 실시예에 따른, 중간 탄화물 층을 증착하기 위한 방법의 흐름도이다.

[0017] 도 6은 3개의 상이한 자기장 세기들에 대한, 타겟으로부터의 거리의 함수로서 플로팅 전위를 예시하는 그래프이다.

[0018] 도 7a 및 7b는 플로팅 전압 및 밀도에 대한 펄스 전압의 영향들을 도시하는 그래프들이다.

[0019] 이해를 촉진시키기 위해, 도면들에 대해 공통적인 동일한 엘리먼트들을 가리키기 위해 가능한 경우 동일한 도면부호들이 사용되었다. 일 실시예에 개시된 엘리먼트들은 구체적인 언급없이 다른 실시예들에서 유리하게 활용될 수 있음이 고려된다.

### 발명을 실시하기 위한 구체적인 내용

[0011] 본원에 개시되는 실시예들은 일반적으로, 기판 상에 형성되는 나노결정질 다이아몬드 층에 관한 것이다. 본원에서 설명되는 프로세스들에 의해 형성되는 나노결정질 다이아몬드 층들은 일반적으로, 작은 피쳐 크기들을 갖는 집적 회로(IC) 디바이스들을 형성하는 데에 필요한, 보다 높은 질량 밀도, 보다 높은 에칭 선택성, 보다 낮은 응력 및 우수한 열 전도율을 갖는다. 실시예들은 하기에 도면들을 참조하여 보다 명확하게 설명된다.

[0012] 도 1은 고 전력 임펄스 마그네트론 스퍼터링(HIPIMS) 프로세스를 사용하여 재료들을 스퍼터 증착하는 데에 적합한 예시적인 물리적 기상 증착(PVD) 프로세스 챔버(100)(예를 들어, 스퍼터링 프로세스 챔버)를 예시한다. 나노결정질 다이아몬드 층을 형성하도록 적용될 수 있는 프로세스 챔버의 하나의 예는, 캘리포니아 산타클라라에 소재하는 Applied Materials, Inc.로부터 입수가능한 PVD 프로세스 챔버이다. 다른 제조사들로부터의 스퍼터 프로세스 챔버들을 포함하는 다른 스퍼터 프로세스 챔버들이 본 발명을 실시하도록 적용될 수 있음이 고려된다.



- [0013] [0022] 프로세스 챔버(100)는, 내부에 정의된 프로세싱 용적(processing volume)(118)을 갖는 챔버 본체(chamber body)(108)를 포함한다. 챔버 본체(108)는 측벽들(110) 및 바닥부(146)를 갖는다. 챔버 본체(108), 및 프로세스 챔버(100)의 관련 컴포넌트들의 치수들은 제한되지 않으며, 일반적으로, 프로세싱될 기판(190)의 크기보다 비례적으로 더 크다. 임의의 적합한 기판 크기가 프로세싱될 수 있다. 적합한 기판 크기들의 예들은, 200 mm 직경, 300 mm 직경, 450 mm 직경 또는 그 초과를 갖는 기판을 포함한다.
- [0014] [0023] 챔버 리드 어셈블리(chamber lid assembly)(104)가 챔버 본체(108)의 상단부(top)에 장착된다. 챔버 본체(108)는 알루미늄 또는 다른 적합한 재료들로 제조될 수 있다. 기판 액세스 포트(130)가 챔버 본체(108)의 측벽(110)을 통해 형성되어, 프로세스 챔버(100) 내외로의 기판(190)의 이송을 용이하게 한다. 액세스 포트(130)는 이송 챔버 및/또는 기판 프로세싱 시스템의 다른 챔버들에 커플링될 수 있다.
- [0015] [0024] 가스 소스(128)가, 프로세싱 용적(118) 내로 프로세스 가스들을 공급하기 위해 챔버 본체(108)에 커플링된다. 일 실시예에서, 프로세스 가스들은 비활성 가스들, 비-반응성 가스들, 및 필요한 경우 반응성 가스들을 포함할 수 있다. 가스 소스(128)에 의해 제공될 수 있는 프로세스 가스들의 예들은, 특히, 아르곤 가스(Ar), 헬륨(He), 네온 가스(Ne), 크립톤(Kr), 크세논(Xe), 질소 가스(N<sub>2</sub>), 산소 가스(O<sub>2</sub>), 수소 가스(H<sub>2</sub>), 형성(forming) 가스(N<sub>2</sub> + H<sub>2</sub>), 암모니아(NH<sub>3</sub>), 메탄(CH<sub>4</sub>), 일산화탄소(CO) 및/또는 이산화탄소(CO<sub>2</sub>)를 포함하지만, 이제 제한되지 않는다.
- [0016] [0025] 펌핑 포트(150)가 챔버 본체(108)의 바닥부(146)를 통해 형성된다. 펌핑 디바이스(152)가 프로세싱 용적(118)에 커플링되어, 프로세싱 용적(118)을 진공배기(evacuate)시키며 그리고 프로세싱 용적(118) 내의 압력을 제어한다. 펌핑 시스템 및 챔버 냉각 설계는, 열 버짓(thermal budget) 요구들에 적합한 온도들, 예를 들어 섭씨 -25도 내지 섭씨 +650도에서, 높은 베이스 진공(1E-8(즉, 1×10<sup>-8</sup>) Torr 또는 그 미만) 및 낮은 상승률(rate-of-rise)(1,000 mTorr/min)을 가능하게 한다. 펌핑 시스템은, 결정 구조(예를 들어, Sp3 함유량), 응력 제어 및 조정(tuning)을 위한 임계 파라미터인 프로세스 압력의 정밀한 제어를 제공하도록 설계된다. 프로세스 압력은, 약 1 mTorr 내지 약 500 mTorr의 범위, 이를테면 약 2 mTorr 내지 약 20 mTorr로 유지될 수 있다.
- [0017] [0026] 리드 어셈블리(104)는 일반적으로, 타겟(120) 및 그에 커플링된 접지 실드 어셈블리(ground shield assembly)(126)를 포함한다. 타겟(120)은, PVD 프로세스 동안 기판(190)의 표면 상으로 스퍼터링되어 증착될 수 있는 재료 소스를 제공한다. 타겟(120)은 DC 스퍼터링 동안 플라스마 회로의 캐소드의 역할을 한다.
- [0018] [0027] 타겟(120) 또는 타겟 플레이트는, 챔버 내에서 형성될 증착 층, 또는 그러한 증착 층의 엘리먼트들에 대해 활용되는 재료로 제조될 수 있다. 고 전압 전력 공급부, 이를테면 전력 소스(132)가 타겟(120)에 연결되어, 타겟(120)으로부터 재료들을 스퍼터링하는 것을 용이하게 한다. 일 실시예에서, 타겟(120)은 탄소 함유 재료, 이를테면, 흑연, 비정질 탄소, 이들의 조합들 등을 포함하는 재료로 제조될 수 있다. 타겟은 또한, 흑연질일 수 있고 그리고/또는 Sp2 타입 탄소 재료 구조들을 포함할 수 있다. 증착 프로세스는 Sp3 층의 증착을 위해 Sp2 재료 함유 증착 타겟의 사용으로부터 이득을 얻을 수 있는데, 이는 Sp2 탄소 재료들이, 다른 덜 구조화된 탄소 타겟들보다 구조적으로 Sp3에 더 가깝기 때문이다. 일 실시예에서, 타겟은 흑연질 타겟이다. 전력 소스(132), 또는 전력 공급부는, (일정한 방식과 대조적으로) 펄스형(pulsed) 방식으로 타겟에 전력을 제공할 수 있다. 즉, 전력 공급부는 타겟에 다수의 펄스들을 제공함으로써 타겟에 전력을 제공할 수 있다.
- [0019] [0028] 타겟(120)은 일반적으로 주변부(124) 및 중앙부(116)를 포함한다. 주변부(124)는 챔버의 측벽들(110) 위에 배치된다. 타겟(120)의 중앙부(116)는 기판 지지부(138) 상에 배치된 기판(190)의 표면을 향해 약간 연장되는 만곡(curvature) 표면을 가질 수 있다. 몇몇 실시예들에서, 타겟(120)과 기판 지지부(138) 간의 간격은 약 50 mm 내지 약 250 mm로 유지된다. 타겟(120)의 치수, 형상, 재료들, 구성 및 및 직경은 특정 프로세스 또는 기판 요건들에 따라 달라질 수 있음이 주목된다. 일 실시예에서, 타겟(120)은, 기판 표면 상에 스퍼터링되도록 요구되는 재료에 의해 제조되고 그리고/또는 결합되는(bonded) 중앙부를 갖는 백킹 플레이트(backing plate)를 더 포함할 수 있다.
- [0020] [0029] 리드 어셈블리(104)는, 프로세싱 동안 타겟(120)으로부터의 재료들의 효율적인 스퍼터링을 강화하는, 타겟(120) 위에 장착된 풀 페이스 부식 마그네트론 캐소드(full face erosion magnetron cathode)(102)를 더 포함할 수 있다. 이러한 풀 페이스 부식 마그네트론 캐소드(121)는, 웨이퍼에 걸쳐서 일관된 타겟 부식 및 균일한 증착을 보장하면서, 쉽고 빠른 프로세스 제어 및 맞춤형(tailored) 막 특성들을 허용한다. 마그네트론 어셈블리의 예들은, 타겟 면 상에 요구되는 부식 패턴을 형성하고 그리고 프로세스의 펄스형 또는 DC 플라스마 스테이지들 동안 바람직한 시스(sheath) 형성을 가능하게 하기 위해, 다른 형상들 중에서, 선형 마그네트론, 서펜타



인(serpentine) 마그네트론, 나선형 마그네트론, 이중-디지털라이징(double-digitated) 마그네트론, 직사각형화된 나선형 마그네트론을 포함한다. 몇몇 구성들에서, 마그네트론은, 타겟의 표면 위에 바람직한 패턴, 이를테면 전술한 패턴들 중 하나(예를 들어, 선형, 서펜타인, 나선형, 이중 디지털라이징 등)로 포지셔닝되는 영구 자석들을 포함할 수 있다. 다른 구성들에서, HIPIMS 프로세스의 하나 또는 그 초과와 부분들에 걸쳐서 플라즈마의 형상 및/또는 밀도를 조정하기 위해, 바람직한 패턴을 갖는 가변 자기장 타입의 마그네트론이 대안적으로(alternately) 또는 심지어 영구 자석들에 부가하여 사용될 수 있다.

[0021] [0030] 리드 어셈블리(104)의 접지 실드 어셈블리(126)는 접지 프레임(106) 및 접지 실드(112)를 포함한다. 접지 실드 어셈블리(126)는 또한, 다른 챔버 실드 부재, 타겟 실드 부재, 암 공간 실드(dark space shield) 및 암 공간 실드 프레임을 포함할 수 있다. 접지 실드(112)는 접지 프레임(106)에 의해 주변부(124)에 커플링되어, 프로세싱 용적(118) 내에, 타겟(120)의 중앙부 아래에 상부 프로세싱 영역(154)을 정의한다. 접지 프레임(106)은, 측벽들(110)을 통해 프로세스 챔버(100)의 챔버 본체(108)에 접지 경로를 제공하면서, 접지 실드(112)를 타겟(120)으로부터 전기적으로 절연시킨다. 접지 실드(112)는, 프로세싱 동안 발생하는 플라즈마를 상부 프로세싱 영역(154) 내에 억제(constrain)시키고, 타겟(120)의 한정된 중앙부(116)로부터 타겟 소스 재료를 축출(dislodge)하며, 그에 의해, 축출된 타겟 소스 재료가 챔버 측벽들(110) 보다는 기관 표면 상에 주로 증착되도록 허용한다.

