(19) 대한민국특허청(KR)
(12) 등록특허공보(B1)

(45) 공고일자 2012년10월30일
(11) 등록번호 10-1196026
(24) 등록일자 2012년10월24일

(51) 국제특허분류(Int. Cl.)
H01L 21/265 (2006.01) *H01L 21/3065* (2006.01)
H01J 37/30 (2006.01) *H01J 37/08* (2006.01)
(21) 출원번호 10-2010-7026970(분할)
(22) 출원일자(국제) 2006년11월15일
심사청구일자 2011년11월15일
(85) 번역문제출일자 2010년11월30일
(65) 공개번호 10-2011-0003565
(43) 공개일자 2011년01월12일
(62) 원출원 특허 10-2008-7015965
원출원일자(국제) 2006년11월15일
심사청구일자 2008년06월30일
(86) 국제출원번호 PCT/US2006/044441
(87) 국제공개번호 WO 2007/067317
국제공개일자 2007년06월14일
(30) 우선권주장
11/385,136 2006년03월20일 미국(US)
(뒷면에 계속)
(56) 선행기술조사문헌
KR1020010040911 A*
Rev. Sci. Instrum., vol.64, 1993, pp.1105-1130
EP00317952 A2*
IBM J. Res. Develop., vol.30, 1986, pp.460-465
*는 심사관에 의하여 인용된 문헌

(73) 특허권자
앨리스 코포레이션
미국 01960 매사추세츠주 피바디 원 코포레이션 웨이
(72) 발명자
워드, 빌리, 더블유.
미국 01860 메사추세츠주 메리막 리틀 폰드 로드 36
노트, 존, 에이. 4세
미국 01930 메사추세츠주 글루세스터 론데일 서클 18
(뒷면에 계속)
(74) 대리인
백만기, 정은진, 양영준

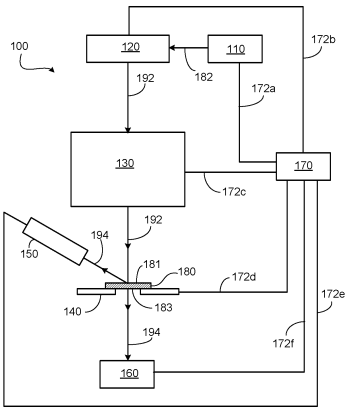
전체 청구항 수 : 총 59 항 심사관 : 이석주

(54) 발명의 명칭 **이온 소스, 시스템 및 방법**

(57) 요 약

이온 소스, 시스템 및 방법이 개시된다.

대 표 도 - 도1



(72) 발명자

파카스, 루이스, 에스. 3세

미국 03824 뉴햄프셔주 더햄 리버뷰 로드 4

퍼시발, 랜달, 지.

미국 03077 뉴햄프셔주 레이몬드 랜디 레인 5

힐, 레이몬드

미국 01969 메사추세츠주 로울리 윌슨 폰드 레인 21

마크워트, 라스

독일 64367 모탤 니에베르갤베그 5

아데르홀드, 더크

독일 73492 슈배스베르그 앰셀베그 6

(30) 우선권주장

11/385,215 2006년03월20일 미국(US)
60/741,956 2005년12월02일 미국(US)
60/784,331 2006년03월20일 미국(US)
60/784,388 2006년03월20일 미국(US)
60/784,390 2006년03월20일 미국(US)
60/784,500 2006년03월20일 미국(US)
60/795,806 2006년04월28일 미국(US)
60/799,203 2006년05월09일 미국(US)

특허청구의 범위

청구항 1

장치로서,

샘플과 상호 작용하여 입자의 상이한 다중 유형이 상기 샘플을 떠나게 야기할 수 있는 이온 빔을 발생시키도록 가스와 상호 작용할 수 있는 이온 소스;

상기 입자의 상이한 다중 유형 중 제1 유형을 검출하도록 구성된 제1 검출기; 및

상기 입자의 상이한 다중 유형 중 제2 유형을 검출하도록 구성된 제2 검출기

를 구비하고,

상기 입자의 제1 유형은 상기 입자의 제2 유형과 상이하고, 상기 입자의 상이한 다중 유형은 이차 전자, 오제 전자(Auger electron), 이차 이온, 이차 중성 입자, 일차 중성 입자, 산란 이온 및 광자로 이루어진 그룹으로부터 선택되는

장치.

청구항 2

시스템으로서,

샘플과 상호 작용하여 산란 이온이 상기 샘플을 떠나게 야기할 수 있는 이온 빔을 발생시키도록 가스와 상호 작용할 수 있는 가스 필드 이온 소스;

사용하는 동안, 상기 산란 이온 중 적어도 일부를 검출할 수 있도록 구성된 적어도 하나의 검출기; 및

상기 적어도 하나의 검출기에 전기적으로 접속된 전자 프로세서로서, 사용하는 동안, 상기 검출된 산란 이온에 기초한 정보를 프로세싱하여 상기 샘플에 관한 정보를 판정할 수 있는 전자 프로세서

를 포함하고,

상기 전자 프로세서는 상기 검출된 산란 이온에 기초한 정보를 프로세싱하여 상기 검출된 산란 이온의 궤적의 각도에 관한 정보를 판정할 수 있는

시스템.

청구항 3

제2항에 있어서,

상기 샘플에 관한 정보는 상기 샘플의 표면에 관한 지형 정보, 상기 샘플의 표면의 재료 구성물 정보, 상기 샘플의 표면 아래 영역에 관한 재료 구성물 정보, 상기 샘플에 관한 결정 정보, 상기 샘플의 표면에 관한 전압 콘트라스트 정보, 상기 샘플의 표면 아래 영역에 관한 전압 콘트라스트 정보, 상기 샘플에 관한 자기 정보(magnetic information), 및 상기 샘플에 관한 광학 정보로 이루어진 그룹으로부터 선택되는 시스템.

청구항 4

제2항에 있어서,

상기 전자 프로세서는 상기 검출된 산란 이온에 기초한 정보를 프로세싱하여 상기 검출된 산란 이온의 에너지에 관한 정보를 판정할 수 있는 시스템.

청구항 5

제4항에 있어서,

상기 검출된 산란 이온의 에너지에 관한 상기 정보는 상기 검출된 산란 이온의 에너지 분포인 시스템.

청구항 6

삭제

청구항 7

삭제

청구항 8

제2항에 있어서,

상기 검출된 산란 이온의 궤적의 각도에 관한 정보는 상기 검출된 산란 이온의 궤적 분포의 각도의 분포인 시스템.

청구항 9

제2항에 있어서,

상기 적어도 하나의 검출기는 다중 검출기를 구비하는 시스템.

청구항 10

제2항에 있어서,

상기 적어도 하나의 검출기는 상기 검출된 산란 이온에 관한 각도 분해 정보(angularly resolved information)를 제공하도록 구성되는 시스템.

청구항 11

제10항에 있어서,

상기 적어도 하나의 검출기는 상기 샘플에 대해서 상이한 각도에 배치되는 다중 검출기를 구비하는 시스템.

청구항 12

제10항에 있어서,

상기 적어도 하나의 검출기는 반구형 검출기를 구비하는 시스템.

청구항 13

제10항에 있어서,

상기 적어도 하나의 검출기는 상기 샘플에 대한 제1 입체각과 상기 샘플에 대한 제2 입체각 사이에서 이동할 수 있는 시스템.

청구항 14

제2항에 있어서,

주어진 산란 이온에 대해, 상기 적어도 하나의 검출기는 상기 주어진 산란 이온의 에너지에 기초한 신호를 제공할 수 있는 시스템.

청구항 15

제14항에 있어서,

상기 적어도 하나의 검출기는 상기 검출된 산란 이온에 관한 각도 분해 정보를 제공하도록 구성되는 시스템.

청구항 16

제2항에 있어서,

사용하는 동안 상기 이온 빔이 펄스화되도록 상기 시스템 내에 전기적으로 접속되는 디바이스를 더 구비하는 시

스템.

청구항 17

제16항에 있어서,

사용하는 동안 상기 산란 이온의 비행시간 정보를 측정할 수 있도록 구성된 비행시간 서브시스템을 더 구비하는 시스템.

청구항 18

제2항에 있어서,

사용하는 동안 상기 산란 이온의 비행시간 정보를 측정할 수 있도록 구성된 비행시간 서브시스템을 더 구비하는 시스템.

청구항 19

제2항에 있어서,

사용하는 동안 상기 이온 빔은 상기 샘플의 제1 표면상에 충돌하고, 상기 검출기들 중 적어도 하나는 상기 샘플의 제2 표면에 인접하게 배치되고, 상기 제2 표면은 상기 제1 표면과 대향하는 시스템.

청구항 20

제2항에 있어서,

상기 이온 빔은 $1x10^{-16}$ cm^2srV 이하의 감소된 Etendue를 갖는 시스템.

청구항 21

제2항에 있어서,

상기 이온 빔은 $5x10^{-21}$ cm^2sr 이하의 Etendue를 갖는 시스템.

청구항 22

제2항에 있어서,

상기 이온 빔은 상기 샘플의 표면에서 $5x10^8$ A/m^2srV 이상의 감소된 밝기를 갖는 시스템.

청구항 23

제2항에 있어서,

상기 이온 빔은 상기 샘플의 표면에서 $1x10^9$ A/cm^2sr 이상의 밝기를 갖는 시스템.

청구항 24

제2항에 있어서,

상기 이온 빔은 상기 샘플의 표면에서 치수가 10 nm 이하인 스폿 사이즈를 갖는 시스템.

청구항 25

제2항에 있어서,

상기 시스템은 가스 필드 이온 현미경인 시스템.

청구항 26

제2항에 있어서,

상기 시스템은 헬륨 이온 현미경인 시스템.

청구항 27

제2항에 있어서,

상기 시스템은 스캔 이온 현미경인 시스템.

청구항 28

제2항에 있어서,

상기 시스템은 스캔 헬륨 이온 현미경인 시스템.

청구항 29

제2항에 있어서,

상기 가스 필드 이온 소스는 20개 이하의 원자를 구비한 터미널 셸프(terminal shelf)를 갖는 전기 전도성 팁을 포함하는 시스템.

청구항 30

이온 빔과 샘플을 상호 작용시켜 입자의 상이한 다중 유형이 상기 샘플을 떠나게 야기하는 단계;

상기 입자의 상이한 다중 유형 중 입자의 적어도 2가지 상이한 유형을 검출하는 단계; 및

상기 검출된 입자의 적어도 2가지 상이한 유형에 기초하여 상기 샘플에 관한 정보를 판정하는 단계

를 구비하고,

상기 입자의 상이한 다중 유형은 이차 전자, 오제 전자, 이차 이온, 이차 중성 입자, 일차 중성 입자, 산란 이온 및 광자로 이루어진 그룹으로부터 선택되는 방법.

청구항 31

가스와 가스 필드 이온 소스를 상호 작용시킴으로써 이온 빔을 발생시키는 단계;

상기 이온 빔을 샘플과 상호 작용시켜 산란 이온이 상기 샘플을 떠나게 야기하는 단계;

상기 산란 이온 중 적어도 일부를 검출하는 단계;

상기 검출된 산란 이온의 궤적의 각도에 관한 정보를 판정하는 단계; 및

상기 검출된 산란 이온에 기초해 상기 샘플에 관한 정보를 판정하는 단계

를 구비하는 방법.

청구항 32

제30항에 있어서,

상기 검출된 입자에 기초해, 상기 샘플의 표면에 관한 지형 정보, 상기 샘플의 표면의 재료 구성물 정보, 상기 샘플의 표면 아래 영역에 관한 재료 구성물 정보, 상기 샘플에 관한 결정(crystalline) 정보, 상기 샘플의 표면에 관한 전압 콘트라스트 정보, 상기 샘플의 표면 아래 영역에 관한 전압 콘트라스트 정보, 상기 샘플에 관한 자기 정보, 및 상기 샘플에 관한 광학 정보로 이루어진 그룹으로부터 선택되는 상기 샘플에 관한 정보를 판정하는 단계를 더 구비하는 방법.

청구항 33

제32항에 있어서,

상기 이온 빔은 가스와 가스 필드 이온 소스 사이의 상호 작용을 통해 발생되는 방법.

청구항 34

제30항에 있어서,

상기 이온 빔은 가스와 가스 필드 이온 소스 사이의 상호 작용을 통해 발생되는 방법.

청구항 35

제30항 또는 제31항에 있어서,

상기 이온 빔을 펄스화하는 단계를 구비하는 방법.

청구항 36

제35항에 있어서,

상기 검출된 입자의 비행시간 정보를 측정하는 단계를 더 구비하는 방법.

청구항 37

제30항에 있어서,

상기 검출된 입자의 비행시간 정보를 측정하는 단계를 더 구비하는 방법.

청구항 38

제30항에 있어서,

상기 이온 빔은 상기 샘플의 제1 표면상에 충돌하고, 상기 입자를 검출하는데 사용되는 검출기는 상기 샘플의 제2 표면에 인접하게 배치되고, 상기 제2 표면은 상기 제1 표면과 대향하는 방법.

청구항 39

제30항 또는 제31항에 있어서,

상기 이온 빔은 $1x10^{-16}$ cm^2srV 이하의 감소된 Etendue를 갖는 방법.

청구항 40

제30항 또는 제31항에 있어서,

상기 이온 빔은 $5x10^{-21}$ cm^2sr 이하의 Etendue를 갖는 방법.

청구항 41

제30항 또는 제31항에 있어서,

상기 이온 빔은 상기 샘플의 표면에서 $5x10^8$ A/m^2srV 이상의 감소된 밝기를 갖는 방법.

청구항 42

제30항 또는 제31항에 있어서,

상기 이온 빔은 상기 샘플의 표면에서 $1x10^9$ A/cm^2sr 이상의 밝기를 갖는 방법.

청구항 43

제30항 또는 제31항에 있어서,

상기 이온 빔은 상기 샘플의 표면에서 치수가 10 nm 이하인 스폿 사이즈를 갖는 방법.

청구항 44

제30항 또는 제31항에 있어서,

상기 방법은 가스 필드 이온 현미경을 사용해 수행되는 방법.

청구항 45

제30항 또는 제31항에 있어서,

상기 방법은 헬륨 이온 현미경을 사용해 수행되는 방법.

청구항 46

제30항 또는 제31항에 있어서,

상기 방법은 스캔 이온 현미경을 사용해 수행되는 방법.

청구항 47

제30항 또는 제31항에 있어서,

상기 방법은 스캔 헬륨 이온 현미경을 사용해 수행되는 방법.

청구항 48

제30항에 있어서,

상기 방법은 1만큼 상이한 원자 번호들을 가진 상기 샘플내의 원자들을 구별할 수 있는 방법.

청구항 49

제30항 또는 제31항에 있어서,

상기 방법은 1 원자 질량 단위(atomic mass unit)만큼 상이한 질량들을 가진 상기 샘플내의 원자들을 구별할 수 있는 방법.

청구항 50

제31항에 있어서,

상기 샘플에 관한 정보는 상기 샘플의 표면에 관한 지형 정보, 상기 샘플의 표면의 재료 구성물 정보, 상기 샘플의 표면 아래 영역에 관한 재료 구성물 정보, 상기 샘플에 관한 결정 정보, 상기 샘플의 표면에 관한 전압 콘트라스트 정보, 상기 샘플의 표면 아래 영역에 관한 전압 콘트라스트 정보, 상기 샘플에 관한 자기 정보, 및 상기 샘플에 관한 광학 정보로 이루어진 그룹으로부터 선택되는 방법.

청구항 51

제31항에 있어서,

상기 검출된 산란 이온의 에너지에 관한 정보를 판정하는 단계를 더 구비하는 방법.

청구항 52

제51항에 있어서,

상기 검출된 산란 이온의 에너지에 관한 정보는 상기 검출된 산란 이온의 에너지 분포인 방법.

청구항 53

삭제

청구항 54

삭제

청구항 55

제31항에 있어서,

상기 검출된 산란 이온의 궤적의 각도에 관한 정보는 상기 검출된 산란 이온의 궤적의 각도의 분포인 방법.

청구항 56

제31항에 있어서,

다중 검출기를 사용하는 단계를 포함하는 방법.

청구항 57

제56항에 있어서,

상기 다중 검출기는 상기 샘플에 대해서 상이한 각도에 배치되는 방법.

청구항 58

제56항에 있어서,

상기 적어도 하나의 검출기는 반구형 검출기를 구비하는 방법.

청구항 59

제56항에 있어서,

하나 이상의 검출기를 상기 샘플에 대한 제1 입체각에서 상기 샘플에 대한 제2 입체각으로 이동시키는 단계를 더 구비하는 방법.

청구항 60

제31항에 있어서,

상기 이온 빔을 펄스화하는 단계를 더 포함하고,

사용하는 동안 상기 검출된 산란 이온의 비행시간 정보를 측정할 수 있도록 구성된 비행시간 서브시스템을 더 구비하는 방법.

청구항 61

제31항에 있어서,

사용하는 동안 상기 검출된 산란 이온의 비행시간 정보를 측정할 수 있도록 구성된 비행시간 서브시스템을 더 구비하는 방법.

청구항 62

제31항에 있어서,

사용하는 동안 상기 이온 빔은 상기 샘플의 제1 표면상에 충돌하고, 적어도 하나의 검출기는 상기 샘플의 제2 표면에 인접하게 배치되고, 상기 제2 표면은 상기 제1 표면과 대향하는 방법.

청구항 63

제31항에 있어서,

상기 방법은 1만큼 상이한 원자 번호들을 가진 상기 샘플내의 원자들을 구별할 수 있는 방법.

명 세 서

기 술 분 야

[0001] 본 발명은 이온 소스, 시스템 및 방법에 관한 것이다.

배 경 기 술

[0002] 이온은, 예를 들어, 액체 금속 이온 소스 또는 가스 필드 이온 소스를 사용해 형성될 수 있다. 일부 경우에서는, 이온 소스에 의해 형성된 이온이 이온에 노출되는 샘플의 소정 특성을 판정하는데 사용될 수 있거나 샘플을 변경하는데 사용될 수 있다. 다른 경우로서, 이온 소스에 의해 형성된 이온이 이온 소스 자체의 소정 특징을

판정하는데 사용될 수도 있다.

[0003] 발명의 개요

[0004] 일 태양에서, 본 발명은, 가스와 상호 작용하여 샘플의 표면에서 10 nm 이하 치수의 스폿 사이즈를 갖는 이온 빔을 발생시킬 수 있는 가스 필드 이온 소스를 포함하는 시스템을 특징으로 한다.

[0005] 다른 태양에서, 본 발명은, 가스와 상호 작용하여 샘플의 표면에서 3 nm 이하 치수의 스폿 사이즈를 갖는 이온 빔을 발생시킬 수 있는 이온 소스를 포함하는 시스템을 특징으로 한다.

[0006] 부가 태양에서, 본 발명은, 가스와 상호 작용하여 샘플의 표면에서 $1x10^{9}$ $A/cm^{2}sr$ 이상의 밝기(brightness)를 갖는 이온 빔을 발생시킬 수 있는 시스템을 특징으로 한다.

[0007] 추가 태양에서, 본 발명은, 가스와 상호 작용하여 샘플의 표면에서 $5x10^{8}$ $A/m^{2}srV$ 이상의 감소된 밝기(reduced brightness)를 갖는 이온 빔을 발생시킬 수 있는 가스 필드 이온 소스를 포함하는 시스템을 특징으로 한다.

[0008] 일 태양에서, 본 발명은, 가스와 상호 작용하여 $5x10^{-21}$ $cm^{2}sr$ 이하의 에텐듀(Etendue)를 갖는 이온 빔을 발생시킬 수 있는 가스 필드 이온 소스를 포함하는 시스템을 특징으로 한다.

[0009] 다른 태양에서, 본 발명은, 가스와 상호 작용하여 $1x10^{-16}$ $cm^{2}srV$ 이하의 감소된 에텐듀를 갖는 이온 빔을 발생시킬 수 있는 가스 필드 이온 소스를 포함하는 시스템을 특징으로 한다.

[0010] 부가 태양에서, 본 발명은, 전기 전도성 팁(electrically conductive tip)을 포함하는 가스 필드 이온 소스를 포함하는 시스템을 특징으로 한다. 가스 필드 이온 소스는 시스템으로부터 전기 전도성 팁을 제거하지 않으면서 1주일 이상의 시주기 동안 가스와 상호 작용하여 이온 빔을 발생시킬 수 있다.

[0011] 추가 태양에서, 본 발명은, 총 중단 시간(interruption time)이 10시간 이하인 1주일 이상의 시주기 동안, 가스와 상호 작용하여 이온 빔을 발생시킬 수 있는 가스 필드 이온 소스를 포함하는 시스템을 특징으로 한다.

[0012] 일 태양에서, 본 발명은, 샘플의 이미지를 발생시킬 수 있는 이온 현미경 을 특징으로 한다. 샘플은 이온 현미경과 상이하고, 샘플의 이미지는 3 nm 이하의 해상도(resolution)를 가진다.

[0013] 다른 태양에서, 본 발명은, 샘플의 이미지를 발생시킬 수 있는 가스 필드 이온 현미경을 특징으로 한다. 샘플은 이온 현미경과 상이하고, 샘플의 이미지는 10 nm 이하의 해상도를 가진다.

[0014] 부가 태양에서, 본 발명은, 0.25 이상의 품질 팩터(quality factor)를 가진 가스 필드 이온 현미경을 특징으로 한다.

[0015] 추가 태양에서, 본 발명은, 25 nm 이하의 손상 테스트 값(damage test value)을 가진 이온 현미경을 특징으로 한다.

[0016] 일 태양에서, 본 발명은, 전기 전도성 팁이 원자가 20개 이하인 터미널 셸프(terminal shelf)를 갖는 이온 소스를 포함하는 이온 현미경을 특징으로 한다.

[0017] 다른 태양에서, 본 발명은, 전기 전도성 팁이 15° 내지 45° 의 평균 완전 원추각(average full cone angle)을 갖는 가스 필드 이온 소스를 포함하는 시스템을 특징으로 한다.

[0018] 부가 태양에서, 본 발명은, 평균 곡률 반경이 200 nm 이하인 전기 전도성 팁을 포함하는 가스 필드 이온 소스를 포함하는 시스템을 특징으로 한다.

[0019] 추가 태양에서, 본 발명은, 터미널 셸프가 하나 이상의 원자를 갖는 전기 전도성 팁을 갖춘 가스 필드 이온 소스를 포함하는 시스템을 특징으로 한다. 시스템은, 시스템의 사용 동안, 1개 이상의 원자가 가스와 상호 작용하여 이온 빔을 발생시키고, 샘플의 표면에 도달하는 이온 빔의 이온 중 70% 이상은 가스와 1개 이상의 원자 중 1개 원자만의 상호 작용을 통해 발생되도록 구성된다.

[0020] 일 태양에서, 본 발명은, 전기 전도성 팁이 가스와 상호 작용하여 이온 빔을 발생시킬 수 있는 가스 필드 이온 소스를 포함하는 시스템을 특징으로 한다. 또한, 시스템은, 사용하는 동안, 이온 빔의 적어도 일부분이 이온 광학계(ion optics)를 통과하도록 구성되는 이온 광학계도 포함한다. 시스템은 가스 필드 이온 소스에 커플링된 이동 메커니즘(moving mechanism)을 더 포함하고, 그에 따라, 이동 메커니즘은 전기 전도성 팁을 병진시킬

(translate) 수 있거나, 전기 전도성 팁을 기울일 수 있거나, 전기 전도성 팁을 병진시키고 기울일 수 있다.

[0021] 다른 태양에서, 본 발명은, 샘플과 상호 작용하여 다수의 상이한 유형의 입자가 샘플을 떠나게 할 수 있는 이온 빔을 발생시키도록 가스와 상호 작용할 수 있는 이온 소스를 포함하는 시스템을 특징으로 한다. 또한, 시스템은 다수의 상이한 유형의 입자 중 적어도 2가지 상이한 유형의 입자를 검출하도록 구성된 적어도 하나의 검출기를 포함한다. 다수의 상이한 유형의 입자는 이차 전자(secondary electrons), 오제(Auger) 전자, 이차 이온, 이차 중성 입자, 일차 중성 입자, 산란 이온 및 광자로부터 선택된다.

[0022] 부가 태양에서, 본 발명은, 샘플과 상호 작용하여 입자가 샘플을 떠나게 할 수 있는 이온 빔을 발생시키도록 가스와 상호 작용할 수 있는 가스 필드 이온 소스를 포함하는 시스템을 특징으로 한다. 입자는 오제 전자, 이차 이온, 이차 중성 입자, 일차 중성 입자, 산란 이온 및 광자로부터 선택된다. 또한, 시스템은, 사용하는 동안, 적어도 하나의 검출기가 입자 중 적어도 일부를 검출하여 샘플에 관한 정보를 판정하도록 구성된 적어도 하나의 검출기를 포함한다.

[0023] 추가 태양에서, 본 발명은, 샘플과 상호 작용하여 입자가 샘플을 떠나게 할 수 있는 이온 빔을 발생시키도록 가스와 상호 작용할 수 있는 가스 필드 이온 소스를 포함하는 시스템을 특징으로 한다. 또한, 시스템은, 사용하는 동안, 적어도 하나의 검출기가 입자 중 적어도 일부를 검출할 수 있도록 구성된 적어도 하나의 검출기를 포함한다. 소정 검출 입자에 대해, 적어도 하나의 검출기는 그 소정 검출 입자의 에너지에 기초한 신호를 발생시킨다.

[0024] 일 태양에서, 본 발명은, 샘플과 상호 작용하여 입자가 샘플을 떠나게 할 수 있는 이온 빔을 발생시키도록 가스와 상호 작용할 수 있는 가스 필드 이온 소스를 포함하는 시스템을 특징으로 한다. 또한, 시스템은, 사용하는 동안, 적어도 하나의 검출기가 입자 중 적어도 일부를 검출할 수 있도록 구성된 적어도 하나의 검출기를 포함한다. 소정 검출 입자에 대해, 적어도 하나의 검출기는 그 소정 검출 입자의 궤적의 각도에 기초한 신호를 발생시킨다.

[0025] 다른 태양에서, 본 발명은, 샘플과 상호 작용하여 산란 이온이 샘플을 떠나게 할 수 있는 이온 빔을 발생시키도록 가스와 상호 작용할 수 있는 가스 필드 이온 소스를 포함하는 시스템을 특징으로 한다. 또한, 시스템은, 사용하는 동안, 적어도 하나의 검출기가 산란 이온 중 적어도 일부를 검출할 수 있도록 구성된 적어도 하나의 검출기를 포함한다. 시스템은 적어도 하나의 검출기에 전기 접속된 전자 프로세서를 더 포함하고, 그에 따라, 사용하는 동안, 전자 프로세서는 검출된 산란 이온에 기초한 정보를 프로세싱하여 샘플에 관한 정보를 판정할 수 있다.

[0026] 부가 태양에서, 본 발명은, 샘플과 상호 작용하여 일차 중성 입자가 샘플을 떠나게 할 수 있는 이온 빔을 발생시키도록 가스와 상호 작용할 수 있는 가스 필드 이온 소스를 포함하는 시스템을 특징으로 한다. 또한, 시스템은, 사용하는 동안, 적어도 하나의 검출기가 일차 중성 입자 중 적어도 일부를 검출할 수 있도록 구성된 적어도 하나의 검출기를 포함한다. 시스템은 적어도 하나의 검출기에 전기 접속된 전자 프로세서를 더 포함하고, 그에 따라, 사용하는 동안, 전자 프로세서는 검출된 일차 중성 입자에 기초한 정보를 프로세싱하여 샘플에 관한 정보를 판정할 수 있다.

[0027] 일 태양에서, 본 발명은, 샘플과 상호 작용하여 광자가 샘플을 떠나게 할 수 있는 이온 빔을 발생시키도록 가스와 상호 작용할 수 있는 가스 필드 이온 소스를 포함하는 시스템을 특징으로 한다. 또한, 시스템은, 사용하는 동안, 적어도 하나의 검출기가 광자 중 적어도 일부를 검출할 수 있도록 구성된 적어도 하나의 검출기를 포함한다. 시스템은 적어도 하나의 검출기에 전기 접속된 전자 프로세서를 더 포함하고, 그에 따라, 사용하는 동안, 전자 프로세서는 검출된 광자에 기초한 정보를 프로세싱하여 샘플에 관한 정보를 판정할 수 있다.

[0028] 다른 태양에서, 본 발명은, 샘플과 상호 작용하여 이차 이온이 샘플을 떠나게 할 수 있는 이온 빔을 발생시키도록 가스와 상호 작용할 수 있는 가스 필드 이온 소스를 포함하는 시스템을 특징으로 한다. 또한, 시스템은, 사용하는 동안, 적어도 하나의 검출기가 이차 이온 중 적어도 일부를 검출할 수 있도록 구성된 적어도 하나의 검출기를 포함한다. 시스템은 적어도 하나의 검출기에 전기 접속된 전자 프로세서를 더 포함하고, 그에 따라, 사용하는 동안, 전자 프로세서는 검출된 이차 이온에 기초한 정보를 프로세싱하여 샘플에 관한 정보를 판정할 수 있다.

[0029] 부가 태양에서, 본 발명은, 샘플과 상호 작용하여 이차 중성 입자가 샘플을 떠나게 할 수 있는 이온 빔을 발생시키도록 가스와 상호 작용할 수 있는 가스 필드 이온 소스를 포함하는 시스템을 특징으로 한다. 또한, 시스템은, 사용하는 동안, 적어도 하나의 검출기가 이차 중성 입자 중 적어도 일부를 검출할 수 있도록 구성된 적어도

하나의 검출기를 포함한다. 시스템은 적어도 하나의 검출기에 전기 접속된 전자 프로세서를 더 포함하고, 그에 따라, 사용하는 동안, 전자 프로세서는 검출된 이차 중성 입자에 기초한 정보를 프로세싱하여 샘플에 관한 정보를 판정할 수 있다.

[0030] 추가 태양에서, 본 발명은, 샘플과 상호 작용하여 오제 전자가 샘플을 떠나게 할 수 있는 이온 빔을 발생시키도록 가스와 상호 작용할 수 있는 가스 필드 이온 소스를 포함하는 시스템을 특징으로 한다. 또한, 시스템은, 사용하는 동안, 적어도 하나의 검출기가 오제 전자 중 적어도 일부를 검출할 수 있도록 구성된 적어도 하나의 검출기를 포함한다. 시스템은 적어도 하나의 검출기에 전기 접속된 전자 프로세서를 더 포함하고, 그에 따라, 사용하는 동안, 전자 프로세서는 검출된 오제 전자에 기초한 정보를 프로세싱하여 샘플에 관한 정보를 판정할 수 있다.

[0031] 일 태양에서, 본 발명은, 샘플과 상호 작용하여 이온이 샘플을 떠나게 할 수 있는 이온 빔을 발생시키도록 가스와 상호 작용할 수 있는 가스 필드 이온 소스를 포함하는 시스템을 특징으로 한다. 또한, 시스템은, 사용하는 동안, 적어도 하나의 검출기가 이온을 검출할 수 있도록 구성된 적어도 하나의 검출기를 포함한다. 샘플과 이온 빔의 상호 작용은 이차 전자가 샘플을 떠나게 할 수도 있고, 샘플과 이온 빔의 상호 작용으로 인해 이차 전자가 샘플을 떠나게 될 때, 적어도 하나의 검출기는, 이차 전자는 검출하지 않으면서, 이온 중 적어도 일부를 검출할 수 있다.

[0032] 다른 태양에서, 본 발명은, 샘플과 상호 작용하여 중성 입자가 샘플을 떠나게 할 수 있는 이온 빔을 발생시키도록 가스와 상호 작용할 수 있는 가스 필드 이온 소스를 포함하는 시스템을 특징으로 한다. 또한, 시스템은, 사용하는 동안, 적어도 하나의 검출기가 중성 입자를 검출할 수 있도록 구성된 적어도 하나의 검출기를 포함한다. 샘플과 이온 빔의 상호 작용은 이차 전자가 샘플을 떠나게 할 수도 있고, 샘플과 이온 빔의 상호 작용으로 인해 이차 전자가 샘플을 떠나게 될 때, 적어도 하나의 검출기는, 이차 전자는 검출하지 않으면서, 중성 입자 중 적어도 일부를 검출할 수 있다.

[0033] 부가 태양에서, 본 발명은, 샘플과 상호 작용하여 광자가 샘플을 떠나게 할 수 있는 이온 빔을 발생시키도록 가스와 상호 작용할 수 있는 가스 필드 이온 소스를 포함하는 시스템을 특징으로 한다. 또한, 시스템은, 사용하는 동안, 적어도 하나의 검출기가 광자를 검출할 수 있도록 구성된 적어도 하나의 검출기를 포함한다. 샘플과 이온 빔의 상호 작용은 이차 전자가 샘플을 떠나게 할 수도 있고, 샘플과 이온 빔의 상호 작용으로 인해 이차 전자가 샘플을 떠나게 될 때, 적어도 하나의 검출기는, 이차 전자는 검출하지 않으면서, 광자 중 적어도 일부를 검출할 수 있다.

[0034] 일 태양에서, 본 발명은, 가스와 상호 작용하여 샘플의 표면에서 10 ㎚ 이하 치수의 스폿 사이즈를 갖는 이온 빔을 발생시킬 수 있는 가스 필드 이온 소스를 포함하는 시스템을 특징으로 한다. 또한, 시스템은 이온 빔을 샘플의 표면을 향해 유도하도록 구성된 이온 광학계를 포함하는데, 이온 광학계는 적어도 하나의 조정 가능한 설정(adjustable setting)을 가진다. 이온 광학계의 조정 가능한 설정이 제1 설정 상태일 때, 이온 빔은 샘플의 제1 위치와 상호 작용한다. 이온 광학계의 조정 가능한 설정이 제2 설정 상태일 때, 이온 빔은 샘플의 제2 위치와 상호 작용한다. 이온 광학계의 제1 설정은 이온 광학계의 제2 설정과 상이하고, 샘플의 제1 위치는 샘플의 제2 위치와 상이하다.

[0035] 다른 태양에서, 본 발명은, 가스와 상호 작용하여 샘플을 향해 유도되는 이온 빔을 발생시킬 수 있는 가스 필드 이온 소스를 포함하는 시스템을 특징으로 한다. 또한, 시스템은, 사용하는 동안, 하전 입자 소스가 샘플을 향해 유도되는 하전 입자의 빔을 제공하도록 구성된 하전 입자 소스를 포함한다. 가스 필드 이온 소스는 하전 입자 소스와 상이하다.

[0036] 부가 태양에서, 본 발명은, 다수의 상이한 유형의 입자가 샘플을 떠나게 하도록 샘플과 이온 빔을 상호 작용시키는 단계 및 다수의 상이한 유형의 입자 중에서 적어도 2가지 상이한 유형의 입자를 검출하는 단계를 포함하는 방법을 특징으로 한다. 다수의 상이한 유형의 입자는 이차 전자, 오제 전자, 이차 이온, 이차 중성 입자, 일차 중성 입자, 산란 이온 및 광자로부터 선택된다.

[0037] 추가 태양에서, 본 발명은, 가스 필드 이온 소스와 가스를 상호 작용시키는 것에 의해 이온 빔을 발생시키는 단계 및 샘플과 이온 빔을 상호 작용시켜 입자가 샘플을 떠나게 하는 단계를 포함하는 방법을 특징으로 한다. 입자는 오제 전자, 이차 이온, 이차 중성 입자, 일차 중성 입자, 산란 이온 및 광자로부터 선택된다. 또한, 본 방법은 입자 중 적어도 일부를 검출하여 샘플에 관한 정보를 판정하는 단계도 포함한다.

[0038] 일 태양에서, 본 발명은, 가스 필드 이온 소스와 가스를 상호 작용시키는 것에 의해 이온 빔을 발생시키는 단계

및 샘플과 이온 빔을 상호 작용시켜 입자가 샘플을 떠나게 하는 단계를 포함하는 방법을 특징으로 한다. 또한, 본 방법은 검출기에 의해 검출되는 입자의 에너지에 기초해 검출기로부터 신호를 발생시키는 단계도 포함한다.

[0039] 다른 태양에서, 본 발명은, 가스 필드 이온 소스와 가스를 상호 작용시키는 것에 의해 이온 빔을 발생시키는 단계 및 샘플과 이온 빔을 상호 작용시켜 입자가 샘플을 떠나게 하는 단계를 포함하는 방법을 특징으로 한다. 또한, 본 방법은 검출기에 의해 검출되는 입자의 궤적의 각도에 기초해 검출기로부터 신호를 발생시키는 단계도 포함한다.

[0040] 부가 태양에서, 본 발명은, 가스 필드 이온 소스와 가스를 상호 작용시키는 것에 의해 이온 빔을 발생시키는 단계 및 샘플과 이온 빔을 상호 작용시켜 산란 이온이 샘플을 떠나게 하는 단계를 포함하는 방법을 특징으로 한다. 또한, 본 방법은 산란 이온 중 적어도 일부를 검출하는 단계 및 검출된 산란 이온에 기초해 샘플에 관한 정보를 판정하는 단계도 포함한다.

[0041] 추가 태양에서, 본 발명은, 가스 필드 이온 소스와 가스를 상호 작용시키는 것에 의해 이온 빔을 발생시키는 단계 및 샘플과 이온 빔을 상호 작용시켜 일차 중성 입자가 샘플을 떠나게 하는 단계를 포함하는 방법을 특징으로 한다. 또한, 본 방법은 일차 중성 입자 중 적어도 일부를 검출하는 단계 및 검출된 일차 중성 입자에 기초해 샘플에 관한 정보를 판정하는 단계도 포함한다.

[0042] 일 태양에서, 본 발명은, 가스 필드 이온 소스와 가스를 상호 작용시키는 것에 의해 이온 빔을 발생시키는 단계 및 샘플과 이온 빔을 상호 작용시켜 광자가 샘플을 떠나게 하는 단계를 포함하는 방법을 특징으로 한다. 또한, 본 방법은 광자 중 적어도 일부를 검출하는 단계 및 검출된 광자에 기초해 샘플에 관한 정보를 판정하는 단계도 포함한다.

[0043] 다른 태양에서, 본 발명은, 가스 필드 이온 소스와 가스를 상호 작용시키는 것에 의해 이온 빔을 발생시키는 단계 및 샘플과 이온 빔을 상호 작용시켜 이차 이온이 샘플을 떠나게 하는 단계를 포함하는 방법을 특징으로 한다. 또한, 본 방법은 이차 이온 중 적어도 일부를 검출하는 단계도 포함한다.

[0044] 부가 태양에서, 본 발명은, 가스 필드 이온 소스와 가스를 상호 작용시키는 것에 의해 이온 빔을 발생시키는 단계 및 샘플과 이온 빔을 상호 작용시켜 이차 중성 입자가 샘플을 떠나게 하는 단계를 포함하는 방법을 특징으로 한다. 또한, 본 방법은 이차 중성 입자 또는 이차 중성 입자로부터 유도되는 입자 중 적어도 일부를 검출하는 단계도 포함한다.

[0045] 추가 태양에서, 본 발명은, 가스 필드 이온 소스와 가스를 상호 작용시키는 것에 의해 이온 빔을 발생시키는 단계 및 샘플과 이온 빔을 상호 작용시켜 오제 전자가 샘플을 떠나게 하는 단계를 포함하는 방법을 특징으로 한다. 또한, 본 방법은 오제 전자 중 적어도 일부를 검출하는 단계도 포함한다.

[0046] 일 태양에서, 본 발명은, 가스 필드 이온 소스를 형성하는 단계 및 가스 필드 이온 소스를 형성한 다음, 이온 소스를 챔버쪽에 배치하여 가스 필드 이온 시스템을 제공하는 단계를 포함하는 방법을 특징으로 한다.

[0047] 다른 태양에서, 본 발명은, 방사축(emission axis)을 갖춘 이온 소스를 형성하는 단계 및 이온 소스를 형성한 후, 이온 소스의 방사축을 이온 광학계 시스템의 진입축(entry axis)과 정렬시키는 단계를 포함하는 방법을 특징으로 한다.

[0048] 부가 태양에서, 본 발명은, 가스 필드 이온 소스와 가스를 상호 작용시키는 것에 의해 이온 빔을 발생시키는 단계로서, 이온 빔은 샘플의 표면에서 치수가 10 nm 이하인 스폿 사이즈를 갖는, 단계 및 이온 빔을 샘플 표면의 제1 위치에서 샘플 표면의 제2 위치로 이동시키는 단계로서, 제1 위치는 제2 위치와 상이한, 단계를 포함하는 방법을 특징으로 한다.

[0049] 추가 태양에서, 본 발명은, 가스 필드 이온 소스와 가스를 상호 작용시키는 것에 의해 이온 빔을 발생시키는 단계 및 샘플을 이온 빔과 접촉시키는 단계를 포함하는 방법을 특징으로 한다. 또한, 본 방법은 하전 입자 소스로부터의 하전 입자 빔과 샘플을 접촉시키는 단계도 포함한다.

[0050] 일 태양에서, 본 발명은, 가스 필드 이온 소스와 가스를 상호 작용시키는 것에 의해 이온 빔을 발생시키는 단계 및 샘플과 이온 빔을 상호 작용시켜 입자가 샘플을 떠나게 하는 단계를 포함하는 방법을 특징으로 한다. 또한, 본 방법은 입자 중 적어도 일부를 검출하는 단계 및 검출 입자에 기초해 샘플에 관한 결정 정보(crystalline information)를 판정하는 단계도 포함한다.

[0051] 다른 태양에서, 본 발명은, 가스 필드 이온 소스와 가스를 상호 작용시키는 것에 의해 이온 빔을 발생시키는 단

계 및 샘플의 일부분에 대해 전압을 유도하는 단계를 포함하는 방법을 특징으로 한다. 또한, 본 방법은 입자를 검출하여 샘플에 관한 전압 콘트라스트 정보(voltage contrast information)를 판정하는 단계도 포함한다.

[0052] 부가 태양에서, 본 발명은, 가스 필드 이온 소스와 가스를 상호 작용시키는 것에 의해 이온 빔을 발생시키는 단계 및 샘플과 이온 빔을 상호 작용시켜 입자가 샘플을 떠나게 하는 단계를 포함하는 방법을 특징으로 한다. 샘플은 적어도 제1 재료 및 제2 재료를 포함한다. 또한, 본 방법은 입자에 기초해 제1 및 제2 재료를 구별하는 단계도 포함한다.

[0053] 추가 태양에서, 본 발명은, 가스 필드 이온 소스와 가스를 상호 작용시키는 것에 의해 이온 빔을 발생시키는 단계 및 활성화 가스와 이온 빔을 상호 작용시켜 샘플 표면에서의 화학 반응을 촉진하는 단계를 포함하는 방법을 특징으로 한다.

[0054] 일 태양에서, 본 발명은, 가스 필드 이온 소스와 가스를 상호 작용시키는 것에 의해 이온 빔을 발생시키는 단계 및 이온 빔을 사용해 반도체 제품에 관한 표면 아래(sub-surface) 정보를 판정하는 단계를 포함하는 방법을 특징으로 한다. 또한, 본 방법은 표면 아래 정보에 기초해 반도체 제품을 편집하는 단계도 포함한다.

[0055] 다른 태양에서, 본 발명은, 가스 필드 이온 소스와 가스를 상호 작용시키는 것에 의해 이온 빔을 발생시키는 단계 및 이온 빔을 사용해 반도체 제품에 관한 정보를 판정하는 단계를 포함하는 방법을 특징으로 한다. 이온 빔은 반도체 제품의 표면에서 10 nm 이하의 스폿 사이즈를 가진다. 또한, 본 방법은 정보에 기초해 반도체 제품을 편집하는 단계도 포함한다.

[0056] 부가 태양에서, 본 발명은, 가스 필드 이온 소스와 가스를 상호 작용시키는 것에 의해 이온 빔을 발생시키는 단계 및 이온 빔을 사용해 리소그래피 마스크에 관한 정보를 판정하는 단계를 포함하는 방법을 특징으로 한다. 이온 빔은 반도체 제품의 표면에서 10 nm 이하의 스폿 사이즈를 가진다. 또한, 본 방법은 정보에 기초해 리소그래피 마스크를 수리하는 단계도 포함한다.

[0057] 추가 태양에서, 본 발명은, 이온 빔을 사용해 샘플에 레지스트를 패터닝하는 단계를 포함하는 방법을 특징으로 한다. 이온 빔은 샘플에서 10 nm 이하의 스폿 사이즈를 가진다.

[0058] 일 태양에서, 본 발명은, 가스 필드 이온 소스와 가스를 상호 작용시키는 것에 의해 이온 빔을 발생시키는 단계 및 사양(feature)을 포함하고 있는 샘플과 이온 빔을 상호 작용시키는 단계를 포함하는 방법을 특징으로 한다. 이온 빔은 샘플의 표면에서 50 nm 이하의 스폿 사이즈를 가진다. 또한, 본 방법은 사양의 사이즈를 판정하는 단계도 포함한다.

[0059] 다른 태양에서, 본 발명은, 가스 필드 이온 소스와 가스를 상호 작용시키는 것에 의해 이온 빔을 발생시키는 단계 및 샘플과 이온 빔을 상호 작용시켜 입자가 샘플을 떠나게 하는 단계를 포함하는 방법을 특징으로 한다. 샘플은 제1 및 제2 층을 포함하는 다수의 적층층(multiple stacked layers)을 가진다. 또한, 본 방법은 입자를 검출하여, 제2 층이 제1 층에 정합되는지(registered)의 여부를 판정하는 단계도 포함한다.

[0060] 부가 태양에서, 본 발명은, 샘플을 포커싱된 이온 빔(focused ion beam)에 노출시키는 단계 및 가스 필드 이온 소스와 가스를 상호 작용시키는 것에 의해 제2 이온 빔을 발생시키는 단계를 포함하는 방법을 특징으로 한다. 또한, 본 방법은 샘플을 제2 이온 빔에 노출시키는 단계도 포함한다.

[0061] 추가 태양에서, 본 발명은, 가스 필드 이온 소스가 이온 현미경내에 존재할 때, 가스 필드 이온 소스의 전기 전도성 팁을 형성하는 단계를 포함하는 방법을 특징으로 한다.

[0062] 일 태양에서, 본 발명은 이온 소스를 포함하는 시스템을 특징으로 한다. 시스템은 이온 소스를 제1 모드에서 영상화할 수 있고, 시스템은 이온 소스를 사용해 제2 모드에서 샘플의 이미지를 수집할 수 있다. 샘플은 이온 소스와 상이하다.

[0063] 다른 태양에서, 본 발명은, 하우징, 하우징에 의해 지지되는 디스크, 디스크에 의해 지지되는 부재(member)로서 샘플을 지지하도록 구성된 다리와 표면을 갖춘 부재, 및 디바이스를 포함하는 샘플 매니퓰레이터(sample manipulaor)를 특징으로 한다. 디바이스가 제1 모드에서는 부재와 접촉하여 샘플을 이동시키지만, 제2 모드에서는 디바이스와 부재가 접촉하지 않는다.

[0064] 추가 태양에서, 본 발명은, 가스 필드 이온 소스 및 샘플 매니퓰레이터를 포함하는 시스템을 특징으로 한다. 샘플 매니퓰레이터는 하우징, 하우징에 의해 지지되는 디스크, 디스크에 의해 지지되는 부재로서 샘플을 지지하도록 구성된 다리와 표면을 갖춘 부재, 및 디바이스를 포함한다. 디바이스가 제1 모드에서는 부재와 접촉하여

샘플을 이동시키지만, 제2 모드에서는 디바이스와 부재가 접촉하지 않는다.

[0065] 일 태양에서, 본 발명은, 가스 필드 이온 소스를 가스와 상호 작용시키는 것에 의해 이온을 함유하고 있는 제1 빔을 발생시키는 단계 및 제1 빔으로부터 1가로 하전되지 않은 화학종(non-singly charged chemical species)을 제거하여, 1가로 하전된 이온을 함유하는 제2 빔을 형성하는 단계를 포함하는 방법을 특징으로 한다.

[0066] 추가 태양에서, 본 발명은, 하전된 화학종을 포함하는 화학종을 구비하는 빔을 발생시키도록 가스와 상호 작용할 수 있는 가스 필드 이온 소스를 포함하는 시스템을 특징으로 한다. 또한, 시스템은 빔에서의 화학종의 빔 경로를 화학종의 전하에 기초해 분기시키도록(diverge) 구성된 적어도 하나의 바이어스 전극을 포함한다.

[0067] 다른 태양에서, 본 발명은, 가스 필드 이온 소스와 가스를 상호 작용시키는 것에 의해 이온을 발생시키는 단계 및 이온으로 샘플을 스퍼터링하는 단계를 포함하는 방법을 특징으로 한다.

[0068] 부가 태양에서, 본 발명은, 가스 필드 이온 소스와 가스를 상호 작용시키는 것에 의해 이온을 발생시키는 단계 및 가스 필드 이온 소스와는 상이한 시스템을 사용해 전자 빔을 발생시키는 단계를 포함하는 방법을 특징으로 한다. 또한, 본 방법은 이온 빔 및 전자 빔의 양자를 사용해 샘플을 조사(investigation)하는 단계도 포함한다.

[0069] 다른 태양에서, 본 발명은, 전자 빔을 제공할 수 있는 스캔 전자 현미경을 포함하는 시스템을 특징으로 한다. 또한, 본 시스템은 가스와 상호 작용하여 이온 빔을 발생시킬 수 있는 가스 필드 이온 소스를 포함한다. 스캔 전자 현미경 및 가스 필드 이온 현미경은, 사용하는 동안, 전자 빔 및 이온 빔 모두 샘플을 조사하는데 사용될 수 있도록 배치된다.

[0070] 추가 태양에서, 본 발명은, 가스 필드 이온 소스와 가스를 상호 작용시키는 것에 의해 제1 이온 빔을 발생시키는 단계를 포함하는 방법을 특징으로 한다. 제1 이온 빔은 제1 전류를 가진다. 또한, 본 방법은 제1 전류를 가진 제1 이온 빔을 사용해, 샘플을 조사하기 위한 가스 필드 이온 소스를 준비하는 단계도 포함한다. 본 방법은 가스 필드 이온 소스와 가스를 상호 작용시키는 것에 의해 제2 이온 빔을 발생시키는 단계를 더 포함한다. 제2 이온 빔은 제2 전류를 가진다. 또한, 본 방법은 제2 이온 빔을 사용해 샘플을 조사하는 단계도 포함한다.

[0071] 실시예는 다음의 이점 중 하나 이상을 포함할 수도 있다.

[0072] 일부 실시예에서, 이온 소스(예를 들어, 가스 필드 이온 소스)는 샘플의 표면에서 비교적 작은 스폿 사이즈를 제공할 수 있다. 그러한 이온 소스를 사용하는 이온 현미경(예를 들어, 가스 필드 이온 현미경)은, 예를 들어, 비교적 높은 해상도의 샘플 이미지를 획득할 수 있다.

[0073] 소정 실시예에서, 이온 소스(예를 들어, 가스 필드 이온 소스)는 비교적 높은 밝기 및/또는 비교적 높은 감소된 밝기(relatively high reduced brightness)를 가질 수 있다. 그러한 이온 소스를 사용하는 이온 현미경(예를 들어, 가스 필드 이온 현미경)은, 예를 들어, 비교적 짧은 시주기에서 양호한 품질의 샘플 이미지를 취할 수 있고, 이것은, 다시, 대규모 샘플이 영상화될 수 있는 속도를 증가시킨다.

[0074] 일부 실시예에서, 이온 소스(예를 들어, 가스 필드 이온 소스)는 소정 이온 전류를 위해 비교적 높은 밝기(예를 들어, 비교적 낮은 에텐듀)를 가질 수 있다. 그러한 이온 소스를 사용하는 이온 현미경(예를 들어, 가스 필드 이온 현미경)은, 예를 들어, 샘플에 대한 비교적 적은 손상으로써 양호한 품질의 샘플 이미지를 취할 수 있다.

[0075] 소정 실시예에서, 가스 필드 이온 현미경은 비교적 높은 신뢰도를 가질 수 있다. 그에 따라, 예를 들어, 가스 필드 이온 소스는 가스 필드 이온 소스를 교체하지 않으면서 연장된 시주기 동안 사용될 수 있고, 이는, 예를 들어, 대규모 샘플이 영상화될 수 있는 속도를 증가시킬 수 있고, 대규모 샘플을 영상화하는 것과 연관된 작업 중단 시간(down time)을 감소시킬 수 있으며, 그리고/또는 대규모 샘플을 영상화하는 것과 연관된 비용을 감소시킬 수 있다.

[0076] 일부 실시예에서, 이온 현미경(예를 들어, 가스 필드 이온 현미경)은, 진동이 이온 소스로부터 사실상 분리되도록 구성된다. 이것은 앞서 지적된 이점 중 하나 이상을 실현하기 위한 이온 현미경의 능력을 향상시킬 수 있다.

[0077] 소정 실시예에서, 이온 현미경(예를 들어, 가스 필드 이온 현미경)은, 여전히 앞서 언급된 이점 중 하나 이상을 제공하면서, 비교적 높은 온도에서 동작될 수 있다. 예를 들어, 액체 질소가 이온 현미경을 위한 냉각제로서 사용될 수 있다. 이것은, 액체 헬륨과 같은, 소정의 다른 냉각제를 사용하는 것과 연관된 비용 및/또는 복잡도를 감소시킬 수 있다. 또한, 이것은 상당한 진동을 생성할 수 있는 액체 헬륨 냉각제가 사용되는 소정 기계 시

스템과 연관된 잠재적 문제점을 감소시킬 수도 있다.

[0078] 본 발명의 다른 사양 및 이점은 설명서, 도면, 및 청구범위로부터 명백할 것이다.

도면의 간단한 설명

[0079] 도 1은 이온 현미경 시스템의 개략도이다.

도 2는 가스 필드 이온 소스의 개략도이다.

도 3은 팁 선단(tip apex)의 실시예에 대한 확대 측면도의 개략적 표현이다.

도 4는 도 3의 팁에 대한 확대 측면도의 개략적 표현이다.

도 5는 헬륨 이온 현미경 시스템의 개략도이다.

도 6은 W(111) 팁의 실시예에 대한 확대 상면도의 개략적 표현이다.

도 7은 도 6의 W(111) 팁의 확대 측면도의 개략적 표현이다.

도 8은 원추각 측정을 나타내는 팁의 측면도이다.

도 9는 곡률 반경 측정을 나타내는 팁의 측면도이다.

도 10은 팁을 제작하는 방법의 실시예를 나타내는 흐름도이다.

도 11A는 팁을 위한 지지 어셈블리의 실시예의 사시도가다.

도 11B는 도 11A의 지지 어셈블리의 하면도이다.

도 12는 팁을 지지하기 위해 포겔 마운트(Vogel mount)를 포함하는 지지 어셈블리의 실시예의 측면도이다.

도 13은 가스 필드 이온 소스 및 이온 광학계의 실시예의 개략도이다.

도 14는 이온 광학 시스템의 실시예의 개략도이다.

도 15는 다중 개구 간극(multi-opening aperture)의 실시예의 상면도이다.

도 16은 다중 개구 간극의 실시예의 상면도이다.

도 17은 가스 필드 이온 현미경 팁을 위한 이동 메커니즘의 실시예의 단면도이다.

도 18은 Everhart-Thornley 검출기의 개략도이다.

도 19는 마이크로 채널 플레이트(MCP;microchannel plate) 검출기를 포함하는 가스 필드 이온 현미경 시스템의 일부분의 단면도이다.

도 20A 및 도 20B는 탄소 표면에 의해 지지되는 금 섬(gold island)의 측면도 및 상면도이다.

도 20C는 도 20A 및 도 20B의 샘플을 위해 이온 빔의 위치의 함수로서 측정된 평균적인 이차 전자의 총 도수(total abundance)의 플롯이다.

도 21은 가스 전달 시스템을 포함하는 가스 필드 이온 현미경의 일부분의 개략도이다.

도 22는 플루드 건(flood gun)을 포함하는 가스 필드 이온 현미경의 일부분의 개략도이다.

도 23은 표면 아래 전하층을 포함하는 샘플의 개략도이다.

도 24는 샘플에서 표면 전하를 감소시키기 위한 콜렉터 전극의 개략도이다.

도 25는 샘플에서 표면 전하를 감소시키기 위한 플루드 건 장치의 개략도이다.

도 26은 샘플에서 표면 전하를 감소시키기 위한, 반전 플레이트를 포함하는 플루드 건 장치의 개략도이다.

도 27A는 양의 하전층(positively charged layer)이 배치되어 있는 샘플의 개략적 표현이다.

도 27B는 양의 하전층 및 음의 하전층이 배치되어 있는 샘플의 개략적 표현이다.

도 28은 진동 분리형 샘플 매니퓰레이터(vibration-decoupled sample manipulator)의 실시예의 개략도이다.

도 29는 진동 분리형 샘플 매니퓰레이터의 실시예의 개략도이다.

도 30은 진동 분리형 샘플 매니퓰레이터의 실시예의 개략도이다.

도 31은 입자 빔에서 이온과 중성 원자를 분리하기 위한 정전기 필터링 시스템의 개략도이다.

도 32는 입자 빔에서 중성 원자, 1가로 하전된 이온, 및 2가로 하전된(doubly-charged) 이온을 분리하기 위한 정전기 필터링 시스템의 개략도이다.

도 33은 입자 빔에서 중성 원자, 1가로 하전된 이온, 및 2가로 하전된 이온을 분리하기 위한 전기 필드 및 자기 필드의 무분산 시퀀스(dispersionless sequence)를 포함하는 필터링 시스템의 개략도이다.

도 34A는 표면으로부터의 헬륨 이온 산란 패턴의 실시예를 나타내는 개략도이다.

도 34B는 도 34A에서의 검출기에 의해 검출되는 산란 헬륨 이온의 상대 도수(relative abundance)의 플롯을 나타내는 도면이다.

도 35A, 도 35D 및 도 35G는, 상이한 검출기를 사용해 산란 헬륨 이온을 검출하는, 표면으로부터의 헬륨 이온 산란 패턴의 개개 실시예를 나타내는 개략도이다.

도 35B, 도 35E 및 도 35H는, 각각, 도 35A, 도 35D 및 도 35G에 도시된 시스템에 대한 총 산란 헬륨 이온 수율(total scattered helium ion yield)의 플롯이다.

도 35C, 도 35F 및 도 35I는, 각각, 도 35A, 도 35D 및 도 35G에서의 검출기에 의해 검출되는 산란 헬륨 이온의 상대 도수의 플롯이다.

도 36은 샘플로부터 산란 이온을 측정하기 위한 검출기의 정렬을 포함하는 가스 필드 이온 현미경의 일부분을 나타내는 개략도이다.

도 37A-도 37D는 전기 전도성 팁의 스캔 전자 현미경 이미지이다.

도 38은 전기 전도성 팁 표면의 디지털 표현이다.

도 39는 도 38에 도시된 표면의 경사에 대한 기울기의 플롯이다.

도 40은 선단에서의 터미널 셀프로서 삼량체(trimer)를 갖춘 전기 전도성 팁의 필드 이온 현미경 이미지이다.

도 41은 선단에서의 터미널 셀프로서 삼량체를 갖춘 전기 전도성 팁의 스캔 필드 이온 현미경 이미지이다.

도 42는 이차 전자를 검출하도록 구성된 헬륨 이온 현미경으로 촬영된 샘플 이미지이다.

도 43은 이차 전자를 검출하도록 구성된 헬륨 이온 현미경으로 촬영된 샘플 이미지이다.

도 44는 전기 전도성 팁의 스캔 필드 이온 현미경 이미지이다.

도 45는 선단에서의 터미널 셀프로서 삼량체를 갖춘 전기 전도성 팁의 필드 이온 현미경 이미지이다.

도 46은 전기 전도성 팁의 스캔 전자 현미경 이미지이다.

도 47은 전기 전도성 팁의 필드 이온 현미경 이미지이다.

도 48은 전기 전도성 팁의 필드 이온 현미경 이미지이다.

도 49는 전기 전도성 팁의 필드 이온 현미경 이미지이다.

도 50은 선단에서의 터미널 셀프로서 삼량체를 갖춘 전기 전도성 팁의 스캔 필드 이온 현미경 이미지이다.

도 51은 이차 전자를 검출하도록 구성된 헬륨 이온 현미경으로 촬영된 샘플 이미지이다.

도 52는 이차 전자를 검출하도록 구성된 헬륨 이온 현미경으로 촬영된 샘플 이미지이다.

도 53는 이차 전자를 검출하도록 구성된 헬륨 이온 현미경으로 촬영된 샘플 이미지이다.

도 54는 이차 전자를 검출하도록 구성된 헬륨 이온 현미경으로 촬영된 샘플 이미지이다.

도 55는 이차 전자를 검출하도록 구성된 헬륨 이온 현미경으로 촬영된 샘플 이미지이다.

도 56은 팁을 위한 지지대(support)의 개략적 표현이다.

도 57은 팁을 위한 지지대의 개략적 표현이다.

도 58은 이차 전자를 검출하도록 구성된 헬륨 이온 현미경으로 촬영된 샘플 이미지이다.

도 59A는 이차 전자를 검출하도록 구성된 헬륨 이온 현미경으로 촬영된 샘플 이미지이다.

도 59B는 스캔 전자 현미경으로 촬영된 샘플 이미지이다.

도 60은 샘플로부터의 이차 전자 전류의 그래프이다.

도 61A는 이차 전자를 검출하도록 구성된 헬륨 이온 현미경으로 촬영된 샘플 이미지이다.

도 61B는 스캔 전자 현미경으로 촬영된 샘플 이미지이다.

도 62는 이차 전자를 검출하도록 구성된 헬륨 이온 현미경으로 촬영된 샘플 이미지이다.

도 63은 이차 전자를 검출하도록 구성된 헬륨 이온 현미경으로 촬영된 샘플 이미지이다.

도 64는 이차 전자를 검출하도록 구성된 헬륨 이온 현미경으로 촬영된 샘플 이미지이다.

도 65는 이차 전자를 검출하도록 구성된 헬륨 이온 현미경으로 촬영된 샘플 이미지이다.

도 66은 이차 전자를 검출하도록 구성된 검출기 구성의 실시예이다.

도 67A는 도 59A에서의 이미지에 기초한 가변 샘플 위치에서의 이차 전자 밀도(secondary electron intensity)의 그래프이다.

도 67B는 도 59B에서의 이미지에 기초한 가변 샘플 위치에서의 이차 전자 밀도의 그래프이다.

도 68은 헬륨 이온 및 중성 헬륨 원자를 검출하도록 구성된 헬륨 이온 현미경으로 촬영된 샘플 이미지이다.

도 69A-도 69C는 헬륨 이온 및 중성 헬륨 원자를 검출하도록 구성된 헬륨 이온 현미경으로 촬영된 샘플 이미지이다.

도 70A는 헬륨 이온 및 중성 헬륨 원자를 검출하도록 구성된 헬륨 이온 현미경으로 촬영된 샘플 이미지이다.

도 70B는 도 70A의 이미지에 대하여 샘플을 떠나는 헬륨 이온 및 헬륨 원자의 각밀도(angular intensity)를 나타내는 극좌표계(polar plot)이다.

도 71A는 헬륨 이온 및 중성 헬륨 원자를 검출하도록 구성된 헬륨 이온 현미경으로 촬영된 샘플 이미지이다.

도 71B는 도 71A의 이미지를 위해 샘플을 떠나는 헬륨 이온 및 헬륨 원자의 각밀도를 나타내는 극좌표계이다.

도 72는 헬륨 이온 및 중성 헬륨 원자를 검출하도록 구성된 헬륨 이온 현미경으로 촬영된 샘플 이미지이다.

도 73은 헬륨 이온 및 중성 헬륨 원자를 검출하도록 구성된 헬륨 이온 현미경으로 촬영된 샘플 이미지이다.

도 74는 광자를 검출하도록 구성된 헬륨 이온 현미경을 사용해 촬영된 샘플 이미지이다.

도 75는 이차 전자를 검출하도록 구성된 헬륨 이온 현미경으로 촬영된 샘플 이미지이다.

도 76은 도 75의 이미지에 대한 일부분의 확장도(expanded view)이다.

도 77은 도 76의 이미지를 관통하는 라인 스캔(line scan)을 위한 픽셀 위치의 함수로서의 이미지 밀도의 플롯이다.

도 78은 도 77에 도시된 데이터에 대한 수치 스케일링(numerical scaling) 및 평활화(smoothing) 연산 이후의 플롯이다.

도 79는 헬륨 이온 및 중성 헬륨 원자를 검출하도록 구성된 헬륨 이온 현미경으로 촬영된 샘플 이미지이다.

도 80은 도 79의 이미지 일부분을 관통하는 라인 스캔을 위한 픽셀 위치의 함수로서의 이미지 밀도의 플롯이다.

도 81은 스캔 전자 현미경으로 촬영된 샘플 이미지이다.

도 82는 도 81의 이미지 일부분을 관통하는 라인 스캔을 위한 픽셀 위치의 함수로서의 이미지 밀도의 플롯이다.

다양한 도면에서의 유사한 참조 심볼은 유사한 구성 요소를 지시한다.

발명을 실시하기 위한 구체적인 내용

[0080] 일반적 도입

[0081] 이온은 현미경 시스템에서의 샘플 영상화 및 다른 애플리케이션을 위해 발생되고 사용될 수 있다. 가스 필드 이온 소스를 사용해 샘플 분석(예를 들어, 영상화)에 사용될 수 있는 이온을 발생시키는 현미경 시스템을 가스 필드 이온 현미경이라고 한다. 가스 필드 이온 소스는, (예를 들어, 추출기(다음의 논의 참고하기)에 대하여 1 kV 이상) 높은 양전위를 전기 전도성 팁의 선단쪽에 인가하면서, 전기 전도성 팁의 부근에 (예를 들어, 약 4 내지 5 옹스트롬의 거리내에) 중성 가스종(neutral gas species)을 가져오는 것에 의해, 중성 가스종을 이온화하여 (예를 들어, 이온 빔 형태의) 이온을 발생시키는데 사용될 수 있는 (통상적으로 10개 이하의 원자를 가진) 전기 전도성 팁을 포함하는 디바이스이다.

[0082] 도 1은 가스 소스(110), 가스 필드 이온 소스(120), 이온 광학계(130), 샘플 매니퓰레이터(140), 정면 검출기(150), 배면 검출기(160), 및 통신 라인(172a-172f)을 통해 시스템(100)의 다양한 컴포넌트에 전기 접속된 전자 제어 시스템(170)(예를 들어, 컴퓨터와 같은, 전자 프로세서)을 포함하는 가스 필드 이온 현미경 시스템(100)의 개략도를 나타낸다. 샘플(180)은 이온 광학계(130)와 검출기(150, 160) 사이의 샘플 매니퓰레이터(140)에 (in/on) 배치된다. 사용하는 동안, 이온 빔(192)은 이온 광학계(130)를 통해 샘플(180)의 표면(181)으로 유도되고, 샘플(180)과 이온 빔(192)의 상호 작용으로부터 발생되는 입자(194)는 검출기(150 및/또는 160)에 의해 측정된다.

[0083] 일반적으로, 시스템을 소개(evacuation)하는 것에 의해 시스템(100)에서 소정의 바람직스럽지 못한 화학종의 존재를 감소시키는 것이 바람직스럽다. 통상적으로, 시스템(100)의 상이한 컴포넌트는 상이한 배경 압력으로 유지된다. 예를 들어, 가스 필드 이온 소스(120)는 약 10^{-10} Torr의 압력으로 유지된다. 가스가 가스 필드 이온 소스(120)쪽으로 도입될 때, 배경(background) 압력은 약 10^{-5} Torr로 상승한다. 이온 광학계(130)는 가스 필드 이온 소스(120)쪽으로의 가스 도입 이전에 약 10^{-8} Torr의 배경 압력으로 유지된다. 가스가 도입될 때, 이온 광학계(130)에서의 배경 압력은 통상적으로 약 10^{-7} Torr로 증가한다. 샘플(180)은, 통상적으로 약 10^{-6} Torr의 배경 압력으로 유지되는 챔버내에 배치된다. 이 압력은 가스 필드 이온 소스(120)에서의 가스의 존재 또는 부재로 인해 크게 달라지지 않는다.

[0084] 도 2에 도시된 바와 같이, 가스 소스(110)는 가스 필드 이온 소스(120)에게로 하나 이상의 가스(182)를 공급하도록 구성된다. 다음에서 좀더 상세하게 설명되는 바와 같이, 가스 소스(110)는 가스(들)를 다양한 순도, 유속, 압력, 및 온도에서 공급하도록 구성될 수 있다. 일반적으로, 가스 소스(110)에 의해 공급되는 가스 중 적어도 하나는 불활성 가스(헬륨(He), 네온(Ne), 아르곤(Ar), 크립톤(Kr), 크세논(Xe))이고, 불활성 가스의 이온이 바람직스럽기로는 이온 빔(192)에서의 일차 구성물이다. 일반적으로, 샘플(180)의 표면(181)에서 측정되는 바와 같이, 이온 빔(192)에서의 이온 전류는, 시스템(100)에서의 불활성 가스 압력이 증가함에 따라, 단조적으로(monotonically) 증가한다. 소정 실시예에서, 이 관계는, 불활성 가스 압력의 소정 범위에 대해, 일반적으로 가스 압력에 비례하여 전류가 증가하는 거듭제곱 법칙(power law)에 의해 설명될 수 있다. 동작하는 동작, 불활성 가스의 압력은 팁 선단(다음의 논의 참고하기)에 인접한 곳에서 통상적으로 10^{-2} Torr 이하(예를 들어, 10^{-3} Torr 이하, 10^{-4} Torr 이하) 및/또는 10^{-7} Torr 이상(예를 들어, 10^{-6} Torr 이상, 10^{-5} Torr 이상)이다. 일반적으로, 비교적 높은 순도의 가스를 사용하는 것(예를 들어, 시스템에서 바람직스럽지 못한 화학종의 존재를 감소시키는 것)이 바람직스럽다. 일례로서, He이 사용될 때, He은 적어도 99.99% 순도(예를 들어, 99.995% 순도, 99.999% 순도, 99.9995% 순도, 99.9999% 순도)일 수 있다. 마찬가지로, 다른 불활성 가스(Ne 가스, Ar 가스, Kr 가스, Xe 가스)가 사용될 때, 가스의 순도는 높은 순도의 공업용 등급인 것이 바람직스럽다.

[0085] 선택적으로, 가스 소스(110)는 불활성 가스(들)에 추가하여 하나 이상의 가스를 공급할 수 있다. 다음에서 좀더 상세하게 논의되는 바와 같이, 그러한 가스의 일례로 질소를 들 수 있다. 통상적으로, 추가 가스(들)가 불활성 가스(들)에서의 불순물의 레벨을 초과하는 레벨로 존재할 수도 있지만, 추가 가스(들)는 여전히 가스 소스(110)에 의해 도입되는 전체 가스 혼합물의 소수 성분을 구성한다. 일례로서, He 가스 및 Ne 가스가 가스 소스(110)에 의해 가스 필드 이온 소스(120)쪽으로 도입되는 실시예에서, 전체 가스 혼합물은 20% 이하(예를 들어, 15% 이하, 12% 이하)의 Ne 및/또는 1% 이상(예를 들어, 3% 이상, 8% 이상)의 Ne를 포함할 수 있다. 예를 들어, He 가스 및 Ne 가스가 가스 소스(110)에 의해 도입되는 실시예에서, 전체 가스 혼합물은 5%에서 15%(예를 들어, 8%에서 12%, 9%에서 11%)의 Ne를 포함할 수 있다. 다른 일례로서, He 가스 및 질소 가스가 가스 소스(110)에

의해 도입되는 실시예에서, 전체 가스 혼합물은 1% 이하(예를 들어, 0.5% 이하, 0.1% 이하)의 질소 및/또는 0.01% 이상(예를 들어, 0.05% 이상)의 질소를 포함할 수 있다. 예를 들어, He 가스 및 질소 가스가 가스 소스(110)에 의해 도입되는 실시예에서, 전체 가스 혼합물은 0.01%에서 1%(예를 들어, 0.05%에서 0.5%, 0.08%에서 0.12%)의 질소를 포함할 수 있다. 일부 실시예에서, 추가 가스(들)는, (예를 들어, 가스를 혼합한 다음 단일 주입구(single inlet)를 통해 혼합물을 시스템(100)쪽으로 전달하는 가스 분기관의 사용을 통해) 시스템(100)으로 진입하기 전에 불활성 가스(들)와 혼합된다. 소정 실시예에서, 추가 가스(들)는 시스템(100)으로 진입하기 전에 불활성 가스(들)와 혼합되지 않는다(예를 들어, 별도의 주입구가 사용되어 각각의 가스를 시스템(100)쪽으로 주입하지만, 별도 주입구는 충분히 가까워, 가스 필드 이온 소스(120)에서의 구성 요소 중 어떤 것과도 상호작용하기 이전에 가스는 혼합된다).

[0086] 가스 필드 이온 소스(120)는 가스 소스(110)로부터 하나 이상의 가스(182)를 수신하고 가스(들)(182)로부터 가스 이온을 발생시키도록 구성된다. 가스 필드 이온 소스(120)는 팁 선단(187)을 갖춘 전기 전도성 팁(186), 추출기(190) 및 선택적으로 억제기(188)를 포함한다. 통상적으로, 팁 선단(187)에서 (도 2에 도시되어 있지 않은) 샘플(180) 표면(181)까지의 거리는 5 cm 이상(예를 들어, 10 cm 이상, 15 cm 이상, 20 cm 이상, 25 cm 이상) 및/또는 100 cm 이하(예를 들어, 80 cm 이하, 60 cm 이하, 50 cm 이하)이다. 예를 들어, 일부 실시예에서, 팁 선단(187)에서 샘플(180) 표면(181)까지의 거리는 5 cm에서 100 cm(예를 들어, 25 cm에서 75 cm, 40 cm에서 60 cm, 45 cm에서 55 cm)이다.

[0087] 전기 전도성 팁(186)은 다양한 재료로 형성될 수 있다. 일부 실시예에서, 팁(186)은 금속(예를 들어, 텅스텐(W), 탄탈(Ta), 이리듐(Ir), 레늄(Rh), 니오브(Nb), 백금(Pt), 몰리브덴(Mo))으로 형성된다. 소정 실시예에서, 전기 전도성 팁(186)은 합금으로 형성될 수 있다. 일부 실시예에서, 전기 전도성 팁(186)은 상이한 재료(예를 들어, 탄소(C))로 형성될 수 있다.

[0088] 사용하는 동안, 팁(186)은 추출기(190)에 대하여 양(예를 들어, 약 20 kV)으로 바이어스되고, 추출기(190)는 외부 그라운드에 대하여 음 또는 양(예를 들어, -20 kV에서 +50 kV)으로 바이어스되며, 선택적 억제기(188)는 팁(186)에 대하여 양 또는 음(예를 들어, -5 kV에서 +5 kV)으로 바이어스된다. 팁(186)은 전기 전도성 재료로 형성되기 때문에, 팁 선단(187)에서의 팁(186)의 전기 필드(electric field)는 팁 선단(187)의 표면으로부터 바깥을 향한다. 팁(186)의 형태로 인해, 전기 필드는 팁 선단(187) 부근에서 최강이다. 팁(186)의 전기 필드 강도는, 예를 들어, 팁(186)에 인가되는 양 전압을 변경하는 것에 의해 조정될 수 있다. 이러한 구성에 의해, 가스 소스(110)에 의해 공급되는 비이온화 가스 원자(182;un-ionized gas atoms)는 이온화되어 팁 선단(187) 부근에서 양으로 하전된 이온이 된다. 양으로 하전된 이온은 양으로 하전된 팁(186)에 의해 반발되는 동시에 음으로 하전된 추출기(190)에 의해 유인됨으로써, 양으로 하전된 이온은 이온 빔(192)으로서 팁(186)에서 이온 광학계(130)쪽으로 유도된다. 억제기(188)는 팁(186)과 추출기(190) 사이의 전체 전기 필드 및, 그에 따라, 팁(186)에서 이온 광학계(130)에 이르는 양으로 하전된 이온의 궤적을 제어하는 것을 지원한다. 일반적으로, 팁(186)과 추출기(190) 사이의 전체 전기 필드는, 팁 선단(187)에서 양으로 하전된 이온이 발생되는 속도 및 양으로 하전된 이온이 팁(186)에서 이온 광학계(130)쪽으로 전달되는 효율성을 제어하도록 조정될 수 있다.

[0089] 일례로서, 이론에 의해 강제될 것이라고 희망하지는 않지만, He 이온은 다음과 같이 발생될 수 있다고 생각된다. 가스 필드 이온 소스(120)는, 팁 선단(187) 부근에서의 팁(186) 전기 필드가 비이온화 He 가스 원자(182)의 이온화 필드를 초과하고, 팁(186)은 비교적 낮은 온도로 유지되도록 구성된다. 비이온화 He 가스 원자(182)는 팁 선단(187)에 근접하게 위치하고, He 원자는, He 원자(182)와 팁 선단(187) 사이에서 약한 인력을 발생시키면서, 팁 전기 필드에 의해 분극될 수 있다. 결과적으로, He 원자(182)는 팁 선단(187)과 접촉하여 일정 시간 동안 그것에 속박된(예를 들어, 물리흡착된(physisorbed)) 상태를 유지할 수도 있다. 팁 선단(187) 부근에서, 전기 필드는, (예를 들어, 이온 빔의 형태로) 양으로 하전된 He 이온을 발생시키면서, 팁 선단(187)쪽으로 흡착된 He 원자(182)를 이온화하기에 충분할 정도로 높다.

[0090] 도 3은 (W(111)로 형성된;다음의 논의 참고하기) 팁 선단(187)의 개략적 표현이다. 팁 선단(187)은 원자 셸프들(atomic shelves)을 형성하도록 정렬된 원자층을 포함한다. 터미널 원자 셸프는 원자(142)에 의해 형성된다. 제2 원자 셸프는 원자(144)에 의해 형성되고, 제3 원자 셸프는 원자(146)에 의해 형성된다. 가스 소스(110)에 의해 전달되는 중성 가스 원자(182)는 팁 선단(187) 부근에 존재한다. 원자(182)는 팁 선단(187)의 전기 필드로 인해 분극되고, 원자(182)에서의 화살표에 의해 지시되는 바와 같이, 원자(182)를 팁 선단(187)을 향해 이동시키는 비교적 약한 인력을 경험한다.

[0091] 팁 전기 필드의 강도에 따라, 팁 선단(187) 부근의 원자 셸프에서의 원자 각각은 대응되는 이온화 디스크(148)

를 가질 수 있다. 이온화 디스크(148)는, 그 속으로 과감하게 뛰어드는 중성 He 원자가 이온화를 경험할 확률이 높은 공간 영역이다. 통상적으로, 중성 He 원자의 이온화는 중성 He 원자에서 팁 선단 원자쪽으로 터널링하는 전자를 통해 발생한다. 따라서, 이온화 디스크(148)는, He 이온이 발생되고 He 이온이 출현하는 공간 영역을 표현한다.

[0092] 특정한 팁 선단 원자에 대한 이온화 디스크(148)의 사이즈는 팁 선단(187)의 형태 및 팁 선단(187)에 인가되는 전위에 의존한다. 일반적으로, He 원자의 이온화는, 로컬 전기 필드가 He 원자의 이온화 전위를 초과하는, 팁 선단(187)에 인접한 공간 영역에서 발생할 수 있다. 따라서, 팁 선단(187)에 높은 전위가 인가되는 경우, 다수 팁 원자가 이온화 디스크를 가질 것이다. 또한, 팁 선단(187) 부근의 로컬 전기 필드는 팁 선단(187)의 형태에 의존한다. 팁 선단이 비교적 날카로운 경우, 팁 선단(187) 부근에서의 로컬 전기 필드는 비교적 높을 것이다. 팁 선단이 비교적 무딘 경우, 로컬 전기 필드는, 팁 선단(187) 부근이라 하더라도, 좀더 작을 것이다.

[0093] 팁 선단(187)의 개개 원자에 대응되는 이온화 디스크(148)는 도 3에서 공간적으로 서로 분리된다. 일부 실시예에서, 팁 선단(187)의 전기 필드가 충분히 크다면, 하나 이상의 원자(예를 들어, 원자(142))로부터의 이온화 디스크는, 다수의 팁 선단 원자에 근접한 공간 영역까지 미치는 좀더 큰 이온화 디스크를 생성하면서, 공간적으로 중첩할 수 있다. 팁 선단(187)에서의 전기 필드를 감소시키는 것에 의해, 이온화 디스크(148)에 의해 점유되는 공간 부피는 감소될 수 있고, 수개 팁 선단 원자가 공간적으로 분리된, 그것만의 고유한 개개 이온화 디스크를 각각 갖는, 도 3에 묘사된 기하학적 구조가 실현될 수 있다. 많은 경우, 팁 선단(187)의 형태는 이온 소스(120)의 사용 동안 쉽게 변경되지 않기 때문에, 팁 선단(187) 부근에서의 전기 필드는 통상적으로, 팁 선단(187)에 인가되는 전위를 조정하는 것에 의해 제어된다.

[0094] 팁 선단(187)에 인가되는 전위를 추가적으로 감소시키는 것에 의해, 도 3에서의 이온화 디스크 중 일부가 제거될 수 있다. 예를 들어, 팁 선단(187)이 제2 원자 셀프 원자(144) 부근에서는 그다지 날카롭지 않고, 팁 선단(187)에 인가되는 전위를 감소시키는 것에 의해, 원자(144) 부근에서의 팁 선단(187) 전기 필드는, He 원자 이온화가 이 영역에서는 높은 확률로써 발생하지 않을 정도로 감소될 수 있다. 결과적으로, 원자(144)에 대응되는 이온화 디스크는 더 이상 존재하지 않는다. 그러나, 터미널 셀프 원자(142) 부근에서의 팁 선단(187) 전기 필드는 He 원자 이온화를 발생시키기에 충분할 정도로 여전히 높을 수 있으므로, 원자(142)에 대응되는 이온화 디스크(148)는 잔존한다. 팁 선단(187)에 인가되는 전위를 조심스럽게 제어하는 것에 의해, 이온 소스(120)는 터미널 셀프 원자(142)에 대응되는 이온화 디스크만이 존재하고, 터미널 셀프 원자에 대응되는 이온화 디스크는 공간적으로 서로 분리되도록 동작할 수 있다. 결과적으로, 팁 선단(187) 부근에서 이온화되는 He 원자는 특정한 터미널 셀프 원자 부근에서의 이온화를 통해 발생된다.

[0095] 중성 He 원자(182)는, 그것이 이온화 디스크(148)내에 머무르는 시간이 길어질수록 이온화를 경험할 확률이 높아진다. 팁 선단(187)의 전기 필드에 의해 유도되는 그리고 분극된 He 원자를 팁 선단(187)을 향해 이동시키는 He 원자의 분극은, He 원자(182)가 이온화 디스크(148)내에 머무르는 시간량을 증가시키면서 그리고 분극된 He 원자의 시간에 따른 이온화 확률을 증가시키면서, 분극된 He 원자가 팁 선단(187)에 속박된 상태를 유지한다는 것을 추가적으로 보장한다.

