



등록특허 10-2629567



(19) 대한민국특허청(KR)

(12) 등록특허공보(B1)

(45) 공고일자 2024년01월25일

(11) 등록번호 10-2629567

(24) 등록일자 2024년01월22일

(51) 국제특허분류(Int. Cl.)

H01L 21/02 (2006.01) G03F 1/20 (2012.01)

H01L 21/203 (2006.01) H01L 21/205 (2006.01)

(52) CPC특허분류

H01L 21/02205 (2013.01)

G03F 1/20 (2013.01)

(21) 출원번호 10-2016-0144491

(22) 출원일자 2016년11월01일

심사청구일자 2021년08월25일

(65) 공개번호 10-2017-0053577

(43) 공개일자 2017년05월16일

(30) 우선권주장

62/252,308 2015년11월06일 미국(US)

15/087,968 2016년03월31일 미국(US)

(56) 선행기술조사문헌

JP2001264220 A*

JP2014130145 A*

JP2014186896 A*

*는 심사관에 의하여 인용된 문헌

(73) 특허권자

에프이아이 컴파니

미국 오리건 97124 힐스보로 엔이 도슨 크릭 드라이브 5350

(72) 발명자

루스 주니어 브라이언 로버츠

미국 오레곤 97008 비버턴 사우쓰웨스트 베이 미도우즈 카운티 13265

밀러 토마스 쥘.

미국 오레곤 97229 포틀랜드 노쓰웨스트 라 카셀 크레스트 레인 10810

(뒷면에 계속)

(74) 대리인

리엔목특허법인

전체 청구항 수 : 총 11 항

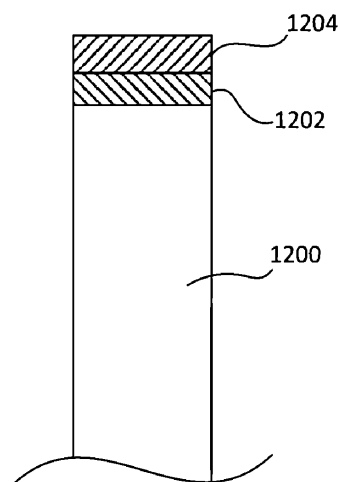
심사관 : 최동기

(54) 발명의 명칭 개선된 물질 증착 방법

(57) 요약

하전 입자 처리 방법 및 장치는 적어도 2종의 물질로 구성된 보호 층의 형성을 포함한다. 상기 2종의 물질은 함께 혼합될 수 있거나 또는 샘플의 물질 특성에 따라 제제화 및 배열된 개별 층으로서 증착될 수 있다.

대표도 - 도22



(52) CPC특허분류

H01L 21/203 (2013.01)

H01L 21/205 (2013.01)

H01L 21/26566 (2013.01)

(72) 발명자

루 차드

미국 오레곤 97229 포틀랜드 노쓰웨스트 락 크릭
블러바드 2133

프랑코 노엘 토마스

미국 오레곤 97124 힐스버러 오렌코 스테이션 파크
웨이 1091 아파트먼트 이124

명세서

청구범위

청구항 1

관찰을 위해서 기관 내 관심 영역을 노출시키기 위한 피가공물의 하전 입자 빔 처리 방법으로서,

적어도 2종의 상이한 전구체 가스를 상기 피가공물 표면에 제공하는 단계;

하전 입자 빔을 상기 기관 쪽으로 향하게 하여 상기 적어도 2종의 상이한 전구체 가스로부터 상기 관심 영역 위로 보호 층의 증착을 유도하는 단계로서, 상기 보호층은 상이한 스퍼터(sputter) 속도를 갖는 적어도 2종의 상이한 물질로 구성되고, 상기 적어도 2종의 물질은 상기 적어도 2종의 상이한 전구체 가스의 분해에 의해 증착되고, 상기 보호층은 상기 적어도 2종의 상이한 물질의 교대 층들(alternating layers)을 포함하고, 상기 보호층의 스퍼터 속도는 상기 적어도 2종의 물질의 증착에 의존하여 조정되는, 단계; 및

하전 입자 빔을 상기 기관 쪽으로 향하게 하여 상기 보호 층을 통과하며 밀링하여 상기 보호 층 아래의 상기 관심 영역을 노출시키는 단계;를 포함하는 것인 방법.

청구항 2

제1항에 있어서, 상기 적어도 2종의 상이한 전구체 가스를 상기 피가공물 표면에 제공하는 단계 및 하전 입자 빔을 상기 기관 쪽으로 향하게 하여 상기 적어도 2종의 전구체 가스로부터 보호 층의 증착을 유도하는 단계가

제1 전구체 가스를 상기 피가공물 표면에 제공하는 단계;

하전 입자 빔을 상기 기관 쪽으로 향하게 하여 상기 제1 전구체 가스로부터 제1 스퍼터 속도를 갖는 제1 물질의 증착을 유도하는 단계;

제2 전구체 가스를 상기 피가공물 표면에 제공하는 단계; 및

상기 하전 입자 빔을 상기 기관 쪽으로 향하게 하여 상기 제2 전구체 가스로부터 제2 스퍼터 속도를 갖는 제2 물질의 상기 제2 전구체 가스로부터의 증착을 유도하는 단계;

이에 따라 상기 적어도 2종의 상이한 물질의 교대 층들을 갖는 보호 층을 제조하는 단계;를 포함하는 것인 방법.

청구항 3

제2항에 있어서, 상기 제1 물질이 산화규소를 포함하는 것인 방법.

청구항 4

제2항 또는 제3항에 있어서, 상기 제2 물질이 텅스텐, 탄소 또는 백금을 포함하는 것인 방법.

청구항 5

제1항에 있어서, 상기 적어도 2종의 상이한 전구체 가스를 상기 피가공물 표면 보호 층에 제공하는 단계가 다중 가스 종의 혼합물을 제공하는 단계를 포함하는 것인 방법.

청구항 6

제5항에 있어서, 상기 다중 가스 종의 혼합물이 백금 전구체 및 탄소 전구체의 혼합물을 포함하는 것인 방법.

청구항 7

제5항에 있어서, 상기 다중 가스 종의 혼합물이 백금 전구체 및 산화규소 전구체의 혼합물을 포함하는 것인 방법.

청구항 8

제1항 내지 제3항 또는 제5항 내지 제7항 중 어느 한 항에 있어서, 상기 하전 입자 빔을 상기 기관 쪽으로 향하게 하여 상기 보호 층을 통과하며 밀링하여 상기 보호 층 아래의 상기 관심 영역을 노출시키는 단계가 200 nm 미만의 두께를 갖는 라멜라(lamella)를 제조하는 단계를 포함하는 것인 방법.

청구항 9

제1항 내지 제3항 또는 제5항 내지 제7항 중 어느 한 항에 있어서, 상기 하전 입자 빔을 상기 기관 쪽으로 향하게 하여 상기 보호 층을 통과하며 밀링하여 상기 보호 층 아래의 상기 관심 영역을 노출시키는 단계가 주사 전자 현미경 상에서의 관측을 위한 상기 피가공물 일부의 횡단면을 제조하는 단계를 포함하는 것인 방법.

청구항 10

이온 빔 공급원을 포함하는 이온 빔 시스템;

이온 빔을 기관 상에 집속시키기 위한 이온 광학 칼럼;

전구체 가스를 피가공물 표면에 제공하기 위한 가스 공급원;

집속 이온 빔 시스템을 저장된 지시사항에 따라 제어하기 위한 프로세서; 및

제1항 내지 제3항 또는 제5항 내지 제7항 중 어느 한 항에 따른 방법을 수행하기 위한 컴퓨터 지시사항을 저장하는 컴퓨터-판독가능한 메모리를 포함하는, 피가공물을 분석하기 위한 집속 이온 빔 시스템.

청구항 11

제1항에 있어서, 상기 적어도 2종의 물질의 증착에 의존하여 상기 보호층의 스퍼터 속도가 조정되는 것은, 상기 교대 층들의 총 수 뿐만 아니라 상기 교대 층들의 개별층의 두께를 조절하는 것에 의해 상기 보호층의 스퍼터 속도를 조정하는 것을 포함하는, 방법.

청구항 12

삭제

청구항 13

삭제

청구항 14

삭제

발명의 설명

기술 분야

[0001] 본 발명은 하전 입자 빔 유도 증착, 및 보다 특히 FIB 및 SEM 빔 화학을 위한 전구체 가스 조성물에 관한 것이다.

배경 기술

[0002] 선행기술에서, 전형적으로 집속 이온 빔 (FIB) 기기에서 수행되는 이온 빔 유도 증착 (IBID), 및 통상적으로 주사 전자 현미경 (SEM) 기기에서 수행되는 전자 빔 유도 증착 (EBID)을 통해 물질을 샘플 상에 증착시키는 것이 공지되어 있다. 공지된 방법에 따르면, 샘플은 하전 입자 빔 장치 - 전형적으로 FIB 시스템 또는 SEM 시스템의 이동가능한 시료 챔버에 위치된다. 상기 하전 입자 (또는 다른) 빔은 증착 가스 (이는 종종 전구체 가스로서 지칭됨)의 존재 하에 상기 샘플 표면에 가해진다. 상기 전구체 가스 층은 상기 샘플의 표면에 흡착된다. 상기 층의 두께는 상기 샘플 표면 상의 상기 가스 분자의 흡착 및 탈착의 균형에 좌우되며, 결국 이는, 예를 들어 부분 가스 압력, 기관 온도 및 점착 계수(sticking coefficient)에 좌우된다. 생성 층의 두께는 용도에 따라 달라질 수 있다.

[0003] 물질 증착은 용도에 따라 다양한 상이한 가스 전구체를 사용하여 수행될 수 있다. 예를 들어, 텅스텐 헥사카보

닐 ($W(CO)_6$) 가스를 사용하여 텅스텐을 증착시킬 수 있고, 나프탈렌 가스를 사용하여 탄소를 증착시킬 수 있다. TEOS, TMCTS 또는 HMCHS 가스의 전구체 가스를 산화제, 예컨대 H_2O 또는 O_2 와 함께 사용하여 산화규소 (SiO_x)를 증착시킬 수 있다. 백금 (Pt)의 증착을 위해, (메틸시클로펜타디에닐) 트리메틸 백금 가스가 사용될 수 있다.

[0004] 이러한 상이한 전구체로부터 얻은 물질 증착물은 상이한 특성을 갖는다. 예를 들어, (메틸시클로펜타디에닐) 트리메틸 백금 전구체를 사용하여 증착된 IBID Pt 물질은 "보다 연질"인 경향이 있다. 즉, 이러한 보다 연질인 물질은, 각각 나프탈렌 또는 $W(CO)_6$ 을 사용하여 얻은 "보다 경질"인 IBID 탄소 또는 텅스텐 층보다 후속의 이온 빔 스퍼터링(sputtering)에 보다 민감성이다. TEOS, TMCTS 또는 HMCHS 가스의 전구체를 산화제, 예컨대 H_2O 또는 O_2 와 함께 사용하는 산화규소 층은 보다 "중간" 정도인 경향이 있다. 물질의 상대적인 "경도" 또는 "연도"는 빔의 입사 각에 좌우된다. 일부 물질 쌍에서, "보다 경질"인 물질은 상이한 입사 각에서 보다 연질이 된다. 다른 상이함이 또한 존재한다. 예를 들어, 백금 필름이 FIB 단면 절취 (예컨대, TEM 제조 시 발생함) 전에 회생 캡으로서 사용되는 경우, 상기 필름의 연질 성질은 평활한 횡단 절취면을 유발하는 경향이 있다. 대조적으로, 탄소 필름은 매우 경질이며, "커트닝(curtaining)"으로서 공지되어 있는 상기 절취면 상의 아티팩트 (artifact)를 생성하는 경향이 있다. 경도 특성에 더하여, 이러한 상이한 증착 전구체의 성장 속도 또한 다양한 용도에 중요한 인자일 수 있다.

[0005] 하기는 다양한 부류의 가스 전구체의 예이다. 예를 들어, 부류 C 식각액은 산소 (O_2), 아산화질소 (N_2O) 및 물을 포함할 수 있다. 금속 식각액은 아이오딘 (I_2), 브로민 (Br_2), 클로린 (Cl_2), 제논 디플루오라이드 (XeF_2) 및 이산화질소 (NO_2)를 포함할 수 있다. 유전 식각액은 제논 디플루오라이드 (XeF_2), 질소 트리플루오라이드 (NF_3), 트리플루오로아세트아마이드 (TFA) 및 트리플루오로아세트산 (TFAA)을 포함할 수 있다. 금속 증착 전구체 가스는 (메틸시클로펜타디에닐) 트리메틸 백금, 테트라키스 (트리페닐포스핀) 백금 (0), (0) 텅스텐 헥사카보닐 ($W(CO)_6$), 텅스텐 헥사플루오라이드 (WF_6), 몰리브데넘 헥사카보닐 ($Mo(CO)_6$), 디메틸 (아세틸아세토네이트) 금 (III), 테트라에틸오르토실리케이트 (TEOS), 및 물 (H_2O)을 포함하는 테트라에틸오르토실리케이트 (TEOS)를 포함할 수 있다. 유전 증착 전구체는 테트라에틸오르토실리케이트 (TEOS), 물 (H_2O)을 포함하는 테트라에틸오르토실리케이트 (TEOS), 헥사메틸시클로헥사실록산 ((HMCHS) + O_2) 및 테트라메틸시클로 테트라실록산 ((TMCTS) + O_2)을 포함할 수 있다. 탄소 증착 전구체는 나프탈렌 및 도데칸 ($C_{12}H_{26}$)을 포함할 수 있고, 평면 층 제거제는 메틸니트로아세테이트를 포함할 수 있다. 이들이 이용가능한 가스 전구체의 다수의 예이지만, 다수의 다른 전구체도 존재하며, 사용가능하다.

[0006] 빔 유도 증착은 물질을 반도체 웨이퍼와 같은 샘플의 표적 표면 상에 증착시키기 위한 매우 다양한 용도에 사용된다. 상기 물질은 다양한 이유로, 예컨대 얇은 필름 표면, 전기적 접속, 반도체 형태(feature) 특성화 및 분석용 보호 코팅, 및 고-종횡비 구조 (예컨대, 비아(via))를 밀링(milling)하기 위한 캡핑 물질을 형성하기 위해 증착된다. 그러나, 샘플 및 증착된 캡핑 물질의 경도 사이에 유의한 차이가 있는 경우, 제조되는 샘플의 목적하는 구조, 형태 및 표면 특성을 얻는 것이 어려울 수 있다. 예를 들어, 물질들의 상이한 스퍼터 속도는 물질들 사이의 접면에서의 경사 변화를 유발할 수 있기 때문에, 밀링된 구조의 형성 시 경사진 표면을 제어하는 것이 어려울 수 있다. 또한, 아티팩트는 형태 특성화 및 분석용 샘플을 제조하기 위한 단면 절취 공정 동안 FIB 밀링된 표면 상에서 발생할 수 있다.

[0007] FIB 시스템을 사용하는 기술은 형태 특성화 및 분석용 초박막 샘플을 제조하기 위한 것으로 공지되어 있고, 여기서 밀링 공정 동안 도입되는 표면 아티팩트의 발생을 최소화하는 것이 중요하다.