[0022] [0031] 챔버 본체(108)의 바닥부(146)로부터 연장되는 샤프트(140)가 리프트 메커니즘(144)에 커플링된다. 리프트 메커니즘(144)은, 하부 이송 포지션과 상부 프로세싱 포지션 사이에서 기관 지지부(138)를 이동시키도록 구성된다. 벨로우즈(bellows)(142)가 샤프트(140)를 둘러싸고 기관 지지부(138)에 커플링되어, 그 사이에 가요성 밀봉(flexible seal)을 제공함으로써, 챔버 프로세싱 용적(118)의 진공 무결성(vacuum integrity)을 유지한다.

[0023] [0032] 기관 지지부(138)는 정전 척일 수 있고, 전극(180)을 가질 수 있다. 정전 척(ESC) 실시예를 사용할 때, 기관 지지부(138)는 절연성 및 전도성 타입 기관들(190) 모두를 유지하기 위해 반대 전하들의 인력을 사용하며, DC 전력 공급부(181)에 의해 전력이 공급된다. 기관 지지부(138)는 유전체 본체 내에 매립된 전극을 포함할 수 있다. DC 전력 공급부(181)는 전극에 약 200 내지 약 2000 볼트의 DC 척킹 전압을 제공할 수 있다. DC 전력 공급부(181)는 또한, 기관(190)을 척킹 및 디-척킹시키기 위해 전극(180)에 DC 전류를 지향시킴으로써 그러한 전극의 동작을 제어하기 위한 시스템 제어를 포함할 수 있다.

[0024] [0033] PVD 프로세스의 온도는, 증착되는 막 특성들이 바람직하지 않게 될 수 있는 온도 미만으로 유지될 수 있다. 예를 들어, 나노결정질 다이아몬드 층 또는 중간 탄화물 층을 증착하는 것을 보조하기 위해, 온도는 섭씨 약 250도 미만일 수 있고, 섭씨 약 50도 마진(margin)을 가질 수 있다. 기관 지지부(138)는 디바이스 집적 요건들의 열 버짓에 의해 요구되는 온도 범위에서 작동한다. 예를 들어, 기관 지지부(138)는, 섭씨 -25도 내지 섭씨 100도의 온도 범위에 대해서는 분리가능(detachable) ESC(DTESC), 섭씨 100도 내지 섭씨 200도의 온도 범위에 대해서는 중간 온도(Mid-Temp) ESC(MTESC), 웨이퍼들의 신속하고 균일한 가열을 보장하는 섭씨 200도 내지 섭씨 500도 범위의 온도들에 대해서는 고온 또는 고온 바이어싱가능(Biasable) 또는 고온 고 균일성 ESC(HTESC) 또는 HTBESC 또는 HTHUESC)일 수 있다.

[0025] [0034] 프로세스 가스가 프로세스 챔버(100) 내로 도입된 후, HIPIMS 타입 PVD 프로세스가 수행될 수 있도록 하기 위해, 가스가 에너지화(energize)되어 플라즈마를 형성한다. HIPIMS 타입 PVD 프로세스의 예가 하기에서 더 설명된다.

[0026] [0035] 새도우 프레임(shadow frame)(122)이 기관 지지부(138)의 주변 영역 상에 배치되며, 타겟(120)으로부터 스퍼터링되는 소스 재료의 증착을 기관 표면의 요구되는 부분에 한정시키도록 구성된다. 챔버 실드(chamber shield)(136)가 챔버 본체(108)의 내측 벽 상에 배치될 수 있으며, 그리고 기관 지지부(138) 주위에 배치된 새도우 프레임(122)을 지지하도록 구성된, 프로세싱 용적(118) 쪽으로 내측으로 연장되는 립(lip)(156)을 가질 수 있다. 기관 지지부(138)가 프로세싱을 위해 상부 포지션으로 상승될 때, 기관 지지부(138) 상에 배치된 기관(190)의 외측 예지는 새도우 프레임(122)에 의해 인게이지되고(engaged), 새도우 프레임(122)은 들어올려지고 챔버 실드(136)로부터 이격된다. 기관 지지부(138)가 기관 이송 액세스 포트(130)에 인접하는 이송 포지션으로 하강될 때, 새도우 프레임(122)은 챔버 실드(136) 상에 다시 놓인다. 리프트 핀들(미도시)이 기관 지지부(138)를 통해 선택적으로 이동되어, 기관 지지부(138) 위로 기관(190)을 들어올림으로써, 이송 로봇 또는 다른 적절한 이송 메커니즘에 의한 기관(190)으로의 액세스를 용이하게 한다.

[0027] [0036] 제어기(148)가 프로세스 챔버(100)에 커플링된다. 제어기(148)는 중앙 처리 유닛(CPU)(160), 메모리

(158) 및 지원 회로들(162)을 포함한다. 제어기(148)는 프로세스 시퀀스를 제어하도록 활용되어, 가스 소스(128)로부터 프로세스 챔버(100) 내로의 가스 유동들을 조절하고, 타겟(120)의 이온 충격을 제어한다. CPU(160)는 산업 환경에서 사용될 수 있는 임의의 형태의 범용 컴퓨터 프로세서일 수 있다. 소프트웨어 루틴들은, 메모리(158), 이블테먼 랜덤 액세스 메모리, 판독 전용 메모리, 플로피 또는 하드 디스크 드라이브, 또는 다른 형태의 디지털 스토리지(digital storage)에 저장될 수 있다. 지원 회로들(162)은 통상적으로 CPU(160)에 커플링되며, 캐시, 클록 회로들, 입력/출력 서브시스템들, 전력 공급부들 등을 포함할 수 있다. 소프트웨어 루틴들은, CPU(160)에 의해 실행될 때, CPU를, 본 발명에 따라 프로세스들이 수행되도록 프로세스 챔버(100)를 제어하는 특수 목적 컴퓨터(제어기)(148)로 변환시킨다. 소프트웨어 루틴들은 또한, 프로세스 챔버(100)로부터 원격에 위치되는 제 2 제어기(미도시)에 저장되고 그리고/또는 그러한 제 2 제어기에 의해 실행될 수 있다.

[0028] [0037] 프로세싱 동안, 재료가 타겟(120)으로부터 스퍼터링되어, 기관(190)의 표면 상에 증착된다. 몇몇 구성들에서, 타겟(120)은, 가스 소스(128)에 의해 공급되는 프로세스 가스들로부터 형성되는 플라즈마를 발생시키고 유지하기 위해, 전력 소스(132)에 의해, 접지 또는 기관 지지부에 대해 바이어싱된다. 플라즈마에서 발생하는 이온들은 타겟(120) 쪽으로 가속되고 타겟(120)을 타격하여, 타겟 재료가 타겟(120)으로부터 추출되게 한다. 추출된 타겟 재료는, 기관(190) 상에, 요구되는 결정 구조 및/또는 조성을 갖는 층을 형성한다. RF, DC 또는 고속 스위칭 펄스형 DC 전력 공급부들 또는 이들의 조합들은, 나노결정질 다이아몬드 재료에 대한 스퍼터링 조성 및 증착 레이트들의 정밀한 제어를 위해 조정가능한(tunable) 타겟 바이어스를 제공한다.

[0029] [0038] 전력 소스(132)는 HIPIMS 전력 소스이다. 본원에서 사용되는 전형적인 HIPIMS 전력 소스(132)는, 약 10  $\mu$ s 내지 약 200  $\mu$ s의 짧은 지속기간들 동안, 약 1 메가볼트(MV) 내지 약 8 MV와 같은 고 전압들을 갖는 전력 임펄스들을 전달하도록 구성된다. HIPIMS 프로세스의 논의는 도 4a-4b 및 도 7a-7b와 관련하여 하기에서 더 설명된다.

[0030] [0039] 몇몇 실시예들에서, 나노결정질 다이아몬드 층 증착 프로세스의 상이한 페이즈(phase)들 동안 기관에 바이어스를 개별적으로 인가하는 것이 또한 바람직하다. 따라서, 소스(185)(예를 들어, DC 및/또는 RF 소스)로부터 기관 지지부(138) 내의 바이어스 전극(186)(또는 척 전극(180))에 바이어스가 제공될 수 있으며, 그에 따라, 증착 프로세스의 하나 또는 그 초과 페이즈들 동안 플라즈마에서 형성되는 이온들에 의해 기관(190)에 충격이 가해질 것이다. 몇몇 프로세스 예들에서, 나노결정질 다이아몬드 막 증착 프로세스가 수행된 후, 기관에 바이어스가 인가된다. 대안적으로, 몇몇 프로세스 예들에서, 나노결정질 다이아몬드 막 증착 프로세스 동안, 바이어스가 인가된다. 더 큰 음의 기관 바이어스는 플라즈마에서 발생하는 양 이온들을 기관 쪽으로 유도(drive)하는 경향이 있거나 또는 그 반대의 경우도 마찬가지일 것이며, 그에 따라, 이들은 기관 표면을 타격할 때 더 많은 양(amount)의 에너지를 갖는다.

[0031] [0040] 도 2는 본원에서 설명되는 실시예들에 따라 탄소계 층을 증착하기 위해 사용될 수 있는 프로세스 챔버(200)의 개략적인 단면도이다. 본원에서 설명되는 탄소 층 증착 방법들을 수행하도록 적용될 수 있는 증착 챔버는, 캘리포니아 산타클라라에 소재하는 Applied Materials, Inc.로부터 입수가 가능한 PRODUCER<sup>®</sup> 화학 기상 증착 챔버이다. 하기에서 설명되는 챔버는 예시적인 실시예이며, 그리고 다른 제조사들로부터의 챔버들을 포함하는 다른 챔버들이, 본원에서 설명되는 본 발명의 특징들로부터 벗어나지 않으면서, 본 발명의 실시예들과 함께 사용될 수 있거나, 또는 본 발명의 실시예들과 매칭(match)하도록 변경될 수 있다는 것을 이해해야 한다.

[0032] [0041] 프로세스 챔버(200)는, 중앙 이송 챔버에 연결되고 로봇(미도시)에 의해 서비스되는 다수의 프로세싱 챔버들을 포함하는 프로세싱 시스템(미도시)의 일부일 수 있다. 일 실시예에서, 프로세싱 시스템은 도 3에서 설명되는 클러스터 툴(300)이다. 프로세스 챔버(200)는, 프로세스 용적(212)을 정의하는, 벽들(206), 바닥부(208), 및 리드(lid)(210)를 포함한다. 벽들(206) 및 바닥부(208)는 알루미늄의 단일 블록(unitary block)으로 제조될 수 있다. 프로세스 챔버(200)는 또한, 프로세스 용적(212)을 배기 포트(216)에 유체적으로 결합시키는 펌핑 링(214), 뿐만 아니라, 다른 펌핑 컴포넌트들(미도시)을 포함할 수 있다.