[0096] 또한, 분극된 He 원자는 팁 선단(187)의 표면을 따라 일 위치에서 다른 위치로 이동할 수도 있다. 분극된 He 원자와 팁 선단(187) 사이의 인력은 분극된 He 원자의 위치에서의 팁 선단(187) 전기 필드의 로컬 강도에 의존하기 때문에, 분극된 He 원자의 이동은 원자를, 로컬 전기 필드가 최고인, 팁(186)의 팁 선단(187) 끝으로(예를 들어, 터미널 셀프(142)쪽으로) 전달하는 경향이 있다. 분극된 He 원자의 이러한 전달 메커니즘은, (예를 들어, 터미널 셀프 원자(142)에만 대응되는 개별 이온화 디스크가 존재한다는 것을 보장하기 위한) 팁(186)에 인가되는 전위에 대한 제어와 결합하여, He 이온 빔(192)이 가스 필드 이온화 소스(120)에 의해 발생되도록 이온 소스(120)를 조작하는데 사용될 수 있는데, 이 경우, 이온 빔의 개개 He 이온은 터미널 셀프 원자(142) 중 하나와 He 가스의 상호 작용을 통해 발생된다. 따라서, 이온 빔(192)은 터미널 셀프 원자(142) 각각으로부터의 복수개 He 이온을 포함하는데, 이 경우, 각각의 He 이온은 터미널 셀프 원자(142) 중 하나에서의 이온화에 기인될 수 있다.

[0097] 앞서 논의된 바와 같이, 일반적으로, 이온화 디스크(148)의 사이즈 및 형태는 팁 선단(187)에 인가되는 전위를 변화시키는 것에 의해 변경될 수 있고, 인접한 이온화 디스크(148)는 적당히 높은 인가 전위와 중첩하게 되거나 적당한 낮은 인가 전위에 의해 공간적으로 서로 구별되는 상태를 유지하게 될 수 있다. 통상적으로, 이온화 디스크(148)는 팁 원자(142, 144, 및 146)로부터 약 0.4 ㎚의 거리만큼 떨어져 위치한다. 팁 원자에 대응되는 개개 이온화 디스크는 통상적으로, 소정 디스크와 그것의 대응되는 원자를 연결하는 라인에 따른 방향으로 측정되

는, 약 0.02 nm의 두께를 가진다. 이온화 디스크(148)는 통상적으로, 소정 디스크와 그것의 대응되는 원자를 연결하는 라인에 수직인 방향으로 측정되는, 대략 대응되는 원자의 지름인 지름을 가진다.

[0098] 도 4는, 팁(186)에 인가되는 전위가 3개의 이온화 디스크(148)를 발생시키는, 팁 선단(187)의 동작 구성을 나타내는데, 3개의 이온화 디스크(148) 각각은 3개의 터미널 원자 셀프 원자(142) 중 하나에 대응된다. 일단 He 이온이 팁 선단(187) 부근에서 발생되고 나면, He 이온은 높은 양의 팁 전위로 인해 팁으로부터 멀어지는 방향으로 빠르게 가속된다. He 이온은 복수개 궤적을 따라 팁 선단(187)으로부터 멀어지는 방향으로 가속된다. 그러한 2개 궤적(156)이 도 4으로 도시된다. 도 4에 묘사된 바와 같이, 궤적(156)은 중앙의 터미널 셀프 원자에 대한 FWHM(full width at half maximum) 궤적 분포의 좌우 극한에 대응된다. 그에 따라, 궤적(156)이 뒤쪽으로(예를 들어, 라인(154)을 따라) 중앙 터미널 셀프 원자의 위치까지 보외된다면, 궤적은 중앙 터미널 셀프 원자에 대한 가상 소스(152)를 정의한다. 가상 소스(152)의 지름은 통상적으로 중앙 터미널 셀프 원자의 지름보다 작고, (예를 들어, 2 이상의 팩터, 3 이상의 팩터, 5 이상의 팩터, 10 이상의 팩터만큼) 중앙 터미널 셀프 원자의 지름보다 훨씬 작을 수도 있다. 유사한 고려 사항이 나머지 터미널 셀프 원자에도 적용되고, 각각의 터미널 셀프 원자는 대응되는 가상 소스 사이즈를 가진다.

[0099] 터미널 셀프 원자에 대한 작은 가상 소스 사이즈는 다수 이점을 제공할 수 있다. 예를 들어, 이온 빔(192)의 작은 가상 소스 사이즈 및 이온 빔(192)의 이온이 발생하는 이온화 디스크(148)의 비교적 작은 두께는, 이온 빔(192)이 비교적 높은 밝기 및 비교적 좁은 이온 에너지 분포를 갖는다는 것을 보장하는데 도움이 될 수 있다.

[0100] 이론에 의해 강제될 것이라고 희망하지는 않지만, 지나치게 낮은 팁 온도를 사용하는 것은 전류 안정성에 부정적인 영향을 미칠 수 있고 그리고/또는 팁에서의 증가된 불순물 흡착으로부터의 바람직스럽지 못한 효과를 증가시킬 수 있다고 생각된다. 일반적으로, 팁(186)의 온도는 5K 이상(예를 들어, 10 K 이상, 25K 이상, 50K 이상, 75K 이상) 및/또는 100K 이하(예를 들어, 90K 이하, 80K 이하)이다. 예를 들어, 팁(186)의 온도는 5K에서 100K(예를 들어, 25K에서 90K, 50K에서 90K, 75K에서 80K)일 수 있다. 팁(186)의 온도는, 예를 들어, 액체 헬륨 또는 액체 질소와 같은, 냉각제와의 열 커플링(thermal coupling)에 의해 달성될 수 있다. 다른 방법으로 또는 추가적으로, 팁(186)은 극저온 냉장고를 사용해 열적으로 냉각될 수 있다.

[0101] 팁(186)의 온도가 지나치게 낮으면, 흡착된 He 원자가 이동에 의해 팁 선단(187)의 터미널 원자 셀프에서의 원자(142)에게로 전달되는 속도가 감소되므로, 매 단위 시간당 충분한 He 원자가, 그것이 이온화될 수 있는 원자(142)에게로 도달하지 않는다. 결과적으로, (예를 들어, FIM(field ion microscope) 기술 또는 SFIM(스캔 FIM) 기술을 사용하는 것에 의해) 팁(186)의 방사 패턴이 관찰될 때, 개개 터미널 셀프 원자로부터의 이온 도수는 (흔히 블링킹(blinking)이라고 하는) 비교적 높은 도수에서 비교적 낮은 도수까지 교대한다. 이것은, 예를 들어, 소정 시점의 터미널 셀프 원자 부근에 이온화를 위해 이용 가능한 He 원자가 존재하지 않을 때 발생할 수 있다. 팁(186)의 온도가 증가됨에 따라, 팁 선단(187)의 터미널 셀프 원자로의 He 원자 전달 속도는 증가하고, 터미널 셀프 원자(142)로부터의 교대하는 이러한 높은/낮은 도수의 관찰은 감소되거나 제거된다.

[0102] 또한, 팁(186)의 온도가 지나치게 높으면, 분극된 He 원자는, 터미널 셀프 원자(142) 부근에서의 He 원자의 충분한 이온화를 보장하기에 충분히 긴 시주기 동안 팁(186)에 속박된 상태를 유지하기에는 지나치게 높은 운동 에너지를 가질 것이다. 또한, 이것은 개개 터미널 셀프 원자로부터 FIM 및/또는 SFIM 영상화 기술을 사용해 관찰되는 바와 같이 방사 패턴의 소멸을 초래할 수 있다. 결과적으로, 터미널 셀프 원자(142) 각각에서의 He 이온화 프로세스가 터미널 셀프 원자(142) 각각으로부터 안정한 이온 전류를 발생시킨다는 것을 보장하기 위해, 팁(186)의 온도는 바람직스럽지 못한 높은 온도 영향 및 낮은 온도 영향 모두를 완화하도록 조심스럽게 제어된다.

[0103] 일반적으로, 이온 광학계(130)는 이온 빔(192)을 샘플(180)의 표면(181)쪽으로 유도하도록 구성된다. 다음에서 좀더 상세하게 설명되는 바와 같이, 이온 광학계(130)는, 예를 들어, 빔(192)에서의 이온을 포커싱, 평행 시준(collimation), 편향, 가속, 및/또는 감속할 수 있다. 또한, 이온 광학계(130)는 이온 빔(192)에서의 이온 중 일부분만이 이온 광학계(130)를 통과하게 할 수도 있다. 일반적으로, 이온 광학계(130)는 원하는 바에 따라 구성되는 다양한 정전기 및 다른 이온 광학 소자를 포함한다. 이온 광학계(130)에서의 하나 이상의 컴포넌트(예를 들어, 정전기 편향기)에 대한 전기 필드 강도를 조작하는 것에 의해, He 이온 빔(192)은 샘플(180)의 표면(181)을 가로질러 스캔될 수 있다. 예를 들어, 이온 광학계(130)는 이온 빔(192)을 2개의 직교 방향으로 편향하는 2개의 편향기를 포함할 수 있다. 편향기는 가변 전기 필드 강도를 가질 수 있고, 그에 따라, 이온 빔(192)은 표면(181)의 영역을 가로질러 래스터링(rastering)된다.

[0104] 이온 빔(192)이 샘플(180)에 충돌할 때, 다양하고 상이한 유형의 입자(193)가 발생될 수 있다. 이 입자는, 예

를 들어, 이차 전자, 오제 전자, 이차 이온, 이차 중성 입자, 일차 중성 입자, 산란 이온 및 광자(예를 들어, X-선 광자, IR 광자, 가시 광자, UV 광자)를 포함한다. 검출기(150 및 160)는, He 이온 빔(192)과 샘플(180) 사이의 상호 작용으로부터 발생하는 하나 이상의 상이한 유형의 입자를 각각 측정하도록 배치되고 구성된다. 도 1에 도시된 바와 같이, 검출기(150)는 주로 샘플(180)의 표면(181)으로부터 기인하는 입자(193)를 검출하도록 배치되고, 검출기(160)는 주로 샘플(180)의 표면(183)으로부터 출현하는 입자(193)(예를 들어, 투과된 입자)를 검출하도록 배치된다. 다음에서 좀더 상세하게 설명되는 바와 같이, 일반적으로, 검출기의 임의 갯수 및 임의 구성이 여기에서 개시되는 현미경 시스템에 사용될 수 있다. 일부 실시예에서는, 다중 검출기가 사용되고, 다중 검출기 중 일부는 상이한 유형의 입자를 측정하도록 구성된다. 소정 실시예에서, 검출기는 동일한 유형의 입자에 관한 상이한 정보(예를 들어, 입자의 에너지, 소정 입자의 각도 분포, 소정 입자의 총 도수)를 제공하도록 구성된다. 선택적으로, 그러한 검출기 정렬의 조합이 사용될 수도 있다.

[0105] 일반적으로, 검출기에 의해 측정되는 정보는 샘플(180)에 관한 정보를 판정하는데 사용된다. 샘플(180)에 관한 예시적 정보로는 표면(181)에 관한 지형 정보, (표면(181)의 그리고/또는 샘플(180)의 표면 아래 영역의) 재료 구성물 정보, 샘플(180)의 결정 방향 정보, 표면(181)에 관한 전압 콘트라스트 정보(및 그에 따른 표면(181)의 전기 특성), 샘플(180)의 표면 아래 영역에 관한 전압 콘트라스트 정보, 샘플(180)의 광학 특성, 및/또는 샘플(180)의 자기 특성을 들 수 있다. 통상적으로, 이 정보는 샘플(180)에 대한 하나 이상의 이미지를 획득하는 것에 의해 판정된다. 이온 빔(192)을 표면(181)을 가로질러 래스터링하는 것에 의해, 샘플(180)에 관한 픽셀 기반(pixel-by-pixel) 정보가 이산적 단계로(in discrete steps) 획득될 수 있다. 검출기(150 및/또는 160)는 각각의 픽셀에서 하나 이상의 상이한 유형의 입자를 검출하도록 구성될 수 있다. 통상적으로, 픽셀은 정사각형이지만, 일부 실시예에서, 픽셀은 상이한 형태(예를 들어, 직사각형)를 가질 수도 있다. 픽셀의 측면 길이에 대응되는 픽셀 사이즈는, 예를 들어, 100 pm에서 2 μm(예를 들어, 1 nm에서 1 μm)일 수 있다. 일부 실시예에서, 인접 픽셀의 위치는 적어도 200 pm 이내로(예를 들어, 적어도 100 pm 이내로, 적어도 75 pm 이내로, 적어도 50 pm 이내로) 판정될 수 있다. 그에 따라, 시스템의 오퍼레이터는 빔 스폿의 중앙 위치를 적어도 200 pm 이내로(예를 들어, 적어도 100 pm 이내로, 적어도 75 pm 이내로, 적어도 50 pm 이내로) 판정할 수 있다. 소정 실시예에서, 샘플(180)의 FOV(field of veiw)는 200 nm 이상(예를 들어, 500 nm 이상, 1 μm 이상, 50 μm 이상, 100 μm 이상, 500 μm 이상, 1 mm 이상, 1.5 mm 이상) 및/또는 25 mm 이하(15 mm 이하, 10 mm 이하, 5 mm 이하)이다. FOV는, 이온 현미경에 의해 영상화되는 샘플 표면의 면적을 의미한다.

[0106] 현미경 시스템(100)의 동작은 통상적으로 전자 제어 시스템(170)을 통해 제어된다. 예를 들어, 전자 제어 시스템(170)은 가스 소스(110)에 의해 공급되는 가스(들), 팁(186)의 온도, 팁(186)의 전위, 추출기(190)의 전위, 억제기(188)의 전위, 이온 광학계(130)의 컴포넌트 설정, 샘플 매니퓰레이터(140)의 위치, 및/또는 검출기(150 및 160)의 위치와 설정을 제어하도록 구성될 수 있다. 선택적으로, 이러한 파라미터 중 하나 이상은 (예를 들어, 전자 제어 시스템(170)과 통합된 사용자 인터페이스를 통해) 수동 제어될 수도 있다. 추가적으로 또는 다른 방법으로, 전자 제어 시스템(170)은 (예를 들어, 컴퓨터와 같은, 전자 프로세서를 통해) 검출기(150 및 160)에 의해 수집된 정보를 분석하는데 그리고, 선택적으로 이미지, 그래프, 도표, 스프레드시트 등의 형태일 수 있는, 샘플(180)에 관한 정보(예를 들어, 지형 정보, 재료 구성물 정보, 결정 정보, 전압 콘트라스트 정보, 광학 특성 정보, 자기 정보)를 제공하는데 사용될 수 있다. 통상적으로, 전자 제어 시스템(170)은 디스플레이 또는 다른 종류의 출력 디바이스, 입력 디바이스, 및 저장 매체를 특징으로 하는 사용자 인터페이스를 포함한다.

[0107] 헬륨 이온 현미경 시스템

[0108] *A. 개요*

[0109] 도 5는 He 이온 현미경 시스템(200)의 개략도를 나타낸다. 현미경 시스템(200)은 He 이온 소스 및 이온 광학계(130)를 밀폐하는 제1 진공 하우징(202)과 샘플(180) 및 검출기(150 및 160)를 밀폐하는 제2 진공 하우징(204)을 포함한다. 가스 소스(110)는 He 가스를 전달관(228)을 통해 현미경 시스템(200)에게로 전달한다. 흐름 조절기(230)는 전달관(228)을 통과하는 He 가스의 유속을 제어하고, 온도 제어기(232)는 가스 소스(110)에서의 He 가스 온도를 제어한다. He 이온 소스는 팁 매니퓰레이터(208)에 부착된 팁(186)을 포함한다. 또한, He 이온 소스는, He 이온을 팁(186)에서 이온 광학계(130)쪽으로 유도하도록 구성되는, 추출기(190) 및 억제기(188)를 포함한다. 이온 광학계(130)는 제1 렌즈(216), 정렬 편향기(220 및 222), 간극(224), 비점 수차 정정기(218), 스캔 편향기(219 및 221), 및 제2 렌즈(226)를 포함한다. 간극(224)은 간극 마운트(234)에 배치된다. 샘플(180)은 제2 진공 하우징(204)내의 샘플 매니퓰레이터(140)에(in/on)에 장착된다. 이 또한 제2 진공 하우징(204)내에 배치되는 검출기(150 및 160)는 샘플(180)로부터 입자(194)를 검출하도록 구성된다. 가스 소스(110), 팁 매니퓰레이터(208), 추출기(190), 억제기(188), 제1 렌즈(216), 정렬 편향기(220 및 222), 간극 마

운트(234), 비점 수차 정정기(218), 스캔 편향기(219 및 221), 샘플 매니퓰레이터(140) 및/또는 검출기(150 및/또는 160)는 통상적으로 전자 제어 시스템(170)에 의해 제어된다. 선택적으로, 전자 제어 시스템(170)은, 진공 하우징(202 및 204)내에 그리고 이온 광학계(130)내에 감소된 압력 환경을 제공하도록 구성되는 진공 펌프(236 및 237)도 포함한다.

[0110] *B. 이온 소스*

[0111] 앞서 지적된 바와 같이, 일반적으로, 팁(186)은 임의의 적합한 전기 전도성 재료로 형성될 수 있다. 소정 실시예에서, 팁(186)은, 단결정 금속과 같은, 단결정 재료로 형성될 수 있다. 통상적으로, 팁 선단(187)의 원자의 터미널 셀프에 대한 특정한 단결정 방향은 3° 이하(예를 들어, 2° 이하, 1° 이하)내에서 팁(186)의 종축과 정렬된다. 일부 실시예에서, 팁(186)의 선단(187)은 소정 갯수의 원자(예를 들어, 20개 이하의 원자, 15개 이하의 원자, 10개 이하의 원자, 9개 이하의 원자, 6개 이하의 원자, 3개 이하의 원자)를 가진 원자 셀프로 종단될 수 있다. 예를 들어, 팁(186)의 선단(187)은 W(111)으로 형성될 수 있고, 3개 원자(삼량체)의 터미널 셀프를 가질 수 있다. 도 6 및 도 7은, 각각, 팁의 선단에 가장 가까운 W 팁(186)의 2개 원자 셀프에 대한 확대된 상면도 및 측면도의 개략적 표현을 나타낸다. 삼량체로 정렬된 3개의 W 원자(302)를 포함하는 터미널 셀프는 W의 (111) 표면에 대응된다. 이론에 의해 확정되는 것을 소망하지 않으면서, 이러한 삼량체 표면은 (그것의 용이한 형성, 재형성 및 안정성의 관점에서) 바람직스럽다고 생각되는데, W(111) 결정면의 표면 에너지는 편리하게도, 등변 삼각형으로 정렬되어 삼량체를 형성하는 3개의 W 원자에 의해 형성되는 터미널 셀프를 지지하기 때문이다. 삼량체 원자(302)는 W 원자(304)의 제2 셀프에 의해 지지된다.

[0112] 일부 실시예에서, 팁(186)은, 3개보다 적은 원자 또는 3개보다 많은 원자를 포함하는 터미널 셀프를 가질 수 있다. 예를 들어, W(111) 팁은, 2개 원자를 포함하는 터미널 셀프 또는 단 하나의 원자를 포함하는 터미널 셀프를 가질 수 있다. 다른 방법으로, W(111) 팁은 4개 이상의 원자(예를 들어, 5개 이상의 원자, 6개 이상의 원자, 7개 이상의 원자, 8개 이상의 원자, 9개 이상의 원자, 10개 이상의 원자)를 포함하는 터미널 셀프를 가질 수 있다.

[0113] 다른 방법으로 또는 그에 더하여, 다른 W 결정 방향(예를 들어, W(112), W(110) 또는 W(100))에 대응되는 팁이 사용될 수 있고, 그러한 팁은 하나 이상의 원자(예를 들어, 2개 이상의 원자, 3개 이상의 원자, 4개 이상의 원자, 5개 이상의 원자, 6개 이상의 원자, 7개 이상의 원자, 8개 이상의 원자, 9개 이상의 원자, 10개 이상의 원자, 10개보다 많은 원자)를 포함하는 터미널 셀프를 가질 수 있다.

[0114] 일부 실시예에서는, 단결정 W 이외의 재료(예를 들어, 앞서 지적된 금속 중 하나의 단결정과 같은, 금속의 단결정)로 형성된 팁이 이온 소스에 사용될 수 있고, 그러한 팁은 하나 이상의 원자(예를 들어, 2개 이상의 원자, 3개 이상의 원자, 4개 이상의 원자, 5개 이상의 원자, 6개 이상의 원자, 7개 이상의 원자, 8개 이상의 원자, 9개 이상의 원자, 10개 이상의 원자, 10개보다 많은 원자)를 포함하는 터미널 셀프를 가질 수 있다.

[0115] 다음에서 설명되는 바와 같이, 팁 선단(187)의 형태는 이온 빔의 품질에 영향을 미칠 수 있고, 이온 빔의 품질은 현미경 시스템(200)의 성능에 영향을 미칠 수 있다. 예를 들어, 측면에서 볼 때, 팁 선단(187)은 그것의 종축 둘레에 대칭적으로 형성될 수 있거나, 그것의 종축 둘레에 비대칭적으로 형성될 수 있다. 소정 실시예에서, 하나 이상의 측면도로부터, 팁 선단(187)은 그것의 종축 둘레에 대칭적으로 형성될 수도 있고, 하나 이상의 상이한 측면도로부터, 팁 선단(187)은 그것의 종축 둘레에 비대칭적으로 형성될 수도 있다. 도 8은, 그것의 종축(308)에 대하여 비대칭적으로 형성되는 예시적 팁(300)의 측면도를 (도 6 및 도 7에서보다 훨씬 작은 배율로) 나타낸다. 소정 측면도로부터, 팁(300)이 종축(308)을 따라 비대칭적으로 형성되는 각도는, 예를 들어, 완전한 평균 원추각(average full cone angle) 및 평균 원추 방향(average cone direction)과 같은 파라미터를 사용해 정량화될 수 있다. 이 파라미터는 다음과 같이 판정된다.

[0116] 스캔 전자 현미경(SEM)을 사용해 팁(300)의 이미지가 획득된다. 도 8은 그러한 이미지의 개략적 표현이다. 팁(300)은 선단 포인트(310) 및 제2 포인트(312)를 포함하는데, 양자는 종축(308)에 위치하고, 포인트(312)는 선단 포인트(310)로부터 종축(308)을 따라 1 μm 떨어져 위치한다. 가상 라인(314)은 도 8의 평면에서 축(308)에 수직으로 포인트(312)를 관통해 연장한다. 라인(314)은 포인트(316 및 318)에서 팁(300)의 프로파일과 교차한다. 왼쪽 원추각(Θ_l)은 포인트(316)에서의 팁(300)의 프로파일에 대한 탄젠트와 라인(320;포인트(316)를 관통해 축(308)에 평행하게 연장하는 가상 라인) 사이의 각도이다. 마찬가지로, 오른쪽 원추각(Θ_r)은 포인트(318)에서의 팁(300)의 프로파일에 대한 탄젠트와 라인(322;포인트(318)을 관통해 축(308)에 평행하게 연장하는 가상 라인) 사이의 각도이다. 팁(300)의 완전 원추각은 Θ_l 및 Θ_r의 크기의 합이다. 예를 들어, Θ_l의 크기가

21.3° 이고 Θ_r의 크기가 11.6° 인 실시예에서의 소정 측면도의 경우, 그러한 측면도를 위한 팁(300) 프로파일의 완전 원추각은 32.9° 이다. 팁(300)이 일 측면도에서는 대칭인 것처럼 보일 수 있고 상이한 측면도에서는 비대칭인 것으로 보일 수 있기 때문에, 팁(300)을 위한 평균 완전 원추각을 판정하는 것이 대체로 바람직스럽다. 평균 완전 원추각은 (팁(300)의 선행 측면도에 대하여 축(308) 둘레로 45° 만큼의 팁(300)의 연속 회전에 각각 대응되는) 팁(800)의 상이한 8개 측면도를 위한 완전 원추각을 측정한 다음 이와 같이 판정된 8개 완전 원추각의 평균을 계산하여 평균 완전 원추각을 발생시키는 것에 의해, 판정된다. 이론에 의해 강제될 것이라고 희망하지는 않지만, 평균 완전 원추각이 지나치게 작다면, 팁의 사용 동안(예를 들어, 팁(300)이 이온 빔(192)을 발생시키는데 사용될 때) 아킹(arcing)이 발생할 수도 있고, 팁(300) 부근의 높은 전기 필드로 인해, 팁의 터미널 셀프에서의 팁 원자를 제외한 팁 원자와 He 원자의 상호 작용을 통한 He 이온의 생성이 발생할 수도 있다고 생각된다. 또한, 평균 완전 원추각이 지나치게 크다면, 팁(300)을 재생 가능하게 재구축하는 능력이 감소될 수 있고, 팁(300) 부근의 전기 필드가 너무 낮아, He 원자를 신뢰 가능하게 이온화하여 안정한 He 이온 전류를 발생시킬 수 없을 수도 있다고 생각된다. 일부 실시예에서, 팁(300)의 평균 완전 원추각은 45° 이하(예를 들어, 42° 이하, 40° 이하, 35° 이하, 32° 이하, 31° 이하)일 수 있고 그리고/또는 평균 완전 원추각은 15° 이상(예를 들어, 20° 이상, 23° 이상, 25° 이상, 28° 이상, 29° 이상)일 수 있다. 예를 들어, 팁(300)의 평균 완전 원추각은 27° 에서 33° (예를 들어, 28° 에서 32° , 29° 에서 31° , 30°)일 수 있다. 소정 실시예에서, 8개 완전 원추각 측정치의 표준 편이는 평균 완전 원추각의 40% 이하(예를 들어, 30% 이하, 20% 이하, 10% 이하)이다.

[0117] 원추 방향은 Θ_l 과 Θ_r의 크기 사이의 차에 대한 절대값의 1/2이다. 그에 따라, 예를 들어, Θ_l의 크기가 21.3° 이고 Θ_r의 크기가 11.6° 인 실시예에서의 소정 측면도의 경우, 원추 방향은 0.5*|21.3° - 11.6° | 또는 4.9° 이다. 평균 완전 원추각에 대하여 앞서 논의된 것과 동일한 이유로, 팁의 평균 원추 방향을 판정하는 것이 바람직스러울 수 있다. (선행 도면에 대하여 축(308) 둘레로 45° 만큼의 팁(300)의 연속 회전에 각각 대응되는) 팁(300)의 8개 상이한 측면도를 위한 원추 방향을 측정한 다음, 8개 원추 방향 측정치의 평균을 계산하여 평균 원추 방향을 발생시키는 것에 의해, 평균 원추 방향이 판정된다. 일부 실시예에서, 팁(300)의 평균 원추 방향은 10° 이하(예를 들어, 9° 이하, 8° 이하, 7° 이하, 6° 이하, 5° 이하)일 수 있고 그리고/또는 팁(300)의 평균 원추 방향은 0° 이상(예를 들어, 1° 이상, 2° 이상, 3° 이상, 4° 이상)일 수 있다. 소정 실시예에서, 팁(300)의 평균 원추 방향은 0° 에서 10° (예를 들어, 1° 에서 10° , 3° 에서 10° , 6° 에서 10° , 2° 에서 8° , 4° 에서 6°)일 수 있다.

[0118] 또한, 팁(300)은 다음과 같이 판정될 수 있는 그것의 곡률 반경에 의해 특징지워질 수도 있다. 도 9는 팁(300)의 개략적인 측면도를 나타낸다. 실제로, 이 측면도는 SEM을 사용해 획득된다. 종축(308)의 어느 한쪽 측면에서, 팁(300) 프로파일의 경사가 측정된다. 포인트(324 및 326)는, (각각, 탄젠트 라인(328 및 330)에 의해 지시되는) 팁(300) 프로파일의 경사가, 각각, 1과 -1의 값(예를 들어, 경사도의 45° 선로)을 갖는 선단(310)에 가장 근접한 팁(300) 표면의 포인트이다. 축(308)에 수직하게 도 9의 평면에서 측정되는, 포인트(324)와 축(308) 사이의 거리는 팁(300)의 왼쪽 탄젠트 거리(T_l)이다. 축(308)에 수직하에 도 9의 평면에서 측정되는, 포인트(326)와 축(308) 사이의 거리는 팁(300)의 오른쪽 탄젠트 거리(T_r)이다. 왼쪽 반지름(R_l)은 $R_l=\sqrt{2}T_l$로서 계산되고, 오른쪽 반지름(R_r)은 $R_r=\sqrt{2}T_r$로서 계산된다. 팁(300)의 곡률 반경(R)은 R_l과 R_r의 평균으로서 계산된다. 그에 따라, 예를 들어, T_l이 120 nm이고 T_r은 43 nm인 실시예에서, Rl은 169 nm이고, R_r은 61 nm이며, R은 115 nm이다. 평균 완전 원추각 및 평균 원추 방향에 대하여 앞서 논의된 것과 동일한 이유로, 팁의 평균 곡률 반경을 판정하는 것이 바람직스러울 수 있다. (선행 측면도에 대하여 축(308) 둘레로 45° 만큼의 팁(300)의 연속 회전에 각각 대응되는) 팁(800)의 상이한 8개 측면도를 위한 곡률 반경을 측정한 다음, 8개 곡률 반경의 평균을 계산하여 평균 곡률 반경을 발생시키는 것에 의해, 평균 곡률 반경이 판정된다. 이론에 의해 강제될 것이라고 희망하지는 않지만, 평균 곡률 반경이 지나치게 작으면, 팁을 사용하는 동안 아킹이 발생할 수도 있고 그리고/또는 팁의 터미널 원자 셀프에서의 팁 원자 이외의 팁 원자 부근에서 He 가스의 이온화가 발생할 수도 있다. 평균 곡률 반경이 지나치게 크면, 팁을 재생 가능하게 재구축하는 능력이 감소되고, 팁(300) 부근에서의 좀더 낮은 필드 강도로 인해, 팁(300) 부근에서의 He 원자의 이온화 속도가 감소될 수도 있다. 일부 실시예에서, 팁(300)의 평균 곡률 반경은 200 nm 이하(예를 들어, 180 nm 이하, 170 nm 이하, 160

nm 이하, 150 nm 이하, 140 nm 이하, 130 nm 이하)이고 그리고/또는 팁(300)의 평균 곡률 반경은 40 nm 이상(예를 들어, 50 nm 이상, 60 nm 이상, 70 nm 이상, 80 nm 이상, 90 nm 이상, 100 nm 이상, 110 nm 이상)이다. 예를 들어, 일부 실시예에서, 팁(300)의 평균 곡률 반경은 40 nm에서 200 nm(예를 들어, 50 nm에서 190 nm, 60 nm에서 180 nm, 70 nm에서 170 nm, 80 nm에서 160 nm)이다. 소정 실시예에서, 8개 곡률 반경 측정치의 표준 편이는 평균 곡률 반경의 40% 이하(예를 들어, 30% 이하, 20% 이하, 10% 이하)이다.

[0119] 도 10은 삼량체인 터미널 원자 셀프를 가진 W(111) 팁을 제작하는 프로세스(400)를 위한 흐름도이다. 제1 단계 402에서는, 단결정 W(111) 전구체 와이어가 지지 어셈블리에 부착된다. 통상적으로, W(111) 전구체 와이어는 3 mm 이하(예를 들어, 2 mm 이하, 1 mm 이하) 및/또는 0.2 mm 이상(예를 들어, 0.3 mm 이상, 0.5 mm 이상)의 지름을 가진다. 일부 실시예에서, W(111) 전구체 와이어는 0.2 mm에서 0.5 mm(예를 들어, 0.3 mm에서 0.4 mm, 0.25 mm)의 지름을 가진다. 예를 들어, FEI Beam Technology(Hillsboro, OR)로부터 적당한 전구체 와이어가 획득될 수 있다.

[0120] 좀더 일반적으로, 일부 실시예에서, 팁 전구체는, 와이어와는 상이한 형태일 수 있다. 예를 들어, 팁 전구체는, 결정 구조(crystalline structure)로 종단하는 돌출부(protrusion)를 가진 전기 전도성 재료로 형성될 수 있다. 돌출부의 종단은, 예를 들어, 단결정 구조일 수 있고, W(111) 또는 유사하거나 상이한 결정 방향의 다른 재료로 형성될 수 있다.

[0121] 도 11A 및 도 11B는, 각각, 지지 어셈블리(520)의 실시예에 대한 사시도 및 하면도를 나타낸다. 지지 어셈블리(520)는 지지 베이스(524)에 접속된 지지 포스트(522a 및 522b)를 포함한다. 포스트(522a 및 522b)는 히터 와이어(526a 및 526b)에 접속되고, 일정 길이의 W(111) 전구체 와이어(528)가 (예를 들어, 용접을 통해) 히터 와이어(526a 및 526b)에 접속된다. 포스트(522a 및 522b)는, 예를 들어, 전기 전류 소스(예를 들어, 전원 공급기)와 같은 보조 디바이스에 접속되어, W(111) 전구체 와이어(528)의 온도 제어를 허용할 수 있다.

[0122] *베이스(524)는 어셈블리(520)를 위한 기계적 지지를 제공하고, 일반적으로, 온도 사이클링(temperature cycling)을 견딜 수 있는 그리고 전기 절연체로서 동작하는 하나 이상의 재료로 형성된다. 예를 들어, 일부 실시예에서, 베이스(524)는 유리 및/또는 고정 폴리머(rigid polymers) 및/또는 세라믹과 같은 전기 절연 재료로 형성된다.

[0123] 포스트(522a 및 522b)는 일반적으로 하나 이상의 전기 전도 재료로 형성된다. 통상적으로, 포스트(522a 및 522b)를 형성하는데 사용되는 재료는, 포스트(522a 및 522b) 및 베이스(524)가 유사한 열 팽창 계수를 갖도록 그리고 전구체 와이어(528)의 온도 사이클링 동안 베이스(524)에 대해 포스트(522a 및 522b)가 위치가 고정된 상태를 유지하도록 선택된다. 일부 실시예에서, 포스트(522a 및 522b)는, 철, 니켈 및 코발트를 포함하는 합금으로부터 형성된다. 포스트(522a 및 522b)가 형성될 수 있는 상용 재료의 일례가 KOVAR™이다.

[0124] 일반적으로, 히터 와이어(526a 및 526b)는, 전구체 와이어(528)보다 높은 전기 저항률을 가진 하나 이상의 재료로부터 형성된다. 예를 들어, 일부 실시예에서, 히터 와이어(526a 및 526b)는 텅스텐-레늄 합금과 같은 재료로부터 형성될 수 있다. 다음에서 설명되는 바와 같이, 히터 와이어(526a 및 526b)는, (예를 들어, 외부 전원 공급기로부터의) 전기 전류가 와이어를 통과할 때, 열을 발생시키고, 이 열은 다양한 팁 프로세싱 단계 동안 전구체 와이어(528)의 온도를 증가시키는데 그리고/또는 제어하는데 사용될 수 있다. 일반적으로, 히터 와이어(526a 및 526b)의 지름 및 재료는, 가공 프로세스 동안, 전구체 와이어(528)의 온도에 대한 적당한 제어가 실현될 수 있다는 것을 보장하도록 선택된다. 일부 실시예에서, 히터 와이어(526a 및 526b)는, 예를 들어, 100 μm에서 750 μm의 지름을 가진다.

[0125] 베이스(524), 포스트(522a 및 522b), 및 히터 와이어(526a 및 526b)의 기하학적 특성은 일반적으로 원하는 바에 따라 선택될 수 있다. 예를 들어, 일부 실시예에서, 포스트(522a 및 522b) 사이의 거리는 1 mm 에서 10 mm일 수 있다.

[0126] 선택적으로, 각각의 포스트가 대응되는 히터 와이어를 통해 전구체 와이어(528)에 접속되는 상태로, 2개 이상의 포스트(예를 들어, 3개의 포스트, 4개의 포스트, 5개의 포스트, 6개의 포스트)가 베이스(524)에 부착될 수도 있다. 추가 포스트를 제공하는 것은, 어셈블리(520)의 안정성을 증가시킬 수도 있고 그리고/또는 기계적 진동에 대한 어셈블리(520)의 감응성(susceptibility)을 감소시킬 수도 있다.

[0127] 일부 실시예에서, 전구체 와이어(528)는, 와이어에 압축력을 가하는 지지 어셈블리에 의해 위치가 고정될 수 있다. 예를 들어, 도 12는, 전구체 와이어(528)를 고정시키기 위해 포겔 마운트를 포함하는 예시적 지지 어셈블

리(550)를 나타낸다. 예를 들어, AP Tech(McMinnville, OR)로부터 적당한 포겔 마운트가 구입 가능하다. 지지 어셈블리(550)는 지지 베이스(556) 및 베이스(556)에 부착된 장착 암(552)을 포함한다. 전구체 와이어(528)를 안전하게 하기 위해, 암(552)은 비집어 열리고, (예를 들어, 열분해(pyrolytic) 탄소로 형성된) 스페이서(554)가 암 사이의 공간에 삽입된다. 다음으로, 전구체 와이어(528)가 스페이서(554) 사이의 개구부에 삽입된 다음, 장착 암(552)은 해제된다. 암(552)의 탄성으로 인해, 암은 화살표(558 및 560)에 의해 지시되는 방향으로 스페이서(554) 및 전구체 와이어(528)에 압축력을 가함으로써, 전구체 와이어(528)를 스페이서(554)에 대하여 고정시킨다. 와이어(528), 스페이서(554), 및 암(552) 사이의 정지 마찰력이 이러한 컴포넌트의 상대적 이동을 방해하여, 와이어(528)가 지지 어셈블리(550)에서 위치가 고정된 상태를 유지한다는 것을 보장한다. 통상적으로, 와이어(528)는 암(552) 위쪽으로, 예를 들어, 1 mm 내지 5 mm의 거리만큼 연장한다.

[0128] 베이스(556)는, 베이스(524)를 형성하는데 사용될 수 있는 것과 유사한 재료(예를 들어, 유리 및/또는 고정 폴리머 및/또는 세라믹)로부터 형성될 수 있다. 베이스(556)의 재료는 통상적으로, 온도 사이클링을 견딜 수 있는 전기 절연 재료이다.

[0129] 장착 암(552)은 하나 이상의 전기 전도 재료로부터 형성될 수 있다. 암(552)을 형성하는데 사용되는 재료 또한, 베이스(556)와 암(552)이 유사한 열 팽창 계수를 갖도록 그리고 전구체 와이어(528)의 온도 사이클링 동안 베이스(556)에 대해 암(552)이 위치가 고정된 상태를 유지하도록 선택될 수 있다. 일부 실시예에서, 암(552)은, 철, 니켈, 및 코발트를 포함하는 합금으로부터 형성된다. 암(552)을 형성하기 위한 적당한 상용 재료로는 KOVAR™을 들 수 있다.

[0130] 스페이서(554)는 열분해 탄소와 같은 재료로부터 형성된다. 적당한 열분해 탄소 스페이서는, 예를 들어, AP Tech(McMinnville, OR)로부터 입수 가능하다. 열분해 탄소 스페이서는 통상적으로, 서로 위에 적층된 일련의 평면 탄소 시트로 형성되어 층 구조를 생성한다. 일반적으로, 열분해 탄소의 저항률은 방향에 따라 달라지는데, 시트에 수직인 방향(예를 들어, 적층 시트의 평면에 대략적으로 수직인 방향)의 탄소 저항률이 시트의 평면에 평행인 평면 방향의 저항률보다 높다. 장착하는 동안, 스페이서(554)는, 스페이서(554)의 좀더 높은 저항률 방향이 암(552)에 의해 가해지는 압축력의 방향과 대략적으로 평행하도록(예를 들어, 화살표(558 및 560)에 대략적으로 평행하도록) 배향된다. 암(552)쪽으로 전류가 도입될 때, 스페이서(554)는 그것의 높은 저항률로 인해 열을 발생시킨다. 따라서, 스페이서(554)는 전구체 와이어(528)의 온도를 조정하기 위한 가열 소자로서 기능할 수 있다.

[0131] 다시 도 10을 참조하면, 제2 단계 404에서, 전구체 와이어(528)는 와이어(528)의 팁을 성형하기 위해 전기 화학 전해조에서 에칭된다. 일반적으로, 단계 404는 다중 서브단계를 포함한다.

[0132] 에칭 프로세스에서의 제1 서브단계는 선택적으로, 와이어(528)로부터 표면 오염물을 제거하는 세정 단계일 수 있다. 이러한 에칭 프로세스는 와이어(528)를 전기 화학 에칭 용액에 배치하는 단계 및 와이어(528)를 교류(alternating current;AC) 전압에 노출시키는 단계를 수반할 수 있다. 예를 들어, 용액은 NaOH(sodium hydroxide)의 1 N 용액일 수 있고, 1 V의 AC 전압이 사용될 수 있다. 후속적으로, 소정의 잔류 오염물을 제거하기 위해 전체 지지 어셈블리(예를 들어, 지지 어셈블리(520 또는 550))가 세정될 수 있다(예를 들어, 물로 초음파 세정될 수 있다).

[0133] 단계 404에서의 후속 서브단계는 선택적으로 와이어(528)의 일부분에 레지스트 재료를 도포하는 것이다. 통상적으로, 레지스트 재료는, 와이어(528)의 선단에서 시작해, 와이어(528)의 약 0.5 mm 길이에 걸쳐 도포된다. 레지스트 재료의 도포는, 예를 들어, 깨끗한 표면상에 레지스트 용액 한 방울을 떨어뜨리고, 레지스트가 도포 사이에서 약간 건조되게 하면서, 와이어(528)를 수차례 레지스트에 담그는 것에 의해 실현될 수 있다. 도포된 레지스트는, 후속 프로세싱 단계 동안 에칭되는 전구체 와이어(528)의 양을 제한한다. 전구체 와이어(528)에서의 후속적인 팁 형성은 대부분 선행 팁의 에칭에 의한 제거를 수반하기 때문에, 레지스트 재료의 사용은, 와이어가 파기되기 전에, 소정 전구체 와이어에 좀더 많은 팁이 형성되게 한다. 다양하고 상이한 레지스트 재료가 전구체 와이어(528)에 도포될 수 있다. 예시적 레지스트 재료가 미용 매니큐어 액이다. 일부 실시예에서는, 하나 이상의 레지스트 재료가 사용될 수도 있다. 그러나, 레지스트 재료의 사용은 팁 형성 프로세스를 위해 선택적이고, 일부 실시예에서는, 가공 프로세스에서의 후속 단계에 착수하기 전에, 전구체 와이어(528)에 레지스트 재료가 도포되지 않을 수도 있다.

[0134] 단계 404에서의 후속 서브단계는 전구체 와이어(528)를 전기 화학적으로 에칭하는 것이다. 다양한 전기 화학 에칭 절차가 사용될 수 있다. 일부 실시예에서는, 다음의 전기 화학 에칭 절차가 사용된다. 지지 어셈블리가, 지지 어셈블리를 병진시키기 위한 병진 장치, 접시(dish), 및 접시쪽으로 연장하는 전극(예를 들어, 스테인레스

강 전극)을 포함하는 에칭 설비에 배치된다. 에칭 용액 이 접시에 담기고, 그에 따라, 용액이 전극과 접촉한다. 지지 어셈블리는, 와이어(528)에서의 레지스트 인터페이스가 에칭 용액과 겨우 접촉할 때까지, 병진 장치를 통해 접시를 향해 강하된다. 그 다음, 와이어(528)는 에칭 용액쪽으로 추가량(예를 들어, 0.2 mm)만큼 강하된다.

[0135] 에칭 용액은, 와이어(528)를 화학적으로 부식시키는 구성물(예를 들어, NaOH)을 포함한다. 에칭 용액이 NaOH를 함유하는 실시예에서, 에칭 용액에서 NaOH의 농도는 전구체 와이어(528)의 부식 속도 및 용액의 화학적 환경을 변경하도록 선택될 수 있다. 예를 들어, 일부 실시예에서, NaOH의 농도는 0.1 M 이상(예를 들어, 0.2 M 이상, 0.5 M 이상, 0.6 M 이상, 0.8 M 이상, 1.0 M 이상, 1.2 M 이상, 1.4 M 이상, 1.6 M 이상, 2.0 M 이상, 2.5 M 이상, 3.0 M 이상) 및/또는 10.0 M 이하(예를 들어, 9.0 M 이하, 8.0 M 이하, 7.0 M 이하, 6.5 M 이하, 6.0 M 이하, 5.5 M 이하, 5.0 M 이하, 4.5 M 이하, 4.0 M 이하)일 수 있다. 일부 실시예에서, NaOH의 농도는 0.5 M에서 10.0 M(예를 들어, 1.0 M에서 9.0 M, 1.5 M에서 8.0 M, 2.0 M에서 7.0 M, 2.0 M에서 6.0 M, 2.0 M에서 3.0 M)이다.

[0136] 소정 실시예에서는, NaOH 대신에 또는 NaOH 이외에, 다른 부식제가 에칭 용액에 추가될 수 있다. 그러한 부식제의 일례로는 (용해된 KOH를 포함하는) KOH, HCl, H_3PO_4, H_2SO_4, KCN, 및/또는 용해된 $NaNO_0$를 들 수 있다. 에칭 용액에서의 부식제는 재료의 특정 형태로 형성된 전구체 와이어를 부식시키는 그것의 능력에 기초해 선택될 수도 있다. 예를 들어, NaOH와 같은 작용제는 W로 형성된 와이어를 부식시키는데 사용될 수 있다. Ir과 같은 상이한 재료로 형성된 와이어의 경우, 에칭 용액에 다른 부식제가 사용될 수 있다.

[0137] 일부 실시예에서, 에칭 용액은 비교적 소량의 계면 활성제를 포함할 수 있다. 이론에 의해 강제될 것이라고 희망하지는 않지만, 계면 활성제는 전구체 와이어(528)의 대칭적 에칭을 촉진하는데 도움이 될 수 있다고 생각된다. 이러한 목적에 적당한 계면 활성제로는 Eastman Kodak(Rochester, NY)으로부터 입수 가능한 PhotoFlo 200과 같은 재료를 들 수 있다. 일반적으로, 에칭 용액에서의 계면 활성제 농도는 0.1 부피 백분율(volume %) 이상(예를 들어, 0.2 부피 백분율 이상, 0.3 부피 백분율 이상, 0.4 부피 백분율 이상) 및/또는 2 부피 백분율 이하(예를 들어, 1 부피 백분율 이하, 0.8 부피 백분율 이하, 0.6 부피 백분율 이하)이다.

[0138] 일부 실시예에서는, 에칭 용액을 휘젓는 것으로써 에칭 프로세스가 수행될 수도 있다. 에칭 용액이 휘저어지는 속도는 에칭 프로세스의 결과에 기초해 경험적으로 판정될 수 있다.

[0139] 전구체 와이어(528)를 에칭 용액에 담근 후, 외부 전원 공급기가 와이어(528) 및 전극의 양자에 접속되고, 전위가 와이어(528) 및 전극을 가로질러 인가되어 와이어(528)의 전기 화학 부식 반응을 용이하게 한다. 일반적으로, 전압은 AC 소스나 DC(direct current) 소스로부터 인가될 수 있다. 인가되는 전압의 진폭은 일반적으로, 균일하게 에칭된 전구체 와이어(528)를 발생시키는 진폭에 대한 경험적 판정에 기초해, 원하는 바에 따라 선택될 수 있다. 예를 들어, 일부 실시예에서, 인가되는 전위의 진폭은 3.0 V 이상(예를 들어, 3.2 V 이상, 3.5 V 이상, 4.0 V 이상, 5.0 V 이상, 10 V 이상, 15 V 이상, 20 V 이상) 및/또는 50 V 이하(예를 들어, 40 V 이하, 35 V 이하, 30 V 이하, 25 V 이하)이다. 일부 실시예에서, 인가되는 전위의 진폭은 3.0 V와 50 V 사이(예를 들어, 3.5 V에서 40 V, 4.0 V에서 30 V, 4.5 V에서 20 V)이다.

[0140] 에칭 용액에 인가되는 AC 펄스의 구간은 일반적으로 와이어(528)의 제어되는 에칭을 촉진하도록 원하는 바에 따라 달라질 수 있다. 예를 들어, 일부 실시예에서, 에칭 용액에 인가되는 펄스는 10 ms 이상(예를 들어, 25 ms 이상, 50 ms 이상, 75 ms 이상, 100 ms 이상, 150 ms 이상, 200 ms 이상, 250 ms 이상) 및/또는 1 초 이하(예를 들어, 900 ms 이하, 800 ms 이하, 700 ms 이하, 650 ms 이하, 600 ms 이하)의 구간을 가진다. 일부 실시예에서, 에칭 용액에 인가되는 펄스는 10 ms에서 1 초(예를 들어, 10 ms에서 900 ms, 10 ms에서 800 ms, 10 ms에서 700 ms, 10 ms에서 600 ms)의 구간을 가진다.

[0141] 일반적으로, 가변 구간 및/또는 가변 진폭의 펄스가 에칭 용액에 인가되어, 용액과 접촉하는 와이어 영역에서의 전구체 와이어(528) 부식을 발생시킬 수 있다. 통상적으로, 프로세싱하는 동안, 전구체 와이어(528)의 끝부분이 에칭 용액에 잠기고, 전구체 와이어(528)의 새롭게 노출된 에칭 영역이 후속 단계에서 추가적으로 프로세싱된다. 예를 들어, 적당한 에칭 방법은, 각각이 약 580 ms의 구간(duration)을 가진, 진폭 5 V의 약 100개 AC 펄스의 초기 인가를 포함한다. 그 후, 각각이 약 325 ms의 구간 및 5 V의 진폭을 가진, 일련의 약 60개 펄스가 인가된다. 다음으로는, 와이어(528)의 끝부분이 에칭 용액에 잠길 때까지, 35 ms의 구간 및 5 V의 진폭을 가진 펄스가 인가된다.

[0142] 에칭 용액으로의 전기 펄스 인가 동안, 전구체 와이어(528)의 투입 깊이는 조정될 수 있다. 통상적으로, 에칭

프로세스는 전구체 와이어(528)의 좁은 지름 영역(narrow-diameter region) 형성을 초래한다. 와이어(528)의 투입 깊이를 조정하는 것은, 에칭 용액의 메니스커스(meniscus)가 좁은 지름 영역의 중앙점 부근에 배치된다는 것을 보장하는데 도움이 될 수 있고, 이는, 비교적 대칭적인 팁을 형성할 확률을 향상시킬 수 있다. 투입 포인트가 가까워짐에 따라(예를 들어, 좁은 지름 영역에서의 지름이 아주 작아짐에 따라), 투입 깊이의 조정이 수행되어, 전구체 와이어(528)의 끝이 첨벙하고 떨어지지 않는다는 것을 보장한다. 전구체 와이어(528)의 끝을 투입한 후에, 와이어(528)의 새롭게 노출된 팁이 아주 약간만 에칭 용액에 투입되고, 추가적 전기 펄스가 인가된다. 일부 실시예에서는, 2개의 전기 펄스가 인가된다. 일례로서, 제1 펄스는 20 ms에서 50 ms(예를 들어, 30 ms에서 40 ms, 35 ms) 구간의 1 V에서 10 V(예를 들어, 3 V에서 7 V, 5V)일 수 있고, 제2 펄스는 10 ms에서 25 ms(예를 들어, 15 ms에서 20 ms, 17 ms) 구간의 1 V에서 10 V일 수 있다.

[0143] 그 다음, 지지 어셈블리는 에칭 설비로부터 제거되고, (예를 들어, 증류수 또는 탈이온수로써) 세정되며, (예를 들어, 건조 질소 가스의 흐름하에서) 건조된다.

[0144] 프로세스(400)의 후속 단계 406은 지지 어셈블리(및, 특히, 와이어(528)의 에칭된 팁)를 검사하여, 에칭된 팁이 적당한 기하학적 사양을 갖는지를 확인하는 것이다. 앞서 논의된 바와 같이, 예를 들어, 기하학적 사양의 판정은 에칭된 팁의 프로파일 이미지를 획득하는 단계 및 프로파일 이미지로부터 획득되는 데이터로부터 다양한 기하학적 파라미터를 계산하는 단계를 포함한다. 검사는, 예를 들어, SEM을 사용해 수행될 수 있다. 와이어(528)의 팁에 대한 프로파일 이미지는, 예를 들어, 65,000X의 배율과 같은, 아주 높은 배율에서 획득될 수 있다. 측정된 기하학적 파라미터는, 예를 들어, 평균 팁 곡률 반경, 평균 원추 방향, 및 평균 완전 원추각을 포함할 수 있다. 이 시점에서, 에칭된 팁의 형태가 부적당하면, 어셈블리를 에칭 설비에 다시 삽입하고, 팁이 에칭 용액과 겨우 접촉할 때까지, 와이어(528)의 에칭된 팁을 접시를 향해 강하하는 것에 의해, 팁을 약간 재성형하는 것이 가능할 수도 있다. 소수의 전기 펄스(예를 들어, 35 ms 구간 및 5 V 진폭의 1개에서 3개 펄스)가 와이어(528)의 팁을 재성형하는데 사용될 수 있다. 예를 들어, 와이어(528)의 팁에 대한 평균 완전 원추각이 지나치게 작으면, 소수의 짧은 구간 펄스가 사용되어, 에칭된 팁의 평균 반지름은 크게 증가시키지 않으면서, 평균 완전 원추각을 증가시킬 수 있다. 이러한 추가 전기 펄스의 인가에 수반하여, 팁은, 그것이 정확하게 재성형되었는지를 확인하기 위해 SEM으로 재검사될 수 있다.

[0145] 후속적으로, 단계 408에서는, 에칭된 와이어(528)의 팁 선단에 대한 터미널 셀프가 삼량체로 형성된다. 이 프로세스는 일반적으로, (예를 들어, FIM 또는 SFIM을 사용해) 팁을 영상화하는 단계 및 (예를 들어, 필드 증발(field evaporation)을 사용해) 팁을 성형하는 단계를 수반한다.

[0146] 일부 실시예에서, 단계 408은 FIM에 지지 어셈블리를 설치하는 단계 및 FIM을 소개시키는 단계를 포함한다. 와이어(528)의 팁은 (예를 들어, 액체 질소 온도로) 냉각되고, (예를 들어, 약 $5x10^{-6}$ Torr의 압력에서) He 가스가 FIM에게로 공급된다. 추출기에 대하여 양 전위(예를 들어, 추출기에 대하여 5 kV 이상)가 와이어(528)의 팁에 인가되고, He 원자는 와이어(528)의 팁 선단과 상호 작용하여 He 이온을 형성한다. He 이온은 와이어(528) 팁의 양으로 하전된 선단으로부터 멀어지는 방향으로 가속된다. CCD 카메라와 같은 2차원, 영상화 디바이스에 광학적으로 커플링된 형광체 스크린과 같은, 검출기가 이온 소스로부터의 선택된 거리에 배치되어, 이온 소스로부터의 주된 이온 빔 궤적에 대해 대략적으로 수직 배향된다. 충돌하는 이온으로 인해, 형광체 스크린은, CCD 카메라에 의해 검출되는 광자를 방출한다. 비교적 큰 수의 검출 이온에 대응되는 이미지의 영역은 비교적 적은 수의 검출 이온에 대응되는 영역보다 좀더 밝아 보일 것이다. He 가스 원자의 이온화는 와이어(528)의 팁 선단에서의 개개 이온 소스 원자 부근에서 발생한다. 결과적으로, 검출기에 의해 캡처되는 이미지는 이온 소스의 방사 패턴에 대응된다. 좀더 구체적으로, 검출기로부터 획득되는 이미지에서 밝은 스폿은 이온 소스 선단에서의 개개 원자에 대응된다. 그에 따라, FIM 이미지는, 원자적으로 분해되는 와이어(528)의 팁 선단의 이미지이다. FIM 이미지에 기초해, 이온 소스 선단에서의 원자의 결정 구조, 방향, 및 특정 정렬이 판정될 수 있다.

[0147] 와이어(528)의 팁 선단에 대한 소정 특성이 존재하지 않으면, 팁은, 예를 들어, 필드 증발을 사용해 성형될 수 있다. 필드 증발 동안, 와이어(528)의 에칭된 팁에 대한 이미지가 FIM 검출기에 대해 포커싱되고 He 가스의 배경 압력이 FIM에 여전히 존재하는 상태에서, 결과적 필드가 로컬 전기 필드가 최고인 팁에서의 위치로부터 W 원자(및 오염 원자)를 제거하기 시작할 때까지, 팁에 대한 양 전위가 (추출기에 대하여 15 kV 이상으로) 증가된다. 원자가 제거되는 속도는 원자의 그룹이 동시에 제거되는 것을 방지하도록 제어된다. 일반적으로, 필드 증발은, 에칭된 팁의 표면이 정확한 결정 방향이라는 것이 확인되고, 팁의 터미널 셀프에 바람직스럽지 못한 오염물이 존재하지 않는다는 것이 판정될 때까지, FIM 방사 패턴의 모니터링을 계속한다.

[0148] 필드 증발 이후에는, 팁을 정교화하는 것(sharpening)이 바람직스러울 수도 있다. 팁을 정교화하기 위해, He

가스는 FIM 챔버로부터 배출되고, 와이어(528)의 팁에 대한 바이어스는, 와이어(528)의 팁 선단이 전자를 방출하도록, 공통 그라운드에 대하여 음이 되도록 변경된다. 형광체가 코팅된 유리 스크린과 같은, 입사 전자에 반응하여 광자를 발생시키는 검출기가 팁으로부터 전자를 가로채기(intercept)하도록 배치된다. 발생된 광자는 적당한 검출기(예를 들어, CCD 디바이스, 광전자 증배관(photomultiplier tube;PMT), 포토다이오드, 또는 다른 유형의 광자 검출기)에 의해 검출되어 팁으로부터의 전자 방사를 모니터링하는데 사용된다. 일부 실시예에서는, 검출기가 광자 발생 디바이스에 직접적으로 커플링될 수 있다. 소정 실시예에서, 검출기 및 광자 발생 디바이스는 직접적으로 커플링되지 않는다. 예를 들어, 거울과 같은 광학 소자가 발생된 광자를 검출기쪽으로 유도하는데 사용될 수 있다.

[0149] 팁에 인가되는 전압 바이어스는, 소정 전자 전류(예를 들어, 25 pA에서 75 pA, 40 pA에서 60 pA, 50 pA)가 측정될 때까지, 조정된다. 그 다음, 팁은 소정 온도(예를 들어, 1000 K에서 1700 K, 1300 K에서 1600 K, 1500 K)로 가열되고, 팁은, 전압과 열의 양자의 인가에 응답하여 팁으로부터 방출되는 광을 검출하기 위해 시각적으로 모니터링된다. 팁으로부터의 광 방사는, 예를 들어, 팁에 의해 방출되는 광을 적당한 광자 검출기(예를 들어, CCD 디바이스, 광전자 증배관, 포토다이오드, 또는 다른 유형의 광자 검출기)를 향해 반사하도록 배치된 거울을 사용해 모니터링될 수 있다. 열은 저항성 가열 디바이스(예를 들어, 필라멘트 히터), 복사성 가열 디바이스, 유도성 가열 디바이스, 또는 전자 빔과 같은 다양한 디바이스를 사용해 팁에 인가될 수 있다. 팁으로부터 처음으로 광이 출현한 후 15 초에서 45 초(예를 들어, 25 초에서 35 초, 30 초)까지, 인가된 전위 및 가열 디바이스 양자는, 삼량체를 그것의 터미널 원자 셀프로서 갖춘 와이어(528)를 산출하면서, 오프된다.

[0150] 선택적으로, 팁을 정교화하는데 가스가 사용될 수 있다. 예를 들어, 산소가 FIM 챔버로 도입되어, 둥근 W 팁 표면의 정교화(sharpening)를 촉진할 수 있다. 정교화 가스(예를 들어, 산소)는, He가 FIM 챔버로부터 제거된 이후에 도입되고, 팁은 선택된 압력의 산소가 존재하는 상태에서 일정 시주기 동안 가열된다. 예를 들어, 둥근 W 팁을 정교화하기 위해, 먼저 He가 FIM 챔버 밖으로 배출된 다음, 팁은 1300 K와 1700 K 사이의 온도(예를 들어, 1500 K)까지 가열된다. 팁은 1 분에서 5분 동안 1500 K로 유지된다. 다음으로, 팁의 온도를 약 2 분 동안 유지하면서, 산소가 약 10^{-5} Torr의 압력에서 챔버에 도입될 수 있다. 챔버쪽으로의 산소 흐름이 계속되는 상태에서, 다음으로, 팁의 온도는 700 K와 1200 K 사이의 온도(예를 들어, 1000 K)로 감소되고, 팁은 약 2 분 동안 그 온도에서 유지된다. 마지막으로, 챔버로의 산소 공급이 폐쇄되고, 챔버에서의 산소 압력이 10^{-7} Torr 미만일 때까지, 산소가 챔버 밖으로 배출된다. 동시에, 팁은 그것의 정상 동작 온도(예를 들어, 일부 실시예의 경우 약 77 K)로 냉각되고, He가 FIM 챔버쪽으로 재도입된다. 팁이 FIM 모드에서 영상화될 때, W(111) 패싯(facet)에 대응되는 팁 상단의 W 삼량체가 관찰된다. 그 다음, 삼량체의 터미널 셀프를 가진 W(111) 와이어는 FIM으로부터 제거되어 이후의 사용을 위해 저장될 수 있다.

[0151] 상기한 내용은 시스템(200)과는 분리된 FIM이 와이어 팁 선단을 영상화/성형하는데 사용되는 실시예를 설명하지만, 일부 실시예에서는, 시스템(200)이 FIM으로서 사용될 수 있다. 그러한 실시예에서, 지지 어셈블리는 이온 소스내에 설치되고, 시스템(200)은, 일반적으로 선행 문단에서 설명된 절차에 따라, FIM으로서 동작된다. 일부 실시예에서, 시스템(200)이 FIM 모드로 동작 중일 때, 검출기는, 샘플(180)이 정상적으로(normally) 배치되는 장소에 배치될 수 있다(즉, 샘플(180)은 그것의 정상적인 위치에 존재하지 않는다). 소정 실시예에서는, 시스템(200)이 FIM 모드에서 동작중일 때, 샘플(180)이 정상적으로 배치되는 장소에 이차 전자 수율이 비교적 높은 평면 샘플이 배치될 수 있고, 평면 샘플과 He 이온의 상호 작용에 의해 발생되는 이차 전자가 검출되는데, 검출되는 이차 전자의 밀도가 평면 샘플로 입사하는 He 이온의 밀도와 일반적으로 균형을 이룰 것이기 때문이다.

[0152] 선택적으로, 시스템(200)은 와이어 팁 선단의 영상화/성형의 프로세스 동안 SFIM 모드로 동작될 수 있다. 그러한 실시예에서, 프로세스는, 정렬 편향기(220 및 222)가 간극(224)의 표면을 가로질러 이온 빔을 래스터링하는데 사용되어 와이어 팁의 선단에 대한 필드 방사 패턴을 발생시킨다는 것을 제외하면, 선행 문단에서 설명된 바와 같다. 간극(224)을 통과하는 이온 빔의 일부분은 선택적으로 제2 렌즈(226)에 의해 포커싱되거나 언포커싱 상태를 유지할 수 있다. SFIM 모드에서, 와이어 팁의 이미지는 픽셀 기반으로 획득되고, 측정된 픽셀 밀도 각각은 간극(224)을 통과하는 것이 허용되는 이온 빔의 일부분에 대응된다. 픽셀 밀도는 다같이 팁의 필드 방사 패턴을 이미지로서 또는, 좀더 일반적으로, 복수개 전기 신호로서 표현하는데 사용될 수 있다. 그 다음, 필드 방사 패턴은 팁의 다양한 특성을 평가하여, 가스 필드 이온 현미경에 사용하기 위한 그것의 적합성을 판정하는데 사용될 수 있다. SFIM 모드에서, 검출기는 선행 문단에서 설명된 바와 같이 배치될 수 있고 선행 문단에서 설명된 바와 같은 유형일 수 있다. 선택적으로, 검출기는 광전자 증배관 또는 포토다이오드와 같은 공간 통합적 검출기일 수 있다.

[0153] 앞서 설명된 절차는 일반적으로 W 팁을 처음으로 정교화하는데 사용될 수 있고, 이온 현미경 시스템내에서 W 팁의 재정교화에도 사용될 수 있다. W 팁을 정교화하기 위한 초기 프로세스가 시스템(200)이 아닌 FIM에서 수행된 경우라 하더라도, 시스템(200)에서 그러한 재정교화가 수행될 수 있다. 재정교화는 일반적으로 초기 정교화와 동일한 방식으로 수행될 수 있거나, 재정교화 기술이 원래의 정교화 기술과 상이할 수도 있다. 일부 실시예에서, 재정교화가 바람직스러운지의 여부를 평가하기 위해, 현미경 시스템(200)은, 상술된 바와 같이, FIM 및/또는 SFIM 모드에서 동작하도록 구성될 수 있다. 팁에 대한 하나 이상의 이미지에 기초해, 재정교화 프로세스가 개시 또는 연기될 수 있다. 소정 실시예에서는, 재정교화를 개시하기 위한 시기를 판정하는데 다른 기준이 사용될 수 있다. 예를 들어, 동작 주기 이후에 팁으로부터 측정된 이온 전류가 확립된 임계치 미만으로 떨어지면, 재정교화가 개시될 수 있다.

[0154] 재정교화의 제1 단계로서, 팁은 팁 선단 부근의 원자를 제거하기 위해 필드 증발될 수 있다. 예를 들어, 현미경 시스템(200)은, 앞서 논의된 바와 같이, FIM 및/또는 SFIM 모드에서 동작하도록 구성될 수 있고, 팁에 인가되는 전위는 팁 원자의 제어되는 필드 증발을 발생시키도록 조심스럽게 조정될 수 있다. 필드 증발 프로세스 동안, 팁의 필드 방사 이미지가 FIM 또는 SFIM 모드에서 검출기(예를 들어, 형광체가 코팅된 광자 검출기 또는 평면 샘플로부터 이차 전자 방사를 측정하도록 구성된 이차 전자 검출기)에 의해 획득되고, 필드 증발 프로세스를 중단해야 할 때를 판정하기 위해, 모니터링될 수 있다. 앞서와 같이, 팁의 표면이 정확한 결정 방향이고 깨끗할 때, 팁은 재성형될 수 있다.

[0155] 배경 He 압력이 약 10^{-7} Torr 미만일 때까지, He 가스는 현미경 시스템(200) 밖으로 배출된다. 일부 실시예에서는, 재정교화를 개시하기 위해, 팁에 음 전위가 인가되어 현미경 시스템(200)을 전자 모드(electron mode)로 동작시키고, 팁은 앞서 설명된 바와 같이 정교화된다. 소정 실시예에서는, 앞서 설명된 바와 같이, 산소와 같은 정교화 가스가 현미경 시스템(200)쪽으로 도입되고, 팁은 선택된 시간 동안 산소의 존재하에서 가열된다. 재정교화 절차에 수반하여, He 가스가 현미경 시스템(200)쪽으로 재도입되고, FIM 및/또는 SFIM 모드에서 동작하도록 구성된 시스템으로써, 팁 선단이 W(111) 패싯에 대응되는 삼량체를 포함하는지를 확인하기 위해, 재정교화된 팁의 하나 이상의 이미지가 캡처된다.

[0156] 일부 실시예에서는, 소정의 재정교화 단계가 전자 제어 시스템(170)에서의 하드웨어 및/또는 소프트웨어에 의해 자동적으로 수행될 수 있다. 예를 들어, 소정 실시예에서는, 둥근 팁(rounded tip)에 적용되는 정교화 절차가 자동화된 방식으로 수행될 수 있다. 전자 제어 시스템(170)에 의해 구현되는 정교화 알고리즘의 일례는 다음과 같다. 먼저, 제어 시스템(170)은 펌프(236 및/또는 237)를 활성화하는 것에 의해 현미경 시스템(200)을 소개시키고 팁을 액체 질소 온도로 냉각한다. 현미경 시스템(200)에서의 가스의 배경 압력이 확립된 임계치(established threshold) 미만일 때, 팁은 제어 시스템(170)에 의해, 팁을 지지하고 있는 히터 와이어에게로 조절된 전기 전류를 인가하는 것에 의해 1500 K의 온도로 가열된다. 1500 K에서의 2 분 후에, 제어 시스템(170)은 산소 가스 소스의 밸브를 개방하는 것에 의해 현미경 시스템(200)쪽으로 산소 가스를 도입한다. 밸브 개방은 현미경 시스템(200)에서 약 10^{-5} Torr의 산소 압력을 유지하도록 조정된다. 추가 2 분 후에, 팁의 온도는 제어 시스템(170)에 의해 시스템으로의 액체 질소 냉각제의 흐름을 조정하는 것에 의해 1100 K로 감소된다. 1100 K에서의 2 분 후에, 제어 시스템(170)은 시스템으로의 산소 공급을 차단하고 팁을 액체 질소 온도로 냉각한다. 이 시점에서, (오퍼레이터에 의해 측정되는) 팁의 FIM 및/또는 SFIM 이미지는 팁 선단에서의 W(111)의 존재를 수동으로 확인하는데 사용될 수 있다.

[0157] 이론에 의해 강제될 것이라고 희망하지는 않지만, 산소가 팁의 터미널 원자 셀프로서의 삼량체 형성을 촉진할 수 있다고 생각된다. 소정 실시예에서, FIM 챔버에서의 산소 가스 압력은 10^{-7} Torr 이상(예를 들어, 10^{-6} Torr 이상, 10^{-5} Torr 이상, 10^{-4} Torr 이상) 및/또는 1 Torr 이하(예를 들어, 10^{-1} Torr 이하, 10^{-2} Torr 이하, 10^{-3} Torr 이하)일 수 있다. 소정 실시예에서, FIM 챔버에서의 산소 가스 압력은 10^{-8} Torr에서 10^{-2} Torr(예를 들어, 10^{-7} Torr에서 10^{-3} Torr, 10^{-6} Torr에서 10^{-4} Torr)일 수 있다. 다른 가스 및 재료 또한, 팁 정교화 동안 터미널 원자 셀프로서의 삼량체 형성을 촉진하는데 사용될 수 있다. 예를 들어, 팔라듐, 백금, 금, 및/또는 이리듐과 같은 재료가 재정교화 이전에 둥근 팁의 표면상으로 기상 증착될 수 있다. 이러한 재료가 팁 선단에서의 좀더 신뢰 가능한 삼량체 형성을 촉진할 수도 있다고 생각된다.

[0158] 일부 실시예에서는, 필드의 인가 또는 산소의 의도적 추가없이, 팁의 제어형 가열에 의해 W 팁의 정교화가 실현될 수 있다. 예를 들어, W 팁은 다음의 단계: 1) FIM 챔버에 팁 설치하기; 2) FIM 챔버의 압력 감소시키기; 3)

팁을 5 분 동안 1000 K로 가열하기; 그리고 (예를 들어, 액체 질소 온도로) 냉각하기에 의해 정교화될 수 있다. 이론에 의해 강제될 것이라고 희망하지는 않지만, 산화물로서 팁에 존재하는 미량(trace amount)의 산소가 열을 사용해 팁을 정교화하는데 도움이 될 수도 있다고 생각된다. 소정 실시예에서는, 비정교화 팁이 산소의 흐름에 노출될 수 있고, 상당한 무산소 환경에 배치될 수 있으며, 제어형 가열에 의해 정교화될 수 있다. 이 접근 방법은 팁의 표면에 W 산화물을 발생시킬 수도 있고, 가열시에 W 산화물로부터 유리된 산소가 팁 정교화 프로세스를 지원할 수도 있다고 생각된다.

[0159] 일부 실시예에서는, 팁 정교화 동안에 하나 이상의 추가 가스가 존재할 수도 있다. 예를 들어, 소정 실시예에서는, 질소 가스가 존재할 수도 있다. 이론에 의해 강제될 것이라고 희망하지는 않지만, 질소 가스는 팁을 에칭하여, 삼량체인 터미널 원자 셀프의 좀더 둥근 구조를 제공하는데 도움이 될 수도 있다고 생각되는데; 그러한 구조는 덜 둥근, 삼량체 종단 팁보다 좀더 안정적일 것으로 생각된다. 일반적으로, 질소 가스는 산소 가스와 동시에 도입된다. 소정 실시예에서, FIM 챔버에서의 질소 가스 압력은 10^{-8} Torr 이상(예를 들어, 10^{-7} Torr 이상) 및/또는 10^{-5} Torr 이하(예를 들어, 10^{-6} Torr)일 수 있다. 소정 실시예에서, FIM 챔버에서의 질소 가스 압력은 10^{-5} Torr에서 10^{-8} Torr(예를 들어, 10^{-6} Torr에서 10^{-7} Torr)일 수 있다.

[0160] 선택적으로, 삼량체를 형성한 후, 팁 정교화 프로세스가 반복 가능하다는 것을 보장하는 것을 지원하기 위해, 정교화된 팁에 인가되는 양 전위는, 팁의 제어형 필드 증발이 발생하도록 증가된다. 일정 시주기 동안 팁을 필드 증발한 후에, 팁 선단은 둥근 형태를 되찾는다. 통상적으로, 둥근 팁은, 초기 필드 증발 단계 이후의 팁 방사 패턴과 유사한 방사 패턴을 발생시킨다. 그 다음, 둥근 팁은 (예를 들어, 앞서 설명된 절차를 사용해) 전자 모드(electron mode)에서 다시 정교화되어, 삼량체인 터미널 원자 셀프를 발생시킨다. 일부 실시예에서는, 정교화된 팁 수명 및 안정성을 증가시키기 위해, 필드 증발 기술을 사용해, 정교화된 팁으로부터 하나 이상의 삼량체가 제거될 수 있다. 예를 들어, 3-원자 셀프에 의해 형성되는, 정교화된 팁의 최상단 원자층이 제거되어, 3개보다 많은 원자를 포함하는 아래쪽 원자 셀프가 드러날 수 있다. 새롭게 노출된 원자 셀프는 추가적으로 필드 증발되어 그것의 선단으로서 W 원자 삼량체를 발생시킬 수 있다. 새롭게 형성된 이 삼량체는, 필드 증발 동안에 형성된 추가 삼량체와 함께, 증발될 수 있다. 이 프로세스는 팁의 선단 부근에서 팁의 층기반 라운딩(layer-by-layer rounding)을 초래한다. 팁을 둥글게 하는 것에 의해, 팁 선단 부근에서의 전기 필드 경사는, 현미경 시스템(200)이 동작하는 동안 팁 원자가 필드 증발을 경험하는 확률을 감소시키고 팁의 안정성과 수명을 증가시키면서, 감소된다.

[0161] 프로세스(400)의 단계 410에서, 팁(186)의 선단(187)은 시스템(200)내에 정렬된다. 현미경 시스템(200)에 지지 어셈블리가 설치된 상태에서, 현미경 시스템(200)은 하나 이상의 진공 펌프를 사용해 소개된 다음, 팁(186)쪽으로 열이 인가되어, 예를 들어, 팁 표면에 부착되었을 수도 있는 산화물, 응축물, 및/또는 임의의 다른 불순물을 제거한다. 통상적으로, 예를 들어, 팁(186)은 10 초 이상(예를 들어, 30 초 이상, 60 초 이상)의 구간 동안 900 K 이상(예를 들어, 1000 K 이상, 1100 K 이상)의 온도로 가열된다. 팁 형태가 불순물의 존재에 의해 저하되는 경우라면, 가열 또한 팁(186)을 리패시팅(re-faceting)하는데 도움이 될 수 있다.

[0162] 인가된 열의 결과로서 팁(186)이 방사상으로 빛나고 있는 상태에서, 다음으로는, (예를 들어, 거울과 같은 반사 소자를 삽입하여 광의 일부분을 CCD 카메라와 같은 검출기쪽으로 유도하는 것에 의해) 종축을 따라 전파중인 팁(186)으로부터의 광을 관찰하는 것에 의해, 팁이 이온 광학계(130)의 종축과 대략적으로 정렬된다. 팁(186)의 위치 및/또는 방향은, 팁 매니퓰레이터(208)를 조정하여 팁(186)으로부터의 광을 이온 광학계(130)를 통과하도록 유도하는 것에 의해 변경될 수 있다.

[0163] 이와 같은 대략적인 정렬 절차에 수반하여, 현미경 시스템(200)은 진공 하우징(202 및 204)에서의 배경 압력을 감소시키고, 팁(186)을 (예를 들어, 대략적으로 액체 질소 온도로) 냉각시키며, 가스 소스(110)를 통해 팁(186) 부근의 영역쪽으로 He 가스 원자의 흐름을 도입하는 것에 의해 FIM 또는 SFIM 모드에서 동작하도록 구성된다. 적당히 구성된 검출기에 의해 팁(186)으로부터의 He 이온의 필드 방사 패턴의 이미지가 측정되고, 이 이미지에 기초해, 팁 매니퓰레이터(208)가, 팁(186)의 필드 방사 패턴이 종축의 중앙에 위치하도록, 필드 방사 패턴을 이온 광학계(130)의 종축과 정렬하는데 사용된다. 팁(186)의 필드 방사 패턴에 대한 유도된 변조(induced modulation)를 관찰하면서, 제1 렌즈(216)에 인가되는 전위를 변경하는 것에 의해, 가운데 맞추기 테스트(centering test)가 수행될 수 있다. 렌즈(216)에 인가되는 전위의 변화로 인해 검출기에 의해 관찰되는 필드 방사 패턴의 사이즈는 달라지지만, 패턴의 중앙 위치는 달라지지 않는다면, 팁(186)은 제1 렌즈(216)의 종축과 정렬된 상태이다. 반대로, 팁(186)의 필드 방사 패턴의 중앙 위치가 제1 렌즈(216)에 인가되는 전위의 변화에 응답하여 달라진다면, 팁(186)은 제1 렌즈(216)의 종축에 중심이 위치하고 있지 않다. 팁 매니퓰레이터(208)를

통한 팁(186)의 방향과 위치 조정은, 팁(186)이 제1 렌즈(216)의 종축과 충분히 잘 정렬될 때까지, 되풀이하여 반복될 수 있다. 통상적으로, 이러한 가운데 맞추기 테스트는 간극(224)이 제자리에 위치하지 않은 상태에서 수행된다.

[0164] 다음으로는, 팁(186)의 선단(187)에서의 3-원자 셀프와 He 가스 원자의 상호 작용을 통해 발생된 He 이온이 간극(224)을 통과한다는 것을 보장하기 위해 미세 정렬 절차(fine alignment procedure)가 수행될 수 있다. 편향기(220 및 222)에 인가되는 전위(다음의 논의 참고하기)는, 간극(224)을 통과하는 이온 빔(192)에서의 He 이온 중 70% 이상(예를 들어, 75% 이상, 80% 이상, 85% 이상, 90% 이상, 95% 이상, 97% 이상, 99% 이상)이 팁(186) 선단에서의 3개의 삼량체 원자 중 단 하나와 He 가스 원자의 상호 작용을 통해 발생되도록 조정된다. 동시에, 편향기(220 및 222)에 인가되는 전위의 조정은, 간극(224)이 나머지 2개의 삼량체 원자와 He 가스 원자의 상호 작용에 의해 발생되는 이온 빔(192)에서의 He 이온 중 50% 이상(예를 들어, 60% 이상, 70% 이상, 80% 이상, 90% 이상, 95% 이상, 98% 이상)이 샘플(180)의 표면(181)에 도달하는 것을 방지한다는 것을 보장한다. 이러한 미세 정렬 절차의 결과로서, 간극(224)을 통과하여 이온 광학계(130)를 벗어나는 He 이온 빔은, 주로 팁(186) 선단에서의 3개 삼량체 원자 중 하나의 부근에서만 이온화된 He 원자를 포함한다.

[0165] 다시 도 10을 참조하면, 팁(186)은 제1 렌즈(216)의 종축과 정렬되어 있고, He 이온 빔은 이온 빔(192)의 일부분이 간극(224)을 통과하도록 정렬되어 있는 상태에서, 현미경 시스템(200)은 프로세스(400)의 단계 412에서 He 이온 모드로 동작될 수 있다. 시스템(200)이 팁 정교화 동안 FIM 모드로 사용되었던 실시예에서, FIM 검출기 및/또는 다른 FIM 컴포넌트는, 샘플(180)이 이온 빔(192)으로의 노출을 위해 배치될 수 있도록 이동된다. 추출기(190)에 대하여 양인 전위가 팁(186)에 인가되고, 가스 소스(110)를 통해 He 가스가 진공 하우징(202)쪽으로 도입된다. 팁(186) 선단에서의 3개 삼량체 원자 중 주로 하나와 He 가스 원자의 상호 작용을 통해 발생되는 He 이온은 이온 광학계(130)에 의해 간극(224)을 통과하도록 안내되고 샘플(180)쪽으로 유도된다.

[0166] 일부 실시예에서, 팁(186)에 인가되는 전위는 5 kV 이상(예를 들어, 10 kV 이상, 15 kV 이상, 20 kV 이상)이다. 소정 실시예에서, 팁(186)에 인가되는 전위는 35 kV 이하(예를 들어, 30 kV 이하, 25 kV 이하)이다. 예를 들어, 일부 실시예에서, 팁(186)에 인가되는 전위는 5 kV에서 35 kV(예를 들어, 10 kV에서 30 kV, 15 kV에서 25 kV)이다.

[0167] 일부 실시예에서는, 현미경 시스템(200)의 동작 동안, He 가스 압력은 10^{-8} Torr 이상(예를 들어, 10^{-7} Torr 이상, 10^{-6} Torr 이상, 10^{-5} Torr 이상)이다. 소정 실시예에서, 현미경 시스템(200)에서의 He 가스 압력은 10^{-1} Torr 이하(예를 들어, 10^{-2} Torr 이하, 10^{-3} Torr 이하, 10^{-4} Torr 이하)이다. 예를 들어, 일부 실시예에서, 현미경 시스템(200)에서의 He 가스 압력은 10^{-7} Torr에서 10^{-1} Torr(예를 들어, 10^{-6} Torr에서 10^{-2} Torr, 10^{-5} Torr에서 10^{-3} Torr)이다.

[0168] 팁(186)의 무결성을 확인하기 위해, 팁(186)으로부터의 필드 방사 패턴은 현미경 시스템(200)을, 앞서 논의된 바와 같이, FIM 또는 SFIM 모드로 동작시키는 것에 의해 주기적으로 모니터링될 수 있다. 삼량체 구조가 팁 선단(187)에 원래대로 남아 있으면, 팁(186)은 계속해서 현미경 시스템(200)에게로 이온 빔(192)을 제공하는데 사용될 수 있다. 그러나, 소정 환경하에서는, 팁(186)의 FIM 또는 SFIM 영상화가, 삼량체 구조가 더 이상 팁 선단(187)에 원래대로 남아 있지 않다는 것을 드러낼 수도 있다. 이 경우, 팁(186)은 먼저 필드 증발되어 팁을 둥글게 하고 손상된 삼량체 구조를 제거한 다음, 상술된 바와 같은 프로세스를 사용해 제자리에서(예를 들어, 현미경 시스템(200)으로부터 팁(186)을 제거하지 않으면서) 재정교화될 수 있다.

[0169] 팁(186)으로부터의 필드 방사 패턴의 모니터링은 감소된 성능(예를 들어, 감소된 이온 전류), 관찰되는 영상화 수차 및/또는 오차, 또는 사전에 판정된 다른 기준과 같은 기준에 기초해 자동적으로 수행될 수 있다. 팁(186)의 FIM 이미지를 캡처하기 위해, 샘플(180)은 그것의 위치로부터 제거될 수 있고, 형광체가 코팅된 CCD 검출기와 같은, 검출기가 샘플(180)의 선행 위치에 배치될 수 있다. 다른 방법으로는, 이차 전자 수율이 비교적 높은 평면 샘플이 샘플(180) 대신에 위치쪽으로 병진될 수 있고, 적당한 검출기가 배치되어, 샘플과 He 이온의 상호 작용으로 인해 샘플을 떠나는 이차 전자를 검출하도록 구성될 수 있다. 간극(224)은, 팁(186)과 He 가스 원자의 상호 작용으로부터 발생되는 이온이 크게 방해받지 않도록 제거될 수 있다(또는 큰 지름의 개구부(225)가 선택될 수 있다). 이 동작은 자동화된 방식으로 수행될 수 있다.