[0008] 반도체 기하학적 구조는 계속 수축하기 때문에, 제조업자는 제조 공정을 모니터링하고, 결함을 분석하고, 접면 층 모폴로지를 조사하기 위해 투과 전자 현미경 (TEM)에 점점 더 의존한다. 투과 전자 현미경은 관찰자가 나노미터 규모의 크기를 갖는 형태를 볼 수 있도록 한다. 물질의 표면만을 이미지화하는 주사 전자 현미경 (SEM)과 대조적으로, TEM은 또한 샘플의 내부 구조의 분석을 가능하게 한다. TEM에서, 얇은 빔이 샘플에 충돌하고, 상기 샘플을 통해 투과하는 전자가 검출되어 상기 샘플의 이미지를 형성한다. 주사형 투과 전자 현미경 (STEM)은 TEM 및 SEM의 원리를 합하고, 어느 기기 상에서도 수행될 수 있다. 상기 STEM 기술은 샘플을 횡단하는 전자의 매우 세밀하게 집속된 빔을 래스터(raster) 패턴으로 스캔한다. 상기 샘플은, 1차 빔에서의 다수의 전자가 상기 샘플을 통해 이동하고 반대 면에서 나가도록 하기에 충분히 얇아야 한다.

- [0009] 샘플은 투과 전자 현미경 (TEM이든 STEM이든 관계없이)으로 관측하기 위해 매우 얇아야 하기 때문에, 상기 샘플의 제조는 까다롭고 시간이 많이 걸리는 일일 수 있다. 본원에 사용된 용어 "TEM"은 TEM 또는 STEM을 지칭하며, TEM을 위한 샘플의 제조에 대한 지칭은 STEM 상에서 관측하기 위한 샘플의 제조를 또한 포함하는 것으로 이해된다. 본원에 사용된 용어 "STEM" 또한 TEM 및 STEM 둘 모두를 지칭한다.
- [0010] TEM 또는 STEM으로 관측하기 위한 얇은 샘플을 제조하는 여러 방법이 존재한다. 일부 방법은 샘플이 추출되는 전체 물질을 파괴하지 않고 샘플을 추출하는 것을 수반한다. 다른 방법은 상기 샘플을 추출하기 위해 상기 물질을 파괴하는 것이 요구된다. 일부 방법은 라멜라(lamella)로서 지칭되는 얇은 샘플의 추출을 제공한다. 상기 라멜라는 TEM 또는 STEM 관측 전에 박막화가 요구될 수 있다.
- [0011] TEM 관측용 라멜라 샘플은 전형적으로 100 nm 두께 미만이지만, 일부 용도의 경우 샘플은 상당히 더 얇아야 한다. 30 nm 이하의 설계 노드에서의 진보된 반도체 제조 공정의 경우, 상기 샘플은 소규모 구조들 사이의 중첩을 피하기 위해 20 nm 미만의 두께일 필요가 있다. 일부 용도, 예컨대 후속-노드 반도체 장치의 분석은, 특정한 관심 장치를 단리하기 위해 15nm 이하의 두께를 갖는 라멜라가 요구된다. 라멜라를 박막화하는 현재의 방법은 어렵고, 견고하지 못하다. 샘플에서의 두께 변형은 샘플 굽힘 또는 휨, 과다밀링, 또는 라멜라를 파괴할 수 있는 다른 치명적인 결함을 일으킨다. 이러한 얇은 샘플에 대해, 제조는 가장 작고 가장 중요한 구조의 구조적 특성화 및 분석의 품질을 중요하게 결정하는, TEM 분석에서의 중요한 단계이다.
- [0012] 샘플 상의 관심 영역을 이온 빔에 대한 노출로부터 보호하고, 굽힘 또는 휨을 방지하기 위해, 박막화 전에 목적하는 라멜라 위치 상에 증착되는 보호 층을 제공하는 것이 공지되어 있다. 도 1 내지 3에서 보여지는 바와 같은 하나의 통상적으로 사용되는 제조 기술에서, 물질, 예컨대 텅스텐, 탄소 또는 백금의 보호 층(22)가 먼저 전자 빔 또는 이온 빔 증착을 사용하여 도 1에 나타난 바와 같이 샘플 몸체의 상단 표면(23) 상의 관심 영역 위에 증착된다. 그 다음, 도 2 및 3에 나타난 바와 같이, 높은 빔 전류를 사용하는, 상응하게 큰 빔 크기를 갖는 집속 이온 빔을 사용하여 많은 양의 물질을 상기 관심 영역의 전방부 및 후방부로부터 밀링한다. 2개의 밀링된 영역(24 및 25) 사이에 남아있는 물질은 관심 영역을 포함하는 얇은 수직 샘플 구획(26)을 형성한다. 전형적으로, 상기 관심 영역은 상기 샘플 표면 아래 상단 200 내지 300 nm에 함유된다. 상기 관심 영역의 후면 상에 밀링된 상기 영역(25)는 상기 전방 영역(24)보다 더 작은 것으로 나타난다. 상기의 보다 작은 밀링된 영역(25)는 기본적으로 시간을 단축시키기 위한 것뿐만 아니라, 마무리된 샘플이 보다 큰 밀링된 영역(24)로 떨어져 상기 샘플 구획(26)을 상기 샘플 몸체로부터 제거하는 것을 어렵게 하는 것을 방지한다. 이어서, 샘플 구획(26)은 집속 이온 빔을 사용하여 상기 샘플 몸체로부터 절단된 다음, 널리 공지된 방식으로, 예를 들어 미세조작기를 사용하여 들어올려질 수 있다. 이어서, 상기 샘플 구획(26)은 전형적으로 TEM 그리드로 이송되고, 박막화된다. 이어서, 상기 샘플 구획(26)은 TEM 또는 다른 분석 도구를 사용하여 분석될 수 있다.
- [0013] 초박막 (< 30 nm 두께) TEM 샘플의 제조 시 중대한 문제가 발생한다. 예를 들어, 상기 관심 영역 상의 백금 보호 층은 너무 연질이라, 종종 라멜라 박막화 동안 파괴되어, 라멜라 박막화가 완료되기 전에 상기 이온 빔 꼬리(tail)로부터의 주변 침식에 의해 완전히 소모된다. 보다 경질인 물질 층은 보다 연질인 물질보다 더 양호하게 침식에 견딜 수 있지만, 상기 라멜라의 횡단면 상에 목적하지 않은 아티팩트를 유발할 수 있다.
- [0014] 도 4 및 5는 초박막 샘플의 제조 시의 문제점의 예를 나타낸다. 도 4에서 보여지는 바와 같이, 라멜라 샘플(30)의 횡단면은 경질 다이아몬드 기관(34) 상에 증착된 연질 Pt 캡(32)을 포함하여 제조된 것으로 나타나 있다. 상기 라멜라(30)이 요구되는 두께 치수로의 박막화에 의해 제조되는 경우, 이러한 경도 미스매칭은 상기 보다 경질인 다이아몬드 기관(34)보다 더 빠른 상기 보다 연질인 Pt 캡(32)의 침식을 일으킨다. 이러한 조합은, 상기 기관(34)가 충분히 박막화되기 전에 상기 보호 캡(32)이 결국 완전히 소모될 것이기 때문에, 사용자가 상기 라멜라를 목적하는만큼 박막화하는 것을 방지할 것이다. 반대로, 도 5에서 보여지는 바와 같이, 라멜라 샘플(36)의 횡단면은 연질 구리 기관(40) 상에 위치한 경질 탄소 캡(38)을 포함하여 제조된 것으로 나타나 있다. 이러한 예에서, 상기 보다 연질인 기관(40)이 상기 보다 경질인 캡(38)보다 더 빠르게 소모되기 때문에 언더커팅(undercutting)(42)이 관찰될 수 있다. 이는 상기 라멜라의 조기 파괴뿐만 아니라 단면 절취 표면 아티팩트, 예컨대 "커트닝"을 유발할 수 있다.
- [0015] 커트닝은 샘플의 표면이 리플(ripple)되거나 또는 비평탄하게 되도록 하는 아티팩트이다. 커트닝은 다양한 이유로 발생할 수 있다. 샘플이 상이한 스피터 속도를 갖는 상이한 물질로 이루어져 비-균질한 경우, 보다 경질인 물질은 횡단면으로부터 약간 돌출되는 저항 영역을 형성할 수 있다. 이러한 돌출부는 이들 아래 영역을 차폐하며, 이는 하향으로 전파되는 세로줄(vertical streaks)을 유발한다. 도 6은 커트닝을 나타내는 텅스텐 보호 층을 포함하는 규소 기관을 갖는 샘플(44)을 나타낸다. "커튼(curtain)"은 상기 텅스텐이 상기 규소 기관보

다 더 경질이거나 또는 이온 빔으로부터의 스퍼터링에 보다 잘 견디기 때문에 발생한다. 이는 상기 기관의 횡단면으로부터 약간 돌출된 형태를 유발한다. 보다 경질의 돌출 텅스텐은 기본적으로 상기 텅스텐의 수직 돌출 부는 남기며 이것 바로 아래의 상기 기관을 차폐한다. 별법으로, 일부 경질 캡핑 물질은 캡핑 물질 그 자체는 내부적으로 균질하더라도 이온 빔에 노출되는 경우 리플-유사 또는 직선의 패턴을 형성한다. 도 7은 커트닝을 나타내는 탄소 보호 층을 포함하는 규소 기관을 갖는 샘플(46)을 나타낸다. 횡단면 밀링이 수행되는 경우, 상기 탄소 층 물질은 점차적으로 고도로 텍스처화된 표면을 만든다. 따라서, 이러한 예에서 상기 탄소 층의 지형은 커트닝을 유발한다. 이러한 유형의 구조적 또는 밀도 변형을 갖는 샘플의 하향식 박막화는, 수직 리지 또는 변형이 샘플 상단 (상기 상단은 이온 빔 공급원에 가장 가까운 것으로서 정의됨) 근처의 보다 밀집 물질 (즉, 금속 라인)로부터 횡단면 아래로, 이온 빔 방향과 평행한 방향으로 유동하며 전파되도록 할 것이다. 커트닝은 대부분 종종 낮은 스퍼터링 수율을 갖는 물질의 다수의 패턴화된 층이 보다 빠른 스퍼터링 수율의 물질을 차단하는 반도체 물질에서 관찰된다. 커트닝은 또한 스퍼터링 수율에서의 변화가 밀링 입사 각에 따라 달라지는 상이한 지형의 영역을 나타내는 물질에서 관찰될 수 있다. 공극을 갖는 샘플 또한 커튼을 유도한다. 커트닝 아티팩트는 TEM 이미징의 품질을 감소시키고, 최소의 유용한 시료 두께를 제한한다.

[0016] 또 다른 유형의 아티팩트는 "골프 티(golf tee)"로서 지칭된다. 예를 들어, 전형적으로 규소와 같은 물질인 샘플 상 관심 영역 상단 상의 텅스텐 또는 탄소의 층이다. 캡핑 물질 및 규소 기관은 상이한 "경도" (이온 빔으로부터의 스퍼터링에 대한 저항력)를 가져, "골프-티"로 불리는 하향식 두께 변형을 유발하며, 여기서 샘플은 상단에서 보다 두껍고, 보다 얇은 치수로 좁아져 상기 샘플은 Y-구획에서 관찰하는 경우 "골프 티" 프로파일을 갖는다. 관심 영역은 통상적으로 라멜라의 상단 표면 근처에 함유되기 때문에, 보다 두꺼운 치수는 상기 관심 영역을 분명히 않게 하여, TEM 관측용의 바람직한 샘플보다 미만을 야기할 수 있다.

[0017] "골프-티" 효과의 한 예는 도 8에서 볼 수 있으며, 이는 샘플(50)의 상단 표면 상에 위치한 이온 빔 유도 증착 (IBID) 텅스텐 보호 층(52)를 포함하는 TEM 샘플(50)을 나타낸다. 이러한 예에서, 박막화 후 상기 샘플(50)은 보호 층(52) 바로 아래에서 44 nm 너비이며, 보호 층(52) 아래 150 nm에서 25 nm 너비로 좁아진다. 이러한 두께 변형은 규소 기관 및 텅스텐 보호 층 사이의 상이한 에칭 속도의 결과이다. 텅스텐은 규소보다 더 경질의 밀집 물질이며, 상당히 더 낮은 에칭 속도를 갖고, 이는 텅스텐 보호 층(52)가 라멜라 몸체보다 더 넓어지도록 한다. 전형적으로, 관심 영역은 "골프-티"가 발생하여 TEM 관측용 관심 영역을 분명히 않게 하거나 또는 방해하는 일반적인 영역에 위치한다.

[0018] 표면 아티팩트 및 경사 변화가 없는 제어된 피가공물 표면을 얻기 위한 개선된 물질 증착 방법이 필요하다.

발명의 내용

[0019] 본 발명의 목적은 관찰을 위해 관심 영역을 노출시키기 위한 하전 입자 빔 처리를 위한 보호 층을 형성하는 개선된 방법 및 장치를 제공하는 것이다.

[0020] 관찰을 위해 관심 영역을 노출시키기 위한 피가공물의 하전 입자 빔 처리 시스템은 전구체 가스를 상기 피가공물 표면에 제공하고; 하전 입자 빔을 기관 쪽으로 향하게 하여 상기 전구체 가스로부터 상이한 스퍼터 속도를 갖는 적어도 2종의 상이한 물질로 구성된, 관심 영역 위의 보호 층의 증착을 유도하고; 하전 입자 빔을 상기 기관 쪽으로 향하게 하여 상기 보호 층을 통과하며 밀링하여 상기 보호 층 아래의 상기 관심 영역을 노출시키는 방법 및 장치를 포함한다.

[0021] 상기는, 하기 본 발명의 상세한 설명이 보다 잘 이해될 수 있도록 본 발명의 특징 및 기술적 이점을 보다 광범위하게 개략화하였다. 본 발명의 추가의 특징 및 이점은 이후에 기재될 것이다. 통상의 기술자는, 개시된 개념 및 구체적 구현예가 본 발명의 동일한 목적을 수행하기 위해 다른 구조를 개질하거나 또는 설계하기 위한 기초로서 쉽게 이용될 수 있음을 알아야 한다. 또한, 통상의 기술자는 이러한 등가의 구성은 첨부되는 청구범위에 제시된 바와 같은 본 발명의 범주로부터 벗어나지 않음을 인식해야 한다.

도면의 간단한 설명

[0022] 제출되는 본 특허 또는 출원은 칼라로 실행된 적어도 하나의 도면을 포함한다. 요청 및 필요한 수수료 납부에 따라 본 사무소에 의해 칼라 도면을 갖는 본 특허 또는 특허 출원 공보의 사본이 제공될 것이다. 본 발명 및 이의 이점을 보다 완전히 잘 이해하기 위해, 이제 첨부되는 도면과 함께 하기 설명을 참조한다:

도 1 내지 3은 선행 기술에 따른 제외(ex-situ) 샘플 제조 시의 단계를 예시한다.