[0033] [0042] 가열될 수 있는 기관 지지 어셈블리(238)가 프로세스 챔버(200) 내에서 중앙에 배치될 수 있다. 기관 지지 어셈블리(238)는 증착 프로세스 동안 기관(203)을 지지한다. 기관 지지 어셈블리(238)는 일반적으로, 알루미늄, 세라믹, 또는 알루미늄과 세라믹의 조합으로 제조되며, 그리고 적어도 하나의 바이어스 전극(232)을 포함한다. 바이어스 전극(232)은 e-척 전극, RF 기관 바이어스 전극 또는 이들의 조합들일 수 있다.

[0034] [0043] 진공 포트가, 증착 프로세스 동안 기관 지지 어셈블리(238)에 기관(203)을 고정시키도록, 기관 지지 어셈블리(238)와 기관(203) 사이에 진공을 적용하기 위해 사용될 수 있다. 바이어스 전극(232)은, 예를 들어, 프로세싱 동안 기관 지지 어셈블리(238) 및 그러한 기관 지지 어셈블리(238) 상에 포지셔닝된 기관(203)을 미리

결정된 바이어스 전력 레벨로 바이어싱하기 위해, 기관 지지 어셈블리(238)에 배치되며 바이어스 전력 소스(230A 및 230B)에 커플링되는 전극(232)일 수 있다.

- [0035] [0044] 바이어스 전력 소스(230A 및 230B)는, 다양한 주파수들, 이를테면 약 2 내지 약 60 MHz의 주파수에서 기관(203) 및 기관 지지 어셈블리(238)에 전력을 전달하도록 독립적으로 구성될 수 있다. 본원에서 설명되는 주파수들의 다양한 변화(permutation)들이, 본원에서 설명되는 발명으로부터 벗어나지 않으면서 이용될 수 있다.
- [0036] [0045] 일반적으로, 기관 지지 어셈블리(238)는 스템(stem)(242)에 커플링된다. 스템(242)은, 기관 지지 어셈블리(238)와 프로세스 챔버(200)의 다른 컴포넌트들 사이의, 전기 리드들, 진공 및 가스 공급 라인들을 위한 도관을 제공한다. 부가적으로, 스템(242)은, 로봇식 이송을 용이하게 하기 위해 기관 지지 어셈블리(238)를 (도 2에서 도시된 바와 같은) 상승된 포지션과 하강된 포지션(미도시) 사이에서 이동시키는 리프트 시스템(244)에 기관 지지 어셈블리(238)를 커플링시킨다. 벨로우즈(246)는, 기관 지지 어셈블리(238)의 이동을 용이하게 하면서, 프로세스 챔버(200) 외부의 분위기와 프로세스 용적(212) 사이에 진공 밀봉(vacuum seal)을 제공한다.
- [0037] [0046] 샤워헤드(218)가 일반적으로, 리드(210)의 내부 측(220)에 커플링될 수 있다. 프로세스 챔버(200)에 들어오는 가스들(즉, 프로세스 가스들 및/또는 다른 가스들)은 샤워헤드(218)를 통해 프로세스 챔버(200) 내로 통과한다. 샤워헤드(218)는 프로세스 챔버(200)에 가스들의 균일한 유동을 제공하도록 구성될 수 있다. 기관(203) 상의 균일한 층 형성을 촉진시키기 위해서는, 균일한 가스 유동이 바람직하다. 원격 플라즈마 소스(205)가 프로세스 용적(212) 및 가스 소스(204)와 커플링될 수 있다. 여기에서 도시된 바와 같이, 원격 플라즈마 발생기와 같은 원격 활성화 소스는 반응 종의 플라즈마를 발생시키는데 사용되며, 이러한 플라즈마는 이후 프로세스 용적(212) 내로 전달된다. 예시적인 원격 플라즈마 발생기들은 MKS Instruments, Inc. 및 Advanced Energy Industries, Inc.와 같은 판매사들로부터 입수가 가능하다.
- [0038] [0047] 부가적으로, 플라즈마 전력 소스(262)가, 기관 지지 어셈블리(238) 상에 배치된 기관(203)을 향하여 샤워헤드(218)를 통하는 가스들을 에너지화시키기 위해, 샤워헤드(218)에 커플링될 수 있다. 플라즈마 전력 소스(262)는 플라즈마를 형성하기 위한 전력, 이를테면 RF 전력 또는 마이크로파 전력을 제공할 수 있다.
- [0039] [0048] 프로세스 챔버(200)의 기능은 컴퓨팅 디바이스(254)에 의해 제어될 수 있다. 컴퓨팅 디바이스(254)는, 다양한 챔버들 및 서브-프로세서들을 제어하기 위해 산업 현장에서 사용될 수 있는 임의의 형태의 범용 컴퓨터 중 하나일 수 있다. 컴퓨팅 디바이스(254)는 컴퓨터 프로세서(256)를 포함한다. 컴퓨팅 디바이스(254)는 메모리(258)를 포함한다. 메모리(258)는, 랜덤 액세스 메모리, 판독 전용 메모리, 플래시 메모리, 하드 디스크, 또는 로컬(local) 또는 원격의, 임의의 다른 형태의 디지털 스토리지와 같은 임의의 적합한 메모리를 포함할 수 있다. 컴퓨팅 디바이스(254)는, 종래의 방식으로 컴퓨터 프로세서(256)를 지원하기 위해 컴퓨터 프로세서(256)에 커플링될 수 있는 다양한 지원 회로들(260)을 포함할 수 있다. 소프트웨어 루틴들은, 필요에 따라, 메모리(258)에 저장될 수 있거나, 또는 원격에 위치한 제 2 컴퓨팅 디바이스(미도시)에 의해 실행될 수 있다.
- [0040] [0049] 컴퓨팅 디바이스(254)는 하나 또는 그 초과 of 컴퓨터 판독가능 매체들(미도시)을 더 포함할 수 있다. 컴퓨터 판독가능 매체들은 일반적으로, 컴퓨팅 디바이스에 의해 검색가능한(retrievable) 정보를 저장할 수 있는, 근거리(locally) 또는 원격에 위치한 임의의 디바이스를 포함한다. 본 발명의 실시예들과 함께 사용가능한 컴퓨터 판독가능 매체들의 예들은, 고체 상태 메모리, 플로피 디스크들, 내부 또는 외부 하드 드라이브들, 및 광학 메모리(CD들, DVD들, BR-D, 등)를 포함한다. 일 실시예에서, 메모리(258)는 컴퓨터 판독가능 매체들일 수 있다. 소프트웨어 루틴들은, 컴퓨팅 디바이스에 의해 실행되도록 컴퓨터 판독가능 매체들 상에 저장될 수 있다.
- [0041] [0050] 소프트웨어 루틴들은, 실행될 때, 범용 컴퓨터를, 챔버 프로세스가 수행되도록 챔버 동작을 제어하는 특수한 프로세스 컴퓨터로 변환시킨다. 대안적으로, 소프트웨어 루틴들은, 주문형 반도체(application specific integrated circuit) 또는 다른 타입의 하드웨어 구현으로서 하드웨어로, 또는 소프트웨어와 하드웨어의 조합으로 수행될 수 있다.
- [0042] [0051] 예시적인 프로세스 챔버(100) 또는 예시적인 프로세스 챔버(200)는 클러스터 툴의 일부일 수 있다. 도 3은 기관 상에 나노결정질 다이아몬드 층을 생성하기에 적합한 예시적인 클러스터 툴(300)을 예시한다. 클러스터 툴(300)은 상기 설명된 바와 같은 적어도 하나의 프로세스 챔버(100)를 특징으로 한다. 클러스터 툴(300)의 예는, 캘리포니아 산타클라라의 Applied Materials, Inc.로부터 입수가 가능한 Endura<sup>®</sup> 시스템이다. 다른 제조사들에 의해 제조되는 클러스터 툴들이 또한 사용될 수 있다.
- [0043] [0052] 클러스터 툴(300)은, 클러스터 툴(300) 내외로 기관들을 이송하기 위한 하나 또는 그 초과 of 로드 록 챔



버들(306A, 306B)을 포함할 수 있다. 전형적으로, 클러스터 툴(300)은 진공 하에 있기 때문에, 로드 록 챔버들(306A, 306B)은 클러스터 툴(300) 내로 도입되는 기관들을 "펌핑다운(pump down)"시킬 수 있다. 제 1 로봇(310)이, 로드 록 챔버들(306A, 306B)과 하나 또는 그 초과와 기관 프로세스 챔버들(312, 314, 316, 318)(4개가 도시됨)의 제 1 세트 간에 기관들을 이송시킬 수 있다. 각각의 프로세스 챔버(312, 314, 316, 318)는, 순환 층 증착(CLD), 원자 층 증착(ALD), 화학 기상 증착(CVD), 물리 기상 증착(PVD), 사전 세정(pre-clean), 탈기(degas), 배향 및 다른 기관 프로세스들에 부가하여, 본원에서 설명되는 예칭 프로세스들을 포함하는 다수의 기관 프로세싱 동작들을 수행하도록 갖추질 수 있다.

[0044] [0053] 제 1 로봇(310)은 또한, 기관들을 하나 또는 그 초과와 중간 이송 챔버들(322, 324)로/로부터 이송할 수 있다. 중간 이송 챔버들(322, 324)은, 기관들이 클러스터 툴(300) 내에서 이송되도록 허용하면서 초고 진공 조건들을 유지하는 데에 사용될 수 있다. 제 2 로봇(330)이, 중간 이송 챔버들(322, 324)과 하나 또는 그 초과와 프로세스 챔버들(332, 334, 336, 338)의 제 2 세트 간에 기관들을 이송할 수 있다. 프로세스 챔버들(312, 314, 316, 318)과 유사하게, 프로세스 챔버들(332, 334, 336, 338)은, 예를 들어, 순환 층 증착(CLD), 원자 층 증착(ALD), 화학 기상 증착(CVD), 물리 기상 증착(PVD), 사전 세정, 열 프로세스/탈기, 및 배향에 부가하여, 본원에서 설명되는 예칭 프로세스들을 포함하는 다양한 기관 프로세싱 동작들을 수행하도록 갖추질 수 있다. 기관 프로세스 챔버들(312, 314, 316, 318, 332, 334, 336, 338) 중 임의의 기관 프로세스 챔버는, 클러스터 툴(300)에 의해 수행될 특정 프로세스에 대해 필요하지 않은 경우 클러스터 툴(300)로부터 제거될 수 있다.

[0045] [0054] 예시적인 멀티-프로세싱 클러스터 툴(300)은, 상기 설명된 프로세스 챔버(200)와 유사하게 구성된 4개까지의 프로세스 챔버들(332, 334, 336, 338)(334와 336 사이에 제 5 챔버에 대한 옵션을 가짐)을 포함할 수 있다. PVD 또는 ALD 챔버들(312 또는 314)은 얇은 ARC/애싱(ashing) 층(예를 들어, AlN 또는 SiN 또는 TiN)을 증착하도록 구성될 수 있다.

[0046] [0055] 클러스터 툴(300)은 하기에서 도 4 및 도 5에서 설명되는 방법들을 수행하기 위해 사용될 수 있다. 몇몇 프로세스 흐름들에서, 기관은 클러스터 툴(300)에서 추가적으로 프로세싱되거나, 보다 전형적으로는, 도 3에 도시된 클러스터 툴과 유사하게 구성된 별도의 클러스터 툴에서 프로세싱되는 것이 바람직할 수 있다.