[0170] 팁(186)의 SFIM 이미지를 캡처하기 위해, 검출기가 FIM 영상화를 위해 설명된 바와 같이 도입될 수 있고, 간극(224)은 제자리에 유지될 수 있다. 정렬 편향기(220 및 222)가 팁(186)의 이온 방사 패턴을 간극(224)을 가로

질러 래스터링하는데 사용되어, 픽셀 기반 방식으로 팁(186)의 이미지를 획득할 수 있다. 팁(186)에 대한 하나 이상의 이미지 획득은, 간극의 위치, 샘플과 검출기의 이동, 팁(186)쪽으로 그리고 정렬 편향기(220 및 222)에 인가되는 전위를 제어하는 전자 제어 시스템(170)에 의해 자동화될 수 있다.

[0171] 도 13을 참조하면, 상술된 정렬 절차는 통상적으로, 팁(186)의 선단(187)에서 축(207 및 132) 사이의 거리(d)가 2 ㎜ 미만(예를 들어, 1 ㎜ 미만, 500 ㎛ 미만, 200 ㎛ 미만)이도록 팁(186)의 종축(207)과 이온 광학계(130)의 종축(132)을 정렬한다. 일부 실시예에서, 팁(186)의 선단(187)에서 축(207 및 132) 사이의 각도는 2° 이하(예를 들어, 1° 이하, 0.5° 이하, 0.2° 이하)이다.

[0172] 추출기(190)는 개구부(191)를 포함한다. 일반적으로, 추출기(190)의 그리고 개구부(191)의 형태는 원하는 바에 따라 선택될 수 있다. 통상적으로, 이 사양은, He 이온이 효율적으로 그리고 신뢰 가능하게 이온 광학계(130) 쪽으로 유도된다는 것을 보장하도록 선택된다. 예를 들어, 도 13에 도시된 바와 같이, 추출기(190)는 z 방향으로 측정된 두께(t_e) 및 x 방향으로 측정된 폭(a)의 개구부(191)를 갖고, 팁(186)의 선단(187)으로부터 z 방향으로 측정된 거리(e)에 배치된다. 일부 실시예에서, t_e는 100 ㎛ 이상(예를 들어, 500 ㎛ 이상, 1 ㎜ 이상, 2 ㎜ 이상)이고 그리고/또는 t_e는 10 ㎜ 이하(예를 들어, 7 ㎜ 이하, 5 ㎜ 이하, 3 ㎜ 이하)이다. 소정 실시예에서, 팁(186)의 선단(187)과 추출기(190) 사이의 거리(e)는 10 ㎜ 이하(예를 들어, 8 ㎜ 이하, 6 ㎜ 이하, 5 ㎜ 이하, 4 ㎜ 이하, 3 ㎜ 이하, 2 ㎜ 이하, 1 ㎜ 이하)이다. 일부 실시예에서, 추출기(190)는, 도 13에 도시된 바와 같이, +z 방향으로 팁(186)보다 먼 곳에 배치된다. 소정 실시예에서는, 추출기(190)가 -z 방향으로 팁(186)보다 먼 곳에 배치된다. 그러한 실시예에서, 예를 들어, 팁(186)은 추출기(190)를 관통해 돌출하고 +z 방향으로 z 축을 따라 추출기(190)보다 멀리 연장한다. 추출기(190)는 도 13에서 특정한 구성을 갖는 것으로 도시되지만, 좀더 일반적으로, 추출기(190)는 소정의 임의 설계일 수 있다. 예를 들어, 일부 실시예에서, 개구부(191)는 소정의 임의 형태의 곡선 측면을 가질 수 있다.

[0173] 추출기(190)는 일반적으로 팁(186)에 대하여 양 또는 음으로 바이어스될 수 있다. 일부 실시예에서, 추출기(190)에 인가되는 전위는 팁(186)에 대하여 -10 kV 이상(예를 들어, -5 kV 이상, 0 kV 이상) 및/또는 20 kV 이하(예를 들어, 15 kV 이하, 10 kV 이하)이다.

[0174] 선택적으로, 팁(186) 부근에 억제기(188)도 존재할 수 있다. 억제기(188)는, 예를 들어, 억제기(188)에 인가되는 전위를 조정하는 것에 의해 팁(186) 부근에서의 전기 필드 분포를 변경하는데 사용될 수 있다. 추출기(190)와 함께, 억제기(188)는 팁(186)에서 발생되는 He 이온의 궤적을 제어하는데 사용될 수 있다. 억제기(188)는 x 방향으로 측정된 폭(k) 및 z 방향으로 측정된 두께(t_s)의 개구부를 가지며, 팁(186)의 선단으로부터 z 방향으로 측정된 거리(s)에 배치된다. 일부 실시예에서, k는 3 ㎛ 이상(예를 들어, 4 ㎛ 이상, 5 ㎛ 이상) 및/또는 8 ㎛ 이하(예를 들어, 7 ㎛ 이하, 6 ㎛ 이하)이다. 소정 실시예에서, t_s는 500 ㎛ 이상(예를 들어, 1 ㎜ 이상, 2 ㎜ 이상) 및/또는 15 ㎜ 이하(예를 들어, 10 ㎜ 이하, 8 ㎜ 이하, 6 ㎜ 이하, 5 ㎜ 이하, 4 ㎜ 이하)이다. 일부 실시예에서, s는 5 ㎜ 이하(예를 들어, 4 ㎜ 이하, 3 ㎜ 이하, 2 ㎜ 이하, 1 ㎜ 이하)이다. 소정 실시예에서는, 도 13에 도시된 바와 같이, 억제기(188)가 +z 방향으로 팁(186)보다 먼 곳에 배치된다. 일부 실시예에서, 팁(186)은 +z 방향으로 z 축을 따라 억제기(188)보다 먼 곳에 배치되고, 그에 따라, 팁(186)은 억제기(188)를 관통하여 +z 방향으로 연장한다.

[0175] 일반적으로, 현미경 시스템(200)은, 추출기(190)를 통과한 후, 이온 빔(192)에서의 이온의 에너지가 원하는 바에 따라 선택될 수 있도록 구성될 수 있다. 통상적으로, 이온 빔(192)에서의 이온의 평균 에너지는, 이온 광학계(130)로의 입구 개구부(133;entry opening)를 통과한 후, 5 keV 이상(예를 들어, 10 keV 이상, 20 keV 이상, 30 keV 이상) 및/또는 100 keV 이하(예를 들어, 90 keV 이하, 80 keV less, 60 keV 이하, 50kV 이하, 40 kV 이하, 30 kV 이하)이다. 예를 들어, 일부 실시예에서, 입구 개구부(133)를 통과한 후, 이온 빔(192)에서의 이온의 에너지는 5 keV에서 100 keV(예를 들어, 10 keV에서 90 keV, 20 keV에서 80 keV)이다. 예를 들어, 샘플을 통해 투과되는 이온을 검출하는 것이 바람직스러운 실시예에서는, 좀더 높은 이온 에너지(예를 들어, 50 keV 내지 100 keV)가 사용될 수도 있다.

[0176] 더 나아가, 소정 실시예에서는, 이온 전류를 변경하지 않으면서, 이온 빔(192)에서의 이온의 에너지가 변경될 수 있다. 다시 말해, 팁(186)에 인가되는 전위가, 이온 빔(192)으로부터의 이온 빔 전류를 크게 변화시키지 않으면서, 이온 빔(192)의 평균 에너지를 변경하도록 조정될 수 있다.

[0177] *C. 이온 광학계*

[0178] 도 14를 참조하면, 이온 빔(192)이 가스 필드 이온 소스(120)로부터 입구 개구부(133)를 통해 이온 광학계(130)로 진입한다. 이온 빔(192)은 먼저 제1 렌즈(216)를 통과한다. 제1 렌즈(216)의 위치 및 전위는 일반적으로 이온 빔(192)을 교차점(C)에 포커싱하도록 선택되는데, 이 경우, 포인트(C)는 간극(224)으로부터, z 방향으로 측정된, 거리(p)에 위치한다. 일반적으로, 제1 렌즈(216)는 입구 개구부(133)로부터, z 방향으로 측정된, 거리(f)에 위치한다. 일부 실시예에서, 거리(f)는 5 ㎜ 이상(예를 들어, 10 ㎜ 이상, 15 ㎜ 이상) 및/또는 30 ㎜ 이하(예를 들어, 25 ㎜ 이하, 20 ㎜ 이하)이다.

[0179] 일반적으로, 제1 렌즈(216)는 팁(186)에 대하여 양 또는 음으로 바이어스될 수 있다. 일부 실시예에서, 제1 렌즈(216)에 인가되는 전위는 팁(186)에 대하여 -30 kV 이상(예를 들어, -20 kV 이상, -10 kV 이상) 및/또는 40 kV 이하(예를 들어, 30 kV 이하, 20 kV 이하, 15 kV 이하, 10 kV 이하)이다.

[0180] 일반적으로, 거리(p)는 1 ㎜ 이상(예를 들어, 5 ㎜ 이상, 10 ㎜ 이상) 및/또는 100 ㎜ 이하(예를 들어, 70 ㎜ 이하, 50 ㎜ 이하, 30 ㎜ 이하, 20 ㎜ 이하)일 수 있다. 포인트(C)의 위치를 변경하는 것은 간극(224)의 위치에서 x 및/또는 y 방향으로 이온 빔(192)의 사이즈를 변경할 수 있는데, 이는, 간극(224)을 통과하는 이온 빔(192)에서의 이온 비율을 선택적으로 제어할 수 있다. 도 14에서는, 교차점(C)이, -z 방향으로 간극(224)보다 먼 곳에 위치하는 것으로 도시되지만, 일부 실시예에서는, +z 방향으로 간극(224)보다 먼 곳에 위치할 수 있다.

[0181] 정렬 편향기(220 및 222)는 이온 빔(192)의 일부분을 유도하여 간극(224) 및 제2 렌즈(226) 양자를 통과시키도록 구성된다. 다양한 설계 및/또는 컴포넌트가 편향기를 구성하는데 사용될 수 있다. 일부 실시예에서, 예를 들어, 편향기(220 및 222)는, 2개의 사중극자 전극(quadrupole electrodes)이 직렬로 정렬되는 상태로, 각각이 사중극자 전극일 수 있다.

[0182] 편향기(220 및 222)는 He 이온 빔(192)을 x 및 y 방향 양자로 각각 편향할 수 있다. 편향기(220 및 222)의 전극에 인가되는 전위는, 이온 빔(192)의 일부분이 간극(224) 및 제2 렌즈(226) 양자를 통과한다는 것을 보장하도록 조정될 수 있다. 소정 실시예에서, 편향기(220 및 222)에 인가되는 전위는 특정한 정렬 조건을 실현하도록 조정된 다음, 전위는, 현미경 시스템(200)이 동작하는 동안, 변함없이 유지된다. 간극(224)을 관통하는 이온 빔(192)의 정렬은, 예를 들어, 간극(224)을 영상화하도록 구성된 적당한 검출기를 사용해 이온 빔(192)을 관찰하는 것에 의해 평가된다. 편향기(220 및/또는 222) 또한, 간극(224)을 통과하는 이온 빔(192)의 일부분이 제2 렌즈(2126)의 종축과 정렬되도록 조정될 수 있다. 제2 렌즈(226)를 관통하는 이온 빔(192)의 정렬을 평가하기 위해, 제2 렌즈(226)에 인가되는 전위는 변경될 수 있고(통상적으로 워블링(wobbling)이라고 함), 영상화 검출기에서 결과가 관찰될 수 있다. 제2 렌즈(226)에 인가되는 전위를 변경하는 결과로서, 이온 빔(192)의 이미지가 사이즈는 달라지지만 위치는 달라지지 않는다면, 이온 빔(192)은 제2 렌즈(226)를 관통하도록 정렬된 것이다. 전위를 변경하는 결과로서 이온 빔(192)의 중앙 위치가 달라진다면, 이온 빔(192)은 제2 렌즈(226)와 정렬되어 있지 않다. 이 경우, 편향기(222 및/또는 220)에 인가되는 전위는, 정렬이 실현될 때까지, 추가 조정될 수 있고 워블 테스트는 반복될 수 있다.

[0183] 일반적으로, 정렬 편향기(220 및 222)의 다양한 전극 소자에 인가되는 전위는 간극(224) 및 제2 렌즈(226)의 양자에 관련한 특정한 위치쪽으로 이온 빔(192)의 편향을 발생시키도록 원하는 바에 따라 선택될 수 있다. 편향기(220 및 222)에서의 전극 각각은 공통의 외부 그라운드에 대하여 양이나 음으로 바이어스될 수 있다. 일반적으로, 임의 전극에 인가되는 전위는 공통의 외부 그라운드에 대하여 100 V 이하(예를 들어, 75 V 이하, 50 V 이하) 및/또는 10 V 이상(예를 들어, 25 V 이상, 40 V 이상)일 수 있다. 동작하는 동안, 예를 들어, 편향기(220 및 222)에서의 임의 전극에 인가되는 전위는 공통의 외부 그라운드에 대하여 10 V에서 100 V(예를 들어, 10 V에서 75 V, 10 V에서 50 V)일 수 있다.

[0184] 간극(224)은 이온 빔(192)에 대하여 이온 빔(192)에서의 이온 일부가 그것을 통과하는 것을 허용하도록 배치된다. 통상적으로, 간극(224)에는 전위가 인가되지 않는다. 일부 실시예에서, 간극(224)에서의 개구부(225)의, x 방향으로 측정된, 폭(w)은 1 μm 이상(예를 들어, 2 μm 이상, 5 μm 이상, 10 μm 이상, 15 μm 이상, 20 μm 이상, 25 μm 이상, 30 μm 이상) 및/또는 100 μm 이하(예를 들어, 90 μm 이하, 80 μm 이하, 70 μm 이하, 60 μm 이하, 50 μm 이하)이다. 예를 들어, 소정 실시예에서, w는 1 μm에서 100 μm(예를 들어, 5 μm에서 90 μm, 15 μm에서 50 μm, 20 μm에서 50 μm)이다. 일부 실시예에서, y 방향으로 측정된, 간극(224)에서의 개구부(225)의 폭은 1 μm 이상(예를 들어, 2 μm 이상, 5 μm 이상, 10 μm 이상, 15 μm 이상, 20 μm 이상, 25 μm 이상, 30 μm 이상) 및/또는 100 μm 이하(예를 들어, 90 μm 이하, 80 μm 이하, 70 μm 이하, 60 μm 이하, 50 μm 이하)이다. 예를 들어, 소정 실시예에서, w는 1 μm에서 100 μm(예를 들어, 5 μm에서 90 μm, 15 μm에서 50 μm, 20 μm에서 50 μm)이다.

[0185] 간극(224)은 간극 마운트(234)에 배치된다. 간극 마운트(234)는, 전자 제어 시스템(170)으로부터 수신되는 제어 신호에 따른, x-y 평면에서의 간극(224)의 병진을 허용한다. 일부 실시예에서, 간극 마운트(234)는 이온 광학계(130)의 종축(132)을 따라 z 방향에서의 간극(224)의 병진도 허용할 수 있다. 더 나아가, 소정 실시예에서, 간극 마운트(234)는 간극(224)의 x-y 평면에 관한 기울어짐(tilting)을 허용할 수 있다. 간극(224)을 기울이는 것은 간극(224)의 종축을 이온 광학계(130)의 종축(132)과 정렬하는데 사용될 수 있다.

[0186] 일부 실시예에서, 간극(224)은 상이한 폭(w)을 가진 복수개 개구부를 포함할 수 있다. 예를 들어, 도 15는, 다중 개구부(225a-225g)를 포함하는 디스크형 간극(224a)의 (z 방향에 따른) 상면도이다. 간극(224a)은, 간극(224a)의 중앙과 일치하는 피벗 포인트(227) 둘레로 회전하도록 구성된다. 개구부(225a-225g) 각각의 중앙은 피벗 포인트(227)로부터 동일한 거리에 위치한다. 따라서, 선택된 개구부가 이온 빔(192)의 경로에 위치하도록 간극 디스크(224a)를 회전시킨 다음, 원한다면, 개구부와 이온 빔(192)의 정확한 정렬을 보장하도록 간극 디스크(224a)를 병진시키는 것에 의해, 특정한 사이즈의 간극 개구부가 선택될 수 있다.

[0187] 도 16은, 간극(224b)을 통해 연장하는 다중 개구부(229a-229e)를 포함하는 막대형 간극(224b)의 (z 방향에 따른) 상면도이다. 간극 사이즈는 간극(224b)에서 개구부를 선택하는 것에 의해 선택될 수 있다. 이 선택은 간극(224b)을 화살표(221)에 평행한 방향으로 병진시켜 개구부(229a-229e) 중 하나를 이온 빔(192)과 정렬하는 것에 의해 수행된다.

[0188] *통상적으로, 개구부(225a-225g 및 229a-229e)는, 원하는 바에 따라 선택될 수 있는 지름을 가진다. 예를 들어, 일부 실시예에서, 개구부 중 어떤 것의 지름은 5 μm 이상(예를 들어, 10 μm 이상, 25 μm 이상, 50 μm 이상) 및/또는 200 μm 이하(예를 들어, 150 μm 이하, 100 μm 이하)일 수 있다. 소정 실시예에서, 개구부(225a-225g 및/또는 229a-229e)의 지름은 5 μm에서 200 μm(예를 들어, 5 μm 내지 150 μm, 5 μm 내지 100 μm)일 수 있다.

[0189] 일부 실시예에서는, 간극 이외의 디바이스가, 이온 빔(192)에서의 이온의 일부분만이 이온 광학계(130)를 통과하여 샘플(180)의 표면에 충돌하도록 허용하는데 사용될 수 있다. 예를 들어, 2개의 수직 슬릿이 이온 빔의 이동 경로를 따라 직렬로 배치될 수 있다.

[0190] 비점 수차 정정기(218)는 일반적으로, 그것의 형태, 이온 빔(192)의 경로에 따른 위치, 및 인가 전위를 통해, 이온 빔(192)에서 비점 수차를 감소시키거나 제거하도록 구성된다. 다양한 컴포넌트가 비점 수차 정정기(218)를 구성하는데 사용될 수 있지만, 비점 수차 정정기(218)는 통상적으로, 간극(224)과 스캔 편향기(219 및 221) 사이에 배치된 팔중극자 전극이다. 통상적으로, 팔중극자 비점 수차 정정기의 8개 전극은, 전극 중 4개(예를 들어, 팁(186)에 대하여 양으로 바이어스된 4개 그룹의 제1 그룹)의 전압을 조정하도록 구성된 제1 제어기 및 나머지 4개 전극(예를 들어, 팁(186)에 대하여 음으로 바이어스된 4개 전극의 제2 그룹)의 전압을 조정하는 제2 제어기로써, 4개 전극의 2개 그룹으로 분리된다. 제1 및 제2 전극 그룹으로부터의 전극은 팔중극자의 세그먼트를 형성하기 위해 교대하는 방식으로 정렬되는데, 이 경우, 인접 세그먼트는 반대 부호의 바이어스 전압을 가진다. 전극의 이러한 정렬은, 팔중극자의 종축을 따라 전파하는 이온 빔은 포커싱하고 오프축(off-axis) 이온 빔은 디포커싱하는 첨점(cusp) 필드를 형성한다.

[0191] 일반적으로, 팔중극자의 전극 각각은 독립적으로 구성될 수 있고, 그에 따라, 비점 수차 정정기(218)는 이온 빔(192)에 대한 민감한 제어를 허용한다. 일부 실시예에서, 비점 수차 정정기(218)의 전극 중 어떤 것에게로 인가되는 전위도, 공통의 외부 그라운드에 대하여, -30 V 이상(예를 들어, -20 V 이상, -10 V 이상, -5 V 이상) 및/또는 30 V 이하(예를 들어, 20 V 이하, 10 V 이하, 5 V 이하)일 수 있다.

[0192] 정렬 편향기(220 및 222) 이외에, 이온 광학계(130)는 스캔 편향기(219 및 221)를 포함한다. 일반적으로, 이온 광학계(130)내의 스캔 편향기(219 및 221)에 대한 다른 정렬도 가능하지만, 스캔 편향기(219 및 221)는 통상적으로 비점 수차 정정기(218)와 제2 렌즈(226) 사이에 배치된다.

[0193] 스캔 편향기(219 및 221)는 샘플(180)의 표면을 가로질러 이온 빔(192)을 스캔하도록 구성된다. 편향기(219)는, 예를 들어, 이온 빔(192)을 x 방향으로 편향하도록 구성될 수 있고, 편향기(221)는 이온 빔(192)을 y 방향으로 편향하도록 구성될 수 있다. 편향기(219 및 221)에 의해 발생되는 조합된 편향이 이온 빔(192)을 샘플(180)에서의 특정 위치에 배치할 수 있다.

[0194] 통상적으로, 편향기(219 및 221)에 인가되는 전위는 이온 빔(192)의 특정한 편향을 발생시키도록 조정된다. 인

가 전위는 빔(192)을 샘플(180)의 일부분에 걸쳐 래스터 스캔하도록 체계적으로 변경될 수 있다. 예를 들어, 일부 실시예에서, 편향기(221)에 인가되는 전위는, 이온 빔(192)을 y 방향에서 이산적 단계로(in discrete steps;예를 들어, 행 기반으로) 샘플(180)을 가로질러 편향하도록 일정한 간격에서 단계적 방식으로 증가된다. 동시에, 편향기(219)에 인가되는 전위는 이온 빔(192)을 x 방향에서 이산적 단계로(예를 들어, 열 기반으로) 샘플(180)을 가로질러 편향하도록 단계적 방식으로 증가된다. 편향기(221)에 인가되는 전위가 증가되는 속도는, 일단 편향기(219)에 인가되는 전위에서의 단계적 증가를 통해 이온 빔(192)이 모든 컬럼에 걸쳐 완전한 스캔을 형성하고 나면, 이온 빔(192)이 y 방향에서 새로운 행쪽으로 편향되도록 선택될 수 있다. 각각의 행에 대하여, 점진적 전위 증가의 동일한 단계적 패턴이 편향기(219)에 인가되어 x 방향에서 이산적 단계로 이온 빔(192)을 스위프(sweep)할 수 있다.

[0195] 일반적으로, 스캔 편향기(219 및/또는 221)는 복수개 전극으로부터 형성될 수 있다. 예를 들어, 일부 실시예에서, 스캔 편향기(219 및/또는 221)는 한 쌍의 평행한 플레이트 전극을 각각 포함할 수 있다. 편향기(219)의 전극은 이온 빔(192)을 편향기(221)에 의해 발생되는 이온 빔(192)의 편향에 수직인 방향으로 편향하도록 배향될 수 있다.

[0196] 소정 실시예에서, 스캔 편향기(219 및/또는 221)는 좀더 복잡한 설계일 수도 있다. 예를 들어, 스캔 편향기(219 및/또는 221)는 사중극자 전극 및/또는 팔중극자 전극을 포함할 수 있다. 이러한 전극은 x-y 평면에서 단일 방향으로 또는 x-y 평면에서 하나 이상의 방향으로 이온 빔(192)의 편향을 제공하도록 구성될 수 있다.

[0197] 스캔 편향기(219 및 221)에서의 전극 소자 각각은 공통의 외부 그라운드에 대하여 양 또는 음으로 바이어스될 수 있다. 일반적으로, 각각의 전극에 인가되는 전압은 -150 V 이상(예를 들어, -100 V 이상, -50 V 이상, -20 V 이상) 및/또는 150 V 이하(예를 들어, 100 V 이하, 50 V 이하, 20 V 이하)일 수 있다. 동작하는 동안, 예를 들어, 편향기(219 및 221)에서의 각각의 전극에 인가되는 전압은 -150 V에서 150 V(예를 들어, -100 V에서 100 V, -50 V에서 50 V, -20 V에서 20 V)일 수 있다.

[0198] 일반적으로, 제2 렌즈(226)의 위치와 전위는, 제2 렌즈(226)가 이온 빔(192)을 샘플(180)의 표면(181)상으로 포커싱하는데 도움이 되도록 선택된다. 제2 렌즈(226)에 인가되는 전위는, 일반적으로, 공통의 외부 그라운드에 대하여 양 또는 음일 수 있다. 소정 실시예에서, 제2 렌즈(226)에 인가되는 전위는 공통의 외부 그라운드에 대하여 -50 kV 이상(예를 들어, -40 kV 이상, -30 kV 이상) 및/또는 40 kV 이하(예를 들어, 30 kV 이하, 20 kV 이하)이다. 제2 렌즈(226)는 z 방향으로 측정된 거리(u)만큼 간극(224)으로부터 떨어져 위치한다. 일부 실시예에서, u는 5 cm 이상(예를 들어, 10 cm 이상, 15 cm 이상) 및/또는 50 cm 이하(예를 들어, 45 cm 이하, 40 cm 이하, 35 cm 이하, 30 cm 이하, 25 cm 이하, 20 cm 이하)이다.

[0199] 제2 렌즈(226)는 z 축을 따라 측정된 (흔히 작업 거리라고 하는) 거리(h)만큼 샘플(180)로부터 떨어져 위치한다. 일부 실시예에서, h는 2 mm 이상(예를 들어, 5 mm 이상, 10 mm 이상, 15 mm 이상의 20 mm 이상) 및/또는 200 mm 이하(예를 들어, 175 mm 이하, 150 mm 이하, 125 mm 이하, 100 mm 이하, 75 mm 이하, 65 mm 이하, 55 mm 이하, 45 mm 이하)일 수 있다. 소정 실시예에서, h는 2 mm에서 200 mm(예를 들어, 5 mm에서 175 mm, 10 mm에서 150 mm, 15 mm에서 125 mm, 20 mm에서 100 mm)이다. 통상적으로, h는, 제2 렌즈(226)에 인가되는 전위를 변경하여 렌즈(226)의 초점 평면(focal plane)을 조정하고 샘플(180)을 (샘플 매니퓰레이터(140)를 통해) 렌즈(226)의 새로운 초점 평면쪽으로 병진시키는 것에 의해 조정될 수 있다. 현미경 시스템(200)에 의해 허용되는 비교적 큰 거리(h)가 다수 이점을 제공한다. 예를 들어, 표면 돌출부를 갖춘 불규칙한 샘플이 현미경 시스템을 사용해 조사될 수 있다. 더 나아가, 샘플이 이온 빔(192)의 주축에 대하여 큰 각도로 기울어질 수도 있다. 예를 들어, 일부 실시예에서, 샘플(180)의 표면(181)에 대한 법선(normal)과 이온 빔(192)의 주축 사이의 각도는 5° 이상(예를 들어, 10° 이상, 20° 이상, 30° 이상, 40° 이상, 50° 이상, 60° 이상) 및/또는 85° 이하(예를 들어, 80° 이하, 75° 이하, 70° 이하, 65° 이하)이다. 소정 실시예에서, 샘플(180)의 표면(181)에 대한 법선과 이온 빔(192)의 주축 사이의 각도는 5° 에서 85° (예를 들어, 10° 에서 80° , 20° 에서 70° , 30° 에서 70° , 40° 에서 60°)이다. 그에 더하여, 비교적 큰 거리(h)는, 다양한 검출기 및 다른 디바이스가 표면(181)에서의 이온 빔(192)의 입사 영역에 근접하게 배치되는 것을 허용할 뿐만 아니라, 입체각의 비교적 큰 범위에 걸쳐 샘플을 떠나는 입자의 검출을 허용할 수 있다. 통상적으로, 이것은 좀더 강한 신호의 검출 및 (예를 들어, 상이한 유형의 검출기를 사용해) 신호의 상이한 다중 유형의 검출을 허용한다.

[0200] 일부 실시예에서, 제2 렌즈(226)는 CHA(cone half-angle)가 10° 이상(예를 들어, 15° 이상, 20° 이상, 25° 이상) 및/또는 50° 이하(예를 들어, 45° 이하, 40° 이하, 35° 이하)인 직각 원추(right-angled cone)로서 성형된다. 소정 실시예에서, 제2 렌즈(226)의 CHA는 10° 에서 50° (예를 들어, 15° 에서 45° , 20° 에서 40°)이다.

렌즈(226)를 위한 비교적 작은 CHA는, 이온 빔(192)에 관한 샘플(180) 경사각의 좀더 큰 범위 그리고 검출기 및 다른 디바이스가 배치될 수 있는 표면(181)에서의 입사 빔 스폿 부근의 좀더 큰 자유 공간 부피를 포함하는, 다수 이점을 제공한다.

[0201] 앞서 논의된 바와 같이, 통상적으로는, 사실상 팁(186) 선단(187)에서의 삼량체 원자 중 하나와 He 원자의 상호 작용을 통해 발생되는 He 이온만이 간극(224)을 통과한다. 그러나, 일부 실시예에서, 이온 광학계(130)에서의 컴포넌트(예를 들어, 제1 렌즈(216) 및/또는 정렬 편향기(220, 222) 및/또는 간극(224))는, 삼량체 원자 중 2개와 He 원자의 상호 작용을 통해 발생되는 He 이온의 상당한 비율이 간극(224)을 통과하도록 설정될 수 있다. 이것은, 예를 들어, 제1 렌즈(216) 및/또는 편향기(220, 222)에 인가되는 전위의 적합한 선택에 의해 그리고/또는 (예를 들어, 각각, 도 15 및 도 16에 도시된 바와 같이, 간극 휠 또는 막대에서 상이한 간극 개구부를 선택하는 것에 의해) 간극(224)의 사이즈를 변경하는 것에 의해 실현될 수 있다. 소정 실시예에서, 이온 광학계(130)에서의 컴포넌트(예를 들어, 제1 렌즈(216) 및/또는 정렬 편향기(220, 222) 및/또는 간극(224))는, 삼량체 원자의 3개 모두와 He 가스 원자의 상호 작용을 통해 발생되는 He 이온의 상당한 비율이 간극(224)을 통과하도록 설정될 수 있다. 이것은, 예를 들어, 제1 렌즈(216) 및/또는 편향기(220, 222)에 인가되는 전위의 적합한 선택에 의해 그리고/또는 (예를 들어, 각각, 도 15 및 도 16에 도시된 바와 같이, 간극 휠 또는 막대에서 상이한 간극 개구부를 선택하는 것에 의해) 간극(224)의 사이즈를 변경하는 것에 의해 실현될 수 있다.

[0202] 선택적으로, 하나 이상의 추가 전극(예를 들어, 렌즈, 편향기, 및/또는 다른 소자)이 광학 이온계(130)에서의 이온 빔(192)의 경로를 따라 배치될 수 있다. 추가 전극은, 예를 들어, 제2 렌즈(226)의 뒤에 배치될 수 있거나, 기존 소자 사이에 도입될 수 있다. 추가 소자는 팁(186)에 대하여 양이나 음으로 바이어스되어, 이온 광학계(130)내에서 이온 빔(192)에서의 이온의 에너지를 증가 또는 감소시키는 것과 같은 기능을 수행할 수 있고 그리고/또는 이온의 궤적을 변경할 수 있다. 예를 들어, 하나 이상의 가속 전극이 샘플(180)에 배치되어, 이온 빔(192)에서의 이온이 샘플(180)에 입사되는 에너지를 변경할 수 있다.

[0203] 다른 일례로서, 이온 광학계(130)는 샘플(180) 표면(181)에서의 이온 빔(192)의 이온 에너지를 증가시키기 위해 (공통의 외부 그라운드에 대하여) 음으로 바이어스된 열 라이너 관(column liner tube)을 포함할 수 있다. 이 관은 공통의 외부 그라운드에 대하여 -50 kV 이상(예를 들어, -25 kV 이상, -15 kV 이상, -10 kV 이상) 및/또는 -1 kV 이하(예를 들어, -3 kV 이하, -5 kV 이하)로 바이어스될 수 있다. 일반적으로, 이 관은, 예를 들어, 간극(224)과 제2 렌즈(226) 사이와 같이 이온 광학계(130)의 축(132)을 따라 임의 위치에 배치될 수 있다. 예를 들어, 이온 빔(192)의 발산을 감소시키는데 도움이 될 수 있는, 같은 극성으로 하전된(like-charged) 이온 사이의 상호 작용 시간의 감소를 포함하는, 소정 이점은, 이온이 이온 광학계(130)를 통과할 때 이온을 가속하는 것에 의해 실현될 수 있다.

[0204] 일부 실시예에서, 샘플(180) 표면(181) 에서의 이온 빔(192)의 이온 에너지는, (예를 들어, 이온 빔(192)에서의 이온 에너지 증가가 소망되는 경우라면 양으로 또는 이온 빔(192)에서의 이온 에너지 감소가 소망되는 경우라면 음으로) 샘플(180)을 바이어스하는 것에 의해 증가 또는 감소될 수 있다. 이온 빔(192)의 좀더 큰 입사 각도에서는, 바이어스된 샘플(180)에 의해 발생되는 전기 필드의 원통형 비대칭이 프리즘같은 효과(prism-like effect)를 발생시킬 수 있는데, 이 경우, 이온 빔(192)에서의 저에너지 이온은 높은 에너지 이온보다 x 및 y 방향에서 좀더 큰 양만큼 편향되어, 샘플(180) 표면(181)에서의 이온 빔(192)의 스폿 사이즈 증가 및 어쩌면 바람직스럽지 못한 다른 결과를 초래한다. 따라서, 일부 실시예에서, 샘플(180)은 이온 빔(192)에서의 이온 에너지를 변경하도록 바이어스되고, 이온 빔(192)과 표면(181)에 대한 법선 사이의 각도는 6° 미만(예를 들어, 5° 미만 , 4° 미만 , 3° 미만 , 1° 미만)이다.

[0205] 이온 광학계의 소정 실시예가 설명되었지만, 이온 광학계의 다른 실시예가 사용될 수도 있다. 일례로서, 소정 전극 유형(예를 들어, 팔중극자)이 설명되었다는 점에서, 하나 이상의 상이한 전극 유형(예를 들어, 사중극자)이 사용되어 동일한 효과를 실현할 수도 있다. 좀더 일반적으로, 다양하고 상이한 이온 광학계 시스템이 현미경 시스템(200)에 사용될 수 있다. 일부 실시예에서, 예를 들어, 이온 광학계(130)는 편향기, 간극, 및 다른 이온 광학 소자 이외에 단일 렌즈만을 포함한다. 소정 실시예에서, 이온 광학계(130)는 그 사이에 간극이 존재하는 제1 및 제2 렌즈를 포함한다.

[0206] 다른 일례로서, 일부 실시예에서, 이온 광학계는 제1 렌즈, 제2 렌즈, 제1 렌즈와 제2 렌즈 사이의 간극, 및 무전극(no electrode)을 포함하고, 이온 광학계는, 제1 렌즈는 이온 빔의 발산을 감소시킬 수 있도록(예를 들어, 이온 빔이 이온 광학계 시스템의 종축과 상당히 정렬되도록), 간극은 이온 빔의 일부분이 그것을 통과하는 것을 차단할 수 있도록, 그리고 제2 렌즈는 이온 빔을 샘플의 표면에서 비교적 작은 스폿 사이즈로 포커싱하는 것을

도울 수 있도록 설계된다. 그러한 실시예에서, 샘플의 표면에 도달하는 이온 빔의 이온은 (예를 들어, 상술된 바와 같이) 삼량체 중 단 하나의 원자와 He 원자의 상호 작용에 의해 주로 발생될 수 있다. 일부 실시예에서는, 샘플의 표면에 도달하는 이온 빔에서의 대략적으로 동일한 수의 이온이 3개의 삼량체 원자 각각과 He 원자의 상호 작용을 통해 발생된다.

[0207] 추가 일례로서, 소정 실시예에서, 이온 광학계는 제1 렌즈, 제2 렌즈, 제1 렌즈와 제2 렌즈 사이의 간극, 및 무전극을 포함하고, 이온 광학계는, 제1 렌즈는 이온 빔을 간극에서의 개구부 중앙을 향해 포커싱할 수 있도록, 간극은 포커싱된 이온 빔이 발산하여 그것을 통과하는 것을 허용할 수 있도록, 그리고 제2 렌즈는 이온 빔을 샘플의 표면에서 비교적 작은 스폿 사이즈로 포커싱하는 것을 도울 수 있도록 설계된다. 그러한 실시예에서, 샘플의 표면에 도달하는 이온 빔은 삼량체에서의 3개 원자 각각과 가스 원자의 상호 작용에 의해 발생되는 이온의 거의 동일한 수를 포함할 수 있다. 팁(186)의 선단이 3개 이상의 원자(예를 들어, 5개 이상의 원자, 7개 이상의 원자, 9개 이상의 원자)를 포함하면, 이온 빔은 팁(186) 선단에서의 원자 각각과 가스 원자의 상호 작용을 통해 발생되는 거의 동일한 수의 이온을 포함할 수 있다.

[0208] 추가 일례로서, 일부 실시예에서, 이온 광학계는 제1 렌즈, 제2 렌즈, 제1 렌즈와 제2 렌즈 사이의 간극, 및 무전극을 포함하고, 이온 광학계는, 제1 렌즈는 이온 빔의 발산을 감소시키고 낮은 발산 빔을 간극을 향해 유도할 수 있도록, 간극은 이온 빔에서의 사실상 모든 이온이 그것을 통과하는 것을 허용할 수 있도록, 그리고 제2 렌즈는 이온 빔을 샘플의 표면에서 비교적 작은 스폿 사이즈로 포커싱하는 것을 도울 수 있도록 설계된다. 그러한 실시예에서, 샘플의 표면에 도달하는 이온 빔은 삼량체에서의 3개 원자 각각과 가스 원자의 상호 작용에 의해 발생되는 이온의 거의 동일한 수를 포함할 수 있다. 팁(186)의 선단이 3개 이상의 원자(예를 들어, 5개 이상의 원자, 7개 이상의 원자, 9개 이상의 원자)를 포함하면, 이온 빔은 팁(186) 선단에서의 원자 각각과 가스 원자의 상호 작용을 통해 발생되는 거의 동일한 수의 이온을 포함할 수 있다.

[0209] 다른 일례로서, 소정 실시예에서, 이온 광학계는 제1 렌즈, 제2 렌즈, 제1 렌즈와 제2 렌즈 사이의 간극, 및 무전극을 포함하고, 이온 광학계는, 제1 렌즈는 이온 빔을 간극을 향해 부분적으로 포커싱할 수 있도록, 간극은 이온 빔에서의 이온의 일부분이 그것을 통과하는 것을 차단할 수 있도록(하지만 이온 빔에서의 이온 중 비교적 큰 비율이 그것을 통과하는 것은 여전히 허용할 수 있도록), 그리고 제2 렌즈는 이온 빔을 샘플의 표면에서 비교적 작은 스폿 사이즈로 포커싱하는 것을 도울 수 있도록 설계된다. 그러한 실시예에서, 샘플의 표면에 도달하는 이온 빔은 삼량체에서의 3개 원자 각각과 가스 원자의 상호 작용에 의해 발생되는 이온의 거의 동일한 수를 포함할 수 있다. 팁(186)의 선단이 3개 이상의 원자(예를 들어, 5개 이상의 원자, 7개 이상의 원자, 9개 이상의 원자)를 포함하면, 이온 빔은 팁(186) 선단에서의 원자 각각과 가스 원자의 상호 작용을 통해 발생되는 거의 동일한 수의 이온을 포함할 수 있다.

[0210] *D. 팁 경사 및 병진 메커니즘*

[0211] 팁 매니퓰레이터(208)는 팁(186)의 x-y 평면에서의 병진과 이온 광학계(130)의 축(132)에 관한 팁(186)의 기울어짐 양자를 허용하도록 구성된다. 도 17은 팁(186), 지지 어셈블리(520) 및 팁 매니퓰레이터의 실시예를 포함하는 현미경 시스템(200)의 일부분의 단면도이다. 팁 매니퓰레이터(208)는 샤프트(502), 돔(504), 솔더(510) 및 병진기(514; translator)를 포함한다. 병진기(514)는 샤프트(502)에 접속되는데, 샤프트(502)는 솔더(510)에서의 개구부(516)를 통과하기에 적당한 치수이다. 샤프트(502)는 부가적으로 베이스(508)에 접속되는데, 베이스(508)는 다음으로 어셈블리(520)에 접속된다. 솔더(510)는 표면(512 및 513) 사이의 정지 마찰력에 의해 돔(504)에 대하여 고정된 위치에 위치하고, 병진기(514)는 표면(518 및 519) 사이의 정지 마찰력에 의해 솔더(510)에 대하여 고정된 위치에 위치한다.

[0212] 팁 매니퓰레이터(208)는 팁(186)의 x-y 평면에서의 병진을 제공한다. 팁(186)을 병진시키기 위해, 고압력 가스가 주입구(503)쪽으로 도입된다. 주입구(503)쪽으로 도입되는 고압력 가스는, 예를 들어, 실내 공기(room air)와 같은 가스일 수 있다. 통상적으로, 가스는 50 psi(pounds per square inch) 이상(예를 들어, 75 psi 이상, 100 psi 이상, 125 psi 이상)의 압력에서 도입될 수 있다. 고압력 가스를 도입하는 결과로서, 병진기(514)에는 솔더(510)로부터 멀어지는 -z 방향으로 힘이 가해진다. 가해진 힘은 표면(518 및 519) 사이의 마찰력을 약화시키고(하지만 0으로 감소시키지는 않음), x-y 평면에서 횡력(lateral force)을 인가하는 것에 의해 솔더(510)에 관한 병진기(514)의 재배치를 허용한다. 팁(186)은, 병진기(514)가 재배치될 때, x-y 평면에서 병진된다. 팁(186)이 그것의 새로운 위치에 위치할 때, 고압력 가스의 공급은 중단되고, 하나 이상의 진공 펌프를 사용해 팁 매니퓰레이터(208)의 내부를 소개시키는 것에 의해, 표면(518 및 519) 사이의 강한 정지 마찰력이 재확립된다. 팁(186)은 재확립된 강한 마찰력의 결과로서 제자리에 강하게 고정된다.

[0213] 팁 매니퓰레이터(208)는 이온 광학계(130)의 축(132)에 관한 팁(186)의 기울어짐도 제공한다. 팁(186)을 기울이기 위해, 고압력 가스가 주입구(505)쪽으로 도입된다. 주입구(505)쪽으로 도입되는 고압력 가스는 실내 공기와 같은 가스일 수 있다. 예를 들어. 통상적으로, 가스는 50 psi 이상(예를 들어, 75 psi 이상, 100 psi 이상, 125 psi 이상)의 압력에서 도입될 수 있다. 고압력 가스를 도입하는 결과로서, 숄더(510)에는 돔(504)으로부터 멀어지는 -z 방향으로 힘이 가해진다. 가해진 힘은 표면(512 및 513) 사이의 마찰력을 약화시킨다(하지만 0으로 감소시키지는 않는다). 그 다음, 숄더(510)는, 숄더(510)를 화살표(506)에 의해 지시되는 방향으로 병진시키기 위한 횡력을 인가하는 것에 의해, 돔(504)에 대하여 재배치될 수 있다. 숄더(510)의 병진은 돔(504)의 곡선형 표면에 따른 상대적 이동에 대응된다. 이러한 이동의 결과로서, (팁(186)의 경사각에 대응되는) 축(132 및 207) 사이의 각도는 달라진다. 팁(186)의 경사 조정이 완료되면, 고압력 가스의 공급은 중단되고, 팁 매니퓰레이터(208)의 내부를 소개시키는 것에 의해, 표면(512 및 513) 사이의 강한 정지 마찰력이 재확립된다. 팁(186)은 재확립된 강한 마찰력의 결과로서 제자리에 강하게 고정된다.

[0214] 일부 실시예에서는, 도 17에 도시된 바와 같이, 돔(504)의 곡률 반경의 중앙(R)이 팁(186) 선단의 위치와 일치하도록 팁 매니퓰레이터(208)가 구성된다. 결과적으로, 팁(186)이 기울어져 축(132 및 207) 사이의 각도를 변경할 때, 팁(186)의 x-y 평면에서의 병진은 발생하지 않는다. 결과적으로, 팁 매니퓰레이터(208)는, 제1 렌즈(216)의 축에 관한 팁(186)의 병진을 발생시키지 않으면서, 팁 원자 중 하나와 가스 원자의 상호 작용을 통해 발생되는 이온의 궤적을 제1 렌즈(216)의 종축과 정렬하는데 사용될 수 있다.

[0215] 소정 실시예에서, 팁 매니퓰레이터(208)는 추가 축 둘레로 회전 이동을 허용하도록 구성될 수 있다. 예를 들어, 도 17에 도시된 실시예에서, 고압력 가스 가 주입구(503)쪽으로 도입되어 표면(518 및 519) 사이의 마찰력을 감소시키고 병진기(514)의 x-y 평면에서의 병진을 허용할 때, 병진기(514)쪽으로 적당한 토크를 인가하는 것에 의해, 병진기(514)는 축(207) 둘레로 회전될 수도 있다. 이 회전은 팁(186)의 병진 및 팁(186)의 기울기 조정과 별도로 또는 그에 더하여 수행될 수 있다.

[0216] *E. 샘플 스테이지*

[0217] 다시 도 5를 참조하면, 현미경 시스템(200)은 샘플(180)을 지지하고 배치하기 위한 샘플 매니퓰레이터(140)를 포함한다. 전자 제어 시스템(170)으로부터의 제어 신호에 응답하여, 샘플 매니퓰레이터(140)는 샘플(180)을 x, y, 및 z 방향 각각으로 병진시킬 수 있다. 일부 실시예에서, 샘플 매니퓰레이터(140)는 제어 신호에 응답하여 샘플(180)을 x-y 평면에서 회전시킬 수도 있다. 더 나아가, 소정 실시예에서, 샘플 매니퓰레이터(140)는 적당한 제어 신호에 응답하여 샘플(180)을 x-y 평면 밖으로 기울일 수도 있다. 이러한 자유도 각각은 독립적으로 조정되어, 이온 빔(192)에 대하여 샘플(180)의 적당한 방향을 실현할 수 있다.

[0218] 다음에서 좀더 상세하게 설명되는 바와 같이, 일부 실시예에서, 샘플 매니퓰레이터(140)는, 매니퓰레이터(140)쪽으로 비교적 작은 전위를 인가하는 것에 의해, 공통의 외부 그라운드에 대하여 양이나 음으로 바이어스될 수 있다. 예를 들어, 일부 실시예에서는, 공통의 외부 그라운드에 대하여 5 V 이상(예를 들어, 10 V 이상, 20 V 이상, 30 V 이상, 40 V 이상, 50 V 이상)의 양 전위 바이어스가 매니퓰레이터(140)에 인가되어, 양으로 하전된 He 이온이 샘플(180)의 표면(181)에 부착되는 것을 방지하는데 도움이 될 수 있다. 소정 실시예에서는, 공통의 외부 그라운드에 대하여 -200 V 이상(예를 들어, -150 V 이상, -100 V 이상, -50 V 이상, -40 V 이상, -30 V 이상, -20 V 이상, -10 V 이상, -5 V 이상)의 음 전위 바이어스가 매니퓰레이터(140)에 인가되어, 예를 들어, 적당히 구성된 검출기에 의해 이차 전자가 검출될 수 있다는 것을 보장하면서, (샘플(180)과 이온의 상호 작용을 통해 샘플(180)의 표면(181)을 떠나는) 이차 전자를 샘플로부터 멀어지도록 가속하는데 도움이 될 수 있다. 일반적으로, 매니퓰레이터(140)에 인가되는 전위는 연구중인 특정 재료, He 이온 전류, 및 샘플의 노출 시간에 따라 원하는 바대로 선택될 수 있다.

[0219] *F. 검출기*

[0220] 검출기(150 및 160)는, 검출기(150)는 샘플(180)의 표면(181)(이온 빔이 충돌하는 표면)으로부터 입자를 검출하도록 배치되고, 검출기(160)는 샘플(180)의 표면(183)으로부터 입자를 검출하도록 배치되는 상태로, 도 5에서 개략적으로 묘사된다. 일반적으로, 광범위한 다른 검출기가 현미경 시스템(200)에서 상이한 입자를 검출하는데 이용될 수 있고, 현미경 시스템(200)은 통상적으로, 소망하는 임의 갯수의 검출기를 포함할 수 있다. 다양한 검출기(들)의 구성은 측정될 입자 및 측정 조건에 따라 선택될 수 있다. 일부 실시예에서는, 스펙트럼 분해 검출기(spectrally resolved detector)가 사용될 수도 있다. 그러한 검출기는 상이한 에너지 및/또는 파장의 입자를 검출할 수 있고, 검출 입자 각각의 에너지 및/또는 파장에 기초해 입자를 분해할 수 있다. 소정 실시예에서, 스펙트럼 분해 검출기는 입자를 입자의 에너지 및/또는 파장에 기초해 검출기의 상이한 영역쪽으로 유도할

수 있는 컴포넌트를 포함한다.

[0221] 소정의 예시적 검출기 및 검출기의 정렬이 다음에서 설명된다.

[0222] (i) Everhart-Thornley 검출기

[0223] ET(Everhart-Thornley) 검출기는 이차 전자, 이온, 및/또는 중성 입자를 검출하는데 사용될 수 있다. 도 18은 입자 선택기(601), 반전 재료(602), 지지대(604), 광자 검출기(606), 및 전압 소스(607 및 608)를 포함하는 ET 검출기(600)의 개략도를 나타낸다.

[0224] 입자 선택기(601)는 전기 전도성 재료로 형성된다. 일부 실시예에서, 예를 들어, 입자 선택기(601)는 금속 충전 팩터(metal fill-factor)가 약 30% 미만(예를 들어, 25% 미만, 20% 미만, 10% 미만, 5% 미만)인 금속 격자 또는 망일 수 있다. 격자는 주로 열린 공간이기 때문에, 격자에 충돌하는 입자는 비교적 방해받지 않고 통과할 수 있다.

[0225] 소정 실시예에서, 입자 선택기(601)는 금속 링 또는 관으로 형성된다. 예를 들어, 입자 선택기(601)는, 입자가 링 또는 관을 통과하는 것을 허용하는 내부 개구부를 갖춘, 사실상 원통형의 링 또는 관일 수 있다. 링 또는 관은, 예를 들어, 구리 또는 알루미늄과 같은 고전도성 금속으로 형성될 수 있다.

[0226] 좀더 일반적으로, 입자 선택기(601)는, 입자가 통과하기 위한 통로를 포함하는 임의의 개방 전극 구조로부터 형성될 수 있다. 입자 선택기(601)는 하나 이상의 전극으로부터 형성될 수 있고, 하나 이상의 전극에 인가되는 전위는 일반적으로, 측정되는 입자의 유형에 따라 원하는 바대로 선택될 수 있다.

[0227] 반전 재료(602)는, 하전 입자(예를 들어, 이온, 전자)와의 상호 작용시에, 광자를 형성할 수 있는 재료로 형성된다. 예시적 재료로는 형광체 재료 및/또는 신틸레이터 재료(예를 들어, YAG(yttrium-aluminium-garnet) 및 YAP(yttrium-aluminium-phosphate)와 같은 결정 재료)를 들 수 있다. 지지대(604)는, 반전 재료(602)에 의해 형성되는 광자에 대해 투과적인 재료로 형성된다.

[0228] 동작하는 동안, 전압 소스(607)는 (전도성 재료로 형성된) 입자 선택기(601)쪽으로 비교적 작은 크기(예를 들어, 100 V에서 500 V와 같은 500 V 이하)의 전압을 인가하고, 전압 소스(608)는 반전 재료(602)쪽으로 비교적 크기가 큰(예를 들어, 5 kV 이상, 10 kV 이상)의 전압을 인가한다. ET 검출기가 샘플(180)로부터 전자(예를 들어, 이차 전자)를 측정하는데 사용되는 실시예에서, 입자 선택기(601) 및 반전 재료(602)에 인가되는 전압의 부호는 샘플(180)에 대하여 양이다. ET 검출기가 샘플(180)로부터 이온(예를 들어, 이차 이온, 산란 이온)을 측정하는데 사용되는 실시예에서, 입자 선택기(601) 및 반전 재료(602)에 인가되는 전압의 부호는 샘플(180)에 대하여 음이다. 소정 실시예에서, 샘플(180)은 샘플(180)에서 검출기(600)로의 입자 전달을 지원하도록 (공통의 외부 그라운드에 대하여) 바이어스될 수도 있다. 예를 들어, ET 검출기가 샘플(180)로부터 이차 전자를 측정하는데 사용될 때, 샘플은 공통의 외부 그라운드에 대하여 음으로 바이어스될 수 있다. 매니퓰레이터(140)쪽으로 음 전위 바이어스를 인가하는 것은, 샘플에서 높은 가로세로비의(예를 들어, 깊은) 홀 또는 비아에서 발생되는 이차 전자를 검출할 때, 특히 유용할 수 있다. 공통의 외부 그라운드에 관한 음 전위 바이어스는, 전자의 검출을 좀더 용이하게 하면서, 홀 또는 비아 밖으로 그리고 샘플로부터 멀어지도록 전자를 가속하는데 도움이 될 수 있다. 음 바이어스가 존재하지 않을 경우, 이차 전자 중 다수는, 홀 또는 비아 벽상의 포인트에서 샘플로 재진입하면서, 검출될 홀 또는 비아를 결코 벗어나지 못할 수도 있다.

[0229] 샘플(180)은, 예를 들어, ET 검출기가 샘플로부터 이온을 측정하는데 사용될 때, 양으로 바이어스될 수 있다. 샘플을 바이어스하기 위해 인가되는 전위의 크기는 5 V 이상(예를 들어, 10 V 이상, 15 V 이상, 20 V 이상, 30 V 이상, 50 V 이상, 100 V 이상)일 수 있다.

[0230] 샘플(180)로부터의 하전 입자(610)(예를 들어, 전자 또는 이온)는 입자 선택기(601)쪽으로 유인되어, 입자 선택기(601)를 통과하며, 반전 재료(602)를 향해 가속된다. 그 다음, 하전 입자(610)는 반전 재료(602)와 충돌하여, 광자(612)를 발생시킨다. 광자(612)는 지지대(604)를 통과하여 광자 검출기(606)에 의해 검출된다.

[0231] 하전 입자를 측정하는 것과 관련하여 ET 검출기의 동작이 설명되었지만, ET 검출기는 중성 입자를 검출하는데도 사용될 수 있는데, 일반적으로, 반전 재료(602)에 충돌하는 입자가 광자(612)를 발생시키기 위해 하전될 필요는 없기 때문이다. 특히, 반전 재료(602)에 충돌하는, 샘플(180)로부터의 일차 원자가 광자 검출기(606)에 의한 검출을 위한 광자(612)를 발생시킬 수 있다. 광자 검출기(606)는, 예를 들어, 광전자 증배관(PMT), 다이오드, 다이오드 어레이, 또는 CCD 카메라일 수 있다.

[0232] ET 검출기는 중성 또는 하전 입자를 검출하기 위해 샘플(180)에 관련한 임의 위치에 배치될 수 있다. 통상적으

로, 예를 들어, ET 검출기는 이온 광학계(130)의 제2 렌즈(226)에 인접하게 배치된다. 선택적으로, ET 검출기는, (예를 들어, 도 5의 검출기(150)를 위해 묘사된 것과 유사한 구성으로) 그것이 샘플(180)을 향해 약간 아래쪽으로 기울어지도록 배치될 수도 있다.

[0233] 소정 실시예에서, ET 검출기는 샘플(180)의 표면(183) 부근에 배치될 수 있다. 그러한 구성은, 예를 들어, (예를 들어, 샘플(180)을 통해 투과된 후) 표면(183)으로부터 출현하는 샘플(180)로부터의 이차 전자를 측정하는 것을 추구할 때, 바람직스러울 수 있다. 그러한 실시예에서, ET 검출기는, 도 5에서의 검출기(160) 구성과 유사한 구성을 가질 수 있다.

[0234] (ii) 광자 검출기

[0235] 샘플(180)과 이온의 상호 작용에 의해 발생되는 광자를 검출하기 위해, PMT와 같은 표준 광자 검출기가 사용될 수 있다. 샘플(180)로부터 발산하는 광자 플럭스(photon flux)가 충분히 크다면, 다이오드, 다이오드 어레이, 및 CCD 카메라와 같은 덜 민감한 광자 검출기가 사용될 수 있다.

[0236] 일부 실시예에서, 광자 검출기는, 예를 들어, 다른 광학 신호 중에서 관심있는 특정 광학 신호를 격리하도록 구성될 수 있는 다양한 광학 소자도 포함할 수 있다. 예를 들어, 소정 실시예에서, 광자 검출기는, 샘플(180)로부터 출현하는 광자 신호에서의 특정한 파장 대역을 선택하기 위해 필터와 같은 광학 소자를 포함할 수 있는데, 이는, 샘플(180)에 관한 재료 구성물 정보를 제공할 수 있다. 필터는, 예를 들어, (원치않는 파장의 광자를 흡수하는 것에 의해, 원치않는 파장의 광자를 반사하는 것에 의해, 또는 원치않는 파장의 광자를 전환하는 것에 의해) 원치않는 파장의 광자를 차단할 수 있다. 일부 실시예에서, 광학 소자(예를 들어, 하나 이상의 격자와 같은 회절 소자 및/또는 하나 이상의 프리즘과 같은 굴절 소자, 및/또는 광자의 파장 분해된 검출을 제공하는 하나 이상의 분광 장치 시스템)는 상이한 파장을 공간적으로 분광하는 것에 의해 (샘플(180)에 의해 발생되는 광자의 스펙트럼을 측정하기 위한) 스펙트럼 분해를 제공할 수 있다. 일부 실시예에서, 광자 검출기는 파장판(waveplates) 및/또는 편광자와 같은 분극 조작 소자를 포함할 수 있다. 이러한 분극 조작 소자는, 예를 들어, (예를 들어, 샘플(180)을 위한 결정 방향 정보를 판정하는 것을 지원하기 위해) 샘플(180)로부터 출현하는 광자 신호의 분극 선택적 검출(polarization-selective detection)을 허용하면서, 선택된 분극 상태를 가진 광자만이 PMT에 도달하는 것을 허용하도록 구성될 수 있다. 소정 실시예에서, 광자 검출기는 (예를 들어, 검출되는 광자의 입체각을 증가시키기 위해) 거울, 렌즈, 빔 분리기, 및 입사 광자를 재유도하고 조작하기 위한 다른 소자와 같은 광학 소자도 포함할 수 있다.

[0237] 일반적으로, 광자 검출기는 샘플(180)로부터 소정의 임의 각도 및 거리에서 광자를 검출하도록 배치될 수 있다. 예를 들어, 소정 실시예에서, 광자 검출기는 표면(181)(이온 빔(192)이 입사하는 샘플(180)의 표면)으로부터 또는 표면(183)(이온 빔(192)이 입사하는 표면과 대향하는 샘플(180)의 표면)으로부터 출현하는 광자를 검출하도록 배치될 수 있다. 선택적으로, 다중 광자 검출기가 사용되어, 샘플(180)의 표면(181)(이온 빔이 충돌하는 표면), 표면(183)(이온 빔이 충돌하는 반대쪽 표면) 및/또는 다른 표면으로부터 광자를 검출하도록 구성될 수 있다.

[0238] 일부 샘플의 경우, 광자는 샘플(180)에서 발생하는 광학 프로세스를 위한 선택 규칙에 따라 특정 방향으로 산란되고, 샘플(180)로부터의 광자 수율에 대한 각도 분해된 측정은, 예를 들어, 샘플(180)에 관한 재료 구성물 정보를 제공할 수 있다.

[0239] (iii) 마이크로 채널 플레이트 검출기

[0240] 일부 실시예에서는, 마이크로 채널 플레이트 검출기가 샘플(180)로부터의 이차 전자, 중성 원자, 또는 이온의 플럭스를 증폭하는데 사용될 수 있다. 마이크로 채널 플레이트는 통상적으로 용융 실리카(fused silica)와 같은 재료로부터 형성되고, 일반적으로 어레이의 형태로 정렬된 대다수 작은 지름 채널을 포함한다. 입자는 개개 채널로 진입하여, 자유 전자를 발생시키면서, 채널 벽과 충돌한다. 통상적으로, 채널 벽과 입자(중성 원자, 이온, 또는 전자)의 충돌 각각에서 다중 자유 전자(multiple free electrons)가 발생된다. 결과적으로, 입력 입자 신호의 증폭에 대응되는 계단식(cascaded) 전자 신호가 마이크로 채널 플레이트를 벗어난다.

[0241] (하나 이상의 마이크로 채널 플레이트를 포함할 수 있는) 마이크로 채널 플레이트 기반 검출기는 샘플(180)로부터 이온, 이차 전자, 및/또는 중성 원자를 검출하도록 구성될 수 있다. 샘플(180)로부터 형성되는 중성 입자 및/또는 이온(예를 들어, 이차 이온 및 원자, 산란 이온 및 일차 원자)은 통상적으로 샘플(180)의 표면(181)(이온 빔이 충돌하는 표면)을 떠난다. 따라서, 샘플(180)로부터 중성 입자 및/또는 이온을 측정하도록 구성된 마이크로 채널 플레이트 기반 검출기는 일반적으로 도 1 및 도 5에서 묘사된 검출기(150)의 위치와 유사한 위치에

배치된다. 그러나, 소정 실시예에서는, 중성 입자 및/또는 이온(예를 들어, 투과된 이온)이 조사될 수 있다. 그러한 실시예에서, 마이크로 채널 플레이트 기반 검출기는 도 1 및 도 5에서의 검출기(160)의 위치와 유사한 위치에 배치된다. 이차 전자는 샘플(180)의 표면(181)(이온 빔이 충돌하는 표면) 및/또는 표면(183)(이온 빔이 충돌하는 표면과 대향하는 쪽의 표면)으로부터 검출될 수 있고, 샘플(180)로부터 이차 전자를 검출하도록 구성된 마이크로 채널 플레이트 기반 검출기는 도 1 및 도 5에서 묘사된 검출기(150) 및/또는 검출기(160)와 유사한 위치에 배치된다.

[0242] 마이크로 채널 플레이트는 입력되는 입자 신호를 증폭하고 입력 신호를 출력 전자 신호로 변환한다. 출력 전자 신호를 가시화하기 위해, 마이크로 채널 플레이트 기반 검출기는 반전 재료, 스크린, 및 광자 검출기를 포함할 수도 있다(앞서의 논의 참고하기).

[0243] 일부 실시예에서, 마이크로 채널 플레이트는 이온 광학계(130)의 소자에 직접적으로 부착된다. 도 19는 제2 렌즈(226)에 직접적으로 장착된 마이크로 채널 플레이트 검출기(620)의 단면도를 나타낸다. 제2 렌즈(226)는, 평평한 하부면(622)의 원추 형태를 가진다. 검출기(620)는 표면(622)에 직접적으로 장착된다. 샘플(180)이 이온 빔(192)에 노출될 때, (화살표(624)에 의해 집합적으로 지시되는) 샘플(180)로부터의 이온, 이차 전자, 및/또는 중성 원자가 마이크로 채널 플레이트 검출기(620)에 의해 검출될 수 있다. 검출기(620)는, 전자 제어 시스템(170)쪽으로 전달될 수 있는, 검출 입자 플럭스에 비례하는 전류를 기록한다.

[0244] (iv) 반전 플레이트

[0245] 일부 실시예에서는, 반전 플레이트가 샘플(180)로부터의 이온(예를 들어, 산란 이온, 이차 이온) 또는 샘플(180)로부터의 중성 입자(예를 들어, 일차 중성 He 원자)를 검출하는데 사용될 수 있다. 통상적으로, 반전 플레이트는, 입사 이온 또는 원자에 의해 충돌되었을 때 높은 이차 전자 수율을 갖는 얇은 호일 재료(thin foil material)로부터 형성될 수 있다. 그러한 재료의 일례가 백금이다. 이차 전자 수율은, 예를 들어, 검출기(150 및/또는 160)(도 1 및 도 5)로서 구성된 적합한 전자 검출기에 의해 쉽게 검출되는 이차 전자의 도수를 발생시킨다.

[0246] (v) 채널트론 검출기(Channeltron Detectors)

[0247] 채널트론 검출기도 샘플(180)을 떠나는 전자, 이온 및 중성 원자와 같은 입자를 검출하는데 사용될 수 있다. 채널트론 검출기는 마이크로 채널 플레이트 검출기와 관련하여 설명된 것과 유사한 방식으로 다중 내부 충돌을 통해 입자 신호를 증폭하는 것에 의해 동작한다. 샘플(180)로부터의 비교적 약한 이차 전자, 이온, 또는 중성 원자 플럭스의 측정은 (예를 들어, 전자 제어 시스템(170)을 사용해) 채널트론 검출기에 의해 출력되는 증폭된 입자 신호를 측정하는 것에 의해 가능하다. 샘플(180)로부터의 이차 전자를 측정할 때, 채널트론 검출기는 도 1 및 도 5에서의 검출기(150) 및/또는 검출기(160)를 위해 묘사된 것과 유사한 위치에 배치될 수 있다. 통상적으로, 샘플(180)로부터의 이온 및/또는 중성 입자의 측정을 위해, 채널트론 검출기는 도 1 및 도 5에서 묘사된 검출기(150)의 위치 및/또는 검출기(160)의 위치와 유사한 위치에 배치된다.

[0248] (vi) 형광체 검출기

[0249] 투명 기판상에 증착된 형광체 재료의 얇은 층을 포함하는 형광체 기반 검출기 및, CCD 카메라, PMT, 또는 하나 이상의 다이오드와 같은, 광자 검출기가 샘플(180)로부터의 전자, 이온 및/또는 중성 입자를 검출하는데 사용될 수 있다. 입자는, 형광체로부터, 광자 검출기에 의해 검출되는, 광자의 방사를 유도하면서, 형광체층과 충돌한다. 형광체 기반 검출기는, 측정되는 입자의 유형에 따라, 도 1 및 도 5에서 묘사된 검출기(150) 및/또는 검출기(160)의 위치와 유사한 위치로 정렬될 수 있다(상기의 논의 참고하기).

[0250] (vii) 반도체(solid state) 검출기

[0251] 반도체 검출기가 샘플(180)로부터의 이차 전자, 이온, 및/또는 중성 원자를 검출하는데 사용될 수 있다. 반도체 검출기는 실리콘 또는 도핑된 실리콘 재료와 같은 재료로 형성된 센서로부터 구성될 수 있다. 입사 입자가 센서와 충돌할 때, 센서 재료에서 전자-홀 쌍이 생성되면서, 전자 제어 시스템(170)에 의해 검출될 수 있는 전류를 발생시킨다. 입사 입자에 의해 발생되는 전자-홀 쌍의 수 및 그에 따라 발생되는 전류의 대응되는 크기는 부분적으로 입자의 에너지에 의존한다. 그에 따라, 반도체 검출기는 입자의 에너지 측정에 특히 유용할 수 있는데, 이는, 샘플(180)로부터 높은 에너지 입자(예를 들어, 산란 He 이온 및 중성 He 원자)를 검출할 때 특히 유용할 수 있다.

[0252] (viii) 신틸레이터 검출기

[0253] 형광체 기반 검출기와 유사하게, 신틸레이터 기반 검출기는, 입사 입자(전자, 이온, 또는 중성 원자)에 의해 충돌되는 것에 응답하여 광자를 발생시키는 신틸레이터 재료를 포함한다. 적당한 신틸레이터 재료로는, 예를 들어, YAG 및 YAP를 들 수 있다. 신틸레이터 기반 검출기에서의 광자 수율은 입사 입자의 에너지에 의존한다. 결과적으로, 신틸레이터 검출기는 입자의 에너지 측정에 특히 유용할 수 있는데, 이는, 샘플(180)로부터 높은 에너지 입자(예를 들어, 산란 He 이온 및 중성 He 원자)를 검출할 때 특히 유용할 수 있다.

[0254] (ix) 이온용 에너지 검출기

[0255] 샘플(180)로부터의 이온(예를 들어, 산란 He 이온)의 에너지를 측정하기 위해 다양하고 상이한 검출기 및 검출 방식이 구현될 수 있다. 편향량이 이온의 에너지에 의존하는, 전기 및/또는 자기 필드가 입사 이온을 편향시키는데 사용되는, 정전기 프리즘 검출기가 상이한 에너지의 이온을 공간적으로 분리하는데 사용될 수 있다. 자기 프리즘 검출기도 이온의 에너지에 기초해 이온을 공간적으로 분리하는데 사용될 수 있다. 그 다음, 앞서 논의된 적당한 검출기(예를 들어, 마이크로 채널 플레이트, 채널트론, 및 다른 것) 중 어떤 것이라도 편향된 이온을 검출하는데 사용될 수 있다.

[0256] 사중극자 검출기도 샘플(180)로부터의 이온의 에너지를 분석하는데 사용될 수 있다. 사중극자 검출기에서, 사중극자내의 RF(radio-frequency) 필드는, 선택된 질량 및 에너지를 가진 이온은 사중극자내의 편향되지 않은 직선 궤적을 따라 전파한다는 것을 보장한다. 상이한 질량 및/또는 에너지의 이온은 사중극자내의 곡선 궤적을 따라 전파한다. 사중극자 분석기내의 이온의 편향된 위치로부터, 이온의 에너지가 판정될 수 있다.

[0257] 일부 실시예에서, 이온 에너지는 양으로 바이어스된 입자 선택기(예를 들어, 전기 전도성 재료의 스크린이나 망, 또는 원통형 금속 관 또는 링)를 이온의 비행 경로를 따라 검출기 앞에 배치하는 것에 의해 판정될 수 있다. 입자 선택기(601)에 인가되는 전위의 크기가 처음에는 아주 높을 수 있고(예를 들어, 샘플(180)로부터의 이온이 그것을 통과하는 것을 방지하기에 확실한 값일 수 있고), 전위의 크기는, 적합한 검출기(앞서의 논의 참고하기)를 사용해 이온을 검출하면서, 감소될 수 있다. 검출기에 도달하는 이온의 전류는 입자 선택기에서의 전위 바이어스 크기의 함수로서 이온의 에너지에 관한 정보를 판정하는데 사용될 수 있다.

[0258] (x) 전자용 에너지 검출기

[0259] 샘플(180)로부터의 전자(예를 들어, 이차 전자)의 에너지를 측정하기 위한 다양하고 상이한 검출기 및 검출 방식이 구현될 수 있다. 전기 및/또는 자기 필드가 입사 전자를 편향시키는데 사용되는 그리고 편향의 양이 전자의 에너지에 의존하는 프리즘 검출기가 상이한 에너지의 전자를 공간적으로 분리하는데 사용될 수 있다. 그 다음, 앞서 논의된 적당한 검출기 중 어떤 것이라도 편향된 전자를 검출하는데 사용될 수 있다.

[0260] 일부 실시예에서, 전자 에너지는 음으로 바이어스된 입자 선택기(예를 들어, 전기 전도성 재료의 스크린이나 망 또는 원통형 금속 관이나 링)를 전자의 비행 경로를 따라 검출기 앞에 배치하는 것에 의해 판정될 수 있다. 입자 선택기의 전위의 크기가 처음에는 아주 높을 수 있고(예를 들어, 샘플(180)로부터의 전자가 그것을 통과하는 것을 방지하기에 확실한 값일 수 있고), 전위의 크기는, 적합한 검출기(앞서의 논의 참고하기)를 사용해 전자를 검출하면서, 감소될 수 있다. 검출기에 도달하는 전자 전류는 입자 선택기에서의 인가 전위의 크기의 함수로서 전자의 에너지에 관한 정보를 판정하는데 사용될 수 있다.

[0261] (xi) 비행시간(Time-of-Flight) 검출기

[0262] 앞서 개시된 검출기는 이차 전자, 이온, 및 중성 원자에 대한 비행시간 정보를 측정하도록 구성될 수도 있다. 비행시간 검출을 수행하기 위해, 이온 빔(192)은 펄스 모드에서 동작된다. 이온 빔(192)은, 예를 들어, 편향기(220 및 222) 중 하나 또는 양자의 편향기(220 및 222)에 인가되는 전위를 빠르게 변화시키는 것에 의해 펄스화될 수 있다. 예를 들어, 이러한 전위를 증가시키는 것에 의해, 이온 빔(192)은 이온 광학계(130)에서의 그것의 평소 경로로부터 전환될 수 있고, 그에 따라, 이온 빔(192)은 간극(224)에 의해 일시적으로 차단된다. 그 다음, 편향기(220 및 222)의 전위가 다시 증가되기 이전의 짧은 시간 동안 그것의 정상 값으로 복귀되면, He 이온의 펄스가 샘플(180)쪽으로 전달될 수 있다.

[0263] 동시에, 검출기(150 및 160)는, 편향기(220 및/또는 222)에 인가되는 전위의 시간적 변화에 기초하는 전자 제어 시스템(170)으로부터의 클록 신호에 동기화될 수 있다. 결과적으로, He 이온 펄스의 입사와 샘플(180)로부터의 입자 검출 사이의 시구간이 정확하게 측정될 수 있다. He 이온 펄스의 이온 광학계(130)내에서의 전파 시간에 관한 공지 정보로부터, 검출 입자의 샘플(180)과 검출기(150 및/또는 160) 사이의 비행시간이 판정될 수 있다.

[0264] (xii) 각도 의존 측정

[0265] 샘플(180)로부터의 입자에 대한 상대 도수 및 에너지를 측정하는 이외에, 앞서 개시된 검출기를 사용해 각도 의존 산란 정보가 획득될 수 있다. 통상적으로, 각도 의존 정보를 획득하기 위해, 검출기는 샘플(180)에 관한 입체각의 범위 전체에 걸쳐 검출기의 이동을 허용하는 마운트(예를 들어, 스위블 마운트)에 부착된다. 특정한 입체각에 대응되는 샘플(180)에 관한 소정 방향에서, 입자의 도수 및/또는 에너지 측정이 기록된다. 검출기는 상이한 입체각에서 순차적으로 재배치되고, 측정량의 각도 의존성을 판정하기 위해 측정이 반복된다. 일부 실시예에서, 핀홀(pinhole)과 같은 제한 간극(limiting aperture)이 산란 입자 경로에서의 검출기 앞쪽에 배치되어, 샘플(180)로부터의 입자 측정이 발생하는 각도 범위를 추가적으로 제한할 수 있다.

[0266] *G. 동작 파라미터*

[0267] 이온 빔(192)은 샘플(180)의 표면(181)에서 비교적 작은 스폿 사이즈를 가질 수 있다. 예를 들어, 일부 실시예에서, 샘플(180) 표면(181)에서의 이온 빔(192)의 스폿 사이즈는 10 nm 이하(예를 들어, 9 nm 이하, 8 nm 이하, 7 nm 이하, 6 nm 이하, 5 nm 이하, 4 nm 이하, 3 nm 이하, 2 nmn 이하, 1 nm 이하)의 치수를 가질 수 있다. 소정 실시예에서, 샘플(180) 표면(181)에서의 이온 빔(192)의 스폿 사이즈는 0.05 nm 이상(예를 들어, 0.1 nm 이상, 0.2 nm 이상, 0.25 nm 이상, 0.5 nm 이상, 0.75 nm 이상, 1 nm 이상, 2 nm 이상, 3 nm 이상)의 치수를 가진다. 일부 실시예에서, 표면(181)에서의 이온 빔(192)의 스폿 사이즈는 0.05 nm에서 10 nm(예를 들어, 0.1 nm에서 10 nm, 0.2 nm 내지 10 nm, 0.25 nm 내지 3 nm, 0.25 nm 내지 1 nm, 0.1 nm 내지 0.5 nm, 0.1 nm 내지 0.2 nm)의 치수를 가진다. 여기에서 사용되는 바와 같이, 스폿 사이즈는 도 20A-도 20C를 참조하여 다음과 같이 판정된다. 금으로 형성된 그리고 50 nm에서 2000 nm의 치수를 가진 섬(1700)이 탄소 표면(1710)에 배치된다. 금 섬은, 예를 들어, 탄소 표면으로의 금 증착에 의해 형성된다. 탄소 위에 증착된 금 섬을 포함하는, 여기에서 설명되는 해상도 측정에 적당한, 측정 샘플은, 예를 들어, Structure Probe Inc.(West Chester, PA)로부터 상업적으로 입수 가능하다. 이온 현미경은, 그것이 이온 빔(192)을 금 섬의 일부분 뿐만 아니라 금 섬의 한쪽면상의 탄소 표면의 일부분을 가로질러 선형(화살표 1730)으로 이동시키도록 동작된다. 이차 전자의 밀도는 이온 빔의 위치의 함수로서 측정된다(도 20C). 탄소 및 금을 위한 평균 총 도수 값에 대응되는 점근선(1740 및 1750)이 계산되고(또는 그려지고), 총 도수가, 점근선(1740 및 1750) 사이의 도수 차이의, 각각, 25% 및 75%인 위치에 대응되는 수직선(1760 및 1770)이 계산된다(또는 그려진다). 이온 현미경(200)의 스폿 사이즈는 라인(1760 및 1770) 사이의 거리이다.

[0268] 일반적으로, 샘플(180) 표면(181)에서의 이온 빔(192)의 전류는 1 nA 이하(예를 들어, 100 pA 이하, 50 pA 이하) 및/또는 0.1 fA 이상(예를 들어, 1 fA 이상, 10 fA 이상, 50 f A 이상, 100 fA 이상, 1 pA 이상, 10 pA 이상)이다. 예를 들어, 일부 실시예에서, 샘플(180) 표면(181)에서의 이온 빔(192)의 전류는 0.1 fA에서 1 nA(예를 들어, 10 fA에서 100 pA, 100 fA에서 50 pA)이다. 소정 실시예에서는, 샘플을 영상화할 때, 비교적 낮은 빔 전류를 사용하는 것이 바람직스러울 수 있다. 예를 들어, 일부 생물학 및/또는 약학 애플리케이션에서는, (예를 들어, 샘플에 대한 가능한 손상을 감소시키기 위해) 샘플에서의 영상화에 낮은 전류를 사용하는 것이 좀더 중요할 수 있다. 그러한 실시예에서, 일 전류(예를 들어, 10 fA 이상의 전류)는 가스 필드 이온 현미경을 사용을 위해 준비시키는데 사용될 수 있고, 상이한 전류(예를 들어, 0.1 fA와 같은, 1 fA 미만의 전류)는 샘플을 영상화하는데 사용될 수 있다.

[0269] 일반적으로, 이온 빔(192)은 샘플(180)의 표면(181)에서 5 eV 이하(예를 들어, 4 eV 이하, 3 eV 이하, 2 eV 이하, 1 eV 이하, 0.5 eV 이하)의 에너지 확산(energy spread)을 가진다. 일부 실시예에서, 이온 빔(192)은 샘플(180)의 표면(181)에서 0.1 eV 이상(예를 들어, 0.2 eV 이상, 0.3 eV 이상, 0.4 eV 이상)의 에너지 확산을 가진다. 예를 들어, 이온 빔(192)은 샘플(180)의 표면(181)에서 0.1 eV에서 5 eV(예를 들어, 0.1 eV에서 3 eV, 0.1 eV에서 1 eV)의 에너지 확산을 가질 수 있다.

[0270] 이온 빔(192)은 샘플(180)의 표면(181)에서 비교적 높은 밝기를 가질 수 있다. 예를 들어, 이온 빔(192)은 샘플(180)의 표면(181)에서 $1x10^{9}$ $A/cm^{2}sr$(예를 들어, $1x10^{10}$ $A/cm^{2}sr$ 이상, $1x10^{11}$ $A/cm^{2}sr$ 이상)의 밝기를 가질 수 있다. 일부 실시예에서, 밝기는 팁(186)에 근접한 가스 압력을 증가시키는 것 그리고/또는 팁(186)의 온도를 감소시키는 것에 의해 증가될 수 있다. 여기에서 참조되는 바와 같이, 이온 빔의 밝기는 다음과 같이 측정된다. 이온 빔(192)에서의 - 네트 전기 필드(net electric field)가 비교적 작고 이온 궤적이 거의 직선인, 추출기(190)와 제1 렌즈(216) 사이의 공간 영역에서 - 이온 궤적의 분포에 대한 FWHM가 x 및 y 방향 양자에서 판정된다. x 및 y 방향 양자에서의 FWHM 폭내에 해당되는 총 100개의 이온 궤적이 이온 빔(192)에서의 이온 궤적의 분포로부터 무작위로 선택된다. 100개 이온 궤적 각각은 거의 직선이고, 팁 선단(187)을 향해 역으로 프로젝션된다. x-y 평면에 평행한 평면(Z_t)에서 포인트(z_t)를 통과하는, 평면(Z_t)과 역으로 프로젝션된 궤적의 교차

점 모두를 둘러싸는 최소 지름의 원을 구성하는 것에 의해, z-축상의 특정 포인트(z_t)에서의 궤적의 공간 범위가 평가된다. 최소 지름 원의 지름은 d_s이다. 통상적으로, 포인트(z_t)가 팁 선단(187)에 가까울수록, d_s는 작아질 것이고, 포인트(z_t)가 샘플(180)에 가까울수록, d_s는 커질 것이다. 특정 포인트($z_t = z_0$)에서, d_s는 최소값(d_o)일 것이다. 다시 말해, x-y 평면에 평행한 평면에서의 궤적의 공간 범위가 최소일 것이다. 포인트(z_0)에서의 최소 지름 원의 지름(d_o)을 현미경 시스템(200)의 가상 소스 사이즈라고 한다. 다음으로는, 추출기(190)와 제1 렌즈(216) 사이의 이온 빔(192)의 FWHM 영역에서의 이온 빔(192)의 발산 및 빔 전류가, 앞서 논의된 바와 같이, 측정된다. 마지막으로, 이온 빔(192)의 가상 소스 사이즈와 발산 입체각의 곱으로 나누어진 빔 전류로서 밝기가 계산된다.

[0271] 이온 빔(192)은 샘플(180)의 표면(181)에서 비교적 크게 감소된 밝기를 가질 수 있다. 예를 들어, 이온 빔(192)은 샘플(180)의 표면(181)에서 $5x10^8$ A/m^{2}srV 이상(예를 들어, $1x10^9$ A/cm^{2}srV 이상, $1x10^{10}$ A/cm^{2}srV 이상)의 감소된 밝기를 가질 수 있다. 여기에서 참조되는 바와 같이, 이온 빔의 감소된 밝기는, 빔 전류가 측정되는 위치의 이온 빔에서의 이온의 평균 에너지로 나누어진 이온 빔의 밝기이다.

[0272] 이온 빔(192)은 추출기(190)의 말단 끝(193)에서 비교적 낮은 에텐듀를 가질 수 있다. 예를 들어, 이온 빔(192)은 추출기(190)의 말단 끝(193)에서 $5x10^{-21}$ cm^{2}sr 이하(예를 들어, $1x10^{-22}$ cm^{2}sr 이하, $1x10^{-23}$ cm^{2}sr 이하, $1x10^{-24}$ cm^{2}sr 이하)의 에텐듀를 가질 수 있다. 여기에서 참조되는 바와 같이, 이온 빔의 에텐듀는 밝기의 역수와 빔 전류의 수학적 곱으로서 계산된다.

[0273] 이온 빔(192)은 추출기(190)의 말단 끝(193)에서 비교적 적게 감소된 에텐듀를 가질 수 있다. 예를 들어, 이온 빔(192)은 추출기(190)의 말단 끝(193)에서 $1x10^{-16}$ cm^{2}sr 이하(예를 들어, $1x10^{-17}$ cm^{2}sr 이하, $1x10^{-18}$ cm^{2}sr 이하, $1x10^{-19}$ cm^{2}sr 이하)의 감소된 에텐듀를 가질 수 있다. 이온 빔의 감소된 에텐듀는, 빔 전류가 측정되는 위치의 이온 빔에서의 이온의 평균에너지-대-전하의 비와 이온 빔의 에텐듀의 수학적 곱이다.