- 도 4는 경질의 다이아몬드 기관 및 쉽게 소모가능한 연질의 백금 상단 층을 갖는 선행 기술의 라멜라 프로파일을 나타낸다.
- 도 5는 생성된 언더커팅을 포함하는, 연질의 구리 기관 및 경질의 탄소 상단 층을 갖는 선행 기술의 라멜라 프로파일을 나타낸다.
- 도 6은 선행 기술에 따른, 커트닝을 나타내는 텅스텐 상단 층을 갖는 FIB 횡단면의 현미경 사진이다.
- 도 7 은 선행 기술에 따른, 커트닝을 나타내는 탄소 상단 층을 갖는 박막화된 TEM 샘플의 현미경 사진이다.
- 도 8은 선행 기술에 따른, "골프-티" 아티팩트를 갖는 박막화 후의 라멜라 이미지를 나타낸다.
- 도 9는 다종가스 주입 시스템 (MGIS)을 포함하는 하전 입자 빔 시스템을 도식적으로 나타낸다.
- 도 10은 Pt 전구체 (X축) 및 C 전구체 (Y축)에 대한 밸브 듀티 사이클(duty cycle)의 함수로서의, 수직 증착 성장 속도의 등고선 플롯을 나타낸다.
- 도 11은 Pt 전구체 (X축) 및 C 전구체 (Y축)에 대한 밸브 듀티 사이클의 함수로서의, 증착된 C-Pt 복합 물질의 스퍼터 속도의 등고선 플롯을 나타낸다.
- 도 12는 C-풍부 보호 복합 층을 갖는 라멜라 프로파일을 나타낸다.
- 도 13은 Pt-풍부 보호 복합 층을 갖는 라멜라 프로파일을 나타낸다.
- 도 14는 C-Pt 보호 복합 층을 갖는 라멜라 프로파일을 나타낸다.
- 도 15는 형성된 비아 구조를 갖는 기관에 대한 복합 물질 증착의 한 구현예를 나타낸다.
- 도 16은 형성된 비아 구조를 갖는 기관에 대한 복합 물질 증착의 또 다른 구현예를 나타낸다.
- 도 17은 형성된 비아 구조를 갖는 기관에 대한 복합 물질 증착의 또 다른 구현예를 나타낸다.
- 도 18은 도 17의 상기 복합 물질 증착에 대한 밸브 듀티 사이클을 나타낸다.
- 도 19는 형성된 비아 구조를 갖는 기관에 대한 복합 물질 증착의 또 다른 구현예를 나타낸다.
- 도 20은 도 19의 상기 복합 물질 증착에 대한 밸브 듀티 사이클을 나타낸다.
- 도 21은 본 발명을 수행하기 위한 유형의 이중 빔 시스템을 사용하는 또 다른 구현예를 나타낸다.
- 도 22는 별개 물질의 보호 층을 갖는 라멜라 프로파일을 나타낸다.
- 도 23은 다종의 별개 물질의 보호 층을 갖는 라멜라 프로파일을 나타낸다.
- 도 24는 별개의 교대 물질의 보호 층을 갖는 라멜라 프로파일을 나타낸다.
- 도 25는 다수의 보호 층을 갖는 라멜라의 바람직한 구현예의 이미지를 나타낸다.
- 도 26은 다수의 보호 층을 갖는 라멜라의 또 다른 바람직한 구현예의 현미경 사진을 나타낸다.
- 도 27a 및 27b는 표 1 및 2로부터의 데이터의 플롯을 나타낸다.
- 도 28은 본 발명에 따른 물질 증착에 대한 흐름도를 나타낸다.

발명을 실시하기 위한 구체적인 내용

- [0023] 본 발명의 구현예는 개선된 보호 층을 제조하기 위해 2종의 상이한 물질을 사용함으로써 하전 입자 빔 처리를 위한 개선된 보호 층을 제공한다.
- [0024] 한 구현예에 따르면, 물질 증착은 기관 물질의 스퍼터 속도와 실질적으로 일치하는 스퍼터 속도를 갖는 보호 물질 층을 제공하도록 수행된다. 하전 입자 빔은 FIB 시스템의 진공 챔버에서 기관 쪽으로 향하여져 전구체 가스 혼합물로부터의 물질 증착을 유도한다. 보호 층 물질 증착의 스퍼터링에 대한 저항력은 가스 혼합물 성분의 비를 변화시킴으로써 조절될 수 있다. 넓은 범위에 걸쳐 전구체 비를 변화시켜 샘플 기관의 물질에 따라 보호 층 물질의 경도를 변화시킬 수 있는 가변적인 유동 제어 및 혼합 능력을 갖는 다종 가스 주입 시스템이 사용된다.
- [0025] 또 다른 구현예에 따르면, 물질 증착은 각각의 층이 상이한 에칭 속도를 갖는 층에 증착된 2종 이상의 물질 조

성물을 포함하는 보호 층을 제공하도록 수행된다. 바람직하게는, 하전 입자 빔은 FIB 시스템의 진공 챔버에서 기관 쪽으로 향하여져, 전구체 가스로부터 관심 영역 위의, 샘플 기관 상의 제1 보호 층의 증착을 유도한다. 이어서, 이온 빔은 샘플 기관 쪽으로 향하여져, 전구체 가스로부터 상기 제1 보호 층 상단 상의 적어도 제2 보호 층의 증착을 유도한다. 바람직하게는, 상기 제1 보호 층은 샘플의 에칭 속도와 근접하게 일치하는 에칭 속도를 갖고, 상기 제2 보호 층 (및 임의의 추가의 층)은 샘플의 에칭 속도와 상이한 에칭 속도를 갖는다. 예를 들어, 보다 연질인 기관의 경우, 보다 연질인 보호 물질이 먼저 기관과 직접 접촉되도록 증착될 수 있고, 이어서 보다 경질인 제2의 층이 상기 제1 층의 상단 상에 증착될 수 있다. 상기의 보다 경질인 층은 이온 빔으로부터의 침식에 견딜 것이며, 상기의 보다 연질인 바닥 층은 단면 절취 아티팩트를 방지할 것이다. 기관의 스퍼터 속도에 근접하게 일치하는 스퍼터 속도를 갖는 바닥 층은 단면 절취 아티팩트의 위험을 줄인다. 보다 경질인 기관, 예컨대 다이아몬드, 탄소 또는 탄화규소의 경우, 보다 경질인 보호 층이 먼저 기관과 직접 접촉되도록 증착되며, 보다 연질인 물질 층은 상기 제1 층의 상단 상에 증착될 수 있다.

[0026] 또 다른 구현예에서, 물질 증착은 교대의 물질 층을 제공하여, 상기 교대의 얇은 물질 층을 별개의 가스 화학을 사용하여 증착시킴으로써 보호 층 물질의 에칭 속도가 "조정"된 보호 층을 형성하도록 수행되며, 이는 개별 성분의 에칭 속도 사이에 있는 에칭 속도를 갖는 교대의 "파르페(parfait)-유사" 거대구조를 형성한다. 상기 개별 성분의 두께뿐만 아니라 층의 총 수를 조절함으로써, 사용자는 목적하는 필름 특성을 달성하기 위한 어느 정도의 조정가능성을 달성할 수 있다. 제한적인 극단의 무한 초박막 교대 층이 증착되어, 복합 혼합물과 유사한 증착물을 유발할 수 있다.

[0027] 또 다른 구현예에서, 가스 전구체의 혼합물이 물질 증착에 사용되지만, 증착 과정 동안 상기 가스의 비가 복합 캡핑 물질을 생성하도록 점차 조절되어, 보호 층의 바닥은 주로 하나의 성분이며, 상기 층의 상단은 주로 또 다른 성분이고, 중간 조성을 갖는 중간 영역을 포함하도록 한다. 이는 밀이 보호 물질을 통해 진행될 때 경질에서 연질로의 (또는 그 반대) 점진적인 전이를 제공한다.

[0028] 또 다른 구현예에서, 본원에 기재된 상기 물질 증착 방법은 희생 보호 캡의 경도를 빔 꼬리로부터의 침식으로 인한 라멜라 파괴를 방지하도록 조정하고, 접면에서의 단면 절취 아티팩트, 예컨대 커트닝 및 측벽 경사 변화를 최소화할 수 있도록 TEM 라멜라 제조 시 수행될 수 있다.

[0029] 또 다른 구현예에서, 본원에 기재된 상기 물질 증착 방법은, 복합 캡핑 층을 사용하여 일반적으로 결함 및 경사 변화가 없는 절취면을 포함하는 단면 FIB 횡단면을 생성하는 용도로 수행될 수 있다.

[0030] 또 다른 구현예에서, 본원에 기재된 상기 물질 증착 방법은 조성물 증착 필름을 사용하여 이온 빔 밀링으로 생성된 고-종횡비 구조 (예컨대, 비아)의 밀링된 프로파일을 조절하는 용도로 수행될 수 있다.

[0031] 본 발명의 제1의 바람직한 구현예에 따르면, 기관, 예컨대 반도체 웨이퍼는 FIB 칼럼 및 SEM 칼럼 둘 모두를 갖는 이중-빔 FIB/SEM 시스템 내로 로딩된다. 이중-빔 시스템이 논의되어 있지만, 본 발명을 수행하기 위해 다른 FIB 시스템이 사용될 수 있음을 이해해야 한다. 웨이퍼는 수동으로 이동될 수 있거나 또는 바람직하게는 다중-웨이퍼 운반체 및 자동-로딩 로봇 (제시되어 있지 않음)에 의해 이동된다.

[0032] 라멜라 샘플을 제조하기 위한 용도에서, 추출 및 분석을 위한 관심 형태를 함유하는 샘플 상 영역의 위치 (즉, 라멜라 부위)가 결정된다. 예를 들어, 기관은 반도체 웨이퍼 또는 그의 부분일 수 있고, 추출되는 샘플은 TEM을 사용하여 관찰되는 집적 회로의 일부를 포함할 수 있다. 전형적으로, 기관은 웨이퍼 또는 웨이퍼 조각 상에 참조 표시를 위치시키기 위한 머신 비전(machine vision)을 사용하거나, 또는 비패턴화된 웨이퍼의 엣지(edge) 및 정렬 노치(notch) 또는 플랫폼(flat)를 사용함으로써 조악하게 정렬된다. 별법으로, 라멜라 부위는 이미지 인식 소프트웨어를 사용하여 자동으로 위치될 수 있다. 적합한 이미지 인식 소프트웨어는 코그넥스 코퍼레이션(Cognex Corporation) (미국 메사추세츠주 마티크 소재)으로부터 입수가능하다. 이미지 인식 소프트웨어는 유사한 특징의 샘플 이미지를 사용하거나 또는 CAD 데이터로부터의 기하학적 정보를 사용함으로써 목적하는 라멜라 위치를 위치시키도록 "훈련"될 수 있다. 자동화된 FIB 또는 SEM 계측학이 또한 상기 라멜라 부위를 확인하거나 또는 확인하는 것을 보조하는 데 사용될 수 있다. 계측학은 이미지-기반 패턴 인식, 엣지 발견, ADR, 질량 중심(center-of-mass) 계산 또는 블로브(blob)로 이루어질 수 있다. 목적하는 경우, 기준 표시는 정밀하고 정확한 위치 표시로서 기관 표면으로 밀링될 수 있다.

[0033] 이어서, 샘플을 보호하기 위해 복합 보호 층이 상기 라멜라 부위 상에 증착된다. 제1의 바람직한 구현예에서, IBID 또는 EBID 증착은 2종 이상의 전구체 가스가 동시에 유동하는 다중 가스 주입 시스템을 사용하여 수행될 수 있다. 예를 들어, 증착된 물질이 2종의 개별 성분에게 중간인 특성을 갖는 증착이 수행될 수 있다. 예

를 들어, Pt 및 C 전구체의 혼합물을 사용하여 얻은 IBID 증착은 Pt 및 C 전구체를 개별적으로 사용하여 얻은 특성 사이의 중간인 특성을 갖는 보호 층을 얻도록 수행될 수 있다. 전구체 혼합은 다수의 방법으로 수행될 수 있다. 예를 들어, 단일 가스 노즐 배출구는 개별 화학적 전구체를 함유하는 2개 이상의 용기에 의해 공유될 수 있고, 개별 성분의 상대적 유속은 상기 화학적 전구체 용기 및 상기 배출구 사이에 위치한 펄스용 밸브에 의해 제어될 수 있다.

[0034] 도 9는 본 발명의 구현예를 포함하는 빔 시스템(100)의 도식을 나타낸다. 빔 시스템(100)은 빔 생성 하위시스템, 예컨대 레이저 또는 하전 입자 빔 칼럼에 의해 생성된 빔(110)에 의해 처리하고자 하는 피가공물(106)을 보조하기 위한 샘플 스테이지(104)를 함유하는 샘플 진공 챔버(102)를 포함한다. 예를 들어, 하전 입자 빔 칼럼(112)은 하전 입자 공급원(113), 하나 이상의 집속 렌즈(114), 및 상기 빔(110)을 상기 피가공물 표면 상에 지정된 패턴으로 스캐닝하거나 또는 다르게는 향하게 하기 위한 변류기(116)를 포함한다. 배기 시스템, 예컨대 고진공 터보 펌프(120) 및 배압 펌프(122)의 조합은 처리 동안 샘플 진공 챔버(102)에서 바람직하게는 10^{-3} mbar 미만, 보다 바람직하게는 10^{-4} mbar 미만, 보다 더 바람직하게는 약 10^{-5} mbar 이하의 진공을 유지한다. 배압 펌프(122)는 배기 배출구(124)로 배기한다.

[0035] 가스는 다중 가스 주입 시스템(MGIS) 밸브(132)로부터 연장되는 접이식 니들(130)에 의해 상기 피가공물 표면의 국지 영역으로 공급되며, 이는 하기에 보다 상세히 기재된다. 가스, 예컨대 증착 전구체 가스, 예칭 전구체 가스 또는 불활성 퍼지 가스는 가스 저장소(131)에 저장된다. 상기 용어 "저장소"는 임의의 가스 공급원을 포함하도록 광범위하게 사용된다. 저장소(131)의 일부는 목적하는 가스를 발생시키기 위해, 예를 들어 도가니에서 가열되는 고체 또는 액체 물질을 포함할 수 있으며, 다른 저장소(131)는 압축 가스를 포함할 수 있다. 각각의 저장소(131)는 각각의 저장소(131) 및 MGIS 밸브(132) 사이의 유동 경로에서 조절 밸브(134) 및 중지 밸브(136)를 포함하는 상응하는 도관(133)에 의해 MGIS 밸브(132)로 연결된다. 도 9가 상응하는 도관을 갖는 2개의 저장소를 나타내지만, 본 발명은 임의의 수의 저장소로 제한되지 않는다. 본 발명의 일부 구현예는 6개 이상의 저장소를 사용하지만, 다른 구현예는 단일 가스 공급원을 사용할 수 있다.

[0036] 사전에 정해진 가스 방안이 실행되는 경우, 상기 MGIS 밸브(132) 니들(130)은 연장되며, 처리 가스는 상기 밸브(132)로부터 니들(130)을 통해 하전 입자 빔(110)이 집속되는 지점 근처의 피가공물(106)의 표면으로 유동한다.

[0037] 샘플 스테이지(104)는 상기 피가공물을 상기 하전 입자 빔(110) 및 상기 니들(130) 아래에 위치시키는 데 사용된다. 상기 샘플 진공 챔버 내 니들(130)으로부터의 가스는 결국 터보 펌프(120)에 의해 상기 챔버로부터 펌핑된다. 진공 펌프(138)은 남아있는 가스를 MGIS 진공 밸브(142)가 장착된 MGIS 진공 도관(140)을 통해 상기 MGIS 밸브 내부로부터 제거한다.