[0047] [0056] 도 4a는 고 전력 임펄스 마그네트론 스퍼터링(HIPIMS) 프로세스의 적어도 일부를 완료하는 데에 사용되는 전력 전달 프로세싱 시퀀스의 그래프(450)를 도시한다. 그래프(450)는 하나의 타입의 HIPIMS 프로세스를 예시하는 바, 이는 예시적인 것이기 때문에, 일반적으로 실체대로 그려지지 않는다. 전술한 바와 같이, 전형적인 HIPIMS 전력 소스들은 HIPIMS 프로세스 동안 고 밀도 및 에너지 플라스마를 발생시키기 위해 짧은 지속기간들에 걸쳐서 고 전압들에서 전력 임펄스들을 전달할 수 있다. 고 전압들은, 이를테면 약 1,000,000 V 내지 약 8,000,000 V의 범위일 수 있다. 전력 임펄스(452)(또는 에너지 펄스)는, 시간 지속기간(454)(또는 펄스 폭) 및 펄스 사이클 시간(456)을 가지면서, 전력 소스(132)에 의해 발생할 수 있다. 일 예에서, 각각의 전력 임펄스(452)의 시간 지속기간(454)은 약 10  $\mu$ s 내지 약 40  $\mu$ s 이고, 펄스 사이클 시간(456)은 200  $\mu$ s 인데, 이는 5000 Hz의 펄스 반복 주파수, 즉 160-190  $\mu$ s의, 순차적인 펄스들 간의 간격에 해당한다. 펄스 사이클 시간(456)에 걸쳐서 전달되는 에너지 또는 전력은 시간 지속기간(454) 동안 비-구형파 형상(미도시)을 가질 수 있고, 그에 따라 시간 지속기간(454)에 걸친 평균 전력은 약 10 킬로-와트(kW) 내지 100 kW, 이를테면 10 kW 내지 40 kW의 값일 수 있다. 몇몇 실시예들에서, 타겟에 제공되는 각각의 전력 임펄스는 같은 양(amount)들의 전력 및/또는 같은 지속기간들을 가질 수 있다. 하지만, 본 개시내용의 실시예들은 그렇게 제한되지 않는다. 예를 들어, 타겟에 제공되는 각각의 펄스는 상이한 양의 전력 및/또는 상이한 지속기간을 가질 수 있다. 인용되는 값들은 오직 예로서 이해되어야 하며, 넓은 범위(limit)들 내에서 달라질 수 있다. 예를 들어, 10  $\mu$ s 내지 100  $\mu$ s 범위의 임펄스 지속기간 및 200  $\mu$ s 내지 1 밀리초(ms)의 펄스 반복 시간으로 간단하게(straightforwardly) 동작할 수 있다. 고 전력이 타겟(캐소드)에 인가되는 시간은 종종, 전력 공급부의 등급, 및 개입 기간(intervening period)(458) 동안 전력 공급부가 재충전하는 데에 걸리는 시간에 의해 제한된다. 캐소드 또는 캐소드들에 고 전력 임펄스들을 인가함으로써, 스퍼터링되는 재료는 많은(high) 양의 반응 에너지(즉, 화학 포텐셜(chemical potential)) 및 고도의 이온화를 갖게 될 것임을 발견하였다. 몇몇 예들에서, 캐소드 또는 캐소드들로부터 나오는 스퍼터링되는 재료의 이온화 정도는 40 % 내지 최대 100 % 까지의 범위일 수 있다. 몇몇 실시예들에서, 이러한 고도의 이온화를 사용하여, 더욱 많은 스퍼터링된 이온들이 플로팅 또는 바이어싱된 기관으로 끌어당겨지고, 더 높은 운동 에너지를 가지고 그러한 기관에 도달하게 하여, 보다 밀도가 높은 코팅들 및 보다 신속한 코팅 프로세스를 이끌도록 하는 것이 바람직하다.

[0048] [0057] HIPIMS 프로세스 동안 스퍼터링되는 재료의 많은 양의 반응 에너지 및 고도의 이온화를 달성하기 위해서는, 발생하는 스퍼터 재료가 이러한 바람직한 특성들을 갖도록 보장하기 위해 다양한 프로세싱 파라미터들이 제

어될 필요가 있다. 몇몇 실시예들에서, 프로세스 파라미터들은, 바람직한 에너지(예를 들어, 전자 온도( $T_e$ )) 및 플라스마 밀도( $N_e$ )를 갖는 플라스마를 발생시키기 위해 시간 지속기간(454)에 걸쳐서 전력 임펄스(452)로 전달되는 전력의 양, 및 타겟 면 근처에 포지셔닝된 마그네트론의 자기장 세기의 제어를 포함한다. 펄스 폭, 각 펄스에서 전달되는 에너지, 및 전달되는 펄스들의 듀티 사이클을 제어함으로써, Sp3 함유 스퍼터링된 탄소 재료가 기판의 표면 상에 층으로 형성될 수 있음을 발견하였다.

[0049] [0058] 도 7a 및 7b는 플라스마 에너지(예를 들어, 전자 온도( $T_e$ )) 및 플라스마 밀도에 대한 타겟 바이어스(펄스 전압)의 영향의 예들을 도시하는 그래프들이다. 도 7a는 플라스마 에너지(예를 들어, 전자 온도( $T_e$ ))에 대한 펄스 폭의 함수로서 타겟 바이어스 전압(예를 들어, 전력 임펄스(452))의 영향을 예시한다. 도 7a에 예시된 바와 같이, 전력 공급부의 고정된 전력 세트 포인트에서, 펄스 폭이 증가함에 따라, 플라스마 에너지는 최초 피크 값으로부터 더 작은 값으로 감소될 것이다. 피크 플라스마 에너지는, 프로세싱 챔버의 프로세싱 용적에서 플라스마를 발생시키고 유지할 수 있는 최소 펄스 폭과 일치하는데, 본 예에서, 이는 약 6.5 내지 7 eV(electron volts)이다. 고정된 전력 전달 세트 포인트(예를 들어, 20 kW)를 유지하면서, 펄스 폭이 증가함에 따라, 전자 온도 또는 플라스마 에너지는 피크 값으로부터 어떠한 더 낮은 값으로 떨어진다. 타겟 바이어스가 증가함에 따라 생성되는 플라스마 밀도의 증가로 인해, 더 큰 타겟 바이어스 전압들에 대해 플라스마 에너지가 보다 신속하게 떨어진다는 것을 주목할 것이다. 상이한 타겟 바이어스 전압들에서의 플라스마 에너지의 강하는, 플라스마 내의 전자들과 이온들 간의 충돌들의 수가 증가하고, 그에 따라 평균 플라스마 에너지(예를 들어, 전자 온도( $T_e$ ))를 감소시키는 것과 관련된 것으로 여겨진다. 추가로, 플라스마 에너지는 또한, 스퍼터링된 원자들이 기판의 표면 상에 랜딩(land)할 때 그러한 원자들이 포함하게 될 에너지와 관련되며, 그에 따라, 타겟 바이어스를 증가시키는 것은 또한, 기판의 표면 상에 랜딩하는, 플라스마 내의 스퍼터링된 원자들의 에너지를 낮추는 경향이 있을 것임을 주목할 것이다.

[0050] [0059] 도 7b에서, 플라스마 밀도가 펄스 폭 및 타겟 바이어스 전압의 함수로서 도시되어 있다. 일반적으로, 각각의 타겟 바이어스 전압에서 특정의 하한(lower limit) 값보다 작은 펄스 폭들은 고밀도 플라스마를 형성하는 데에 효과적이지 않고, 상한(upper limit) 값보다 더 큰 펄스 폭들도 유사하게, 동일한 타겟 바이어스 전압에서 고밀도 플라스마를 형성하는 데에 효과적이지 않음을 도 7b에서 알 수 있다. 따라서, 도 7b에 도시된 바와 같이, 고정된 타겟 바이어스에서 하한 값보다 더 크며 그리고 상한 값보다 더 작은 펄스 폭을 갖는 전력 임펄스(452)를 공급함으로써, 플라스마 밀도( $N_e$ )가 피크 값으로 또는 거의 피크 값으로 유지될 수 있다. 더 높은 플라스마 밀도들은, 플라스마를 통과하는 스퍼터링된 원자들의 HIPIMS 증착 레이트 및 이온화 레이트를 증가시킬 것임을 주목할 것이다. 또한, 플라스마 밀도의 피크는 바이어스 전압이 증가함에 따라 더 짧은 펄스 폭들 쪽으로 시프트되며, 그에 따라, 피크 플라스마 밀도는 타겟 바이어스 전압 및 펄스 폭의 함수임을 주목할 것이다. 일 예에서, 전력 임펄스(452) 동안 인가되는 1000 V 타겟 바이어스는 125  $\mu$ s 내지 약 225  $\mu$ s의 펄스 폭들에서 피크 플라스마 밀도( $N_e$ )를 가지며, 이는 약 175  $\mu$ s 내지 약 350  $\mu$ s의 펄스 폭들 및 600 V의 타겟 바이어스에서의 피크 플라스마 밀도( $N_e$ )와 상이하다.

[0051] [0060] 따라서, 성장하는 스퍼터 증착되는 막이 바람직한 물리적, 화학적 및 구조적 특성들, 이를테면 Sp3 다이아몬드 구조를 갖도록 보장하기 위해서는, 경쟁 프로세싱 레짐(competing processing regime)들, 이를테면 플라스마 에너지(도 7a) 및 플라스마 밀도(도 7b)를 밸런싱하고 조정할 필요가 있다. 따라서, 바람직한 HIPIMS 스퍼터 증착 레이트, 막 결정 구조 및 막 응력을 달성하기 위해, 스퍼터링되는 원자들에 바람직한 양의 에너지, 높은 이온화 레이트 및 이온화 정도를 부여(impart)할 플라스마를 형성하는 펄스 폭 및 타겟 바이어스 전압의 선택을 포함하는 HIPIMS 프로세스가 필요하다.

[0052] [0061] 추가로, HIPIMS 프로세스에서 사용되는, 짧은 펄스 폭 또는 시간 지속기간(454)으로 인해, 스퍼터링 플라스마의 형성의 초기 스테이지들 동안 "프리-시스(pre-sheath)"의 발생이, 고 에너지 및 고도로 이온화된 스퍼터링 재료를 형성하는 프로세스에 상당한 영향을 미치는 것으로 발견되었다. 일반적으로, "프리-시스"는, 평형 플라스마 시스 영역이 형성되고 있을 때, 타겟과 기판 간의 프로세싱 영역(예를 들어, 도 1의 프로세싱 용적(118)) 내의, 시간에 따라 달라지는 가변 크기를 갖는 플라스마의 비-평형 영역이다. 따라서, 플라스마를 형성하는 프로세스의 초기 스테이지들 동안, 프로세싱 챔버의 프로세싱 영역에 배치되는 스퍼터링 가스들(예를 들어, 아르곤(Ar))에 결합되도록 타겟에 전달되는 전력의 능력이, 타겟의 표면으로부터 재료를 스퍼터링하는 데에 사용되는 이온 에너지에 큰 영향을 미친다. 프리-시스 형성 프로세스는, 전력 임펄스(452)가 타겟에 인가될 때 대략 처음 10 내지 40  $\mu$ s 동안 지속되는 것으로 여겨진다.