[0274] 이온 빔(192)은 샘플(180)의 표면(181)에 대하여 비교적 낮은 각도 수렴(angular convergence)을 가질 수 있다. 예를 들어, 일부 실시예에서, 이온 빔의 수렴 절반각(convergence half angle)은 5 mrad 이하(예를 들어, 1 mrad 이하, 0.5 mrad 이하, 0.1 mrad 이하) 및/또는 0.05 mrad 이상일 수 있다. 여기에서 참조되는 바와 같이, 이온 빔의 수렴 절반각은 다음과 같이 판정된다. 앞서 설명된 바와 같이, 탄소 기판상에 금 섬을 포함하는 샘플이 이온 현미경(200)에 장착되고, 이온 빔(192)의 초점 위치가 금 섬의 지름에 따른 최고 상승점에 가능한 가깝게 위치하도록 z 방향으로 병진된다. 그 다음, 이온 빔(192)은, 상술된 바와 같이, 금 섬의 지름을 따라 선형으로 병진되고, 이온 빔의 포커싱된 스폿 사이즈(s_f)가 측정된다. 그 다음, 샘플은, 이온 빔(192)의 디포커싱된 스폿 사이즈(s_d)를 측정하기 위해, s_z = 1 μm만큼 이온 광학계(130)로부터 멀어지는 +z 방향으로 병진되고, 이온 빔(192)은 금 섬의 동일한 지름을 따라 선형으로 병진된다. 다음으로는, 병진 거리와 함께, 포커싱된 스폿 사이즈 및 디포커싱된 스폿 사이즈의 측정으로부터, 다음의 수학식 1과 같이, 수렴 각(η)이 판정될 수 있다.

수학식 1

[0275]
$$\eta = 2\sin^{-1}\left(\frac{s_d - s_f}{2s_z}\right)$$

[0276] 이온 현미경(200)의 수렴 절반각은 $\eta/2$이다.

[0277] 이온 현미경(200)은 상당히 신뢰 가능할 수 있다. 일례로서, 일부 실시예에서, He 이온 소스(팁(186), 추출기(190) 및 선택적인 억제기(188))는, 시스템으로부터 팁(186)을 제거하지 않으면서, 가스 원자와 계속적으로 상호 작용하여 1 주 이상(예를 들어, 2 주 이상, 1 달 이상, 2 달 이상)의 시주기 동안 이온 빔을 발생시킬 수 있다. 일부 실시예에서는, He 이온 소스가 가스 원자와 계속적으로 상호 작용하여 이온 빔을 발생시키는 시주기 동안, 샘플(180) 표면(181)에서의 이온 빔(192) 전류는 매 분마다 10% 이하(예를 들어, 5% 이하, 1 % 이하)만큼

달라진다.

[0278] 다른 일례로서, 일부 실시예에서, 가스 필드 이온 소스(팁(186), 추출기(190) 및 선택적인 억제기(188))는, 총 중단 시간이 10 시간 이하(예를 들어, 5 시간 이하, 2 시간 이하, 1 시간 이하)인 상태에서, 가스 원자와 상호 작용하여 1 주 이상(예를 들어, 2 주 이상, 1 달 이상, 2 달 이상)의 시주기 동안 이온 빔을 발생시킬 수 있다. 그러한 실시예에서, 가스 필드 이온 소스는 (0 시간의 총 중단 시간에 대응되는) 전체 시주기 동안 계속적으로 가스 원자와 상호 작용하여 이온 빔을 발생시킬 수도 있지만, 그럴 필요는 없다. 예를 들어, 시주기 동안, 가스 필드 이온 현미경이 이온 빔을 발생시키기 위해 가스 원자와 상호 작용하지 않는 시점이 존재할 수도 있다. 그러한 시주기는 중단 시간에 대응된다. 시주기 동안, 그러한 중단 시간은 1 회 이상(예를 들어, 2 회, 3 회, 4 회, 5 회, 6 회, 7 회, 8 회, 9 회, 10 회) 발생할 수도 있다. 중단은, 예를 들어, 계획된 유지 보수 및/또는 교대 사이의 작업 중단 시간(예를 들어, 밤샘 작업 중단 시간) 때문일 수도 있다. 시주기 동안, 중단 시간의 합계가 총 중단 시간이다. 일례로서, 시주기 동안, 각각 1 시간씩, 3 번의 중단 시간이 존재한다면, 총 중단 시간은 3 시간이다. 다른 일례로서, 시주기 동안, 단 한번의 중단 시간이 존재하고 그것의 길이가 3 시간이라면, 총 중단 시간은 3 시간이다. 추가 일례로서, 시주기 동안, 제1 중단 시간은 1 시간이고 제2 중단 시간은 2 시간인 상태로, 2 번의 중단 시간이 존재한다면, 총 중단 시간은 3 시간이다. 일부 실시예에서, 가스 필드 이온 소스가 가스 원자와 상호 작용하여 이온 빔을 발생시키는 시주기 동안의 그러한 시점 동안, 샘플(180) 표면(181)에서의 이온 빔(192)의 전류는 매 분마다 10% 이하(예를 들어, 5% 이하, 1% 이하)만큼 달라진다.

[0279] 이온 현미경(200)은 비교적 양호한 해상도를 가질 수 있다. 예를 들어, 일부 실시예에서, 이온 현미경(200)의 해상도는 10 nm 이하(예를 들어, 9 nm 이하, 8 nm 이하, 7 nm 이하, 6 nm 이하, 5 nm 이하, 4 nm 이하, 3 nm 이하, 2 nm 이하, 1 nm 이하)일 수 있다. 소정 실시예에서, 이온 현미경(200)의 해상도는 0.05 nm 이상(예를 들어, 0.1 nm 이상, 0.2 nm 이상, 0.25 nm 이상, 0.5 nm 이상, 0.75 nm 이상, 1 nm 이상, 2 nm 이상, 3 nm 이상)일 수 있다. 일부 실시예에서, 이온 현미경(200)의 해상도는 0.05 nm에서 10 nm(예를 들어, 0.1 nm에서 10 nm, 0.2 nm 내지 10 nm, 0.25 nm 내지 3 nm, 0.25 nm 내지 1 nm, 0.1 nm 내지 0.5 nm, 0.1 nm 내지 0.2 nm)일 수 있다. 여기에서 사용되는 바와 같이, 이온 빔의 해상도는, 이온 현미경을 사용해 획득되는 이미지로부터 신뢰 가능하게 측정될 수 있는 최소 사양의 사이즈를 의미한다. 유사한 조건에서 획득되는 사양의 10개 이미지로부터 측정된 사이즈의 표준 편이가 사양의 실제 사이즈의 5% 미만인 상태에서, 사양의 사이즈가 사양의 실제 사이즈에 대한 10% 이하의 오차 이내로 판정될 수 있다면, 사양의 사이즈는 신뢰 가능하게 측정된다.

[0280] 이온 현미경(200)은 비교적 짧은 시주기내에 양호한 품질의 이미지를 촬영하는데 사용될 수 있다. 예를 들어, 이온 현미경(200)은 0.25 이상(예를 들어, 0.5 이상, 0.75 이상, 1 이상, 1.5 이상, 2 이상)의 품질 팩터를 가질 수 있다. 여기에서 참조되는 바와 같이, 품질 팩터는 다음과 같이 판정된다. 1/2은 실리콘(Si)으로 형성되고 나머지 1/2은 구리(Cu)로 형성되며, 재료 사이의 경계는 샘플을 가로지르는 직선 상태인 평면 샘플이, 경계가 y 축과 평행이도록 배향된다. 샘플은 샘플의 표면을 512개 픽셀 대 512개 픽셀의 x-y 어레이로 세분하는 것에 의해 픽셀 기반으로 영상화된다. 측정하는 동안 매 픽셀당 지속 시간(dwell time)은 100 ns이다. 샘플로부터의 이차 전자의 총 도수는 샘플 표면에서의 이온 빔의 위치의 함수로서 측정된다. 샘플에서의 Si에 대응되는 이미지 픽셀에 대해, Si 픽셀 밀도 분포로부터의 표준 편이(SD_1)와 함께, 평균 픽셀 밀도(G_1)가 판정된다. 샘플에서의 Cu에 대응되는 이미지 픽셀에 대해, Cu 픽셀 밀도 분포로부터의 표준 편이(SD_2)와 함께, 평균 픽셀 밀도(G_2)가 판정된다. 품질 팩터는 다음의 수학식 2에 따라 계산된다.

수학식 2

[0281]
$$\frac{G_1 - G_2}{\sqrt{SD_1 \cdot SD_2}}$$

[0282] 샘플(180)의 표면(181)은, 이온 빔(192)에 노출될 때, 비교적 작은 손상을 겪을 수 있다. 예를 들어, 샘플(180)의 표면(181)은 손상 테스트에 따른 25 nm 이하(예를 들어, 20 nm 이하, 15 nm 이하, 10 nm 이하, 5 nm 이하)의 값을 가질 수 있다. 여기에서 참조되는 바와 같이, 손상 테스트는 다음과 같이 수행된다. 4 μm^2 FOV(field of view)의 원자적으로 평평한 실리콘(atomically flat silicon)(99.99% 순도) 샘플이, 샘플에서의 10 pA의 이온 빔 전류 및 샘플에서의 10 nm 이하의 이온 빔 스폿 사이즈를 사용해 픽셀 기반으로 샘플 표면을

가로질러 이온 빔을 래스터링하면서, 120 초 동안 영상화된다. 4 μm^2 FOV는 래스터링 목적을 위해 512개 픽셀 대 512개 픽셀 어레이로 분해된다. 손상 테스트의 값은 손상 테스트를 수행하는 것으로부터 초래되는 실리콘 샘플의 영상화된 부분으로의 최대 에칭 거리에 대응된다.

[0283] 이온 현미경(200)은 비교적 큰 초점 깊이를 가질 수 있다. 예를 들어, 일부 실시예에서, 이온 현미경(200)의 초점 깊이는 5 nm 이상(예를 들어, 10 nm 이상, 100nm 이상, 1 μm 이상) 및/또는 200 μm 이하(예를 들어, 100 μm 이하, 10 μm 이하)일 수 있다. 일부 실시예에서, 이온 현미경(200)의 초점 깊이는 200 μm에서 5 nm (예를 들어, 500 μm에서 5 nm, 1 mm에서 5 nm)일 수 있다. 여기에서 사용되는 바와 같이, 이온 빔의 초점 깊이는 다음 방식으로 측정된다. (He 이온 빔 스폿 사이즈의 측정과 관련하여 앞서 논의된 바와 같이) 탄소 기판 상에 형성된 금 섬을 포함하는 샘플이 He 이온 현미경에 삽입되고, He 이온 빔 스폿 사이즈의 측정이 앞서 논의된 바와 같이 수행된다. z 축상의 샘플 위치는, 최소의 He 이온 빔 스폿 사이즈를 산출하는 샘플 위치가 판정되도록 반복하여 조정된다. z 축상의 이 위치는 z_f로 지시된다. z_f에서의 He 이온 빔의 스폿 사이즈는 ss_f로 지시된다. 그 다음, 샘플은 z_f에 대하여 -z 방향을 따라 증분적으로 병진된다. 점진적 병진 이후에 (z_f를 판정하는데 사용된 것과 동일한 샘플 위치에서) He 이온 빔의 스폿 사이즈 측정이 수행된다. 샘플의 병진은, 측정된 He 이온 빔 스폿 사이즈가 $2ss_f$일 때 중단된다. z 축상의 샘플의 이 위치는 z_u로 지시된다. 그 다음, 샘플은 z_u에 대하여 +z 방향을 따라 그리고 포인트(z_f)를 통해 증분적으로 병진된다. 연속적인 점진적 병진 이후에 (z_f를 판정하는데 사용된 것과 동일한 샘플 위치에서) He 이온 빔의 스폿 사이즈 측정이 수행된다. 측정된 He 이온 빔 스폿 사이즈가 $2ss_f$일 때, 샘플의 병진은 중단된다. z 축상의 샘플의 이 위치는 z_l로 지시된다. He 이온 현미경의 초점 깊이(d_f)는 $d_f = |z_l - z_u|$로서 계산된다.

[0284] 일부 실시예에서는, 여기에서 개시된 바와 같은 가스 필드 이온 현미경(예를 들어, He 이온 현미경)이, 예를 들어, 이차 전자 수율, 산란 이온 도수, 및/또는 각도- 및 에너지-분해된 산란 이온 검출을 사용해, 아주 근접한 원자수(Z 값)를 가진 샘플에서의 원소를 구별하는데 사용될 수 있다. 예를 들어, 소정 실시예에서, 가스 필드 이온 현미경은 단지 1만큼 상이한 원자수(Z 값)를 가진 원소를 구별하는데 사용될 수 있다.

[0285] 소정 실시예에서는, 여기에서 개시된 바와 같은 가스 필드 이온 현미경(예를 들어, He 이온 현미경)이, 예를 들어, 이차 전자 수율, 산란 이온 도수, 및/또는 각도- 및 에너지-분해된 산란 이온 검출을 사용해, 아주 근접한 질량을 가진 샘플에서의 원소를 구별하는데 사용될 수 있다. 소정 실시예에서, 가스 필드 이온 현미경은 1 원자 질량 단위 이하(예를 들어, 0.9 원자 질량 단위 이하, 0.8 원자 질량 단위 이하, 0.7 원자 질량 단위 이하, 0.6 원자 질량 단위 이하, 0.5 원자 질량 단위 이하, 0.4 원자 질량 단위 이하, 0.3 원자 질량 단위 이하, 0.2 원자 질량 단위 이하, 0.1 원자 질량 단위 이하)만큼 상이한 질량을 가진 원소를 구별하는데 사용될 수 있다. 일부 실시예에서, 샘플은 상이한 평균 질량을 가진 재료(예를 들어, 합금)로 형성된 도메인을 가질 수도 있다. 그러한 실시예에서, 가스 필드 이온 현미경은, 예를 들어, 단지 1 원자 질량 단위 이하(예를 들어, 0.9 원자 질량 단위 이하, 0.8 원자 질량 단위 이하, 0.7 원자 질량 단위 이하, 0.6 원자 질량 단위 이하, 0.5 원자 질량 단위 이하, 0.4 원자 질량 단위 이하, 0.3 원자 질량 단위 이하, 0.2 원자 질량 단위 이하, 0.1 원자 질량 단위 이하)만큼 상이한 질량을 가진 재료의 도메인을 구별하는데 사용될 수 있다.

[0286] *H. 선택적 사양*

[0287] (i) 고효율 가스 사용

[0288] 일부 실시예에서, 팁(206)쪽으로의 He 가스의 좀더 포커싱된 전달은 현미경 시스템(200)내에서 He 가스 이용의 효율성을 증가시킬 수 있다. 통상적으로, 비이온화 He 가스 원자가 이온 광학계(130)로 진입할 수 있고, 이는, 이온 빔(192)에서의 이온의 에너지 분포 폭을 증가시킬 수 있다. 그에 더하여, 저에너지의 비이온화 He 가스 원자가 고에너지 He 이온과의 전하 교환 상호 작용에 참여할 수 있는데, 이 또한, 이온 빔(192)에서의 이온의 에너지 분포 폭을 증가시킬 수 있다.

[0289] 그에 따라, 일부 실시예에서, 가스 전달 시스템은 가스 필드 이온 소스(120)의 가스(예를 들어, He 가스)를 팁(186)쪽으로 좀더 타게팅된 방식으로(in a more targeted manner) 제공하도록 그리고 시스템으로부터 미사용 가스(예를 들어, 비이온화 He 가스)를 좀더 효율적인 방식으로 제거하도록 설계될 수 있다. 예를 들어, 도 21은, 가스 소스(110) 및 진공 펌프(734)를 포함하는 가스 필드 이온 현미경의 일부분에 대한 개략도이다. 가스 소스(110)는 전달 노즐(736)에서 종단하는 길이 q 및 지름 n의 전달관(730)을 포함하고, 진공 펌프(734)는 주입구 포트(732)를 포함한다. 노즐(736)은 팁(186)의 선단(187)으로부터 거리 g에 배치되고, 주입구 포트(732)는 팁

(186)의 선단(187)으로부터 거리 l에 배치된다.

[0290] 일부 실시예에서, g는 10 mm 이하(예를 들어, 9 mm 이하, 8 mm 이하, 7 mm 이하)일 수 있다. 통상적으로, g는 3 mm 이상(예를 들어, 4 mm 이상, 5 mm 이상, 6 mm 이상)이다. 예를 들어, g는 3 mm에서 10 mm(예를 들어, 4 mm에서 9 mm, 5 mm에서 8 mm)일 수 있다.

[0291] 소정 실시예에서, l은 100 mm 이하(예를 들어, 90 mm 이하, 80 mm 이하, 70 mm 이하, 60 mm 이하, 50 mm 이하)일 수 있다. 통상적으로, l은 10 mm 이상(예를 들어, 20 mm 이상, 30 mm 이상, 40 mm 이상)이다. 예를 들어, l은 10 mm에서 100 mm(예를 들어, 30 mm에서 100 mm, 40 mm에서 80 mm)일 수 있다.

[0292] 일부 실시예에서, 팁(186)의 선단(187) 위치에서의 He 가스의 로컬 압력(local pressure)은 10^{-5} Torr 이상(예를 들어, 10^{-4} Torr 이상, 10^{-3} Torr 이상, 10^{-2} Torr 이상, 10^{-1} Torr 이상, 1 Torr 이상)이다. 동시에, 현미경 시스템에서의 He 가스의 전체 압력은, He 가스의 배경 도입을 이용하는 시스템에 대하여 감소될 수 있다. 예를 들어, 현미경 시스템(200)에서의 전체 He 압력은 10^{-4} Torr 이하(예를 들어, 10^{-5} Torr 이하, 10^{-6} Torr 이하, 10^{-7} Torr 이하, 10^{-8} Torr 이하)일 수 있다.

[0293] 일부 실시예에서, 주입구 포트(732)의 거리(l) 및 단면적은, 진공 펌프(734)가 현미경 시스템(200)의 특정한 입체각 영역내의 비이온화 He 원자를 캡처하도록 선택된다. 예를 들어, 팁(186)의 선단(187)에 배치된 He 원자를 위해, 주입구 포트(732)에 의해 대면되는 입체각은 5° 이상(예를 들어, 10° 이상, 15° 이상, 20° 이상, 30° 이상, 40° 이상)이다.

[0294] 일반적으로, 전달관(730)의 지름(n)에 대한 관(730) 길이(q)의 비는, 팁(186)쪽으로 전달되는 He 가스 원자의 궤적 분포를 제어하도록 선택될 수 있다. 예를 들어, 일부 실시예에서, 비(q/n)는 3 이상(예를 들어, 4 이상, 5 이상, 6 이상) 및/또는 10 이하(예를 들어, 9 이하, 8 이하, 7 이하)일 수 있다. 소정 실시예에서, 비(q/n)는 3과 10 사이(예를 들어, 3과 9 사이, 4와 9 사이, 4와 8 사이, 5와 8 사이, 5와 7 사이)일 수 있다.

[0295] 일부 실시예에서, 가스 전달 시스템은 하나 이상의 전달관 및 노즐을 포함할 수 있다. 예를 들어, 소정 실시예에서, 가스 전달 시스템은 2개 이상(예를 들어, 3개 이상, 4개 이상, 5개 이상, 6개 이상)의 가스 전달관을 포함할 수 있다. 다중 가스 전달관 각각은, He 가스를 팁(186)쪽으로, 비교적 지향된 방식으로(in a relatively directed fashion), 전달하도록 배치될 수 있다. 다중 가스 전달관을 사용하는 결과로서, 팁(186)의 선단(187) 위치에서의 He 가스의 로컬 압력은 좀더 증가될 수 있다. 하나 이상의 진공 펌프가 현미경 시스템(200)으로부터 비이온화 He 가스를 제거하는데 사용될 수 있다.

[0296] 일부 실시예에서, 가스 전달관(730)은 시스템의 다른 컴포넌트쪽으로 통합될 수 있다. 예를 들어, 소정 실시예에서, 가스 전달관(730)은 추출기(190) 및/또는 억제기(188)에서의 가스 전달을 위한 하나 이상의 통로(예를 들어, 2개 이상의 통로, 4개 이상의 통로, 6개 이상의 통로)로써 형성될 수 있다. 일부 실시예에서, 가스 전달을 위한 하나 이상의 통로(예를 들어, 2개 이상의 통로, 4개 이상의 통로, 6개 이상의 통로)는 탑(186)을 지지하는 포스트(예를 들어, 포스트(522a/b 및 552))로 제공될 수 있다. 일례로서, 소정 실시예에서, 추출기(190)는 팁(186)쪽으로의 가스 전달을 위해 4개 통로를 포함할 수 있다. 통로는, 각 통로의 개구부가 직접적으로 팁(186)과 대면하도록, 추출기(190)의 원주를 따라 동일한 간격으로 방사상으로 정렬될 수 있다. 통로 각각의 지름대 길이 비는 동일하거나 상이할 수 있다.

[0297] 가스 전달관을 현미경 시스템(200)의 다른 소자쪽으로 통합하는 것에 의해 다수 이점이 실현될 수 있다. 예를 들어, 팁(186)에 인접하게 배치된 금속관(730)을 가스 전달에 사용하는 것은 팁(186) 부근의 전기 필드를 교란시킬 수 있다. 현미경 시스템의 다른 소자쪽으로의 가스 전달관의 통합은 그러한 교란을 제거할 수 있다. 다른 일례로서, 팁(186) 부근에서의 공간 영역은 통상적으로 현미경 시스템(200)의 동작을 위한 전극 및 다른 디바이스로 채워진다. 가스 전달관(730)을 시스템의 다른 소자쪽으로 통합하는 것에 의해, 팁(186) 부근의 번잡함이 감소될 수 있다.

[0298] 일부 실시예에서, 전달관(730)을 통해 전달되는 He 가스는, 그것이 현미경 시스템(200)에 진입할 때 팁(186)의 동작 온도와 근접하도록, 사전 냉각될 수 있다. 예를 들어, 전달관(730)의 일부분은, 팁(186)을 냉각시키는데 사용되는 냉각제(예를 들어, 액체 질소)의 저장기와 접촉하도록 배치될 수 있다. 이러한 열 접촉의 결과로서, 관(730)을 통해 이동하는 He 가스는, 팁(186)이 배치되어 있는 챔버쪽으로 도입되기 전에, 거의 팁(186)과 동일한 온도로 냉각된다.

[0299] (ii) 표면 전하 중화

[0300] 일반적으로, He 이온이 샘플 표면에 입사될 때, 이차 전자가 샘플을 떠난다. 궁극적으로 양전하를 가진 표면을 초래하면서, 다수의 이차 전자가 샘플을 떠난다. 샘플 표면에서의 과도한 양전하는 다수의 바람직스럽지 못한 효과를 발생시킬 수 있다. 일부 실시예에서는, 샘플의 재료가 양전하에 의해 손상될 수 있다. 예를 들어, 소정 재료는 전하에 민감하고, 과도한 양(또는 음)전하의 존재시에 격렬하게 반응(예를 들어, 폭발)할 수 있다.

[0301] 소정 실시예에서, 샘플의 표면을 양으로 하전하는 것은, 샘플과 이온 빔의 상호 작용으로 인해 샘플을 떠나는 이차 전자를 검출하는 검출기의 능력을 제한할 수 있다. 예를 들어, 샘플 표면에서의 양전하와 이차 전자 사이의 인력은 전자를 감속하여, 전자가 검출기에 도달하는 것을 방해할 수 있다.

[0302] 일부 실시예에서, 샘플 표면을 양으로 하전하는 것은 부정확한 이온 빔 래스터링을 발생시킬 수 있다. 샘플 표면에서의 양전하에 의해 생성되는 전기 필드의 결과로서 입사 이온 빔의 편향 및 감속은 입사 이온의 에너지를 감소시킬 수 있고 예측하기 어려운 방식으로 입사 이온의 궤적을 변경할 수 있다.

[0303] 샘플 표면에서의 궁극적인 양전하가 충분히 커지면, 샘플 표면은 He 이온을 위한 정전기 거울(electrostatic mirror)로서 동작하여, He 이온이 샘플 표면에 도달하기 전에, He 이온을 샘플 표면으로부터 멀어지는 방향으로 편향시킬 수 있다.

[0304] 전자의 플럭스를 샘플 표면쪽으로 전달할 수 있는 플루드 건(flood gun)이 표면 하전 효과를 상쇄시키는데 사용될 수 있다. 도 22는, He 이온 빔(192)이 표면(181)에 입사하는 동안, 전자 빔(842)을 샘플(180)의 표면(181)쪽으로 전달하도록 구성된 플루드 건(840)을 포함하는 가스 필드 이온 현미경의 일부분을 나타낸다. 표면(181)에서의 전자 플럭스는, 일반적으로, 원하는 정도까지 표면 하전 효과가 전자 빔(842)에 의해 상쇄되도록 제어될 수 있다.

[0305] 도 22는 샘플(180)의 표면(181)에서 동시에 충돌하는 이온 빔(192)과 전자 빔(842)을 묘사하지만, 다른 접근 방법이 사용될 수도 있다. 예를 들어, 플루드 건(840)은, 표면(181)을 He 이온 빔(192)에 노출시키기 전에, 전자 빔(842)을 샘플(180)쪽으로 전달하여 샘플(180)의 표면 아래 영역에 전하층(846)을 생성하도록 구성될 수 있다(도 23). 층(846)은 표면(181) 아래쪽으로 평균 깊이(m)를 갖고, 층(846)은 표면(181)에 대한 법선 방향으로 측정된 두께(r)를 가진다. 일반적으로, 깊이(m) 및 두께(r) 뿐만 아니라 층(846)에서의 전자 밀도는 전자 빔(842)에서의 전자의 에너지, 표면(181)에 관한 전자 빔(842)에서의 전자의 입사각, 및 샘플(180)쪽으로 전달되는 전자의 총 조사량(total dosage)에 의해 제어될 수 있다.

[0306] 일부 실시예에서는, 전자 빔(842)에서의 전자의 평균 에너지가, 표면(181)에 입사될 때, 조정 가능하다. 예를 들어, 전자의 평균 에너지는 500 eV 이상(예를 들어, 1 keV 이상, 2 keV 이상) 및/또는 20 keV 이하(예를 들어, 15 keV 이하, 10 keV 이하)일 수 있다. 예를 들어, 표면(181)에 입사될 때, 전자 빔(842)에서의 전자의 평균 에너지는 500 eV에서 20 keV(예를 들어, 1 keV에서 15 keV, 2 keV에서 10 keV)일 수 있다.

[0307] 표면(181)에 관한 전자 빔(842)에서의 전자의 입사각(δ)은 전자 빔(842)의 주된 궤적(850)과 표면(181)에 대한 법선(848) 사이의 각도에 대응된다. 일반적으로, δ는 0° 이상(예를 들어, 10° 이상, 20° 이상) 및/또는 80° 이하(예를 들어, 70° 이하, 60° 이하)이다. 예를 들어, δ는 0° 에서 70° (예를 들어, 0° 에서 10° , 40° 에서 60°)일 수 있다.

[0308] 소정 실시예에서, 샘플(180)쪽으로 전달되는 전자의 총 전류는 10 pA 이상(예를 들어, 100 pA 이상, 1 nA 이상, 10 nA 이상) 및/또는 100 μA 이하(예를 들어, 10 μA 이하, 1 μA 이하, 500 nA 이하, 100 nA 이하)이다. 예를 들어, 샘플(180)쪽으로 전달되는 전자의 총 전류는 10 pA에서 1 μA(예를 들어, 100 pA 에서 100 nA, 1 nA 에서 10 nA)일 수 있다.

[0309] 일부 실시예에서, m은 10 nm 이상(예를 들어, 25 nm 이상, 50 nm 이상, 75 nm 이상, 100 nm 이상) 및/또는 500 nm 이하(예를 들어, 400 nm 이하, 300 nm 이하, 200 nm)이다. 예를 들어, m은 10 nm에서 500 nm(예를 들어, 25 nm에서 500 nm, 50 nm에서 500 nm, 75 nm에서 400 nm, 100 nm에서 400 nm)일 수 있다.

[0310] 소정 실시예에서는, 다중 플루드 건이 사용될 수 있다. 예를 들어, 일부 실시예에서는, 상이한 플루드 건이 샘플(180) 표면(181)의 상이한 부분을 전자에 노출시키는데 사용될 수 있다. 소정 실시예에서는, 각각의 플루드 건이 표면(181)의 동일한 부분을 전자에 노출시키는데 사용될 수 있다. 선택적으로, 상이한 플루드 건이 상이한 횟수로 동작될 수도 있다. 예를 들어, 하나 이상의 플루드 건은, 표면(181)이 He 이온이 노출되기 전에 표면(181)을 전자에 노출시키는데(예를 들어, 표면 아래 전하층을 형성하는데) 사용될 수 있는 한편, 하나 이상의

상이한 플루드 건은, 표면(181)이 He 이온에 노출되는 동안에도 표면(181)을 전자에 노출시키는데 사용될 수 있다. 일부 실시예에서는, 모든 플루드 건이, 표면(181)이 He 이온에 노출되기 전에 표면(181)을 전자에 노출시키는데(예를 들어, 표면 아래 전하층을 형성하는데) 사용될 수 있는 반면, 소정 실시예에서는, 모든 플루드 건이, 표면(181)이 He 이온에 노출되는 동안에도 표면(181)을 전자에 노출시키는데 사용될 수 있다. 다른 조합이 사용될 수도 있다.

[0311] 플루드 건을 사용해 중화가 실현될 수 있는 실시예가 설명되었지만, 표면 전하 중화는, 배출된 이차 전자를 수입하여 그것들을 샘플 표면으로 복귀시킴으로써 표면에서의 궁극적인 양전하를 감소시키는 콜렉터 전극을 사용해서 실현될 수도 있다. 도 24를 참조하면, 콜렉터 전극(852)은 도체(854)를 통해 샘플(180)에 접속된다. 샘플(180)이 He 이온 빔(192)에 노출될 때, (화살표(856)에 의해 표현되는) 샘플(180)의 표면(181)으로부터 배출된 이차 전자는 콜렉터 전극(852)으로 입사한다. 그 다음, 전자(856)는, 도체(854)를 통해, 표면(181)으로 역전달되어, 표면(181)에서의 양전하를 감소시킨다. 추가 콜렉터 전극(852)이 샘플(180)에 접속되어, 추가적 표면 전하 중화를 제공할 수도 있다.

[0312] 소정 실시예에서는, 하나 이상의 콜렉터 전극 및 하나 이상의 플루드 건의 조합이 사용될 수 있다. 예를 들어, 하나 이상의 플루드 건은, 표면(181)이 He 이온에 노출되기 전에 샘플(180)의 표면(181)을 전자에 노출시키는데(예를 들어, 표면 아래 전하층을 형성하는데) 사용될 수 있고, 하나 이상의 콜렉터 전극은, 표면(181)이 He 이온에 노출되는 동안, 표면(181)에서의 하전(charging)을 중화시키는데 사용될 수 있다. 다른 조합도 가능하다.

[0313] 일부 실시예에서, 플루드 건(840)은 전자(842)의 아주 저에너지 빔을 샘플(180)쪽으로 전달하도록 구성될 수 있다. 예를 들어, 빔(842)에서의 전자는 약 50 eV 이하의 평균 에너지를 가질 수 있다. 저에너지 전자는 낮은 착륙 에너지를 갖고, 이는, 표면(181)에 누적될 수 있는 음전하의 양을 제한한다. 예를 들어, 전자 빔(842)에서의 평균 전자 에너지가 50 eV인 경우, 일단 샘플(180)이 공통 그라운드에 대하여 -50 V의 전위로 하전되고 나면, 플루드 건(840)으로부터의 전자는 더 이상 샘플 표면에 착륙하지 않을 것이다. 결과적으로, 플루드 건(840)으로부터의 저에너지 전자의 에너지를 조정하는 것에 의해, 샘플(180)의 표면(181)에 누적되는 최대 음전하가 제어될 수 있다. 이 방법은, 비전도성 재료의 하전을 방지하기 위해 비전도성 재료의 상단에 도전성 재료층을 증착하지 않으면서 비전도성 재료를 영상화하는데 사용될 수 있다. 이 방법의 일례는 도 25에서 도시된다. 이온 빔(192)이, 비교적 낮은 전기 전도율의 유전체 재료인(예를 들어, 금속성이 아닌) 샘플(180)의 표면(181)에 입사한다. 샘플(180)은, 현미경 시스템(200)의 공통의 외부 그라운드에 대하여 -600 V의 전하로 바이어스되는 샘플 매니퓰레이터(140)에 의해 지지된다. 매니퓰레이터(140)에 인가되는 전위는 샘플(180)의 표면(181)에서 전기 필드를 생성한다. 플루드 건(840)은, 500 eV의 평균 에너지를 가진 전자를 포함하는 전자 빔을, 충돌하는 이온 빔(192) 부근의 표면(181)쪽으로 전달하도록 구성된다. 처음에, 매니퓰레이터(140)에 인가된 바이어스로 인한 표면(181)에서의 전기 필드는 플루드 건(840)으로부터의 전자의 843a 및 843b와 같은 궤적에 따른 편향을 발생시키므로, 전자는 표면(181)에 착륙하지 않는다. 그러나, 입사하는 He 이온으로 인해 표면(181)에 양전하가 누적됨에 따라, 샘플(180)은 양으로 하전되어, 플루드 건(840)으로부터의 전자에 의해 경험되는 전기 필드 강도를 감소시킨다. 표면에서의 유효 바이어스가 공통 그라운드에 대하여 -500 V에 도달하는 시점까지 샘플(180) 표면(181)에서의 전하가 누적될 때, 플루드 건(840)으로부터의 전자는, 예를 들어, 843c와 같은 궤적을 따라, 표면(181)에 착륙할 수 있고 거기에서의 양전하를 중화할 수 있다. 결과적으로, 매니퓰레이터(140)에 인가되는 바이어스 및 플루드 건(840)에 의해 전달되는 전자의 에너지를 제어하는 것에 의해, 샘플(180)에서의 양전하 누적이 제어될 수 있다. 그에 따라, 비전도성 재료의 샘플(180)은, 그렇지 않으면, 표면 하전으로부터 초래되는 전압 콘트라스트 효과로 인해 바람직스럽지 못한 이미지 콘트라스트를 초래할 수도 있는, 표면 전하의 누적없이, 영상화될 수 있다. 전하 소실층(charge dissipation layer)으로서 동작하는 도전성 재료층을 샘플에 증착하지 않으면서, 비전도성 및 반도체 재료의 이미지가 획득될 수 있다.

[0314] 일부 실시예에서, 플루드 건(840)은, 음의 착륙 에너지를 가진 샘플(180)쪽으로 전자를 전달하도록 구성될 수 있는데, 다시 말해, 샘플 표면에서의 양전하 부재시에, 전자는 표면(181)에 전혀 착륙하지 않는다. 샘플(180)이 입사하는 He 이온으로 인해 표면 전하를 획득할 때, 플루드 건(840)으로부터의 전자는 표면(181)에 착륙하기 시작하여, 양전하를 중화시킨다. 결과적으로, 샘플(180)의 표면(181)은 대략적인 비하전 상태로 유지된다.

[0315] 일부 실시예에서는, 반전 표면이 이차 전자를 발생시키는데 사용될 수 있고, 다음으로, 이차 전자는 샘플(180)의 표면(181)에 누적되는 양전하를 중화시키는데 사용될 수 있다. 예를 들어, 이차 전자 수율이 높은 재료(예를 들어, 백금)로 형성된 반전 표면이 샘플(180) 부근에 배치될 수 있다. 샘플(180)을 떠나는, 고에너지 He 이온 및/또는 중성 원자가 반전 표면과 충돌하여, 이차 전자를 발생시킬 수 있다. 발생된 이차 전자는 샘플(180)에서의 누적된 표면 양전하로 인한 인력을 경험한다. 결과적으로, 이차 전자는 샘플 표면에 착륙하여, 양전

하를 중화시키고 표면 전하로 인한 전기 필드를 감소시킨다. 결과적으로, 이차 전자는, 표면 양전하의 좀더 큰 누적이 존재하는 경우에, 샘플(180)의 표면(181)쪽으로 좀더 강하게 유인된다. 이는, 표면 하전을 감소시키기 위한 자기 조절 메커니즘을 제공한다.

[0316] 일부 실시예에서는, 반전 플레이트가 이온 광학계(130)의 소자에 직접적으로 장착되어, 샘플(180)의 표면 전하 중화를 위한 이차 전자를 제공할 수 있다. 예를 들어, 도 26에서는, 반전 플레이트(845)가 제2 렌즈(226)의 표면에 부착된다. 플루드 건(840)으로부터의 전자(842)가, 이차 전자 수율이 높은 재료로부터 형성되는 반전 플레이트에 입사하도록 유도된다. He 이온 빔(192)이 샘플(180)의 표면(181)에 입사하고, 시간에 걸쳐, 이온 빔(192)이 입사하는 영역에서의 표면(181)에 양전하가 누적된다. 반전 플레이트(845)로부터 발생된 이차 전자(847)는 과도한 양전하의 표면 영역쪽으로 유인되고 이 영역에 착륙하여, 과도한 양전하를 중화시킨다. 일단 과도한 표면 전하가 제거되고 나면, 추가적 이차 전자가 표면(181)으로 착륙하지 않는다. 결과적으로, 표면(181)은 의사 중성 상태(quasi-neutral state)로 유지될 수 있다.

[0317] 일반적으로, 플루드 건(840)은 연속적이거나 간헐적인 동작을 위해 구성될 수 있다. 특히, 간헐적인 동작 동안, 플루드 건(840)은 소정 속도로 온 및 오프될 수 있다. 예를 들어, 일부 실시예에서, 플루드 건(840)은 온 및 오프되어, 픽셀 노출 속도에서 샘플(180)의 전하 중화를 제공할 수 있다. 이온 빔(192)은 불연속적인 단계로 샘플(180)의 표면을 가로질러 래스터링되어, 샘플 표면의 연속적인 부분을 노출시킬 수 있다. 각 부분이 노출된 후, 플루드 건(840)은 노출된 영역에서의 표면 전하를 중화시키는데 사용될 수 있다. 이것이 픽셀 노출 속도에서의 전하 중화에 대응된다. 다른 방법으로, 또는 그에 더하여, 플루드 건(840)은 라인 스캔 속도에서(예를 들어, 샘플(180)의 불연속적인 부분의 전체 라인이 이온 빔(192)에 노출된 후에) 그리고/또는 프레임 속도에서(예를 들어, 샘플(180)의 불연속적인 부분의 2차원, 면적 전체가 이온 빔(192)에 노출된 후에) 중화를 수행하는데 사용될 수 있다.

[0318] 일부 실시예에서, 플루드 건(840)은 샘플(180)로부터의 이차 전자의 검출 용이성을 향상시키는데 사용될 수 있다. 예를 들어, 플루드 건(840)은 샘플(180)의 벌크 영역내에 전하층(예를 들어, 전하층(846))을 매입하는데 사용될 수 있다. 매입된 음전하층은 샘플(180)의 표면(181)에서 전기 필드를 유도한다. 입사하는 이온 빔(192)과 샘플(180)의 상호 작용으로 인해 샘플(180)을 떠나는 이차 전자는 전하층(846)에 의해 생성된 전기 필드로 인해 샘플(180)로부터 멀어지도록 가속되어, 적당히 구성된 검출기에 의한 이차 전자의 검출을 비교적 용이하게 한다.

[0319] 매입된 음전하층의 사용 일례가 도 27A 및 도 27B에서 개략적으로 도시된다. 도 27A에서, 이온 빔(192)이 샘플(180)의 표면(181)에 입사한다. 샘플(180)의 처음의 수 nm내에서 복수개 이차 전자(2012)가 발생된다. 먼저, 이차 전자 중 다수는, 적당히 구성된 검출기에 의해 검출될 수 있는 자유 전자(2014)로서 탈출한다. 그러나, 시간에 걸쳐, 입사하는 He 이온이 샘플(180)내에 이식되어, 샘플(180)내에 양으로 하전된 층(2010)을 형성한다. 층(2010)내의 궁극적인 양전하가 증가함에 따라, 이차 전자(2012)가 층(2010)을 향해 점진적으로 유인되고, 점점 더 적은 이차 전자(2012)가 자유 전자(2014)로서 샘플(180)을 탈출한다. 결과적으로, 이차 전자의 검출을 통한 샘플(180)의 영상화는 점차 어려워질 수 있다.

[0320] 이 문제점에 대한 해결책은 도 27B에서 도시된다. 도 27B에 도시된 실시예에서는, (도시되어 있지 않은) 플루드 건(840)이 샘플(180)내에 음전하층(2016)을 매입하는데 사용된다. 매입된 음전하층은 도 23의 층(846)과 유사하다. 층(2016)의 결과로서, 샘플(180)에서 발생된 이차 전자(2012)는 샘플(180)로부터 멀어지는 방향으로 가속되어, 샘플(180)을 탈출하는, 발생된 이차 전자(2014) 수의 증가를 초래함으로써, 샘플로부터 검출되는 이차 전자 신호를 향상시킨다. 사실상, 층(2016)은 이차 전자를 위한 정전기 거울로서 기능하여, 그것의 검출 가능성을 향상시킨다.

[0321] 일반적으로, 플루드 건(840)은 샘플의 분석 이전에 샘플에 전자를 이식하는데 사용될 수 있고, 그리고/또는 플루드 건(840)은 샘플을 영상화하는 동안 샘플에 전자를 이식하는데 사용될 수 있다. 일부 실시예에서, 샘플은 이따금 (예를 들어, 일정한 간격으로) 플루드 건(840)으로부터의 전자에 노출될 수도 있다. 이는, 예를 들어, 하전의 비교적 일관된 레벨을 유지하는데 도움이 될 수 있다. 예를 들어, 샘플은 매 픽셀당 지속 시간(예를 들어, 100 ns)에 대응되는 시주기로 플루드 건(840)으로부터의 전자에 노출될 수도 있다.

[0322] (iii) 진동 분리

[0323] 진공 펌프, 다양한 이동 부분, 및 배경 음향 교란으로 인한 기계적 진동이 가스 필드 이온 현미경 시스템(200)의 소정의 성능 파라미터(예를 들어, 영상화 해상도, 샘플(180)에서의 이온 빔 스폿 사이즈, 안정성)에 영향을

미칠 수 있다. 일부 실시예에서는, 샘플 매니퓰레이터(140)가 시스템(200)의 다른 부분으로부터 샘플(180)을 분리하도록 구성됨으로써, 외부의 기계적 교란의 영향을 감소시킬 수 있다. 도 28은, 구동 장치(908)에 의해 지지되는 안내 지침(906)을 포함하는 진동 분리형 샘플 매니퓰레이터(140)를 나타내는데, 지침(906) 및 구동 장치(908) 각각은 스페이지(904)내에 배치되어 있다. 지지 디스크(902)는 스테이지(904) 상단에 배치되고, 샘플(180)을 지지하는 마찰 스파이더(900)는 디스크(902) 상단에 배치된다.

[0324] 샘플(180)을 x-y 평면에서 이동시키기 위해, 구동 장치(908)는 전자 제어 시스템(170)으로부터 적당한 신호를 수신하고 안내 지침(906)을 활성화한다. 안내 지침(906)은, 구동 장치(908)로부터의 신호에 응답하여, 샘플(180) 및/또는 스파이더(900)를 조금씩 밀어, x-y 평면에서의 병진을 발생시킨다.

[0325] 안내 지침(906)의 그것의 선단에서의 폭(j)은 통상적으로, 스파이더(900)에서의 간극(910)의 지름(b)보다 약간 작도록 선택된다. 예를 들어, j는 1 mm일 수 있고, b는 1.1 mm일 수 있다. 또한, 스파이더(900) 및 디스크(902)는, 디스크(902)와 스파이더(900) 사이의 정지 마찰력이 크기는 하지만 안내 지침(906)을 통해 구동 장치(908)에 의해 샘플(180)에 인가되는 힘에 의해 극복될 수 있도록 선택된다. 안내 지침(906)은, 인가되는 스트레스하에서 샘플(180)쪽으로의 진동 전송을 감소시키도록 변형될 수 있지만 구동 장치(908)에 의해 인가되는 힘을 샘플(180)쪽으로 전송하기에는 충분할 정도로 뻣뻣한, 기계적으로 순응적인 재료(mechanically compliant material)로 형성된다.

[0326] 이러한 시스템 파라미터의 결과로서, 스테이지(904)쪽으로 결합되는 기계적 진동은 안내 지침(906)에 의해 부분적으로 흡수되어 소실될 수 있고, 그에 따라, 스파이더(900)의 진동은 거의 또는 전혀 존재하지 않는다. 추가적으로, 안내 지침(906)이 스파이더(900)쪽으로 힘을 인가한다면, 안내 지침(906)은, 스파이더(900)의 진동을 유도하기보다는, 스파이더(900)의 측면에 대하여 우선적으로 미끄러질 것이다.

[0327] 일부 실시예에서, 안내 지침(906)은 상당한 직사각형 단면 형태를 가질 수 있다. 직사각형 단면 형태는, 스파이더(900)가 안내 지침(900)에 의해 x 및/또는 y 방향으로 병진됨에 따라, 샘플(180) 및/또는 스파이더(900)의 회전이 발생하지 않는다는 것을 보장하는데 도움이 될 수도 있다. (예를 들어, 이온 빔(92)이 비법선 각도(non-normal angle)에서 샘플(180)에 입사하도록) 샘플 매니퓰레이터(140)가 이온 광학계(130)의 축(132)에 대하여 기울어진다면, 스파이더(900) 및/또는 디스크(902)를 형성하는데 사용되는 재료는, 이러한 소자 사이에 훨씬 높은 정지 마찰력이 존재하도록 선택될 수 있다. 다른 방법으로 또는 그에 더하여, 소정 실시예에서, 스파이더(900) 및 디스크(902)는 기계적으로 결합되어 이러한 소자 사이의 마찰력을 증가시킬 수 있다. 자기 필드 결합은, 자기 필드가 국지화되어 샘플(180) 또는 충돌중인 이온 빔(192)을 교란하지 않는다는 것을 보장하도록, 조심스럽게 구현될 수 있다.

[0328] 안내 지침(906)이 활성화되지 않을 때, 지침(906)은 스파이더(900)로부터 완전히 분리될 수 있다. 예를 들어, 안내 지침(906)이 스파이더(900)쪽으로 힘을 인가하여 스파이더(900)와 샘플(180)이 x-y 평면에서 병진되게 한 후, 지침(906)의 작은 반동 이동(small recoil motion)이 전자 제어 시스템(170)에 의해 유도될 수 있는데, 이는, 안내 지침(906)과 스파이더(900) 사이에 공간을 도입한다. 결과적으로, 안내 지침(906)이 스파이더(900)로부터 완전히 분리되고, 지침(906)을 통한 스파이더(900)쪽으로의 기계적 진동 결합이 방지된다.

[0329] 도 29는 현미경 시스템을 위한 샘플 홀더 어셈블리(1510)를 묘사한다. 샘플 홀더 어셈블리(1510)는 베어링의 사용을 감소시키고, 동작하는 동안, 샘플에서의 저주파수 기계 진동을 감소시키는데 도움이 된다. 어셈블리(1510)는 샘플을 삽입하기 위한 개구부(1512)를 갖춘 바디(1511)를 포함한다. 바디(1511)는 조정 가능한 커넥터(1522)를 통해 암(1518)에 접속된다. 암(1518)은 그립(1520)을 사용해 샘플 스테이지(1514)를 지지한다. 샘플 스테이지(1514)는 간극(1524)을 갖춘 표면 디스크(1516)를 포함한다.

[0330] 어셈블리(1510)는, 팁(186)이 샘플 스테이지(1514)에서의 간극(1524)을 향해 포인팅되도록 이온 현미경에 접속될 수도 있다. 바디(1511)는 경화강(hardened steel), 스테인레스강, 형광체 브론즈, 및 티타늄과 같은 적당한 강체(rigid materials)로부터 형성될 수도 있다. 바디(1511)는 애플리케이션의 특정한 필요에 적합하도록 크기가 정해져 성형될 수도 있다. 일례로서, 바디(1511)의 사이즈 및 형태는 여기에서 개시된 현미경 시스템과의 사용을 위해 선택될 수도 있다. 동작하는 동안, 샘플은 개구부(1512)를 통해 어셈블리(1510)쪽으로 도입될 수도 있다.

[0331] *샘플 스테이지(1514)는 조정 가능한 커넥터(1522)와 함께 바디(1511)에 접속된 암(1518)에 의해 지지된다. 조정 가능한 커넥터(1522)는 암(1518)의 수직 이동을 허용한다. 암(1518) 및 샘플 스테이지(1514)는 수직 방향으

로 이동되어 특정 위치에 고정될 수 있다. 커넥터(1522)는, 암(1518) 및 스테이지(1514)가 소정의 수직 위치에서 단단하게 고정될 수 있도록 공기 역학적일 수 있거나 진공 제어될 수 있다. 커넥터(1522)는 선택적으로, 커넥터의 다른 유형을 포함할 수 있다.

[0332] 샘플 스테이지(1514)는 그립(1520)을 사용해 암(1518)에 접속된다. 암(1518)은, 샘플 스테이지(1514)의 그립(1520)이 샤프트를 고정시킬 수 있도록 안쪽을 향해 연장하는 샤프트를 가질 수 있다. 그립(1520)은, 스테이지(1514)가 기울어질 수 있도록 공기 역학적으로 또는 진공 동작될 수 있다. 그립(1520)은, 스테이지(1514)가 소정 위치쪽으로 기울어지도록 제어될 수 있다. 일부 실시예에서는, 소정 위치에 도달된 후, 그립(520)은, 샘플 스테이지(1514)가 기울어진 소정 위치에 단단히 고정되도록 조여질 수 있다.

[0333] 샘플 스테이지(1514)는 개구부(1524)를 갖춘 표면 디스크(1516)를 더 포함한다. 샘플은 디스크(1516)에 배치될 수도 있고, 디스크(1516)의 평면에서 샘플을 이동시키기 위한 샘플 위치 제어 시스템이 개구부(1524)를 통해 도입될 수 있다. 소정 실시예에서, 디스크(1516)는 디스크의 표면에 배치된 샘플을 원하는 바에 따라 회전 및 이동시키기 위해 그것의 중앙 둘레로 회전될 수 있다. 디스크(1516)는 세라믹, 유리 및 폴리머를 포함하는 적당한 강체로부터 형성될 수도 있다.

[0334] 도 30은 현미경 시스템을 위한 샘플 홀더 어셈블리를 묘사한다. 도 3의 샘플 홀더 어셈블리는, 스파이더(1600)가 디스크(1516)의 표면에 배치된, 도 29의 샘플 홀더 어셈블리와 유사하다. 스파이더(1600)는, 그것이 개구부(1524)의 상단에 배치되게 하기 위한 다리(legs)를 가질 수 있다. 선택적으로, 스파이더(1600)는 표면의 일부에 개구부를 가질 수도 있다. 스파이더(1600)는 세라믹, 유리 및 폴리머를 포함하는 적당한 강체로부터 형성될 수 있다.

[0335] 현미경 시스템(200)의 동작 동안, 샘플(180)은 z 방향으로 이동될 수 있고, x-y 평면에서 기울어지고 병진될 수 있으며, 회전될 수 있다. 샘플(180)이 기울어지고 경사각(예를 들어, 이온 빔(192)과 샘플(180)의 표면에 대한 법선 사이의 각도)이 비교적 크면, 경사진 샘플은 현미경 시스템(200)의 전체 FOV에 걸쳐 또렷한 상태가 아닐 수도 있다. 결과적으로, 이러한 조건하에서 획득되는 샘플의 이미지는 중앙 및 경사축에 대해 수직이 벗어난 면적에서는 희미하게 번질 수도 있다.

[0336] 이는, 이온 빔(192)이 샘플(180)의 표면에 걸쳐 스캔됨에 따라 렌즈(226)의 초점 길이를 변경하는 것에 의해 보상될 수 있다. 이러한 정정을 수행하기 위해, 샘플 매니퓰레이터(140)는 샘플(180)을 위한 경사각 정보를 전자 제어 시스템(170)에게로 전송할 수 있다. 다른 방법으로, 경사각 정보는 시스템 오퍼레이터에 의해 사용자 인터페이스를 통해 수동으로 입력될 수 있다. 전자 제어 시스템(170)은, 샘플(180)의 방향에 기초해, 기울어진 샘플(180)의 표면에 걸쳐 이온 빔(192)이 스캔됨에 따라 렌즈(226)의 초점 길이를 동적으로 변경하기 위해 제2 렌즈(226)에 적용하기 위한 한 세트의 전압 정정을 판정할 수 있다.

[0337] 그에 더하여, 경사진 샘플의 측면 치수는 기울어진 샘플의 평면 표면에서의 돌출로 인해 그리고 이온 광학계(130)까지의 거리 차이로 인해 왜곡된다. 예를 들어, 경사진 샘플 표면의 측면 치수는, 이온 빔(192)에 관한 샘플(180)의 방향으로 인해 실제보다 좀더 짧아 보일 수도 있다. 다른 일례는 이미지의 키스톤 왜곡이다. 본 효과는, 직사각형의 이미지가 그것의 형태에서 키스톤(keystone)처럼 보이도록, 직사각형 사양이 왜곡되는 것이다.

[0338] 이는, 이온 빔(192)이 샘플(180)의 표면에 걸쳐 스캔됨에 따라 스캔 편향기(219 및 221)의 스캔 진폭을 조정하는 것에 의해 보상될 수 있다. 이러한 정정을 수행하기 위해, 전자 제어 시스템(170)은 상술된 바와 동일한 방법으로 샘플(180)을 위한 경사각에 관한 정보를 취할 수 있다. 전자 제어 시스템(170)은, 샘플(180)의 경사에 기초해, 기울어진 샘플(180)의 표면에 걸쳐 이온 빔(192)이 스캔됨에 따라 이온 빔 편향을 기울어진 샘플(180) 표면의 왜곡되지 않은 영상화에 적응시키기 위해 스캔 편향기(219 및 221)에 적용하기 위한 스캔 진폭의 조정을 판정할 수 있다. 다른 방법으로, 이러한 2가지 왜곡 효과는 왜곡된 이미지의 디지털 조작에 의해 정정될 수 있다.

[0339] (iv) 이온 빔에서 중성 입자 및 2가로 하전된 입자의 존재를 감소시키기

[0340] 앞서 논의된 바와 같이, 중성 입자(예를 들어, He 원자)는 가스 필드 이온 소스(120)로부터의 비이온화 중성 원자로서 현미경 시스템(200)의 이온 광학계(130)로 진입할 수 있다. 그러한 중성 입자는 현미경 시스템의 성능에 부정적인 영향을 미칠 수 있다. 따라서, 일부 실시예에서는, 이온 빔(192)에서 중성 입자의 존재를 감소시키는 것이 바람직스러울 수 있다. 2가로 하전된 He 이온(예를 들어, He^{2+}) 또한, 팁(186) 부근에서의 He 원자의 이중-이온화를 통해서나 He 이온 사이의 충돌에 의해 가스 필드 이온 소스(120)에서 발생될 수 있다. 2가로 하

전된 He 이온의 포커싱 특성은 1가로 하전된 이온과 상이하고, 이온 빔(192)에 존재하는 2가로 하전된 이온은 샘플(180)에서의 좀더 큰 스폿 사이즈 및 바람직스럽지 못한 다른 효과를 초래할 수 있다.

[0341] 이온 빔(192)에서의 중성 입자 밀도를 감소시키기 위한 일 접근 방법은, 중성 입자가 이온 빔쪽으로 중성 입자 경로를 형성할 확률을 감소시키는 단계를 수반한다. 그러한 접근 방법은, 예를 들어, 팁(186)쪽으로의 유도된 가스 전달(상기 논의 참고하기)을 사용해 현미경 시스템(200)에서 비이온화 He 가스 원자의 전반적인 존재를 감소시키는 단계를 수반할 수 있다.

[0342] 이온 빔(192)에서 중성 입자의 밀도를 감소시키기 위한 다른 접근 방법은, 중성 입자가 이온 빔(192)에 출현한 후에 이온 빔으로부터 중성 입자를 제거하는 단계를 수반한다. 이 접근 방법은 이온을 편향시키기 위한 정전기 렌즈 소자를 사용해, 이온 광학계(130)에서의 이온 및 중성자를 공간적으로 분리하는 단계를 수반할 수 있다. 예를 들어, 도 31은, 편향기(220)가 이온 광학계(130)의 종축(132)으로부터 오프셋되는 그리고 추가 편향기(223)가 배치되는 이온 광학계(130)를 나타낸다. He 이온 빔(192)은 He 이온(192a) 및 He 원자(192b)를 포함한다. He 이온(192a)과 He 원자(192b)를 분리하기 위해, 편향기(223)에 인가되는 전위는 He 이온(192a)의 x 방향 편향을 발생시키도록 조정된다. He 원자(192b)는, 편향기(223)에 영향을 받지 않으므로, 편향되지 않는다. He 원자(192b)는, He 원자(192b)가 간극(224)을 통과하는 것을 방지하는 콜렉터(1016)에 의해 후속적으로 가로채기된다. 편향기(220 및 222)에 인가되는 전위 또한, He 이온(192a)의 궤적이 종축(132)과 재정렬되고 He 이온(192a)의 일부분이 간극(224)을 통과하여 이온 빔(192)으로서 샘플(180)의 표면(181)에 입사하도록 조정된다.

[0343] 다른 기술도 이온 빔으로부터 중성 입자를 제거하는데 사용될 수 있다. 통상적으로, 그러한 기술은, 중성 입자는 편향시키지 않으면서, 전기 및/또는 자기 필드(들)를 사용해 이온 빔에서의 이온을 편향시키는 단계를 수반한다. 일부 실시예에서는, 전기 및 자기 필드의 조합이 이온 광학계(130)에서의 이온 편향으로부터 초래되는 이온의 에너지 의존적인 공간 분리를 보상하는데 사용될 수 있다. 그에 더하여, 다양한 비대칭 이온 열 기하구조(various asymmetric ion column geometries)(예를 들어, 구부러진 이온 열(bent ion columns))가 He 원자와 이온을 분리하는데 사용될 수도 있다.

[0344] 예를 들어, 도 32에서는, 이온 광학계(130)의 구부러진 열 구성이 He 원자, 1가로 하전된 He 이온, 및 2가로 하전된 He 이온을 분리하는데 사용될 수 있다. 이온 빔(192)은, 이온 광학계(130)의 축(132)에 대하여 기울어진 방향을 따라 전파하면서 이온 광학계(130)로 진입한다. 이온 빔(192)은 중성 He 원자, He^+ 이온, 및 He^{2+} 이온을 포함한다. He^+ 이온이 편향기(223)를 통과한 후, He^+ 이온이 이온 빔(192a)으로서 축(132)을 따라 전파하도록, 이온 빔(192)에서의 He^+ 이온을 편향시키는 전위가 편향기(223)에 인가된다. 그러나, 중성 원자는 편향기(223)를 통과할 때 편향되지 않는다. 따라서, 중성 원자는, 콜렉터(1016b)에 의해 가로채기되는 중성 원자 빔(192b)을 제공하면서, He^+ 이온으로부터 공간적으로 분리된다. He^{2+} 이온은 He^+ 이온보다 좀더 크게 편향되어, 1가로 하전된 이온과 2가로 하전된 이온을 공간적으로 분리하고, He^{2+} 이온의 이온 빔(192c)을 제공한다. He^{2+} 이온 빔(192c)은 콜렉터(1016c)에 의해 가로채기된다. 결과적으로, 이온 광학계(130)로부터 출현하는 이온 빔(192a)은 사실상 He^+ 이온만을 포함한다.

[0345] 도 33은, He 원자, He^+ 이온, 및 He^{2+} 이온을 분리하기 위한 이온 광학 시스템의 다른 실시예를 나타낸다. 도 33에 도시된 이온 광학 시스템은, He 원자, He^+ 이온, 및 He^{2+} 이온을 서로 분리하는데 사용되는 그리고 입자 빔에 대해 프리즘 유사 효과를 제공하지 않는 전기 및 자기 필드의 무분산 시퀀스를 포함한다. 이온 광학 시스템은, 사실상 He^+ 이온만을 포함하는 이온 빔(192a)이 이온 광학계(130)로부터 출현하도록, He^+ 이온을 이온 광학계(130)를 통해 편향시키고 유도하도록 구성되는 일련의 3개 편향기(223a, 223b, 및 223c)를 포함한다. 중성 원자 빔(192b)은 편향되지 않고 각각의 편향기를 뒤따르는 위치에서 콜렉터(1016b)에 의해 가로채기된다. 2가로 하전된 He 이온은 He^+ 이온보다 좀더 많이 편향되고, 다중 He^{2+} 빔(192c)은 콜렉터(1016c)에 의해 가로채기된다. 결과적으로, He 원자, He^+ 이온, 및 He^{2+} 이온은 서로 공간적으로 분리되고, He^+ 이온은, 원치않는 빔 구성물이 이온 광학계(130)로 차단되는 사이에, 이온 빔(192)으로서 샘플(180)을 향해 유도된다.

[0346] 일부 실시예에서, 자기 필드의 사용은, 동일한 전하를 갖지만 가스 소스(110)에 의해 도입되는 가스의 상이한 동위 원소에 대응되는, 이온 빔(192)에서의 이온 궤적의 공간적인 분리를 초래할 수 있다. 우세한(예를 들어,

90% 상대 도수보다 큰) 자연 발생 동위 원소를 갖는, He와 같은 소정 가스의 경우, 자기 필드로 인한 분리 효과는 통상적으로 작다. 그러나, 2 이상의 자연 발생 동위 원소를 가진 그리고 우세한 동위 원소가 부족한 다른 가스의 경우, 그러한 효과는 좀더 클 수 있다. 결과적으로, 소정 실시예에서는, 동위 원소 분리자(예를 들어, 원치않는 동위 원소가 이온 광학계(130)의 길이를 트래버스(traverse)하는 것을 방지하는데 사용되는 블록)가 사용될 수 있다. 일부 실시예에서, 중성 원자 또는 2가로 하전된 이온을 차단하는데 사용되는 콜렉터(1016)는 이온 빔(192)에서 원치않는 동위 원소를 차단하는데도 사용될 수 있다.

[0347] 입자의 유형

[0348] 샘플과 이온 빔의 상호 작용은, 다음에서 설명되는 바와 같이, 다양한 상호 작용을 통해 상이한 유형의 입자가 표면을 떠날 수 있게 한다. 그러한 입자로는 이차 전자, 오제 전자, 산란 이온, 일차 중성 입자, X-선 광자, IR 광자, 가시 광자, UV 광자, 이차 이온 및 이차 중성 입자를 들 수 있다. 샘플에 관한 정보의 하나 이상의 상이한 유형을 판정하기 위해, 입자의 한가지 이상의 유형이 검출 및 분석될 수 있다. 샘플에 관한 정보의 그러한 유형으로는 샘플의 표면에 관한 지형 정보, 샘플의 표면에 관한 재료 구성물 정보, 샘플의 표면 아래 영역에 관한 재료 구성물 정보, 샘플에 관한 결정 정보, 샘플의 표면에 관한 전압 콘트라스트 정보, 샘플의 표면 아래 영역에 관한 전압 콘트라스트 정보, 샘플에 관한 자기 정보, 및 샘플에 관한 광학 정보를 들 수 있다. 여기에서 사용되는 바와 같이, 샘플의 표면이라는 용어는 5 nm 이하의 깊이에 이르는 부피를 의미한다.

[0349] *A. 이차 전자*

[0350] 이차 전자는, 여기에서 참조되는 바와 같이, 샘플 종(sample species)으로부터 방사되는 그리고 50 eV 미만의 에너지를 가진 전자이다. 일반적으로, 이차 전자는 일정 범위의 각도 및 에너지로 샘플 표면으로부터 방사된다. 그러나, 가장 흥미로운 정보는 대체로 (에너지 분해된 이차 전자 정보 또는 각도 분해된 이차 전자 정보와는 대조적으로) 이차 전자의 총 도수인데, 다음에서 설명되는 바와 같이, 이차 전자의 총 도수는 샘플 표면에 관한 정보를 제공할 수 있는 정보이기 때문이다.

[0351] 이차 전자는 전자를 검출할 수 있는 하나 이상의 적합한 검출기를 사용해 검출될 수 있다(검출기의 유형에 관한 상기 논의 참고하기). 다중 검출기가 사용된다면, 검출기는 모두가 동일한 유형의 검출기일 수 있거나, 검출기의 상이한 유형이 사용될 수도 있고, 원하는 바에 따라 일반적으로 구성될 수도 있다. 검출기는 샘플(180)의 표면(181)(이온 빔이 충돌하는 표면), 샘플(180)의 표면(183)(이온 빔이 충돌하는 반대쪽 표면) 또는 양자를 떠나는 이차 전자를 검출하도록 구성될 수 있다(검출기의 구성에 관한 상기 논의 참고하기).

[0352] 검출된 이차 전자 신호는 샘플의 이미지를 형성하는데 사용될 수 있다. 일반적으로, 이온 빔은 샘플 표면의 FOV에 걸쳐 래스터 스캔되고, 하나 이상의 검출기에 의해 (이미지에서의 개개 픽셀에 대응되는) 래스터 단계 각각에서의 이차 전자 신호가 측정된다. 일반적으로, 각각의 검출기는, 이온 빔이 샘플 표면의 FOV에 걸쳐 래스터 스캔됨에 따라 샘플에 대하여 고정된 위치를 유지한다. 그러나, 소정 실시예에서는, 하나 이상의 검출기가 샘플에 대하여 이동될 수 있다. 예를 들어, 단일 검출기가 사용되고 있다면, 샘플에 대하여 검출기를 이동시키는 것을 통해, 샘플에 관한 각도 의존 정보를 산출할 수 있다.

[0353] 소정 실시예에서, 이차 전자의 총 도수를 검출하는 것은 샘플의 지형에 관한 정보를 제공할 수 있다. 표면의 소정 위치에서의 이차 전자 총 도수는 일반적으로 그 포인트에서의 이온 빔에 관한 표면 경사에 의존한다. 일반적으로, 이차 전자 총 도수는, 이온 빔에 관한 표면 경사가 높은 경우(즉, 표면 법선으로부터 측정되는 이온 빔의 입사각이 큰 경우)에 좀더 높다. 그에 따라, 샘플 표면에서의 이온 빔의 위치의 함수로서의 이차 전자의 총 도수 변화는 표면의 경사 변화와 상관되어, 샘플 표면의 지형에 관한 정보를 제공할 수 있다.

[0354] 일부 실시예에서, 이차 전자의 총 도수를 검출하는 것은 샘플에 관한 재료 구성물 정보(예를 들어, 원소 정보, 화학적 환경 정보)를 산출할 수 있다. 그러한 실시예에서, 정보는 주로 샘플의 표면에 관련된다. 일반적으로, 원소 또는 재료 각각은 소정의 화학적 환경에서 고유의 특정한 이차 전자 수율을 가질 것이다. 결과적으로, 표면의 소정 위치에서의 이차 전자 총 도수는 일반적으로 그 위치에 존재하는 재료에 의존한다. 따라서, 샘플 표면에서의 이온 빔의 위치의 함수로서의 이차 전자 총 도수 변화는 샘플의 표면에 존재하는 원소(들) 및/또는 재료(들)의 변화와 상관되어, 샘플의 표면에 관한 재료 구성물 정보를 제공할 수 있다. 소정 실시예에서, 샘플에서의 특정 재료는 샘플로부터의 이차 전자 수율의 정량적 측정(quantitative measurements)에 기초해 식별될 수 있다. 예를 들어, Al, Si, Ti, Fe, Ni, Pt, 및 Au와 같은 재료는, 제어되는 조건하에서 He 이온 빔에 노출될 때의 이차 전자 수율이 공지되어 있다. 이온 현미경(예를 들어, 가스 필드 이온 현미경)은, 다양한 재료를 위한 공지의 이차 전자 수율에 기초해, 연구중인 샘플에서의 다양하고 상이한 재료의 존재 및 상대 도수를 식별하

도록 조정될 수 있다. 예를 들어, 다양한 재료를 위한 이차 전자 수율이 표 1으로 도시된다. 수율은 He 이온 빔의 법선 입사 및 21 keV의 평균 이온 에너지에서 측정되었다. 예를 들어, 비법선 입사 각도에서, 표 1에 도시된 수율은 통상적으로, 샘플 표면에 대한 이온 빔의 입사각의 시컨트(secant)에 대응되는 배율 팩터만큼 크기 조정된다. 다른 실험 조건은 다음에서 지적되는 대응 실시예에서 설명된다.

표 1

[0355]

재료	Z	M(amu)	이차 전자의 수율
알루미늄	13	27.0	4.31
실리콘	14	28.1	2.38
티타늄	22	47.9	3.65
철	26	55.8	3.55
니켈	28	58.7	4.14
구리	29	63.4	3.23
인듐	49	114.8	4.69
텅스텐	74	183.8	2.69
레늄	75	186.2	2.61
백금	78	195.1	7.85
금	79	197.0	4.17
납	82	207.2	4.57

[0356] 소정 실시예에서, 이차 전자의 총 도수를 검출하는 것은, 차례로, 샘플 표면에서의 원소 및/또는 재료의 전기 전도율 특성 및/또는 전위에 관한 정보를 제공할 수 있는 전압 콘트라스트 정보를 산출할 수 있다. 샘플 표면의 소정 위치에서의 이차 전자 총 도수는 대체로 샘플 표면에 존재하는 재료의 특성에 의존한다. 일반적으로, 전기 전도성이 낮은 재료는 시간에 걸쳐 이온 빔에 노출되면서 시간에 걸쳐 양으로 하전되는 경향을 띠는 반면, 전기 전도성이 높은 재료는 이온 빔에 노출되면서 시간에 걸쳐 양으로 하전되는 경향이 적을 것이다. 그에 따라, 예를 들어, 샘플 표면의 소정 위치에서의 이차 전자 총 도수가, (좀더 적은 이차 전자가 샘플을 탈출하게 하는 좀더 높은 표면 하전으로 인해) 전기 전도성이 낮은 재료에 대해서는 시간에 걸쳐 감소하는 경향을 띠는 한편, 전기 전도성이 높은 샘플 표면의 소정 위치에서의 이차 전자 총 도수는 (낮은 표면 하전으로 인해) 시간에 걸친 이차 전자 총 도수의 좀더 적은 감소를 경험하는 경향을 띨 것이다. 결과적으로, 샘플 표면에서의 이온 빔의 위치의 함수로서의 이차 전자의 총 도수 변화는 그 위치에서의 재료의 전기 전도율과 상관되어, 샘플의 표면에 관한 전압 콘트라스트 정보를 제공할 수 있다.

[0357] 표면 아래 전압 콘트라스트 효과는, 샘플의 표면 아래 영역내에 매입되는 He 이온에 의해 제공될 수 있다. 도 27A 및 도 27B와 관련하여 설명된 바와 같이, 표면 아래 He 이온은 샘플에서 발생되는 이차 전자가 샘플 표면을 탈출하는 것을 방지할 수 있다. 그에 따라, 샘플의 이차 전자 이미지에서의 콘트라스트는 입사하는 He 이온에 의한 샘플의 표면 아래 하전으로 인한 것일 수 있다.

[0358] 이 기술에 의해 제공되는 정보는 반도체 제품의 이온 빔 테스트에 사용될 수 있다. 예를 들어, 전압 콘트라스트 측정은, 전기 디바이스 및/또는 회로의 일부분이 이온 빔에 노출될 때 일부분 사이의 전기 접속의 존재 또는 부재로 인해 상이한 전위에 해당되는지의 여부 및 그에 따라 디바이스 및/또는 회로가 정확하게 동작중인지의 여부를 판정하는데 사용될 수 있다.

[0359] 일부 실시예에서, 이차 전자의 총 도수를 검출하는 것은 샘플에 관한 결정 정보를 제공할 수 있다. 이차 전자의 총 도수는, 이온 빔이 샘플의 결정 구조와 정렬되는지(예를 들어, 결정 격자를 설명하는 단위 벡터 중 하나에 평행하게 정렬되는지)의 여부에 따라 달라질 수 있다. 이온 빔이 샘플의 결정 구조와 정렬되면, 이온 빔의 이온이 (흔히 채널링이라고 하는) 샘플 원자와의 충돌을 경험하지 않으면서 샘플쪽으로 소정 거리만큼 일반적으로 침투할 수 있는 확률이 비교적 높아, 이차 전자의 좀더 낮은 총 도수를 초래한다. 반면, 이온 빔이 결정 구조와 정렬되지 않으면, 이온 빔의 이온은, 샘플 원자와의 충돌을 경험하지 않으면서 소정 거리만큼 샘플쪽으로 침투할 좀더 낮은 확률을 가져, 이차 전자의 좀더 높은 총 도수를 초래할 것이다. 따라서, 샘플 표면에서의 이온 빔의 위치의 함수로서의 이차 전자의 총 도수 변화는 그 위치에서의 재료의 결정 정보와 상관될 수 있다. 예를 들어, 이차 전자 총 도수가 사실상 동일한 샘플 표면의 영역이 존재할 수도 있다. 그러한 영역은, 예를 들어, 동일한 결정 방향을 가질 수 있고, 영역의 사이즈는 (다중의 배향 결정 도메인을 포함하는 다결정 샘플에서의) 입자 사이즈 및/또는 결정 사이즈 정보를 제공할 수 있고 그리고/또는, 소정 화학 조성(예를 들어, 원소

조성, 재료 조성)의 재료를 위한 이차 전자 총 도수의 크기는 재료의 인장(strain)에 의존할 수 있기 때문에, (비결정인지 아니면 결정인지) 샘플의 인장 영역에 관한 정보를 제공할 수 있다.

[0360] 소정 실시예에서, 이차 전자의 총 도수를 검출하는 것은 샘플에 관한 자기 정보를 제공할 수 있다. 이차 전자의 총 도수는 샘플 표면에 인접한 자기 필드의 크기에 의존할 수 있다. 일부 실시예에서, 예를 들어, 샘플 표면에 인접한 자기 필드는, 샘플 표면에서의 로컬 자기 필드를 발생시키는 샘플내의 자기 도메인으로 인해 달라진다. 소정 실시예에서는, 외부 자기 필드 소스에 의해 정적 자기 필드가 인가되고, 샘플내의 자기 도메인은, 인가되는 외부 자기 필드에서의 변화를 도입하는 샘플 표면에서의 로컬 자기 필드를 발생시킨다. 어떤 경우이든, 샘플 표면에서의 로컬 자기 필드의 변화는, 예를 들어, 샘플로부터 배출되는 이차 전자의 궤적을 변화시킬 수 있다. 이차 전자 궤적의 변화는, 좀더 많은 이차 전자가 검출기(들)를 향해 유도되도록 이차 전자의 궤적이 변화될 때의 이차 전자의 총 도수 증가에 대응될 수 있거나, 이차 전자 궤적의 변화는, 좀더 많은 이차 전자가 검출기(들)로부터 멀어지도록 이차 전자의 궤적이 변화될 때의 이차 전자의 총 도수 감소에 대응될 수 있다.

[0361] 일부 샘플의 경우, 샘플의 이차 전자 이미지에 등장하는 콘트라스트는 앞서 논의된 메커니즘 중 2 이상으로 인한 것일 수도 있다. 다시 말해, 소정 샘플의 이차 전자 이미지는 부분적으로 샘플 표면에서의 지형 변화, 샘플 표면에서의 재료 구성물 변화, 샘플 표면에서의 전압 콘트라스트 변화, 샘플 표면에서의 결정 변화, 및/또는 샘플 표면에서의 자기 변화로 인한 콘트라스트를 포함할 수 있다. 따라서, 이차 전자 총 도수를 측정하는 것으로부터 획득되는 정보와 입자의 다른 유형을 측정하는 것으로부터 획득되는 정보를 조합하여 이러한 메커니즘 중 하나 이상으로부터의 기여를 정성적으로(qualitatively) 그리고/또는 정량적으로 분리하는 것이 유리할 수 있다. 이러한 가능성은 다음에서 좀더 상세하게 논의된다.

[0362] 이차 전자 영상화 기술은 샘플의 다양하고 상이한 부류에 적용될 수 있다. 재료의 그러한 부류의 일례가, 예를 들어, 절연 재료의 행렬에 의해 둘러싸인 다중 전기 도체를 포함할 수 있는, 패터닝된 웨이퍼와 같은, 반도체 제품이다. 이차 전자 영상화 기술은 디바이스에서, 도체 사이의 불완전한 전기 접속 및/또는 회로 소자 사이의 전기 단락과 같은, 결함을 식별하는데 사용될 수 있다. 좀더 일반적으로, 이차 전자 영상화 기술은 반도체 제품의 광범위한 이온 빔 테스트 애플리케이션에 사용될 수 있다. 선택적으로, 이 접근 방법은 마스크 수리의 목적을 위해서도 유사하게 사용될 수 있다.

[0363] 이차 전자 영상화 기술이 사용될 수 있는 샘플 부류의 다른 일례는 금속 및 합금이다. 예를 들어, 합금과 같은 혼합 재료를 포함하는 샘플의 이미지는 샘플에서의 재료 각각의 표면 분포를 판정하는데 사용될 수 있다. 이차 전자 영상화 기술이 사용될 수 있는 샘플 부류의 또 다른 일례는 데이터 저장을 위한 판독/기입 구조이다. 이차 전자 영상화 기술이 사용될 수 있는 재료 부류의 추가 일례는 생물학 재료 및 약학 재료이다.

[0364] He 이온 빔으로의 노출에 의해 발생되는 이차 전자를 사용해 샘플을 영상화하는 것은, SEM과 같은, 다른 기술을 통한 이차 전자 영상화에 대하여 다수 이점을 제공할 수 있다. 예를 들어, 샘플에서의 He 이온 빔의 스폿 사이즈는 SEM으로부터의 전자 빔의 스폿 사이즈보다 작을 수 있다. 작은 스폿 사이즈의 결과로서, He 이온 빔에 노출되는 샘플의 영역은 SEM에서의 노출 영역보다 좀더 주의깊게 제어된다.

[0365] 더 나아가, 일반적으로, He 이온은 전자보다 좀더 무겁기 때문에, 산란 이벤트는, 전자가 산란에 의해 분광되는 것만큼 He 이온을 샘플내에서 용이하게 분광하지 않는다. 결과적으로, 샘플의 표면에 입사하는 He 이온은 SEM에서의 전자보다 좀더 작은 상호 작용 부피에서 샘플과 상호 작용할 수 있다. 결과적으로, 가스 필드 이온 현미경(예를 들어, He 이온 현미경)에서 검출되는 이차 전자는 유사한 스폿 사이즈의 SEM에서 이차 전자를 발생시키는 영역보다 좀더 작은 영역으로부터 발생할 수 있다. 따라서, He 이온 빔에 의해 발생되는 이차 전자는 SEM에서 발생되는 이차 전자보다 (예를 들어, 재료 특성의 측면 평균이 좀더 낮은) 샘플 표면의 좀더 국지화된 가로채기(more localized interrogation)에 대응될 수 있다.

[0366] 그에 더하여, He 이온 소스는 전자 소스보다 좀더 큰 초점 깊이도 제공한다. 결과적으로, 이온 현미경(예를 들어, 가스 필드 이온 현미경)을 사용해 획득되는 샘플의 이미지는, SEM에서 이차 전자로부터 획득되는 필적 가능한 이미지보다, 초점이 맞는, 샘플 표면에 수직인 방향을 따라 측정된, 샘플의 좀더 큰 부분을 나타낼 수 있다.

[0367] He 이온 빔은, 샘플과 전자 빔의 상호 작용으로 인해 이차 전자가 표면을 떠나게 하는 경우에 비해, 샘플과 이온 빔의 상호 작용으로 인해 이차 전자가 샘플을 떠나게 하는 경우, 이용 가능한 상이한 재료를 위한 좀더 큰 범위의 이차 전자 수율로 인해 샘플의 이차 전자 이미지를 위한 좀더 민감한 콘트라스트 메커니즘을 제공할 수도 있다. 통상적으로, 예를 들어, 반도체 및 금속과 같은 일반적인 재료를 위한 이차 전자 수율은 입사하는 전

자 빔을 위해 0.5에서 2.5까지 달라진다. 그러나, He 이온 빔에 노출된 동일 재료를 위한 이차 전자 수율은 0.5에서 8까지 달라질 수 있다. 그에 따라, 이차 전자 이미지로부터의 상이한 재료의 식별은 필적 가능한 SEM 시스템의 경우보다 가스 필드 이온 현미경(예를 들어, He 이온 현미경)을 사용해 좀더 정확하게 수행될 수 있다.

[0368] *B. 오제 전자*

[0369] 여기에서 참조되는 바와 같이, 오제 전자는 다음과 같이 발생되는 전자이다. 내각(inner shell) 원자 전자가 제거되어 공동을 형성한 다음, 방출 에너지를 가진 고각(higher shell)으로부터의 제2 원자 전자로써 공동을 채운다. 이 에너지는 오제 전자라고 하는 다른 전자를 통해 방출된다. 일반적으로, 오제 전자는 일정 범위의 각도 및 에너지로 샘플 표면으로부터 방사된다. 그러나, 가장 관심있는 정보는 대체로 (각도 분해된 오제 전자 정보와는 대조적으로) 오제 전자의 에너지인데, 다음에서 설명되는 바와 같이, 오제 전자의 에너지는 샘플 표면에 관한 정보를 제공할 수 있는 정보이기 때문이다. 오제 전자는 에너지 분해 방식으로 전자를 검출할 수 있는 하나 이상의 적합한 검출기를 사용해 검출될 수 있다(검출기의 유형에 관한 상기 논의 참고하기). 다중 검출기가 사용된다면, 검출기는 모두가 동일 유형의 검출기일 수 있거나, 검출기의 상이한 유형이 사용될 수도 있고, 일반적으로 원하는 바에 따라 구성될 수도 있다. 검출기는 샘플(180)의 표면(181)(이온 빔이 충돌하는 표면), 샘플(180)의 표면(183)(이온 빔이 충돌하는 반대쪽 표면) 또는 양자를 떠나는 오제 전자를 검출하도록 구성될 수 있다(검출기의 구성에 관한 상기 논의 참고하기). 검출된 오제 전자의 SNR(signal to noise ratio)을 향상시키기 위해서는, 오제 전자의 비교적 큰 입체각을 수집할 수 있는 검출기를 사용하는 것이 바람직스러울 수 있다. 추가적으로 또는 다른 방법으로, 샘플의 표면에 인접한 그리고 전자를 검출기쪽으로 유도할 수 있는 전자 수집 광학계(예를 들어, 정전기 렌즈 시스템)가 (예를 들어, 오제 전자를 위한 검출의 유효 입체각을 증가시키는데) 사용될 수 있다.

[0370] 일반적으로, 오제 전자의 에너지를 검출하는 것은 샘플에 관한 재료 구성물 정보(예를 들어, 원소 정보, 화학적 환경 정보)를 산출할 수 있다. 그러한 실시예에서, 정보는 주로 샘플의 표면에 관련된다. 일반적으로, 소정 화학적 환경에서의 소자 또는 재료 각각을 위해, 소자 또는 재료에 의해 방출되는 오제 전자는 특정한 에너지 또는 에너지의 대역을 가질 것이다. 결과적으로, 표면의 소정 위치에서의 오제 전자의 에너지는 일반적으로 그 위치에 존재하는 재료에 의존한다. 따라서, 샘플 표면에서의 이온 빔의 위치의 함수로서의 오제 전자의 에너지 변화는 샘플의 표면에 존재하는 원소(들) 및/또는 재료(들)에서의 변화와 상관되어, 샘플의 표면에 관한 재료 구성물 정보를 제공할 수 있다.

[0371] 오제 전자 영상화 기술은 다양하고 상이한 샘플의 부류에 적용될 수 있다. 재료의 그러한 부류의 일례가, 예를 들어, 절연 재료의 행렬에 의해 둘러싸인 다중 전기 도체를 포함할 수 있는, 패터닝된 웨이퍼와 같은, 반도체 제품이다. 선택적으로, 이 접근 방법은 마스크 수리의 목적을 위해서도 유사하게 사용될 수 있다. 오제 전자 영상화 기술이 사용될 수 있는 샘플 부류의 다른 일례는 금속 및 합금이다. 예를 들어, 합금과 같은 혼합 재료를 포함하는 샘플의 이미지는 샘플에서의 재료 각각의 표면 분포를 판정하는데 사용될 수 있다. 오제 전자 영상화 기술이 사용될 수 있는 샘플 부류의 또 다른 일례는 데이터 저장을 위한 판독/기입 구조이다. 오제 전자 영상화 기술이 사용될 수 있는 재료 부류의 추가 일례는 생물학 재료 및 약학 재료이다.