[0038] 상기 복합 보호 층에 대한 특정한 방안은 상기 샘플 기관의 물질에 따라 전구체를 특정한 비로 혼합하는 것으로 이루어진다. 바람직하게는, 상기 전구체 중 하나는 상대적으로 연질의 증착 물질을 산출할 것이고, 다른 전구체는 상대적으로 경질의 증착 물질을 산출할 것이다. 따라서, 사용자는 증착 층의 경도가 각각의 개별 전구체의 특성 사이의 어느 것이도록 조정할 수 있다. 상기 전구체는, 상기 보호 층 물질의 스퍼터 속도가 상기 기관 물질의 스퍼터 속도와 일치하여 충분한 박막화를 가능하게 하고, 접면 아티팩트를 방지하도록 하는 비로 혼합된다. 상기 MGIS 전달 하드웨어에서의 밸브의 듀티 사이클은 0% 내지 100%로 연속으로 달라질 수 있다. 따라서, 증착 물질은 개별의 혼합된 전구체 성분의 특성 사이의 중간인 특성을 갖도록 조절될 수 있다. 이는 상이한 기관 물질 및 상이한 용도에 대해 맞춤형된 증착을 허용한다.

[0039] 하나의 예에서, 탄소-백금(C-Pt) 보호 층이 증착된다. C-Pt 전구체는 기관의 물질에 따라 특정한 비로 혼합된다. 이는 도 10 및 11에서 보여지는 바와 같은 등고선 플롯에 표시되어 있는 바와 같이 C-Pt 비를 조절함으로써 달성된다. 도 10에, Pt 전구체(X축) 및 C 전구체(Y축)에 대한 밸브 듀티 사이클의 함수로서의, 수직 증착 성장 속도(nm/sec)의 등고선 플롯(150)이 나타나 있다. 가장 높은 성장 속도는 원(152)에 의해 표시되며, 표준 단일-전구체 물질의 성장 속도는 각각 Pt 및 C에 대해 원(154) 및 원(156)에 의해 표시된다. 도 11에, 상기 Pt 전구체(X축) 및 C 전구체(Y축)에 대한 밸브 듀티 사이클의 함수로서의, 증착된 C-Pt 복합 물질의 스퍼터 속도의 등고선 플롯(160)이 나타나 있다. 표준 단일-전구체 물질의 스퍼터 속도는 각각 Pt 및 C에 대해 원(162) 및 원(164)에 의해 표시된다. 소량의 Pt를 대부분의 C 증착에 첨가 시 원(166)에 의해 표시된 조건은, 예를 들어 개별 성분보다 보호 캡 층으로서 우수한 물질을 유발한다. 상기 층은 Pt 단독보다 훨씬 더 경질이지만, C 단독의 커트닝 효과를 갖지 않는다. 상기 가변적인 듀티 사이클 밸브 제어, 또는 상기 펄스용 밸브의 "사용" 시간%, 및 다중 가스 주입 시스템의 혼합 능력이 이러한 조정을 가능하게 한다. 따라서, 목적하는 "경도"는 도 11에서 등고선 플롯(160)의 상단 좌측에서 저부 우측으로 이동함으로써 달성될 수 있다. 따라서,

사용자는 증착된 층의 경도를 샘플에 맞도록, 특히 샘플 기관의 경도에 일치하도록 맞춤화할 수 있다.

- [0040] 예를 들어, 도 12 내지 14에서 보여지는 바와 같이, 다양한 경도 특성을 갖는 C-Pt 복합 물질 증착이 기관 상에 수행된다. 예를 들어, C-Pt 복합 물질은 C-풍부 복합물 (C 밸브 듀티 사이클 = 80%, Pt 밸브 듀티 사이클 < 2%)을 달성하도록 밸브 듀티 사이클을 연속으로 조절함으로써 기관(200) 상에 형성되어, 도 12에서 보여지는 바와 같은 매우 경질인 보호 층(202) (C 단독만큼 경질이지는 않음)을 유발할 수 있다. 도 13에서 보여지는 바와 같이, C-Pt 복합 물질은 Pt-풍부 복합물 (C 밸브 듀티 사이클 < 2%, Pt 밸브 듀티 사이클 = 80%)을 달성하도록 밸브 듀티 사이클을 연속으로 조절함으로써 기관(206) 상에 형성되어, 매우 연질인 보호 층(208) (Pt 단독만큼 연질이지는 않음)을 유발할 수 있다. 경질 기관 샘플, 예컨대 다이아몬드가 사용되는 경우, 다이아몬드 기관의 경도와 근접하게 일치하는 경도를 갖는 C-풍부 층이 증착될 수 있다. 도 14에서 보여지는 예와 같이, 80%-5% (C 대 Pt)의 MGIS 세팅으로 증착된 C-Pt 물질의 보호 층(212)를 갖는 기관(210)이 순수한 C 또는 순수한 Pt 전구체로 얻어진 층보다 더 선호된다. 80%-5% 비는 단독으로 사용되는 개별 C 또는 Pt보다 더 높은 물질 성장 속도를 갖는다. 또한, 이러한 비는 Pt보다 더 높은 스퍼터 저항력을 갖고, C보다 더 적은 커트닝 아티팩트를 갖는다.
- [0041] 다양한 경도 특성을 갖는 기관에 대해 다른 증착이 얻어질 수 있다. 예를 들어, 중간 듀티 사이클 (예를 들어, 탄소 및 백금 둘 모두에 대해 40%)을 갖는 보호 층은 개별 성분으로 얻어진 특성에 대해 대략 중간인 특성을 가질 것이다. 보다 연질인 기관 특성을 갖는 샘플, 예컨대 유기 수지의 경우, 증착 전구체는 Pt가 풍부하도록 조절될 수 있다.
- [0042] 가능한 듀티 사이클 및 샘플 조합은 50%-50% (C 대 Pt)의 밸브 듀티 사이클을 사용하는 증착 층을 갖는 중간 경질의 규소 기관, 80%-1% (C 대 Pt)의 밸브 듀티 사이클을 사용하는 증착 층을 갖는 경질의 다이아몬드 기관, 및 5%-80% (C 대 Pt)의 밸브 듀티 사이클을 사용하는 증착 층을 갖는 연질의 수지 기관을 포함한다. 상기 전구체는 종래의 MGIS 시스템과도 혼합될 수 있으며, 여기서 상기 전구체의 비는 각각의 작용제의 도가니 온도를 제어함으로써 대략적으로 조절될 수 있다. 그러나, 다수의 듀티 사이클 조합이 가능하고, 이러한 예는 증착된 물질의 경도가 기관 물질의 경도에 일치하도록 연속으로 달라질 수 있음을 예시한다.
- [0043] 상기 기재된 펄스용 밸브 혼합 전략에 더하여, 다른 전구체 전달 방법이 사용될 수 있다. 예를 들어, 개별 전구체 성분의 상대적인 유속은 질량 유량 제어 밸브, 계량 니들 밸브를 사용하거나, 또는 간단히 전구체 용기의 온도를 조절하여 상기 성분의 증기 압력을 조절함으로써 조절될 수 있다. 유속은 또한 상이한 크기의 구멍 (개구)을 사용하거나 또는 상이한 내부 직경을 갖는 배관을 사용함으로써 영향을 받을 수 있다. 최종적으로, 다중 전구체 화학물질을 동일한 용기에서 혼합하는 것이 가능하며, 단일 밸브의 개방이 기기의 진공 챔버 내로 전구체 가스의 혼합물을 수용하도록 한다. 상기 다중-성분 전구체 혼합물을 전달하는 데 사용되는 전달 전략에 관계없이, 전구체 혼합물을 사용하여 상기 혼합물을 생성하기 위한 하드웨어 또는 시스템에 관계없이 증착된 물질 층의 특성을 조정할 수 있다.
- [0044] 전구체 혼합물로부터의 증착 물질 층은 다양한 상이한 용도를 위해 적용될 수 있다. TEM 라멜라 제조에서, 희생 보호 캡의 경도를 조정하는 것은 빔 꼬리로부터의 침식으로 인한 라멜라 파괴를 방지할 수 있고, 접면에서의 단면 절취 아티팩트, 예컨대 커트닝 및 골프-티뿐만 아니라 측벽 경사 변화를 최소화할 수 있다. 복합 물질 증착에 대한 또 다른 용도는 일반적으로 결함 및 경사 변화가 없는 절취면을 갖는 단면 FIB 횡단면을 생성하는 데 사용하기 위한 것이다.
- [0045] 복합 증착 층은 또한 이온 빔 밀링으로 생성된 고-종횡비 구조 (예컨대, 비아)의 밀링된 프로파일을 제어하기 위해 사용될 수 있다. 이는 FIB 나노- 및 마이크로-제조 또는 이온-빔 리소그래피 기술에 유용할 수 있다. 본 출원에서 도 15에서 보여지는 바와 같이, 피가공물(250)은 사용자가 그 위에 고-종횡비 구조, 예컨대 비아(256)를 생성하고자 하는 기관(254) 상에 증착된 얇은 복합 증착 캡핑 물질(252)을 포함한다. 복합 증착에 대한 구체적 방안은 기저 표적 물질보다 "더 경질"이도록 선택되어야 한다. 밀이 초기에 진행될 때, 이온 빔은 상기 경질의 증착 층(252)로 더 깊이 깊이 관통할 것이다. 결국, 상기 밀은 상기 경질의 증착(252) 및 연질의 기저 기관(254) 사이의 접면에 도달할 것이다. 이 지점에서, 밀링 속도가 가장 높은 상기 이온 빔 프로파일의 중심에서만 상기 기저 기관(254)이 밀링되기 시작할 것이다. 상기 기저 기관(254)이 상기 캡핑 물질(252)보다 더 연질이고, 이온 빔 프로파일이 대략 가우스(Gaussian) 프로파일이기 때문에, 상기 연질의 물질(254)은 이온 빔 분포의 강력한 중심에 의해 신속하게 밀링된 한편, 이온 빔의 덜 강력한 "꼬리"는 보다 경질의 캡핑 물질(252)을 관통하지 않았다.
- [0046] 따라서, 보다 연질의 표적 물질 상단 상의 보다 경질의 캡핑 필름의 배열은 이온 밀링 프로브의 형태에 대한 침

예화 효과(sharpening effect)를 갖고, 비캡핑된 기관으로 달성하는 것이 가능할 보다 좁은 치수를 갖는 비아를 얻는 것이 가능하다. 목적하는 경우, 상기 상단 캡핑 필름은 상기 "첨예화된" 고종형비 밀은 뒤에 남기면서 최종 단계에서 제거될 수 있었다. 이는, 예를 들어 규소 기관 상의 경질의 탄소 필름을 사용함으로써 달성될 수 있었고, 상기 탄소 필름은 산소 플라즈마 세척 단계를 이용하여 제거될 수 있었다. 따라서, 상대적으로 좁은 치수 및 평행의 측벽을 갖는 고종형비 구조가 형성될 수 있다.

[0047] 또 다른 예에서, 상기 기저 기관보다 보다 연질인 캡핑 필름을 증착시킴으로써, 면취되거나(chamfered) 또는 테이퍼링된(tapered) 프로파일 (상단에서 나팔 모양으로(flared) 개방됨)을 갖는 비아가 형성될 수 있다. 도 16에서 보여지는 이러한 예에서, 피가공물(260)은 비아(266)을 갖도록 형성된 기저 기관(264)보다 더 연질인 캡핑 층(262)을 갖는 것으로 나타난다. 상기 연질의 캡핑 층(262)에 대한 상기 빔 꼬리의 효과는 캡 없이 밀링된 비아와 비교하여, 보다 측방의 침식을 생성하여, 상기 비아 구조 상단에서의 확연한 확장을 유발할 것이다.

[0048] 도 17은 FIB-밀링된 비아(283)이 생성된 복합 층(282)을 갖는 규소 기관(281)을 포함하는 피가공 샘플(280)의 구현예를 나타내며, 여기서 상기 복합 층(282)은 상기 층의 바닥에서 상단으로 변화하는 "경도"를 갖는다. 이러한 복합 층은 증착 과정 동안 개별 전구체 성분의 듀티 사이클을 조절함으로써 생성될 수 있다. 예를 들어, 증착을 Pt-풍부 혼합물로 시작하고, 증착물이 성장함에 따라 점차적으로 C-풍부 혼합물로 전이함으로써, 연질에서 경질로 (바닥에서 상단으로) 변화하는 Pt-C 복합 층이 증착될 수 있다. 이러한 공정의 밸브 듀티 사이클은 도 18에 그래프(286)에 의해 나타내어져 있다.

[0049] 도 19는 FIB-밀링된 비아(293)이 생성된 복합 층(292)을 갖는 규소 기관(291)을 포함하는 피가공 샘플(290)을 이용한 역 공정을 나타내며, 여기서 상기 복합 층(292)은 상기 층의 바닥에서 상단으로 변화하는 "경도"를 갖는다. 이러한 복합 층은 증착 과정 동안 개별 전구체 성분의 듀티 사이클을 조절함으로써 생성될 수 있다. 예를 들어, 증착을 C-풍부 혼합물로 시작하고, 증착물이 성장함에 따라 점차적으로 Pt-풍부 혼합물로 전이함으로써, 경질에서 연질로 (바닥에서 상단으로) 변화하는 Pt-C 복합 층이 증착될 수 있다. 이러한 공정에 대한 밸브 듀티 사이클은 도 20에 그래프(296)에 의해 나타내어져 있다.

[0050] Pt-C 혼합물이 복합 층의 예로서 논의되었지만, 다른 전구체 조합이 또한 가변적인 물질 특성을 갖는 증착 층을 유발할 수 있음을 이해해야 한다. 예를 들어, 나프탈렌 및 (메틸시클로펜타디에닐) 트리메틸 백금의 전구체를 사용하여 탄소-백금 복합물이 얻어질 수 있다. 나프탈렌 및 $W(CO)_6$ 전구체를 사용하여 탄소-텅스텐 복합물이 얻어질 수 있다. 백금-텅스텐 복합물을 얻기 위해 (메틸시클로펜타디에닐) 트리메틸 백금 및 $W(CO)_6$ 의 전구체가 사용될 수 있고, 나프탈렌, 및 TEOS 또는 TMCTS 또는 HMCHS의 전구체를 사용하여 탄소-SiO_x 복합물이 얻어질 수 있다.

[0051] 유전 증착물의 "경도"를 조절하는 것이 가능하며, 이는 전형적으로 실록산-기재 전구체 및 산화제를 사용하여 수행된다. 높은 농도의 산화제는 완전 포화된 SiO₂ 화학량론을 갖는 증착 층을 유발할 것이지만, 고갈량의 산화제로 증착된 층은 완전 포화되지 않을 것이며, 화학량론 SiO_x ($x < 2$)를 가질 것이다. 임의의 하기 실록산-산화제 조합이 이러한 조정에 적합하다: TEOS (테트라에틸오르토실리케이트) 및 O₂; N₂O를 포함하는 TMCTS (테트라메틸시클로테트라실록산); 및 HMCHS (헥사메틸시클로헥사실록산) 및 물. 그러나, 임의의 상기 실록산은 임의의 상기 산화제와 함께 사용될 수 있다.