- [0053] [0062] 도 6은, 상이한 자기장 세기를 각각 갖는 상이한 마그네트론들에 대한 타겟으로부터의 거리의 함수로서, 플라스마 내에 형성되는 플로팅 전위의 플롯을 예시한다. 도 6에 도시된 바와 같이, 200 가우스 마그네트론은 제 1 해당 곡선을 갖는 다이아몬드들에 의해 표현되고; 500 가우스 마그네트론은 제 2 해당 곡선을 갖는 정사각형들에 의해 표현되며; 그리고 800 가우스 마그네트론은 제 3 해당 곡선을 갖는 삼각형들에 의해 표현된다. 이러한 예들은, 마그네트론 구성들 각각에 대해 동일한 타겟 바이어스 전압 및 전력을 활용하는 50  $\mu$ s 펄스 폭 HIPIMS 프로세스의 사용을 포함한다. 주목할 것은, 200 가우스 마그네트론 어셈블리에 대해, 플로팅 전위는 타겟과 기판 사이에서 크게 달라지지 않는다는 것이다. 500 가우스 예의 경우, 타겟과 기판 간의 플로팅 전위는 또한, 챔버의 기판 단부(substrate end) 근방에서는 실질적으로 일정하지만, 타겟의 표면에 더 가깝게 이동함에 따라, 떨어지는(예를 들어, 플라스마가 점점 더 음의 플로팅 전위를 가짐) 경향이 있다. 800 가우스 예의 경우, 타겟과 기판 사이의 전기 전위는 상당히 상이한데, 이는 기판의 표면으로부터 타겟의 표면 쪽으로 이동함에 따라 플로팅 전위가 급격하게 떨어지기 때문이다. 당업자라면, 더 높은 마그네트론 자기장 세기는, 증가된 자기장 세기(예를 들어, 타겟의 표면을 통과하는 자기장 라인들의 수)로 인해, 바이어싱된 타겟의 표면으로부터 방출되는 전자들을 포획하는 마그네트론의 능력을 증가시킬 것임을 인식할 것이다. 당업자라면 또한, 낮은 자기장 세기(예를 들어, <<200 가우스) 마그네트론은 또한 바람직하지 않다는 것을 인식할 것인데, 왜냐하면 이러한 낮은 자기장들은 전형적으로, 스퍼터링 프로세스 동안 타겟으로부터 방출되는 전자들을 효과적으로 포획하지 않을 것이기 때문이다. 자기장에 의해 포획되는 전자들은 일반적으로, 스퍼터링되는 재료 및 스퍼터링 가스들의 이온화를 개선시키는 데에 사용되며, 그에 따라, 낮은 자기장 세기 마그네트론들의 사용은, 균일하고 신뢰성 있는 플라스마가 형성되는 것을 막는다.
- [0054] [0063] 200 가우스 마그네트론에 의해 발생하는 프로파일(도 6에 도시된 제 1 해당 곡선)과 같은 실질적으로 편평한(flat) 플로팅 전위( $V_f$ ) 프로파일을 제공하지 않는 마그네트론 어셈블리를 사용하게 되면, 플라스마로부터 이온들을 추출하는 감소된 능력을 갖게 될 것으로 여겨진다. 다시 말해, 마그네트론에 의해 발생하는 자기장이 증가함에 따라, 타겟 먼 근방의 플라스마에서 이온들을 트랩하는 마그네트론의 능력이 증가하고, 그에 따라, 이는 가스 이온들 및 이온화된 스퍼터링된 재료가 프로세싱 동안 플로팅, 접지된 또는 바이어싱된 기판으로 끌어들여지는 것을 막는다. 플라스마로부터 이온들을 추출할 수 없다는 것은, 기판 표면 상에 증착되는 층을 형성하는 데에 사용되는 스퍼터링된 재료의 증착 레이트 및 에너지에 영향을 미칠 것이다. 따라서, 몇몇 실시예들에서, 실질적으로 편평한 플로팅 전위 프로파일을 갖는 마그네트론을 선택하는 것이 바람직하다.
- [0055] [0064] 몇몇 실시예들에서, 성장하는 스퍼터 증착되는 막이 바람직한 물리적, 화학적 및 구조적 특성들, 이를테면  $Sp^3$  다이아몬드 구조를 갖도록 보장하기 위해서는, 플라스마 에너지, 플라스마 밀도를 밸런싱하고, 조정하고 그리고/또는 제어하며, 또한, 마그네트론 어셈블리에 의해 공급되는 바람직한 자기장 세기를 선택할 필요가 있다. 따라서, 바람직한 HIPIMS 스퍼터 증착 레이트, 막 결정 구조 및 막 응력을 달성하기 위해, 스퍼터링되는 원자들에 바람직한 양의 에너지, 높은 이온화 레이트 및 이온화 정도를 부여할 플라스마를 형성하는 펄스 폭 및 타겟 바이어스 전압, 및 바람직한 플로팅 전위 프로파일(예를 들어, 실질적으로 편평한 프로파일)을 제공하기 위한 바람직한 자기장 세기를 갖는 마그네트론 어셈블리의 선택을 포함하는 HIPIMS 프로세스가 필요하다.
- [0056] [0065] 도 4b는 프로세스 챔버(200)와 같은 PVD 프로세스 챔버에서 나노결정질 다이아몬드 층을 증착하기 위한 방법의 흐름도이다. 상기 주목한 바와 같이, 자기장 세기가 증가함에 따라, 플라스마 형성 프로세스의 프리-시스 발생 페이즈 동안 플라스마로부터 이온들을 추출하는 능력은 더욱 어려워지게 된다. 더 낮은 가우스 레벨은 플라스마가 타겟에 더 가깝게 형성될 수 있게 하며, 그에 따라, 프리-시스 형성에 영향을 미치지 않는다. 따라서, 자기장 세기를 300 가우스 미만, 이를테면 약 200 가우스로 감소시킴으로써, 바람직한 프리-시스를 생성하는 데에 더 짧은 펄스 시간이 사용될 수 있다. 따라서, 자기장과 펄스 시간 간의 상호 작용은, 증착 품질을 유지하면서 그리고 실온과 같은 저온에서, 나노결정질 다이아몬드 증착을 위한 높은 증착 레이트를 허용한다.
- [0057] [0066] 방법(400)은 일반적으로, 실질적으로 탄소-함유 스퍼터 타겟을 갖는 프로세스 챔버의 프로세싱 영역에 스퍼터 가스를 전달하는 단계를 포함한다. 이후, 스퍼터링 플라스마를 생성하기 위해, 스퍼터 가스에 에너지 펄스를 전달한다. 일 예에서, 스퍼터링 플라스마는 스퍼터링 지속시간을 갖고, 에너지 펄스는,  $1 \text{ W/cm}^2$  내지  $10 \text{ W/cm}^2$ 의 평균 전력, 및 100  $\mu$ s 미만 및 30  $\mu$ s 초과의 펄스 폭을 갖고, 스퍼터링 플라스마는 자기장에 의해 제어되며, 자기장은 300 가우스 미만이다. 이에 의해, 스퍼터링되고 이온화된 탄소 함유 층을 형성하기 위해, 실질적으로 탄소-함유 스퍼터 타겟에 인접하는 프로세싱 용적에서 스퍼터링 플라스마를 형성하는 바, 스퍼터링되고 이온화된 탄소 함유 층은 기판 상에 결정질 탄소-함유 층을 형성한다.
- [0058] [0067] 방법(400)은, 402에서, 탄소-함유 스퍼터 타겟을 갖는 프로세스 챔버의 프로세싱 용적에 스퍼터 가스를



전달함으로써 시작한다. 일 예에서, 프로세스 챔버는 도 2와 관련하여 상기 설명된 프로세스 챔버(200)이다. 다른 예에서, 프로세스 챔버는, 본원에서 설명되는 동작들을 수행하도록 변경되는 프로세스 챔버이다. 프로세스 챔버는, 흑연질 타겟과 같은 탄소-함유 타겟을 갖는다. 스퍼터 가스는 일반적으로, 기관 또는 스퍼터 타겟에 대해 비활성인 가스이다. 일 예에서, 스퍼터링 가스는 아르곤이다.

[0059] [0068] 기관이 프로세싱 용적 내에 포지셔닝되면, 404에서, 일련의 에너지 펄스들이 스퍼터 가스에 전달되어, 스퍼터링 플라즈마를 생성한다. 스퍼터링 플라즈마는, 도 4a와 관련하여 설명된 에너지 전달 프로세스를 사용하여 형성될 수 있다. 일반적으로, 에너지 펄스들은, 바람직한 HIPIMS 스퍼터 증착 레이트, 막 결정 구조 및 막 응력을 달성하기 위해, 스퍼터링되는 원자들에 대해 높은 이온화 레이트 및 이온화 정도를 달성하도록, 바람직한 플라즈마 에너지(예를 들어, 전자 온도( $T_e$ )) 및 플라즈마 밀도( $N_e$ )를 얻기 위한 바람직한 양(amount)의 에너지를 부여할 플라즈마를 형성하는 펄스 폭 및 타겟 바이어스 전압의 선택을 포함하는 프로세스의 이러한 페이즈 동안 제공된다. 일 예에서, 스퍼터링 플라즈마를 형성하기 위해 사용되는 에너지 펄스들은 각각,  $1 \text{ W/cm}^2$  내지  $10 \text{ W/cm}^2$ 의 평균 전력을 가질 수 있다. 이러한 프로세스 단계 동안 마그네트론의 자기장 세기가 또한, 이러한 HIPIMS PVD 프로세스에서 활용되는 짧은 펄스 폭으로 인해, 바람직한 프리-시스가 형성되고, 그리고 플라즈마로부터의 바람직한 양의 이온 추출이 기관 표면에서 생성되는 것을 보장하도록 선택되었음을 주목해야 한다. 마그네트론의 자기장은 300 가우스 미만, 이를테면 약 200 가우스일 수 있다.

[0060] [0069] 이론에 의해 구속되는 것으로 의도하지 않으면서, 안정적인 프리-시스의 생성이 나노결정질 다이아몬드의 저온 증착에 유익한 것으로 여겨진다. 플라즈마 형성 프로세스 동안, 초기에, 전기장은 상당히 높다. 플라즈마 형성의 시작시, 플라즈마 자체가 비교적 큰 용적을 차지하게 된다. 그런 다음, 시스는, 프로세스 챔버의 프로세싱 용적 내로 유동하는 모든 전류를 수용하는 포인트(point)로 수축되고 치밀화(densify)된다. 프리-시스는, 타겟 주위의 양으로 대전된 입자들을 수축 및 치밀화하기 직전에 형성된다. 프리시스(presheath)는 스퍼터링되는 타겟의 스퍼터 분율(fraction), 이온화 분율 및 에너지의 역학에 영향을 미친다. 이전의 HIPIMS 기법들은 표준 PVD 증착보다 현저하게(measurably) 적은 증착 레이트를 제공한다. 프로세싱 용적에 대한 에너지 전달 프로세스(도 4a)를 제어함으로써, 바람직한 플라즈마 에너지( $T_e$ ) 및 플라즈마 밀도( $N_e$ )가 플라즈마에 부여되고, 그에 따라, 초기 페이즈들에서 형성되어, 본원에서 설명되는 HIPIMS PVD 프로세스의 전력 전달 부분의 큰 부분 동안 유지되는, 형성된 프리-시스가 바람직한 특성들을 포함할 것이며, 이러한 특성들은 HIPIMS PVD 프로세스가, 기관 상에 Sp3 탄소 층의 형성을 허용하기 위해, 스퍼터링되는 원자들에 충분한 에너지를 제공하고 그리고 높은 증착 레이트를 갖는 것을 가능하게 한다는 것을 발견하였다.