[0372] 샘플과 He 이온 빔의 상호 작용으로 인해 표면을 떠나는 오제 전자를 사용해 샘플을 영상화하는 것은, SEM과 같은, 다른 기술을 통한 오제 전자 영상화에 대하여 다수 이점을 제공할 수 있다. 예를 들어, 샘플에서의 He 이온 빔의 스폿 사이즈는 SEM으로부터의 전자 빔의 스폿 사이즈보다 작을 수 있다. 작은 스폿 사이즈의 결과로서, He 이온 빔에 노출되는 샘플의 영역은 SEM에서의 노출 영역보다 좀더 주의깊게 제어된다.

[0373] 더 나아가, 일반적으로, He 이온은 전자보다 좀더 무겁기 때문에, 산란 이벤트는, 전자가 산란에 의해 분광되는 것만큼 He 이온을 샘플내에서 용이하게 분광하지 않는다. 결과적으로, 샘플의 표면에 입사하는 He 이온은 SEM에서의 전자보다 좀더 작은 상호 작용 부피에서 샘플과 상호 작용할 수 있다. 결과적으로, 가스 필드 이온 현미경(예를 들어, He 이온 현미경)에서 검출되는 오제 전자는 유사한 스폿 사이즈의 SEM에서 오제 전자를 발생시키는 영역보다 좀더 작은 영역으로부터 발생할 수 있다. 따라서, 샘플와 He 이온 빔의 상호 작용으로 인해 표면을 떠나는 오제 전자는 SEM에서 발생되는 오제 전자보다 (예를 들어, 재료 특성의 측면 평균이 좀더 낮은) 샘플 표면의 좀더 국지화된 가로채기(interrogation)에 대응될 수 있다.

[0374] 그에 더하여, He 이온 소스는 전자 소스보다 좀더 큰 초점 깊이도 제공한다. 결과적으로, 이온 현미경(예를 들어, 가스 필드 이온 현미경)을 사용해 획득되는 샘플의 이미지는, SEM에서 오제 전자로부터 획득되는 필적 가능한 이미지보다, 초점이 맞는, 샘플 표면에 수직인 방향을 따라 측정된, 샘플의 좀더 큰 부분을 나타낼 수 있다.

[0375] 오제 전자 검출에, 전자 빔과는 대조적으로, 이온 빔을 사용하는 다른 이점은, 전자 빔을 사용하는 경우, 오제 전자는 역산란 전자(backscattered electrons)의 기선(baseline)에서 검출되고, 이온 빔을 사용하는 경우, 역산란 전자는 존재하지 않는다는 것이다. 결과적으로, 비교적 적은 수의 오제 전자를 수집하면서, 검출된 오제 전자를 위해 비교적 높은 SNR을 획득하는 것이 가능할 수 있는데, 이는, 이온 빔을 사용하는 경우, 샘플로부터 비교적 양호한 품질의 오제 전자 스펙트럼을 획득하는데 걸리는 시간량을 감소시킬 수 있다.

[0376] *C. 산란 이온*

[0377] 여기에서 참조되는 바와 같이, 산란 이온은, 이온 빔으로부터의 이온(예를 들어, He 이온)이 샘플과 상호 작용하고, 이온(예를 들어, He 이온)을 남기면서, 샘플로부터 산란될 때 발생된다. 산란 이온이 샘플의 표면 아래 영역으로부터 샘플의 표면까지 이동한 다음 샘플로부터 방출될 수 있는 확률은 아주 낮기 때문에, 산란 이온은 일반적으로 샘플의 표면에 관한 정보를 제공한다. 다음에서 좀더 상세하게 설명되는 바와 같이, 산란 이온을 검출할 때, 검출기(들)의 특정한 정렬은 일반적으로, 획득되기를 소망하는 정보의 유형에 의존한다.

[0378] 일부 실시예에서, 샘플 표면에 관한 지형 정보는 검출된 산란 이온을 통해 획득될 수 있다. 도 34A는 일반적으로, 표면의 상이한 영역으로부터 산란 이온을 검출하여 샘플의 표면에 관한 지형 정보를 판정하기 위한 접근 방법의 실시예를 묘사한다. 특히, 도 34A는, 각각, 7013, 7015 및 7017 표면의 7012, 7014 및 7016 영역을 갖춘 샘플(7010)을 나타낸다. 산란 패턴(7020, 7030 및 7040)은, 이온 빔이 그 위에 수직으로 입사할 때, 각각, 표면(7013, 7015 및 7017)으로부터 산란되는 이온의 각도 분포를 표현한다. 도 34A에 도시된 바와 같이, 산란 패턴(7020, 7030 및 7040) 각각은 코사인형 분포이다. 도 34B는, 지형 효과로부터 발생하는, 각각, 검출기(7041 및 7050)에 의해 검출되는 산란 이온의 상대 밀도(7042 및 7052;각각, 약간 긴 점선 및 점선) 분포를 묘사한다. 그에 따라, 예를 들어, 샘플(7010)이 그것의 전체 표면을 가로질러 동일한 재료로 형성된다고 가정하면, 검출기(7041 및 7050)로부터의 상대적 총 도수 프로파일이 샘플(7010)의 지형을 판정하는데 사용될 수 있다. 다른 방법으로, 샘플(7010)의 지형이 공지되어 있다고 가정하면, 지형에만 기인하는, 검출되는 산란 이온의 총 도수에 대한 기여(상대 밀도(7042 및 7052))는, 다른 효과(예를 들어, 샘플(1710)의 표면에 걸쳐 재료를 변경하는 것)로 인한 총 검출 산란 이온에 대한 기여를 판정하기 위해, 검출된 산란 이온의 총 도수로부터 제거될 수 있다. 검출기는 표면에 대하여 원하는 바에 따라 배치될 수 있지만, 소정 실시예에서, 도 34A에 도시된 유형의 검출기 시스템의 경우, 지형 정보는 큰 산란 각도에서 산란되는 He 이온으로부터 획득된다. 일례로서, 일부 실시예에서, 산란 이온으로부터의 지형 정보는 이온 빔의 방향에 대하여 60° 이상(예를 들어, 65° 이상, 70° 이상, 75° 이상)의 각도에서 산란 이온을 검출하는 것에 의해 판정된다. 도 34A는 2개 검출기의 사용을 묘사하지만, 일부 실시예에서는, 단일 검출기(예를 들어, 검출기(7041) 또는 검출기(7050))가 사용된다. 다른 방법으로, 소정 실시예에서는, 2개 이상(예를 들어, 3개, 4개, 5개, 6개, 7개, 8개)의 검출기가 사용될 수 있다. 일반적으로, 다중 검출기가 산란 이온을 검출하는데 사용되는 경우, 검출기는 샘플의 표면에 관한 그것의 입체각에 대하여 서로 동일한 간격을 유지한다. 샘플의 표면에 대하여 대칭적으로 배치되는 2개 이상의 검출기(예를 들어, 4개 검출기) 사용은, 샘플 표면의 공칭 평면(nominal plane)에 관한 양자의 수직 방향에서 표면 사양을 검출하는 것을 허용할 수 있다.

[0379] 도 35A 내지 도 35I는 일반적으로, 표면의 상이한 영역으로부터 산란 이온을 검출하여 샘플의 표면에 관한 지형 정보를 판정하기 위한 접근 방법의 다양한 실시예를 묘사한다. 특히, 도 35A, 도 35D 및 도 35G는, 각각, 8053, 8055, 8057, 8059 및 8061 표면의 8052, 8054, 8056 및 8058 영역을 갖춘 샘플(8050)을 나타낸다. 도 35A, 도 35D 및 도 35G에 도시된 바와 같이, 표면(8055 및 8059)은 표면(8053, 8057 및 8061)에 대하여 비스듬하다. 산란 패턴(8070, 8090 및 80110)은, 각각, 이온 빔이 거기에 수직으로 입사할 때, 표면(8053, 8057 및 8061)으로부터 산란되는 이온의 각도 분포를 표현한다. 도 35A, 도 35D 및 도 35G에 도시된 바와 같이, 산란 패턴(8070, 8090 및 80110) 각각은 코사인형 분포이다. 산란 패턴(8080 및 80100)은, 이온 빔이 영역(8054 및 8058)에 대하여 수직인 경우에 표면(8055 및 8059)으로부터 산란되는 이온의 각도 분포를 표현한다. 도 35A, 도 35D 및 도 35G에 도시된 바와 같이, 산란 패턴(8080 및 80100)의 각도 분포는 코사인형 분포가 아닌데, 이온 빔이 표면(8055 및 8059)에 대해 수직으로 입사하지 않기 때문이다.

[0380] 도 35B 및 도 35C는, (산란 이온을 각도 분해할 수 있거나, 산란 이온을 스펙트럼 분해할 수 있거나, 산란 이온을 각도 분해 및 스펙트럼 분해할 수도 있는) 반구형 검출기(80120)가 산란 이온을 검출하는데 사용되는 경우의 산란 이온의 총 수율 및 검출되는 산란 이온의 상대 도수를 묘사한다. 도 35C에 도시된 바와 같이, 검출기(80120)를 사용하는 경우에 검출되는 이온의 상대 도수에는 쉐도우 효과(shadow effect)가 존재한다. 그에 따

라, 예를 들어, 샘플(8050)이 그것의 전체 표면을 가로질러 동일 재료로 형성된다고 가정하면, 검출기(80120)로부터의 상대 도수 프로파일이 샘플(8050)의 지형을 판정하는데 사용될 수 있다. 다른 방법으로, 샘플(8050)의 지형이 공지되어 있다고 가정하면, 지형에만 기인하는, 검출되는 산란 이온의 총 도수에 대한 기여(도 35D의 상대 도수)는, 다른 효과(예를 들어, 샘플(8050)의 표면을 가로질러 재료를 변경하는 것)로 인한 총 검출 산란 이온에 대한 기여를 판정하기 위해, 검출되는 산란 이온의 총 도수로부터 제거될 수 있다.

[0381] 도 35E 및 도 35F는, 산란 이온을 위해 비교적 작은 수용 각도를 갖는 상단 검출기(80130)가 산란 이온을 검출하는데 사용되는 경우의 산란 이온의 총 수율 및 검출되는 산란 이온의 상대 도수를 묘사한다. 도 35F에 도시된 바와 같이, (도 35E에 도시된 바와 같이, 영역(8054 및 8056)에서 산란 이온의 총 수율은 좀더 높다는 사실에도 불구하고) 검출기(80130)의 수용 각도쪽으로의 산란 수율은 이 영역(8054 및 8058)에서 좀더 작기 때문에, 산란 이온의 상대 도수는 영역(8054 및 8058)에서 감소한다. 그에 따라, 예를 들어, 샘플(8050)이 그것의 전체 표면을 가로질러 동일 재료로 형성된다고 가정하면, 검출기(80130)로부터의 상대 도수 프로파일이 샘플(8050)의 지형을 판정하는데 사용될 수 있다. 다른 방법으로, 샘플(8050)의 지형이 공지되어 있다고 가정하면, 지형에만 기인하는, 검출되는 산란 이온의 총 도수에 대한 기여(도 35D의 상대 도수)는, 다른 효과(예를 들어, 샘플(8050)의 표면을 가로질러 재료를 변경하는 것)로 인한 총 검출 산란 이온에 대한 기여를 판정하기 위해, 검출되는 산란 이온의 총 도수로부터 제거될 수 있다.

[0382] 도 35H 및 도 35I는, 산란 이온을 위해 비교적 큰 수용 각도를 갖는 상단 검출기(80140)가 산란 이온을 검출하는데 사용되는 경우의 산란 이온의 총 수율 및 검출되는 산란 이온의 상대 도수를 묘사한다. 도 35I에 도시된 바와 같이, 검출기(80140)의 적합한 수용 각도를 선택하는 것에 의해, 검출되는 산란 이온의 상대 도수는 사실상 샘플 전체에 걸쳐 동일하다. 검출되는 산란 이온의 총 도수 변화는 표면 지형의 변화가 아닌 다른 효과(예를 들어, 샘플(8050)의 표면을 가로질러 재료를 변화시키는 것)에 기인할 것이다.

[0383] 소정 실시예에서, 산란 이온의 검출은 샘플의 표면에 관한 재료 구성물 정보를 판정하는데 사용될 수 있다. 그러한 일 접근 방법은 산란 이온의 총 도수를 측정하는 단계를 수반한다. 산란 이온의 총 도수는 샘플(180)의 표면(181)(이온 빔이 충돌하는 표면)을 떠나는 산란 이온을 검출하도록 구성된 단일 검출기(예를 들어, 반구형 검출기) 또는 샘플(180)의 표면(181)(이온 빔이 일정 범위의 각도 및 에너지에서 샘플 표면과 충돌하는 표면)을 떠나는 산란 이온을 검출하도록 구성된 (예를 들어, 샘플의 표면에 대하여 상이한 입체각에 배치된) 다중 검출기를 사용해 검출될 수 있다. 일반적으로, He 이온의 산란 확률(및, 샘플 표면에서의 지형 변화와 같은, 다른 팩터로부터의 효과는 존재하지 않는다고 가정하는, 그에 따른 산란 He 이온의 총 도수)은 He 이온이 산란하는 표면 원자의 원자수(Z 값)의 제곱에 대략적으로 비례한다. 그에 따라, 일례로서, 반도체 제품에서 실리콘(원자수 14)으로부터 구리(원자수 29)선을 구별하고자 할 때, 반도체 제품의 표면에서 구리 원자로부터 산란되는 He 이온의 총 도수는 반도체 제품의 표면에서 실리콘 원자로부터 산란되는 이온 총 도수의 약 4배일 것이다. 다른 일례로서, 반도체 제품에서 실리콘(원자수 14)으로부터 텅스텐(원자수 74) 플러그를 구별하고자 할 때, 반도체 제품의 표면에서 텅스텐 원자로부터 산란되는 He 이온의 총 도수는 반도체 제품의 표면에서 실리콘 원자로부터 산란되는 이온 총 도수의 약 25배일 것이다. 추가 일례로서, 반도체 제품에서 실리콘(원자수 14)으로부터 금(원자수 79) 영역을 구별하고자 할 때, 반도체 제품의 표면에서 금 원자로부터 산란되는 He 이온의 총 도수는 반도체 제품의 표면에서 실리콘 원자로부터 산란되는 이온 총 도수의 약 25배일 것이다. 추가 일례로서, 반도체 제품에서 실리콘(원자수 14)으로부터 인듐(원자수 49)을 구별하고자 할 때, 반도체 제품의 표면에서 인듐 원자로부터 산란되는 He 이온의 총 도수는 반도체 제품의 표면에서 실리콘 원자로부터 산란되는 이온 총 도수의 약 10배일 것이다.

[0384] (총 도수 검출과 결합하여 또는 총 도수 검출 대신에 사용될 수도 있는) 산란 He 이온을 검출하는 것에 의해 샘플 표면에 관한 재료 구성물 정보를 판정하기 위한 다른 접근 방법은 산란 He 이온을 에너지 분해 및 각도 분해 방식으로 측정하는 단계를 수반한다. 예를 들어, 도 36에 도시된 바와 같이, 제2 렌즈(226)는 샘플(180)의 표면(181)쪽으로 He 이온 빔(192)을 포커싱한다. He 이온(1102)은 표면(181)으로부터 산란하여 검출기(1100)에 의해 검출된다. 검출기(1100)는, 검출된 산란 He 이온 각각의 각도 및 에너지가 검출기(1100)의 수용 각도내의 각도(ε) 각각을 위해 공지되도록 설계된다. 산란 He 이온의 에너지 및 산란 각도를 측정하는 것에 의해, 산란 He 이온을 산란하는 표면에서의 원자 질량이 다음의 수학식 3의 관계에 기초해 계산될 수 있는데:

수학식 3

[0385] $$\frac{E_s}{E_i} = 1 - \frac{2M_{He}M_a}{(M_{He}+M_a)^2}(1-\cos\theta_s)$$

[0386] 여기에서, E_s는 산란 He 이온의 에너지이고, E_i는 He 이온의 입사 에너지이며, M_{He}는 He 이온의 질량이고, Θ_s는 산란 각도이며, M_a는 He 이온을 산란하는 원자의 질량이다.

[0387] 검출기(1100)는, 예를 들어, 에너지 분해형 형광체 기반 검출기, 에너지 분해형 신틸레이터 기반 검출기, 반도체 검출기, 에너지 분해형 정전기 프리즘 기반 검출기, 정전기 프리즘, 에너지 분해형 ET 검출기, 또는 에너지 분해형 마이크로 채널일 수 있다. 일반적으로, 검출기(1100)는 상당한 수용 각도를 갖는 것이 바람직스럽다. 일부 실시예에서, 검출기(1100)는 고정형(예를 들어, 환상 검출기(annular detector))이다. 소정 실시예에서, 검출기(1100)는 입체각의 소정 범위를 스위프할 수 있다. 단일 검출기를 포함하는, 에너지 분해된 그리고 각도 분해된 산란 He 이온을 검출하기 위한 시스템이 설명되었지만, 그러한 시스템은 다중(예를 들어, 2개, 3개, 4개, 5개, 6개, 7개, 8개) 검출기를 포함할 수 있다. 대체로, 다중 검출기의 사용이 바람직스러울 수 있는데, 검출되는 산란 He 이온의 좀더 큰 수용 각도를 허용할 수 있기 때문이다.

[0388] 일부 실시예에서, 산란 He 이온의 총 도수를 검출하는 것은 샘플에 관한 결정 정보를 제공할 수 있다. 산란 He 이온의 총 도수는, 이온 빔이 샘플의 결정 구조와 정렬되는지의 여부에 따라 달라질 수 있다. 이온 빔이 샘플의 결정 구조와 정렬되면, 이온 빔에서의 이온이, (흔히 채널링이라고 하는) 샘플 원자와의 충돌을 경험하지 않으면서 샘플쪽으로 소정 거리만큼 일반적으로 침투할 수 있는 확률이 비교적 높아, 산란 He 이온의 좀더 낮은 총 도수를 초래한다. 한편, 이온 빔이 결정 구조와 정렬되지 않으면, 이온 빔에서의 이온은, 샘플 원자와의 충돌을 경험하지 않으면서 소정 거리만큼 샘플쪽으로 침투할 좀더 낮은 확률을 가져, 산란 He 이온의 좀더 높은 총 도수를 초래할 것이다. 따라서, 샘플 표면에서의 이온 빔의 위치의 함수로서의 산란 He 이온의 총 도수 변화는 그 위치에서의 재료의 결정 정보와 상관될 수 있다. 예를 들어, 산란 He 이온의 총 도수가 사실상 동일한 샘플 표면의 영역이 존재할 수도 있다. 그러한 영역은, 예를 들어, 동일한 결정 방향을 가질 수 있고, 영역의 사이즈는 (예를 들어, 배향된 다중 결정 도메인을 포함하는 다결정 샘플에서) 입자 사이즈 및/또는 결정 사이즈 정보를 제공할 수 있고 그리고/또는, 소정 화학 조성(예를 들어, 원소 조성, 재료 조성)의 재료를 위한 산란 He 이온의 총 도수 크기는 재료의 인장에 의존할 수 있기 때문에, (비결정인지 아니면 결정인지) 샘플의 인장된 영역에 관한 정보를 제공할 수 있다.

[0389] 다른 방법으로 또는 추가적으로, 샘플의 표면에 관한 결정 정보는 (이온 빔을 래스터링하지 않으면서) 표면의 영역을 이온 빔에 노출시킨 다음 (예를 들어, 전자 빔에 노출된 샘플 표면으로부터 역산란되는 전자로 인해 획득되는 Kikuchi 패턴과 유사한) 산란 He 이온의 패턴을 측정하는 것에 의해 획득될 수 있다. 산란 He 이온의 패턴은, 예를 들어, 이온 빔에 노출되는 샘플 표면의 위치에서 재료의 방향, 결정 간격, 및/또는 결정 유형(예를 들어, BCC(body centered cubic), FCC(face centered cubic))을 판정하기 위해 분석될 수 있다.

[0390] 산란 이온 영상화 기술은 다양하고 상이한 샘플 부류에 적용될 수 있다. 그러한 재료 부류의 일례가, 예를 들어, 절연 재료의 행렬로 둘러싸인 다중 전기 도체를 포함할 수 있는, 패터닝된 웨이퍼와 같은, 반도체 제품이다. 산란 이온 영상화 기술은, 도체 사이의 불완전한 전기 접속 및/또는 회로 소자 사이의 전기 단락과 같은, 디바이스에서의 결함을 식별하는데 사용될 수 있다. 선택적으로, 이 접근 방법은 마스크 수리의 목적을 위해서도 유사하게 사용될 수 있다. 산란 이온 영상화 기술이 사용될 수 있는 샘플 부류의 다른 일례는 금속 및 합금이다. 예를 들어, 합금과 같은 혼합 재료를 포함하는 샘플의 이미지는 샘플에서의 재료 각각의 표면 분포를 판정하는데 사용될 수 있다. 산란 이온 영상화 기술이 사용될 수 있는 샘플 부류의 또 다른 일례는 데이터 저장을 위한 판독/기입 구조이다. 산란 이온 영상화 기술이 사용될 수 있는 재료 부류의 추가 일례는 생물학 재료 및 약학 재료이다.

[0391] 일반적으로, 샘플 표면이 전통적인 SEM에서 사용되는 유형의 전자 빔에 노출되는 경우에는 산란 이온이 형성되지 않으므로, 검출되는 산란 He 이온을 통해 획득 가능한 결정 정보 또는 재료 구성물 정보 중 어떤 것도 그러한 SEM에서는 이용 불가능하다. 이것이 전통적인 SEM에 대하여 여기에서 설명되는 가스 필드 이온 현미경(예를 들어, He 이온 현미경)의 중요한 이점이다.

[0392] 여기에서 설명되는 가스 필드 이온 현미경(예를 들어, He 이온 현미경)을 사용하는 산란 He 이온의 측정은 전통적인 Rutherford 역산란 측정 디바이스에 대하여 다수 이점을 제공할 수 있다. 입사하는 He 이온이 샘플의 표면에서 포커싱될 수 있는 스폿 사이즈는, 샘플 표면에 관한 재료 구성물 정보가 전통적인 Rutherford 역산란 측정 디바이스로써 실현될 수 있는 것보다 좀더 정확하게 국지화되는 것을 허용하면서, 전통적인 Rutherford 역산란 측정 디바이스의 스폿 사이즈(100 μm 내지 1 mm 이상의 통상적인 스폿 사이즈)보다 상당히 작을 수 있다. 더 나아가, 여기에서 설명되는 가스 필드 이온 현미경(예를 들어, He 이온 현미경)은 샘플 표면을 가로질러 픽셀 기반 래스터링을 허용하는 반면, Rutherford 역산란 측정 디바이스는 이러한 능력을 갖지 않는다. 이것은 표면의 다양한 위치에서 샘플 표면에 관한 재료 구성물 정보와 연관된 비용 및/또는 복잡도를 감소시킬 수 있다.

[0393] *D. 일차 중성 입자*

[0394] 여기에서 참조되는 바와 같이, 일차 중성 입자는, 이온 빔이 샘플과 상호 작용하여 이온 빔으로부터의 이온(예를 들어, He 이온)이 비하전 중성 입자(예를 들어, 비하전 He 원자)로서 샘플을 떠날 때 발생되는 중성 입자이다. 산란 He 이온과 달리, 일차 He 원자는 샘플의 표면 아래 영역에 대한 비교적 민감한 프로브이다. 여기에서 사용되는 바와 같이, 표면 아래 영역은, 샘플 표면 바로 아래의 5 nm 이상(예를 들어, 샘플 표면 바로 아래의 10 nm 이상, 샘플 표면 바로 아래의 25 nm 이상, 샘플 표면 바로 아래의 50 nm 이상) 및 샘플 표면 바로 아래의 1000 nm 이하(예를 들어, 샘플 표면 바로 아래의 500 nm 이하, 샘플 표면 바로 아래의 250 nm 이하, 샘플 표면 바로 아래의 100 nm 이하)인 샘플 영역이다. 일반적으로, 이온 빔의 프로브 깊이는, 이온의 에너지가 증가함에 따라 증가한다. 그에 따라, 샘플에 관한 표면 아래 정보를 판정하기 위해, 좀더 높은 에너지의 이온 빔이 사용될 수 있다. 재료 구성물 정보의 깊이 프로파일은 가변 이온 빔 에너지(프로브 깊이)에서 샘플의 다중 He 원자 이미지를 취하는 것에 의해 획득될 수 있다. 일부 실시예에서는, 단층 촬영 재구성 알고리즘 및/또는 기술이 깊이 의존 정보에 적용되어, 샘플의 구조에 대한 단층 촬영 재구성을 수행할 수 있다.

[0395] 일반적으로, 일차 He 원자의 검출에 기초한 재료 구성물 정보는 총 도수 검출, 에너지 분해/각도 분해 검출, 또는 양자를 사용해, 산란 He 이온을 위한 대응되는 기술에 대하여 앞서 설명된 검출기 정렬을 사용해, 그리고 산란 He 이온을 위해 앞서 설명된 동일한 수치 관계를 사용해서도 판정될 수 있다. 그러나, 통상적으로, 일차 He 원자에 사용되는 검출기(들)는 중성 종을 검출할 수 있다. 그러한 검출기의 일례로는 마이크로 채널 플레이트, 채널트론 및 신틸레이터/PMT 검출기를 들 수 있다.

[0396] 일차 중성 입자(예를 들어, He 원자) 기술은 다양하고 상이한 샘플 부류에 적용될 수 있다. 재료의 그러한 부류에 대한 일례가, 예를 들어, 절연 재료의 행렬에 의해 둘러싸인 다중 전기 도체를 포함할 수 있는, 패터닝된 웨이퍼와 같은, 반도체 제품이다. 일차 중성 입자 기술은 디바이스에서, 도체 사이의 불완전한 전기 접속 및/또는 회로 소자 사이의 전기 단락과 같은, 결함을 식별하는데 사용될 수 있다. 선택적으로, 이 접근 방법은 마스크 수리의 목적을 위해서도 유사하게 사용될 수 있다. 일차 중성 입자 영상화 기술이 사용될 수 있는 샘플 부류의 다른 일례는 금속 및 합금이다. 예를 들어, 합금과 같은 혼합 재료를 포함하는 샘플의 이미지는 샘플에서의 재료 각각의 표면 분포를 판정하는데 사용될 수 있다. 일차 중성 입자 영상화 기술이 사용될 수 있는 샘플 부류의 또 다른 일례는 데이터 저장을 위한 판독/기입 구조이다. 일차 중성 입자 영상화 기술이 사용될 수 있는 재료 부류의 추가 일례는 생물학 재료 및 약학 재료이다.

[0397] 일반적으로, 샘플 표면이 전통적인 SEM에서 사용되는 유형의 전자 빔에 노출되는 경우에는 일차 중성 입자가 발생되지 않으므로, 검출되는 산란 He 이온을 통해 획득 가능한 결정 정보 또는 재료 구성물 정보 중 어떤 것도 그러한 SEM에서는 이용 불가능하다. 이것이 전통적인 SEM에 대하여 여기에서 설명되는 가스 필드 이온 현미경(예를 들어, He 이온 현미경)의 중요한 이점이다.

[0398] *E. 광자*

[0399] 관심있는 통상적인 광자로는 X-선 광자, UV 광자, 가시 광자 및 IR 광자를 들 수 있다. 여기에서 참조되는 바와 같이, IR 광자는, 700 nm 내지 100,000 nm(예를 들어, $1.2x10^{-5}$ keV에서 $1.7x10^{-3}$ keV) 이상의 파장을 가진 광자이고, 가시 광자는 400 nm 이상에서 700 nm(예를 들어, $1.8x10^{-3}$ keV에서 $3x10^{-3}$ keV)의 파장을 가진 광자이며, UV 광자는 10 nm 내지 400 nm(예를 들어, $3.1x10^{-3}$ keV에서 125 eV)의 파장을 가진 광자이고, X-선 광자는 0.01 nm에서 10 nm(예를 들어, 125 eV에서 125 keV)의 파장을 가진 광자이다. 일반적으로, 그러한 광자는 일정 범위의 각도 및 에너지/파장으로 샘플 표면으로부터 방출된다. 그러나, 가장 관심있는 정보는 (각도 분해 광자 정보와는 대조적으로) 대부분 광자의 파장 및/또는 에너지인데, 다음에서 설명되는 바와 같이, 광자의 파장 및/

또는 에너지는 샘플 표면에 관한 정보를 제공할 수 있는 정보이기 때문이다. 광자는 파장 분해 또는 에너지 분해 방식으로 광자를 검출할 수 있는 하나 이상의 적합한 검출기를 사용해 검출될 수 있다(검출기의 유형에 관한 상기 논의 참고하기). 다중 검출기가 사용된다면, 검출기 모두는 동일한 유형의 검출기일 수 있거나, 검출기의 상이한 유형이 사용될 수도 있고, 원하는 바에 따라 일반적으로 구성될 수도 있다. 검출기는 샘플(180)의 표면(181)(이온 빔이 충돌하는 표면), 샘플(180)의 표면(183)(이온 빔이 충돌하는 반대쪽 표면) 또는 양자를 떠나는 광자를 검출하도록 구성될 수 있다(검출기의 구성에 관한 상기 논의 참고하기). 검출되는 광자의 SNR을 향상시키기 위해, 광자의 비교적 큰 입체각을 수집할 수 있는 검출기를 사용하는 것이 바람직스러울 수 있다. 추가적으로 또는 다른 방법으로, 시스템은, (예를 들어, 검출되는 광자의 유효한 검출 입체각을 증가시키는데 사용될 수 있는) 샘플의 표면에 인접한 그리고 광자를 검출기쪽으로 유도할 수 있는 하나 이상의 광학 소자(예를 들어, 하나 이상의 렌즈, 하나 이상의 거울)를 포함할 수 있다.

[0400] 일반적으로, 광자의 에너지 및/또는 파장을 검출하는 것은 샘플에 관한 재료 구성물 정보(예를 들어, 원소 정보, 화학적 환경 정보)를 산출할 수 있다. 그러한 실시예에서, 정보는 주로 샘플의 표면에 관련된다. 일반적으로, 소정 화학적 환경에서의 원소 또는 재료 각각에 대하여, 원소 또는 재료에 의해 방출되는 광자는 특정한 에너지/에너지의 대역 및 파장/파장의 대역을 가질 것이다. 결과적으로, 표면의 소정 위치로부터 방출되는 광자의 에너지 및 파장은 일반적으로 그 위치에 존재하는 재료에 의존한다. 따라서, 샘플 표면에서의 이온 빔의 위치의 함수로서의 광자의 에너지 또는 파장 변화는 샘플의 표면에 존재하는 원소(들) 및/또는 재료(들)의 변화와 상관되어, 샘플의 표면에 관한 재료 구성물 정보를 제공할 수 있다.

[0401] 다른 방법으로 또는 추가적으로, 샘플에 관한 재료 구성물 정보는 샘플 재료의 반-여기(안정화) 시간(de-excitation time)을 판정하는 것에 의해 광자를 검출하면서 획득될 수 있다. 이것은, 예를 들어, 이온 빔을 펄스화하여 샘플을 이온 빔에 짧은 주기 동안 노출시킨 다음, 광자를 방출하는 샘플 재료의 반-여기 시간에 관련되는, 광자를 검출하는데 걸리는 시간량을 측정하는 것에 의해 실현될 수 있다. 일반적으로, 소정 화학적 환경에서의 원소 또는 재료 각각은 특정한 반-여기 시주기를 가질 것이다.

[0402] 샘플에 관한 결정 정보는 편광자(polarizer)와 결합한 광자 검출을 사용해 획득될 수 있는데, 광자의 분극은 샘플에서의 재료의 결정 방향에 의존할 수 있기 때문이다. 그에 따라, 편광자의 사용을 통해, 샘플에 의해 방출되는 광자의 분극이 판정되어, 샘플의 결정 방향에 관한 정보를 제공할 수 있다.

[0403] 일반적으로, 검출되는 광자에 포함된 정보는 주로 샘플의 표면에 관한 정보일 것이다. 그러나, 광자는 샘플의 표면 아래 영역으로부터 탈출할 수도 있기 때문에, 검출되는 광자는 샘플의 표면 아래 영역에 관한 정보를 포함할 수도 있다. 그에 따라, 검출되는 광자는 샘플의 광학 특성을 판정하는데 사용될 수 있다. 예를 들어, 광자에 대한 샘플의 투명성(transparency)은 이온 빔에서의 이온의 에너지 및 그에 따른 그것의 프로브 깊이를 조작하고, 검출되는 광자의 밀도에 대한 대응되는 충격을 판정하는 것에 의해 조사될 수 있다. 이온 에너지(프로브 깊이)의 함수로서의 검출되는 광자 밀도는 광자에 대한 샘플의 투명성에 관한 정보를 산출할 수 있다.

[0404] 광자 영상화 기술은 샘플의 다양하고 상이한 부류에 적용될 수 있다. 재료의 그러한 부류의 일례가, 예를 들어, 절연 재료의 행렬에 의해 둘러싸인 다중 전기 도체를 포함할 수 있는, 패터닝된 웨이퍼와 같은, 반도체 제품이다. 광자 영상화 기술은 디바이스에서, 도체 사이의 불완전한 전기 접속 및/또는 회로 소자 사이의 전기 단락과 같은, 결함을 식별하는데 사용될 수 있다. 선택적으로, 이 접근 방법은 마스크 수리의 목적을 위해서도 유사하게 사용될 수 있다. 광자 영상화 기술이 사용될 수 있는 샘플 부류의 다른 일례는 금속 및 합금이다. 예를 들어, 합금과 같은 혼합 재료를 포함하는 샘플의 이미지는 샘플에서의 재료 각각의 표면 분포를 판정하는데 사용될 수 있다. 광자 영상화 기술이 사용될 수 있는 샘플 부류의 또 다른 일례는 데이터 저장을 위한 판독/기입 구조이다. 광자 영상화 기술이 사용될 수 있는 재료 부류의 추가 일례는 생물학 재료 및 약학 재료이다.

[0405] He 이온 빔으로의 노출에 의해 발생되는 광자를 사용해 샘플을 영상화하는 것은, SEM과 같은, 다른 기술을 통한 광자 영상화에 대하여 다수 이점을 제공할 수 있다. 예를 들어, 샘플에서의 He 이온 빔의 스폿 사이즈는 SEM으로부터의 전자 빔의 스폿 사이즈보다 작을 수 있다. 작은 스폿 사이즈의 결과로서, He 이온 빔에 노출되는 샘플의 영역은 SEM에서의 노출 영역보다 좀더 주의깊게 제어된다.

[0406] 더 나아가, 일반적으로, He 이온은 전자보다 좀더 무겁기 때문에, 산란 이벤트는, 전자가 산란에 의해 분광되는 것만큼 He 이온을 샘플내에서 용이하게 분광하지 않는다. 결과적으로, 샘플의 표면에 입사하는 He 이온은 SEM에서의 전자보다 좀더 작은 상호 작용 부피에서 샘플과 상호 작용할 수 있다. 결과적으로, 가스 필드 이온 현미경(예를 들어, He 이온 현미경)에서 검출되는 광자는 유사한 스폿 사이즈의 SEM에서 광자를 발생시키는 영역

보다 좀더 작은 영역으로부터 발생할 수 있다. 따라서, 샘플과 He 이온 빔의 상호 작용에 의해 발생되는 광자는 SEM에서 발생되는 광자보다 (예를 들어, 재료 특성의 측면 평균이 좀더 낮은) 샘플 표면의 좀더 국지화된 가로채기(interrogation)에 대응될 수 있다.

[0407] 그에 더하여, He 이온 소스는 전자 소스보다 좀더 큰 초점 깊이도 제공한다. 결과적으로, 이온 현미경(예를 들어, 가스 필드 이온 현미경)을 사용해 획득되는 샘플의 이미지는, SEM에서 광자로부터 획득되는 필적 가능한 이미지보다, 초점이 맞는, 샘플 표면에 수직인 방향을 따라 측정된, 샘플의 좀더 큰 부분을 나타낼 수 있다.

[0408] *F. 이차 이온*

[0409] 여기에서 참조되는 바와 같이, 이차 이온은, 이온 빔이 샘플과 상호 작용하여 하전된 상태의 샘플로부터 단원자(mono-atomic) 또는 다원자(poly-atomic) 종을 제거할 때 형성되는 이온이다. 입사하는 이온 빔과 샘플 사이의 상호 작용은 이차 이온을 발생시킬 수 있다. 통상적으로, 이 방법은, He보다 큰 질량의 불활성 가스 이온(Ar 이온, Ne 이온, Kr 이온, Xe 이온)을 사용할 때 좀더 효과적이다.

[0410] 샘플로부터의 이차 이온 검출은 검출 입자의 질량을 계산하는 것을 통해 샘플에 관한 재료 구성물 정보를 제공할 수 있다. 일반적으로, 이 정보는 샘플 표면에서의 재료에 대응될 것이다. 일부 실시예에서, 이차 이온의 질량(들)은 비행시간과, 사중극자 질량 분광 장치와 같은, 질량 해상도 검출기의 조합을 사용해 판정된다. 그러한 이차 이온 검출은 다음과 같이 수행될 수 있다. 이온 광학계의 이온 광학 소자에 인가되는 전위를 변경하는 것에 의해, 이온 빔은 펄스 모드로 동작된다. 입사 이온의 펄스가 샘플의 표면에 입사한다. 이온 광학 소자의 전위가 이온 빔을 온 및 오프하도록 스위칭되는 속도를 판정하는 클록 신호도 검출기를 위한 기준 시간 신호로서 사용된다(검출기에 관한 상기 논의 참고하기). 이런 식으로, 샘플에서 검출기에 이르는 이차 이온의 비행시간이 정확하게 판정될 수 있다.

[0411] 검출되는 이차 이온의 비행시간, 그것의 이동 거리(예를 들어, 검출기와 샘플 사이의 거리), 및 그것의 에너지에 기초해, 입자의 질량이 계산될 수 있고, 화학종의 유형(예를 들어, 원자)이 식별될 수 있다. 이 정보는 샘플을 위한 재료 구성물 정보를 판정하는데 사용된다.

[0412] 이차 이온 영상화 기술은 다양하고 상이한 샘플 부류에 적용될 수 있다. 그러한 재료 부류의 일례가, 예를 들어, 절연 재료의 행렬로 둘러싸인 다중 전기 도체를 포함할 수 있는, 패터닝된 웨이퍼와 같은, 반도체 제품이다. 이차 이온 영상화 기술은, 도체 사이의 불완전한 전기 접속 및/또는 회로 소자 사이의 전기 단락과 같은, 디바이스에서의 결함을 식별하는데 사용될 수 있다. 선택적으로, 이 접근 방법은 마스크 수리의 목적을 위해서도 유사하게 사용될 수 있다. 이차 이온 영상화 기술이 사용될 수 있는 샘플 부류의 다른 일례는 금속 및 합금이다. 예를 들어, 합금과 같은 혼합 재료를 포함하는 샘플의 이미지는 샘플에서의 재료 각각의 표면 분포를 판정하는데 사용될 수 있다. 이차 이온 영상화 기술이 사용될 수 있는 샘플 부류의 또 다른 일례는 데이터 저장을 위한 판독/기입 구조이다. 이차 이온 영상화 기술이 사용될 수 있는 재료 부류의 추가 일례는 생물학 재료 및 약학 재료이다.

[0413] 일반적으로, 샘플 표면이 전통적인 SEM에서 사용되는 유형의 전자 빔에 노출되는 경우에는 이차 이온이 형성되지 않으므로, 검출되는 이차 이온을 통해 획득 가능한 결정 정보 또는 재료 구성물 정보 중 어떤 것도 그러한 SEM에서는 이용 불가능하다. 이것이 전통적인 SEM에 대하여 여기에서 설명되는 가스 필드 이온 현미경(예를 들어, He 이온 현미경)의 중요한 이점이다.

[0414] *G. 이차 중성 입자*

[0415] 이차 중성 입자는, 이온 빔이 샘플과 상호 작용하여 미하전 상태(un-charged state)의 샘플로부터 단원자(mono-atomic) 또는 다원자(poly-atomic) 종을 제거할 때 발생되는 중성 입자이다. 입사하는 이온 빔과 샘플 사이의 상호 작용이 이차 중성 입자를 발생시킬 수 있다. 통상적으로, 이 방법은, He보다 큰 질량의 불활성 가스 이온(Ar 이온, Ne 이온, Kr 이온, Xe 이온)을 사용할 때 좀더 효과적이다. 일반적으로, 이차 중성 입자로부터 이용 가능한 정보에 액세스하기 위해, 입자는 검출 이전에 (예를 들어, 레이저 유도 이온화, 전자 유도 이온화를 통해) 이온화된다.

[0416] 샘플로부터의 (이온화 이후의;post-ionization) 이차 중성 입자 검출은 검출 입자의 질량을 계산하는 것을 통해 샘플에 관한 재료 구성물 정보를 제공할 수 있다. 일반적으로, 이 정보는 샘플 표면에서의 재료에 대응될 것이다. 일부 실시예에서, 이차 중성 입자의 질량(들)은 비행시간과, 사중극자 질량 분광 장치와 같은, 질량 해상도 검출기의 조합을 사용해 판정된다. (이온화 이후의) 그러한 이차 중성 입자 검출은 다음과 같이 수행될 수 있다. 이온 광학계의 이온 광학 소자에 인가되는 전위를 변경하는 것에 의해, 이온 빔은 펄스 모드로

동작된다. 입사 이온의 펄스가 샘플의 표면에 입사한다. 이온화 디바이스(예를 들어, 레이저, 전자 빔) 및/또는 이온 광학 소자의 전위가 스위칭되는 속도를 판정하는 클록 신호도 검출기를 위한 기준 시간 신호로서 사용된다(검출기에 관한 상기 논의 참고하기). 이런 식으로, 샘플에서 검출기에 이르는 (이온화 이후의) 이차 중성 입자의 비행시간이 정확하게 판정될 수 있다.

[0417] 검출되는 이차 중성 입자의 비행시간, 그것의 이동 거리(예를 들어, 검출기와 샘플 사이의 거리), 및 그것의 에너지에 기초해, 입자의 질량이 계산될 수 있고, 화학종의 유형(예를 들어, 원자)이 식별될 수 있다. 이 정보는 샘플을 위한 재료 구성물 정보를 판정하는데 사용된다.

[0418] 이차 중성 입자 영상화 기술은 다양하고 상이한 샘플 부류에 적용될 수 있다. 그러한 재료 부류의 일례가, 예를 들어, 절연 재료의 행렬로 둘러싸인 다중 전기 도체를 포함할 수 있는, 패터닝된 웨이퍼와 같은, 반도체 제품이다. 이차 중성 입자 영상화 기술은, 도체 사이의 불완전한 전기 접속 및/또는 회로 소자 사이의 전기 단락과 같은, 디바이스에서의 결함을 식별하는데 사용될 수 있다. 선택적으로, 이 접근 방법은 마스크 수리의 목적을 위해서도 유사하게 사용될 수 있다. 이차 중성 입자 영상화 기술이 사용될 수 있는 샘플 부류의 다른 일례는 금속 및 합금이다. 예를 들어, 합금과 같은 혼합 재료를 포함하는 샘플의 이미지는 샘플에서의 재료 각각의 표면 분포를 판정하는데 사용될 수 있다. 이차 중성 입자 영상화 기술이 사용될 수 있는 샘플 부류의 또 다른 일례는 데이터 저장을 위한 판독/기입 구조이다. 이차 중성 입자 영상화 기술이 사용될 수 있는 재료 부류의 추가 일례는 생물학 재료 및 약학 재료이다.

[0419] 일반적으로, 샘플 표면이 전통적인 SEM에서 사용되는 유형의 전자 빔에 노출되는 경우에는 이차 중성 입자가 형성되지 않으므로, 검출되는 이차 중성 입자를 통해 획득 가능한 결정 정보 또는 재료 구성물 정보 중 어떤 것도 그러한 SEM에서는 이용 불가능하다. 이것이 전통적인 SEM에 대하여 여기에서 설명되는 가스 필드 이온 현미경(예를 들어, He 이온 현미경)의 중요한 이점이다.

[0420] 예시적 애플리케이션

[0421] *A. 반도체 가공*

[0422] (i) 개관

[0423] 반도체 가공은 통상적으로, 순차적으로 적층되고 프로세싱되어 집적된 전자 회로, 집적 회로 소자, 및/또는 상이한 마이크로 전자 디바이스를 형성하는 재료의 다중층을 포함하는 제품의 준비를 포함한다. 그러한 제품은 통상적으로, 서로에 대하여 (예를 들어, 일반적으로 수 나노미터 이내의 규모로) 정확하게 배치되는 다양한 사양(예를 들어, 전기 전도성 재료의 회로선, 전기적 비전도성 재료로 충전된 웰, 전기적 반도체 재료로 형성된 영역)을 포함한다. 소정 사양의 위치, 사이즈(길이, 폭, 깊이), 조성(화학적 조성) 및 관련된 특성(전도율, 결정 방향, 자기 특성)은 제품의 성능에 중요한 영향을 미칠 수 있다. 예를 들어, 소정 경우에서, 이러한 파라미터 중 하나 이상이 적합한 범위를 벗어나면, 제품은, 원하는 바에 따라 기능할 수 없기 때문에, 거부될 수도 있다. 결과적으로, 반도체 가공 동안 각각의 단계에 대해 아주 양호한 제어를 갖는 것이 일반적으로 바람직스러울 수 있고, 가공 프로세스의 다양한 단계에서 반도체 제품의 가공을 모니터링하여 반도체 가공 프로세스의 다양한 스테이지에서 하나 이상의 사양에 대한 위치, 사이즈, 조성 및 관련된 특성을 조사할 수 있는 도구를 갖는 것이 유리할 것이다. 여기에서 사용되는 바와 같이, 반도체 제품이라는 용어는 집적된 전자 회로, 집적 회로 소자, 마이크로 전자 디바이스 또는 집적된 전자 회로, 집적 회로 소자, 마이크로 전자 디바이스를 가공하는 프로세스 동안에 형성된 제품을 의미한다. 일부 실시예에서, 반도체 제품은 평면 패널 디스플레이 또는 광기전 셀(photovoltaic cell)의 일부일 수 있다.

[0424] 반도체 제품의 영역은 재료의 상이한 유형(전기 전도성, 전기적 비전도성, 전기적 반도체)으로 형성될 수 있다. 예시적인 전기 전도성 재료로는, 알루미늄, 크롬, 니켈, 탄탈, 티타늄, 텅스텐과 같은, 금속 및 이러한 금속 중 하나 이상을 포함하는 합금(예를 들어, 알루미늄-구리 합금)을 들 수 있다. 예시적인 전기적 비전도성 재료로는 금속 중 하나 이상의 붕소화물, 탄화물, 질화물, 산화물, 인화물, 규화물, 및 황화물(예를 들어, 니켈 규화물, 탄탈 붕소화물, 탄탈 게르마늄, 탄탈 질화물, 탄탈 규화물, 탄탈 실리콘 질화물, 및 티타늄 질화물)을 들 수 있다. 예시적인 전기적 반도체 재료로는 실리콘, 게르마늄 및 비화 갈륨(GaAs)을 들 수 있다. 선택적으로, 전기적 반도체 재료는 재료의 전기 전도율을 향상시키기 위해 도핑(p-도핑, n-도핑)될 수 있다.

[0425] 앞서 지적된 바와 같이, 일반적으로, 반도체 제품의 가공은 재료의 다중층을 순차적으로 증착하고 프로세싱하는 단계를 포함한다. 소정 재료층의 증착/프로세싱에서의 통상적인 단계는 (예를 들어, 형성될 소정 사양이 배치되어야 하는 곳을 판정하기 위해) 제품을 영상화하는 단계, 적합한 재료(예를 들어, 전기 전도성 재료, 전기적

반도체 재료, 전기적 비전도성 재료)를 증착하는 단계 및 제품의 소정 위치로부터 원치않는 재료를 제거하기 위해 에칭하는 단계를 포함한다. 대체로, 폴리머 포토레지스트와 같은, 포토레지스트가 증착되어/적합한 방사에 노출되어/선택적으로 에칭되어 소정 사양의 위치 및 사이즈를 제어하는 것을 돕는다. 통상적으로, 포토레지스트는 하나 이상의 후속 프로세스 단계에서 제거되고, 일반적으로, 최종적인 반도체 제품은 바람직스럽게도 포토레지스트의 감지 가능한 양을 포함하지 않는다.

[0426] *여기에서 설명되는 가스 필드 이온 현미경(예를 들어, He 이온 현미경)은 가공 프로세스의 다양한 단계(예를 들어, 각각의 단계)에서 반도체 제품을 조사하는데 사용될 수 있다. 특히, 입자의 일 유형 또는 입자의 상이한 다중 유형을 검출하고 분석하는 것에 의해(상기 논의 참고하기), 가스 필드 이온 현미경(예를 들어, He 이온 현미경)은 반도체 제품의 표면에 관한 지형 정보, 반도체 제품의 표면에 대한 재료 구성물 정보, 반도체 제품의 표면 아래 영역에 관한 재료 구성물 정보, 반도체 제품에 관한 결정 정보, 반도체 제품의 표면에 관한 전압 콘트라스트 정보, 샘플의 표면 아래 영역에 관한 전압 콘트라스트 정보, 반도체 제품에 관한 자기 정보, 및/또는 반도체 제품에 관한 광학 정보를 판정하는데 사용될 수 있다.

[0427] 여기에서 설명되는 이온 현미경 또는 이온 빔을 사용하면, 일반적으로, 반도체 제품 가공과 연관된 시간, 비용 및/또는 복잡도를 감소시킬 수 있는 다양하고 상이한 이점을 제공할 수 있다. 여기에서 설명되는 이온 현미경 또는 이온 빔과 연관된 예시적 이점으로는 비교적 높은 해상도, 비교적 작은 스폿 사이즈, 비교적 적은 바람직스럽지 못한 샘플 손상, 비교적 적은 바람직스럽지 못한 재료 증착 및/또는 이식, 비교적 짧은 시주기의 비교적 높은 품질 영상화, 비교적 높은 처리율을 들 수 있다.

[0428] 다음에서는 반도체 가공에서의 프로세스 단계의 소정 일례가 논의된다.

[0429] (ii) 마스크리스(maskless) 리소그래피

[0430] 반도체 제품은 통상적으로, 표면에 포토레지스트(예를 들어, PMMA(poly(methyl methacrylate)) 또는 에폭시 기반 포토레지스트, ADC(allyl diglycol carbornate), 또는 감광 유리와 같은, 폴리머 포토레지스트)의 층을 배치하는 단계, 포토레지스트의 소정 영역이 에칭용 시약에 저항하도록(그리고 일부 영역은 에칭용 시약에 저항하지 않도록) 재료를 패터닝하는 단계, 재료의 에칭 비저항 영역을 에칭하는 단계, 적합한 재료(예를 들어, 하나 이상의 전기 전도성 재료, 하나 이상의 전기 비전도성 재료, 하나 이상의 반도체 재료)를 증착하는 단계, 및 재료의 원치않는 영역을 선택적으로 제거하는 단계를 포함하는 리소그래피 프로세스를 사용해 준비된다. 통상적으로, 패터닝하는 단계는, 포토레지스트의 일부 영역은 에칭 저항적이고 포토레지스트의 다른 영역은 에칭 저항적이지 않도록, 포토레지스트를 적합한 파장의 방사 패턴에 노출시키는 단계를 포함한다. 방사 패턴은, 포토레지스트상에 마스크의 이미지를 형성하거나 포토레지스트의 소정 영역을 마스크로 덮고 마스크를 통해 포토레지스트의 덮히지 않은 영역을 노출시키는 것에 의해, 포토레지스트에 형성될 수 있다.

[0431] 그러나, 방사(radiation)로의 노출 이전에 마스크를 사용해 포토레지스트의 영역을 덮는 것이 아니라, 여기에서 설명되는 가스 필드 이온 소스(예를 들어, He 이온 소스)와 가스 원자의 상호 작용에 의해 발생되는 이온 빔이 포토레지스트를 패터닝하기 위한 방사에 사용되어 소정의 에칭 저항 영역 및 에칭 비저항 영역을 생성할 수 있다. 이것은, 예를 들어, (예를 들어, 포토레지스트의 방사로의 노출이 소망되는 영역에서는 이온 빔을 온(on)하고 포토레지스트의 방사로의 노출이 소망되지 않는 영역에서는 이온 빔을 오프(off)하는 것에 의해) 재료의 소정 영역이 이온에 노출되도록 포토레지스트를 가로질러 이온 빔을 래스터링하는 것에 의해 실현될 수 있다. 결과적으로, 마스크리스 프로세스로 반도체 제품이 가공될 수 있다.

[0432] 여기에서 개시되는 가스 필드 이온 소스(예를 들어, He 이온 소스)와 가스 원자의 상호 작용을 통해 발생되는 이온 빔을 사용하는 것은 다음의 이점 중 하나 이상을 제공할 수 있다. 지적된 바와 같이, 프로세스는 마스크의 사용없이 수행될 수 있고, 이는, 반도체 제품의 가공과 연관된 시간, 비용 및/또는 복잡도를 감소시킬 수 있다. 이온 빔의 비교적 큰 초점 깊이는 비교적 두꺼운 (예를 들어, 2㎛ 이상으로 두꺼운, 5 ㎛ 이상으로 두꺼운, 10 ㎛ 이상으로 두꺼운, 그리고/또는 20㎛ 이하로 두꺼운) 포토레지스트 재료의 패터닝을 허용할 수 있다. 이온 빔으로써 실현될 수 있는 이온의 비교적 깊은 침투 깊이는 비교적 두꺼운 포토레지스트 재료를 프로세싱하는데 부가적으로 도움이 될 뿐만 아니라 좀더 표준적인 두께의 포토레지스트 재료를 양호한 품질로 프로세싱하는데도 도움이 될 수 있다. 그에 더하여, 이온 빔은 전자 빔으로써 일반적으로 실현되는 것에 비해 좀더 높은 해상도를 가짐으로써, 좀더 작은 사이즈의 사양을 좀더 높은 정확도로써 가공할 수 있게 한다. 더 나아가, 포토레지스트의 이온 빔 패터닝은 포토레지스트의 전자 빔 패터닝보다 좀더 빠를 수 있다.

[0433] *(iii) 이온 현미경과 포커싱된 이온 빔(FIB;Focused Ion Beam)의 조합

[0434] FIB는 흔히 반도체 제품의 가공 동안 검사를 위한 샘플을 획득하는데 사용된다. 갈륨(Ga) 이온이 FIB에 흔히 사용된다. FIB는, 반도체 제품을 통한 단면 영상화, 회로 편집, 반도체 제품의 장애 분석, TEM(transmission electron microscopy)을 위한 반도체 제품 표본의 준비 및 마스크 수리와 같은, 다양한 원인을 위해 사용될 수 있다. 선택적으로, FIB는 (예를 들어, 화학적 기상 증착 프로세스에서의 이온 소스로서) 샘플에 하나 이상의 재료를 증착하는데 사용될 수 있다. 통상적으로, FIB는 스퍼터링을 통해 반도체 제품으로부터 재료를 제거하는데 사용된다. 예를 들어, 일부 실시예에서, FIB는 반도체 제품을 슬라이스하여 이온 현미경을 사용하는 후속 영상화를 위해 제품의 단면을 노출시키는데 사용된다. 소정 실시예에서, FIB는 제품으로부터 재료를 스퍼터링하여 제품에 트렌치 또는 비아를 형성하는데 사용된다. 이 기술은, 예를 들어, 제품의 표면 바로 아래에 위치하는 제품의 일부분을 노출시키는데 사용될 수 있다. 그 다음, 이온 현미경은, 가스 보조(gas assisted) 화학 기술을 사용해, 새로운 재료를 증착하거나 FIB에 의해 노출된 기존 재료를 에칭 제거하는데 사용될 수 있다. 일부 실시예에서, FIB는, 제품에서의 도전성 재료의 일부분과 같은, 반도체 제품의 일부분을 제거하기 위한 선택적 스퍼터링 도구로도 사용될 수 있다. 소정 실시예에서, FIB는, 샘플의 일부분이 (예를 들어, TEM을 사용해) 후속적으로 분석될 수 있도록 하기 위해, 샘플의 일부분을 절단하는데 사용된다.

[0435] 일반적으로, FIB를 샘플에 정확하게 배치하는 것이 바람직스럽다. 여기에서 설명되는 가스 필드 이온 현미경(예를 들어, He 이온 현미경)이 이 목적에 사용될 수 있다. 예를 들어, 샘플을 이동시키지 않으면서, 가스 필드 이온 현미경을 사용해 FIB의 위치가 판정될 수 있도록 하기 위해, FIB 계기와 가스 필드 이온 현미경의 양자를 갖춘 교차 빔 도구(cross-beam tool)가 사용될 수 있다. 그러한 도구에 의해, 가스 필드 이온 소스는 샘플을 영상화하는데 그리고 FIB를 원하는 바에 따라 정확하게 배치하는데 사용될 수 있는 정보를 제공하는데 사용될 수 있다. 그러한 정렬은, SEM을 사용해 FIB의 위치를 판정하는 것에 대하여 다수 이점을 제공할 수 있다. 일례로서, SEM의 사용은 샘플 표면에 인접한 자기 필드를 초래할 수 있고, 이는, Ga 이온의 동위 원소 분리를 초래하면서, 샘플에서 FIB의 하나 이상의 위치를 초래할 수 있다. 다수 경우에서, 이 문제점은 FIB 및 SEM이 동시적으로 사용되는 것이 아니라 순차적으로(in series) 사용되는 결과를 초래한다. 그러나, 그에 반해, 가스 필드 이온 현미경은 그러한 자기 필드의 부재시에 동작될 수 있고, 그것에 의해, FIB 및 가스 필드 이온 현미경이 동시에 사용되는 것을 허용하면서, Ga 이온 동위 원소 분리와 연관된 복잡한 상태를 제거한다. 이것은, 예를 들어, 샘플의 두께가 비교적 엄격한 허용 오차를 충족시키는 것이 바람직스러울 수도 있는 후속 검사(예를 들어, TEM 검사)를 위한 샘플을 준비하는 경우에 바람직스러울 수 있다. 가스 필드 이온 현미경(예를 들어, He 이온 현미경)을 사용하는 것의 추가 이점은, 그것이, 여전히 상당히 양호한 해상도를 유지하면서, SEM에 의해 통상적으로 사용되는 것보다 좀더 긴 작업 거리를 갖는다는 것인데, 이온 빔은 전자 빔보다 작은 가상 소스를 갖기 때문이다. 이것은, FIB 계기와 SEM을 조합하는 도구를 위해 존재할 수도 있는 소정 간격 제한을 경감시킬 수 있다. 여기에서 설명되는 가스 필드 이온 현미경의 추가 이점은, 가스 필드 이온 현미경은, FIB를 정확하게 배치하는 능력을 향상시킬 수 있는, 샘플에 관한 표면 아래 정보를 획득하는데 사용될 수 있는 반면, SEM은 일반적으로 그러한 표면 아래 정보를 제공할 수 없다는 것이다.

[0436] (iv) 가스 보조 화학 반응

[0437] 가스 보조 화학 반응은 흔히 반도체 가공 동안에 소정 층에 재료를 추가하는데 그리고/또는 소정 층으로부터 재료를 제거하는데 사용된다. 예를 들어, 가스 보조 화학 반응은 반도체 제품에 형성된 손상되거나 부정확하게 가공된 회로를 수리하기 위한 반도체 회로 편집에 사용될 수 있다. 가스 보조 화학 반응은, 사용으로부터 또는 부정확한 가공으로부터 발생하는 결함을 수리하기 위해 마스크에 재료가 추가될 수 있거나 마스크로부터 재료가 제거될 수 있는 포토리소그래피 마스크 수리에도 사용될 수 있다.

[0438] 프로세스는 일반적으로, 활성화 가스와 전자를 상호 작용시켜 반응성 가스를 형성하는 단계를 포함하는데, 다음으로, 반응성 가스는 반도체 제품 표면에서의 화학 반응에 참여하여 표면에 재료를 추가할 수 있거나, 표면으로부터 재료를 제거할 수 있거나, 표면에 재료를 추가하고 표면으로부터 재료를 제거할 수도 있다. 통상적으로, 전자는 샘플과 Ga 이온 빔의 상호 작용으로부터 기인하는 이차 전자로서 발생되고 그리고/또는 전자는 샘플과 (예를 들어, SEM에 의해 발생되는) 전자 빔의 상호 작용으로부터 기인하는 이차 전자로서 발생된다. 선택적으로, 적합한 펌핑 시스템이 표면 화학 반응의 바람직스럽지 못한 휘발성 산물을 제거하는데 사용될 수 있다.

[0439] 표면으로부터 재료를 제거하는데 사용될 수 있는 활성화 가스의 일례로는 Cl_2, O_2, I_2, XeF_2, F_2, CF_4 및 H_2O를

들 수 있다. 일례로서, 일부 실시예에서, 크롬, 크롬 산화물, 크롬 질화물 및/또는 크롬 산소질화물로 형성된 표면 영역은, 전자를 C_l2 및/또는 O_2와 상호 작용시키고 결과적 화학종이 표면 영역을 에칭하게 하는 것에 의해, 적어도 부분적으로 제거될 수 있다. 다른 일례로서, 소정 실시예에서, 탄탈 질화물로 형성된 표면 영역은, 전자를 XeF_2, F_2 및/또는 CF_4와 상호 작용시키고 결과적 화학종이 표면 영역을 에칭하게 하는 것에 의해, 적어도 부분적으로 제거될 수 있다. 추가 일례로서, 소정 실시예에서는, 탄소-함유 재료로 형성된 표면 영역은, 전자를 H_2O 및/또는 O_2와 상호 작용시키고 결과 화학종이 표면 영역을 에칭하게 하는 것에 의해, 적어도 부분적으로 제거될 수 있다.

[0440] 표면에 재료를 증착하는데 사용될 수 있는 활성화 가스의 일례는 (W 플러그와 같은, W를 증착하기 위한) WF_6이다.

[0441] 여기에서 설명되는 가스 필드 이온 소스(예를 들어, He 이온 소스)와 가스 원자의 상호 작용에 의해 발생되는 이온 빔이 가스 보조 화학 반응을 수행하는데 사용될 수 있다. 그러한 프로세스에서, 예를 들어, 샘플과 이온 빔의 상호 작용으로 인해 샘플을 떠나는 이차 전자는 화학 반응을 보조하는데 사용되는 전자일 수 있다. 그러한 이온 빔을 사용하는 것은 Ga 이온 빔을 사용하는 것에 대하여 몇가지 이점을 제공할 수 있다. 일례로서, 바람직스럽지 못한 이온 이식(undesirable ion implantation)은 He 이온 빔을 사용해 감소(예를 들어, 제거)될 수 있는 반면, Ga 이온 빔이 사용되는 경우, Ga의 바람직스럽지 못한 이식은 흔한 문제점이다. 다른 일례로서, 가스 필드 이온 빔(예를 들어, He 이온 빔)은 Ga 이온 빔 및/또는 입사 전자 빔(예를 들어, SEM에 의해 발생되는 입사 전자 빔)에 대하여 개선된 해상도를 제공할 수 있는데, 이는, 화학 반응의 좀더 정확한 그리고/또는 제어 가능한 사용을 허용할 수 있다. 이것은, 예를 들어, (예를 들어, 빔 프로파일이, Ga 이식이 반도체 제품의 성능에 관련된 문제점을 생성할 수 있는 샘플의 바람직스럽지 못한 영역쪽으로 연장하는, 꼬리를 갖는 Ga 이온 빔에 의해 발생할 수 있는 것과 같은) 샘플의 소정 부분과 이온의 바람직스럽지 못한 상호 작용을 감소시킬 수 (예를 들어, 제거할 수) 있다.

[0442] (v) 스퍼터링

[0443] 반도체 제품을 가공하는 프로세스에서, 소정 단계 동안에는 재료를 제거하는 것이 바람직스러울 수 있다. 이온 빔이 이러한 목적에 사용될 수 있는데, 이 경우, 이온 빔은 샘플로부터 재료를 스퍼터링한다. 특히, 여기에서 설명되는 바와 같이 가스 필드 이온 소스와 가스 원자의 상호 작용을 통해 발생되는 이온 빔이 샘플을 스퍼터링하는데 사용될 수 있다. He 가스 이온이 사용될 수도 있지만, 통상적으로, 좀더 무거운 이온(예를 들어, Ne 가스 이온, Ar 가스 이온, Kr 가스 이온, Xe 가스 이온)을 사용해 재료를 제거하는 것이 바람직스러울 수 있다. 재료의 제거 동안, 이온 빔은 제거될 재료가 위치하는 샘플의 영역에 포커싱된다.

[0444] 이온 빔을 사용해 재료를 제거하는 이점은, 재료가 비교적 제어되는 방식으로 그리고/또는 정확한 방식으로 제거될 수 있다는 것이다. 추가 이점은, (예를 들어, Ga 이식이 스퍼터링의 바람직스럽지 못한 흔한 부작용인 Ga 이온 스퍼터링을 사용하는 경우에 흔히 발생되는 것과 같은) 이온의 바람직스럽지 못한 이식없이, 스퍼터링이 실현될 수 있다는 것이다.

[0445] (vi) 공동(voids)의 검출

[0446] 반도체 제품의 가공 동안, 무의식중에 소정 사양 또는 층에서 공동이 형성될 수도 있다. 일부 실시예에서, 공동은 사양 및/또는 전체 디바이스의 (예를 들어, 전기, 기계) 특성에 바람직스럽지 못한 영향을 미칠 수 있다. 소정 실시예에서, 후속 프로세싱 단계는 공동을 개방할 수도 있고, 공동은, 예를 들어, 액체 및/또는 가스 성분으로써 충전될 수도 있다. 이것은 주변 웨이퍼 표면에 하부 구조의 부식, 입자 결함 및/또는 잔류물 결함을 발생시킬 수 있다.

[0447] 일례로서, WF_6로부터의 W 플러그 증착 동안, TiN_x 보호층이 인접 유전체 재료(예를 들어, 붕소 및 형광체 도핑 실리콘 유리)를 부식으로부터 (예를 들어, W 형성 동안에 유리되는 HF로부터) 보호하는데 흔히 사용된다. TiN_x 층에서의 불연속이 상당한 공동 형성을 초래할 수 있다. 다른 일례로서, 트렌치(예를 들어, 비교적 높은 가로세로비 트렌치)에서의 재료 (예를 들어, 유전체 재료) 증착은 후속적인 공동 형성과의 병목(bottleneck) 형성을 초래할 수 있다. 추가 일례로서, 얕은 트렌치 격리 구조의 유전체 충전 동안에 공동 형성이 발생할 수 있다. 부가 일례로서, 전기 전도성 재료선(예를 들어, 구리선)의 형성 동안에 공동이 형성될 수 있는데, 이는, 전기 전도성의 바람직스럽지 못한 감소를 초래할 수 있다. 일부 경우에서, 그러한 공동은, 전기 전도성이 소망되는 곳에서의 전기 전도성 부족을 초래할 수 있다.

[0448] 여기에서 설명되는 가스 필드 이온 현미경(예를 들어, He 이온 현미경)은, 반도체 제품과 같은, 샘플에 관한 표면 아래 정보를 제공하는 그것의 능력을 이용하는 것에 의해 공동 형성을 조사하는데 사용될 수 있다. 이 특성은 반도체 제품의 가공 프로세스 동안 공동의 존재 및/또는 위치를 판정하는데 사용될 수 있다. 이것이 전자 빔을 사용하는 것에 대한 두드러진 이점인데, 전자 빔은 일반적으로 샘플을 위해 이런 종류의 표면 아래 정보를 제공하지 않기 때문이다.

[0449] (vii) 오버레이 시프트 정합(Overlay Shift Registration)

[0450] 오버레이 시프트 정합은 일반적으로, 반도체 제품의 소정 층의 사양과 반도체 제품의 상이한 층에서의 사양의 정렬을 의미한다. 앞서 지적된 바와 같이, 반도체 제품의 형성은 일반적으로, 다수 층의 적당한 형성을 포함한다. 통상적으로, 반도체 제품은 20개가 훨씬 넘는 층을 포함하고 있다. 대체로, 각 층은 상이한 다중 사양을 포함할 수 있는데, 상이한 다중 사양 각각은, 반도체 제품이 적당하게 기능할 수 있도록 하기 위해, 높은 정확도로써 배치되는 것이 바람직스럽다. 일례로서, 반도체 제품은, 상이한 층에 위치하며 비아를 통해 서로에게 접속되는, 전기 전도성 와이어와 같은, 측면 사양을 포함할 수 있다. 일반적으로, 반도체 제품내의 사양은 100 nm 이내(예를 들어, 75 nm, 50 nm, 25 nm, 15 nm, 10 nm, 9 nm, 8 nm, 7 nm, 6 nm, 5 nm, 4 nm, 3 nm, 2 nm, 1 nm)로 서로 정렬되는 것이 바람직스러울 수 있다. 이러한 다수 사양 중 단 하나의 오정렬이 반도체 제품을 쓸모없게 할 수 있다.

[0451] 오버레이 시프트 정합은, (마이크로 전자 회로 사양 사이즈보다 훨씬 큰) μm-사이즈 구조인 테스트 구조를 사용하는 광학 기술을 사용해 흔히 수행된다. 그에 따라, 광학 테스트 구조는 통상적으로, 그것이 차지하는 웨이퍼 공간의 양으로 인해 웨이퍼의 다이내(intra-dye)에 배치될 수 없다. 테스트 구조는, 예를 들어, 웨이퍼의 에지에 좀더 가깝게 배치될 수 있지만, 테스트 구조는 여전히 웨이퍼 표면의 상당한 공간을 차지한다. 광학 테스트 구조는 정렬 목적만을 위해 제조되기 때문에, 고비용이기도 하다. 마지막으로, 정렬을 위한 광학 테스트 구조의 사용은, 상이한 층에서의 사양 정렬이 판정될 수 있는 정밀도에 관한 제한을 가진다.

[0452] 비교적 높은 정밀도로써 샘플에 관한 다양한 유형의 정보(예를 들어, 지형 정보, 표면에 관한 재료 구성물 정보, 표면 아래 영역에 관한 재료 구성물 정보, 결정 정보, 표면에 관한 전압 콘트라스트 정보, 표면 아래 영역에 관한 전압 콘트라스트 정보, 자기 정보, 및 광학 정보)를 제공할 수 있는 여기에서 설명되는 가스 필드 이온 현미경(예를 들어, He 이온 현미경)의 능력은, 현미경이 반도체 제품의 가공 동안 디바이스에서의 사양이 디바이스내에서 적절하게 그리고 높은 정밀도로써 배치되고 크기가 정해진다는 것을 지원하는데 안성맞춤으로 사용될 수 있게 한다. 특히, He 이온 현미경은, 광학 테스트 구조를 사용해 통상적으로 실현될 수 있는 것보다 높은 해상도에서 다중층에서의 회로 사양의 정렬을 허용할 수 있다. 더 나아가, 오버레이 시프트 정합은 목적 가공된 테스트 구조(예를 들어, 광학 테스트 구조)를 사용해 수행될 수 있는데, 예를 들어, 여기에서 설명되는 가스 필드 이온 현미경(예를 들어, He 이온 현미경)은, 반도체 제품과 같은, 샘플의 표면 아래 사양을 영상화할 수 있기 때문이다. 따라서, 목적 가공된 테스트 구조(예를 들어, 광학 테스트 구조)에 의해 취해지는 웨이퍼에서의 낭비되는 공간이 방지될 수 있을 뿐만 아니라 그러한 테스트 구조를 포함하는 것과 연관된 비용 및/또는 복잡도도 방지될 수 있다.

[0453] (viii) 임계 치수 계측

[0454] 임계 치수 계측은 디바이스의 성능에 대해 결정적인 영향(critical impact)을 미칠 수 있는 반도체 제품에서의 사양의 선형 치수에 대한 측정을 의미한다. 그러한 사양의 일례로는 선로(예를 들어, 전기 전도성 재료의 선로, 전기적 반도체 재료의 선로, 전기적 비전도성 재료의 선로)을 들 수 있다. 반도체 제품은 20 nm 이하(예를 들어, 10 nm 이하, 5 nm 이하, 4 nm 이하, 3 nm 이하, 2 nm 이하, 1 nm 이하)의 사이즈 치수를 가진 하나 이상의 사양을 포함할 수 있다. 일부 실시예에서, 사양의 사이즈는 사양의 사이즈에 관한 통계 정보를 제공하기 위해 여러번 측정된다. 임계 치수 측정은 대부분, 예를 들어, 웨이퍼에 패터닝된 사양의 길이에 대한 판정을 포함한다. (각각이 반도체 제품을 형성하는 다중 다이(multiple dies)를 포함하고 있는) 웨이퍼는 검사를 위해 가공 라인으로부터 무작위로 선택될 수 있거나, 라인의 모든 웨이퍼가 검사될 수도 있다. 선택된 임계 치수를 비교적 높은 처리율 속도에서 측정하기 위해 영상화 계기가 사용될 수 있다. 측정된 임계 치수가 수용 가능한 제한내에 해당되지 않으면, 웨이퍼는 파기될 수도 있다. 특정한 가공 머신으로부터 기인하는 다중 샘플이 수용 가능한 제한을 벗어난 임계 치수를 가지면, 머신은 서비스에서 제외될 수 있거나 그것의 동작 파라미터가 변경될 수 있다.

[0455] 여기에서 설명되는 He 이온 현미경 시스템이 임계 치수 측정에 사용될 수 있다. 특히, He 이온 빔이 웨이퍼의 영역에 걸쳐 래스터 스캔될 수 있고, 웨이퍼의 결과적 이미지(들)는 임계 치수(들)를 판정하는데 사용될 수 있

다. 임계 치수 측정과 관련하여, He 이온 현미경 시스템은 SEM 및 다른 검사 시스템에 대하여 다수 이점을 제공할 수 있다. He 이온 현미경 이미지는 일반적으로, 필적 가능한 SEM 이미지보다 약한 에지 블루밍(edge blooming)(일반적으로, 빔에 거의 평행한 경사의 지형 사양에서의 향상된 수율로 인해, 검출기의 포화점에 접근하는 과도 신호)을 나타낸다. 감소된 에지 블루밍은, 표면과 전자의 상호 작용 부피에 대하여, He 이온과 샘플 표면 사이의 좀더 작은 상호 작용 부피의 결과이다.

[0456] 그에 더하여, 입사 He 이온은 필적 가능한 입사 전자 빔보다 작은 스폿 사이즈로 포커싱될 수 있다. 좀더 작은 빔 스폿 사이즈는, 좀더 작은 상호 작용 부피와 결합하여, SEM으로써 발생되는 이미지보다 우수한 해상도를 가진 샘플 이미지와 샘플의 임계 치수에 대한 좀더 정확한 판정을 초래한다.

[0457] He 이온 빔의 초점 깊이는 SEM에 대하여 비교적 크다. 결과적으로, 가변 깊이에서의 샘플 사양의 해상도는, 전자 빔에 대하여, 이온 빔을 사용할 때 좀더 일관적이다. 따라서, 이온 빔을 사용하는 것은, 전자 빔을 사용해 제공될 수 있는 것보다, 좀더 양호하고 좀더 일관적인 측면 해상도로써 다양한 샘플 깊이에서의 정보를 제공할 수 있다. 일례로서, 전자 빔으로써 실현될 수 있는 것보다 양호한 임계 치수 프로파일이 이온 빔을 사용해 실현될 수 있다.

[0458] 더 나아가, 이차 전자에 적어도 부분적으로 기초해 정보가 획득되는 실시예에서, 전자 빔에 대하여, 이온 빔에 의해 제공되는 이차 전자의 비교적 높은 수율은, 소정 전류를 위해 비교적 높은 SNR을 초래할 수 있다. 이것은, 다음으로, 비교적 짧은 시주기에서 샘플에 관한 충분한 정보가 획득되는 것을 허용하여, 소정 전류를 위한 처리율을 증가시킬 수 있다.

[0459] 임계 치수의 판정을 위한 샘플의 영상화는 산란 He 이온을 사용해 수행될 수 있다. 이것은, 높은 해상도 거리 판정 이외에, 재료 정보의 추가 이점을 제공한다.

[0460] 임계 치수 측정을 위한 이온 현미경 시스템의 사용 동안, 플루드 건이 샘플 표면의 과도한 하전을 방지하는데 사용될 수 있다(상기 논의 참고하기). 다른 방법으로 또는 추가적으로, 아주 낮은 (예를 들어, 100 fA 이하의) He 이온 빔 전류가 사용될 수 있다. 표면 전하를 감소시키고 이미지 충실도를 유지하는 이외에, 낮은 이온 전류의 사용은 소정 레지스트 재료에 대한 이온 빔 유도형 손상을 감소시킨다.

[0461] 일부 실시예에서, 임계 치수 측정을 위해 선택된 웨이퍼 샘플은 (예를 들어, 샘플의 단면 치수를 측정하기 위해) 먼저 섹션화되어야 할 수도 있다. 이 목적을 위해, Ne 및 Ar과 같은 좀더 무거운 가스가 이온 현미경에 사용되어, 샘플을 슬라이스하는데 사용될 수 있는 이온 빔을 형성할 수 있다. 다른 방법으로는, Ga-기반 FIB가 샘플을 섹션화하는데 사용될 수 있다. 그 다음, 현미경 시스템에서 이 가스는 제거되고 He가 도입될 수 있는데, 그에 따라, 임계 치수 측정은, 계측 동안의 샘플 손상을 방지하면서, He 이온 빔으로써 이루어진다.

[0462] (ix) LER(Line Edge Roughness) 및 LWR(Line Width Roughness)

[0463] LER은 일반적으로 반도체 제품에서의 재료선 에지의 거칠기를 의미하고, LWR은 일반적으로 반도체 제품에서의 재료선 폭의 거칠기를 의미한다. 소정 반도체 제품에 실제의 또는 가능성 있는 문제점이 존재하는지의 여부를 판정하기 위해서는 이 값을 이해하는 것이 바람직스러울 수 있다. 예를 들어, 전기 전도성 재료로 형성된 인접 라인이 서로를 향해 바깥쪽으로 돌출하는 에지를 가진다면, 라인은 서로 접촉하여 단락을 초래할 수도 있다. LER 및/또는 LWR의 치수는 5 nm 이하(예를 들어, 4 nm 이하, 3 run 이하, 2 nm 이하, 1 nm 이하, 0.9 nm 이하, 0.8 nm 이하, 0.7 nm 이하, 0.6 nm 이하, 0.5 nm 이하)라고 생각하는 것이 바람직스러울 수 있다. 일부 실시예에서, LER 및/또는 라인 에지 폭은 사양의 사이즈에 관한 통계 정보를 제공하기 위해 여러번 측정된다. 그에 더하여, LER과 같은 파라미터를 위한 가공 허용 오차는 아주 높을 수 있다. 예를 들어, 반도체 제품 사양의 LER은 5 nm 이하(예를 들어, 4 nm 이하, 3 nm 이하, 2 nm 이하, 1 nm 이하, 0.5 nm 이하, 0.1 nm 이하, 0.05 nm 이하, 0.01 nm 이하)로 제어되어야 할 수도 있다.

[0464] LER 및 LWR을 판정할 때, 웨이퍼는 검사를 위해 가공 라인으로부터 무작위로 선택될 수 있거나, 라인의 모든 웨이퍼가 검사될 수도 있다. 비교적 높은 처리율 속도에서 LER 및 LWR을 측정하기 위해 영상화 계기가 사용될 수 있다. 측정된 LER 및 LWR이 수용 가능한 제한내에 해당되지 않으면, 웨이퍼는 파기될 수도 있다. 특정한 가공 머신으로부터 기인하는 다중 샘플이 수용 가능한 제한을 벗어나는 LER 및 LWR을 갖는다면, 머신은 서비스에서 제외될 수 있거나 그것의 동작 파라미터가 변경될 수 있다.

[0465] 여기에서 개시된 가스 필드 이온 현미경(예를 들어, He 이온 현미경)이 LER 및 LWR의 계측에 사용될 수 있다. 특히, He 이온 빔이 사양의 길이를 따라 래스터 스캔될 수 있고, 결과적 정보는 비교적 높은 정밀도로써 LER 및

LWR을 판정하는데 사용될 수 있다.

[0466] LER 및 LWR 측정과 관련하여, He 이온 현미경 시스템은 SEM 및 다른 검사 시스템에 대하여 다수 이점을 제공할 수 있다. He 이온 현미경 이미지는 일반적으로, 필적 가능한 SEM 이미지보다 약한 에지 블루밍(일반적으로, 빔에 거의 평행한 경사의 지형 사양에서의 향상된 수율로 인해, 검출기의 포화점에 접근하는 과도 신호)을 나타낸다. 감소된 에지 블루밍은, 표면과 전자의 상호 작용 부피에 대하여, He 이온과 샘플 표면 사이의 좀더 작은 상호 작용 부피의 결과이다.

[0467] 그에 더하여, 입사 He 이온은 필적 가능한 입사 전자 빔보다 작은 스폿 사이즈로 포커싱될 수 있다. 좀더 작은 빔 스폿 사이즈는, 좀더 작은 상호 작용 부피와 결합하여, SEM으로써 발생되는 이미지보다 우수한 해상도를 가진 샘플 이미지 및 샘플의 임계 치수에 대한 좀더 정확한 판정을 초래한다.

[0468] He 이온 빔의 초점 깊이는 SEM에 대하여 비교적 크다. 결과적으로, 가변 깊이에서의 샘플 사양의 해상도는, 전자 빔에 대하여, 이온 빔을 사용할 때 좀더 일관적이다. 따라서, 이온 빔을 사용하는 것은, 전자 빔을 사용해 제공될 수 있는 것보다, 좀더 양호하고 좀더 일관적인 측면 해상도로써 다양한 샘플 깊이에서의 정보를 제공할 수 있다. 일례로서, 전자 빔으로써 실현될 수 있는 것보다 양호한 라인 폭 프로파일이 이온 빔을 사용해 실현될 수 있다.

[0469] 더 나아가, 이차 전자에 적어도 부분적으로 기초해 정보가 획득되는 실시예에서, 전자 빔에 대하여, 이온 빔에 의해 제공되는 이차 전자의 비교적 높은 수율은, 소정 전류를 위해 비교적 높은 SNR을 초래할 수 있다. 이것은, 차례로, 비교적 짧은 시주기에서 샘플에 관한 충분한 정보가 획득되는 것을 허용하여, 소정 전류를 위한 처리율을 증가시킬 수 있다.

[0470] 임계 치수의 판정을 위한 샘플의 영상화는 산란 He 이온을 사용해 수행될 수 있다. 이것은, 높은 해상도 거리 판정 이외에, 재료 정보의 추가 이점을 제공한다.

[0471] LER 및 LWR 측정을 위한 이온 현미경 시스템의 사용 동안, 플루드 건이 샘플 표면의 과도한 하전을 방지하는데 사용될 수 있다(상기 논의 참고하기). 다른 방법으로 또는 추가적으로, 아주 낮은 (예를 들어, 100 fA 이하의) He 이온 빔 전류가 사용될 수 있다. 표면 전하를 감소시키고 이미지 충실도를 유지하는 이외에, 낮은 이온 전류의 사용은 소정 레지스트 재료에 대한 이온 빔 유도형 손상을 감소시킨다.