[0052] 가변적인 경도를 갖는 유전체 층을 증착시키기 위해 임의의 하기 1차 이온: O⁺, O₂⁺, O₃⁺, N⁺, N₂⁺, H₂O⁺, H₂O₂⁺, N₂O⁺, NO⁺, NO₂⁺를 생성하는 플라즈마 FIB 기기가 잠재적으로 실록산 전구체와 함께 사용될 수 있다. 이러한 경우, 산화제는 상기 1차 빔 중 그 자체일 수 있다. 따라서, 증착된 층은 상기 증착 공정 동안 빔 전류 밀도, 전구체 플럭스(flux) 및/또는 이온 빔 에너지를 조절함으로써, 범위가 완전 포화된 SiO₂ 화학량론에서부터 덜 포화된 SiO_x ($x < 2$) 화학량론까지 이르게 될 수 있다.

[0053] 상기 예는 물질 "경도" 또는 이온 빔으로부터의 스퍼터링에 대한 저항력을 조절하는 것을 논의하지만, 동일한 방법을 사용하여 다른 물질 특성 또한 조절가능함을 이해해야 한다. 예를 들어, 유전체 필름의 저항률은 산화제 농도가 증가함에 따라 증가할 것이다. 따라서, 실록산-산화제 혼합물을 제어함으로써, 사용자는 보다 큰 또는 보다 작은 전기 전도도를 갖는 필름을 증착시킬 수 있다. 증착된 필름의 광학 투과도는 전구체 혼합에 의해 조절될 수 있는 또 다른 특성이다. 또한, 상기 개시된 방법을 사용한 물질 증착은 레이저-보조된 전구체 분해

에 의해 또는 가열된 표면 상에서의 열 분해에 의해 얻어질 수 있다.

- [0054] 본 발명의 제2의 바람직한 구현예에 따르면, 기관, 예컨대 반도체 웨이퍼는 FIB 칼럼 및 SEM 칼럼 둘 모두를 갖는 이중-빔 FIB/SEM 시스템 내로 로딩된다. 전형적인 이중-빔 시스템 구성은 수직 축을 갖는 전자 칼럼 및 상기 수직 축에 대해 기울어진 (통상적으로 대략 52° 의 기울기의) 축을 갖는 이온 칼럼을 포함한다. 이러한 하나의 시스템은 본 발명의 양수인인 에프이아이 컴퍼니(FEI Company) (미국 오리건주 힐스보로 소재)로부터 상업적으로 입수가능한 헬리오스(Helios) 패밀리의 듀얼빔(DualBeam)TM 시스템이다.
- [0055] 도 21은 본 발명을 실시하기에 적합한 전형적인 이중-빔 FIB/SEM 시스템(2110)을 나타낸다. 시스템(2110)은 액체 금속 이온 공급원(2114) 또는 다른 이온 공급원 및 집속 칼럼(2116)이 그 내부에 위치된 상부 목부(upper neck portion)(2112)를 갖는 배기된 인벨로프(envelope)를 포함한다. 전자 빔 및 레이저 시스템뿐만 아니라 다른 유형의 이온 공급원, 예컨대 멀티커스프(multicusp) 또는 다른 플라스마 공급원, 및 다른 광학 칼럼, 예컨대 성형 빔 칼럼이 또한 사용될 수 있다.
- [0056] 이온 빔(2118)은 액체 금속 이온 공급원(2114)로부터 이온 빔 집속 칼럼(2116)을 통해 그리고 편향판(2120)에서 도식적으로 나타내어진 정전기적 편향 도구들 사이로 기관 또는 피가공물(2122) (이는, 예를 들어 저부 챔버(2126) 내 스테이지(2124) 상에 위치된 반도체 장치를 포함함) 쪽으로 통과한다. 스테이지(2124)는 또한 하나 이상의 TEM 샘플 홀더를 지지하여, 샘플이 상기 반도체 장치로부터 추출되어 TEM 샘플 홀더로 이동할 수 있도록 할 수 있다. 스테이지(2124)는 바람직하게는 수평면 (X축 및 Y축)으로 그리고 수직으로 (Z축) 이동할 수 있다. 일부 시스템에서, 스테이지(2124)는 또한 대략 60° 기울어지며, Z축 주위를 회전할 수 있다. 시스템 제어기(2119)는 FIB 시스템(2110)의 다양한 부분의 작동을 제어한다. 시스템 제어기(2119)를 통해, 사용자는 이온 빔(2118)이 종래의 사용자 인터페이스 (제시되지 않음)로 입력되는 명령을 통해 목적하는 방식으로 스캐닝되도록 제어할 수 있다. 별법으로, 시스템 제어기(2119)는 컴퓨터 판독가능한 메모리, 예컨대 RAM, ROM, 또는 자기 또는 광학 디스크에 저장된 프로그래밍된 지시사항에 따라 FIB 시스템(2110)을 제어할 수 있다. 상기 메모리는 상기 기재된 방법을 자동화 또는 반-자동화된 방식으로 수행하기 위한 지시사항을 저장할 수 있다. SEM으로부터의 이미지는, 처리를 계속해야 하는 시점, 처리를 중단해야 하는 시점 및 밀링을 위한 상기 빔을 위치시키는 위치를 결정하기 위한 소프트웨어에 의해 인식될 수 있다.
- [0057] 예를 들어, 사용자는 위치지정(pointing) 장치를 사용하여 관심 영역을 디스플레이 스크린 상에 기술할 수 있고, 이어서 상기 시스템은 샘플을 추출하기 위한 하기 기재된 단계들을 자동으로 수행할 수 있다. 일부 구현예에서, FIB 시스템(2110)은 관심 영역을 자동으로 확인하기 위해 이미지 인식 소프트웨어, 예컨대 코그넥스 코포레이션 (미국 메사추세츠주 마티크 소재)으로부터 상업적으로 입수가능한 소프트웨어를 포함하며, 이어서 상기 시스템은 본 발명에 따라 샘플을 수동으로 또는 자동으로 추출할 수 있다. 예를 들어, 상기 시스템은 다수의 장치를 포함하는 반도체 웨이퍼 상에 유사한 형태를 자동으로 위치시킬 수 있으며, 이러한 형태의 샘플을 상이한 (또는 동일한) 장치 상으로 가지고 간다.
- [0058] 상부 목부(2112)를 배기시키기 위해 이온 펌프(2128)이 이용된다. 저부 챔버(2126)은 진공 제어기(2132)의 제어 하에 터보 분자식 및 기계식 펌핑 시스템(2130)을 사용하여 배기된다. 상기 진공 시스템은 저부 챔버(2126) 내에 대략 1×10^{-7} Torr (1.3×10^{-7} mbar) 내지 5×10^{-4} Torr (6.7×10^{-4} mbar)의 진공을 제공한다. 상기 증착 전구체 가스의 경우, 또는 에칭-보조 가스 또는 에칭-억제 가스가 사용되는 경우, 상기 챔버 배경 압력은 전형적으로 약 1×10^{-5} Torr (1.3×10^{-5} mbar)로 상승할 수 있다.
- [0059] 고전압 전원장치(2134)는 대략 1 keV 내지 60 keV 이온 빔(2118)을 형성하고, 이를 샘플 쪽으로 향하게 하도록 액체 금속 이온 공급원(2114)뿐만 아니라 이온 빔 집속 칼럼(2116) 내 적절한 전극에 연결된다. 패턴 발생기(2138)에 의해 제공되는 소정의 패턴에 따라 작동되는 편향 제어기 및 증폭기(2136)은 편향판(2120)에 연결되며, 이에 의해 패턴 발생기(2138)에 의해 제공된 이온 빔(2118)은 편향판(2120)에 연결되며, 이에 의해 이온 빔(2118)은 피가공물(2122)의 상부 표면 상의 상응하는 패턴의 흔적을 찾도록 수동으로 또는 자동으로 제어될 수 있다. 일부 시스템에서, 상기 편향판은 당업계에 널리 공지되어 있는 바와 같이 최종 렌즈 전에 위치된다. 이온 빔 집속 칼럼(2116) 내의 빔 블랭킹 전극(beam blanking electrode) (제시되지 않음)은, 블랭킹 제어기 (제시되지 않음)가 상기 블랭킹 전극에 블랭킹 전압을 가하는 경우 이온 빔(2118)이 표적(2122) 대신에 블랭킹 개구 (제시되지 않음) 상에 충격을 주도록 한다.
- [0060] 상기 액체 금속 이온 공급원(2114)는 전형적으로 갈륨 금속 이온 빔을 제공한다. 상기 공급원은 상기 피가공물(2122)를 이온 밀링, 증진된 에칭, 물질 증착에 의해 개질하기 위해 또는 상기 피가공물(2122)의 이미지화를 목

적으로, 전형적으로 피가공물(2122)에 10^{-1} 마이크로미터 너비 빔으로 집속될 수 있다. 목적하는 경우, 하전 입자 검출기(2140)은 드라이브 신호를 비디오 모니터(2144)에 공급하는 비디오 회로(2142)에 연결되어 2차 이온 또는 전자 방출을 검출하고, 편향 신호를 제어기(2119)로부터 받도록 사용될 수 있다.

[0061] 저부 챔버(2126) 내의 하전 입자 검출기(2140)의 위치는 다양한 구현예에서 달라질 수 있다. 예를 들어, 하전 입자 검출기(2140)은 이온 빔과 동축일 수 있으며, 이온 빔이 통과하도록 하기 위한 홀을 포함한다. 다른 구현예에서, 최종 렌즈를 통해 2차 입자가 수집된 다음, 수집을 위한 축에서 벗어나 우회될 수 있다. 주사 전자 현미경 (SEM)(2141)은 그의 전원장치 및 제어기(2145)와 함께 임의로 상기 FIB 시스템(2110)과 함께 제공된다.

[0062] 가스 전달 시스템(2146)은 가스 증기를 피가공물(2122) 쪽으로 도입하고 향하게 하기 위해 저부 챔버(2126)로 연장된다. 본 발명의 양수인에게 양도된 미국 특허 제5,851,413호 (Casella et al., "Gas Delivery Systems for Particle Beam Processing")는 적합한 가스 전달 시스템(2146)을 기재한다. 또 다른 가스 전달 시스템은 본 발명의 양수인에게 또한 양도된 미국 특허 제5,435,850호 (Rasmussen, "Gas Injection System")에 기재되어 있다. 예를 들어, 에칭을 증진시키기 위해 아이오딘이 전달될 수 있거나, 또는 금속을 증착시키기 위해 금속 유기 화합물이 전달될 수 있다.

[0063] 미세조작기(2147), 예컨대 본 발명의 양수인인 에프이아이 (미국 오리건주 힐스보로 소재)로부터의 이지리프트 (EasyLift) 미세조작기는 상기 진공 챔버 내에서 물체를 정밀하게 이동시킬 수 있다. 미세조작기(2147)은 상기 진공 챔버 내에 위치된 부분(2149)의 X, Y, Z 및 세타 제어를 제공하기 위한 상기 진공 챔버 외부에 위치된 정밀 전동기(2148)을 포함할 수 있다. 상기 미세조작기(2147)은 작은 물체를 조작하기 위한 상이한 엔드 이펙터 (end effector)를 구비할 수 있다. 하기 기재된 구현예에서, 상기 엔드 이펙터는 얇은 프로브(2150)이다. 상기 얇은 프로브(2150)은, 전하를 상기 프로브(2150)에 가하여 샘플과 상기 프로브 사이의 인력을 제어하기 위한 시스템 제어기(2119)에 전기적으로 연결될 수 있다.

[0064] 도어(2160)은 피가공물(2122)를 X-Y 스테이지(2124) (이는 가열 또는 냉각될 수 있음) 상에 삽입하기 위해, 그리고 또한 사용되는 경우 내부 가스 공급 저장소를 제공하기 위해 개방된다. 상기 도어는 상기 시스템이 진공 하에 있는 경우 개방될 수 없도록 연동(interlocking)된다. 일부 구현예에서, 대기 웨이퍼 취급 시스템이 이용될 수 있다. 상기 고전압 전원장치는 이온 빔(2118)의 동력을 공급하고 집속하기 위해 이온 빔 집속 칼럼(2116) 내 전극에 적절한 가속 전압을 제공한다. 이온 빔이 피가공물(2122)에 부딪히는 경우, 물질이 상기 샘플로부터 스퍼터, 즉 물리적으로 분사된다. 별법으로, 이온 빔(2118)은 물질을 증착시키기 위해 전구체 가스를 분해할 수 있다. 집속 이온 빔 시스템은, 예를 들어 본 출원의 양수인인 에프이아이 컴파니 (미국 오리건주 힐스보로 소재)로부터 상업적으로 입수가 가능하다. 적합한 하드웨어의 예가 상기 제공되었지만, 본 발명은 임의의 특정한 유형의 하드웨어에서 실행되는 것으로 제한되지 않는다.

[0065] 이러한 구현예에서, 물질 증착은 2개 이상의 별개 층의 보호 캡핑 물질을 형성함으로써 수행될 수 있다. 사용자는 처음에 "보다 연질"인 물질이 기저 기관과 직접 접촉되게 증착시키도록 선택할 수 있고, 이어서 두번째로 "보다 경질"인 층이 상기 제1 층의 상단에 증착될 수 있다. 보다 경질의 상단 층은 이온 빔으로부터의 침식에 견딜 것이며, 보다 연질의 바닥 층은 단면 절취 아티팩트를 방지할 것이다. 특히, 상기 바닥 층이 상기 기저 물질의 스퍼터 속도에 일치하도록 선택될 수 있는 경우, 단면 절취 아티팩트의 위험이 최소화될 수 있다. 다른 경우, 처음에 보다 경질의 물질이 증착되고, 이어서 보다 연질의 물질이 증착되도록 상기 순서는 역전될 수 있다. 이러한 배열은 FIB가 경질의 물질, 예컨대 다이아몬드, 탄소 또는 탄화규소를 밀링하는 경우에 선호될 수 있다.

[0066] 예를 들어, 도 22에서 보여지는 바와 같이, 라멜라 기관(1200)은 관심 영역이 일반적으로 위치되는 상단 표면 근처의 상기 기관(1200)의 상부 영역에 대한 손상을 방지하기 위해, 바람직하게는 전자 빔 유도 증착 (EBID)을 사용하여 처음에 기관(1200)의 상단 표면 상에 증착되는 바닥 층(1202)를 갖는 물질의 보호 층을 갖는다. 별법은 낮은 에너지 (<8 keV)의 IBID를 사용하는 것이며, 이는 또한 상기 상단 표면에 대한 매우 낮은 손상을 유발한다. 일부 공정에서, EBID보다는, 낮은 에너지의 FIB 증착이 사용된다. 이러한 제1 바닥 층 물질(1202)는 특히 10 내지 45도 벗어난 경사각(glancing angle) 작동 체제의 <5kV FIB에서 상기 기관(1200) 물질의 에칭 속도에 가능한 한 근접하게 일치하도록 선택된다. 규소 (Si)-기재 샘플의 경우, 이러한 바닥 층(1202)는 바람직하게는 산화규소 물질 유형, 예컨대 TEOS (IDEP), TEOS+H₂O (IDEP2), TEOS+O₂, HMCHS, HMCHS+O₂ (IDEP3), HMCHS/H₂O 및 HMCHS/N₂O, TMCTS, TMCTS+O₂, 및/또는 TMCTS/H₂O, TMCTS/N₂O이다. 이어서, 상단 층 물질(1204)는 이온 빔 유도 증착 (IBID)을 사용하여 상기 바닥 층(1202)의 상단 상에 증착된다. 상기 상단 층 물질(1204)는

상기 기관(1200) 물질보다 더 낮은 에칭 속도를 갖도록 선택되어 라멜라 박막화 공정 동안 보호를 제공하고, 아티팩트가 샘플의 외부 표면 상에 형성되는 것을 방지한다.