[0061] [0070] 일단 플라즈마가 형성되면, 406에서, 스퍼터링 플라즈마가 스퍼터 타겟에 전달되어, 이온화된 종을 형성하며, 이온화된 종은 기관 상에 결정질 탄소-함유 층을 형성한다. 스퍼터링 전력, 듀티 사이클 및 자기장은, 상기 설명된 바와 같이, 기관 상의 Sp2 증착에 대한 Sp3의 증가된 분율을 허용한다.

[0062] [0071] 도 5는 본원에서 설명되는 실시예들에 따른, 중간 탄화물 층을 형성하기 위한 방법의 흐름도이다. 탄화물 층은, 다이아몬드형 탄소 층과 구별되는 바와 같은, 나노결정질 다이아몬드 층의 성장에 유익한 것으로 여겨진다. 다른 실시예에서, 상기 설명된 HIPIMS PVD 방법은 하나 또는 그 초과 of 중간 층들을 형성하는 데에 사용될 수 있다. 중간 층들이 형성되면, CVD 방법과 같은 2차 성장 방법을 사용하여 나노결정질 다이아몬드 층이 성장될 수 있다. 방법(500)은, 502에서, 제 1 HIPIMS PVD 프로세스 챔버(예를 들어, 프로세스 챔버(100))에 기관을 포지셔닝하는 것 - 제 1 프로세스 챔버는 탄소-함유 스퍼터 타겟 및 스퍼터 가스를 가짐 - ; 및 (예를 들어, 도 4a에 예시된) 에너지 전달 프로세스를 사용하여 제 1 플라즈마를 형성하기 위해, 스퍼터 가스에 일련의 에너지 펄스들을 전달하는 것을 포함한다. 504에서, 제 1 플라즈마는 자기장에 의해 제어된다. 이에 의해, 이온화된 종을 형성하기 위해 제 1 플라즈마를 스퍼터 타겟에 전달하며, 그에 따라, 506에서, 이온화된 종은 기관 상에 중간 탄화물 층을 형성한다. 이후, 508에서, 기관을 제 2 프로세스 챔버로 이송한다. 제 2 프로세싱 챔버에 있는 동안, 활성화된 핵형성(nucleation) 가스를 형성하기 위해, 핵형성 가스의 존재하에서 플라즈마를 형성하며, 핵형성 가스는 탄소-함유 소스를 포함한다. 이후, 510에서, 기관 상에 핵형성 층을 형성하기 위해, 핵형성 가스를 활성화시킨다. 이후, 510에서, 활성화된 증착 가스를 형성하기 위해, 증착 가스를 활성화시킨다. 이후, 512에서, 활성화된 증착 가스를 기관에 전달하며, 활성화된 증착 가스는 기관 상에 나노결정질 다이아몬드 층을 형성한다.

[0063] [0072] 방법(500)은, 502에서, 제 1 프로세스 챔버에 기관을 포지셔닝함으로써 시작되고, 제 1 프로세스 챔버는 탄소-함유 스퍼터 타겟 및 스퍼터 가스를 갖는다. 기관은 결정질 실리콘 기관과 같은 임의의 조성으로 이루어



질 수 있다. 기판은 또한, 기판의 표면에 형성되는 비아 또는 인터커넥트와 같은 하나 또는 그 초과 피쳐(feature)들을 포함할 수 있다. 기판은 기판 지지부 상에 지지될 수 있다. 일 실시예에서, 이러한 실시예에서 사용되는 스퍼터 가스 및 스퍼터 타겟은, 도 4a-4b와 관련하여 상기 설명된 것과 동일하다.

[0064] [0073] 본원에서 사용되는 바와 같이, "기판 표면"은, 상부에서 막 프로세싱이 수행되는, 임의의 기판 또는 기판 상에 형성된 재료 표면을 지칭한다. 예를 들어, 상부에서 프로세싱이 수행될 수 있는 기판 표면은, 애플리케이션에 따라, 재료들, 이를테면 실리콘, 실리콘 산화물, 실리콘 질화물, 도핑된 실리콘, 게르마늄, 갈륨비소, 유리, 사파이어, 및 임의의 다른 재료들, 이를테면 금속들, 금속 질화물들, 금속 합금들, 및 다른 전도성 재료들을 포함한다. 기판 표면은 또한 유전체 재료들, 이를테면 실리콘 이산화물 및 탄소 도핑된 실리콘 산화물들을 포함할 수 있다. 기판들은 다양한 치수들, 이를테면 200 mm, 300 mm, 450 mm 또는 다른 직경의 웨이퍼들뿐만 아니라, 직사각형 또는 정사각형 패인(pane)들을 가질 수 있다.

[0065] [0074] 이후, 엘리먼트(504)에서, 제 1 플라즈마를 형성하기 위해, 스퍼터 가스에 에너지 펄스가 전달될 수 있다. 일 실시예에서, 에너지 펄스는, 상기 논의된 바와 같이, 고 전력 임펄스 마그네트론 스퍼터링(HIPIMS) 임펄스이다. HIPIMS 프로세스의 펄스 전력, 펄스 시간, 평균 전력, 자기장 세기 및 다른 파라미터들은 도 4a-4b와 관련하여 설명된 것과 동일할 수 있다.

[0066] [0075] 상기 주목한 바와 같이, HIPIMS PVD 프로세스는 < 10 %의 낮은 듀티 사이클(온/오프 시간 비율)에서 수십 마이크로초의 짧은 펄스들(임펄스들)로 대략  $\text{kW} \cdot \text{cm}^{-2}$ 의 높은 전력 밀도들을 활용한다. HIPIMS의 구별되는 특징들은 스퍼터링되는 재료의 고도의 이온화 및 분자 가스 해리의 높은 레이트이며, 이는 증착되는 막들의 높은 밀도를 초래한다. 이온화 및 해리의 정도는 피크 캐소드 전력에 따라 증가한다. 자기장 세기는, 타겟과 기판 사이의 낮은 전기 전위차를 유지하면서 짧은 펄스가 사용될 수 있도록 선택되는 바, 이를테면 300 가우스 미만(예를 들어, 약 200 가우스)이 선택된다.

[0067] [0076] 하나 또는 그 초과 실시예들에서, 타겟에 제공되는 각각의 펄스는 적어도 1 킬로와트의 평균 전력을 가질 수 있다. 몇몇 실시예들에서, 타겟에 제공되는 각각의 펄스는 적어도 1 메가와트의 전력을 가질 수 있다. 예를 들어, 각각의 펄스는 대략 1 - 3 메가와트의 전력을 가질 수 있다. 부가적으로, 하나 또는 그 초과 실시예들에서, 타겟에 제공되는 각각의 펄스는 대략 1 마이크로초 내지 300 마이크로초, 이를테면 10 내지 100 마이크로초의 지속기간을 가질 수 있다. 몇몇 실시예들에서, 타겟에 제공되는 각각의 펄스는 대략 1 마이크로초 내지 200 마이크로초의 지속기간 또는 대략 100 마이크로초 내지 200 마이크로초의 지속기간을 가질 수 있다. 예를 들어, 각각의 펄스는 대략 50 마이크로초의 지속기간을 가질 수 있다. 추가로, 하나 또는 그 초과 실시예들에서, 타겟에 제공되는 각각의 펄스는 대략 100 밀리초의 지속기간 만큼 분리될 수 있다. 즉, 타겟에 제공되는 각각의 펄스 사이에 100 밀리초가 존재할 수 있다. 하지만, 본 개시내용의 실시예들은 특정 지속기간으로 제한되지 않는다.

[0068] [0077] 이후, 엘리먼트(506)에서, 이온화된 종을 형성하기 위해, 스퍼터 플라즈마가 스퍼터 타겟에 전달될 수 있으며, 이온화된 종은 기판 상에 중간 탄화물 층을 형성한다. 스퍼터 타겟은 탄소 함유 타겟, 이를테면 흑연 질 타겟일 수 있다. 타겟 증기(vapor)의 이온화 정도는, 방전의 피크 전류 밀도뿐만 아니라 펄스 폭 및 자기장 세기의 함수이다. 일 실시예에서, 에너지 펄스는  $1 \text{ W/cm}^2$  내지  $10 \text{ W/cm}^2$ 의 전력, 10 % 미만의 듀티 사이클, 및 약 10 마이크로초 내지 100 마이크로초의 펄스 길이를 가질 수 있다.

[0069] [0078] 이온화된 종은 기판에 도달하여, 기판 상에 중간 탄화물 층을 형성한다. 중간 탄화물 층은 추가의 증착을 위한 시드(seed) 층의 역할을 한다.

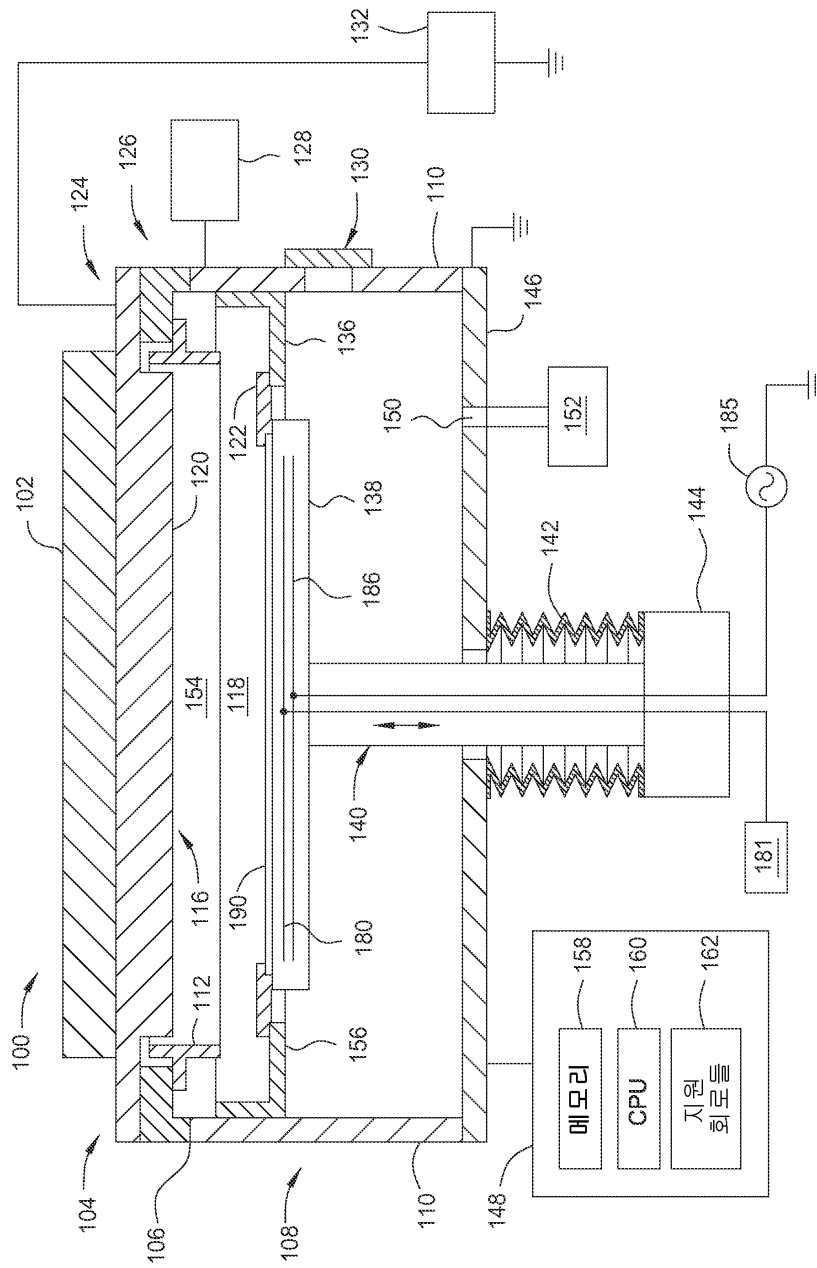
[0070] [0079] 508에서, 기판은 제 2 프로세스 챔버로 이송될 수 있다. 하나 또는 그 초과 실시예들과 함께 사용되는 프로세스 챔버는, 원격 플라즈마 소스를 갖는 임의의 CVD 프로세스 챔버, 이를테면, 상기 설명된 프로세스 챔버(100) 또는 다른 제조사들로부터의 챔버들일 수 있다. 하기 설명되는 유량들 및 다른 프로세싱 파라미터들은 300 mm 기판에 대한 것이다. 이러한 파라미터들은, 본원에 개시되는 발명으로부터 벗어나지 않으면서, 프로세싱되는 기판의 크기 및 사용되는 챔버의 타입에 기초하여 조정될 수 있음을 이해해야 한다.