[0472] 일부 실시예에서, LER 및 LWR 측정을 위해 선택된 웨이퍼 샘플은 (예를 들어, 샘플의 단면 치수를 측정하기 위해) 먼저 섹션화되어야 할 수도 있다. 이 목적을 위해, Ne 및 Ar과 같은 좀더 무거운 가스가 이온 현미경에 사용되어, 샘플을 슬라이스하는데 사용될 수 있는 이온 빔을 형성할 수 있다. 그 다음, 현미경 시스템에서 이 가스는 제거되고 He가 도입될 수 있는데, 그에 따라, 임계 치수 측정은, 계측 동안의 샘플 손상을 방지하면서, He 이온 빔으로써 이루어진다.

[0473] (x) 회로 편집

[0474] 앞서 논의된 바와 같이, 반도체 제품을 형성하는 프로세스는 통상적으로 재료의 상이한 다수 층을 소정 방식으로 적층하는 단계 및 각각의 층에 대해 적합한 프로세스를 수행하는 단계를 포함한다. 일반적으로, 이것은 소정 층에 재료를 증착하는 단계 및/또는 소정 층으로부터 재료를 제거하는 단계를 포함한다. 최종적인 반도체 제품은 (예를 들어, 소정 회로를 형성하기 위해) 상이한 층에 상이한 다수 사양을 포함한다. 일반적으로, 최종적인 디바이스가 원하는 바대로 기능하기 위해 사양은 적절하게 정렬되는 것이 바람직스러울 수 있다. 정렬 마크는 흔히 반도체 제품에서 소정 층의 사양을 상이한 층의 사양과 적절하게 정렬하는 것을 지원하는데 사용된다. 그러나, 정렬 마크를 사용하는 것은 전반적인 가공 프로세스에 추가 단계를 부가할 수 있고 그리고/또는 가공 프로세스에 다른 복잡도 또는 비용을 도입할 수 있다. 더 나아가, 정렬 마크의 단순한 존재는, (예를 들어, 능동 컴포넌트의 가공을 위해) 사용 불가능한 반도체 제품의 면적 및/또는 부피가 존재한다는 것을 의미한다.

[0475] 앞서 지적된 바와 같이, 이온 빔은 재료의 표면 아래 영역을 조사하는데 사용될 수 있다. 이 특성은, 반도체 제품의 상이한 층에서의 사양이 정렬 마크의 사용없이 원하는 바에 따라 정렬되는 것을 허용하면서, 표면층 바로 아래층에서의 소정 사양의 위치를 판정하는데 사용될 수 있다.

[0476] 여기에서 설명되는 가스 필드 이온 현미경(예를 들어, He 이온 현미경)은, 예를 들어, 앞서 언급된 가스 보조 화학 반응 및/또는 스퍼터링 기술을 사용해, (예를 들어, 전기 회로로부터) 재료를 제거 및/또는 증착하는데 사용될 수 있다. 이온 현미경을 사용해 이 프로세스를 수행하는 것의 이점은, 이온 빔은, 예를 들어, 소정 재료

가 적절하게 증착 또는 제거되었는지의 여부를 판정하기 위해 결과 제품을 평가하는데도 사용될 수 있다는 것이다. 이것은 디바이스 가공과 연관된 비용 및/또는 복잡도를 감소시킬 수 있고 그리고/또는 디바이스 가공의 처리율을 증가시킬 수 있다. 재료의 제거 및/또는 추가 역량은 조합되어 표면 아래 회로 수리를 수행할 수 있다. 표면 아래 결함을 수리하기 위해, 먼저, 디바이스로부터의 재료가 결함을 노출시키는 깊이까지 제거된다. 그 다음, 디바이스로부터의 재료를 추가하거나 제거하는 것에 의해, 결함이 수리된다. 마지막으로, 적합한 두께의 새로운 재료를 추가하는 것에 의해, 디바이스의 오버레이층이, 층 기반으로(layer-by-layer), 수리된다.

[0477] 여기에서 설명되는 가스 필드 이온 현미경(예를 들어, He 이온 현미경)은 가공된 디바이스의 제어되는 그리고 상당히 정확한 편집을 위한 작은 스폿 사이즈 및 낮은 이온 전류를 포함하는 회로 편집 애플리케이션을 위한 특정한 이점을 제공할 수 있다.

[0478] (x) 마스크 수리

[0479] 반도체 제품은 통상적으로, 표면에 포토레지스트(예를 들어, PMMA(poly(methyl methacrylate)) 또는 에폭시 기반 포토레지스트, ADC(allyl diglycol carbornate), 또는 감광 유리와 같은, 폴리머 포토레지스트)의 층을 배치하는 단계, 포토레지스트의 소정 영역이 에칭용 시약에 저항하도록(그리고 일부 영역은 에칭용 시약에 저항하지 않도록) 재료를 패터닝하는 단계, 재료의 에칭 비저항 영역을 에칭하는 단계, 적합한 재료(예를 들어, 하나 이상의 전기 전도성 재료, 하나 이상의 전기 비전도성 재료, 하나 이상의 반도체 재료)를 증착하는 단계, 및 재료의 원치않는 영역을 선택적으로 제거하는 단계를 포함하는 리소그래피 프로세스를 사용해 준비된다. 통상적으로, 패터닝하는 단계는, 포토레지스트의 일부 영역은 에칭 저항적이고 포토레지스트의 다른 영역은 에칭 저항적이지 않도록, 포토레지스트를 적합한 파장의 방사 패턴에 노출시키는 단계를 포함한다. 방사 패턴은, 포토레지스트상에 마스크의 이미지를 형성하거나 포토레지스트의 소정 영역을 마스크로 덮고 마스크를 통해 포토레지스트의 덮히지 않은 영역을 노출시키는 것에 의해, 포토레지스트에 형성될 수 있다.

[0480] 반도체 산업에서 가공된 집적 회로 및 다른 마이크로 전자 디바이스에 사용되는 포토리소그래피 마스크는 연성(fragile)일 수 있고 그리고/또는 고비용일 수 있다. 그에 더하여, 마스크 가공 프로세스는 시간 소모적일 수 있고 그리고/또는 정교할 수 있다. 일부 환경에서는, 그러한 마스크의 제조 동안 통상적으로 사용되는 주의에도 불구하고, 가공 오차가 마스크 결함을 발생시킨다. 다른 환경에서, 마스크 결함은 핸들링 및 일반적인 사용에서 발생할 수도 있다. 회로 또는 다른 디바이스가 결함있는 마스크를 사용해 발생된다면, 회로 또는 디바이스는 정확하게 동작하지 않을 수도 있다. 새로운 마스크를 가공하는데 필요한 시간 및 비용을 고려한다면, 전체적으로 새로운 마스크를 가공하는 것보다 결함있는 마스크를 편집하는 것이 좀더 비용 효과적일 수도 있다.

[0481] 마스크 결함은 일반적으로, 재료가 존재하지 않아야 하는 마스크 영역에서의 과도한 마스크 재료 및/또는 재료가 존재해야 하는 곳에서의 마스크 재료 부재를 포함한다. 어떤 상황에서든, 여기에서 설명되는 가스 필드 이온 현미경(예를 들어, He 이온 현미경)이 마스크를 검사 및/또는 수리하는데 사용될 수 있다.

[0482] 일부 실시예에서, 여기에서 개시되는 가스 필드 이온 현미경(예를 들어, He 이온 현미경)은 마스크를 검사하는데 사용되어, 결함이 존재하는지의 여부 그리고, 결함이 존재한다면, 결함이 어디에 존재하는지를 판정할 수 있다. 여기에서 개시되는 가스 필드 이온 현미경(예를 들어, He 이온 현미경)에 의해 제공되는 다양하고 유용한 사양 중 다수가 바람직스럽게도 마스크의 영상화에 사용된다.

[0483] 소정 실시예에서는, 마스크 수리 동안 마스크를 영상화하는 이외에, 가스 필드 이온 현미경(예를 들어, He 이온 현미경)이 수리 프로세스 동안에도 사용될 수 있다. 일례로서, 가스 필드 이온 현미경은, FIB가, 앞서 설명된 바와 같은, 가스 표면 화학 반응 프로세스 및/또는 에칭 프로세스를 사용해 마스크에 재료를 추가하고 그리고/또는 마스크로부터 재료를 제거하는데 사용될 수 있도록 하기 위해, 마스크를 FIB에 대하여 배치하는데 사용될 수 있다. 다른 일례로서, 가스 필드 이온 현미경은, 결함의 존재 및/또는 위치를 판정하기 위해 마스크를 처음에 영상화하는 이외에, 상술된 바와 같은, 가스 표면 화학 반응 프로세스 및/또는 에칭 프로세스를 사용해 마스크에 재료를 추가하고 그리고/또는 마스크로부터 재료를 제거하는데 사용될 수 있다. 선택적으로, 가스 필드 이온 현미경은, 다른 계기(예를 들어, FIB)가 다른 수리 단계(재료 추가, 재료 제거)를 수행하는데 사용되는 동안, 소정 수리 단계(재료 추가, 재료 제거)를 수행하는데 사용될 수 있다.

[0484] (xii) 결함 검사

[0485] 일반적으로, 반도체 제품을 가공하는 프로세스 동안, 제품은 가능성있는 결함을 위해 검사된다. 통상적으로, 검사는, 항상 실행되어 웨이퍼에 제공되는 그리고 완전 자동인 인라인 도구(in-line tool)를 사용해 수행된다. 도구는 흔히 웨이퍼의 작은 면적에 결함이 발생할 영역이 존재하는지의 여부를 검사하는데 사용된다. 이 검사

는 결함 검토(다음의 논의 참고하기) 이전에 수행된다. 결함 검사의 목적은 통상적으로, 소정 결함의 정확한 특징을 판정하는 것과는 대조적으로, 결함이 존재할 수 있는지의 여부를 판정하는 것이다. 결함 검사 동안, 웨이퍼의 영역은, 동일한 웨이퍼의 다른 영역 및/또는 다른 웨이퍼의 영역에 대하여, 어떤 변칙적인 특성(예를 들어, 전압 콘트라스트 특성, 지형 특성, 재료 특성)이 샘플에 의해 제시되는지의 여부를 알아보기 위해 분석된다. 통상적으로, 가능성있는 결함의 경우, 웨이퍼상의 좌표(예를 들어, X, Y 좌표)가 지시되고, 웨이퍼의 위치는 결함 검토 동안 좀더 주의깊게 검사된다.

[0486] 여기에서 설명되는 가스 필드 이온 현미경(예를 들어, He 이온 빔)은 결함 검사 동안 샘플에 관한 정보를 모으는데 사용될 수 있다. 그러한 현미경은 비교적 높은 처리율 및 고품질 결함 검사에 사용될 수 있다. 가스 필드 이온 현미경(예를 들어, He 이온 현미경)에 의해 제공되는 상이한 콘트라스트 메커니즘은 결함의 상이한 유형에 대한 그리고 광학 영상화 기술을 사용해 일반적으로 관찰될 수 있는 것보다 높은 해상도에서 시각화를 허용할 수 있다.

[0487] (xiii) 결함 검토

[0488] 일반적으로, 샘플이 결함 검사 동안 가능성있는 결함을 가지고 있는 것으로 지시되면, 그 다음, 그 샘플은, 가능성있는 결함을 가지고 있는 샘플의 특정한 영역(들)이 결함의 특징을 판정하기 위해 조사되는 결함 검토를 위해 제출된다. 이 정보에 기초해, 프로세스에 대한 변경이 구현되어, 최종적인 제품에서 결함의 위험을 감소시킬 수도 있다. 통상적으로, 결함 검사는 결함 검토보다 좀더 느린 속도 및 좀더 높은 배율에서 수행되고, 자동화되거나 수동으로 수행되어하나 이상의 결함에 관한 특정 정보를 획득할 수도 있다. 정보는 결함 검토 동안 변칙적인 결과가 획득된 이유와 변칙적인 결과를 발생시킨 결함의 특징 및 원인을 이해하는 것을 시도하는데 사용된다.

[0489] 여기에서 설명되는 가스 필드 이온 현미경(예를 들어, He 이온 현미경)은 가공 프로세스에서의 다양한 단계(예를 들어, 각 단계)에서 반도체 제품을 조사하는데 사용될 수 있다. 특히, 입자의 일 유형 또는 입자의 상이한 다중 유형(상기 논의 참고하기)을 검출하고 분석하는 것에 의해, 가스 필드 이온 현미경(예를 들어, He 이온 현미경)은 반도체 제품의 표면에 관한 지형 정보, 반도체 제품의 표면에 대한 재료 구성물 정보, 반도체 제품의 표면 아래 영역에 대한 재료 구성물 정보, 반도체 제품에 관한 결정 정보, 반도체 제품의 표면에 관한 전압 콘트라스트 정보, 반도체 제품의 표면 아래 영역에 관한 전압 콘트라스트 정보, 반도체 제품에 관한 자기 정보, 및/또는 반도체 제품에 관한 광학 정보를 판정하는데 사용될 수 있다. He 이온 현미경에 의해 제공되는 상이한 콘트라스트 메커니즘은, 그렇지 않고 SEM 기반 기술을 사용한다면 나타나지 않을 결함의 시각화를 허용할 수 있다.

[0490] 여기에서 설명되는 이온 현미경 또는 이온 빔을 사용하는 것은, 일반적으로, 반도체 제품 가공과 연관된 시간, 비용 및/또는 복잡도를 감소시킬 수 있는 다양하고 상이한 이점을 제공할 수 있다. 여기에서 설명되는 이온 현미경 또는 이온 빔을 사용하는 것과 연관된 예시적 이점으로는 비교적 높은 해상도, 비교적 작은 스폿 사이즈, 비교적 적은 바람직스럽지 못한 샘플 손상, 비교적 적은 바람직스럽지 못한 재료 증착 및/또는 이식, 비교적 짧은 시주기의 비교적 높은 품질 영상화, 비교적 높은 처리율을 들 수 있다.

[0491] (xiv) 회로 테스팅

[0492] 반도체 제품의 가공 동안, 제품의 하나 이상의 사양에 대한 전기 전도율 및 기능성이 테스트될 수도 있다. 이 프로세스는 일반적으로 사양(들)을 하전 입자에 노출시킨 다음, 전하가 누적되는 속도를 모니터링하는 단계를 포함한다. 개방 회로는 폐쇄 회로에 비해 상이한 속도에서 하전되어, 좀더 상세한 검사를 위해 개방 회로가 식별되고 고려되는 것을 허용할 것이다. 여기에서 설명되는 가스 필드 이온 현미경(예를 들어, He 이온 현미경)은 이온 빔을 사용해 사양에게로 전하를 인가하는데 사용될 수도 있고 그리고/또는 (예를 들어, 전압 콘트라스트 특징을 모니터링하는 것에 의해) 전하가 누설되었는지의 여부를 모니터링하는데 사용될 수도 있다. 선택적으로, 플루드 건이 전하를 인가하는데 사용될 수 있고(상기 논의 참고하기), 가스 필드 이온 현미경이 (예를 들어, 전압 콘트라스트 특징을 모니터링하는 것에 의해) 전하가 누설되었는지의 여부를 모니터링하는데 사용될 수 있다.

[0493] *B. 금속 및 합금 부식*

[0494] He 이온 현미경은 다양한 디바이스 및 재료에서의 금속 부식을 식별하고 검사하는데 사용될 수 있다. 예를 들어, 원자력 발전소(NPP;nuclear power plants), 군사 애플리케이션, 및 생체 의학 애플리케이션에 사용되는 금속 설비 및 디바이스는, 그것이 배치되는 가혹한 환경으로 인해 부식을 경험할 수 있다. He 이온 현미경은, 부

식의 신뢰 가능한 지시자로서 기능하는, 디바이스에서의 수소(H)의 상대 도수에 기초해 이들 및 다른 디바이스의 이미지를 구성하는데 사용될 수 있다.

[0495] 통상적으로, 산란 H 이온 또는 원자에 기초해 이미지를 구성하기 위해서, 이러한 이온 또는 원자에 대한 검출기는, 입사 He 이온 빔의 반대쪽인, 샘플의 뒤쪽에 배치된다. 샘플을 He 이온에 노출시키는 것은 샘플내에서 산란 H 원자 및 이온을 발생시키고, 이러한 산란 H 원자 및 이온은 검출되어 샘플의 이미지를 구성하는데 사용될 수 있다. 그 다음, H 도수 이미지는 샘플내에서 부식의 정도를 평가하는데 사용될 수 있다. He 이온 빔의 작은 스폿 사이즈 및 상호 작용 부피는 샘플을 손상시키지 않으면서 샘플의 고해상도 H 이미지가 획득될 수 있게 한다.

[0496] *C. 데이터 저장을 위한 판독/기입 구조*

[0497] 하드 디스크와 같은 자기 저장 디바이스에 사용되는 판독/기입 헤드는 상당히 큰 허용 오차로 가공되므로 설치 이전에 제조 결함을 위해 검사되어야 한다. 이 디바이스는 대체로 아주 높은 가로세로비를 갖고; 그러한 디바이스의 짧은 측면은 1 nm만큼 작을 수도 있다. He 이온 현미경은, 검사 동안 이러한 디바이스를 영상화하는데 사용되어 다수 이점을 제공한다. 그 중에서도, 작은 스폿 사이즈 및 상호 작용 부피는 이처럼 작은 디바이스의 고해상도 영상화를 초래할 수 있고, 큰 초점 깊이는 전체적으로 큰 가로세로비 디바이스의 긴 치수를 따라 그것에 대한 초점이 맞는 영상화를 허용할 수 있으며, 산란 He 이온 및/또는 중성 원자의 측정에 의해 제공되는 재료 정보는 작은 회로 소자가 적절하게 접속되는지를 확인하는데 사용될 수 있다.

[0498] *D. 생명공학*

[0499] 비파괴 기술을 사용해 생물학 샘플에 관한 원소 및/또는 화학 구성 정보를 판정하는 것이 흔히 소망될 수 있다. 생물학 샘플의 일례로는 조직, 핵산, 단백질, 탄수화물, 지방질 및 세포막을 들 수 있다.

[0500] 여기에서 설명되는 가스 필드 이온 현미경(예를 들어, He 이온 현미경)은, 예를 들어, 생물학 샘플에 관한 지형 정보, 생물학 샘플 표면의 재료 구성물 정보, 생물학 샘플의 표면 아래 영역에 관한 재료 구성물 정보 및/또는 생물학 샘플에 관한 결정 정보를 판정하는데 사용될 수 있다. 예를 들어, 가스 필드 이온 현미경은 면역으로 분류된(immuno-labeled) 세포 및 내부 세포(internal cell) 구조를 영상화하는데 사용될 수 있다. 현미경은 여기에서 개시된 소정 이점을 제공하면서 이런 식으로 사용될 수 있다.

[0501] *E. 약학*

[0502] 대체로, 치료제(예를 들어, 소분자 약품)는 (예를 들어, 그것이 용액에서 벗어날 때) 결정을 형성할 것이다. 결정화된 소분자의 결정 구조를 판정하는 것이 소망될 수 있는데, 이것은, 예를 들어, 소분자의 수화(hydration) 정도에 관한 정보를 제공할 수 있고, 다음으로, 이것은, 소분자의 생물학적 이용도(bioavailability)에 관한 정보를 제공할 수 있기 때문이다. 소정 경우에서, 결정 정보는, 소분자가 실제로는 (결정에 반대되는) 비결정 형태임을 증명한다고 판명될 수도 있고, 이는, 소분자의 생물학적 이용도에도 영향을 미칠 수 있다.

[0503] 추가적으로 또는 다른 방법으로, 비파괴 기술을 사용해 생물학 샘플에 관한 원소 및/또는 화학 구성 정보를 판정하는 것이 흔히 소망될 수 있다.

[0504] 여기에서 설명되는 가스 필드 이온 현미경(예를 들어, He 이온 현미경)은, 예를 들어, 생물학 샘플에 관한 지형 정보, 생물학 샘플 표면의 재료 구성물 정보, 생물학 샘플의 표면 아래 영역에 관한 재료 구성물 정보 및/또는 생물학 샘플에 관한 결정 정보를 판정하는데 사용될 수 있다. 현미경은 여기에서 개시된 소정 이점을 제공하면서 이런 식으로 사용될 수 있다.

[0505] 컴퓨터 하드웨어 및 소프트웨어

[0506] 일반적으로, 앞서 설명된 분석 방법 중 어떤 것도 컴퓨터 하드웨어, 소프트웨어, 또는 양자의 조합으로 구현될 수 있다. 이 방법은 여기에서 설명되는 방법 및 수치를 준수하는 표준 프로그래밍 기술을 사용해 컴퓨터 프로그램으로 구현될 수 있다. 프로그램 코드가 입력 데이터에 적용되어, 여기에서 설명되는 기능을 수행하고 출력 정보를 발생시킨다. 출력 정보는 디스플레이 모니터와 같은 하나 이상의 출력 디바이스에 적용된다. 각각의 프로그램은 컴퓨터 시스템과 통신하기 위한 고급 절차 프로그래밍 언어 또는 객체 지향 프로그래밍 언어로 구현될 수도 있다. 그러나, 프로그램은, 원한다면, 어셈블리 또는 기계어로 구현될 수도 있다. 어떤 경우라도, 언어는 컴파일되거나 해석된 언어일 수 있다. 더 나아가, 프로그램은 그러한 목적을 위해 미리 프로그램된 전용

집적 회로에서 실행될 수도 있다.

[0507] 그러한 컴퓨터 프로그램 각각은, 저장 매체 또는 디바이스가 컴퓨터에 의해 판독될 때, 여기에서 설명되는 절차를 수행하도록 컴퓨터를 구성하고 동작시키기 위해, 범용 또는 특수 목적 프로그램 가능 컴퓨터에 의해 판독 가능한 저장 매체 또는 디바이스(예를 들어, ROM 또는 자기 디스켓)에 저장되는 것이 바람직스럽다. 컴퓨터 프로그램은 프로그램 실행 동안 캐시 또는 메인 메모리에도 상주할 수 있다. 분석 방법은, 컴퓨터 프로그램으로써 구성된, 컴퓨터 판독 가능 저장 매체로서도 구현될 수 있는데, 이 경우, 그렇게 구성된 저장 매체는 컴퓨터를 특정된 소정 방식으로 동작시켜 여기에서 설명된 기능을 수행하게 한다.

[0508] 다른 실시예

[0509] 소정 실시예가 설명되었지만, 다른 실시예도 가능하다.

[0510] 일례로서, SEM이 가스 필드 이온 현미경과 결합하여 선행 실시예 중 하나 이상에 사용될 수 있다. 예를 들어, SEM이 이차 전자, 오제 전자, X-선 광자, IR 광자, 가시 광자 및/또는 UV 광자를 발생시키는데 사용될 수 있다. 선택적으로, SEM이 가스 보조 화학 반응을 촉진하는데 사용될 수 있다. 가스 필드 이온 현미경은 여기에서 설명되는 동작 모드 중 어떤 것으로도 구성될 수 있고, 그에 따라, SEM 및 가스 필드 이온 현미경은 상보적인 기능을 수행한다.

[0511] 다른 일례로서, W(111) 팁이 개시되었지만, W의 상이한 결정 방향도 팁에 사용될 수 있다. 예를 들어, W(112), W(110) 또는 W(100) 팁이 사용될 수도 있다.

[0512] 추가 일례로서, 일부 실시예에서, 이온 현미경(예를 들어, 가스 필드 이온 현미경)은, 반도체 산업에 관련된 샘플(예를 들어, 웨이퍼 샘플)과 같은, 샘플의 분석에 현미경이 인라인으로 사용될 수 있도록 하기 위한 적합한 컴포넌트를 포함할 수 있다. 소정 실시예에서, 예를 들어, 이온 현미경은 표준 사이즈의 반도체 웨이퍼를 위한 고속 로드 록(loadlock)으로써 자동화될 수도 있다. 일부 실시예에서, 시스템은 샘플 웨이퍼의 일부를 고속으로 이온 현미경 아래쪽에 배치할 수 있는 웨이퍼 스테이지를 포함할 수도 있다. 이온 현미경은 계측 패턴을 고속으로 래스터링할 수 있는 스캔 시스템도 포함할 수 있다. 선택적으로, 이온 현미경은 샘플 하전을 감소시키기 위한 전하 중화 방식도 포함할 수 있다. 이온 현미경은 작업 거리를 조정하기 위한 웨이퍼 높이 제어 모듈도 포함할 수 있다. 소정 실시예에서, 시스템은, (예를 들어, 50 mm 정도의 길이를 가진) 개개 다이가 영상화될 수 있도록 구성될 수도 있다.

[0513] 실시예

[0514] 다음의 일례는 제한적인 것이 아니라 예시적인 것이다.

[0515] 1.

[0516] FEI Company(Hillsboro, OR)로부터 단결정 W(111)(지름 250 μm)로 형성된 25 mm 길이의 이미터 와이어가 획득되었다. 이미터 와이어는 3 mm 길이로 손질되어 따로 준비되었다. V형 히터 와이어가 다음과 같이 준비되었다. Goodfellow(Devon, PA)로부터 13 mm 길이의 다결정 텅스텐 와이어(지름 180 μm)가 획득되었고, 탄소 잔류물 및 다른 불순물을 제거하기 위해 초음파에 의해 15 분 동안 증류수로 세정되었다. 와이어는 그것의 중앙점에서 구부러져 115° 의 각도를 형성하였다. "V"의 선단 부근 영역은, 그것을 NaOH(sodium hydroxide)의 1 N 수용액에서의 용접을 위해 준비시키기 위해, 약 15 초 구간 동안의 1 V 및 주파수 60 Hz의 인가 AC 전위로써 전기 화학적으로 에칭되었다. 그 다음, 히터 와이어는 에칭 용액으로부터 제거되었고, 증류수로 세정되었으며, 건조되었다.

[0517] V형 히터 와이어는, 와이어의 끝이 같은 평면에 유지된다는 것을 보장하도록 설비에 장착되었다. 이미터 와이어는 히터 와이어의 V형 선단에 스폿 용접되었다. 그 다음, 히터 와이어의 2개 끝은 도 11A 및 도 11B에 도시된 유형의 지지 베이스의 2개 포스트에 스폿 용접되었다. 지지 베이스는 AEI Corporation(Irvine, CA)으로부터 획득되었다. 그 다음, 결과 어셈블리는 증류수로 초음파 세정되고 건조되었다.

[0518] 지지 베이스로의 이미터 와이어 마운트 및 지지 베이스의 세정 이후에, 이미터 와이어의 끝은 다음과 같이 전기화학 프로세스에 의해 에칭되었다. 먼저, 레지스트 재료(예를 들어, Revlon Corporation, New York, NY으로 획득되는 매니큐어 액)가, 와이어의 자유로운 끝으로부터 시작해, 이미터 와이어의 0.5 mm 길이까지 도포되었다. 한 방울의 레지스트가 깨끗한 유리 현미경 슬라이드의 표면에 배치되었고, 와이어는, 각각의 담그기(dipping) 사이에서 레지스트가 약간씩 건조되게 하면서, 레지스트 용액에 10회 담궈졌다. 레지스트의 상단 경계가 원형이라는 것과 원의 평면이 와이어의 축에 대해 수직으로 유지된다는 것을 보장하기 위한 주의가 기울

여졌다. 이미터 와이어의 끝을 레지스트 재료에 마지막으로 담근 다음, 와이어는 공기중에서 1 시간 동안 건조되었다.

[0519] 그 다음, 레지스트 코팅된 이미터 와이어가 부착된 지지 베이스는 (a) 지지 베이스를 수직으로 병진시키기 위한 병진 장치; (b) 접시; 및 (c) 원치않는 화학 반응을 최소화하기 위한, 스테인레스강으로 형성된, 접시쪽으로 연장하는, 카운터 전극을 포함하는 에칭 설비에 부착되었다. 접시는, 용액이 카운터 전극과 접촉하는 높이까지 에칭 용액으로 채워졌다. 약 150 mL의 용액이 에칭 설비 접시(etching fixture dish)에 존재하였다. 지지 베이스의 방향은, 이미터 와이어의 종축이 수직 방향(예를 들어, 병진 장치가 지지 베이스의 병진을 위해 제공되는 방향)과 대략적으로 평행하다는 것을 보장하도록 조정되었다. 그 다음, 지지 베이스는, 노출된 이미터 와이어가 에칭 용액과 겨우 접촉될 때까지, 병진 장치를 사용해 접시를 향해 하강되었다. 에칭 설비에 장착된 고배율 카메라는 레지스트층 및 에칭 용액 표면이 쉽게 관찰될 수 있게 하여, 용액 표면에 관한 이미터 와이어의 정확한 배치를 가능하게 하였다.

[0520] 그 다음, 와이어는 에칭 용액쪽으로 0.2 mm 추가 하강되었다. 이 위치에서, 이미터 와이어의 레지스트 코팅 부분은 에칭 용액에 완전히 담궈졌다.

[0521] 에칭 용액은 2.5 M의 수용성 NaOH 150 mL로 이루어졌다. 젖음(wetting)을 용이하게 하기 위해, 한 방울의 계면활성제(Eastman Kodak, Rochester, NY으로부터 획득되는 PhotoFlo 200)가 에칭 용액에 추가되었다. 자기 교반기를 사용하는 에칭 용액의 부드러운 교반도 에칭 프로세스 동안에 이용되었다.

[0522] 외부 전원 공급기가 지지 베이스 포스트 및 카운터 전극에 접속되었다. 외부 전원 공급기의 전압 최대 진폭, 펄스 구간, 및 파형은 에칭 설비에서 특정한 에칭 조건을 제공하도록 제어될 수 있었다.

[0523] 60 Hz 주파수의 AC 펄스 시퀀스가 이미터 와이어에 인가되어 전기 화학 에칭 프로세스를 용이하게 하였다. 먼저, 580 ms 구간 및 10 V 진폭의 100개 펄스가 총 5 분의 시간창에 걸쳐 인가되었다. 인가된 펄스의 효과는 에칭 프로세스 속도를 증가시키는 것이었다. 용액에 담궈졌지만 레지스트 재료로 덮히지 않은 이미터 와이어 부분이 에칭되기 시작하였다. 이미터 와이어는, 포토레지스트 재료의 에지 위쪽에 와이어의 코팅되지 않은 작은 영역만이 용액에 담궈지도록 배치되었기 때문에, 이 영역에서 이미터 와이어의 국지화된 에칭이 관찰되었다. 전기 화학 반응이 진행됨에 따라, 이 영역에서의 와이어 지름은 에칭 프로세스로 인해 좁아지기 시작하였다.

[0524] 다음으로, 외부 전원 공급기의 펄스 구간은 325 ms로 조정되었고, 이러한 구간의 60개 펄스가 총 5 분의 시간창에 걸쳐 이미터 와이어에 인가되었다. 이 펄스는 전기 화학 에칭 프로세스를 추가적으로 촉진하여, 아주 작은 지름의 이미터 와이어 에칭 영역을 초래하였다.

[0525] 마지막으로, 외부 전원 공급기의 펄스 구간은 35 ms로 조정되었고, 에칭이 완료될 때까지 개개 펄스가 이미터 와이어에 인가되었으며, 이미터 와이어의 레지스트 코팅 부분이 에칭 용액쪽으로 하강되었다. 그 다음, 지지 베이스는 에칭 설비로부터 제거되었고, 증류수로 세정되었으며, 질소의 흐름하에서 건조되었다.

[0526] 그 다음, 이미터 와이어는 - 여전히 지지 베이스에 부착된 상태로 - 에칭된 팁이 적당한 기하 구조 사양을 갖는지를 확인하기 위해 SEM을 사용해 검사되었다. 5 keV에서 그리고 3 nm의 프로브 사이즈로써 동작하는 AMRAY Model 1860 SEM이 이미터 와이어 팁을 영상화하는데 사용되었다. 지지 베이스는, 수동의 경사 및 회전 스테이지가 장비된 샘플 매니퓰레이터의 SEM 샘플 영역에 설치되었다. 팁이 정확하게 성형되었는지를 확인하기 위해 수개의 상이한 관찰 관점 및 배율로부터 소스의 이미지가 획득되었다.

[0527] 그 다음, SEM 이미지는, 와이어의 팁 선단에 대해 앞서 논의된 바와 같이, 평균 완전 원추각, 평균 팁 반지름, 및 평균 원추 방향을 특징짓는데 사용되었다. 이러한 측정에 사용되는 이미지는 65,000 X의 배율에서 그리고 이미터 와이어의 축에 대해 오른쪽 각도로 배향된 시청축(viewing axis)을 따라 취해졌다. 이미터 와이어 경사는 SEM 샘플 매니퓰레이터를 사용해, 이미터 와이어가 시청축에 대하여 수직으로 배향된다는 것을 보장하도록 조정되었다. 팁의 원추각, 원추 방향, 및 반지름의 평균 측정치를 형성하기 위해, SEM 샘플 매니퓰레이터는 연속 이미지 사이에서 (이미터 와이어의 축에 대하여) 45° 만큼 팁을 회전시키는데 사용되었다. 이것은 - 상이한 관점으로부터 하나씩, 팁의 8개 이미지 세트를 산출하였고, 이것은, 그 다음, 팁의 원추각, 곡률 반경, 및 원추 방향을 판정하는데 사용되었다.

[0528] 8개 개개 이미지 중 4개가 도 37A 내지 도 37D로 도시된다. SEM 이미지 각각은 비트맵 포맷으로 디지털화된 다음, MathCAD 소프트웨어 패키지(PTC Inc., Needham, MA)를 사용해서 개발된 맞춤형 알고리즘을 사용해 분석되었다. 먼저, 이미지 각각은, 이미지 잡음, 특히 영상화 동안에 발생된 SEM의 진동으로 인한 잡음을 감소시키기 위해 Gaussian 컨벌루션 알고리즘(convolution algorithm)을 적용하는 것에 의해 완화되었다. 다음으로는, 임

계 밀도값에 기초한 필터링 단계가 이미지 각각에 적용되어 텅스텐 팁과 검은색 배경 사이의 경계를 강조하였다. 그 다음, 팁에 대응되는 이미지 픽셀과 검은색(예를 들어, 0-밀도) 배경에 대응되는 이미지 픽셀 사이의 구별(demarcation)을 형성한 0이 아닌 밀도(X,Y) 포인트의 세트로서, 이미지 각각에서의 팁 경계가 판정되었다. 팁의 뷰 중 하나를 위한 (X,Y) 포인트의 그러한 일 세트가 도 38로 도시된다. 경계 포인트의 유사한 세트가 팁의 8개 사시도 각각을 위해 판정되었다.

[0529] *소정 경계 곡선의 경사를 계산하기 전에, 곡선의 국지적 경사가 잡음 및 다른 작은 신호 변화에 비교적 둔감하다는 것을 보장하기 위해 평활화 알고리즘(smoothing algorithm)이 곡선에 적용되었다. 평활화 알고리즘은, 미가공 (X,Y) 데이터 포인트를 팁의 형태를 잘 설명하는 것으로 밝혀진 4차원 다항식으로 피팅하는 단계로 이루어졌다. 평활화 알고리즘의 효과는, 선단 위치의 어느 한쪽에서도, 이 곡선의 일차 미분이 형태에서의 작은 변화에 의해 과도하게 영향받지 않는다는 것을 보장하는 것이었다.

[0530] 평활화 단계 이후에는, 유한 차분(finite difference) 알고리즘을 사용해 각각의 뷰를 위한 경계 곡선상의 X 포인트 각각에서 경사(dY/dX)가 계산되었다. 도 39는 도 38에 도시된 경계 곡선을 위한 X의 함수로서의 경계 곡선상의 포인트에서 계산된 경사 그래프를 나타낸다.

[0531] 팁의 특정한 뷰에 대해, 경사가 0 값을 획득한, 그 뷰에 대응되는 경계 곡선상의 위치가 팁 선단으로서 식별되어 X_{apex} 레이블이 부여되었다. 경계 곡선의 경사가 1의 값을 획득한, 팁 선단에 가장 근접한, (X,Y) 포인트에 대응되는 경계 곡선상의 위치에는 X_{+1}의 레이블이 부여되었다. 경계 곡선의 경사가 -1의 값을 획득한, 팁 선단에 가장 근접한, (X,Y) 포인트에 대응되는 경계 곡선상의 위치에는 X_{-1}의 레이블이 부여되었다.

[0532] 그 다음, 이러한 측정 포인트는 팁의 기하 구조 파라미터를 판정하는데 사용되었다. 특정한 뷰에서의 팁의 왼쪽 반지름은, 1.414만큼 배율된, X_{+1}과 X_{apex} 사이의 차이에 대한 절대값으로서 계산되었다. 특정한 뷰에서의 팁의 오른쪽 반지름은, 1.414만큼 배율된, X_{-1}과 X_{apex} 사이의 차이에 대한 절대값으로서 계산되었다. 그 다음, 왼쪽 및 오른쪽 반지름 값에 기초해, 특정한 뷰에서의 팁의 곡률 반경이 왼쪽 반지름과 오른쪽 반지름 값의 평균으로서 계산되었다.

[0533] 오른쪽 반지름, 왼쪽 반지름, 및 팁 곡률 반경의 계산은 팁의 8개 사시도 각각을 위해 반복되었다. 그 다음, 팁의 뷰 모두에서의 팁 곡률 반경 측정치의 평균으로서 평균 팁 반지름이 계산되었다. 도 37A 내지 도 37D에 도시된 팁의 경우, 평균 팁 반지름은 62 nm인 것으로 판정되었다.

[0534] 팁 왼쪽 및 오른쪽 반지름 모두의 표준 편이(standard deviation)도 계산되어, 평균 팁 반지름의 백분율로서 표현되었다. 도 37A 내지 도 37D에 도시된 팁의 경우, 이심률은 11.9%인 것으로 판정되었다.

[0535] 8개 사시도 각각에서의 팁의 원추각도 판정되었다. 각각의 뷰에 대응되는 경계 곡선에서, 경계 곡선에서의 왼쪽 및 오른쪽 탄젠트 포인트는, 앞서 논의된 바와 같이, Y 방향을 따라 측정된, 팁 선단으로부터의 1 μm 위치에서, 각각, 팁 선단의 왼쪽 및 오른쪽 측면에 배치되었다. 그 다음, 특정한 뷰에서의 팁의 왼쪽 원추각이, 왼쪽 탄젠트 포인트에서의 경계 곡선에 대한 탄젠트와 Y 축에 평행하게 왼쪽 탄젠트 포인트를 통해 연장하는 라인 사이의 각도로서 판정되었다. 특정한 뷰에서의 팁의 오른쪽 원추각은, 오른쪽 탄젠트 포인트에서의 경계 곡선에 대한 탄젠트와 Y 축에 평행하게 오른쪽 탄젠트 포인트를 통해 연장하는 라인 사이의 각도로서 판정되었다. 마지막으로, 왼쪽 및 오른쪽 원추각의 크기의 합으로서 완전 원추각이 판정되었다.

[0536] 그 다음, 팁의 8개 사시도로부터의 팁의 완전 원추각의 8개 측정치의 평균을 계산하는 것에 의해 팁의 평균 완전 원추각이 판정되었다. 예를 들어, 도 37A 내지 도 37D에 도시된 팁의 경우, 평균 완전 원추각은 34.5° 인 것으로 판정되었다.

[0537] 팁의 특정한 뷰에 대해, 원추 방향은 왼쪽 원추각과 오른쪽 원추각의 크기 사이의 차이에 대한 절대값의 1/2로서 계산되었다. 팁의 8개 뷰 각각을 위해 이 판정을 반복하는 것을 통해 팁의 원추 방향에 대한 8개 측정치를 산출하였다. 그 다음, 팁의 평균 원추 방향은 원추 방향의 이러한 8개 측정치의 평균으로서 계산되었다. 도 37A 및 도 37B에 팁에 대해, 평균 원추 방향은 2.1° 인 것으로 판정되었다.

[0538] 평균 팁 반지름, 반지름 이심률, 평균 원추각, 및 평균 원추 방향의 측정치에 기초한 한 세트의 기준이, 소정 팁이 He 이온 현미경에서의 사용을 위해 수용될 것인지의 여부를 판정하는데 사용되었다. 일반적으로, 이러한 기준은 다음과 같았다. 측정된 평균 원추각이 15° 와 45° 사이이고, 평균 팁 반지름이 35 nm와 110 nm 사이이

며, 팁 곡률 반경 측정치의 표준 편이가 30% 미만이고, 평균 원추 방향이 7° 미만이라면, 팁은 수용되었다. 궁극적으로, 도 37A 내지 도 37D에 도시된 팁은 이러한 기준 각각을 충족시켰고, He 이온 현미경에서의 사용을 위해 수용되었다.

[0539] 팁의 기하학적 특성을 확인한 후에, 팁은 맞춤형 내장 FIM(custom-built FIM)으로 검사되었다. FIM은 팁을 지지하는 지지 어셈블리를 위한 장착 면적, 팁을 바이어스하기 위한 고전압 전원 공급기, 팁에 인접한 추출기, 및 팁으로부터의 이온 방사 패턴을 기록하기 위한 검출기를 포함하였다.

[0540] 추출기는 팁으로부터 5 mm 거리만큼 이격되었고, 10 mm의 개구부를 가졌다. 추출기는 외부 그라운드에 접지되었다. MCP(microchannel plate)와 (Burle Electro-Optics Inc., Sturbridge, MA로부터 획득되는) 이미지 증배관의 조합인 검출기가 추출기로부터 75 mm 거리에 배치되었다.

[0541] 팁을 포함하는 지지 어셈블리가 FIM에 설치되었고, FIM 챔버는 $1x10^{-8}$ Torr의 배경 압력까지 소개되었다. 팁은 액체 질소를 냉각제로서 사용해 77 K까지 냉각되었다. 온도 평형 이후에, 소스는 5 분 동안 900 K까지 가열되어, 프로세싱하는 동안 팁에 형성되었던 응축물 또는 다른 불순물을 탈착하였다. 팁의 가열은, 팁이 용접된 히터 와이어쪽으로 전기 전류를 인가하는 것에 의해 실현되었다. 전류는 일정한 파워 역량의 전원 공급기(Spellman High Voltage Inc., Hauppauge, NY로부터 입수 가능한 Bertan Model IB-30A)를 사용해 인가되었다. 온도 측정은 (Pyro Corporation, Windsor, NJ로부터 획득되는) 광학 파이로미터(pyrometer)를 사용해 이루어졌다.

[0542] 후속적으로, 팁은 다시 77 K까지 냉각되었고, FIM 추출기는 접지되었으며, 팁은 추출기에 대하여 +5 kV로 바이어스되었다. 고순도 He 가스(99.9999% 순도)가 $1x10^{-5}$ Torr의 압력에서 FIM 챔버쪽으로 도입되었다. 팁 바이어스는, 팁을 떠나는 He 이온에 대응되는 He 이온 이미지가 검출기에서 관찰될 때까지, 증분적으로(in increments) +29 kV까지 점증되었다. FIM 방사 패턴은 팁 표면에서의 약 300개 원자에 대응되었다. FIM 패턴에 기초해, 팁의 단결정 구성 및 W(111) 방향이 확인되었다.

[0543] 다음으로, 팁은 팁 선단에서 터미널 원자 삼량체를 획득하도록 정교화되었다. 헬륨 가스는, 챔버에서의 배경 압력이 $1.2x10^{-8}$ Torr 미만일 때까지 FIM 챔버에서 배출되었다. 그 다음, 팁은, 상술된 바와 같은 히터 와이어쪽으로의 전류 인가를 통해, 2 분 동안 1500 K의 온도까지 가열되었다. 산소 가스가 $1x10^{-5}$ Torr의 압력에서 팁 부근의 FIM 챔버쪽으로 도입되었다. 2 분 후에, 팁 온도는 1100 K까지 감소되었다. 2 분 후 1100 K에서, 산소 공급은 차단되었고, 팁은 약 77 K까지 냉각되었다. 냉각되는 동안 그리고 산소 공급이 차단된 15 분 후에, 잔류 산소 가스는, 챔버에서의 배경 압력이 $1.2x10^{-8}$ Torr 미만일 때까지 FIM 챔버에서 배출되었다.

[0544] 일단 액체 질소 온도까지 냉각되고 나면, 추출기는 앞서와 같이 바이어스되었고, 팁은 추출기에 대하여 +5 kV로 다시 바이어스되었다. $1x10^{-5}$ Torr 압력의 He 가스가 FIM 챔버쪽으로 도입되었고, FIM은 앞서 설명된 바와 같이 다시 한번 동작되어 팁의 He 방사 이미지를 획득하였다. 팁 전압은, 팁의 FIM 이미지가 팁에 대해 약 +18 kV 바이어스 전위의 검출기에 의해 캡처될 때까지 점증되었다.

[0545] 관찰된 FIM 패턴은 흡착 원자(adatoms) - 팁 선단에서의 소정의 3 원자 삼량체 구조 이외에 추가 원자 - 를 포함하였다. 흡착 원자는 +18 kV 팁 바이어스 전위에서의 필드 증발에 의해 느리게 제거되었다. 필드 증발 동안, 팁의 이미지는 주기적으로 캡처되었고, 필드 증발 프로세스를 중단해야 할 때를 판정하기 위해 모니터링되었다. 흡착 원자는, 팁 선단에서의 원자 삼량체에 대한 선명한 FIM 이미지가 관찰될 때까지 하나씩 제거되었다. 원자 삼량체 이외에, 3면 피라미드의 능선(ridges)도 선명하게 관찰되었다.

[0546] 원자 삼량체는 팁의 추가 필드 증발에 의해 느리게 제거되었다. 팁 바이어스를 +18 kV 이상으로 느리게 증가시키는 것에 의해, 삼량체 원자는 하나씩 제거되어, 검출기에 의해 기록되는 FIM 이미지에서 관찰되는 둥근 팁을 초래하였다.

[0547] 팁 바이어스 전위는 +28 kV까지 추가 증가되었다. 팁 원자의 필드 증발은 이 프로세스 동안 계속되었다. +28 kV의 바이어스 전위에서, 다른 원자 삼량체가 팁 선단에서 획득되었다. 제2 삼량체의 FIM 이미지는 도 40으로 도시된다. 제2 삼량체가 획득된 후, 팁 바이어스 전위는 FIM 방사 패턴에서 최고 각밀도를 실현하도록 감소되었다. 이것은 +23 kV의 팁 바이어스에서 발생하였다. 최고 각밀도는, FIM 방사 패턴에서 선택 원자의 관찰되는 최대 밝기를 획득하도록 팁 바이어스를 조정하는 것에 의해 판정되었다. 최고 방사 각밀도가 발생된 바이어스는, 팁의 전위 바이어스가 조정됨에 따라, 삼량체로부터 He 이온 전류를 측정하는 것에 의해 확인되었다. He

이온 전류는 He 이온 빔의 경로에 배치된 Faraday 컵을 사용해 측정되었다.

[0548] 그 다음, 팁은, 팁의 바이어스 전위를 +28 kV 이상으로 서서히 증가시키고 팁 선단으로부터 원자를 필드 증발시키는 것에 의해, 거의 끝 모양이 구형인 정도까지 무뎌졌다. 필드 증발은, +34 kV 바이어스 전위의 팁 표면에서 다른 원자 삼량체가 획득될 때까지 계속되었다. 팁 재구축 절차의 반복 가능성을 확인하기 위해, 정교화 프로세스는 2회 더 반복되어 팁 선단에서 새로운 원자 삼량체를 획득하였다. 2회의 연속적인 삼량체 재구축 후에, 헬륨 가스 공급은 차단되었고, 인가되는 팁 바이어스는 제거되었으며, 팁은 실온까지 데워졌고, FIM 챔버 압력은 대기 압력까지 서서히 균일화되었다. 팁은, 여전히 지지 어셈블리에 장착된 상태에서, 그것이 헬륨 이온 현미경에 사용될 때까지, 2 주의 주기 동안 셸프(shelf)에 보관되었다.

[0549] 팁을 포함하는 지지 어셈블리는 도 1 및 도 5에 도시된 시스템과 유사한 헬륨 이온 현미경 시스템에 설치되었다. 시스템의 소자는 다음과 같이 구성되었다. 추출기는 팁으로부터 1 ㎜에 배치되었고, 지름 3 ㎜의 개구부를 가졌다. 이온 광학계의 제1 렌즈는 추출기로부터 30 ㎜의 거리에 배치되었다. 제1 렌즈를 통과한 후, 이온은, 사중극자 전극으로서 구성된 정렬 편향기를 통과하였다. 이온 빔의 일부분을 선택적으로 차단하기 위해 20 ㎛ 지름의 개구부를 갖춘 간극이 이온의 경로를 따라 추가 배치되었다. 이온 궤적의 교차점은 간극 앞쪽의 50 ㎜ 거리에 배치되었다. 이온 빔의 비점 수차를 조정하기 위해, 팔중극자 전극으로서 구성된 비점 수차 정정기가 간극 이후에 배치되었다. 샘플의 표면을 가로지르는 이온 빔의 래스터링을 허용하기 위해, 팔중극자 전극으로서 구성된 스캔 편향기가 비점 수차 정정기 이후에 배치되었다. 제2 렌즈는 간극으로부터 150 ㎜ 거리에 배치되어, 이온 빔을 샘플 표면상에 포커싱하는데 사용되었다. 제2 렌즈는, 완전 원추각이 90° 인 절두형(truncated) 직각 원추로서 성형되었다.

[0550] 처음에, 이온 현미경 시스템은, 팁 면적에서의 베이스 압력이 약 $2x10^{-9}$ Torr이도록 소개되었다. 팁은 액체 질소를 사용해 약 80 K까지 냉각되었다. 추출기는 접지된 다음, 추출기에 대하여 +5 kV의 바이어스가 팁에 인가되었다.

[0551] 팁은, (약 1100 K의 팁 온도에 대응되어) 그것이 가시적으로 빨갛게 달아 오를 때까지, 히터 와이어쪽으로 8 W의 전력을 인가하는 것에 의해 가열되었다. 빨갛게 달아 오른 팁으로부터 방출되는 광자는, 이온 광학계의 종축에 대해 수직인 평면에 대하여 45° 로 기울어진 거울을 사용해, 이온 광학계의 측면 포트로부터 관찰되었다. 거울은 이러한 목적을 위해, 이온 열(ion column)의 측면 포트를 통해, 정렬 편향기의 바로 아래쪽에 위치하도록, 이온 광학계에 도입되었다. 팁은, 빨갛게 달아 오른 팁이 이온 광학계의 종축을 따라 대략적으로 조준될 때까지, 반복하여 기울여지고 이동되었다. 빨갛게 달아 오른 팁이 원형 포인트 소스처럼 보일 때에, 종축과 팁의 적당한 정렬이 실현된 것이다. 팁이 막대형처럼 보인다면, 팁은 오정렬된 것이다.

[0552] 팁은, 팁을 추출기에 대하여 +5 kV의 전위 바이어스로 유지하면서, 냉각되는 것이 허용되었다. 일단 팁이 액체 질소 온도까지 냉각되고 나면, He 가스가 $1x10^{-5}$ Torr의 압력에서 팁 영역으로 도입되었다. 이온 현미경 시스템은, 상술된 바와 같이, SFIM 모드에서 실행되어, 팁의 He 이온 방사 패턴을 나타내는 이미지를 발생시켰다. 이 이미지는 원자 정밀도에 대한 팁의 형태를 지시한다. 정렬 전극이, 팁으로부터 발생된 이온 빔을 간극의 표면에 걸쳐 래스터링하는데 사용되었다. 톱니 모양 함수의 최대 전압이 현미경 시스템의 공통의 외부 그라운드에 대하여 150 V인 톱니 모양 전압 함수가 정렬 편향기 각각에 인가되어, 10 Hz 프레임 속도의 래스터링을 실현하였다. 래스터 패턴은 이온 광학계의 축을 가로지르는 2개 직교 방향 각각에서 256개 포인트를 스캔하였다. 이러한 영상화 모드에서 비점 수차 정정기 및 스캔 편향기는 사용되지 않았다.

[0553] 간극을 통과한 이온을 검출하기 위해, 구리의 샘플이 제2 렌즈 아래쪽에 배치되었고, MCP 검출기는 양으로(공통의 외부 그라운드에 대하여 +300 V로) 바이어스되어, 샘플과 샘플로 입사하는 He 이온 사이의 상호 작용으로 인해 구리 샘플을 떠나는 이차 전자를 측정하였다. 검출기는 샘플로부터 10 ㎜ 거리에 배치되고 샘플의 평면에 평행하게 배향되었다.

[0554] 획득 시스템은 래스터 포인트 각각에서의 검출기 신호를 샘플링하여, 모니터에 디스플레이되는 팁의 SFIM 이미지를 발생시켰다. 영상화를 용이하게 하기 위해, 이온 열에서의 제1 렌즈의 전위는 팁 바이어스의 77%이도록 설정되었다. 그 다음, 팁 바이어스가 증가됨에 따라, SFIM 이미지는 대략 일정한 배율과 밀도로 유지되었다. SFIM 이미지를 관찰하면서, 팁 바이어스는 서서히 증가되어, 원치않는 흡착 원자를 제거하였고 그것의 선단에서 원자 삼량체의 팁을 발생시켰다. 이 삼량체는 팁 바이어스 전위를 좀더 증가시켜 팁 원자의 필드 증발을 발생시키는 것에 의해 제거되었다. 필드 증발은, +23 kV의 인가되는 팁 전위에서 새로운 원자 삼량체가 팁의 선단에 형성될 때까지 계속되었다. 이러한 팁에 대한 결과적 SFIM 이미지가 도 41로 도시된다.

[0555] 정렬 편향기, 비점 수차 정정기, 스캔 편향기, 및 제2 렌즈가 오프(예를 들어, 현미경 시스템의 공통의 외부 그라운드에 대하여 0 전위)인 상태에서, 삼량체 중 1개 원자가 선택되었고, 팁은, 제1 렌즈의 강도가 100 V만큼 변조되는 동안, 기울여지고 병진되었다. 현미경 시스템은 FIM 모드에서 동작되었고, 검출기는 팁의 FIM 방사 이미지를 수집하였다. 팁은, 제1 렌즈의 강도가 변조되었을 때, FIM 이미지에 대한 팁의 중앙 위치가 이미지에 따라 변경되지 않을 때까지, 반복하여 기울여지고 병진되었다.

[0556] 다음으로, 간극이 배치되었고, 간극에서의 이온 빔 위치를 제어하기 위해, 정렬 편향기에 인가되는 전위가 조정되었다. 간극을 통해 투과되는 이온 빔의 일부분은 검출기에 의해 영상화되었고, 검출기 이미지는 정렬 편향기를 반복하여 조정하는데 사용되었다.

[0557] 스캔 편향기는 간극을 통해 투과되는 이온 빔을 샘플의 표면에 걸쳐 래스터링하는데 사용되었다. 샘플 표면에서의 인식 가능한 높은 콘트라스트 사양(구리 격자)(Structure Probe International, West Chester, PA로부터 획득되는, 부품 번호 02299C-AB)이 제2 렌즈 아래쪽의 이온 빔 경로에 배치되었고, 사양의 이차 전자 이미지는 앞서 논의된 구성을 사용해 검출기에 의해 측정되었다.

[0558] 제2 렌즈의 강도는 이온 빔을 샘플 표면에 포커싱하도록 대략적으로 조정되었고; 제2 렌즈에 인가되는 전위 바이어스는 공통의 외부 그라운드에 대하여 약 15 kV였다. 초점의 품질은 검출기에 의해 기록되는 샘플의 이미지로부터 시각적으로 평가되었다. 제2 렌즈의 축에 관한 이온 빔의 정렬은 - 1 Hz 주파수 및 제2 렌즈 동작 전압의 약 0.1% 변조 진폭에서 - 제2 렌즈의 강도를 서서히 변조시키고 사양의 변위를 관찰하는 것에 의해 평가되었다. 최종 렌즈에서의 빔 정렬은 정렬 편향기의 전압을 조정하는 것에 의해 최적화되었다. 검출기에 의해 측정되는 이미지의 중앙 위치가 제2 렌즈의 강도에 대한 변조 동안 크게 달라지지 않는 경우에, 정렬은 최적화된 것이다.

[0559] 그 다음, 샘플은 제2 렌즈의 강도를 조정하는 것에 의해 좀더 높은 배율에서 영상화되었고, 그에 따라, 샘플에 대한 FOV는 약 2 μm^2이었다. 초점의 비대칭은 비점 수차 정정기 제어를 조정하는 것에 의해 최소화되었다. 이러한 제어는, 이미지 및 구체적으로 에지의 선명도를 모든 방향에서 관찰하면서, 조정되었다. 비점 수차 정정은, 포커싱된 이미지의 선명도가 모든 방향에서 동일할 때 완성된 것이다. 통상적으로, 단지 30 V가 비점 수차 정정기에 인가되어 이 조건을 실현하였다. 이 시점에서, 헬륨 이온 현미경은 완전하게 동작 가능하였다.

[0560] 동작 가능한 현미경은 다양한 샘플을 영상화하는데 사용되었다. 이차 전자를 측정하는 것에 의해 기록되는 샘플 이미지가 도 42 및 도 43으로 도시된다.

[0561] 영상화 조건은 광범위한 빔 전류(100 pA 내지 1 fA)를 포함하였다. 빔 전류는 몇가지 방법에 의해 제어되었다. 첫번째, 상이한 지름 홀의 상이한 간극이 동력화된 간극 메커니즘(motorized aperture mechanism)을 사용해 배치되었다. 간극 메커니즘은, 지름이 5 μm에서 100 μm에 이르는 간극을 포함하였다. 두번째, 제1 렌즈 초점 강도는 빔 교차를 이온 광학계에서의 간극 평면에 좀더 근접하게 이동시키도록 조정되었고, 그에 따라, 좀더 큰 이온 전류가 샘플에 도달되었다. 반대로, 제1 렌즈 초점 강도는 빔을 간극 평면으로부터 좀더 멀리 이동시키도록 조정되었고, 그에 따라, 좀더 적은 이온 전류가 간극을 통과하였다. 세번째, 팁 영역에서의 헬륨 가스 압력은, 각각, 이온 빔 전류를 증가 또는 감소시키기 위해 증가되거나 감소되었다.

[0562] 빔 에너지는 통상적으로 최상의 각밀도를 위해 선택되었고; 빔 에너지는 통상적으로 17 keV에서 30 keV의 범위에 해당되었다. 빔 에너지는 팁의 변화 형태에 응답하여 시간에 걸쳐 변화되었다.

[0563] 사용되는 검출기의 유형 및 검출기의 설정은, 이온 현미경으로써 검사되는 샘플의 유형에 따라 선택되었다. 샘플의 이차 전자 이미지를 측정하기 위해, 공통의 외부 그라운드에 대하여 약 +300 V로 바이어스된 금속 격자와 함께 ET 검출기가 사용되었다. ET 검출기에 내장된 신틸레이터는 외부 그라운드에 대하여 +10 kV로 바이어스되었고, 내부 PMT의 이득은 포화없이 가능한 최대 신호를 발생시키도록 조정되었다.

[0564] (Burle Electro-Optics, Sturbridge, MA로부터 획득되는) MCP 검출기도 샘플로부터의 이차 전자 및/또는 산란 He를 검출하는데 사용되었다. MCP 격자, 전면, 및 후면은 외부 그라운드에 대하여 각각 바이어스될 수 있었다. 검출기의 이득은 MCP의 후면을 전면에 대하여 양으로 바이어스하는 것에 의해 실현되었다. 통상적인 이득 전압은 1.5 kV였다. 후면에 인접한 콜렉터 플레이트는 후면에 대하여 +50 V로 바이어스되었다. 콜렉터 플레이트로부터, 검출 신호는, 큰 양전압에 중첩되는 작은 가변 전류의 형태였다. 이차 전자의 수집을 위해, MCP의 전면 및 격자는 +300 V로 바이어스되었다. 산란 He의 수집을 위해, 전면 및 격자는 -300 V로 바이어스되었다.

[0565] 래스터 속도는 샘플 각각의 최상 영상화 조건을 위한 필요에 따라 조정되었다. 매 픽셀당 지속 시간은 100 ns

에서 500 μs의 범위였다. 좀더 짧은 지속 시간을 위해, 다중 스캔을 평균하는 것에 의해 잡음이 감소되었다. 이것은 연속적인 라인 스캔을 위해 그리고 연속적인 프레임 스캔을 위해 수행되었다.

[0566] 도 42에 도시된 이미지는 실리콘 기판상의 복수개 탄소 나노튜브의 이미지이다. 이미지는 나노튜브의 표면으로부터 이차 전자를 검출하는 것에 의해 획득되었다. ET 검출기는 샘플로부터 8 mm 거리 및 이온 빔으로부터 15 mm 비축(off-axis)에 배치되었고 샘플의 평면에 대하여 20° 의 각도로 배향되었다. He 이온 빔 전류는 0.5 pA 이었고, 평균 이온 에너지는 21 keV였다. 이온 빔은 매 픽셀당 200 μs의 지속 시간으로써 래스터 스캔되었고, 총 이미지 획득 시간은 200 초였다. 이미지의 FOV는 4 μm였다.

[0567] 도 43에 도시된 이미지는 실리콘 기판상의 알루미늄 포스트의 이미지이다. 이미지는 나노튜브의 표면으로부터 이차 전자를 검출하는 것에 의해 획득되었다. 상술된 유형의 MCP 검출기가, 격자 및 전면이 외부 그라운드에 대하여 +300 V로 바이어스된 상태에서, 샘플로부터 10 mm 거리에 배치되었고 샘플의 평면에 대해 평행하게 배향되었다. He 이온 빔 전류는 0.5 pA였고, 평균 이온 에너지는 24 keV였다. 이온 빔은 매 픽셀당 200 μs의 지속 시간으로써 래스터 스캔되었다. 샘플 표면의 FOV는, 스캔 편향기쪽으로 1 V의 최대 전압을 인가하는 것에 의해 획득되는, 1 μm였다.

[0568] 헬륨 이온 현미경에서 이러한 팁과의 동작은, 이온 소스를 공급하기 위해 시스템을 환기시킬 필요가 전혀 없는 상태에서(without any need to vent the system to service the ion source), 수 주 동안 계속되었다. 의도적으로나 정상 사용을 통해서나, 삼량체 원자가 제거됨에 따라, 팁의 끝 형태는, 도 44에서의 SFIM 이미지에서 지시되는 바와 같이, 좀더 구형이 되었다. 본래의 장소에서, 팁을 정교화하기 위해 FIM에서 처음부터 수행되었던 동일한 가열 및 산소 구축 레시피를 사용하는 것에 의해 피라미드 재구축(정교화)이 필요에 따라 수행되었다. 일반적으로, 각각의 재구축 프로세스는 5 분 미만의 시간을 소비하였고, 그렇지 않다면, 시스템은 수 주의 이러한 주기 동안 사용 가능할 수 있었다. 전반적으로, 팁은 8회 이상 재구축되었다. 선단 팁에서의 재구축된 원자 삼량체의 이미지는 도 45에서 도시된다.

[0569] 2.

[0570] W(111) 팁이 지지 어셈블리에 장착되었고 실시예 1에서 설명된 절차에 따라 전기 화학적으로 에칭되었다. 팁의 SEM 이미지는 도 46으로 도시된다. 팁의 기하학적 캐릭터리제이션(characterization)은 실시예 1에서의 절차에 따라 수행되었다. 이러한 팁의 경우, 평균 팁 반지름은 70 nm인 것으로 판정되었다. 팁은 실시예 1에서의 기준에 기초해 사용을 위해 수용되었다.

[0571] 팁의 기하학적 특성이 수용 가능한 제한내에 해당된다는 것을 확인한 후, 에칭된 팁을 포함하는 소스 어셈블리가 실시예 1에서 설명된 FIM에 설치된다. FIM의 구성은, 다음에서 지적되는 경우를 제외하면, 실시예 1에서 논의된 구성과 동일하였다. 팁에 대한 전위 바이어스는, 추출기에 대하여, +21.8 kV의 전위까지 천천히 증가되었다. 전위가 증가됨에 따라, 팁 원자의 필드 증발이 발생하였다. +21.8 kV에 도달한 후, 팁 전위는 +19.67 kV로 감소되었다. 도 47에 도시된 팁의 FIM 이미지는, 팁이 이 전위로 유지되는 상태에서 획득되었다. 이 이미지를 사용해, 팁의 단결정 구조 및 정확한 방향이 확인되었다.

[0572] 다음으로, 팁은 선단에서 원자 삼량체를 발생시키기 위해 정교화되었다. 헬륨은 FIM 챔버로부터 배출되었고, 팁은 4.3 A의 일정한 전류를 20 초 동안 팁에 인가하는 것에 의해 가열되었다. FIM 열(column)에 설치되어 열 축을 따라 전파하는 광을 열의 측면 포트쪽으로 재유도하도록 각도가 정해진, 기울어진 거울이 팁을 관찰하는데 사용되었다. 눈에 대해 가시적인 글로(glow)(예를 들어, 팁으로부터 방출되는 광자)가 존재하지 않으므로, 팁은 5 분 동안 냉각될 수 있었다. 그 다음, 팁은 4.4 A의 일정한 전류를 20 초 동안 팁에 인가하는 것에 의해 가열되었다. 눈에 대해 가시적인 글로가 존재하지 않으므로, 팁은 5 분 동안 냉각될 수 있었다. 그 다음, 팁은 4.5 A의 일정한 전류를 20 초 동안 팁에 인가하는 것에 의해 가열되었다. 눈에 대해 가시적인 글로가 존재하지 않으므로, 팁은 5 분 동안 냉각될 수 있었다. 그 다음, 팁은 4.6 A의 일정한 전류를 20 초 동안 팁에 인가하는 것에 의해 가열되었다. 이 온도에서는, 글로가 팁으로부터 선명하게 가시적이었다. 그에 따라, 팁 글로를 유도하는데 필요한 전류는 4.6 A인 것으로 확립되었다. 그 다음, 소스는 5 분 동안 냉각될 수 있었다.

[0573] *다음으로는, 팁으로부터의 전자 방사 전류를 모니터링하면서, 팁쪽으로 음 바이어스가 인가되었다. 바이어스는, 팁으로부터 50 pA의 전자 방사 전류가 관찰될 때까지, 점진적으로 음화되었다. 이 전류에서의 팁 바이어스는 -1.98 kV였다. 이 바이어스가 팁쪽으로 여전히 인가되는 상태에서, 4.6 A의 가열 전류가 팁에 인가되었다. 약 20 초 후에 팁 글로가 다시 관찰되었다. 팁 글로가 관찰된 후에, 팁의 가열은 다시 10 초 동안 연장되었다.

그 다음, 팁에 인가되는 바이어스 전위 및 가열 전류는 팁으로부터 제거되었고, 팁은 액체 질소 온도까지 냉각될 수 있었다.

[0574] 일단 팁이 냉각되고 나면, 추출기에 대하여 + 5 kV의 양 바이어스가 팁에 인가되었다. He 가스가, $1x10^{-5}$ Torr의 압력에서, 팁 부근의 FIM 챔버쪽으로 수용되었다. 팁 선단의 FIM 이미지는 실시예 1에서 설명된 바와 같이 획득되었다. FIM 이미지는, 바이어스가 증가됨에 따라 좀더 선명하게 보여졌다. 도 48의 이미지는 +13.92 kV의 팁 바이어스에서 관찰되었다. 이미지는 원자 삼량체에 대응되는 피라미드의 능선 및 밝은 중앙 선단을 나타낸다.

[0575] 팁에서의 방출 원자 중 일부는 느슨하게 속박된 흡착 원자였고, 팁 원자의 필드 증발을 통해 증가된 필드 강도로써 제거되었다. 팁 바이어스는 좀더 증가되었고, 제1 및 제2 삼량체는 +21.6 kV까지의 필드 증발에 의해 제거되었다. 이 전위에 도달한 후, 팁 바이어스는 +18.86 kV까지 감소되었고, 도 49에서의 팁의 FIM 이미지가 기록되었다.

[0576] 실시예 1에서 식별된 기준에 기초해, 팁은 실용적인 것으로 식별되었고 FIM으로부터 제거되었다. 약 1 달 후에, 팁은 실시예 1에서 설명된 바와 같이 구성된 헬륨 이온 현미경에 장착되었다. 삼량체는, 산소 가스가 사용되지 않았다는 것을 제외하면, 실시예 1에서 설명된 바와 같은 프로세스로 수차례 재구축되고 증발되었다. 대신에, 삼량체 재구축 프로세스는, 히터 와이어에 인가되는 4.6 A 전류로써 팁을 가열하여 20 초 동안 히터 와이어의 가시적 글로를 초래하는 동시에, (50 pA의 전자 방사 전류를 발생시키기 위해) 팁쪽으로 특정 음 전위 바이어스를 인가하는 것에 의존하였다. 팁은 헬륨 이온 현미경에 잔존되었고 및 팁을 공급하기 위해 시스템을 환기시킬 필요없이 4 주 이상 사용되었다. 이 주기 동안, 팁은, 앞서 논의된 바와 같이, 음의 인가 전위 바이어스 및 가열을 수반하는 절차를 사용해 수차례 재구축되었다. 팁의 재구축 삼량체의 SFIM 이미지는 도 50으로 도시된다.

[0577] 이러한 팁의 He 이온 현미경을 사용해 기록된 반도체 샘플의 이미지가 도 51로 도시된다. 샘플은 실리콘 산화물 기판의 표면에 증착된 알루미늄 금속의 선로를 포함하였다. 이러한 재료 각각의 상단에 미지 코팅이 증착되었다.

[0578] 최대 진폭 1 V의 스캔 전압이 스캔 편향기에 대해 도입되어 샘플에 대해 10 μm의 FOV를 발생시켰다. 제1 및 제2 렌즈, 정렬 편향기, 및 비점 수차 정정기의 전위는, 실시예 1에서 설명된 바와 같이, 간극을 통과하는 He 이온 빔의 일부분을 제어하도록 그리고 샘플 위치에서의 빔 초점 품질을 제어하도록 조정되었다. 샘플은 영상화 동안 기울여지고 회전되어 측벽의 3차원 특징 및 세부 사항을 드러내었다.

[0579] 도 51에 도시된 이미지는 샘플 표면으로부터의 이차 전자를 측정하는 것에 의해 기록되었다. MCP 검출기는 샘플로부터 10 mm 거리에 배치되었고, 샘플 표면에 대해 평행하게 배향되었다. MCP 격자 및 전면은, 공통의 외부 그라운드에 대하여, +300 V로 바이어스되었다. He 이온 빔 전류는 4 pA였고, 평균 이온 에너지는 21.5 keV였다. 총 이미지 획득 시간은 30 초였다.

[0580] 이러한 팁을 사용해 촬영된 다른 반도체 샘플의 이미지가 도 52에 도시된다. 샘플은, 표면 사양이 금속으로 형성된 다층 반도체 디바이스였다. 이미지는, 입사 He 이온과 샘플의 상호 작용으로 인해 샘플의 표면을 떠나는 이차 전자를 측정하는 것에 의해 기록되었다. 150 V의 최대 스캔 전압이 스캔 편향기에 인가되어 샘플 표면에서 1.35 mm의 FOV를 발생시켰다.

[0581] 샘플은 하향식 관점(top down perspective)으로부터 관찰되었고, 이는, 샘플 표면에서의 다수 사양을 나타낸다. 이미지를 기록하기 위해, 격자 및 전면이 공통의 외부 그라운드에 대하여 +300 V로 바이어스된 MCP 검출기가 샘플로부터 10 mm 거리에 배치되었고, 샘플 표면에 대해 평행하게 배향되었다. He 이온 빔 전류는 15 pA였고, 평균 이온 에너지는 21.5 keV였다. 이온 빔은 매 픽셀당 10 μs의 지속 시간으로써 래스터 스캔되었다.

[0582] 3.

[0583] 이 실시예의 팁은 실시예 2에서 설명된 바와 같은 절차를 사용해 준비되었고 헬륨 이온 현미경에 정렬되었다. 팁의 기하학적 캐릭터리제이션은 실시예 1에서의 절차에 따라 수행되었다. 팁은 실시예 1에서의 기준에 기초해 사용을 위해 수용되었다.

[0584] 직접 측정 또는 보외 측정(extrapolated measurement)에 의해, 공지의 빔 전류에서 그리고 공지의 획득 시간 동안 샘플의 이미지를 획득할 수 있었다. 빔 전류는 피코-전류계(Model 487, Keithley Instruments, Cleveland, OH)와 함께 Faraday 컵을 사용해 주의깊게 모니터링되었다. 팁 영역에서의 He 압력도 (Varian Vacuum Inc,

Lexington, MA로부터 입수 가능한) Baynard Alpert형 이온화 게이지(ionization gauge)를 사용해 주의깊게 모니터링되었다. He 이온 전류가 너무 낮아 정확하게 측정될 수 없는 (예를 들어, 약 0.5 pA 미만인) 상황에서, 이온 전류는 측정된 He 가스 압력에 기초한 보외에 의해 판정되었다. 통상적으로, He 가스 압력 및 He 이온 전류는 서로 선형적으로 비례하고, 선형 관계는 팁에서 팁까지 일관적이다.

[0585] 샘플은 지형 사양을 갖춘 금 격자 샘플(Structure Probe International, West Chester, PA로부터 획득되는, 부품 번호 02899G-AB)이었다. 샘플은 입사 He 이온에 응답하여 샘플 표면으로부터 이차 전자 방사를 측정하는 것에 의해 영상화되었다.

[0586] 이미지를 기록하기 위해, (Burle Electro-Optics, Sturbridge, MA로부터 획득되는) 40 mm 지름의 환상(annular), 역V자형(chevron-type) MCP 검출기가 샘플로부터 10 mm 거리에 배치되었고, 샘플의 표면에 대해 평행하게 배향되었다. 검출기는 약 1.8 스테라디안의 입체각을 소비하였고, 이온 빔에 대하여 대칭이었다. 검출기는, 도 66에 도시된 바와 같이, 제2 렌즈의 바닥에 직접적으로 장착되었다. MCP의 전면은 공통의 외부 그라운드에 대하여 양(+300 V)으로 바이어스되었고, 이 또한 (공통의 외부 그라운드에 대하여) 양(+300 V)로 바이어스된 내부 금속 격자가 존재하였다.

[0587] 평균 이온 에너지는 20 keV였다. 샘플의 이미지는, 각각, 1 pA, 0.1 pA 및 0.01 pA의 빔 전류로써 측정되었고, 각각, 도 53, 도 54, 및 도 55으로 도시된다. 총 이미지 획득 시간은, 각각, 33 초, 33 초, 및 67 초였다.

[0588] 처음의 2개 이미지(도 53 및 도 54)의 경우, 이미지 사이즈는 1024x1024 픽셀이었다. 세번째 이미지(도 55)의 경우, 이미지 사이즈는 512x512 픽셀이었다. 각각의 이미지에서, 약 2 V의 최대 스캔 전압이 스캔 편향기에 인가되어 샘플 표면에서 20 μm의 FOV를 발생시켰다.

[0589] 산란 헬륨 이온 및/또는 중성 원자가 이러한 기록 이미지에 크게 기여하지 않았다는 것을 확인하기 위해, 격자 및 MCP 바이어스 전위는, 신호가 관찰되지 않는 -50 V로 변경되었다. 이러한 이미지의 잡음 내용은, 동일한 전류, 동일한 픽셀 수, 및 동일한 총 획득 시간을 위한 샘플의 SEM 이미지로써 획득될 잡음 내용보다 낮은 것으로 인식되었다.

[0590] 4.

[0591] 팁은 지지 어셈블리에 장착되고, 도 56에 도시된 바와 같이, 지지 어셈블리에서, 소스 베이스에 부착된 2개의 포스트가 서로를 향해 미리 구부러졌다는 것을 제외하면, 실시예 1에서 설명된 방법을 사용해 가공되었다. 벤드(bend)로 인해, 히터 와이어는 훨씬 짧은 길이에 미칠 수 있었다. 히터 와이어는, 실시예 1에서 설명된 바와 같이, 지름 180 μm의 다결정 텅스텐 와이어였다. 구부러진 포스트와 함께, 5 mm의 히터 와이어 길이가 사용되었다. 좀더 짧은 히터 와이어 길이의 이점은, 와이어의 길이가 감소함에 따라, 와이어 길이의 강직성이 증가한다는 것이다. 이미터 와이어는 실시예 1에서 설명된 바와 같이 일상적인 방법으로 부착되었다.

[0592] 짧은 히터 와이어의 증가된 강직성은, 하나는 실시예 1에서 설명된 유형의 지지 어셈블리에 장착되고 다른 하나는 도 56에 도시된 지지 어셈블리에 장착된, 상이한 2개 팁에 동일한 힘을 인가하는 것에 의해 관찰되었다. 인가되는 힘에 응답하여 2개 팁의 편향이 비교되었다. 실시예 1형 지지 베이스와 비교하여, 구부러진 포스트 지지 어셈블리는, 좀더 작은 6의 팩터였던 양만큼 편향되었다. 따라서, 구부러진 포스트형 지지 어셈블리의 고유한 진동 주파수(약 4 kHz)는 실시예 1의 지지 어셈블리에 대한 고유 주파수보다 약 2.5배 높았다. 좀더 높은 주파수와 함께, 지지 베이스 및 팁은, 사실상 고유한 진동 주파수 미만의 진동 주파수에서 여기될 때, 일치하여 (예를 들어, 무시할 수 있는 위상 시프트로써) 이동되었다. He 이온 현미경으로 구현될 때, 구부러진 포스트 소스 어셈블리에서의 팁에 대한 비교적 낮은 진동은, 이온 현미경 이미지가 팁 진동으로 인한, 빔 착륙 오차와 같은, 상당한 이미지 아티팩트를 가질 가능성을 감소시켰다.

[0593] 5.

[0594] 팁은, 상이한 히터 와이어가 사용되었다는 것을 제외하면, 실시예 1에서 설명된 절차에 따라 준비되었다. 이 실시예에 사용되는 히터 와이어는, 실시예 1의 히터 와이어 지름보다 약 25%만큼 더 큰 지름을 가졌다. 두꺼운 히터 와이어는 진동 이동에 대하여 덜 순종적이었는데, 일반적으로, 와이어의 강직성은 증가하는 지름과 함께 증가하기 때문이다. 그에 더하여, 두꺼운 히터 와이어는 텅스텐-레늄 합금(74% 텅스텐, 26% 레늄)으로부터 형성되었다. 합금 와이어는 실시예 1의 텅스텐 히터 와이어보다 상당히 높은 전기 저항률을 가졌는데; 전반적인 히터 와이어 저항은 약 0.5 Ω인 것으로 측정되었다. 적당한 텅스텐-레늄 합금 와이어는 Omega Engineering(Stanford, CT)으로부터 획득되었다.

[0595] 두꺼운 히터 와이어는, 팁을 포함하는, 지지 어셈블리의 고유 주파수를 약 1.5 kHz(실시예 1)에서 약 2.2 kHz(이 실시예)로 증가시켰다. He 이온 현미경으로 구현될 때, 이러한 히터 와이어 어셈블리를 갖춘 소스 어셈블리에서의 팁에 대한 비교적 낮은 진동은, 이온 현미경 이미지가 팁 진동으로 인한, 빔 착륙 오차와 같은, 상당한 이미지 아티팩트를 가질 가능성을 감소시켰다.

[0596] 6.

[0597] 팁은, 히터 와이어가 (MINTEQ International Pyrogenics Group, Easton, PA로부터 획득되는) 열분해 탄소의 블록으로 대체되었다는 것을 제외하면, 실시예 1에서 설명된 프로세스에 의해 형성되었다. 소스 어셈블리의 포스트는 서로를 향해 구부러졌고, 평행한 평탄 표면을 갖도록 가공되었다. 이미터 와이어를 장착하기 위해, 포스트는 이격되었고, 열분해 탄소의 2개 블록이 포스트 사이에 삽입되었다. 탄소 블록 사이에 이미터 와이어가 배치되었고, 그 다음, 포스트는 해제되었다. 지지 베이스에 관한 이미터 와이어의 상대적 이동을 방지하면서, 탄소 블록에 인가되는 압축력이 블록 및 지지 어셈블리에 위치한 이미터 와이어를 고정시켰다. 구부러진 포스트, 2개의 탄소 블록, 및 이미터 와이어를 포함하는, 지지 어셈블리의 일부분이 도 57로 도시된다.

[0598] 열분해 탄소 블록의 사이즈는, 탄소 블록 및 이미터 와이어가 압축 상태이도록 선택되었다. 탄소 블록이 제자리에 위치하지 않으면, 구부러진 포스트 사이의 공간은 1.5 mm였다. 탄소 블록은 2개의 구부러진 포스트 사이의 방향을 따라 각각 700 μm의 길이를 가졌다. 이미터 와이어는 250 μm의 지름을 가졌다.

[0599] 열분해 탄소 블록은 (예를 들어, 열분해 탄소 블록에서의 탄소 평면이 포스트를 결합하는 라인에 대략적으로 수직 배향된 상태에서) 구부러진 포스트에 대하여 최대 전기 저항 및 최소 열 전도율을 위해 배향되었다. 지지 어셈블리의 전기 저항은 1500 K에서 4.94 Ω인 것으로 측정되었는데, 이는, 실시예 1의 지지 어셈블리에 대한 저항(0.56 Ω)보다 큰 것이다. 팁을 1500 K까지 가열하는데 필요한 전력은 (실시예 1에서 팁을 1500 K까지 가열하는데 필요했던 약 11 W에 대하여) 6.4 W였다. 팁은, 히터 와이어의 부재로 인해, 소스 베이스에 대하여 비교적 단단하게 고정되었다. 지지 어셈블리의 고유한 진동 주파수는 3 kHz보다 컸다.

[0600] 헬륨 이온 현미경으로 구현되었을 때, 팁의 어느 한쪽 측면의 열분해 탄소 블록에 인가되는 압축력에 의해 제자리에 고정된, 이러한 소스 어셈블리에서의 팁의 비교적 낮은 진동은, 이온 현미경 이미지가 팁 진동으로 인한, 빔 착륙 오차와 같은, 상당한 이미지 아티팩트를 가질 가능성을 감소시켰다.

[0601] 7.

[0602] 팁은 실시예 1에서 설명된 절차에 따라 준비되었고, 기하학적 팁 특성의 캐릭터리제이션은 실시예 1에서 설명된 바와 같이 수행되었다. 팁은 실시예 1에서의 기준에 기초해 사용을 위해 수용되었다.

[0603] 팁은 실시예 1에서 설명된 절차를 사용해 FIM으로 정교화되었다. 그 다음, 팁은 He 이온 현미경에 설치되고 구성되었다. 현미경 시스템은 실시예 1에서 설명된 바와 같이 구성되었는데, 구성에 대한 변화는 다음에서 지적된다.

[0604] 현미경 시스템은, 입사 He 이온과 샘플의 상호 작용으로 인해 샘플을 떠나는 이차 전자를 측정하도록 구성되었다. (실시예 3에서 설명된 검출기와 유사하게 구성된) MCP 검출기가 샘플 이미지를 기록하는데 사용되었다.

[0605] 샘플은 철강이었고, 구형(spherical in shape)으로 균일한 조성이었다. He 이온 빔 전류는 1.0 pA였고, 평균 이온 에너지는 20 keV였다. 이온 빔은 매 픽셀당 10 μs의 지속 시간으로써 래스터 스캔되었다. 스캔 편향기에 인가되는 최대 전위(약 100 V)는 샘플의 표면에서 약 1 mm의 FOV를 산출하였다.

[0606] 샘플의 이미지는 도 58로 도시된다. 이미지는 샘플을 위한 총 이차 전자 수율을 반영한다. 이미지는 오른손 에지에서의 향상된 이차 전자 수율을 나타낸다. 향상된 수율은, 이차 전자가 탈출할 수 있는, 샘플 표면 부근에서의 이온 빔의 증가된 경로 길이로부터 초래되었다. 이차 전자 수율은, 입사 He 이온 빔과 샘플 표면에 대한 법선 사이의 각도를 표현하는 sec(α)에 대략적으로 비례하여 증가하는 것으로 밝혀졌다.

[0607] 제2 샘플의 이미지는 도 59A 및 도 59B로 도시된다. 도 59A에 도시된 샘플을 위한 영상화 조건은 이 실시예에서의 제1 샘플과 관련하여 앞서 논의되었다.