[0067] 목적하는 경우, 1개 초과 상단 층이 증착될 수 있다. 상기 상단 층 또는 층들은 바람직하게는 텅스텐, 탄소 또는 백금이다. 예로서, 탄소는 저-kV FIB 밀링에 대한 우수한 저항력을 가지며, 이는 탁월한 보호에 기여하지만, 라멜라를 휘어지게 할 수 있는 상당한 내부 응력을 갖는다. 따라서, 순수한 탄소 층은 바람직하지 않다. 그러나, 도 23에서 보여지는 바와 같이, 기관(1300)은 도 22에 관하여 논의된 층(1202)와 유사한 물질의 바닥 층(1302)을 포함하는 보호 층을 갖는다. 보다 두꺼운 텅스텐 층(1306) (예를 들어, 400 nm 정도)의 상단 상의 얇은 탄소 층(1304) (예를 들어, 30 kV 처리 후의 100 nm C 층)은 텅스텐 단독보다 양호하게 저-kV FIB 조사를 견뎌낼 것이고, 상기 텅스텐은 라멜라에 대한 강성을 제공할 것이다. 라멜라 측벽에 대한 상기 FIB 빔의 각인 35°의 방목 범위에서, 규소 기관 에칭 속도는 텅스텐과 비교하여 극적으로 증가하며, 이는 전형적으로 샘플 표면 아래의 수백 nm 영역보다 훨씬 더 두꺼운 라멜라 상단부를 만드는 골프-티 효과를 유발한다. 규소 및 텅스텐의 각-의존성 스퍼터 속도의 정성적 플롯은 하기 표에서 알 수 있다.

[0068] 하기 표 1 및 2는 5 kV 갈륨 이온으로부터의 스퍼터 및 부피 수율을 나타낸다. 표 1 및 2로부터의 데이터는 도 27a 및 27b에 도표화된다.

표 1

[0069]

각	스퍼터 수율 (SRIM)		부피 수율, nm ³ /이온	
	Si	W	Si	W
45	4.08	6.82	6.44E-05	1.37E-04
50	5.01	7.07	7.90E-05	1.42E-04
55	6.46	7.14	1.02E-04	1.43E-04
60	8.14	7.24	1.28E-04	1.45E-04
62	8.87	7.17	1.40E-04	1.44E-04
64	9.4	7.6	1.48E-04	1.53E-04
66	10.08	7.53	1.59E-04	1.51E-04
68	10.99	7.54	1.73E-04	1.51E-04
70	11.6	7.44	1.83E-04	1.49E-04
75	12.94	7.29	2.04E-04	1.46E-04
80	13.22	6.55	2.09E-04	1.32E-04
82	12.63	6.1	1.99E-04	1.23E-04
84	12.09	5.65	1.91E-04	1.14E-04
85	11.47	5.47	1.81E-04	1.10E-04
86	10.68	5.04	1.69E-04	1.01E-04
87	9.992	4.72	1.58E-04	9.48E-05

표 2

[0070]

각	45°에서 Si에 대한 스퍼터 속도	
	Si	W
45	1.00	2.13
40	1.23	2.21
35	1.58	2.23
30	2.00	2.26
28	2.17	2.24
26	2.30	2.37
24	2.47	2.35
22	2.69	2.35
20	2.84	2.32
15	3.17	2.28
10	3.24	2.04
8	3.10	1.90
6	2.96	1.76
5	2.81	1.71
4	2.62	1.57

3	2.45	1.47
---	------	------

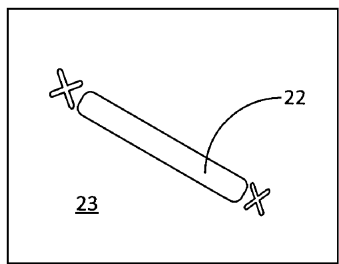
- [0071] 다층 증착 전략의 또 다른 구현예에서, 다수의 층이 교대의 구성으로 증착될 수 있다. 상이한 증착 물질의 다수 층의 적층은 평균으로서 2종의 개별 성분의 중간의 특성을 갖는 층을 유발할 수 있다. 개별 성분의 두께뿐만 아니라 층의 총 수를 조절함으로써, 사용자는 층의 목적하는 특성을 달성하기 위한 어느 정도의 조정가능성을 달성할 수 있다. 전형적으로, 목적하는 필름 특성은 개별 성분의 중간이다. 예를 들어, 특정 용도에 대해 백금이 너무 연질이고, 탄소가 너무 경질인 경우, 개별 성분 중 어느 하나의 균질 층보다, 교대의 백금 및 탄소 증착물의 다층 증착이 선호될 수 있다.
- [0072] 도 24는 기관(1400)이 물질(1404, 1406)의 교대 층을 갖는 보호 층(1402)를 포함하는 물질 증착의 구현예를 나타내며, 여기서 상기 보호 층 물질(1402)의 에칭 속도는 별개의 가스 화학을 사용하여 상기 물질(1404, 1406)의 교대의 얇은 층을 증착시킴으로써 "조정"되며, 이는 상기 개별 성분의 에칭 속도 사이인 에칭 속도를 갖는 교대의 "파르페-유사" 거대구조를 형성한다.
- [0073] 도 25는 기관(1500)의 상단과, SEM 증착된 산화규소 층(1506) 및 텅스텐의 상단 층(1508)인 희생 보호 층(1502) 사이의 윤곽묘사의 시각적 관찰을 위한, 텅스텐 층(1504)를 포함하는 별개 층의 희생 보호 층(1502)를 갖는 기관(1500)의 이미지를 나타낸다. 알 수 있는 바와 같이, 박막화 후에 "골프 티" 효과가 상기 희생 보호 층(1502) 내에 발생하지만, 기관(1500) 내에는 발생하지 않는다.
- [0074] 도 26은 EBID TEOS 층, IBID 텅스텐 층 및 IBID 탄소 층을 갖는 규소 라멜라를 나타낸다.
- [0075] 도 12 내지 16의 상기 구현예에서, 기관 샘플에 유사한 에칭 속도를 갖는 희생 보호 층은 골프-티를 상기 보호 층 내 위로 그리고 관찰 및 분석용 관심 영역을 포함하는 기관의 상단으로부터 떨어져 이동시킨다.
- [0076] 도 28에서 보여지는 바와 같이, 본 발명은 (1600)에서 샘플이 선택된 빔 시스템 내로 로딩되는 물질 증착 방법을 제공한다. 물질 증착을 위해 적어도 2종의 전구체 가스가 제공된다(1602). 결정 블록(1604)에서, 물질을 별개 층으로 또는 복합 층으로서 증착시킬지 결정된다. 별개 층이 증착되는 경우(1606), 제1 층이 샘플 상에 증착(1608)된 다음, 또 다른 층이 증착(1610)된다. 오직 2개의 층만을 증착하고자 하는 경우, 종료(1612)로의 결정은 (1616)에서 결정되고, 상기 프로세스는 완료(1618)된다. 2개 초과 층을 증착하고자 하는 경우, 종료(1614)로의 결정이 이루어지고, 상기 프로세스는 블록(1608)로 복귀하고, 종료로 결정(1616)되어 상기 프로세스를 완료(1618)할 때까지 지속된다. 복합 층을 증착하고자 하는 경우(1620), 상기 결정된 방안에 따라 적어도 2종의 전구체 가스가 혼합(1622)되고, 상기 복합 층이 상기 샘플 상에 증착(1624)되고, 상기 프로세스는 종료(1626)된다.
- [0077] 본 발명의 일부 구현예는
- [0078] 전구체 가스를 피가공물 표면에 제공하는 단계;
- [0079] 하전 입자 빔을 기관 쪽으로 향하게 하여 상기 전구체 가스로부터 상이한 스피터 속도를 갖는 적어도 2종의 상이한 물질로 구성된, 관심 영역 위의 보호 층의 증착을 유도하는 단계; 및
- [0080] 하전 입자 빔을 상기 기관 쪽으로 향하게 하여 상기 보호 층을 통과하며 밀링하여 상기 보호 층 아래의 상기 관심 영역을 노출시키는 단계
- [0081] 를 포함하는, 관찰을 위해 관심 영역을 노출시키기 위한 피가공물의 하전 입자 빔 처리 방법을 제공한다.
- [0082] 일부 구현예에서, 전구체 가스를 피가공물 표면에 제공하는 단계, 및 하전 입자 빔을 기관 쪽으로 향하게 하여 상기 전구체 가스로부터 보호 층의 증착을 유도하는 단계는
- [0083] 제1 전구체 가스를 상기 피가공물 표면에 제공하는 단계;
- [0084] 하전 입자 빔을 상기 기관 쪽으로 향하게 하여 상기 제1 전구체 가스로부터 제1 스피터 속도를 갖는 제1 물질의 증착을 유도하는 단계;
- [0085] 제2 전구체 가스를 상기 피가공물 표면에 제공하는 단계; 및
- [0086] 상기 하전 입자 빔을 상기 기관 쪽으로 향하게 하여 제2 전구체 가스로부터 제2 스피터 속도를 갖는 제2 물질의 상기 제2 전구체 가스로부터의 증착을 유도하는 단계;

- [0087] 이에 따라 상기 제1 물질 층 및 상기 제2 물질 층을 갖는 보호 층을 제조하는 단계
- [0088] 를 포함한다.
- [0089] 일부 구현예에서, 상기 제1 물질은 산화규소를 포함한다.
- [0090] 일부 구현예에서, 상기 제2 물질은 텅스텐, 탄소 또는 백금을 포함한다.
- [0091] 일부 구현예에서, 상기 보호 층은 교대의 물질 층을 포함한다.
- [0092] 일부 구현예에서, 하전 입자 빔을 상기 기관 쪽으로 향하게 하여 상기 보호 층을 통과하며 밀링하여 상기 보호 층 아래의 상기 관심 영역을 노출시키는 단계는 200 nm 미만의 두께를 갖는 라멜라를 제조하는 단계를 포함한다.
- [0093] 일부 구현예에서, 상기 제1 물질의 스퍼터 속도는 상기 피가공물의 스퍼터 속도에 일치하고, 상기 제2 물질의 스퍼터 속도는 상기 피가공물의 스퍼터 속도보다 더 낮다.
- [0094] 일부 구현예에서, 전구체 가스를 상기 피가공물 표면 보호 층에 제공하는 단계는 다중 가스 종의 혼합물을 제공하는 단계를 포함한다.
- [0095] 일부 구현예에서, 상기 다중 가스 종의 혼합물은 백금 전구체 및 탄소 전구체의 혼합물을 포함한다.
- [0096] 일부 구현예에서, 상기 다중 가스 종의 혼합물은 백금 전구체 및 산화규소 전구체의 혼합물을 포함한다.
- [0097] 일부 구현예에서, 상기 다중 가스 종의 혼합물 중의 상기 다중 가스 종의 상대적인 양은 상기 보호 층의 증착 동안 변화하며, 이에 따라 상기 보호 층의 상이한 깊이에서 상이한 조성을 갖는 보호 층을 제공한다.
- [0098] 일부 구현예에서, 상기 피가공물 표면에서의 상기 보호 층의 부분은 상기 보호 층의 상단 부분보다 더 연질이다.
- [0099] 일부 구현예에서, 하전 입자 빔을 상기 기관 쪽으로 향하게 하여 상기 보호 층을 통과하며 밀링하여 상기 보호 층 아래의 상기 관심 영역을 노출시키는 단계는 주사 전자 현미경 상에서의 관측을 위한 상기 피가공물 일부의 횡단면을 제조하는 단계를 포함한다.
- [0100] 일부 구현예는
- [0101] 이온 빔 공급원을 포함하는 이온 빔 시스템;
- [0102] 이온 빔을 기관 상에 집속시키기 위한 이온 광학 칼럼;
- [0103] 전구체 가스를 피가공물 표면에 제공하기 위한 가스 공급원;
- [0104] 집속 이온 빔 시스템을 저장된 지시사항에 따라 제어하기 위한 프로세서; 및
- [0105] 상기 기재된 방법을 수행하기 위한 컴퓨터 지시사항을 저장하는 컴퓨터-판독가능한 메모리
- [0106] 를 포함하는, 피가공물을 분석하기 위한 집속 이온 빔 시스템을 제공한다.
- [0107] 상기 기재가 보호 층의 증착에 관한 것이며, 이 방법은 주로 견고하고 반복가능하여 자동화에 적합하지만, 상기 방법의 조작을 수행하는 장치가 추가로 본 발명의 범주 내에 있을 수 있음을 인식해야 한다. 상기 물질 증착 방법이 이중-빔 시스템을 사용하여 수행되는 것으로서 기재되었지만, 본원에 기재된 상기 물질 증착 방법은 임의의 이온 극성의 표준-단독 SEM 시스템 또는 표준-단독 FIB 시스템에 의해 수행될 수 있음을 이해해야 한다. 대부분의 빔 증착물은 완전히 순수하지 않고, 스퍼터 경도의 이론적 모델로부터의 편차를 유발할 수 있는 "불순물", 예컨대 전구체 단편, 탄화수소 혼입, 공극 및 밀도 변형을 함유할 수 있음을 또한 이해해야 한다. 또한, 본 발명의 구현예는 컴퓨터 하드웨어 또는 소프트웨어, 또는 이 둘 모두의 조합을 통해 실행될 수 있음을 인식해야 한다. 상기 방법은 컴퓨터 프로그램으로 구성된 컴퓨터-판독가능한 기억 매체 (여기서 기억 매체는 컴퓨터가 특정의 사전정의된 방식으로 작동하도록 구성됨)를 포함하는 표준 프로그래밍 기술을 사용하는 컴퓨터 프로그램으로 본 명세서에 기재된 상기 방법 및 도면에 따라 실행될 수 있다. 각각의 프로그램은 컴퓨터 시스템과 통신하기 위한 높은 수준의 절차적 또는 객체 지향 프로그래밍 언어로 실행될 수 있다. 그러나, 상기 프로그램은 목적하는 경우 어셈블리(assembly) 또는 기계 언어로 실행될 수 있다. 임의의 경우에, 상기 언어는 편집되거나 또는 해석된 언어일 수 있다. 게다가, 상기 프로그램은 그러한 목적으로 프로그래밍된 전용 집적 회로 상에서 실행될 수 있다.