[0071] [0080] 선택적으로, 기판은 이후 바이어싱될 수 있다. 바이어스는 바이어스-강화(bias-enhanced) 핵생성 프로세스의 일부일 수 있다. 바이어스-강화 핵형성의 경우, 기판은 음의 바이어스일 수 있다. 일 예에서, 기판은 바이어스 전처리(bias pretreatment)에 의해 바이어싱된다. 바이어스는 약 100 밀리암페어 내지 약 200 밀리암페어의 전류를 가질 수 있다. 바이어스는 약 150 볼트 내지 약 250 볼트의 전압을 가질 수 있다.

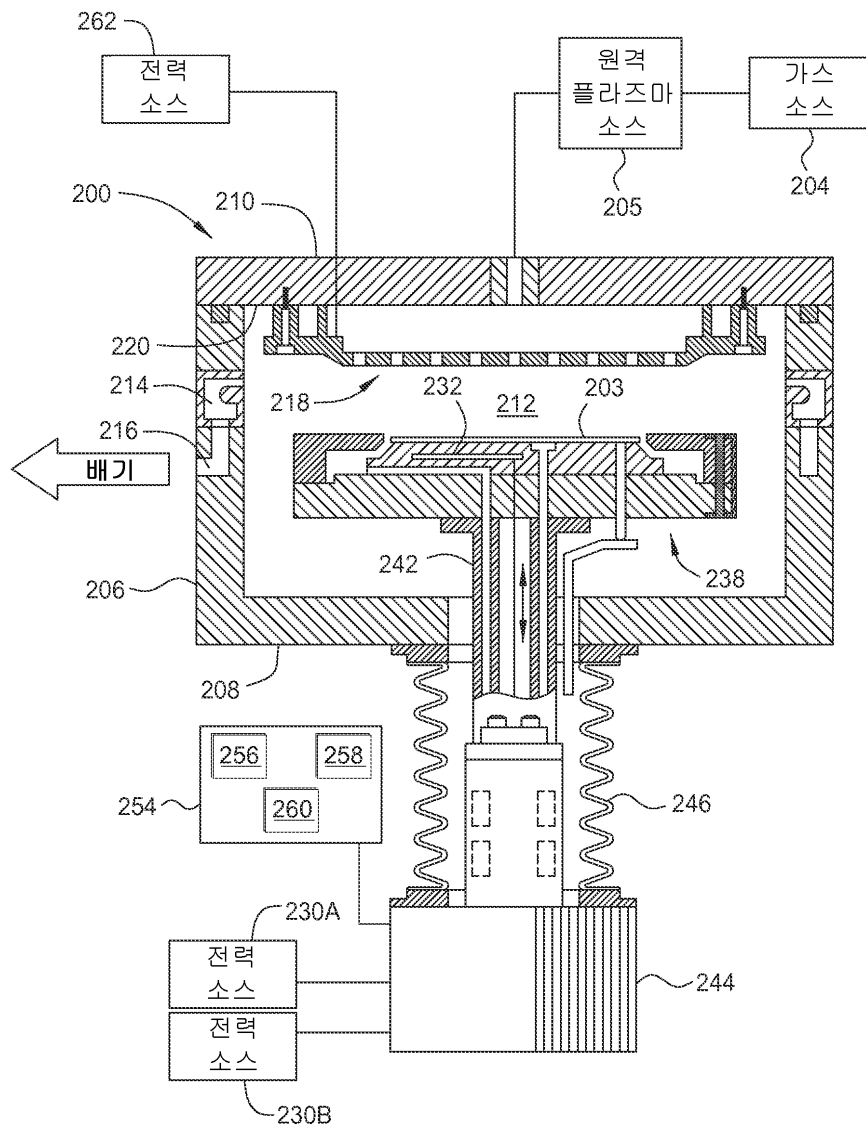
- [0072] [0081] 이후, 엘리먼트(510)에서, 활성화된 증착 가스를 형성하기 위해, 증착 가스의 존재하에서 플라즈마가 형성될 수 있다. 플라즈마는 증착 가스 또는 2차 가스(secondary gas), 이를테면 비활성 가스로부터 형성될 수 있다. 플라즈마는 국부적으로 또는 원격으로 형성될 수 있다. 증착 가스는, 전력 소스를 사용하여 플라즈마를 형성함으로써 활성화될 수 있다. 가스들을 반응성 증으로 활성화시키고 반응성 증의 플라즈마를 유지할 수 있는 임의의 전력 소스가 사용될 수 있다. 예를 들어, 무선 주파수(RF), 직류(DC), 또는 마이크로파(MW) 기반의 전력 방전 기법들이 사용될 수 있다. 증착 가스는 탄소-함유 소스, 수소-함유 소스, 비활성 가스 또는 이들의 조합들을 포함할 수 있다.
- [0073] [0082] 탄소-함유 전구체는 알칸, 알켄 또는 알킨 전구체일 수 있다. 알칸 전구체는, 이를테면 메탄, 에탄, 프로판 및 이들의 조합들과 같은 포화된 비분기(unbranched) 탄화수소일 수 있다. 다른 알칸 전구체들은 n-부탄, n-펜탄, n-헥산, n-헵탄, n-옥탄 및 이들의 조합들을 포함한다. 수소 함유 가스는  $H_2$ ,  $H_2O$ ,  $NH_3$  또는 다른 수소 함유 분자들을 포함할 수 있다. 증착 가스는 비활성 가스를 더 포함할 수 있다. 비활성 가스는 아르곤과 같은 노블 가스(noble gas)일 수 있다.
- [0074] [0083] 이후, 엘리먼트(512)에서, 활성화된 증착 가스가 기판에 전달될 수 있고, 이러한 활성화된 증착 가스는 핵형성 층 상에 나노결정질 다이아몬드 층을 성장시킨다. 이전에 형성된 활성화된 증착 가스로부터의 라디칼들이 기판 표면에 충돌하여, 나노결정질 다이아몬드 층을 형성한다. 본원에서 사용되는 바와 같이, 기판 표면은 기판 표면 상에 형성되는 임의의 층들, 이를테면 중간 탄화물 층을 포함할 수 있다.
- [0075] [0084] 상기 설명된 방법은, 나노결정질 다이아몬드 층의 성장을 위한 적어도 중간 탄화물 층의 형성을 교시한다. 균일한 중간 탄화물 층을 증착함으로써, 나노결정질 다이아몬드가 등각적으로 그리고 감소된 거칠기를 가지면서 증착될 수 있다.
- [0076] [0085] 전술한 내용이 본 발명의 실시예들에 관한 것이지만, 본 발명의 다른 그리고 추가적인 실시예들이 본 발명의 기본적인 범위로부터 벗어나지 않으면서 안출될 수 있으며, 본 발명의 범위는 하기의 청구항들에 의해 결정된다.