[0608] 20 keV의 에너지에서, He 이온 빔은, 크게 분기하기 전에, 샘플쪽으로 깊이 (약 100 nm) 침투하였다. 결과적으로, 샘플 이미지의 에지는 비교적 좁은 밝은 에지 효과(예를 들어, 감소된 에지 블루밍)를 나타내었다. 예를 들어, 도 59A의 이미지는 He 이온 현미경으로부터 기록된 한편, 도 59B의 이미지는 표준 SEM을 사용해 기록되었다. 양자의 이미지에서, 신호는 이차 전자만의 측정으로부터 발생한다. 도 59B에 도시된 SEM 이미지에서, SEM

은, 2 keV 전자 빔 에너지 및 30 pA 빔 전류의 영상화 조건하에서 동작되었다.

[0609] 밝은 에지는 He 이온 현미경 이미지에서 눈에 띄게 좁은 것으로 관찰되었는데, 이는, 입사 전자에 비해 샘플 표면에서의 He 이온의 좀더 작은 상호 작용 부피의 결과인 것으로 생각된다. He 이온 빔은, 그것이 샘플쪽으로 전달될 때, 비교적 평행 시준 상태를 유지한다. 대조적으로, SEM의 전자 빔은, 샘플 표면에 즉각적으로 인접한 상당히 넓은 상호 작용 부피를 산출한다. 결과적으로, 입사 전자 빔에 의해 발생되는 이차 전자는, 표면에서의 공칭 전자 빔 위치로부터 수 나노미터까지 연장하는 표면 영역으로부터 발생한다. 따라서, SEM의 밝은 에지 효과는, 도 59A 및 도 59B의 이미지를 시각적으로 비교하는 것에 의해 알 수 있는 바와 같이, 사실상 좀더 넓었다.

[0610] 이러한 2개 이미지에서의 밝은 에지 효과를 수치적으로 비교하기 위해, 이미지 각각에서의 공통 에지 사양을 가로질러 라인 스캔이 수행되었다. 결과는, 각각, 도 59A 및 도 59B에 대응되는 도 67A 및 도 67B로 도시된다. 라인 스캔 면적은 1개 픽셀 폭 × 50개 픽셀 길이였다. 에지 사양에 대응되는, 라인 스캔에서의 밀도 피크는, 대응되는 He 이온 현미경 이미지에서보다 SEM 이미지에서 40% 더 넓은 FWHM(full width at half-maximum)을 가진다. 앞서 지적된 바와 같이, He 이온 현미경 이미지에서 관찰되는 감소된 에지 폭은, 전자에 비해, 샘플 표면에서의 He 이온의 좀더 작은 상호 작용 부피의 결과이다.

[0611] 8.

[0612] 팁은 실시예 1에서 설명된 절차에 따라 준비되었고, 기하학적 팁 특성의 캐릭터리제이션은 실시예 1에서 설명된 바와 같이 수행되었다. 팁은 실시예 1에서의 기준에 기초해 수용되었다.

[0613] 팁은 실시예 1에서 설명된 절차를 사용해 FIM으로 정교화되었다. 그 다음, 팁은 He 이온 현미경에 설치되고 구성되었다. 현미경 시스템은 실시예 1에서 설명된 바와 같이 구성되었는데, 구성에 대한 변화는 다음에서 지적된다.

[0614] 현미경 시스템은, 입사 He 이온과 샘플의 상호 작용으로 인해 샘플을 떠나는 이차 전자를 측정하도록 구성되었다. (실시예 3에서 설명된) MCP 검출기가 샘플 이미지를 기록하는데 사용되었다.

[0615] 다수 재료를 위한 이차 전자 수율을 정량적으로 판정하기 위해 다양한 샘플이 측정되었다. 각 샘플은 테스트될 재료의 평탄 조각(flat piece)으로 이루어졌다. 샘플 위쪽으로 2 mm의 거리에 낮은 충전 팩터(예를 들어, 대부분 개방 공간)의 금속 스크린이 배치되었다. 피코-전류계(Keithley Instruments, Cleveland, OH)가, 각 샘플의 표면쪽으로 그루브를 가공하는 것에 의해 각각의 샘플쪽으로 통합되는 Faraday 컵과 함께, 샘플 전류를 측정하는데 사용되었다.

[0616] 각각의 실험은, He 이온 빔이 각 샘플에서의 Faraday 컵에 입사하도록 He 이온 빔을 배치하는 것에 의한 He 이온 전류의 측정으로써 시작되었다. 다음으로, He 이온 빔은, 공통의 외부 그라운드에 대하여, 가변 바이어스가 스크린에 인가되는 상태에서, 샘플에 대해 래스터링되었고, 샘플로부터 이차 전자 전류가 측정되었다.

[0617] He 이온 빔은 어떠한 오염 또는 하전 아티팩트를 최소화하기 위해 의도적으로 (100 nm의 스폿 사이즈까지) 디포커싱되었다. 스크린 바이어스 전위는 -30 V에서 +30 V까지 증분적으로 조정되었고, 이차 전자 전류가 각각의 바이어스 전위를 위해 측정되었다. 각각의 측정은 22.5 keV의 He 이온 빔 에너지 및 13 pA의 빔 전류로써 수행되었다. 도 60의 그래프는 실리콘 샘플을 위한 결과를 나타낸다.

[0618] 스크린이 음으로 바이어스된 그래프의 왼쪽에서, 입사 He 이온과 샘플의 상호 작용으로 인해 샘플을 떠나는 모든 이차 전자는 실리콘 샘플쪽으로 복귀되었다. He 이온 빔 전류 및 이차 전자 전류는 거의 동일하였고, 그에 따라, 무시할 수 있는 양의 자유 이차 이온 및 산란 헬륨 이온이 발생되었다. 스크린이 양으로 바이어스된 그래프의 오른쪽에서, 입사 He 이온과 샘플의 상호 작용으로 인해 샘플을 떠나는 모든 이차 전자는 샘플로부터 멀어지도록 가속되었다. 측정된 샘플 전류는 He 이온 전류와 이차 전자 전류의 합이었다. 이러한 측정치에 기초해, 평면 실리콘 샘플에 (수직 입사로) 입사하는 22.5 keV 헬륨 빔을 위한 이차 전자 수율은 약(44-13)/13 = 2.4이다.

[0619] 유사한 측정 절차가 유사한 측정 조건하에서 다양한 재료를 위해 수반되었다. 결과는 다음의 표 2로 요약된다.

표 2

[0620]

재료	이차 전자 수율
알루미늄	4.31

실리콘	2.38
티타늄	3.65
철	3.55
니켈	4.14
구리	3.23
인듐	4.69
텅스텐	2.69
레늄	2.61
백금	7.85
금	4.17
납	4.57

[0621] 이들 비교적 큰 이차 전자 수율 및 상이한 재료를 위한 광범위한 값이, 이차 전자의 검출에 기초한 He 이온 현미경 이미지가 상이한 재료를 구별하기 위한 양호한 방법을 제공한다는 일반적인 관찰을 설명한다. 일례로서, 도 61A는, 헬륨 이온 현미경을 사용해 기록된, 기판 표면을 가로지르는 정렬의 이차 전자 이미지이다. 약 1.5 V 최대 진폭의 스캔 전압이 스캔 편향기에 도입되어 샘플에 대해 15 μm FOV를 발생시켰다. MCP 검출기는 샘플로부터 10 mm 거리에 배치되었고, 샘플의 표면에 대해 평행하게 배향되었다. MCP의 격자 및 전면은 공통의 외부 그라운드에 대하여 +300 V로 바이어스되었다. He 이온 빔 전류는 5 pA였고, 평균 이온 에너지는 27 keV였다. 이온 빔은 매 픽셀당 150 μs의 지속 시간으로써 래스터 스캔되었다.

[0622] 도 61B는 동일한 사양에 대해 촬영된 SEM 이차 전자 이미지이다. SEM은, 2 keV 전자 빔 에너지 및 30 pA 빔 전류의 실험적으로 판정된 최적 영상화 조건하에서 동작되었다. 다른 빔 전류, 스캔 속도, 및 빔 에너지 또한 시도되었지만, 이들 중 어떤 것도 양호한 콘트라스트를 제공하지 못했다.

[0623] He 이온 현미경 이미지는, 입사 전자 빔에 대하여, 입사 He 이온 빔을 위한 이차 전자 수율에서의 좀더 큰 차이 때문에, 정렬 교차를 형성하는 상이한 재료 사이의 좀더 큰 콘트라스트를 나타낸다. 정렬 교차에서의 2가지 재료가 도 61A의 이미지에서는 시각적으로 쉽게 구별될 수 있다. 그러나, 도 61B에서 관찰되는 바와 같이, 2가지 재료가 SEM의 전자 빔을 위해서는 유사한 이차 전자 수율을 가진다.

[0624] 9.

[0625] 팁은 실시예 1에서 설명된 절차에 따라 준비되었고, 기하학적 팁 특성의 캐릭터리제이션은 실시예 1에서 설명된 바와 같이 수행되었다. 팁은 실시예 1에서의 기준에 기초해 사용을 위해 수용되었다.

[0626] 팁은 실시예 1에서 설명된 절차를 사용해 FIM으로 정교화되었다. 그 다음, 팁은 He 이온 현미경에 설치되고 구성되었다. 현미경 시스템은 실시예 1에서 설명된 바와 같이 구성되었는데, 구성에 대한 변화는 다음에서 지적된다.

[0627] 현미경 시스템은, 입사 He 이온과 샘플의 상호 작용으로 인해 샘플을 떠나는 이차 전자를 측정하도록 구성되었다. (실시예 3에서 설명된) MCP 검출기가 샘플 이미지를 기록하는데 사용되었다. MCP의 전단은, 그것의 앞쪽 격자에서와 같이, 공통의 외부 그라운드에 대하여 +100 V로 바이어스되었다. 이 구성에서, MCP는, 양으로 바이어스된 샘플의 영역에서 발생된 이차 전자를 제외하고, 입사 He 이온과 샘플의 상호 작용으로 인해 샘플을 떠나는 거의 모든 이차 전자를 수집할 수 있었다. 이 전자는, 샘플로부터 완전하게 유리되어 MCP에 의해 검출되는 대신에, 양 전압 바이어스로 인해 샘플쪽으로 다시 복귀되었다.

[0628] 샘플의 영역은, 입사 He 이온 빔으로부터 도달하는 양전하 및 떠나는 음전하(이차 전자)의 양자로 인해, 양으로 바이어스되었다. 소정 He 이온 빔 전류를 위해 샘플에 유도된 전압 바이어스의 크기는, 샘플의 주변 부분에 대하여, 샘플의 노출 영역에 대한 전기 용량 및/또는 저항에 의존하였다. 이 차이가, 샘플의 용량성 및/또는 저항성 특성에 따른, 샘플의 상이한 영역을 위한 상이한 이차 전자 수집을 초래한다. 검출된 이차 수집에서의 차이가 He 이온 현미경을 사용해 기록된 샘플 이미지에서의 콘트라스트를 발생시킨다. 이런 식으로, 샘플의 전기 특성은 이차 전자 이미지에 기초해 판정되었다.

[0629] 도 62에서는, 샘플의 이차 전자 이미지가 도시된다. 샘플은 절연 기판의 표면에 증착된 한 세트의 알루미늄 라인이 특징이었다. 최대 진폭 3 V의 스캔 전압이 스캔 편향기에 대해 도입되어 샘플에 대해 30 μm FOV를 발생시켰다. He 이온 빔 전류는 5 pA였고, 평균 이온 에너지는 26 keV였다. 이온 빔은 매 픽셀당 100 μs의 지속 시간으로써 래스터 스캔되었다.

[0630] 샘플 이미지는 일련의 주기적인 밝은 알루미늄 라인을 나타낸다. 이러한 밝은 라인 사이의 공간은 일련의 좀더 어두운 라인이다. 이미지에서의 중간 밝기 라인은, 그 너머가 어두운 두드러진 경계를 나타낸다. 샘플의 특징에 기초해, 밝은 라인은 그라운드에 이르는 낮은 저항 경로를 갖거나 어쩌면 그라운드에 대하여 아주 높은 용량을 가지므로, 밝은 라인은 He 이온 빔의 작용으로 인해 사실상 바이어스되지 않았다.

[0631] 어두운 라인은 He 이온 빔의 영향하에 양으로 바이어스되었으므로, 거기에서 발생된 이차 전자는 샘플쪽으로 다시 복귀되었다. 이 효과가 어두운 라인의 용량성 특성으로 인한 것인지 아니면 저항성 특성으로 인한 것인지를 판정하기 위해, 어두운 라인은 He 이온 빔하에서 시주기에 걸쳐 관찰되었다. 효과가 용량성 특징으로 인한 것이었다면, 라인은 시간에 걸쳐 점진적으로 어두워졌을 것이다.

[0632] 중앙 알루미늄 라인을 위한 밝음에서 어두움으로의 전이는, 예를 들어, 라인에서의 전기 단속(electrical disconnect)의 존재를 지시할 수도 있다. 라인의 좀더 아래쪽 밝은 부분이 라인의 좀더 위쪽 어두운 부분과 완전한 전기 접촉 상태에 있지 않을 수도 있다.

[0633] 도 63은 앞서 설명된 측정 구성을 사용해 기록된 샘플의 이미지를 나타낸다. 샘플은 실리콘 기판상에 구리로 형성된 라인 및 다른 사양을 포함한다. 최소 사양은 글자("DRAIN")의 형태이다. 이 사양에 대한 양 전위 바이어스는, 각 문자의 하단이 어두워 보이는 동안 각 문자의 상단은 밝아 보인다는 관찰에 의해 알 수 있는 바와 같이, 이미지 획득의 과정에 걸쳐 증가되었다. 이 이미지에서의 래스터 스캔은 상단에서 하단으로 진행되었다. 결과적으로, 샘플의 표면 사양에 대한 바이어싱 메커니즘은 주로 용량성이다.

[0634] 10.

[0635] 팁은 실시예 1에서 설명된 절차에 따라 준비되었고, 기하학적 팁 특성의 캐릭터리제이션은 실시예 1에서 설명된 바와 같이 수행되었다. 팁은 실시예 1에서의 기준에 기초해 사용을 위해 수용되었다.

[0636] 팁은 실시예 1에서 설명된 절차를 사용해 FIM으로 정교화되었다. 그 다음, 팁은 He 이온 현미경에 설치되고 구성되었다. 현미경 시스템은 실시예 1에서 설명된 바와 같이 구성되었는데, 구성에 대한 변화는 다음에서 지적된다.

[0637] 현미경 시스템은, 입사 He 이온과 샘플의 상호 작용으로 인해 샘플을 떠나는 이차 전자를 측정하도록 구성되었다. (실시예 3에서 설명된) MCP 검출기가 샘플 이미지를 기록하는데 사용되었다. MCP의 전단은, 그것의 앞쪽 격자에서와 같이, 공통의 외부 그라운드에 대하여 +300 V로 바이어스되었다. 이 구성에서, 측정되는 신호는 거의 대부분 이차 전자로부터 발생하였다. 이것은, MCP 이득을 변경하지 않으면서 MCP 전단을 -300 V로 바이어스하고 측정되는 신호가 거의 0으로 감소되었다는 것을 관찰하는 것에 의해 확인되었다.

[0638] 최대 진폭 3 V의 스캔 전압이 스캔 편향기에 대해 도입되어 샘플에 대해 30 μm FOV를 발생시켰다. He 이온 빔 전류는 10 pA였고, 평균 이온 에너지는 22 keV였다. 이온 빔은 매 픽셀당 100 μs의 지속 시간으로써 래스터 스캔되었다.

[0639] 두드러진 3개 층을 포함하는 샘플이 영상화되었다. 최상단 금속층은 구리로 형성된 패터닝된 라인으로 이루어졌다. 다음 층은 유전체 재료로 이루어졌다. 하부층은 구리로 형성된, 상이하게 패터닝된 다른 금속층으로 이루어졌다. 샘플의 이미지는 도 64로 도시된다. 이미지는, 하부(표면 아래) 금속층에 대응되는 회색 이미지 사양에 중첩된, 밝은 흰색의 최상단 금속층 패턴을 선명하게 나타낸다. 표면 아래 금속층은 이미지에서 어두운 동시에 약간 번져 보인다.

[0640] 측정되는 신호는 산란 He 이온과 중성 He 원자의 양자에 의해 샘플의 표면에서 발생된 이차 전자의 결과였다. 이러한 평가는, MCP 및 스크린을 음으로 바이어스하고 거의 신호가 검출되지 않는다는 것에 유의하는 것에 의해 확인되었다. 입사 He 이온과 샘플의 상호 작용으로 인해 샘플을 떠나는 이차 전자가 도 64에서의 표면 금속층 이미지를 발생시켰다. 표면 아래 금속층의 이미지는, 샘플쪽으로 침투되어 중성화되는 He 이온에 의해 발생된다. 중성 He 원자는 표면 아래층으로부터 산란하고, 그것 중 일부는, 그것이 탈출할 때 이차 전자를 발생시켰던 표면쪽으로 복귀한다. 이것이 표면 아래 사양의 흐리고 어두운 이미지를 설명한다.

[0641] 11.

[0642] 팁은 실시예 1에서 설명된 절차에 따라 준비되었고, 기하학적 팁 특성의 캐릭터리제이션은 실시예 1에서 설명된 바와 같이 수행되었다. 팁은 실시예 1에서의 기준에 기초해 사용을 위해 수용되었다.

[0643] 팁은 실시예 1에서 설명된 절차를 사용해 FIM으로 정교화되었다. 그 다음, 팁은 He 이온 현미경에 설치되고 구

성되었다. 현미경 시스템은 실시예 1에서 설명된 바와 같이 구성되었는데, 구성에 대한 변화는 다음에서 지적된다.

[0644] 현미경 시스템은, 입사 He 이온과 샘플의 상호 작용으로 인해 샘플을 떠나는 이차 전자를 측정하도록 구성되었다. (실시예 3에서 설명된) MCP 검출기가 샘플 이미지를 기록하는데 사용되었다. MCP의 전단은, 그것의 앞쪽 격자에서와 같이, 공통의 외부 그라운드에 대하여 +300 V로 바이어스되었다. 이 구성에서, 측정되는 신호는 거의 대부분 이차 전자로부터 발생하였다. 이것은, MCP 이득을 변경하지 않으면서 MCP 전단을 -300 V로 바이어스하고 측정되는 신호가 거의 0으로 감소되었다는 것을 관찰하는 것에 의해 확인되었다.

[0645] 최대 진폭 15 V의 스캔 전압이 스캔 편향기에 대해 도입되어 샘플에 대해 150 μm FOV를 발생시켰다. He 이온 빔 전류는 10 pA였고, 평균 이온 에너지는 21.5 keV였다. 이온 빔은 매 픽셀당 100 μs의 지속 시간으로써 래스터 스캔되었다.

[0646] 영상화되는 샘플은 한 단위의 텅스텐 용접(a piece of a tungsten weld)으로 이루어졌다. 텅스텐은 그것의 용융점 이상으로 가열된 다음, 결정 입자 사이의 경계가 단절적인 두드러진 결정 도메인을 형성하면서, 냉각되었다. 샘플은 입사 He 이온과 샘플의 상호 작용으로 인해 샘플을 떠나는 이차 전자를 측정하는 것에 의해 영상화되었다.

[0647] 샘플의 이미지는 도 65로 도시된다. 이미지는 두드러지게 밝은 입자 및 어두운 입자를 나타낸다. 수개 입자에 걸쳐 연장하는 밝은 이미지 사양이 이러한 배경에 중첩된다. 밝은 사양은 표면 지형 경감 패턴(surface topographic relief patterns)에 대응되는데, 이는, 여기에서 개시되는 지형 효과로 인한 이차 전자 발생을 향상시킨다. 다양한 결정 입자의 이미지 밀도를 두드러지게 하는 것은 입사 He 이온 빔에 관한 결정 도메인의 상대적 방향 때문이다. 특정 입자에서의 텅스텐 격자가, He 이온 빔이 낮은 굴절률의 결정 방향에 대해 거의 평행하게 진입하도록 배향된 경우, 표면에서의 산란 확률은 낮았고, 그에 따라, 이온 빔은 입자쪽으로 깊이 흡수되었다. 결과적으로, 재료 표면에서의 이차 전자 수율은 비교적 낮았고, 입자는 이미지에서 좀더 어둡게 보였다. 반대로, 특정 입자에서의 텅스텐 격자가, He 이온 빔이 높은 굴절률의 결정 방향에 대해 수직으로 입사하도록 배향된 경우, 입자 표면에서의 산란 확률은 높았다. 결과적으로, 재료 표면에서의 이차 전자 수율은 비교적 높았고, 입자는 이미지에서 좀더 밝게 보였다.

[0648] 12.

[0649] 팁은 실시예 1에서 설명된 절차에 따라 준비되었고, 기하학적 팁 특성의 캐릭터리제이션은 실시예 1에서 설명된 바와 같이 수행되었다. 팁은 실시예 1에서의 기준에 기초해 사용을 위해 수용되었다.

[0650] 팁은 실시예 1에서 설명된 절차를 사용해 FIM으로 정교화되었다. 그 다음, 팁은 He 이온 현미경에 설치되고 구성되었다. 현미경 시스템은 실시예 1에서 설명된 바와 같이 구성되었는데, 구성에 대한 변화는 다음에서 지적된다.

[0651] 현미경 시스템은, 입사 He 이온에 응답하여 샘플로부터 산란되는 He 이온 및 중성 He 원자를 측정하도록 구성되었다. (실시예 3에서 설명된) MCP 검출기가 샘플 이미지를 기록하는데 사용되었다. MCP의 전단은, 그것의 앞쪽 격자에서와 같이, 공통의 외부 그라운드에 대하여 -100 V로 바이어스되었다. 이 구성에서, 이차 전자는, 인가되는 음 전위 바이어스로 인해 MCP에 도달하지 않는다. MCP에 의해 측정되는 신호는, MCP의 전면에 입사하는 산란 He 이온 및 중성 He 원자로부터 발생한다.

[0652] 최대 진폭 15 V의 스캔 전압이 스캔 편향기에 대해 도입되어 샘플에 대해 150 μm FOV를 발생시켰다. He 이온 빔 전류는 10 pA였고, 평균 이온 에너지는 21.5 keV였다. 이온 빔은 매 픽셀당 100 μs의 지속 시간으로써 래스터 스캔되었다.

[0653] 영상화된 샘플은, 실시예 11에서도 검사된 텅스텐 용접 샘플이었다. 앞서와 같이, 텅스텐 용접은, 입자 사이의 경계가 단절적인 두드러진 결정 도메인을 포함하였다.

[0654] 샘플은 MCP로 입사하는 He 원자 및 He 이온의 도수를 검출하는 것에 의해 영상화되었다. 이러한 측정 절차를 사용해 획득된 샘플의 이미지는 도 68로 도시된다. 이미지는 밝은 입자 및 어두운 입자를 나타낸다. 특정한 결정 입자를 위해, 입자에서의 텅스텐 격자가, He 이온 빔이 비교적 낮은 굴절률의 결정 방향을 따라 입사하도록 배향된다면, 입자 표면에서의 He 산란 확률은 낮았다. 결과적으로, 이온은 산란이 발생하기 전에 입자쪽으로 비교적 깊이 침투하였다. 결과적으로, He 이온(또는, He 이온이 샘플에서의 전자와 결합할 때 발생되는, He 중성 원자)이 샘플을 떠나 MCP 검출기에 의해 검출될 확률은 낮을 것 같다. 이러한 특성을 가진 입자는 기록된

이미지에서 어둡게 나타났다.

[0655] 반대로, 특정 입자에서의 텅스텐 격자가, He 이온 빔이 비교적 높은 굴절률의 결정 방향을 따라 입사하도록 배향된다면, 입자 표면에서의 산란 확률은 비교적 높았다. 결과적으로, He 이온의 산란 이전의 샘플쪽으로의 침투는, 평균적으로, 비교적 얕았다. 결과적으로, He 이온 및/또는 중성 He 원자가 샘플의 표면을 떠나 MCP 검출기에 의해 검출될 확률은 비교적 높았다. 따라서, 입사 He 이온 빔에 대하여 높은 굴절률의 결정 방향을 갖춘 입자는 도 68에 도시된 이미지에서 좀더 밝게 나타났다.

[0656] 도 65에 도시된 이미지를 참조하면, 도 68의 이미지에서의 지형 정보는, 이미지가, 이차 전자가 아니라, 산란 He 입자에 기초해 기록되었기 때문에, 상당히 감소되었다. 특히, 도 65의 이미지에 나타났던 일련의 밝은 라인은 도 68의 이미지로부터 대부분 제거되었다. 지형 정보의 부재는 도 68의 이미지 해석을 비교적 용이하게 할 수 있는데, 특히, 도 68에서 측정된 밀도가 샘플에서의 결정 도메인에 대한 (상대적 방향과 같은) 결정 특성을 정량적으로 식별하는데 사용되는 경우에 그러하다.

[0657] 13.

[0658] 팁은 실시예 1에서 설명된 절차에 따라 준비되었고, 기하학적 팁 특성의 캐릭터리제이션은 실시예 1에서 설명된 바와 같이 수행되었다. 팁은 실시예 1에서의 기준에 기초해 사용을 위해 수용되었다.

[0659] 팁은 실시예 1에서 설명된 절차를 사용해 FIM으로 정교화되었다. 그 다음, 팁은 He 이온 현미경에 설치되고 구성되었다. 현미경 시스템은 실시예 1에서 설명된 바와 같이 구성되었는데, 구성에 대한 변화는 다음에서 지적된다.

[0660] 현미경 시스템은, 입사 He 이온에 응답하여 샘플로부터 산란되는 He 이온 및 중성 He 원자를 측정하도록 구성되었다. 검출기- 미니 MCP -가 전기 모터의 샤프트에 장착되었다. 구리 테이프가 MCP에 의한 He 이온 및/또는 중성 원자의 측정을 한정하기 위해 MCP의 전면을 덮는데 사용되었다. 구리 테이프의 작은 원형 홀은, 입자가 좁은 각도 범위내에 해당되는 경우에만 산란 He 이온 및/또는 중성 원자가 MCP에 도달하는 것을 허용하였다. 이 실시예에서, He 이온 및/또는 중성 원자의 측정은 0.01 스테라디안의 입체각에 대응되는 각도 범위에만 한정되었다. 구리 테이프 및 MCP의 전단은 공통의 외부 그라운드에 대하여 -100 V로 바이어스되었고, 그에 따라, 이차 전자는 MCP 검출기로 진입하지 않을 것이다.

[0661] 검출기는 샘플로부터 30 mm 거리에 배치되었다. 모터는 상이한 각도 범위에서 샘플 표면을 떠나는 He 이온 및/또는 중성 원자를 검출하기 위해 샘플에 관한 MCP 검출기의 회전을 허용하였다. 통상적으로, 예를 들어, 모터는 약 180° 에 걸친 MCP 회전을 허용하였다.

[0662] 샘플은 약 1 mm 지름의 구리 볼이었다. 모터는, 샘플이 모터 샤프트의 축을 따라 배치되도록 샘플에 대하여 배치되었다. 구리 볼 샘플은, He 이온 빔에 노출될 때, 샘플 표면의 형태로 인해, 광범위한 각도 범위에서 산란 He 이온 및 중성 He 원자를 제공하였다. 다시 말해, 입사 He 이온 빔을 샘플 표면을 가로질러 스캔하는 것에 의해, 다양하고 상이한 입사 각도(예를 들어, He 이온 빔과 샘플 표면에 대한 법선 사이의 각도)가 실현될 수 있다. 예를 들어, 구리 볼의 중앙에서, He 이온 빔의 입사각은 0° 이다. (He 이온 빔의 관점으로부터 관찰되는 바에 따라) 볼의 에지에서, 입사각은 약 90° 이다. 구리 볼의 중앙과 에지 사이의 중간 위치에서, 입사각은 간단한 삼각법으로부터 약 30° 이다.

[0663] 샘플은 He 이온 빔의 아래쪽에 배치되었고, 검출기는 샘플에 대하여 앞서 설명된 바와 같이 배치되었다. He 이온 빔 전류는 15 pA였고, He 이온 빔에서의 평균 이온 에너지는 25 keV였다. 100 V의 최대 전압이 스캔 편향기에 인가되어 샘플 표면에서 1 mm FOV를 실현하였다. 현미경 시스템의 제2 렌즈에서 샘플까지의 거리(예를 들어, 작업 거리)는 75 mm였다. 이는, MCP 검출기가 샘플에 대하여 회전하게 하기에 충분한 개방 공간을 제공하였다.

[0664] 측정은, 검출기가 샘플에 대하여 반구형 호의 180° 각도 범위를 쓸어가는 동안, 구리 볼의 이미지를 기록하는 것에 의해 수행되었다. He 이온 빔은 샘플의 표면을 2개 측면으로 효과적으로 분할하였고, 구리 볼의 돌출 표면으로 인해, 산란 He 이온 및 중성 He 입자는 검출기가 배치된 측면으로부터만 검출될 수 있었다. 결과적으로, 도 69A에서, 샘플의 이미지에 대한 밀도 프로파일은, 왼쪽의 밝은 영역이 검출기의 위치에 대응되는 점증형(crescent-shape)을 나타낸다. 샘플의 오른쪽 측면은 비교적 어두웠는데, 산란 He 이온 및 중성 He 입자가, 검출기에 의해 그것이 측정될 수 없는 방향으로 샘플의 표면을 떠났기 때문이다.

[0665] 샘플의 연속적인 이미지는 각각의 이미지 사이에서 검출기 각도를 증가시키는 것에 의해 기록되었다. 검출기의

스캔 범위에 걸쳐, 샘플의 총 20개 이미지가 획득되었다. 어떤 이미지는 유용한 정보를 제공하지 않았는데, 검출기가 입사 He 이온 빔을 차단하도록 배치되어, He 이온이 샘플 표면에 입사하는 것을 방지하였기 때문이다. 도 69B 및 도 69C에 도시된 이미지는, 각각, 거의 샘플 바로 위쪽에 그리고 샘플의 오른쪽 측면에 배치된 검출기로써 기록된 샘플의 이미지에 대응된다. 도 69C에서는, 도 69A에서 관찰된 프로파일과 유사한 점증형 밀도 프로파일이 관찰된다.

[0666] 기록된 이미지의 정성적 검사에 기초해, 샘플에 관한 지형 정보는 오프축 위치(off-axis positions)의 검출기로써 측정된 이미지(예를 들어, 도 69A 및 도 69C)로부터 판정될 수 있다는 것이 명백하였다. 이러한 측정으로부터 획득된 정보는, 예를 들어, 이차 전자 이미지에서 관찰되는 이미지 콘트라스트가 샘플의 표면 지형으로 인한 것이었는지 아니면 샘플 하전 또는 재료 조성과 같은 다른 콘트라스트 메커니즘으로 인한 것이었는지를 확인하기 위해, 샘플의 이차 전자 측정과 조합될 수 있었다. 공지 위치의 검출기로써, 기록된 이미지에 기초해, 샘플 표면의 융기를 침하와 구별할 수 있었다. 기록된 이미지 각각을 위한 작은 검출기 수용 각도 및 검출기의 공지 위치 또한, 이미지에서의 표면 사양의 그림자 길이를 측정하고 표면 사양에 관한 입사 He 이온 빔의 공지 각도를 사용하는 것에 의해, 샘플을 위한 정량적 표면 경감(예를 들어, 높이) 정보를 판정하는데 사용될 수 있었다.

[0667] 또한, 샘플의 이미지는, 샘플에 관한 검출기의 방향에 따라, 샘플의 어떤 에지는 밝은 에지 효과를 나타내는 한편, 다른 에지는 어두운 에지 효과를 나타낸다는 것을 드러내었다(예를 들어, 도 69A 참고하기). 이 정보는, 샘플로부터의 지형 정보 측정을 감소시키도록 구성된 검출기의 설계에 사용되었다. 검출기 설계는 검출 각도의 균형을 유지하여 거의 균일한 에지 효과를 제공하였다. 결과적으로, 구리 볼과 같은 샘플의 이미지는, 샘플에서의 재료 차이로부터 발생하는 밀도 변화에 대하여, 균일하게 밝아 보일 것이다.

[0668] 샘플로부터 기록된 이미지 데이터는, 검출기가 스캔됨에 따라 샘플 표면의 선택된 영역에 대한 밀도가 변화하는 방법을 판정하기 위해 분석되었다. 밀도 변화는 샘플 표면을 떠나는 He 이온 및 He 중성 원자의 각도 분포 때문이었고, 이 분석은, 간혹 방사 로브(emission lobes)라고도 하는 각도 분포에 관한 정보를 제공하였다.

[0669] 도 70A는 입사 He 이온 빔과 거의 온축(on-axis) 상태인 검출기로써 기록된 샘플의 이미지를 나타내는데; 다시 말해, 검출기는 약 0° 의 각도에서 산란 He 이온 및 중성 He 원자를 측정하였다. 직사각형 박스로써 지시되는, 샘플 표면의 영역은 일련의 이미지로 격리되어 추가 분석되었다. 도 70B에 도시된 도표에서, 두꺼운 수평선은 샘플의 표면을 개략적으로 표현하고, 얇은 수직선은 입사 He 이온 빔을 표현한다. 점은 다양한 검출기 위치에서 측정된 산란 He 이온 및 중성 He 원자의 평균 밀도를 표현한다. 점은 폴라 스케일(polar scale)로 플로팅되는데, 이 경우, 극좌표계의 원점은 샘플 표면에 대한 He 이온 빔의 입사점이다. 소정 점의 각도 위치는 검출기의 각도 위치에 대응되고, 원점에서 각 점까지의 방사 거리는 그러한 특정 각도의 검출기 위치에서 측정된 평균 밀도를 표현한다. 상이한 검출기 위치에 대응되는 샘플의 개개 이미지는 분석되어 도 70B에 도시된 각밀도 데이터를 제공하였다. 각각의 점은 상이한 검출기 위치에서 기록된 이미지에 대응된다.

[0670] 점들의 폴라 어레이는 방사 로브 도표를 형성한다. 도표는 (He 이온 빔이 검출기에 의해 차단되었던 몇개 누락 포인트를 제외하면) 대략적으로 원형이고, 원점 주위의 코사인 분포에 대응된다.

[0671] 도 71A에서는, 다중 샘플 이미지를 사용해 샘플로부터의 산란 He 이온 및 중성 원자에 대한 각밀도 분포를 판정하도록 분석되었던 샘플 표면의 상이한 영역을 지시하는 직사각형 박스가 중첩되어 있는 샘플의 이미지가 도시된다. 이 경우, 산란 또는 방사 각도는 입사 He 이온 빔에 대하여 약 40° 였다.

[0672] 도 71B에 도시된 방사 각밀도의 극좌표계는 앞서 도 70B와 관련하여 설명된 방식으로 구성되었다. 이 각도에서의 로브 형태는, 산란/방사가 입사 He 이온 빔으로부터 차별적으로 유도된다는 것을 지시하였다.

[0673] 이 분석은 (다양하고 상이한 각도에 대응되는) 샘플 표면의 다양하고 상이한 영역에 대해 반복되어, 구리 볼 샘플을 위한 각도 함수로서의 산란 He 이온 및 중성 He 원자의 분포에 대한 비교적 완전한 도면을 구축하였다.

[0674] 14.

[0675] 팁은 실시예 1에서 설명된 절차에 따라 준비되었고, 기하학적 팁 특성의 캐릭터리제이션은 실시예 1에서 설명된 바와 같이 수행되었다. 팁은 실시예 1에서의 기준에 기초해 사용을 위해 수용되었다.

[0676] 팁은 실시예 1에서 설명된 절차를 사용해 FIM으로 정교화되었다. 그 다음, 팁은 He 이온 현미경에 설치되고 구성되었다. 현미경 시스템은 실시예 1에서 설명된 바와 같이 구성되었는데, 구성에 대한 변화는 다음에서 지적된다.

[0677] 현미경 시스템은, 입사 He 이온에 응답하여 샘플로부터 산란되는 He 이온 및 중성 He 원자를 측정하도록 구성되

었다. (실시예 3에서 설명된) MCP 검출기가 샘플 이미지를 기록하는데 사용되었다. MCP의 전단은, 그것의 앞쪽 격자에서와 같이, 공통의 외부 그라운드에 대하여 -300 V로 바이어스되었다. 이 구성에서, 이차 전자는, 인가되는 음 전위 바이어스로 인해 MCP에 도달하지 않는다. MCP에 의해 측정되는 신호는, MCP의 전면에 입사하는 산란 He 이온 및 중성 He 원자로부터 발생한다. 샘플의 관점으로부터, MCP는 약 1.8 스테라디안의 입체각 이내로부터 He 이온 및 He 원자를 검출하였다. 입체각은 도 66에 도시된 바와 같이 입사 빔에 대하여 방위각 대칭적이었다.

[0678] 실시예 13으로부터, 구리 볼 샘플을 위해 관찰되는 밝은 에지 효과 및 어두운 에지 효과는, 산란 He 이온 및/또는 중성 He 원자를 측정하는 것에 의해 샘플을 영상화하는데 사용되었을 때, 측정 신호에서의 지형 정보량을 감소시켰고 샘플의 국지적 표면 지형에서의 차이가 아니라 재료 조성에서의 차이를 좀더 정확하게 반영하였던 검출기의 설계 및 구성에 관한 정보를 제공하였다. 도 66에 도시된 MCP 검출기의 경우, 산란 He 이온 및 중성 He 원자의 측정에 기초해 형성되는 이미지에서의 지형 정보 감소는, MCP가 샘플로부터 약 25 mm의 작업 거리에 배치된 경우에 관찰되었다.

[0679] *그 다음, 상이한 재료를 포함한 샘플이 영상화될 수 있었고 재료는 신뢰 가능하게 시각적으로 서로 구별될 수 있었다. 4가지 상이한 재료- 니켈 기본층, 탄소 코팅, 구리 격자, 및 금 와이어 -를 포함한 샘플이 He 이온 현미경을 사용해 영상화되었다. He 이온 빔 전류는 1.1 pA였고, 평균 He 이온 에너지는 18 keV였다. 4 V의 최대 전압이 스캔 편향기에 인가되어 샘플 표면에서 40 μm의 FOV를 실현하였다. 총 이미지 획득 시간은 90 초였다.

[0680] 결과 이미지는 도 72으로 도시된다. 샘플에서의 4가지 상이한 재료 각각을 위해 상이한 밀도가 관찰되었다. 이것은, 특정한 재료로 입사하는 He 이온의 산란 확률이 재료의 원자 번호에 의존한다는 사실의 결과이다. 도 72에서는, 비슷한 원자 번호의 재료조차도 구별될 수 있다. 예를 들어, 구리(원자 번호 29)와 니켈(원자 번호 28)이 시각적으로 구별 가능하다.

[0681] 도 73은, 산화물층이 웨이퍼를 덮고 있는 상태에서, 실리콘 웨이퍼 아래쪽에 구리층을 포함하는 샘플의 이미지를 나타낸다. 이미지는, 이 실시예에서 앞서 설명된 바와 같이, 산란 He 이온 및 중성 He 원자의 검출을 위해 구성된 He 이온 현미경 시스템을 사용해 측정되었다. 샘플은, 레이저를 샘플 표면으로 입사하도록 유도하는 것에 의해 발생된 표면 구조 사양을 포함한다. 레이저는 하부 구리층의 폭발적인 분출을 발생시켰다. 이미지의 시각적 검사는, 샘플에 존재하는 상이한 재료로부터 초래되는 이미지 콘트라스트(예를 들어, 이미지 밀도 변화)를 드러낸다. 도 73의 이미지와 같은 이미지로부터, 샘플에서의 상이한 재료에 대한 분포가 판정될 수 있다.

[0682] 15.

[0683] 팁은 실시예 1에서 설명된 절차에 따라 준비되었고, 기하학적 팁 특성의 캐릭터리제이션은 실시예 1에서 설명된 바와 같이 수행되었다. 팁은 실시예 1에서의 기준에 기초해 사용을 위해 수용되었다.

[0684] 팁은 실시예 1에서 설명된 절차를 사용해 FIM으로 정교화되었다. 그 다음, 팁은 He 이온 현미경에 설치되고 구성되었다. 현미경 시스템은 실시예 1에서 설명된 바와 같이 구성되었는데, 구성에 대한 변화는 다음에서 지적된다.

[0685] 현미경 시스템은, 입사 He 이온에 응답하여 샘플로부터 방출되는 광자를 측정하도록 구성되었다. 샘플의 이미지는 광전자 증배관(모델 R6095, Hamamatsu Photonics K.K., Toyooka, Japan)에 의해 발생되는 신호로부터 구성되었다. 광전자 증배관은 엔드온 윈도(end-on window), 비교적 높은 양자 효율성, 및 200 nm에서 700 nm까지의 광범위한 스펙트럼 응답을 가졌다. 튜브는, 200 V까지 또는 출력 신호가 과도한 포화없이 신호 체인의 백색 잡음 레벨에 도달되는 시점까지 증가될 수 있는 신호 이득으로써 동작되었다. 광전자 증배관은 샘플로부터 15 mm 거리에 배치되었고 샘플과 대면하도록 배향되었다. 이 구성에서, 튜브는 약 2 스테라디안의 입체각을 대면하였다.

[0686] NaCl의 샘플이 광전자 증배관 검출기를 사용해 영상화되었다. 이러한 측정을 위해, He 이온 빔 전류는 10 pA였고, 평균 He 이온 에너지는 25 keV였다. 샘플은 매 픽셀당 500 μs의 지속 시간으로써 래스터 스캔되었다. 150 V의 최대 전압이 스캔 편향기에 인가되어 샘플 표면에서 1.35 mm의 FOV를 산출하였다.

[0687] 샘플의 이미지는 도 74로 도시된다. 상이한 NaCl 결정 사이에서 이미지 콘트라스트(예를 들어, 이미지 밀도의 변화)가 뚜렷하다. 광자는 샘플에서 2가지 상이한 메커니즘을 통해 발생될 수 있다. 먼저, 광자는, SEM 이미

지에서 관찰되는 음극선 발광(cathodoluminescence)과 유사한 프로세스를 통해 발생될 수 있다. 이 메커니즘에서, 샘플의 원자는 좀더 높은 준위의(higher-lying) 에너지 상태로 여기된다. 후속적인 안정화(de-excitation) 프로세스 동안에 광자가 방출된다. 입사 빔으로부터의 He 이온이 좀더 낮은 준위의 에너지 상태로 복귀할 때, 광자가 방출된다.

[0688] He 이온 빔에 노출된 그리고 그로부터 방출된 광자가 검출된 다른 샘플로는 플라스틱, 신틸레이터, 및 유기 재료를 들 수 있다.

[0689] 16.

[0690] 팁은 실시예 1에서 설명된 절차에 따라 준비되었고, 기하학적 팁 특성의 캐릭터리제이션은 실시예 1에서 설명된 바와 같이 수행되었다. 팁은 실시예 1에서의 기준에 기초해 사용을 위해 수용되었다.

[0691] 팁은 실시예 1에서 설명된 절차를 사용해 FIM으로 정교화되었다. 그 다음, 팁은 He 이온 현미경에 설치되고 구성되었다. 현미경 시스템은 실시예 1에서 설명된 바와 같이 구성되었는데, 구성에 대한 변화는 다음에서 지적된다.

[0692] 팁은 추출기에 대하여 +19 kV로 바이어스되었고, He 가스가 $2x10^{-5}$ Torr의 압력에서 팁 부근으로 도입되었다. Faraday 컵은 제2 렌즈 너머에 배치되었고, 제1 렌즈 및 정렬 편향기가 빔을 포커싱하는데 사용되었으며, 그에 따라, 팁 삼량체 원자 중 하나로부터 기인하는 사실상 모든 He 이온은 (팁으로부터 370 ㎜에 배치된 지름 600 ㎛의) 간극을 통과하였고, 나머지 2개의 삼량체 원자로부터 기인하는 사실상 모든 He 이온은 간극에 의해 차단되었다. 간극을 통과한 후, He 이온 빔은 제1 렌즈에 의해 Faraday 컵쪽으로 포커싱되었다. 이 구성에서, 비점 수차 정정기, 스캔 편향기, 및 제2 렌즈는 오프 상태였다.

[0693] 팁 원자로부터 기인하는 총 He 이온 전류는 Faraday 컵과 함께 피코-전류계(Model 487, Keithley Instruments, Cleveland, OH)를 사용해 300 pA인 것으로 측정되었다. Faraday 컵은 깊이-대-지름 비가 약 6 대 1인 원통형 금속 컵이었다.

[0694] 그 후, 제1 렌즈는 오프되었다. 팁에서 발생된 He 이온 각각은, 팁으로부터 분기하면서, 계속해서 직선으로 이동하였다. 간극이 대부분의 He 이온 빔을 가로채기하였고, 그것 중 작은 중앙 부분만이 나머지 이온 열을 추가적으로 통과하는 것이 허용되었다. 간극을 통과한 일부분의 He 이온 빔은 Faraday 컵으로써 검출되어, 간극을 통과하는 5 pA의 측정된 He 이온 전류를 산출하였다. 그 다음, 팁 관점에서의 간극의 입체각으로써 나누어진, 간극을 통과하는 He 이온 빔 전류(5 pA)로서, He 이온 빔의 각밀도가 계산되었다. $\tan^{-1}(0.300/370) = 0.046^{\circ} = 8.1 \times 10^{-4}$ 라디안으로서 팁의 선단 및 간극에 의해 형성되는 원추각의 절반이 계산되었다. 대응되는 입체각은 2.1×10^{-6} 스테라디안(sr)으로서 계산되었다. 입체각에 기초해, He 이온 빔의 각밀도는 2.42 ㎂ /sr인 것으로 판정되었다.

[0695] He 이온 소스의 밝기는 He 이온 빔 각밀도 및 가상 소스 사이즈로부터 판정되었다. 가상 소스 사이즈는 팁의 정교화 동안에 기록된 팁의 FIM 이미지를 검사하는 것에 의해 추정되었다. 이 이미지로부터, 팁 삼량체 원자에 대응되는 개개 이온화 디스크는 중첩하지 않는다는 것이 명백하였다. 더 나아가, 텅스텐의 결정으로부터, 삼량체 원자는 약 5 옹스트롬만큼 떨어져 있다는 것을 알 수 있었다. 따라서, 실제 이온화 디스크는 약 3 옹스트롬의 지름을 갖는 것으로 추정되었다.

[0696] 가상 소스 사이즈는 일반적으로 실제 이온화 면적보다 작다. 가상 소스 사이즈는 앞서 논의된 일반적인 절차를 사용해: 일단 이온이 이온 소스의 전기 필드 영역(예를 들어, 팁 및 추출기 부근의 영역)을 넘어서고 나면, 100개 He 이온의 점근적인 궤적을 역프로젝팅하는 것에 의해 판정되었다. 역프로젝팅된 궤적은, 그것이 서로에 대하여 가장 근접하게 간격을 두게 될 때까지, 서로 좀더 가깝게 이동된 다음, 다시 분기되었다. 역프로젝팅된 궤적의 가장 근접한 간격의 원형 지름이 가상 소스 사이즈인 것으로 정의되었다.

[0697] 상한(upper bound)으로서, 가상 소스의 지름을 위해 3 옹스트롬의 값을 사용하였다. 단일 팁 원자로부터 기인하는 He 이온 빔의 일부분만이 간극을 통과하는 것을 허용하도록 현미경이 구성되는 경우, 가상 소스 사이즈는 상당히 작을 수 있다. 밝기는 가상 소스 사이즈의 면적($A;A = \pi(D/2)^2$)으로 나누어진 각밀도로서 계산되었다. 이온 소스의 밝기는 3.4×10^{9} A/cm^2sr이었다.

[0698] 감소된 밝기는, 빔을 추출하는데 사용된 전압(예를 들어, 팁에 인가된 전압 바이어스)으로 나누어진 밝기로서

계산되었다. 추출기에 대한 팁 전압은 19 kV였고, 감소된 밝기는 1.8 x 10^{9} A/m^{2}srV이었다.

[0699] 에텐듀는 He 이온 빔의 가상 소스 사이즈와 (입체각으로서의) 그것의 각 발산의 곱에 대한 측정이다. 앞서 판정된 밝기를 사용해, 에텐듀는 1.5 x 10^{-21} cm^{2}sr인 것으로 판정되었다.

[0700] 감소된 에텐듀는 He 이온 빔 전압만큼 배율된 에텐듀가다. 감소된 에텐듀는, 앞서 계산된 에텐듀에 기초해, (+19 kV의 팁 바이어스 전압을 사용하면) 2.8 x 10^{-17} cm^{2}srV인 것으로 판정되었다.

[0701] 17.

[0702] 팁은 실시예 1에서 설명된 절차에 따라 준비되었고, 기하학적 팁 특성의 캐릭터리제이션은 실시예 1에서 설명된 바와 같이 수행되었다. 팁은 실시예 1에서의 기준에 기초해 사용을 위해 수용되었다.

[0703] 팁은 실시예 1에서 설명된 절차를 사용해 FIM으로 정교화되었다. 그 다음, 팁은 He 이온 현미경에 설치되고 구성되었다. 현미경 시스템은 실시예 1에서 설명된 바와 같이 구성되었는데, 구성에 대한 변화는 다음에서 지적된다.

[0704] 현미경 시스템은 ET 검출기를 사용해 이차 전자를 측정하도록 구성되었다. 검출기는, 샘플로부터 측면으로 25 mm 변위되어, 샘플로부터 수직으로 (He 이온 빔에 평행하게) 10 mm 거리에 배치되었고, 샘플을 향해 기울여졌다. ET 스크린은 공통의 외부 그라운드에 대하여 +300 V의 전위로 바이어스되었다.

[0705] He 이온 빔 전류는 1 pA였고, 빔에서의 평균 이온 에너지는 22 keV였다. He 이온 빔은 매 픽셀당 100 μs의 지속 시간으로써 샘플 표면을 가로질러 래스터 스캔되었다. 100 mV의 최대 전압이 스캔 편향기에 인가되어 샘플의 표면에서 1000 nm의 FOV를 산출하였다.

[0706] 샘플은 탄소 기판의 표면에 형성된 금 섬을 포함하였고, Structure Probe Inc.(West Chester, PA)로부터 획득되었다. 상기 측정 구성을 사용해 기록된 샘플의 이미지가 도 75로 도시된다. 도 75의 이미지에 중첩된 직사각형으로써 지시되는 샘플 이미지의 영역은 He 이온 현미경으로써 관찰되는 에지 콘트라스트의 품질을 검사하기 위해 선택되었다. 직사각형에 의해 지시되는 영역은 거의 수직인 금 에지를 포함한다. 영역은, 각각이 57개 픽셀을 갖춘 20개 행을 포함한다. 선택 영역의 확장도가 도 76으로 도시된다.

[0707] 선택된 이미지 영역의 행 각각은 다음과 같이 개별적으로 분석되었다. 먼저, 잡음을 감소시키기 위해, 각각의 행은 MathCAD ksmooth 함수(PTC Inc., Needham, MA)를 사용해 3개 픽셀 대역폭의 가우시안 커널(Gaussian kernel)로써 평활화되었다. 도 77은, 평활화 이전(점) 및 평활화 이후(곡선)의 특정한 1개 라인(라인 #14)을 위한 픽셀 밀도 값이 플로팅되는 그래프를 나타낸다. 수직 축은, 0(검은색)에서 255(흰색)의 범위에 해당되는 이미지 밀도에 대응된다. 수평 축은, 0(왼쪽 에지)에서 57(오른쪽 에지)의 범위에 해당되는 픽셀 번호(pixel number)에 대응된다.

[0708] 이미지의 선택된 영역에서의 밀도 라인 스캔 각각을 위해, 밀도 라인 스캔의 일차 미분에 대한 최소값을 찾아내는 것에 의해, 왼쪽에서 오른쪽 명암 전이(left to right light-to-dark transition)의 중앙이 판정되었다. 왼쪽에서 오른쪽 명암 전이에 의한 에지의 경우, 전이의 중앙은, 밀도 라인 스캔의 일차 미분에 대한 최대값의 위치를 판정하는 것에 의해, 발견되었을 것이다.

[0709] 그 다음, 각 라인은 21개 픽셀만을 포함하도록 트리밍되었다. 트리밍은 전이 포인트를 선행하는 10개 픽셀, 및 전이 포인트를 후행하는 10개 픽셀이 각 라인에 포함되도록 동작된다. 트리밍된 각 라인에서의 처음의 5개 픽셀을 위한 밀도 값이 다같이 평균되었고, 평균은 100% 값으로서 식별되었다. 트리밍된 각 라인에서의 마지막 5개 픽셀을 위한 밀도 값이 다같이 평균되었고, 평균은 0% 값으로서 식별되었다. 그 다음, 라인 스캔 각각으로부터의 평활화된 데이터는 100% 및 0% 값에 의하여 재조정되었다. 도 77로부터의 재조정된 데이터가 도 78에 도시된다.

[0710] 도 78을 참조하면, 75% 및 25% 값은 0% 및 100% 값을 참조하여 판정되었다. He 이온 빔의 스폿 사이즈는 25% 값과 75% 값 사이의 수평축에 따른 격리 거리로서 후속적으로 판정되었다. 도 78의 데이터에 기초해, 스폿 사이즈는 3.0개 픽셀인 것으로 판정되었다. 픽셀 사이즈는 측정 구성에서의 공지된 FOV 및 이미지에서의 픽셀 수를 사용해 나노미터로 변환되었다. 이 측정의 경우, FOV는 641 nm였고, FOV에 걸쳐 656개 픽셀이 존재하였다. 따라서, He 이온 빔의 스폿 사이즈는 2.93 nm인 것으로 판정되었다. 이미지의 선택 영역에서의 20개 라인 각각을 위해 이것이 반복되었고, 결과는 평균되어 평균 2.44 nm의 He 이온 빔 스폿 사이즈를 산출하였다.

[0711] 18.

[0712] 팁은 실시예 1에서 설명된 절차에 따라 준비되었고, 기하학적 팁 특성의 캐릭터리제이션은 실시예 1에서 설명된 바와 같이 수행되었다. 팁은 실시예 1에서의 기준에 기초해 사용을 위해 수용되었다.

[0713] 팁은 실시예 1에서 설명된 절차를 사용해 FIM으로 정교화되었다. 그 다음, 팁은 He 이온 현미경에 설치되고 구성되었다. 현미경 시스템은 실시예 1에서 설명된 바와 같이 구성되었는데, 구성에 대한 변화는 다음에서 지적된다.

[0714] 현미경 시스템은 입사 He 이온에 응답하여 샘플 표면을 떠나는 산란 He 이온 및 중성 He 원자를 측정하도록 구성되었다. 실시예 3에서 설명된 MCP 검출기가 샘플로부터 10 mm에 배치되었다. 외부 그라운드에 관한 0 V의 전위 바이어스가 MCP 격자 및 전면에 인가되었다.

[0715] He 이온 빔 전류는 1 pA였고, 평균 He 이온 빔 에너지는 26 keV였다. He 이온 빔은 매 픽셀당 100 μs의 지속 시간으로써 샘플 표면에 걸쳐 래스터 스캔되었다. 1.30 V의 최대 전압이 스캔 편향기에 인가되어 샘플의 표면에서 13 ㎛의 FOV를 산출하였다.

[0716] 폴리실리콘으로 형성된 표면 사양의 실리콘 기판을 포함하는 샘플이 Metrocal로서 공지되어 있으며, Metroboost(Santa Clara, CA)로부터 획득되었다. 샘플은, He 이온 빔이 샘플 표면에 대한 법선 각도에서 입사하도록 배향되었다. 샘플은 공통의 외부 그라운드에 대하여 +19.4 kV로 바이어스되었고, 그에 따라, 입사 이온 빔에서의 He 이온은 6.6 keV의 착륙 에너지로써 샘플에 도달하였다. 샘플과 MCP 검출기 사이의 큰 전기 필드는 이차 전자가 검출기에 도달하는 것을 방지하였다. 샘플을 떠난 사실상 모든 이차 전자가 전기 필드의 영향하에 샘플 표면쪽으로 복귀되었다. 결과적으로, MCP 검출기는 산란 He 이온 및 중성 원자를 측정하였다. 검출기에 의해 측정되는 중성 He 원자는 6.6 keV의 최대 에너지를 갖는 한편, 검출기에 의해 측정되는 He 이온은, 그것이 MCP에 도달할 때까지는, 26 keV의 최대 에너지까지 가속되었다.

[0717] 도 79는 앞서 설명된 측정 구성을 사용해 기록된 샘플의 이미지를 나타낸다. 샘플 표면에서의 다양한 사양은, 비교적 균일하고 기판의 밀도와는 상이한 측정 밀도를 가진다. 표면 사양의 에지에 대한 시각적 검사는, 신호 체인의 포화를 초래할 수 있으며 에지의 정확한 위치 찾기를 어렵게 만들 수 있는, 명백한 밝은 에지 효과(예를 들어, 에지 블루밍)는 존재하지 않는다는 것을 드러낸다. 그에 더하여, 존재한다면, 이미지에서의 전압 콘트라스트로서 명시될 아티팩트와 같은, 샘플 표면에 대한 하전 아티팩트의 시각적 증거도 존재하지 않는다.

[0718] 샘플의 표면 사양 중 하나를 통한 수평 라인 스캔이 도 80으로 도시된다. 라인 스캔의 수평축은 픽셀 번호를 나타내고, 수직축은 특정한 픽셀에서 측정된 이미지 밀도를 지시한다. 비교를 위해, 동일한 샘플이 (약 13 ㎛의 FOV에 대응되는) 30,000 X 배율에서 3 keV 빔 에너지 및 30 pA 빔 전류의 Schottky Field Emission SEM(AMRAY model 1860)으로 영상화되었다. 결과 이미지는 도 81로 도시되고, 도 80에서 스캔된 동일 사양을 통한 수평 라인 스캔은 도 82로 도시된다.

[0719] 도 82의 라인 스캔은 상당한 밝은 에지 효과를 나타내었고, 영상화된 표면 사양 에지에서의 신호 체인은 거의 포화되었다. 표면 사양의 바디에서, SEM 라인 스캔은 비교적 균일한 정상 상태 밀도 레벨을 나타내지 않는다. 대신에, 사양의 바디에서의 밀도 레벨은 사양 중앙에서의 작은 영역을 제외한 어디에서든 감소 또는 증가하고 있는 중이다. 마지막으로, SEM 라인 스캔의 비대칭성은, SEM 노출 동안, 표면 사양의 시간 의존적 하전이 발생 중이었다는 것을 지시한다. 대조적으로, 산란 He 이온 및 중성 He 원자를 검출하는 것에 의해 기록된 사양의 라인 스캔 이미지는 상당히 감소된 에지 효과를 나타내고 명백한 하전 아티팩트는 나타내지 않는다.

[0720] 샘플 표면에서의 특정 사양에 대한 다중 측정도 수행될 수 있었다. 사양의 다중 측정이 이루어진다면, 측정 사양의 치수에 관한 통계 데이터를 규명할 수 있을 것이다. 예를 들어, 평균 사양 폭, 사양 폭의 표준 편이, 및/또는 사양의 제1 에지 및/또는 제2 에지의 위치에 대한 평균 및 표준 편이가 측정될 수 있었다. Fourier 방법도 하나 이상의 사양에 대한 에지 위치를 분석하여 에지 형태에 대응되는 공간 파장의 스펙트럼을 판정하는데 사용될 수 있었다.

[0721] 19. 샘플로부터의 지형 및 결정 정보의 측정

[0722] 샘플로부터 지형 및 결정 정보를 측정하기 위해, 샘플은 여기에서 설명되는 바와 같이 가스 필드 이온 현미경의 샘플 마운트에 제자리를 찾아 고정된다. 가스 필드 이온 현미경은 샘플 표면에서의 100 μm^2 FOV를 1 pA의 빔 전류, 20 KeV의 평균 이온 에너지, 및 FOV의 0.1%를 샘플 표면에서의 빔 스폿 사이즈로 가진 He 이온 빔에 노출

시키도록 구성된다.

[0723] 샘플로부터 결정 정보를 측정하기 위해, He 이온 빔은 샘플 표면의 FOV 영역에 걸쳐 이산 단계로 래스터 스캔된다. 2차원 검출기가 각각의 단계에서 샘플 표면으로부터 산란 He 이온의 이미지를 캡처하는데 사용된다. 2차원 이미지 각각은 샘플 표면의 특정 위치에서의 Kikuchi 패턴에 대응된다. Kikuchi 패턴에 기초해, 샘플의 결정 구조, 격자 간격, 및 그 위치에서의 결정 방향이 판정될 수 있다. FOV 전체에 걸친 이산 단계로 Kikuchi 패턴을 측정하는 것에 의해, 샘플의 표면 결정 구조에 대한 완전한 맵이 획득된다.

[0724] 샘플로부터 지형 정보를 측정하기 위해, 검출기는 입사 He 이온 빔에 응답하여 발생되는 샘플로부터 이차 전자 총 밀도를 측정하도록 구성된다. He 이온 빔은 샘플 표면의 전체 FOV 영역에 대해 이산 단계로 래스터 스캔되고, 샘플 표면에 대한 He 이온 빔의 위치의 함수로서 이차 전자의 총 밀도가 측정된다. 그 다음, 측정된 결정 정보는, 샘플에서의 결정 구조 변화로부터 발생하는 이차 전자 밀도 측정에 대한 기여를 제거하는데 사용된다. 정정된 총 이차 전자 밀도 값은 샘플의 그레이 스케일 이미지(grayscale image)를 구성하는데 사용되는데, 이 경우, 특정한 이미지 픽셀에서의 그레이 레벨은 샘플에 대한 대응되는 He 이온 빔 위치에서의 정정된 이차 전자 밀도에 의해 판정된다. 지형 정보는, FOV에서의 샘플에 대한 표면 경감 패턴을 나타내는 이미지에 의해 제공된다.

[0725] 20. 샘플로부터의 지형 및 결정 정보의 측정

[0726] 샘플로부터 지형 및 결정 정보를 측정하기 위해, 샘플은 여기에서 설명되는 바와 같이 가스 필드 이온 현미경의 샘플 마운트에 제자리를 찾아 고정된다. 가스 필드 이온 현미경은 실시예 19에서 설명된 바와 같이 구성된다.

[0727] 샘플로부터 결정 정보를 측정하기 위해, He 이온 빔은 샘플 표면의 FOV 영역에 걸쳐 이산 단계로 래스터 스캔된다. 검출기가 샘플 표면에 대한 He 이온 빔의 위치의 함수로서 산란 He 이온의 총 도수를 측정하는데 사용된다. 측정된 총 도수 값은 샘플의 그레이 스케일 이미지를 구성하는데 사용되는데, 이 경우, 특정한 이미지 픽셀에서의 그레이 레벨은 샘플에 대한 대응되는 He 이온 빔 위치에서의 He 이온의 측정된 총 도수에 의해 판정된다. 샘플 표면에서의 상이하게 배향된 결정 입자는 산란 He 이온의 상이한 수율을 가지며, 이미지는 상이하게 배향된 결정 입자를 가변 그레이 레벨로서 나타낸다. 이미지에서의 정보를 사용해, 결정 입자 및 입자 경계가 샘플 표면에서 식별될 수 있다.

[0728] 샘플로부터 지형 정보를 측정하기 위해, 실시예 19에서 설명된 바와 같이 총 이차 전자 밀도가 측정된다. 그 다음, 측정된 결정 정보는, 샘플에서의 결정 구조 변화로부터 발생하는 이차 전자 밀도 측정에 대한 기여를 제거하는데 사용된다. 정정된 총 이차 전자 밀도 값은 샘플의 그레이 스케일 이미지를 구성하는데 사용되는데, 이 경우, 특정한 이미지 픽셀에서의 그레이 레벨은 샘플에 대한 대응되는 He 이온 빔 위치에서의 이차 전자의 정정된 밀도에 의해 판정된다. 지형 정보는 FOV에서의 샘플의 표면 경감 패턴을 나타내는 이미지에 의해 제공된다.

[0729] 21. 샘플로부터의 지형 및 결정 정보의 측정

[0730] 샘플로부터 지형 및 결정 정보를 측정하기 위해, 샘플은 여기에서 설명되는 바와 같이 가스 필드 이온 현미경의 샘플 마운트에 제자리를 찾아 고정된다. 가스 필드 이온 현미경은 실시예 19에서 설명된 바와 같이 구성된다.

[0731] 샘플로부터 결정 정보를 측정하기 위해, He 이온 빔은 샘플 표면의 FOV 영역에 걸쳐 이산 단계로 래스터 스캔된다. 검출기가 샘플 표면에 대한 He 이온 빔의 위치의 함수로서 산란 He 이온의 총 도수를 측정하는데 사용된다. 측정된 총 도수 값은 샘플의 그레이 스케일 이미지를 구성하는데 사용되는데, 이 경우, 특정한 이미지 픽셀에서의 그레이 레벨은 샘플에 대한 대응되는 He 이온 빔 위치에서의 He 이온의 측정된 총 도수에 의해 판정된다. 샘플 표면에서의 상이하게 배향된 결정 입자는 산란 He 이온의 상이한 수율을 가지며, 이미지는 상이하게 배향된 결정 입자를 가변 그레이 레벨로서 나타낸다. 이미지에서의 정보를 사용해, 결정 입자 및 입자 경계가 샘플 표면에서 식별될 수 있다. 일단 샘플 표면에 대한 입자 경계가 식별되고 나면, He 이온 빔은 샘플 표면에서의 1개 입자에서 다른 입자까지 스캔된다. He 이온 빔의 위치 각각에서, 2차원 검출기가 샘플 표면으로부터 산란 He 이온의 이미지를 캡처하는데 사용된다. 2차원 이미지 각각은 샘플 표면에서의 특정한 결정 입자를 위한 Kikuchi 패턴에 대응된다. Kikuchi 패턴에 기초해, 입자의 결정 구조, 격자 간격, 및 결정 방향이 판정될 수 있다. FOV 전체에 걸친 픽셀 각각에서가 아니라 입자 각각을 위한 단일 Kikuchi 패턴을 측정하는 것에 의해, 샘플의 표면 결정 구조에 대한 완전한 맵이 좀더 짧은 시간에 획득된다.

[0732] 샘플로부터 지형 정보를 측정하기 위해, 실시예 19에서 설명된 바와 같이 총 이차 전자 밀도가 측정된다. 그 다음, 측정된 결정 정보는, 샘플에서의 결정 구조 변화로부터 발생하는 이차 전자 밀도 측정에 대한 기여를 제

거하는데 사용된다. 정정된 총 이차 전자 밀도 값은 샘플의 그레이 스케일 이미지를 구성하는데 사용되는데, 이 경우, 특정한 이미지 픽셀에서의 그레이 레벨은 샘플에 대한 대응되는 He 이온 빔 위치에서의 이차 전자의 정정된 밀도에 의해 판정된다. 지형 정보는 FOV에서의 샘플의 표면 경감 패턴을 나타내는 이미지에 의해 제공된다.

[0733] 22. 샘플로부터의 지형 및 결정 정보의 측정

[0734] 샘플로부터 지형 및 결정 정보를 측정하기 위해, 샘플은 여기에서 설명되는 바와 같이 가스 필드 이온 현미경의 샘플 마운트에 제자리를 찾아 고정된다. 가스 필드 이온 현미경은 실시예 19에서 설명된 바와 같이 구성된다.

[0735] 샘플로부터의 결정 정보는 실시예 19에서 설명된 바와 같이 측정된다.

[0736] 샘플로부터 지형 정보를 측정하기 위해, 검출기는 입사 He 이온 빔에 응답하여 발생되는 샘플로부터의 이차 전자의 총 밀도를 측정하도록 구성된다. 샘플은 He 이온 빔에 대하여 기울여지고, 그에 따라, He 이온 빔은 비법선 각도에서 샘플의 표면쪽으로 입사한다. He 이온 빔은 샘플 표면의 전체 FOV 영역에 대해 이산 단계로 래스터 스캔되고, 샘플 표면에 대한 He 이온 빔의 위치의 함수로서 이차 전자의 총 밀도가 측정된다. 그 다음, 측정된 결정 정보는, 샘플에서의 결정 구조 변화로부터 발생하는 이차 전자 밀도 측정에 대한 기여를 제거하는데 사용된다. 정정된 총 밀도 값은 샘플의 그레이 스케일 이미지를 구성하는데 사용되는데, 이 경우, 특정한 이미지 픽셀에서의 그레이 레벨은 샘플에 대한 대응되는 He 이온 빔 위치에서의 이차 전자의 정정된 총 밀도에 의해 판정된다. 지형 정보는, FOV에서의 샘플에 대한 표면 경감 패턴을 나타내는 이미지에 의해 제공된다. He 이온 빔에 대하여 샘플을 기울이는 것은, 그렇지 않고, He 이온 빔이 법선 각도에서만 샘플 표면으로 입사한다면, 은닉된 상태를 유지할 지형 정보를 드러낼 수 있다.

[0737] 그 다음, 선택적으로, 샘플 기울기는, He 이온 빔이 상이한 비법선 각도에서 샘플 표면쪽으로 입사하도록 조정될 수 있고, He 이온 빔은 샘플 표면의 전체 FOV 영역에 걸쳐 이산 단계로 래스터 스캔된다. 이차 전자의 총 밀도는 샘플 표면에 대한 He 이온 빔의 위치의 함수로서 측정되고, 측정된 결정 정보는, 샘플에서의 결정 구조 변화로부터 발생하는 이차 전자 밀도 측정에 대한 기여를 제거하는데 사용된다. 정정된 총 이차 전자 밀도 값은 He 이온 빔의 제2 비법선 입사각에 대응되는 샘플의 제2 그레이 스케일 이미지를 구성하는데 사용되는데, 이 경우, 특정한 이미지 픽셀에서의 그레이 레벨은 샘플에 대한 대응되는 He 이온 빔 위치에서의 이차 전자의 정정된 총 밀도에 의해 판정된다. 그 다음, 상이한 He 이온 빔 입사각에서 측정된 2개 이미지로부터의 정보는 조합되어, 샘플의 표면에 관한 정량적인 3차원 지형 정보를 판정하는데 사용될 수 있다.

[0738] 23. 샘플로부터의 지형 및 결정 정보의 측정

[0739] 샘플로부터 지형 및 결정 정보를 측정하기 위해, 샘플은 여기에서 설명되는 바와 같이 가스 필드 이온 현미경의 샘플 마운트에 제자리를 찾아 고정된다. 가스 필드 이온 현미경은 실시예 19에서 설명된 바와 같이 구성된다.

[0740] 샘플로부터의 결정 정보는 실시예 20에서 설명된 바와 같이 측정된다.

[0741] 샘플로부터 지형 정보를 측정하기 위해, 샘플로부터의 이차 전자의 총 밀도가 실시예 22에서 설명된 바와 같이 측정된다. 측정된 결정 정보는, 각각의 이온 빔 입사각에서, 샘플에서의 결정 구조 변화로부터 발생하는 이차 전자 밀도 측정에 대한 기여를 제거하는데 사용된다. 정정된 총 이차 전자 밀도 값은 실시예 22에서 설명된 바와 같이 샘플의 그레이 스케일 이미지를 구성하는데 사용된다. 그 다음, 상이한 He 이온 빔 입사각에서 측정된 2개 이미지로부터의 정보는 조합되어, 샘플의 표면에 관한 정량적인 3차원 지형 정보를 판정하는데 사용될 수 있다.

[0742] 24. 샘플로부터의 지형 및 결정 정보의 측정

[0743] 샘플로부터 지형 및 결정 정보를 측정하기 위해, 샘플은 여기에서 설명되는 바와 같이 가스 필드 이온 현미경의 샘플 마운트에 제자리를 찾아 고정된다. 가스 필드 이온 현미경은 실시예 19에서 설명된 바와 같이 구성된다.

[0744] 샘플로부터의 결정 정보는 실시예 21에서 설명된 바와 같이 측정된다.

[0745] 샘플로부터 지형 정보를 측정하기 위해, 샘플로부터의 이차 전자의 총 밀도가 실시예 22에서 설명된 바와 같이 측정된다. 측정된 결정 정보는, 각각의 이온 빔 입사각에서, 샘플에서의 결정 구조 변화로부터 발생하는 이차 전자 밀도 측정에 대한 기여를 제거하는데 사용된다. 정정된 총 이차 전자 밀도 값은 실시예 22에서 설명된 바와 같이 샘플의 그레이 스케일 이미지를 구성하는데 사용된다. 그 다음, 상이한 He 이온 빔 입사각에서 측정된 2개 이미지로부터의 정보는 조합되어, 샘플의 표면에 관한 정량적인 3차원 지형 정보를 판정하는데 사용될 수

있다.

[0746] 25. 샘플로부터의 지형 및 결정 정보의 측정

[0747] 샘플로부터 지형 및 결정 정보를 측정하기 위해, 샘플은 여기에서 설명되는 바와 같이 가스 필드 이온 현미경의 샘플 마운트에 제자리를 찾아 고정된다. 가스 필드 이온 현미경은 실시예 19에서 설명된 바와 같이 구성된다.

[0748] 샘플로부터의 결정 정보는 실시예 19에서 설명된 바와 같이 측정된다.

[0749] 샘플로부터 지형 정보를 측정하기 위해, 각각이 샘플에 대하여 상이한 각도 및 위치로 배향된 2 이상의 검출기가 입사 He 이온 빔에 응답하여 발생되는 샘플로부터의 이차 전자의 총 밀도를 측정하도록 구성된다. He 이온 빔은 샘플 표면의 전체 FOV 영역에 대해 이산 단계로 래스터 스캔되고, 샘플 표면에 대한 He 이온 빔의 위치의 함수로서 이차 전자의 총 밀도가 각각의 검출기에 의해 측정된다. 측정된 결정 정보는, 샘플에서의 결정 구조 변화로부터 발생하는 검출기 각각에서의 이차 전자 밀도 측정에 대한 기여를 제거하는데 사용된다. 정정된 총 밀도 값은, 각각이 검출기 중 하나에 대응되는, 샘플의 그레이 스케일 이미지를 구성하는데 사용되는데, 이 경우, 특정 이미지의 특정 픽셀에서의 그레이 레벨은 샘플에 대한 대응되는 He 이온 빔 위치에서의 이차 전자의 정정된 총 밀도에 의해 판정된다. 그 다음, 다중 검출기에 의해 측정된 이미지로부터의 정보는 조합되어, 샘플의 표면에 관한 정량적인 3차원 지형 정보를 판정하는데 사용될 수 있다.

[0750] 26. 샘플로부터의 지형 및 결정 정보의 측정

[0751] 샘플로부터 지형 및 결정 정보를 측정하기 위해, 샘플은 여기에서 설명되는 바와 같이 가스 필드 이온 현미경의 샘플 마운트에 제자리를 찾아 고정된다. 가스 필드 이온 현미경은 실시예 19에서 설명된 바와 같이 구성된다.

[0752] 샘플로부터의 결정 정보는 실시예 20에서 설명된 바와 같이 측정된다.

[0753] 샘플로부터 지형 정보를 측정하기 위해, 샘플로부터의 이차 전자의 총 밀도가 실시예 25에서 설명된 바와 같이 측정된다. 측정된 결정 정보는, 검출기 각각에서, 샘플에서의 결정 구조 변화로부터 발생하는 이차 전자 밀도 측정에 대한 기여를 제거하는데 사용된다. 정정된 총 이차 전자 밀도 값은 실시예 25에서 설명된 바와 같이 샘플의 그레이 스케일 이미지를 구성하는데 사용된다. 그 다음, 다중 검출기에 의해 측정된 이미지로부터의 정보는 조합되어, 샘플의 표면에 관한 정량적인 3차원 지형 정보를 판정하는데 사용될 수 있다.

[0754] 27. 샘플로부터의 지형 및 결정 정보의 측정

[0755] 샘플로부터 지형 및 결정 정보를 측정하기 위해, 샘플은 여기에서 설명되는 바와 같이 가스 필드 이온 현미경의 샘플 마운트에 제자리를 찾아 고정된다. 가스 필드 이온 현미경은 실시예 19에서 설명된 바와 같이 구성된다.

[0756] 샘플로부터의 결정 정보는 실시예 21에서 설명된 바와 같이 측정된다.

[0757] 샘플로부터 지형 정보를 측정하기 위해, 샘플로부터의 이차 전자의 총 밀도가 실시예 25에서 설명된 바와 같이 측정된다. 측정된 결정 정보는, 검출기 각각에서, 샘플에서의 결정 구조 변화로부터 발생하는 이차 전자 밀도 측정에 대한 기여를 제거하는데 사용된다. 정정된 총 이차 전자 밀도 값은 실시예 25에서 설명된 바와 같이 샘플의 그레이 스케일 이미지를 구성하는데 사용된다. 그 다음, 다중 검출기에 의해 측정된 이미지로부터의 정보는 조합되어, 샘플의 표면에 관한 정량적인 3차원 지형 정보를 판정하는데 사용될 수 있다.

[0758] 28. 샘플로부터의 지형 및 결정 정보의 측정

[0759] 샘플로부터 지형 및 결정 정보를 측정하기 위해, 샘플은 여기에서 설명되는 바와 같이 가스 필드 이온 현미경의 샘플 마운트에 제자리를 찾아 고정된다. 가스 필드 이온 현미경은 실시예 19에서 설명된 바와 같이 구성된다.

[0760] 샘플로부터의 결정 정보는 실시예 19에서 설명된 바와 같이 측정된다.

[0761] 샘플로부터 지형 정보를 측정하기 위해, He 이온을 측정하도록 구성된 검출기가 샘플의 표면으로부터 큰 산란 각도에서 산란되는 He 이온을 검출하도록 배치된다. He 이온 빔은 샘플 표면의 전체 FOV 영역에 대해 이산 단계로 래스터 스캔되고, 샘플 표면에 대한 He 이온 빔의 위치의 함수로서 He 이온의 총 도수가 검출기에 의해 측정된다. 총 도수 값은 샘플의 그레이 스케일 이미지를 구성하는데 사용되는데, 이 경우, 특정한 이미지 픽셀에서의 그레이 레벨은 샘플에 대한 대응되는 He 이온 빔 위치에서의 산란 He 이온의 측정된 총 도수에 의해 판정된다. 지형 정보는, FOV에서의 샘플의 표면 경감 패턴을 나타내는 이미지에 의해 제공된다.

[0762] 29. 샘플로부터의 지형 및 결정 정보의 측정

[0763] 샘플로부터 지형 및 결정 정보를 측정하기 위해, 샘플은 여기에서 설명되는 바와 같이 가스 필드 이온 현미경의 샘플 마운트에 제자리를 찾아 고정된다. 가스 필드 이온 현미경은 실시예 19에서 설명된 바와 같이 구성된다.

[0764] 샘플로부터의 결정 정보는 실시예 20에서 설명된 바와 같이 측정된다.

[0765] 샘플로부터의 지형 정보는 실시예 28에서 설명된 바와 같이 측정된다.

[0766] 30. 샘플로부터의 지형 및 결정 정보의 측정

[0767] 샘플로부터 지형 및 결정 정보를 측정하기 위해, 샘플은 여기에서 설명되는 바와 같이 가스 필드 이온 현미경의 샘플 마운트에 제자리를 찾아 고정된다. 가스 필드 이온 현미경은 실시예 19에서 설명된 바와 같이 구성된다.

[0768] 샘플로부터의 결정 정보는 실시예 31에서 설명된 바와 같이 측정된다.

[0769] *샘플로부터의 지형 정보는 실시예 28에서 설명된 바와 같이 측정된다.

[0770] 31. 샘플로부터의 지형 및 결정 정보의 측정

[0771] 샘플로부터 지형 및 결정 정보를 측정하기 위해, 샘플은 여기에서 설명되는 바와 같이 가스 필드 이온 현미경의 샘플 마운트에 제자리를 찾아 고정된다. 가스 필드 이온 현미경은 실시예 19에서 설명된 바와 같이 구성된다.

[0772] 샘플로부터의 결정 정보는 실시예 19에서 설명된 바와 같이 측정된다.

[0773] 샘플로부터 지형 정보를 측정하기 위해, He 이온을 측정하도록 구성된 2 이상의 검출기가 샘플의 표면으로부터 큰 산란 각도에서 산란되는 He 이온을 검출하도록 배치된다. He 이온 빔은 샘플 표면의 전체 FOV 영역에 대해 이산 단계로 래스터 스캔되고, 샘플 표면에 대한 He 이온 빔의 위치의 함수로서 He 이온의 총 도수가 검출기 각각에 의해 측정된다. 총 도수 값은 검출기 각각에 대응되는 샘플의 그레이 스케일 이미지를 구성하는데 사용되는데, 이 경우, 특정한 이미지 픽셀에서의 그레이 레벨은 샘플에 대한 대응되는 He 이온 빔 위치에서의 산란 He 이온의 측정된 총 도수에 의해 판정된다. 그 다음, 검출기에 의해 측정된 다중 이미지로부터의 정보는 조합되어, 샘플의 표면에 관한 정량적인 3차원 지형 정보를 판정하는데 사용될 수 있다.

[0774] 32. 샘플로부터의 지형 및 결정 정보의 측정

[0775] 샘플로부터 지형 및 결정 정보를 측정하기 위해, 샘플은 여기에서 설명되는 바와 같이 가스 필드 이온 현미경의 샘플 마운트에 제자리를 찾아 고정된다. 가스 필드 이온 현미경은 실시예 19에서 설명된 바와 같이 구성된다.

[0776] 샘플로부터의 결정 정보는 실시예 20에서 설명된 바와 같이 측정된다.

[0777] 샘플로부터의 지형 정보는 실시예 31에서 설명된 바와 같이 측정된다.

[0778] 33. 샘플로부터의 지형 및 결정 정보의 측정

[0779] 샘플로부터 지형 및 결정 정보를 측정하기 위해, 샘플은 여기에서 설명되는 바와 같이 가스 필드 이온 현미경의 샘플 마운트에 제자리를 찾아 고정된다. 가스 필드 이온 현미경은 실시예 19에서 설명된 바와 같이 구성된다.

[0780] 샘플로부터의 결정 정보는 실시예 21에서 설명된 바와 같이 측정된다.

[0781] *샘플로부터의 지형 정보는 실시예 31에서 설명된 바와 같이 측정된다.

[0782] 34. 샘플로부터의 지형 및 재료 정보의 측정

[0783] 샘플로부터 지형 및 재료 정보를 측정하기 위해, 샘플은 여기에서 설명되는 바와 같이 가스 필드 이온 현미경의 샘플 마운트에 제자리를 찾아 고정된다. 가스 필드 이온 현미경은 실시예 19에서 설명된 바와 같이 구성된다.

[0784] 샘플로부터 재료 정보를 측정하기 위해, He 이온을 측정하도록 구성된 검출기가 샘플로부터 역산란되는(backscattered) He 이온을 검출하도록 배치된다. He 이온 빔은 샘플 표면의 전체 FOV 영역에 대해 이산 단계로 래스터 스캔되고, 샘플 표면에 대한 He 이온 빔의 위치의 함수로서 역산란 He 이온의 총 도수가 측정된다. 역산란 He 이온의 총 도수 측정은 샘플의 그레이 스케일 이미지를 구성하는데 사용되는데, 이 경우, 특정한 이미지 픽셀에서의 그레이 레벨은 샘플에 대한 대응되는 He 이온 빔 위치에서의 역산란 He 이온의 측정된 총 도수에 의해 판정된다. He 이온 산란 단면은 대략적으로 산란 원자의 원자 번호 제곱에 의존하기 때문에, 이미지에

서의 밀도가 샘플의 조성을 정량적으로 판정하는데 사용될 수 있다.