- [0108] 본 발명의 바람직한 방법 또는 장치는 다수의 신규한 측면을 갖고, 본 발명은 상이한 목적으로 상이한 방법 또는 장치로 구현될 수 있기 때문에, 모든 측면이 모든 구현예에 존재할 필요가 있는 것은 아니다. 게다가, 상기 기재된 구현예의 다수의 측면은 개별적으로 특허성이 있을 수 있다. 본 발명은 넓은 적용가능성을 갖고, 상기 예에 기재되고 제시된 바와 같은 다수의 이점을 제공할 수 있다. 상기 구현예는 구체적인 용도에 따라 크게 달라질 것이고, 모든 구현예가 본 발명에 의해 달성가능한 이점 모두를 제공하고 목적 모두를 충족시키지는 않을 것이다.
- [0109] 본 발명의 구현예가 컴퓨터 하드웨어, 하드웨어 및 소프트웨어 둘 모두의 조합을 통해, 또는 비-일시적인 컴퓨터-판독가능한 메모리에 저장된 컴퓨터 지시사항에 의해 실행될 수 있음을 인식해야 한다. 상기 방법은 컴퓨터 프로그램으로 구성된 비-일시적인 컴퓨터-판독가능한 기억 매체 (여기서 상기 기억 매체는 컴퓨터가 특정의 사전정의된 방식으로 작동하도록 구성됨)를 포함하는 표준 프로그래밍 기술을 사용하는 컴퓨터 프로그램으로 본 명세서에 기재된 방법 및 도면에 따라 실행될 수 있다. 각각의 프로그램은 컴퓨터 시스템과 통신하기 위한 높은 수준의 절차적 또는 객체 지향 프로그래밍 언어로 실행될 수 있다. 그러나, 상기 프로그램은 목적하는 경우 어셈블리 또는 기계 언어로 실행될 수 있다. 임의의 경우에, 상기 언어는 편집되거나 또는 해석된 언어일 수 있다. 게다가, 상기 프로그램은 그러한 목적으로 프로그래밍된 전용 집적 회로 상에서 실행할 수 있다.
- [0110] 또한, 방법론은, 하전 입자 도구 또는 다른 이미지화 장치 등과 분리되거나, 이에 내장되거나 또는 이와 접속된 컴퓨터 플랫폼인 개인용 컴퓨터, 미니-컴퓨터, 본체(main-frame), 워크스테이션(workstation), 네트워킹 또는 분산 컴퓨팅 환경을 포함하나 이에 제한되지 않는 임의의 유형의 컴퓨팅 플랫폼(computing platform)으로 실행될 수 있다. 본 발명의 측면은 제거가능하거나 또는 상기 컴퓨팅 플랫폼, 예컨대 하드 디스크, 광학 판독 및/또는 기록 기억 매체, RAM, ROM 등에 내장되었는지 여부에 관계없이 비-일시적인 기억 매체 또는 장치 상에 저장된 기계 판독가능한 코드로 실행될 수 있으며, 이에 따라 이는 상기 기억 매체 또는 장치가 컴퓨터에 의해 판독되는 경우 본원에 기재된 절차를 수행하도록 상기 컴퓨터를 구성 및 작동하도록, 프로그래밍가능한 컴퓨터에 의해 판독가능하다. 게다가, 기계-판독가능한 코드 또는 이의 일부는 유선 또는 무선 네트워크 상에서 전송될 수 있다. 본원에 기재된 본 발명은, 이러한 매체가 상기 기재된 단계를 실행하기 위한 지시사항 또는 프로그램을 마이크로프로세서 또는 다른 데이터 프로세서와 함께 함유하는 경우 상기 및 다른 다양한 유형의 비-일시적 컴퓨터-판독가능한 기억 매체를 포함한다. 본 발명은 또한 본원에 기재된 방법 및 기술에 따라 프로그래밍되는 경우 상기 컴퓨터 그 자체를 포함한다.
- [0111] 상기 용어 "피가공물", "샘플", "기관" 및 "시료"는 달리 명시되지 않는 한 본 출원에서 상호교환가능하게 사용된다. 또한, 용어 "자동의", "자동화된" 또는 유사 용어가 본원에 사용되는 경우마다, 이러한 용어는 상기 자동의 또는 자동화된 프로세스 또는 단계의 수동적인 작동을 포함하는 것으로 이해될 것이다.
- [0112] 하기 논의 및 청구범위에서, 용어 "포함하는(including)" 및 "포함하는(comprising)"은 개방형(open-ended) 방식으로 사용되며, 따라서 ". . .을 포함하나, 이에 제한되지 않는"을 의미하는 것으로 해석되어야 한다. 임의의 용어가 본 명세서에서 특별하게 정의되지 않는 정도로, 그 의도는 용어를 그의 보통의 일상적인 의미로 제공하고자 함이다. 첨부되는 도면은 본 발명의 이해를 보조하도록 의도되며, 달리 명시되지 않는 한, 스케일로 도시되지 않는다. 본 발명을 수행하기에 적합한 입자 빔 시스템은, 예를 들어 본 출원의 양수인인 에프이아이 컴파니로부터 상업적으로 입수가 가능하다.
- [0113] 본 발명 및 이의 이점이 상세히 기재되었지만, 첨부되는 청구범위에 의해 정의된 바와 같은 본 발명의 범주를 벗어나지 않으면서 다양한 변화, 치환 및 변경이 본원에 기재된 상기 구현예에 이루어질 수 있음을 이해해야 한다. 더욱이, 본 출원의 범주는 본 명세서에 기재된 프로세스, 기계, 제조, 물질의 조성, 수단, 방법 및 단계의 특정한 구현예에 제한되는 것으로 의도되지 않는다. 통상의 기술자가 본 발명의 개시내용을 쉽게 인식할 것처럼, 본원에 기재된 상응하는 구현예와 실질적으로 동일한 기능을 수행하거나 또는 실질적으로 동일한 결과를 달성하는, 현존하거나 또는 후에 개발될 프로세스, 기계, 제조, 물질의 조성, 수단, 방법 또는 단계는 본 발명에 따라 이용될 수 있다. 따라서, 첨부되는 청구범위는 그의 범주 내에 이러한 프로세스, 기계, 제조, 물질의 조성, 수단, 방법 또는 단계를 포함하도록 의도된다.