도면

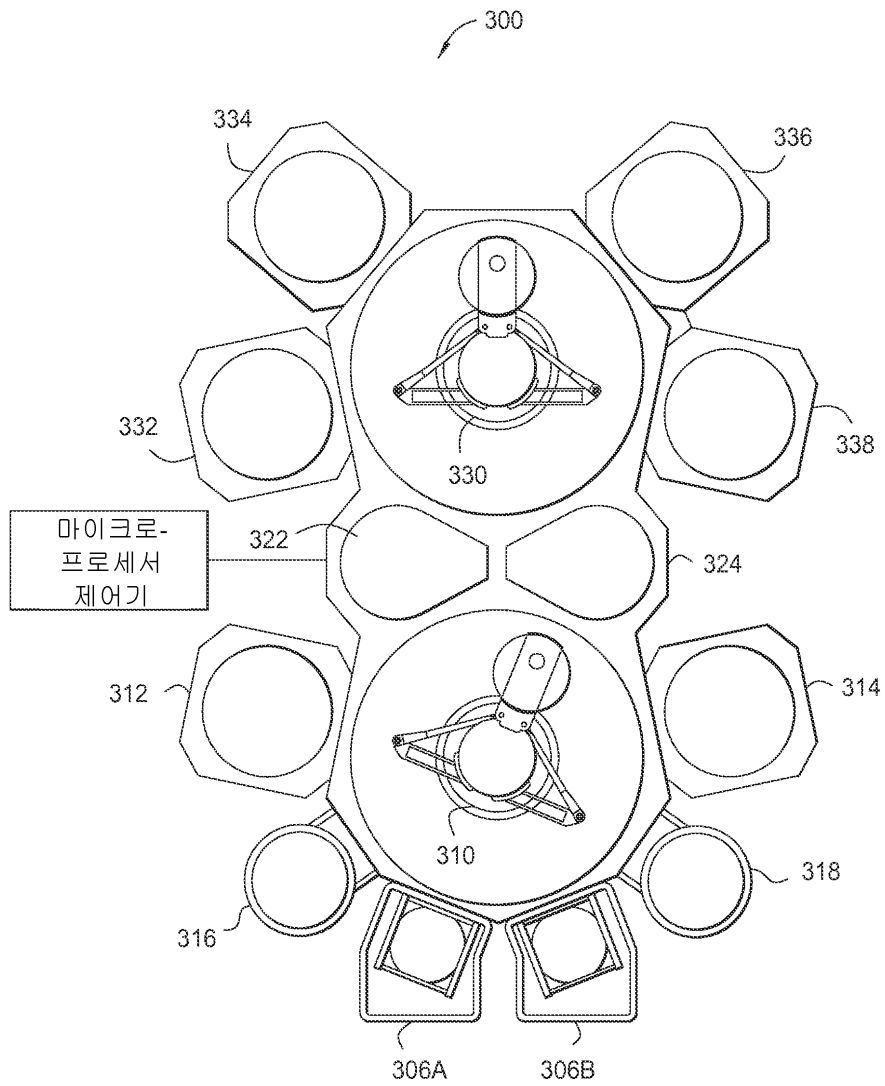
도면1



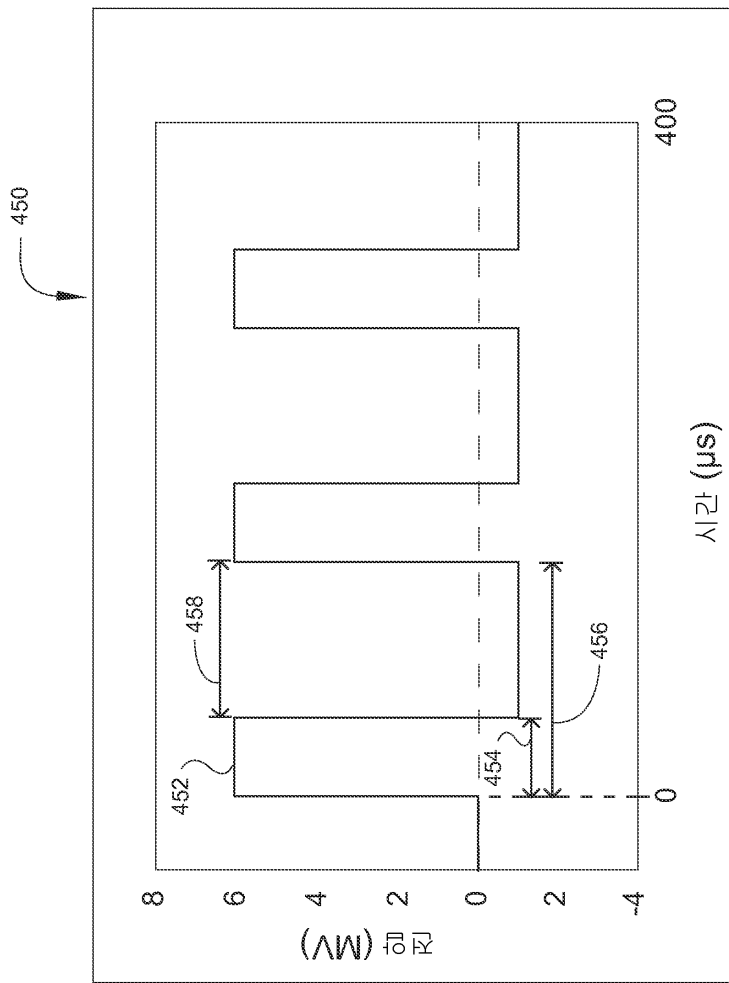
도면2



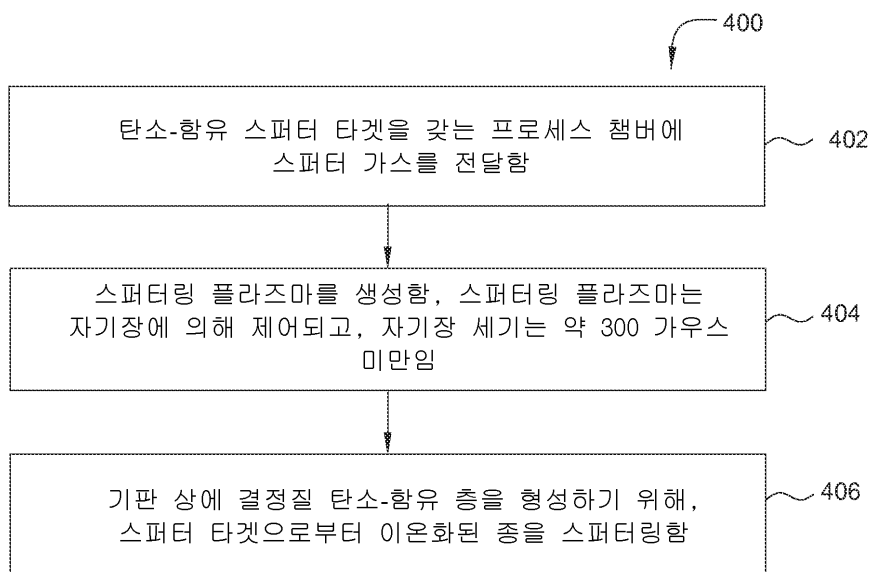
도면3



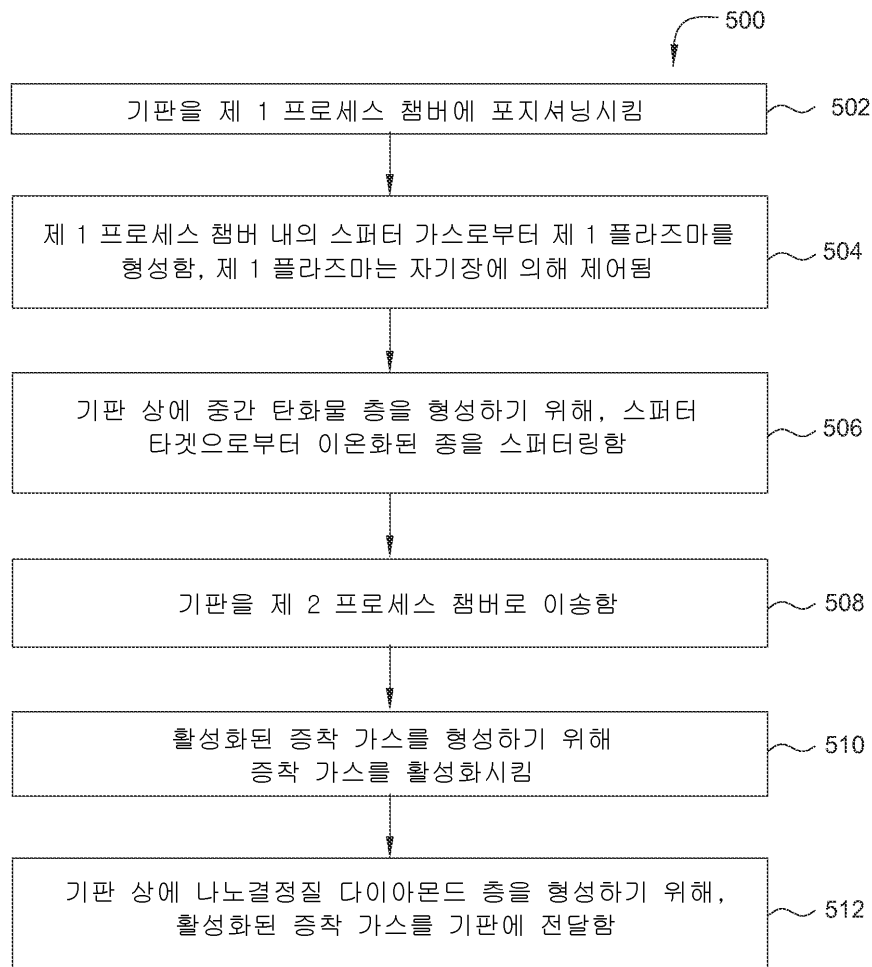
도면4a



도면4b

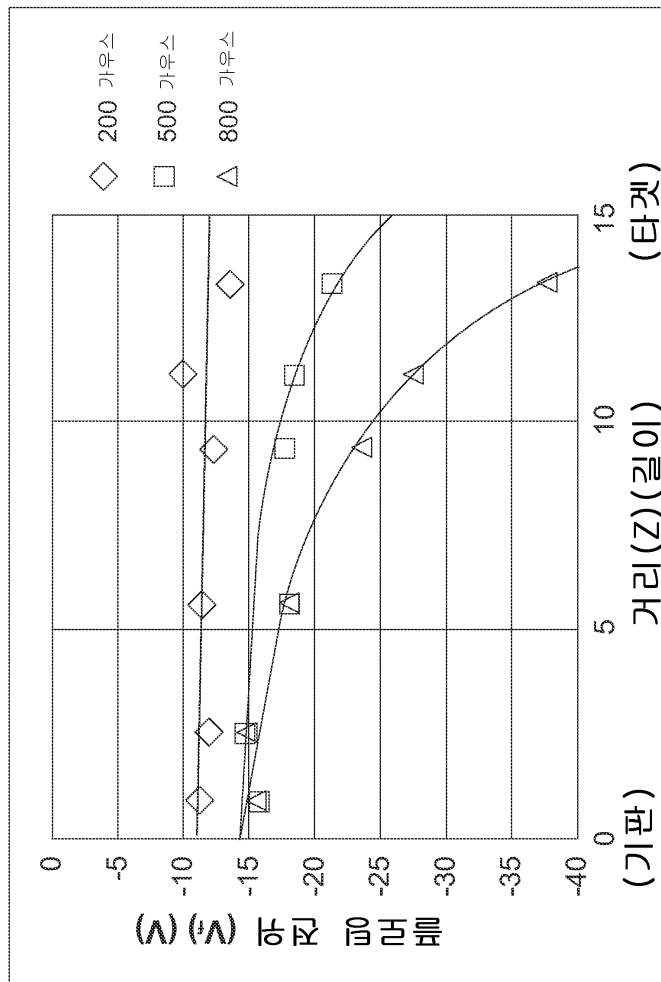


도면5

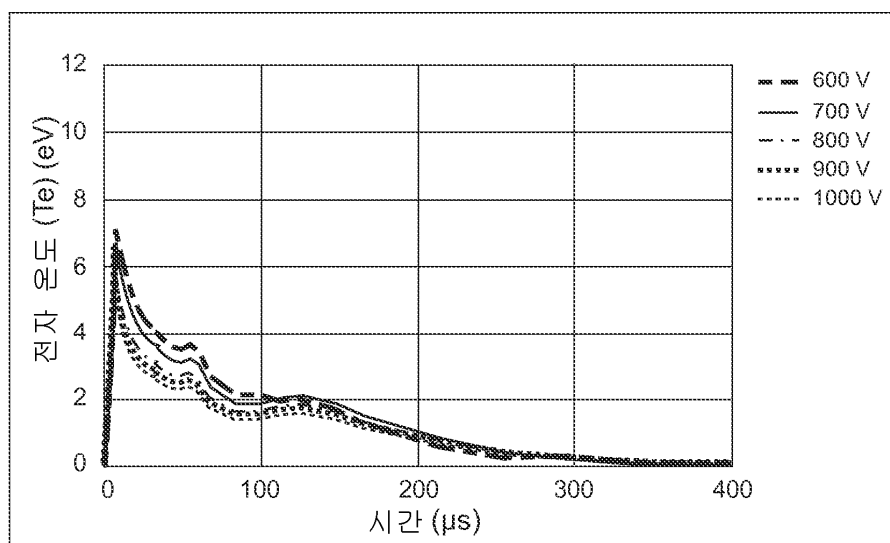




도면6



도면7a



도면7b