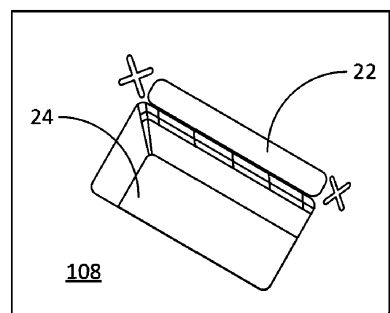
도면

도면1



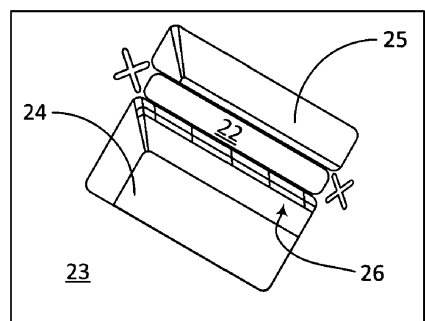
선행 기술

도면2



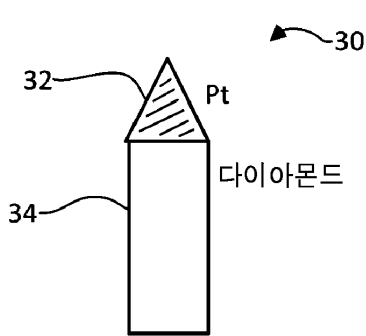
선행 기술

도면3



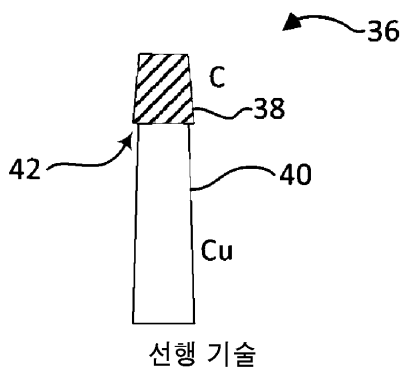
선행 기술

도면4

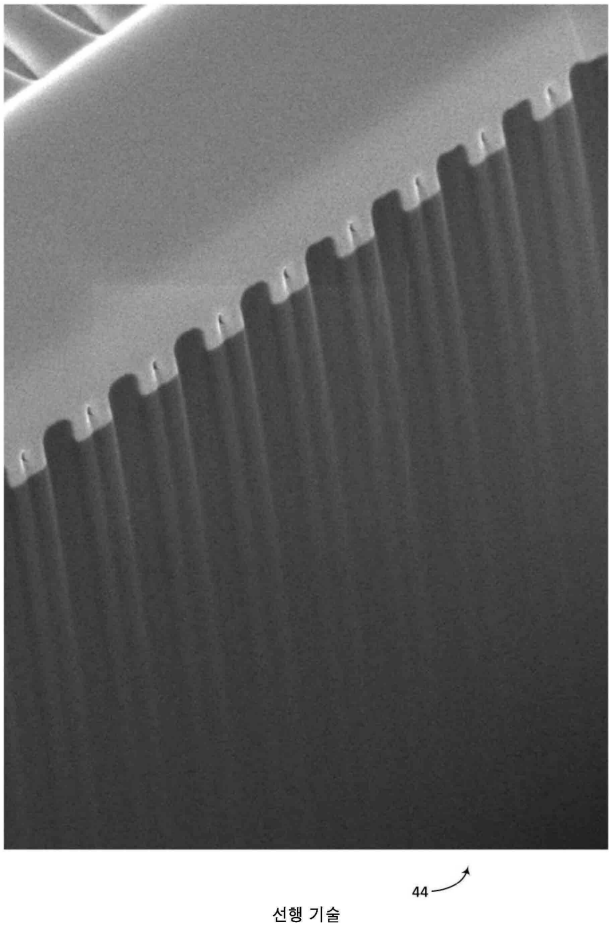


선행 기술

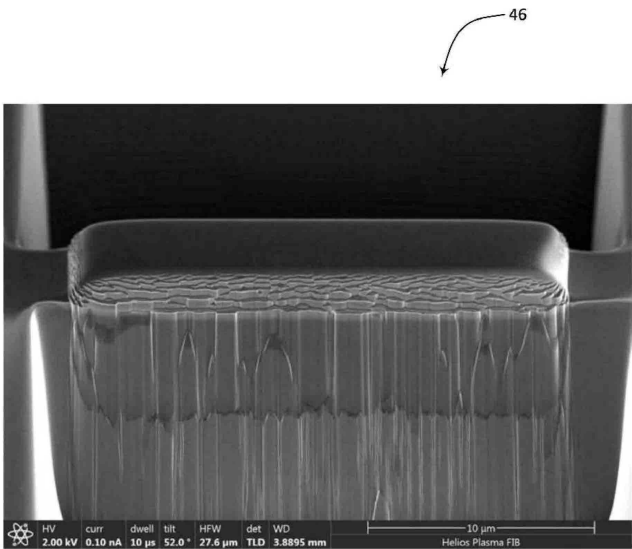
도면5



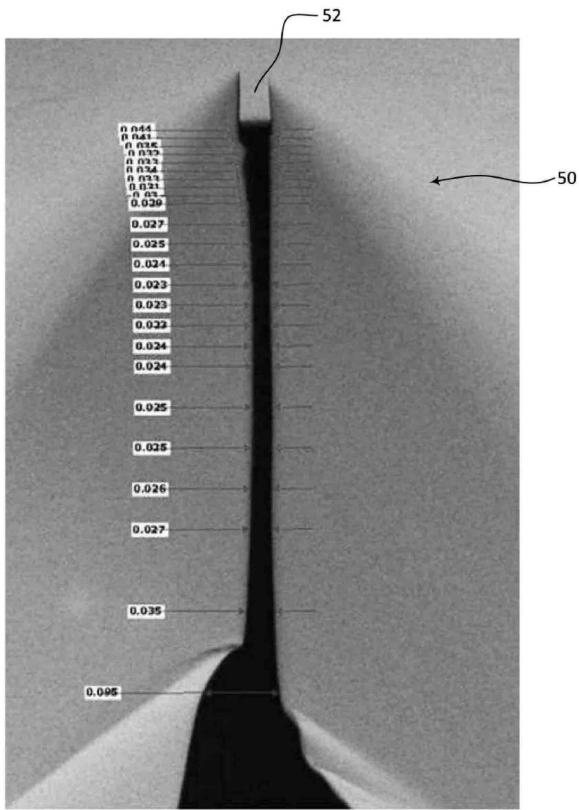
도면6



도면7

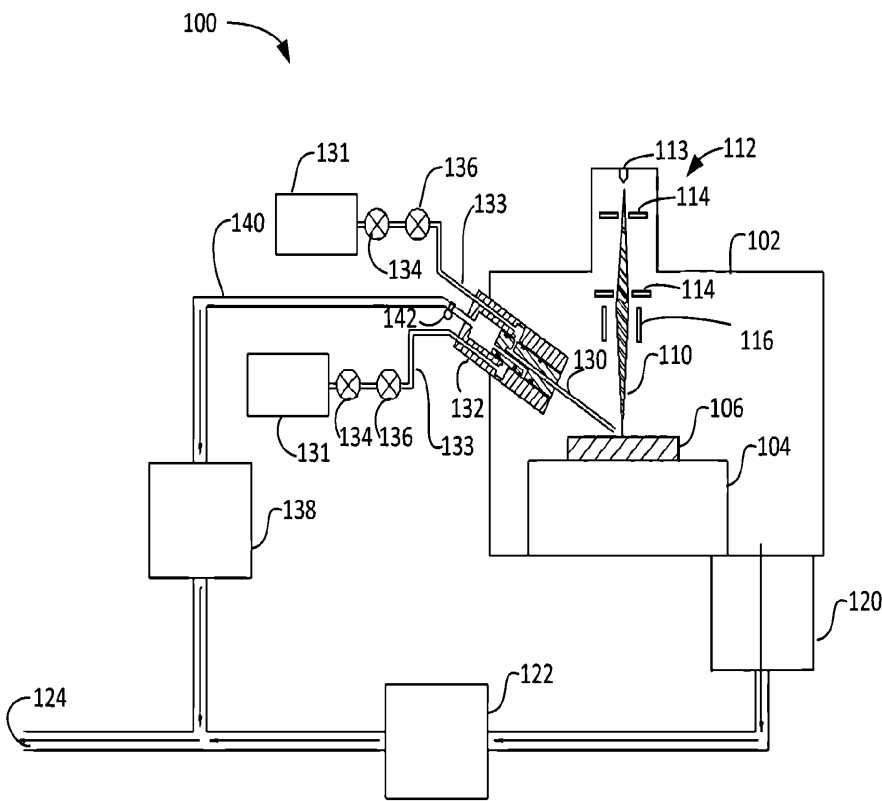


도면8

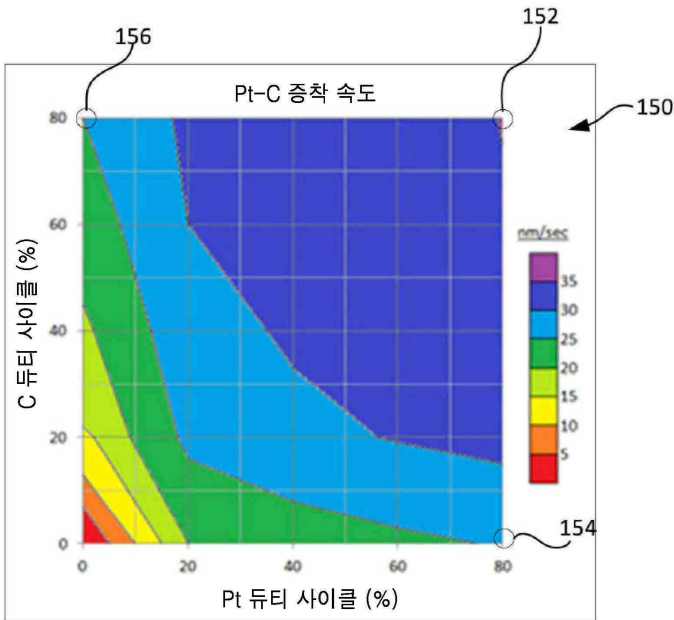


선행 기술

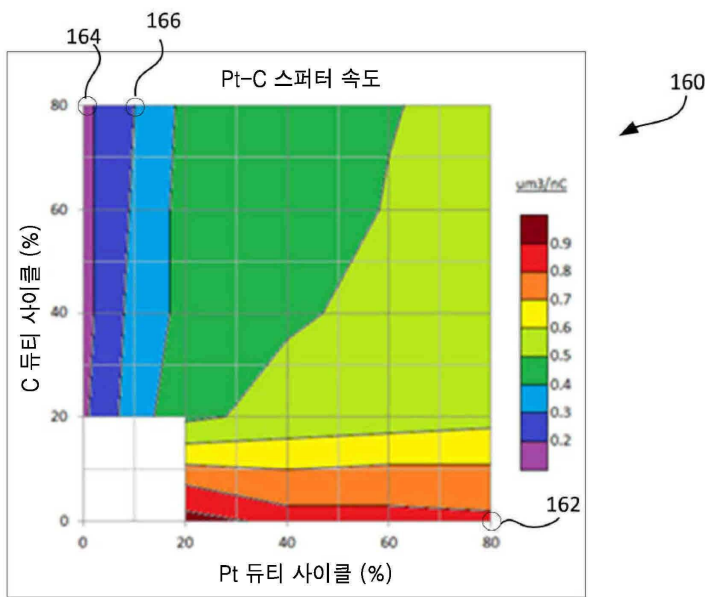
도면9



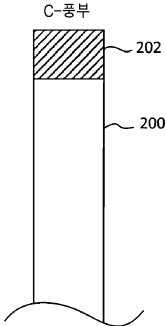
도면10



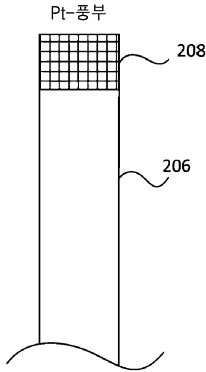
도면11



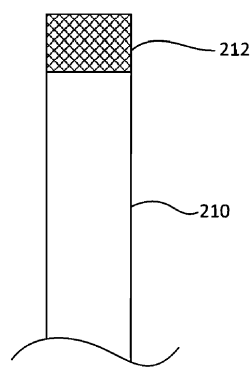
도면12



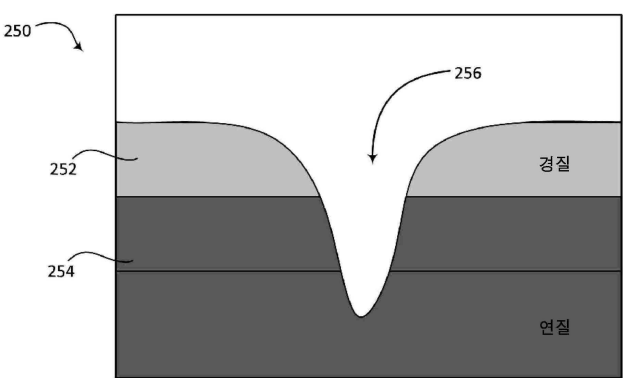
도면13



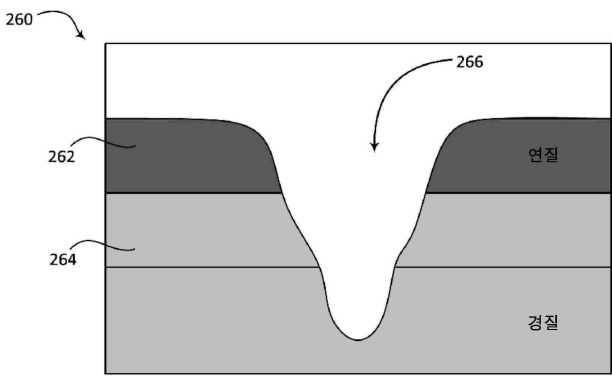
도면14



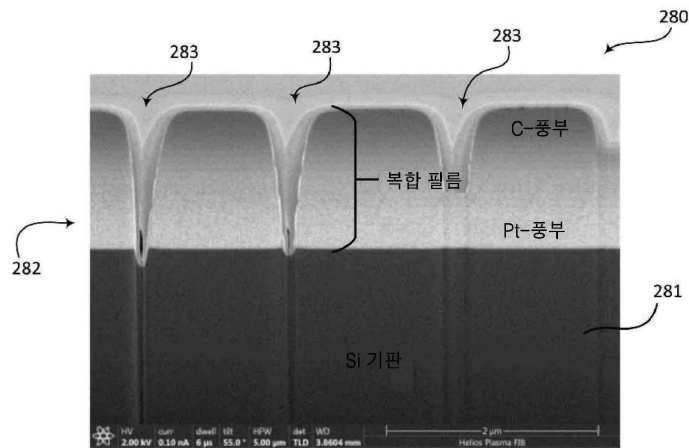
도면15



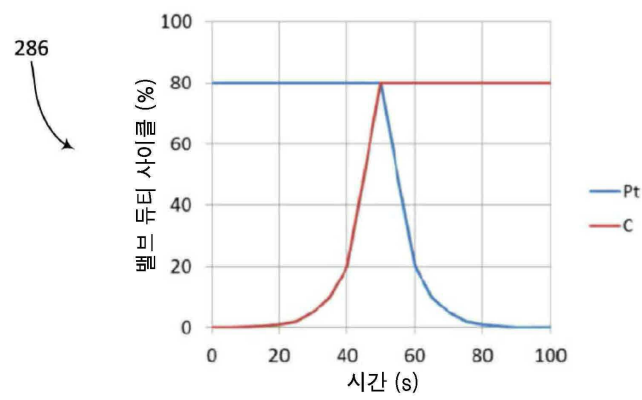
도면16



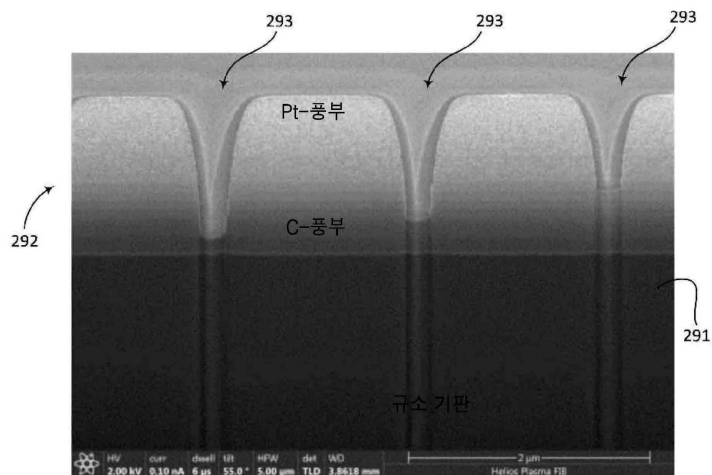
도면17



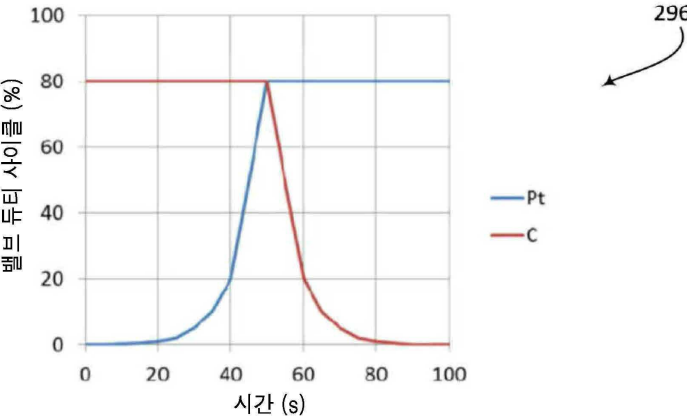
도면18



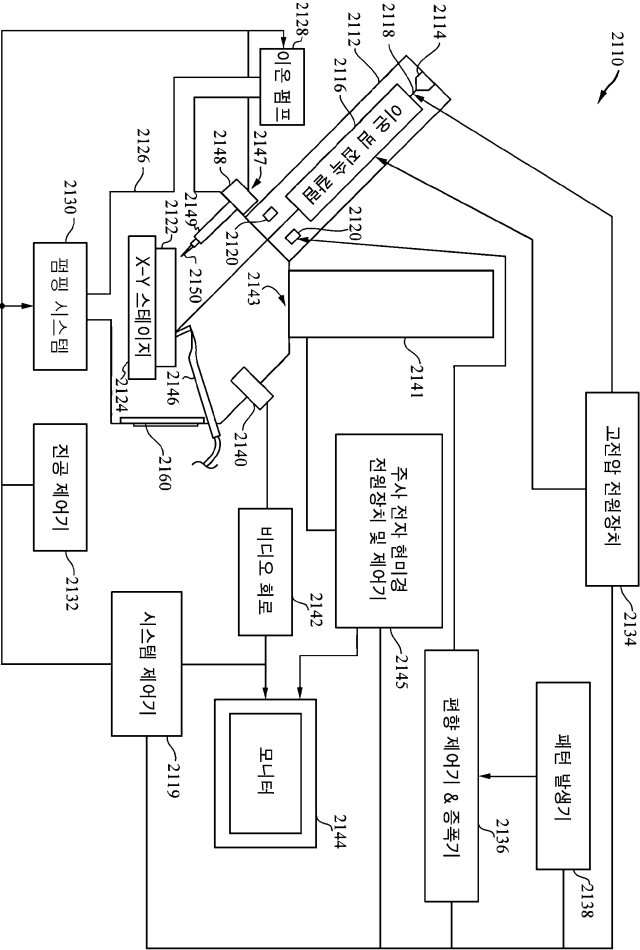
도면19



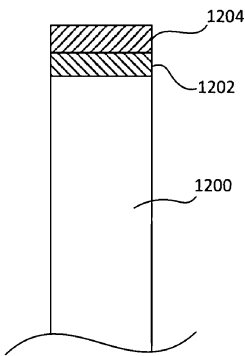
도면20



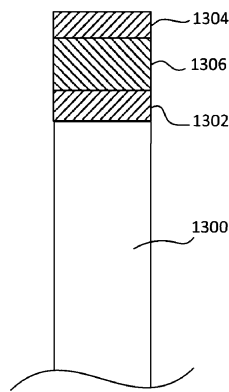
도면21



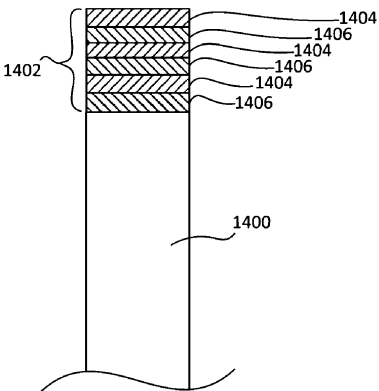
도면22



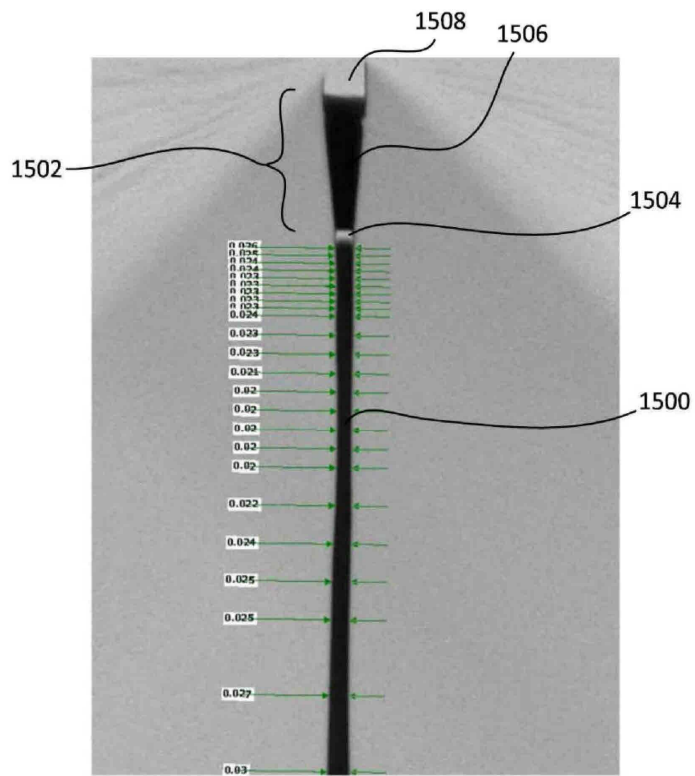
도면23



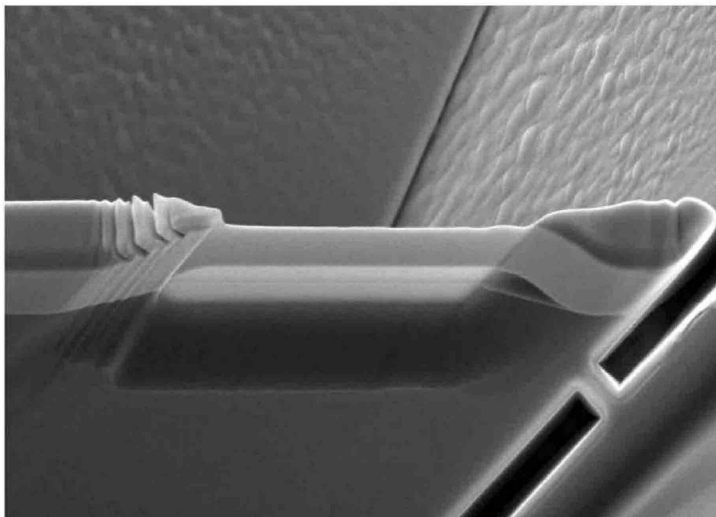
도면24



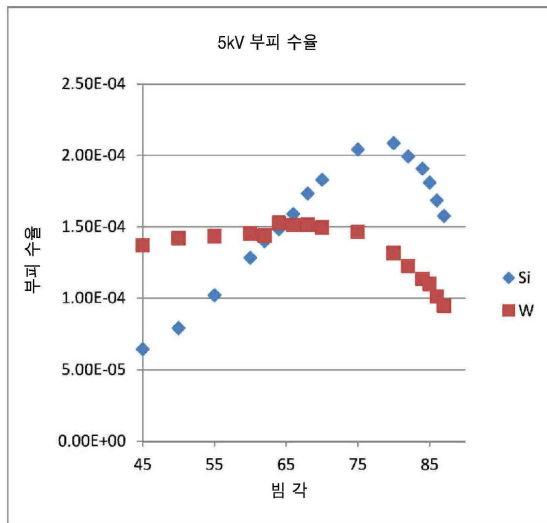
도면25



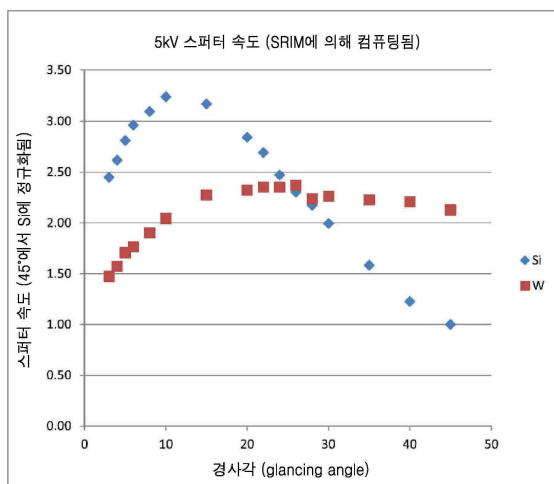
도면26



도면27a



도면27b



도면28