[0785] 샘플로부터 지형 정보를 측정하기 위해, 실시예 19에서 설명된 바와 같이 샘플 표면에 대한 He 이온 빔의 위치의 함수로서 이차 전자의 총 밀도가 측정된다. 그 다음, 측정된 재료 정보는 샘플에서의 조성 변화로부터 발생하는 총 이차 전자 밀도 측정에 대한 기여를 제거하는데 사용된다. 정정된 총 이차 전자 밀도 값은 샘플의 그레이 스케일 이미지를 구성하는데 사용되는데, 이 경우, 특정한 이미지 픽셀에서의 그레이 레벨은 정정된 총 밀도 값에 의해 판정된다. 지형 정보는, FOV에서의 샘플의 표면 경감 패턴을 나타내는 이미지에 의해 제공된다.

[0786] 35. 샘플로부터의 지형 및 재료 정보의 측정

[0787] 샘플로부터 지형 및 재료 정보를 측정하기 위해, 샘플은 여기에서 설명되는 바와 같이 가스 필드 이온 현미경의 샘플 마운트에 제자리를 찾아 고정된다. 가스 필드 이온 현미경은 실시예 19에서 설명된 바와 같이 구성된다.

[0788] 재료 정보는 실시예 34에서 설명된 바와 같이 샘플로부터 측정될 수 있다.

[0789] 샘플로부터 지형 정보를 측정하기 위해, 샘플로부터의 이차 전자의 총 밀도가 실시예 22에서 설명된 바와 같이 측정된다. 측정된 재료 정보는, 각각의 이온 빔 입사각에서, 샘플에서의 조성 변화로부터 발생하는 이차 전자 밀도 측정에 대한 기여를 제거하는데 사용된다. 정정된 총 이차 전자 밀도 값은 실시예 22에서 설명된 바와 같이 샘플의 그레이 스케일 이미지를 구성하는데 사용된다. 그 다음, 상이한 He 이온 빔 입사각에서 측정된 2개 이미지로부터의 정보는 조합되어, 샘플의 표면에 관한 정량적인 3차원 지형 정보를 판정하는데 사용될 수 있다.

[0790] 36. 샘플로부터의 지형 및 재료 정보의 측정

[0791] 샘플로부터 지형 및 재료 정보를 측정하기 위해, 샘플은 여기에서 설명되는 바와 같이 가스 필드 이온 현미경의 샘플 마운트에 제자리를 찾아 고정된다. 가스 필드 이온 현미경은 실시예 19에서 설명된 바와 같이 구성된다.

[0792] 재료 정보는 실시예 34에서 설명된 바와 같이 샘플로부터 측정될 수 있다.

[0793] 샘플로부터 지형 정보를 측정하기 위해, 샘플로부터의 이차 전자의 총 밀도가 실시예 25에서 설명된 바와 같이 측정된다. 측정된 재료 정보는, 각각의 검출기에서, 샘플에서의 조성 변화로부터 발생하는 이차 전자 밀도 측정에 대한 기여를 제거하는데 사용된다. 정정된 총 이차 전자 밀도 값은 실시예 25에서 설명된 바와 같이 샘플의 그레이 스케일 이미지를 구성하는데 사용된다. 그 다음, 다중 검출기에 의해 측정된 이미지로부터의 정보는 조합되어, 샘플의 표면에 관한 정량적인 3차원 지형 정보를 판정하는데 사용될 수 있다.

[0794] 37. 샘플로부터의 지형 및 재료 정보의 측정

[0795] 샘플로부터 지형 및 재료 정보를 측정하기 위해, 샘플은 여기에서 설명되는 바와 같이 가스 필드 이온 현미경의 샘플 마운트에 제자리를 찾아 고정된다. 가스 필드 이온 현미경은 실시예 19에서 설명된 바와 같이 구성된다.

[0796] 재료 정보는 실시예 34에서 설명된 바와 같이 샘플로부터 측정될 수 있다.

[0797] 샘플로부터의 지형 정보는 실시예 28에서 설명된 바와 같이 측정된다.

[0798] 38. 샘플로부터의 지형 및 재료 정보의 측정

[0799] 샘플로부터 지형 및 재료 정보를 측정하기 위해, 샘플은 여기에서 설명되는 바와 같이 가스 필드 이온 현미경의 샘플 마운트에 제자리를 찾아 고정된다. 가스 필드 이온 현미경은 실시예 19에서 설명된 바와 같이 구성된다.

[0800] 재료 정보는 실시예 34에서 설명된 바와 같이 샘플로부터 측정될 수 있다.

[0801] 샘플로부터의 지형 정보는 실시예 31에서 설명된 바와 같이 측정된다.

[0802] 39. 샘플로부터의 지형 및 재료 정보의 측정

[0803] 샘플로부터 지형 및 재료 정보를 측정하기 위해, 샘플은 여기에서 설명되는 바와 같이 가스 필드 이온 현미경의 샘플 마운트에 제자리를 찾아 고정된다. 가스 필드 이온 현미경은 실시예 19에서 설명된 바와 같이 구성된다.

[0804] 샘플로부터 재료 정보를 측정하기 위해, He 이온을 측정하도록 구성된 에너지- 및 각도-분해 검출기(energy- and angle-resolved detector)가 샘플로부터 He를 검출하도록 배치된다. He 이온 빔은 샘플 표면의 전체 FOV 영역에 대해 이산 단계로 래스터 스캔되고, 샘플 표면에 대한 He 이온 빔의 위치의 함수로서 산란 He 이온의 에너지 및 각도가 측정된다. 산란 He 이온의 평균 각도 및 에너지로부터, 산란 원자의 질량이 판정될 수 있고, 샘플의 조성이 판정될 수 있다.

[0805] 샘플로부터 지형 정보를 측정하기 위해, 이차 전자의 총 밀도가 실시예 19에서 설명된 바와 같이 샘플 표면에 대한 He 이온 빔의 위치의 함수로서 측정된다. 그 다음, 측정된 재료 정보는 샘플에서의 조성 변화로부터 발생하는 총 이차 전자 밀도 측정에 대한 기여를 제거하는데 사용된다. 정정된 총 이차 전자 밀도 값은 샘플의 그레이 스케일 이미지를 구성하는데 사용되는데, 이 경우, 특정한 이미지 픽셀에서의 그레이 레벨은 정정된 총 밀도 값에 의해 판정된다. 지형 정보는, FOV에서의 샘플의 표면 경감 패턴을 나타내는 이미지에 의해 제공된다.

[0806] 40. 샘플로부터의 지형 및 재료 정보의 측정

[0807] 샘플로부터 지형 및 재료 정보를 측정하기 위해, 샘플은 여기에서 설명되는 바와 같이 가스 필드 이온 현미경의 샘플 마운트에 제자리를 찾아 고정된다. 가스 필드 이온 현미경은 실시예 19에서 설명된 바와 같이 구성된다.

[0808] 재료 정보는 실시예 39에서 설명된 바와 같이 재료로부터 측정될 수 있다.

[0809] 샘플로부터 지형 정보를 측정하기 위해, 샘플로부터의 이차 전자의 총 밀도가 실시예 22에서 설명된 바와 같이 측정된다. 측정된 재료 정보는, 각각의 이온 빔 입사각에서, 샘플에서의 조성 변화로부터 발생하는 이차 전자 밀도 측정에 대한 기여를 제거하는데 사용된다. 정정된 총 이차 전자 밀도 값은 실시예 22에서 설명된 바와 같이 샘플의 그레이 스케일 이미지를 구성하는데 사용된다. 그 다음, 상이한 He 이온 빔 입사각에서 측정된 2개 이미지로부터의 정보는 조합되어, 샘플의 표면에 관한 정량적인 3차원 지형 정보를 판정하는데 사용될 수 있다.

[0810] 41. 샘플로부터의 지형 및 재료 정보의 측정

[0811] 샘플로부터 지형 및 재료 정보를 측정하기 위해, 샘플은 여기에서 설명되는 바와 같이 가스 필드 이온 현미경의 샘플 마운트에 제자리를 찾아 고정된다. 가스 필드 이온 현미경은 실시예 19에서 설명된 바와 같이 구성된다.

[0812] 재료 정보는 실시예 39에서 설명된 바와 같이 재료로부터 측정될 수 있다.

[0813] 샘플로부터 지형 정보를 측정하기 위해, 샘플로부터의 이차 전자의 총 밀도가 실시예 25에서 설명된 바와 같이 측정된다. 측정된 재료 정보는, 각각의 검출기에서, 샘플에서의 조성 변화로부터 발생하는 이차 전자 밀도 측정에 대한 기여를 제거하는데 사용된다. 정정된 총 이차 전자 밀도 값은 실시예 25에서 설명된 바와 같이 샘플의 그레이 스케일 이미지를 구성하는데 사용된다. 그 다음, 다중 검출기에 의해 측정된 이미지로부터의 정보는 조합되어, 샘플의 표면에 관한 정량적인 3차원 지형 정보를 판정하는데 사용될 수 있다.

[0814] 42. 샘플로부터의 지형 및 재료 정보의 측정

[0815] 샘플로부터 지형 및 재료 정보를 측정하기 위해, 샘플은 여기에서 설명되는 바와 같이 가스 필드 이온 현미경의 샘플 마운트에 제자리를 찾아 고정된다. 가스 필드 이온 현미경은 실시예 19에서 설명된 바와 같이 구성된다.

[0816] 재료 정보는 실시예 39에서 설명된 바와 같이 샘플로부터 측정될 수 있다.

[0817] 샘플로부터의 지형 정보는 실시예 28에서 설명된 바와 같이 측정된다.

[0818] 43. 샘플로부터의 지형 및 재료 정보의 측정

[0819] 샘플로부터 지형 및 재료 정보를 측정하기 위해, 샘플은 여기에서 설명되는 바와 같이 가스 필드 이온 현미경의 샘플 마운트에 제자리를 찾아 고정된다. 가스 필드 이온 현미경은 실시예 19에서 설명된 바와 같이 구성된다.

[0820] 재료 정보는 실시예 39에서 설명된 바와 같이 샘플로부터 측정될 수 있다.

[0821] 샘플로부터의 지형 정보는 실시예 31에서 설명된 바와 같이 측정된다.

[0822] 44. 샘플로부터의 지형 및 재료 정보의 측정

[0823] 샘플로부터 지형 및 재료 정보를 측정하기 위해, 샘플은 여기에서 설명되는 바와 같이 가스 필드 이온 현미경의 샘플 마운트에 제자리를 찾아 고정된다. 가스 필드 이온 현미경은 실시예 19에서 설명된 바와 같이 구성된다.

[0824] 재료 정보를 측정하기 위해, x-선 검출기가, 입사 He 이온 빔에 응답하여 샘플로부터 출현하는 x-선을 검출하는데 사용될 수 있다. He 이온 빔은 샘플 표면의 전체 FOV 영역에 대해 이산 단계로 래스터 스캔되고, 샘플 표면에 대한 He 이온 빔의 위치의 함수로서 x-선 방사 스펙트럼이 측정된다. x-선 스펙트럼에서의 소정 방사선(certain emission lines)은 원자의 소정 유형에 대해 독특하므로, 측정된 x-선 스펙트럼에 기초해, 샘플 표면에 대한 단계 각각에서의 조성이 판정된다.

[0825] *샘플로부터 지형 정보를 측정하기 위해, 이차 전자의 총 밀도가 실시예 19에서 설명된 바와 같이 샘플 표면에 대한 He 이온 빔의 위치의 함수로서 측정된다. 그 다음, 측정된 재료 정보는 샘플에서의 조성 변화로부터 발생하는 총 이차 전자 밀도 측정에 대한 기여를 제거하는데 사용된다. 정정된 총 이차 전자 밀도 값은 샘플의 그레이 스케일 이미지를 구성하는데 사용되는데, 이 경우, 특정한 이미지 픽셀에서의 그레이 레벨은 정정된 총 밀도 값에 의해 판정된다. 지형 정보는, FOV에서의 샘플의 표면 경감 패턴을 나타내는 이미지에 의해 제공된다.

[0826] 45. 샘플로부터의 지형 및 재료 정보의 측정

[0827] 샘플로부터 지형 및 재료 정보를 측정하기 위해, 샘플은 여기에서 설명되는 바와 같이 가스 필드 이온 현미경의 샘플 마운트에 제자리를 찾아 고정된다. 가스 필드 이온 현미경은 실시예 19에서 설명된 바와 같이 구성된다.

[0828] 재료 정보는 실시예 44에서 설명된 바와 같이 샘플로부터 측정될 수 있다.

[0829] 샘플로부터 지형 정보를 측정하기 위해, 샘플로부터의 이차 전자의 총 밀도가 실시예 22에서 설명된 바와 같이 측정된다. 측정된 재료 정보는, 각각의 이온 빔 입사각에서, 샘플에서의 조성 변화로부터 발생하는 이차 전자 밀도 측정에 대한 기여를 제거하는데 사용된다. 정정된 총 이차 전자 밀도 값은 실시예 22에서 설명된 바와 같이 샘플의 그레이 스케일 이미지를 구성하는데 사용된다. 그 다음, 상이한 He 이온 빔 입사각에서 측정된 2개 이미지로부터의 정보는 조합되어, 샘플의 표면에 관한 정량적인 3차원 지형 정보를 판정하는데 사용될 수 있다.

[0830] 46. 샘플로부터의 지형 및 재료 정보의 측정

[0831] 샘플로부터 지형 및 재료 정보를 측정하기 위해, 샘플은 여기에서 설명되는 바와 같이 가스 필드 이온 현미경의 샘플 마운트에 제자리를 찾아 고정된다. 가스 필드 이온 현미경은 실시예 19에서 설명된 바와 같이 구성된다.

[0832] 재료 정보는 실시예 44에서 설명된 바와 같이 샘플로부터 측정될 수 있다.

[0833] 샘플로부터 지형 정보를 측정하기 위해, 샘플로부터의 이차 전자의 총 밀도가 실시예 25에서 설명된 바와 같이 측정된다. 측정된 재료 정보는, 각각의 검출기에서, 샘플에서의 조성 변화로부터 발생하는 이차 전자 밀도 측정에 대한 기여를 제거하는데 사용된다. 정정된 총 이차 전자 밀도 값은 실시예 25에서 설명된 바와 같이 샘플의 그레이 스케일 이미지를 구성하는데 사용된다. 그 다음, 다중 검출기에 의해 측정된 이미지로부터의 정보는 조합되어, 샘플의 표면에 관한 정량적인 3차원 지형 정보를 판정하는데 사용될 수 있다.

[0834] 47. 샘플로부터의 지형 및 재료 정보의 측정

[0835] 샘플로부터 지형 및 재료 정보를 측정하기 위해, 샘플은 여기에서 설명되는 바와 같이 가스 필드 이온 현미경의 샘플 마운트에 제자리를 찾아 고정된다. 가스 필드 이온 현미경은 실시예 19에서 설명된 바와 같이 구성된다.

[0836] 재료 정보는 실시예 44에서 설명된 바와 같이 샘플로부터 측정될 수 있다.

[0837] 샘플로부터의 지형 정보는 실시예 28에서 설명된 바와 같이 측정된다.

[0838] 48. 샘플로부터의 지형 및 재료 정보의 측정

[0839] 샘플로부터 지형 및 재료 정보를 측정하기 위해, 샘플은 여기에서 설명되는 바와 같이 가스 필드 이온 현미경의 샘플 마운트에 제자리를 찾아 고정된다. 가스 필드 이온 현미경은 실시예 19에서 설명된 바와 같이 구성된다.

[0840] 재료 정보는 실시예 44에서 설명된 바와 같이 샘플로부터 측정될 수 있다.

[0841] 샘플로부터의 지형 정보는 실시예 31에서 설명된 바와 같이 측정된다.

[0842] 49. 샘플로부터의 지형 및 재료 정보의 측정

[0843] 샘플로부터 지형 및 재료 정보를 측정하기 위해, 샘플은 여기에서 설명되는 바와 같이 가스 필드 이온 현미경의 샘플 마운트에 제자리를 찾아 고정된다. 가스 필드 이온 현미경은 실시예 19에서 설명된 바와 같이 구성된다.

[0844] 재료 정보를 측정하기 위해, 광자 검출기가 입사 He 이온 빔에 응답하여 샘플로부터 출현하는 광자를 검출하는데 사용될 수 있다. He 이온 빔은 샘플 표면의 전체 FOV 영역에 대해 이산 단계로 래스터 스캔되고, 샘플 표면에 대한 He 이온 빔의 위치의 함수로서 광자 방사 스펙트럼이 측정된다. 스펙트럼에서의 소정 방사선은 원자의 소정 유형에 대해 독특하므로, 측정된 스펙트럼에 기초해, 각 단계에서의 샘플 표면에 대한 조성이 판정된다.

[0845] 샘플로부터 지형 정보를 측정하기 위해, 실시예 19에서 설명된 바와 같이 샘플 표면에 대한 He 이온 빔의 위치의 함수로서 이차 전자의 총 밀도가 측정된다. 그 다음, 측정된 재료 정보는 샘플에서의 조성 변화로부터 발생

하는 총 이차 전자 밀도 측정에 대한 기여를 제거하는데 사용된다. 정정된 총 이차 전자 밀도 값은 샘플의 그레이 스케일 이미지를 구성하는데 사용되는데, 이 경우, 특정한 이미지 픽셀에서의 그레이 레벨은 정정된 총 밀도 값에 의해 판정된다. 지형 정보는, FOV에서의 샘플의 표면 경감 패턴을 나타내는 이미지에 의해 제공된다.

[0846] 50. 샘플로부터의 지형 및 재료 정보의 측정

[0847] 샘플로부터 지형 및 재료 정보를 측정하기 위해, 샘플은 여기에서 설명되는 바와 같이 가스 필드 이온 현미경의 샘플 마운트에 제자리를 찾아 고정된다. 가스 필드 이온 현미경은 실시예 19에서 설명된 바와 같이 구성된다.

[0848] 재료 정보는 실시예 49에서 설명된 바와 같이 샘플로부터 측정될 수 있다.

[0849] 샘플로부터 지형 정보를 측정하기 위해, 샘플로부터의 이차 전자의 총 밀도가 실시예 22에서 설명된 바와 같이 측정된다. 측정된 재료 정보는, 각각의 이온 빔 입사각에서, 샘플에서의 조성 변화로부터 발생하는 이차 전자 밀도 측정에 대한 기여를 제거하는데 사용된다. 정정된 총 이차 전자 밀도 값은 실시예 22에서 설명된 바와 같이 샘플의 그레이 스케일 이미지를 구성하는데 사용된다. 그 다음, 상이한 He 이온 빔 입사각으로부터 측정된 2개 이미지로부터의 정보는 조합되어, 샘플의 표면에 관한 정량적인 3차원 지형 정보를 판정하는데 사용될 수 있다.

[0850] 51. 샘플로부터의 지형 및 재료 정보의 측정

[0851] 샘플로부터 지형 및 재료 정보를 측정하기 위해, 샘플은 여기에서 설명되는 바와 같이 가스 필드 이온 현미경의 샘플 마운트에 제자리를 찾아 고정된다. 가스 필드 이온 현미경은 실시예 19에서 설명된 바와 같이 구성된다.

[0852] 재료 정보는 실시예 49에서 설명된 바와 같이 샘플로부터 측정될 수 있다.

[0853] 샘플로부터 지형 정보를 측정하기 위해, 샘플로부터의 이차 전자의 총 밀도가 실시예 25에서 설명된 바와 같이 측정된다. 측정된 재료 정보는, 각각의 검출기에서, 샘플에서의 조성 변화로부터 발생하는 이차 전자 밀도 측정에 대한 기여를 제거하는데 사용된다. 정정된 총 이차 전자 밀도 값은 실시예 25에서 설명된 바와 같이 샘플의 그레이 스케일 이미지를 구성하는데 사용된다. 그 다음, 다중 검출기에 의해 측정된 이미지로부터의 정보는 조합되어, 샘플의 표면에 관한 정량적인 3차원 지형 정보를 판정하는데 사용될 수 있다.

[0854] 52. 샘플로부터의 지형 및 재료 정보의 측정

[0855] 샘플로부터 지형 및 재료 정보를 측정하기 위해, 샘플은 여기에서 설명되는 바와 같이 가스 필드 이온 현미경의 샘플 마운트에 제자리를 찾아 고정된다. 가스 필드 이온 현미경은 실시예 19에서 설명된 바와 같이 구성된다.

[0856] 재료 정보는 실시예 49에서 설명된 바와 같이 샘플로부터 측정될 수 있다.

[0857] 샘플로부터의 지형 정보는 실시예 28에서 설명된 바와 같이 측정된다.

[0858] 53. 샘플로부터의 지형 및 재료 정보의 측정

[0859] 샘플로부터 지형 및 재료 정보를 측정하기 위해, 샘플은 여기에서 설명되는 바와 같이 가스 필드 이온 현미경의 샘플 마운트에 제자리를 찾아 고정된다. 가스 필드 이온 현미경은 실시예 19에서 설명된 바와 같이 구성된다.

[0860] 재료 정보는 실시예 49에서 설명된 바와 같이 샘플로부터 측정될 수 있다.

[0861] 샘플로부터의 지형 정보는 실시예 31에서 설명된 바와 같이 측정된다.

[0862] 54. 샘플로부터의 지형 및 재료 정보의 측정

[0863] 샘플로부터 지형 및 재료 정보를 측정하기 위해, 샘플은 여기에서 설명되는 바와 같이 가스 필드 이온 현미경의 샘플 마운트에 제자리를 찾아 고정된다. 가스 필드 이온 현미경은 실시예 19에서 설명된 바와 같이 구성된다.

[0864] 재료 정보를 측정하기 위해, 오제 전자 검출기가 입사 He 이온 빔에 응답하여 샘플로부터 출현하는 오제 전자를 검출하는데 사용될 수 있다. He 이온 빔은 샘플 표면의 전체 FOV에 대해 이산 단계로 래스터 스캔되고, 샘플 표면에 대한 He 이온 빔의 위치의 함수로서 오제 전자 방사 스펙트럼이 측정된다. 스펙트럼에서의 소정 방사선은 원자의 소정 유형에 대해 독특하므로, 측정된 스펙트럼에 기초해, 각 단계에서의 샘플 표면에 대한 조성이 판정된다.

[0865] 샘플로부터 지형 정보를 측정하기 위해, 이차 전자의 총 밀도가 실시예 19에서 설명된 바와 같이 샘플 표면에 대한 He 이온 빔의 위치의 함수로서 측정된다. 그 다음, 측정된 재료 정보는 샘플에서의 조성 변화로부터 발생

하는 총 이차 전자 밀도 측정에 대한 기여를 제거하는데 사용된다. 정정된 총 이차 전자 밀도 값은 샘플의 그레이 스케일 이미지를 구성하는데 사용되는데, 이 경우, 특정한 이미지 픽셀에서의 그레이 레벨은 정정된 총 밀도 값에 의해 판정된다. 지형 정보는, FOV에서의 샘플의 표면 경감 패턴을 나타내는 이미지에 의해 제공된다.

[0866] *55. 샘플로부터의 지형 및 재료 정보의 측정

[0867] 샘플로부터 지형 및 재료 정보를 측정하기 위해, 샘플은 여기에서 설명되는 바와 같이 가스 필드 이온 현미경의 샘플 마운트에 제자리를 찾아 고정된다. 가스 필드 이온 현미경은 실시예 19에서 설명된 바와 같이 구성된다.

[0868] 재료 정보는 실시예 54에서 설명된 바와 같이 샘플로부터 측정될 수 있다.

[0869] 샘플로부터 지형 정보를 측정하기 위해, 샘플로부터의 이차 전자의 총 밀도가 실시예 22에서 설명된 바와 같이 측정된다. 측정된 재료 정보는, 각각의 이온 빔 입사각에서, 샘플에서의 조성 변화로부터 발생하는 이차 전자 밀도 측정에 대한 기여를 제거하는데 사용된다. 정정된 총 이차 전자 밀도 값은 실시예 22에서 설명된 바와 같이 샘플의 그레이 스케일 이미지를 구성하는데 사용된다. 그 다음, 상이한 He 이온 빔 입사각에서 측정된 2개 이미지로부터의 정보는 조합되어, 샘플의 표면에 관한 정량적인 3차원 지형 정보를 판정하는데 사용될 수 있다.

[0870] 56. 샘플로부터의 지형 및 재료 정보의 측정

[0871] 샘플로부터 지형 및 재료 정보를 측정하기 위해, 샘플은 여기에서 설명되는 바와 같이 가스 필드 이온 현미경의 샘플 마운트에 제자리를 찾아 고정된다. 가스 필드 이온 현미경은 실시예 19에서 설명된 바와 같이 구성된다.

[0872] 재료 정보는 실시예 54에서 설명된 바와 같이 샘플로부터 측정될 수 있다.

[0873] 샘플로부터 지형 정보를 측정하기 위해, 샘플로부터의 이차 전자의 총 밀도가 실시예 25에서 설명된 바와 같이 측정된다. 측정된 재료 정보는, 각각의 검출기에서, 샘플에서의 조성 변화로부터 발생하는 이차 전자 밀도 측정에 대한 기여를 제거하는데 사용된다. 정정된 총 이차 전자 밀도 값은 실시예 25에서 설명된 바와 같이 샘플의 그레이 스케일 이미지를 구성하는데 사용된다. 그 다음, 다중 검출기에 의해 측정된 이미지로부터의 정보는 조합되어, 샘플의 표면에 관한 정량적인 3차원 지형 정보를 판정하는데 사용될 수 있다.

[0874] 57. 샘플로부터의 지형 및 재료 정보의 측정

[0875] 샘플로부터 지형 및 재료 정보를 측정하기 위해, 샘플은 여기에서 설명되는 바와 같이 가스 필드 이온 현미경의 샘플 마운트에 제자리를 찾아 고정된다. 가스 필드 이온 현미경은 실시예 19에서 설명된 바와 같이 구성된다.

[0876] 재료 정보는 실시예 54에서 설명된 바와 같이 샘플로부터 측정될 수 있다.

[0877] 샘플로부터의 지형 정보는 실시예 28에서 설명된 바와 같이 측정된다.

[0878] 58. 샘플로부터의 지형 및 재료 정보의 측정

[0879] 샘플로부터 지형 및 재료 정보를 측정하기 위해, 샘플은 여기에서 설명되는 바와 같이 가스 필드 이온 현미경의 샘플 마운트에 제자리를 찾아 고정된다. 가스 필드 이온 현미경은 실시예 19에서 설명된 바와 같이 구성된다.

[0880] 재료 정보는 실시예 54에서 설명된 바와 같이 샘플로부터 측정될 수 있다.

[0881] 샘플로부터의 지형 정보는 실시예 31에서 설명된 바와 같이 측정된다.

[0882] 59. 샘플로부터의 지형 및 재료 정보의 측정

[0883] 샘플로부터 지형 및 재료 정보를 측정하기 위해, 샘플은 여기에서 설명되는 바와 같이 가스 필드 이온 현미경의 샘플 마운트에 제자리를 찾아 고정된다. 가스 필드 이온 현미경은 실시예 19에서 설명된 바와 같이 구성된다.

[0884] 재료 정보를 측정하기 위해, TOF 검출기가 입사 He 이온 빔에 응답하여 샘플로부터 출현하는 이차 이온 및/또는 원자를 검출하는데 사용될 수 있다. He 이온 빔은 샘플 표면의 전체 FOV 영역에 대해 이산 단계로 래스터 스캔되고, 샘플 표면에 대한 He 이온 빔의 위치의 함수로서 샘플(180)로부터의 이차 이온 및/또는 원자의 비행시간이 측정된다. 이온/원자의 측정된 비행시간 및 TOF 계기에서의 가속 전극의 공지 전압에 기초해, 검출 입자의 질량이 계산될 수 있고, 입자의 고유성이 식별될 수 있다.

[0885] 샘플로부터 지형 정보를 측정하기 위해, 실시예 19에서 설명된 바와 같이 샘플 표면에 대한 He 이온 빔의 위치의 함수로서 이차 전자의 총 밀도가 측정된다. 그 다음, 측정된 재료 정보는 샘플에서의 조성 변화로부터 발생

하는 총 이차 전자 밀도 측정에 대한 기여를 제거하는데 사용된다. 정정된 총 이차 전자 밀도 값은 샘플의 그레이 스케일 이미지를 구성하는데 사용되는데, 이 경우, 특정한 이미지 픽셀에서의 그레이 레벨은 정정된 총 밀도 값에 의해 판정된다. 지형 정보는, FOV에서의 샘플의 표면 경감 패턴을 나타내는 이미지에 의해 제공된다.

[0886] 60. 샘플로부터의 지형 및 재료 정보의 측정

[0887] 샘플로부터 지형 및 재료 정보를 측정하기 위해, 샘플은 여기에서 설명되는 바와 같이 가스 필드 이온 현미경의 샘플 마운트에 제자리를 찾아 고정된다. 가스 필드 이온 현미경은 실시예 19에서 설명된 바와 같이 구성된다.

[0888] 재료 정보는 실시예 59에서 설명된 바와 같이 샘플로부터 측정될 수 있다.

[0889] 샘플로부터 지형 정보를 측정하기 위해, 샘플로부터의 이차 전자의 총 밀도가 실시예 22에서 설명된 바와 같이 측정된다. 측정된 재료 정보는, 각각의 이온 빔 입사각에서, 샘플에서의 조성 변화로부터 발생하는 이차 전자 밀도 측정에 대한 기여를 제거하는데 사용된다. 정정된 총 이차 전자 밀도 값은 실시예 22에서 설명된 바와 같이 샘플의 그레이 스케일 이미지를 구성하는데 사용된다. 그 다음, 상이한 He 이온 빔 입사각에서 측정된 2개 이미지로부터의 정보는 조합되어, 샘플의 표면에 관한 정량적인 3차원 지형 정보를 판정하는데 사용될 수 있다.

[0890] 61. 샘플로부터의 지형 및 재료 정보의 측정

[0891] 샘플로부터 지형 및 재료 정보를 측정하기 위해, 샘플은 여기에서 설명되는 바와 같이 가스 필드 이온 현미경의 샘플 마운트에 제자리를 찾아 고정된다. 가스 필드 이온 현미경은 실시예 19에서 설명된 바와 같이 구성된다.

[0892] 재료 정보는 실시예 59에서 설명된 바와 같이 샘플로부터 측정될 수 있다.

[0893] 샘플로부터 지형 정보를 측정하기 위해, 샘플로부터의 이차 전자의 총 밀도가 실시예 25에서 설명된 바와 같이 측정된다. 측정된 재료 정보는, 각각의 검출기에서, 샘플에서의 조성 변화로부터 발생하는 이차 전자 밀도 측정에 대한 기여를 제거하는데 사용된다. 정정된 총 이차 전자 밀도 값은 실시예 25에서 설명된 바와 같이 샘플의 그레이 스케일 이미지를 구성하는데 사용된다. 그 다음, 다중 검출기에 의해 측정된 이미지로부터의 정보는 조합되어, 샘플의 표면에 관한 정량적인 3차원 지형 정보를 판정하는데 사용될 수 있다.

[0894] 62. 샘플로부터의 지형 및 재료 정보의 측정

[0895] 샘플로부터 지형 및 재료 정보를 측정하기 위해, 샘플은 여기에서 설명되는 바와 같이 가스 필드 이온 현미경의 샘플 마운트에 제자리를 찾아 고정된다. 가스 필드 이온 현미경은 실시예 19에서 설명된 바와 같이 구성된다.

[0896] 재료 정보는 실시예 59에서 설명된 바와 같이 샘플로부터 측정될 수 있다.

[0897] 샘플로부터의 지형 정보는 실시예 28에서 설명된 바와 같이 측정된다.

[0898] 63. 샘플로부터의 지형 및 재료 정보의 측정

[0899] 샘플로부터 지형 및 재료 정보를 측정하기 위해, 샘플은 여기에서 설명되는 바와 같이 가스 필드 이온 현미경의 샘플 마운트에 제자리를 찾아 고정된다. 가스 필드 이온 현미경은 실시예 19에서 설명된 바와 같이 구성된다.

[0900] 재료 정보는 실시예 59에서 설명된 바와 같이 샘플로부터 측정될 수 있다.

[0901] 샘플로부터의 지형 정보는 실시예 31에서 설명된 바와 같이 측정된다.

[0902] 64. 샘플로부터의 결정 및 재료 정보의 측정

[0903] 샘플로부터 결정 및 재료 정보를 측정하기 위해, 샘플은 여기에서 설명되는 바와 같이 가스 필드 이온 현미경의 샘플 마운트에 제자리를 찾아 고정된다. 가스 필드 이온 현미경은 실시예 19에서 설명된 바와 같이 구성된다.

[0904] 재료 정보는 실시예 44에서 설명된 바와 같이 샘플로부터 측정될 수 있다.

[0905] 결정 정보는 실시예 19에서 설명된 바와 같이 샘플로부터 측정될 수 있다.

[0906] 65. 샘플로부터의 결정 및 재료 정보의 측정

[0907] 샘플로부터 결정 및 재료 정보를 측정하기 위해, 샘플은 여기에서 설명되는 바와 같이 가스 필드 이온 현미경의 샘플 마운트에 제자리를 찾아 고정된다. 가스 필드 이온 현미경은 실시예 19에서 설명된 바와 같이 구성된다.

[0908] 재료 정보는 실시예 44에서 설명된 바와 같이 샘플로부터 측정될 수 있다.

[0909] 결정 정보는 실시예 20에서 설명된 바와 같이 샘플로부터 측정될 수 있다.

[0910] 66. 샘플로부터의 결정 및 재료 정보의 측정

[0911] 샘플로부터 결정 및 재료 정보를 측정하기 위해, 샘플은 여기에서 설명되는 바와 같이 가스 필드 이온 현미경의 샘플 마운트에 제자리를 찾아 고정된다. 가스 필드 이온 현미경은 실시예 19에서 설명된 바와 같이 구성된다.

[0912] 재료 정보는 실시예 44에서 설명된 바와 같이 샘플로부터 측정될 수 있다.

[0913] 결정 정보는 실시예 21에서 설명된 바와 같이 샘플로부터 측정될 수 있다.

[0914] 67. 샘플로부터의 결정 및 재료 정보의 측정

[0915] 샘플로부터 결정 및 재료 정보를 측정하기 위해, 샘플은 여기에서 설명되는 바와 같이 가스 필드 이온 현미경의 샘플 마운트에 제자리를 찾아 고정된다. 가스 필드 이온 현미경은 실시예 19에서 설명된 바와 같이 구성된다.

[0916] 재료 정보는 실시예 49에서 설명된 바와 같이 샘플로부터 측정될 수 있다.

[0917] 결정 정보는 실시예 19에서 설명된 바와 같이 샘플로부터 측정될 수 있다.

[0918] 68. 샘플로부터의 결정 및 재료 정보의 측정

[0919] 샘플로부터 결정 및 재료 정보를 측정하기 위해, 샘플은 여기에서 설명되는 바와 같이 가스 필드 이온 현미경의 샘플 마운트에 제자리를 찾아 고정된다. 가스 필드 이온 현미경은 실시예 19에서 설명된 바와 같이 구성된다.

[0920] 재료 정보는 실시예 49에서 설명된 바와 같이 샘플로부터 측정될 수 있다.

[0921] 결정 정보는 실시예 20에서 설명된 바와 같이 샘플로부터 측정될 수 있다.

[0922] 69. 샘플로부터의 결정 및 재료 정보의 측정

[0923] 샘플로부터 결정 및 재료 정보를 측정하기 위해, 샘플은 여기에서 설명되는 바와 같이 가스 필드 이온 현미경의 샘플 마운트에 제자리를 찾아 고정된다. 가스 필드 이온 현미경은 실시예 19에서 설명된 바와 같이 구성된다.

[0924] 재료 정보는 실시예 49에서 설명된 바와 같이 샘플로부터 측정될 수 있다.

[0925] 결정 정보는 실시예 21에서 설명된 바와 같이 샘플로부터 측정될 수 있다.

[0926] 70. 샘플로부터의 결정 및 재료 정보의 측정

[0927] 샘플로부터 결정 및 재료 정보를 측정하기 위해, 샘플은 여기에서 설명되는 바와 같이 가스 필드 이온 현미경의 샘플 마운트에 제자리를 찾아 고정된다. 가스 필드 이온 현미경은 실시예 19에서 설명된 바와 같이 구성된다.

[0928] 재료 정보는 실시예 54에서 설명된 바와 같이 샘플로부터 측정될 수 있다.

[0929] 결정 정보는 실시예 19에서 설명된 바와 같이 샘플로부터 측정될 수 있다.

[0930] 71. 샘플로부터의 결정 및 재료 정보의 측정

[0931] 샘플로부터 결정 및 재료 정보를 측정하기 위해, 샘플은 여기에서 설명되는 바와 같이 가스 필드 이온 현미경의 샘플 마운트에 제자리를 찾아 고정된다. 가스 필드 이온 현미경은 실시예 19에서 설명된 바와 같이 구성된다.

[0932] 재료 정보는 실시예 54에서 설명된 바와 같이 샘플로부터 측정될 수 있다.

[0933] 결정 정보는 실시예 20에서 설명된 바와 같이 샘플로부터 측정될 수 있다.

[0934] 72. 샘플로부터의 결정 및 재료 정보의 측정

[0935] 샘플로부터 결정 및 재료 정보를 측정하기 위해, 샘플은 여기에서 설명되는 바와 같이 가스 필드 이온 현미경의 샘플 마운트에 제자리를 찾아 고정된다. 가스 필드 이온 현미경은 실시예 19에서 설명된 바와 같이 구성된다.

[0936] 재료 정보는 실시예 54에서 설명된 바와 같이 샘플로부터 측정될 수 있다.

[0937] 결정 정보는 실시예 21에서 설명된 바와 같이 샘플로부터 측정될 수 있다.

[0938] 73. 샘플로부터의 결정 및 재료 정보의 측정

[0939] 샘플로부터 결정 및 재료 정보를 측정하기 위해, 샘플은 여기에서 설명되는 바와 같이 가스 필드 이온 현미경의

샘플 마운트에 제자리를 찾아 고정된다. 가스 필드 이온 현미경은 실시예 19에서 설명된 바와 같이 구성된다.

[0940] 재료 정보는 실시예 59에서 설명된 바와 같이 샘플로부터 측정될 수 있다.

[0941] 결정 정보는 실시예 19에서 설명된 바와 같이 샘플로부터 측정될 수 있다.

[0942] 74. 샘플로부터의 결정 및 재료 정보의 측정

[0943] 샘플로부터 결정 및 재료 정보를 측정하기 위해, 샘플은 여기에서 설명되는 바와 같이 가스 필드 이온 현미경의 샘플 마운트에 제자리를 찾아 고정된다. 가스 필드 이온 현미경은 실시예 19에서 설명된 바와 같이 구성된다.

[0944] 재료 정보는 실시예 59에서 설명된 바와 같이 샘플로부터 측정될 수 있다.

[0945] 결정 정보는 실시예 20에서 설명된 바와 같이 샘플로부터 측정될 수 있다.

[0946] 75. 샘플로부터의 결정 및 재료 정보의 측정

[0947] 샘플로부터 결정 및 재료 정보를 측정하기 위해, 샘플은 여기에서 설명되는 바와 같이 가스 필드 이온 현미경의 샘플 마운트에 제자리를 찾아 고정된다. 가스 필드 이온 현미경은 실시예 19에서 설명된 바와 같이 구성된다.

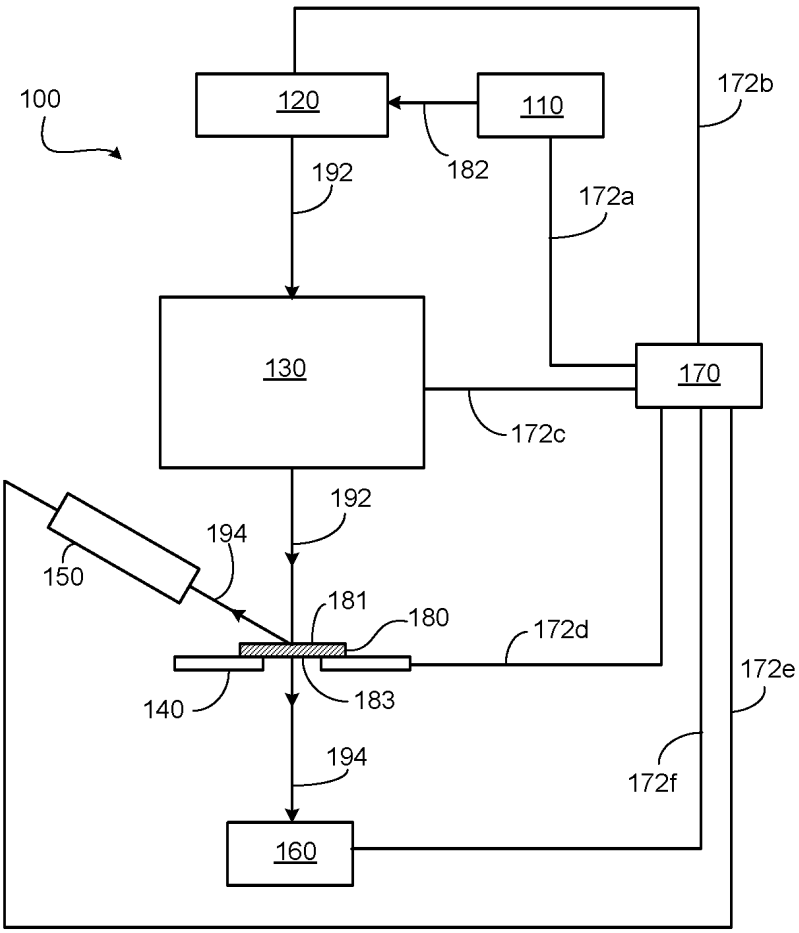
[0948] 재료 정보는 실시예 59에서 설명된 바와 같이 샘플로부터 측정될 수 있다.

[0949] 결정 정보는 실시예 21에서 설명된 바와 같이 샘플로부터 측정될 수 있다.

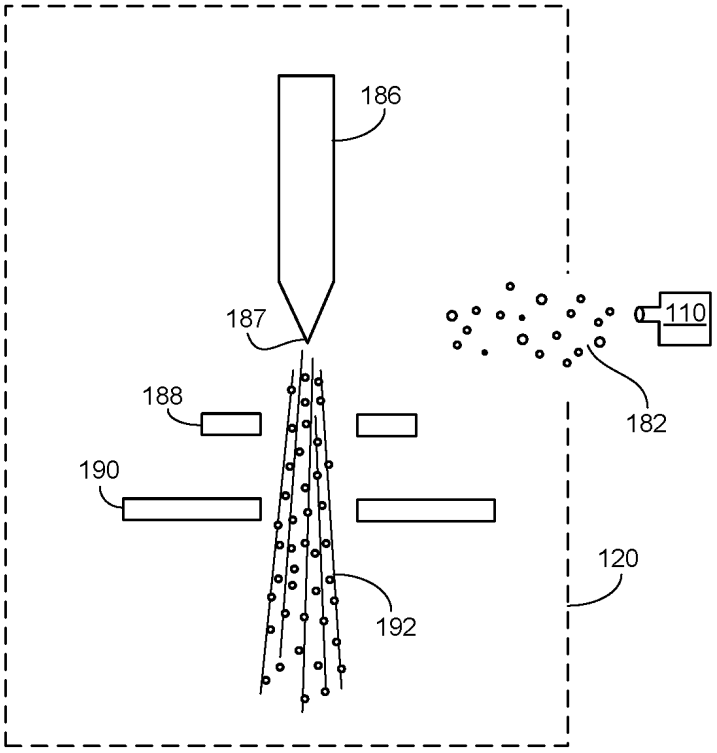
[0950] 다른 실시예가 청구항에 존재한다.

도면

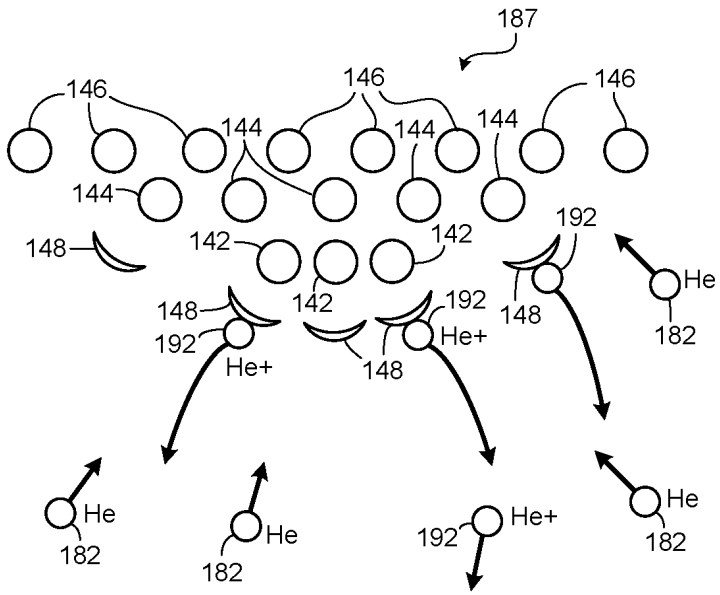
도면1



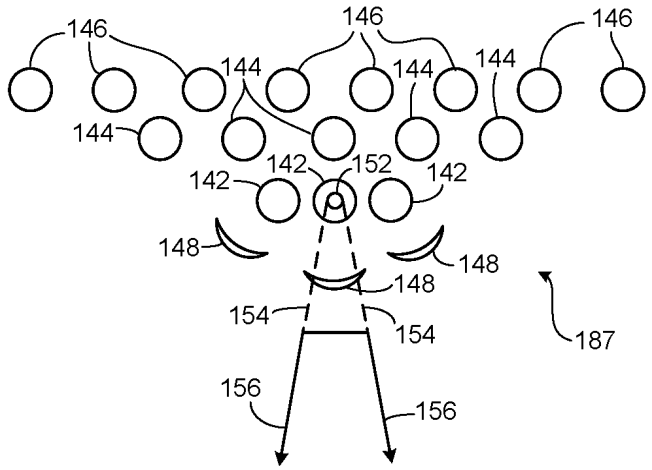
도면2


186
187
110
182
188
190
120
192

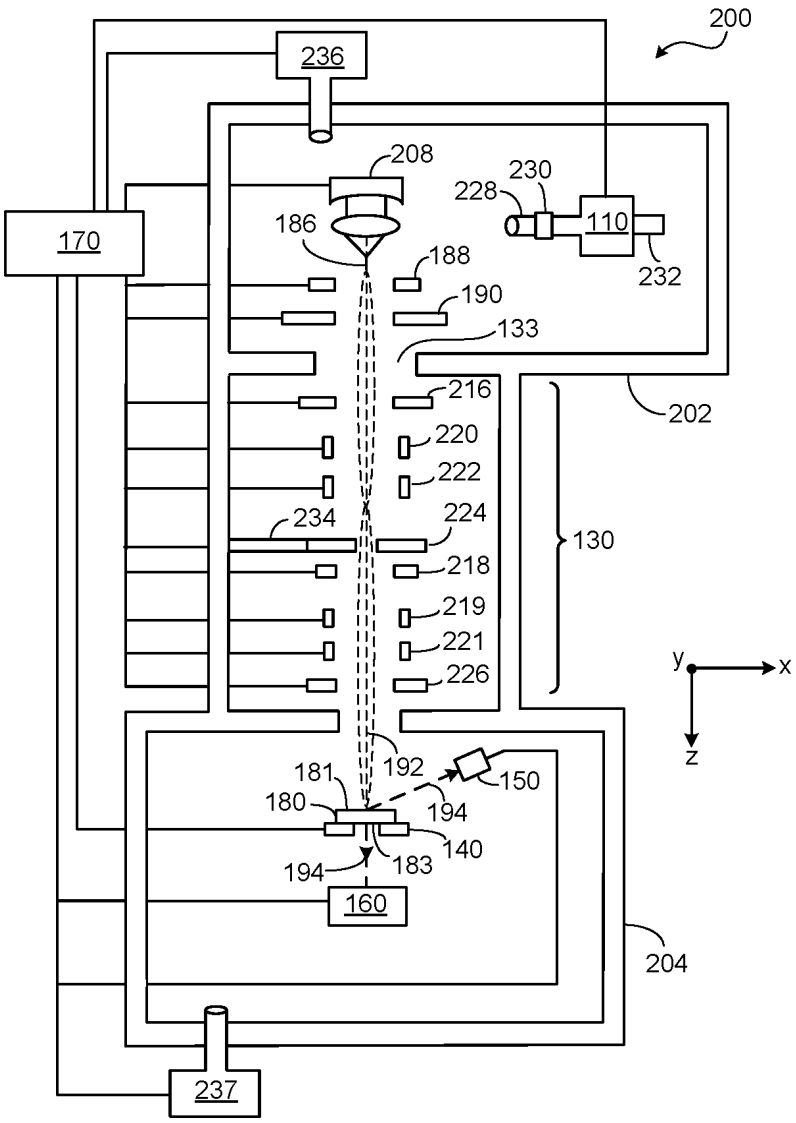
도면3


187
146
146
146
144
144
144
144
142
142
148
148
142
192
192
He+
He+
148
148
192
He
182
He
182
He
182
He+
192
He
182

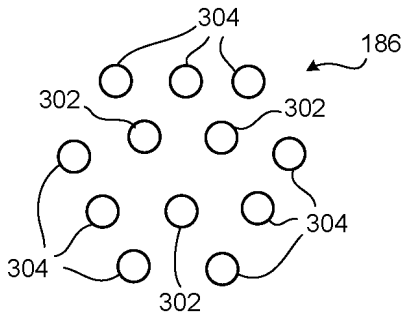
도면4


146
146
146
144
144
144
144
142
152
142
142
148
148
148
154
154
187
156
156

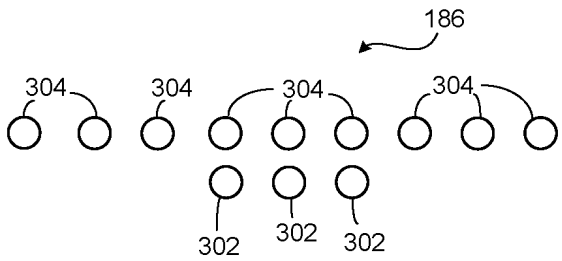
도면5


200
236
208
230
228
110
186
188
232
170
190
133
216
202
220
222
234
224
130
218
219
221
226
y
x
z
181
192
150
180
194
140
183
194
160
204
237

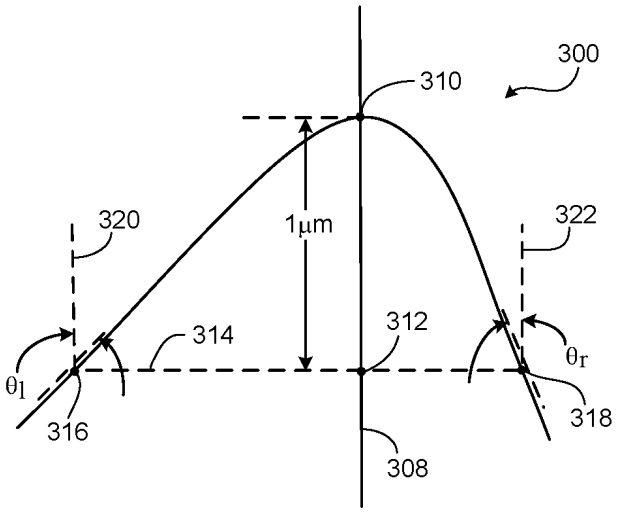
도면6


304
186
302
302
304
304
302

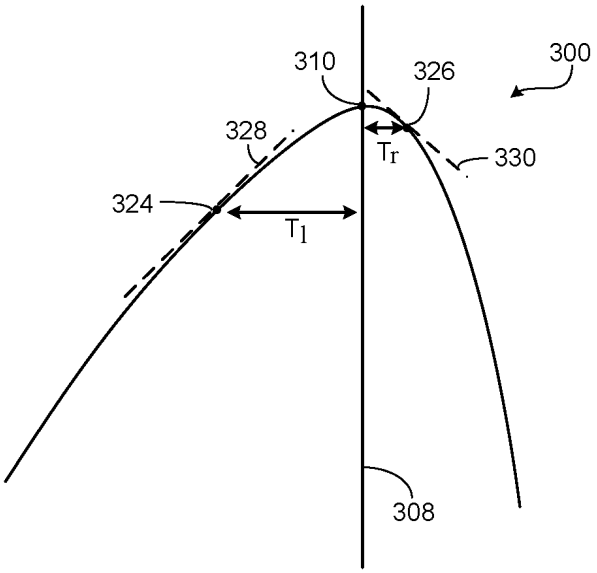
도면7


186
304
304
304
304
302
302
302

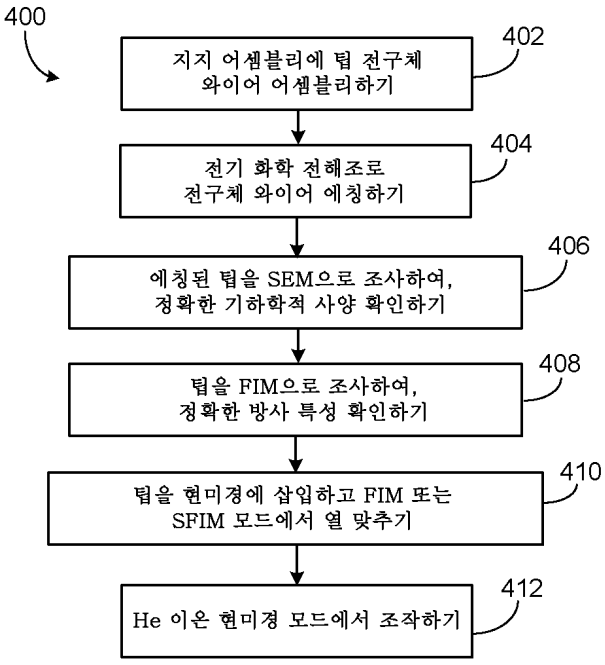
도면8


300
310
320
1μm
322
314
312
θr
θl
316
318
308

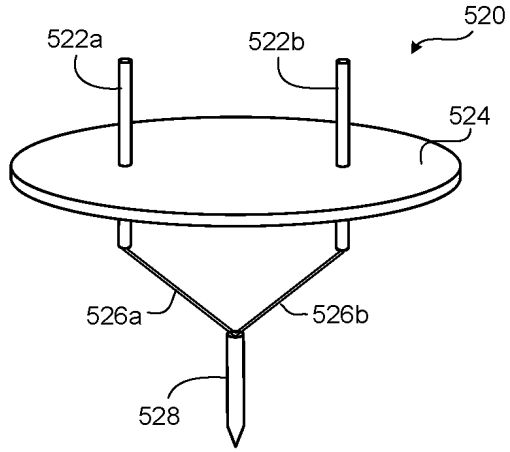
도면9


310
326
300
328
Tr
330
324
Tl
308

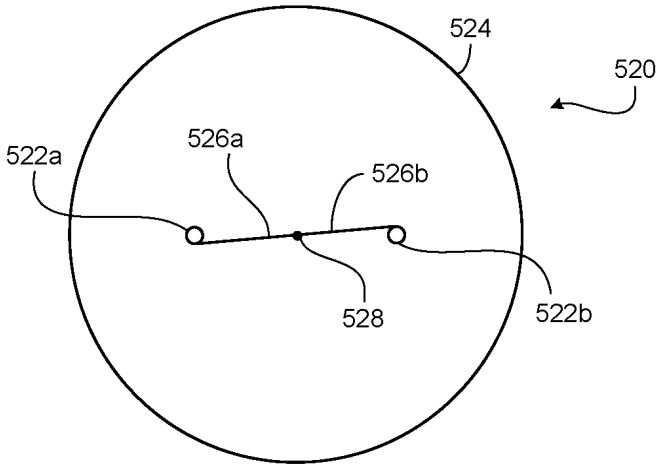
도면10


400
지지 어셈블리에 팁 전구체 와이어 어셈블리하기
402
전기 화학 전해조로 전구체 와이어 에칭하기
404
에칭된 팁을 SEM으로 조사하여, 정확한 기하학적 사양 확인하기
406
팁을 FIM으로 조사하여, 정확한 방사 특성 확인하기
408
팁을 현미경에 삽입하고 FIM 또는 SFIM 모드에서 열 맞추기
410
He 이온 현미경 모드에서 조작하기
412

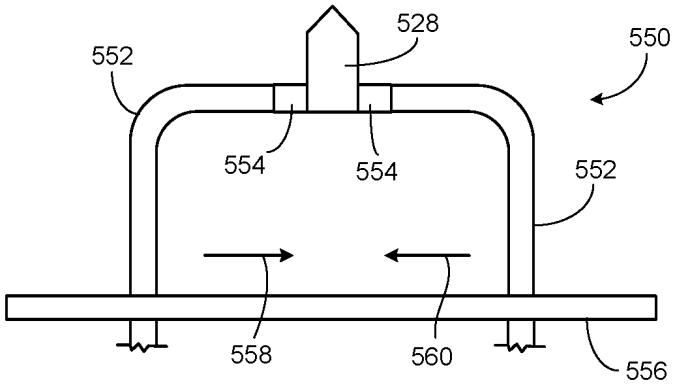
도면11a



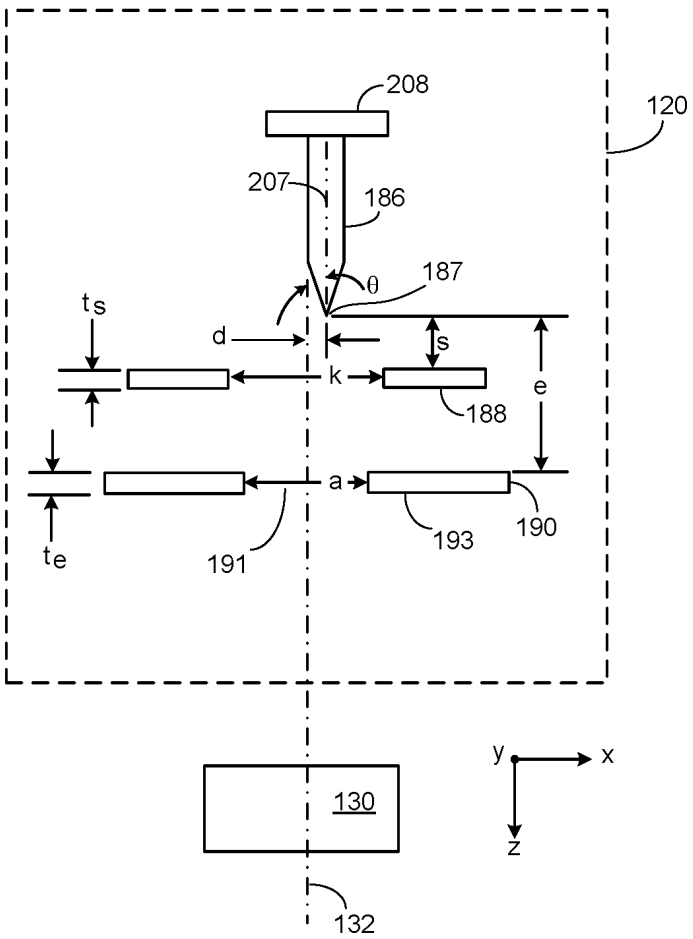
도면11b



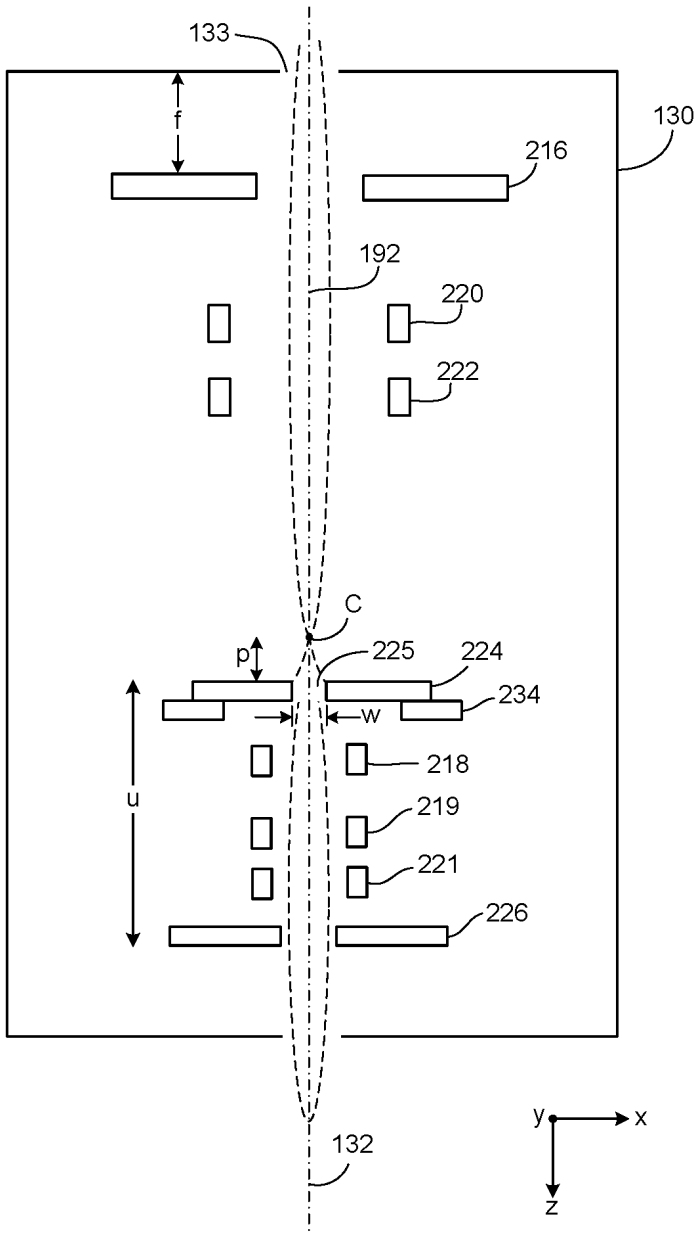
도면12



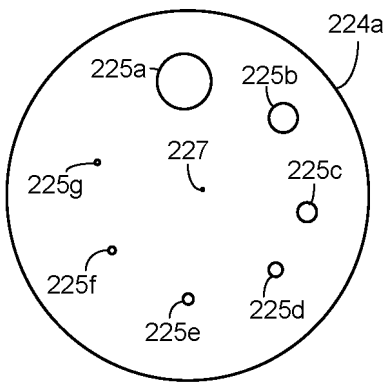
도면13



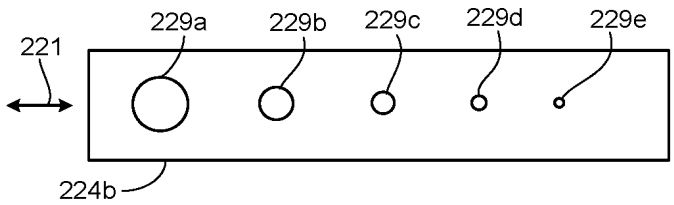
도면14


133
f
130
216
192
220
222
C
p
225
224
234
w
218
219
221
226
u
132
y
x
z

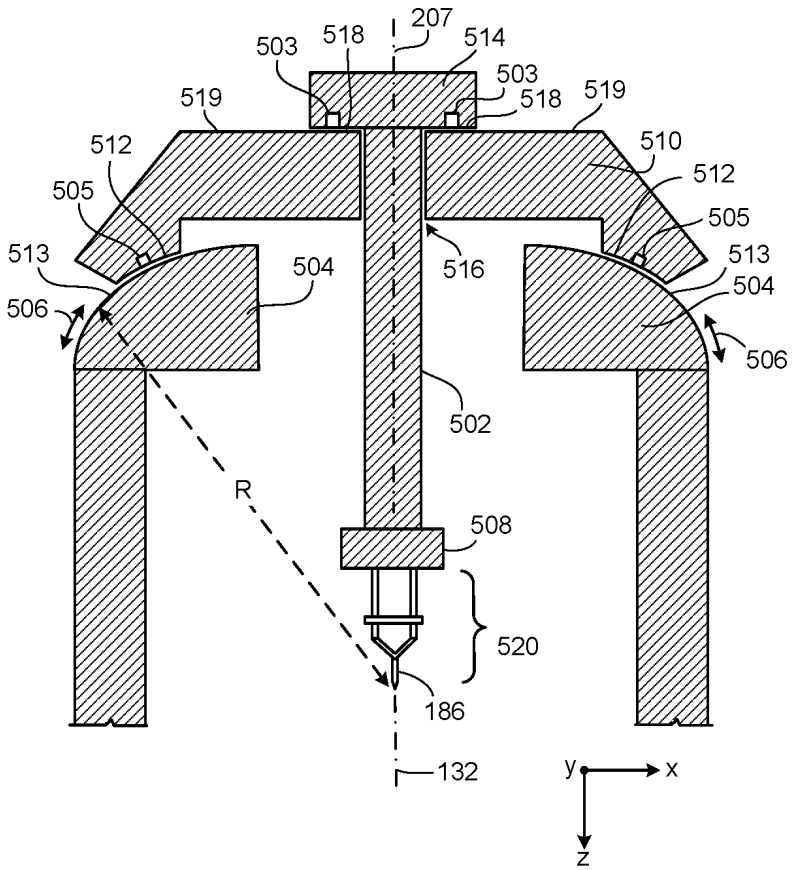
도면15


224a
225a
225b
227
225g
225c
225f
225e
225d

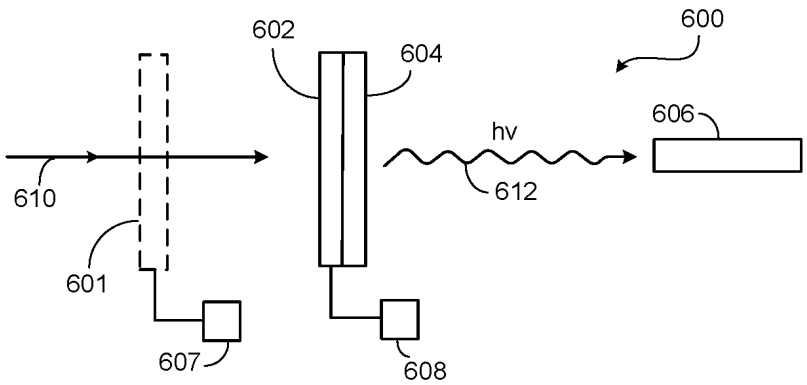
도면16



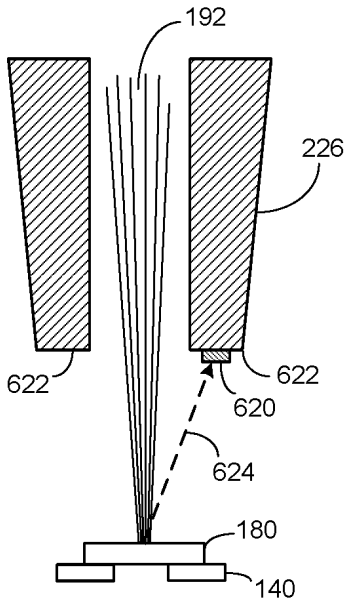
도면17



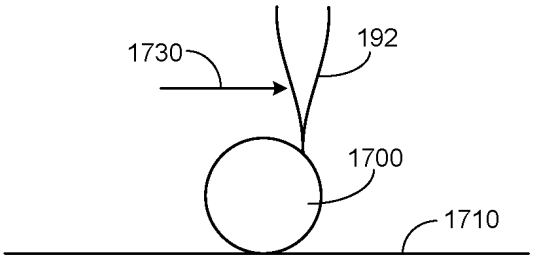
도면18



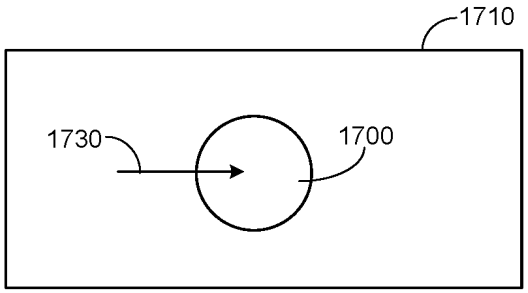
도면19



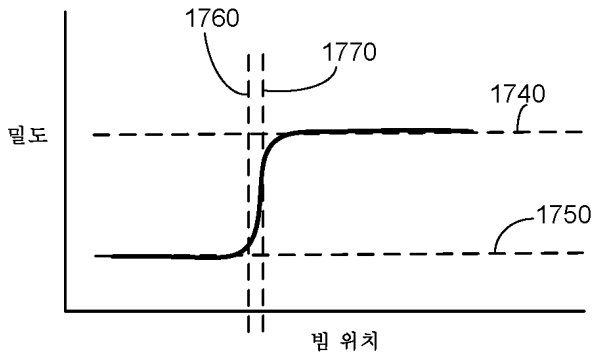
도면20a



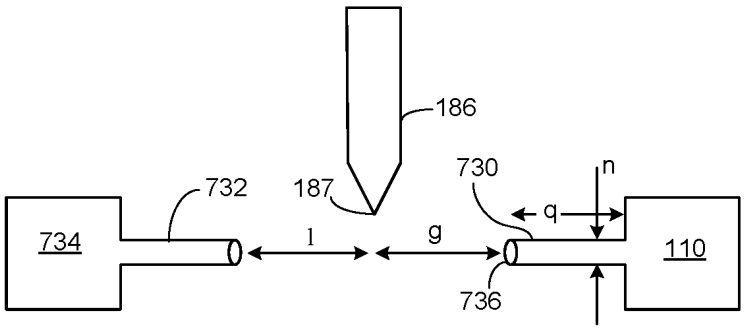
도면20b



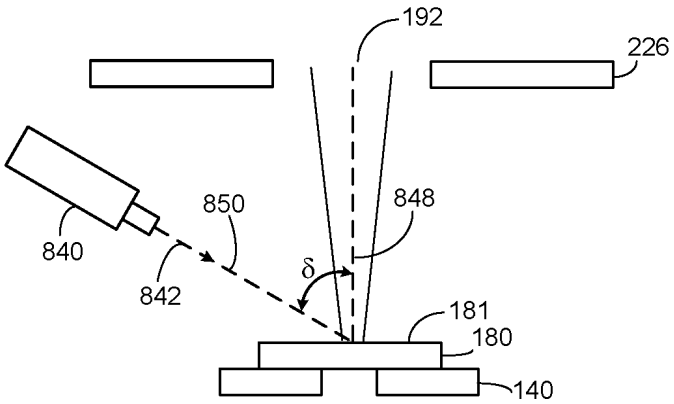
도면20c



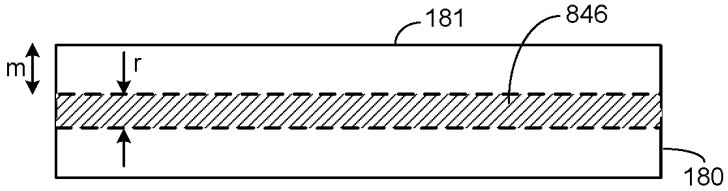
도면21



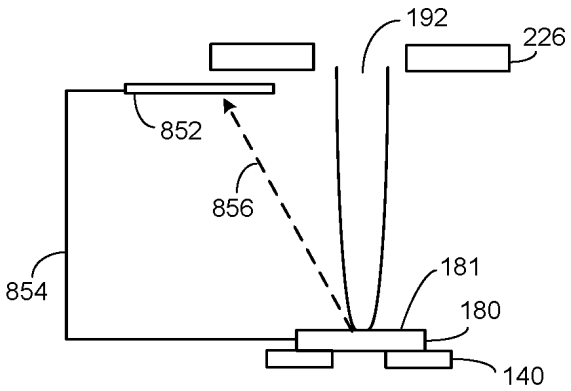
도면22



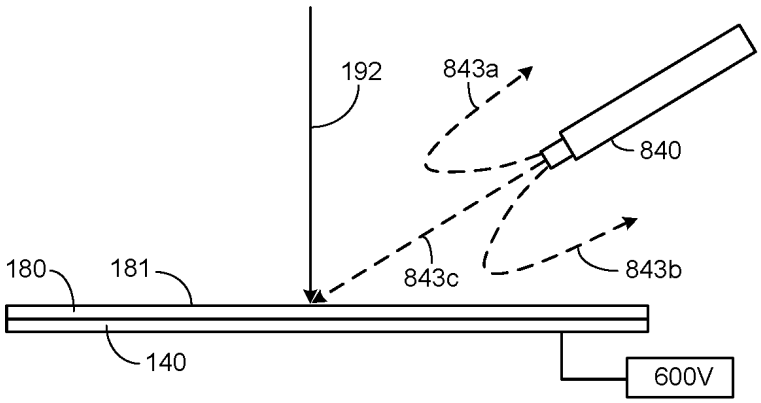
도면23



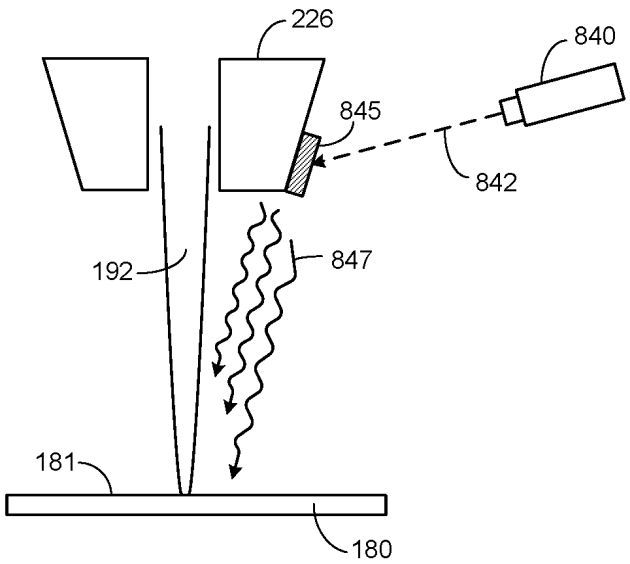
도면24



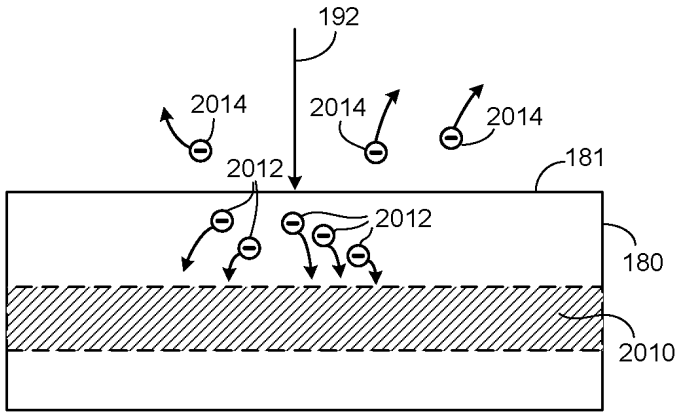
도면25



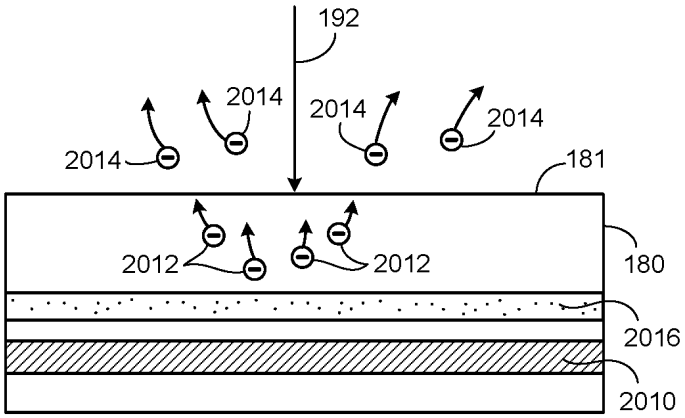
도면26



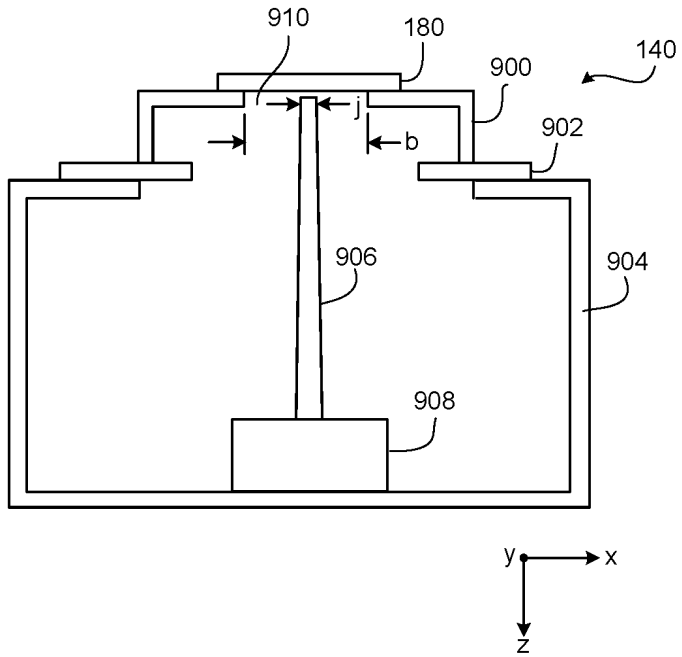
도면27a



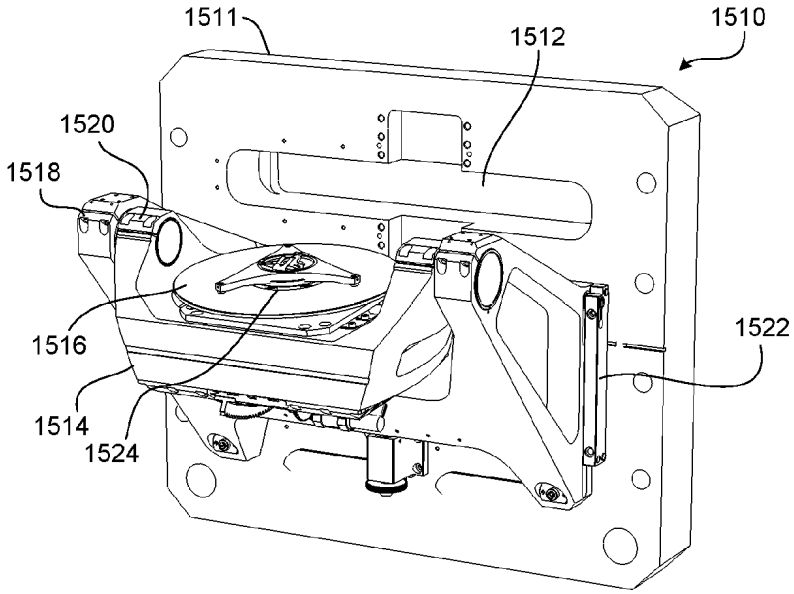
도면27b



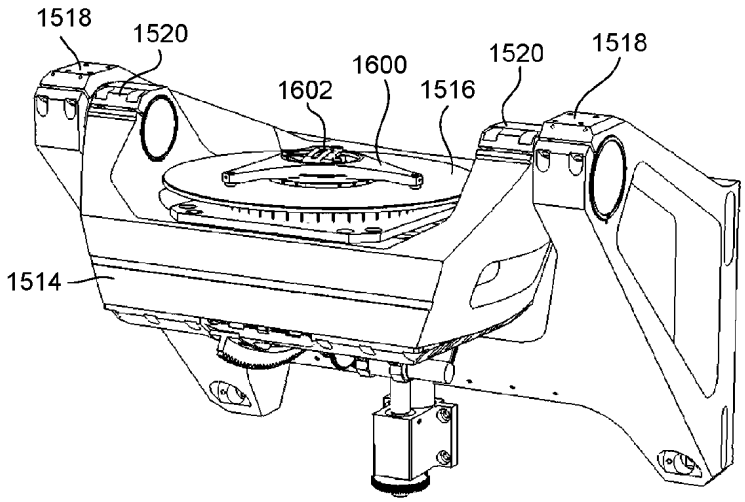
도면28



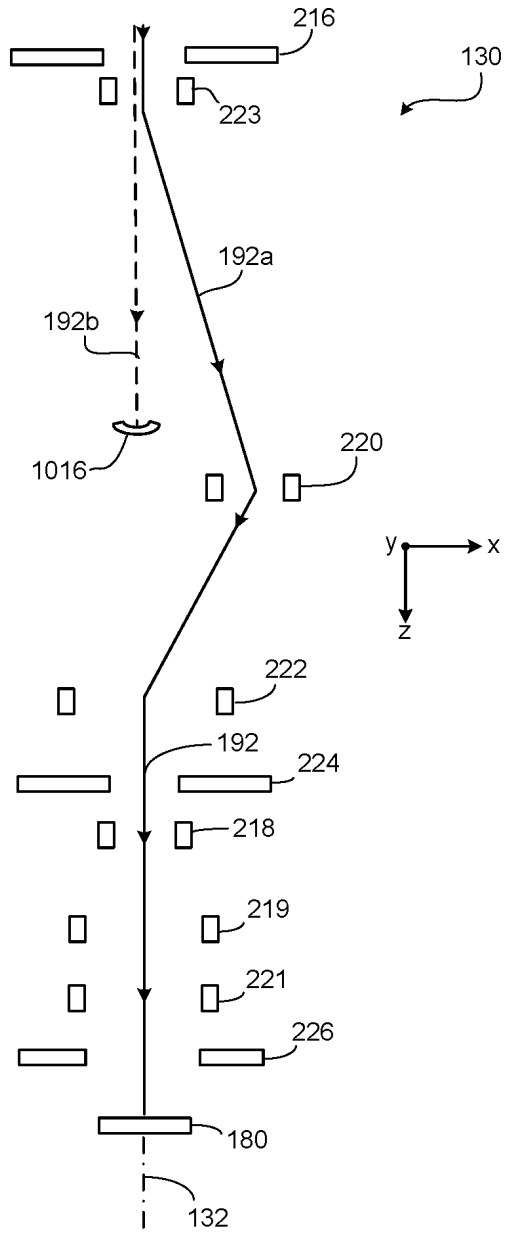
도면29


1511
1512
1510
1520
1518
1516
1522
1514
1524

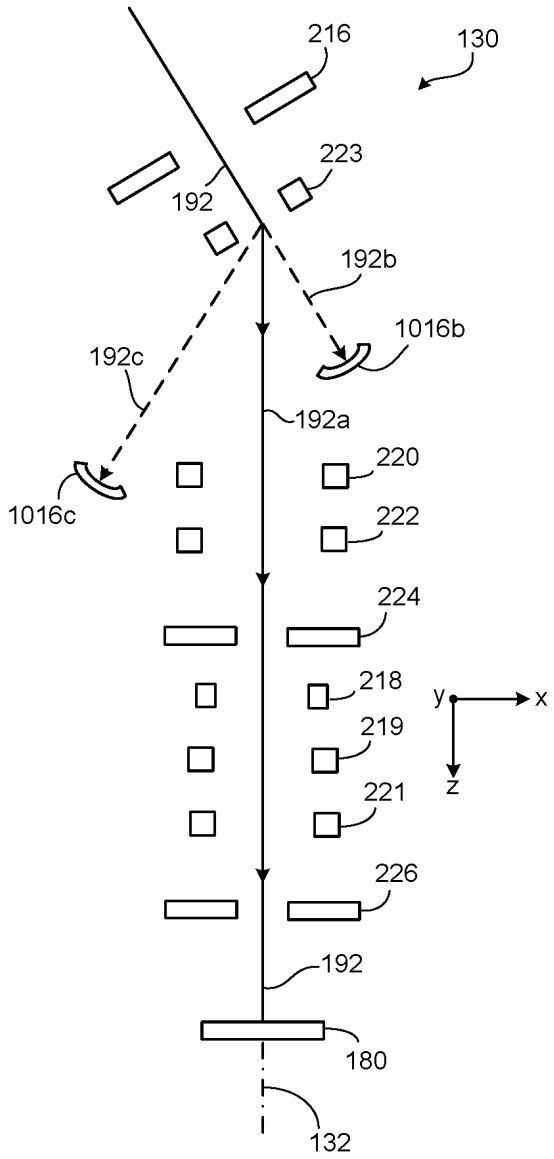
도면30


1518
1520
1600
1602
1516
1520
1518
1514

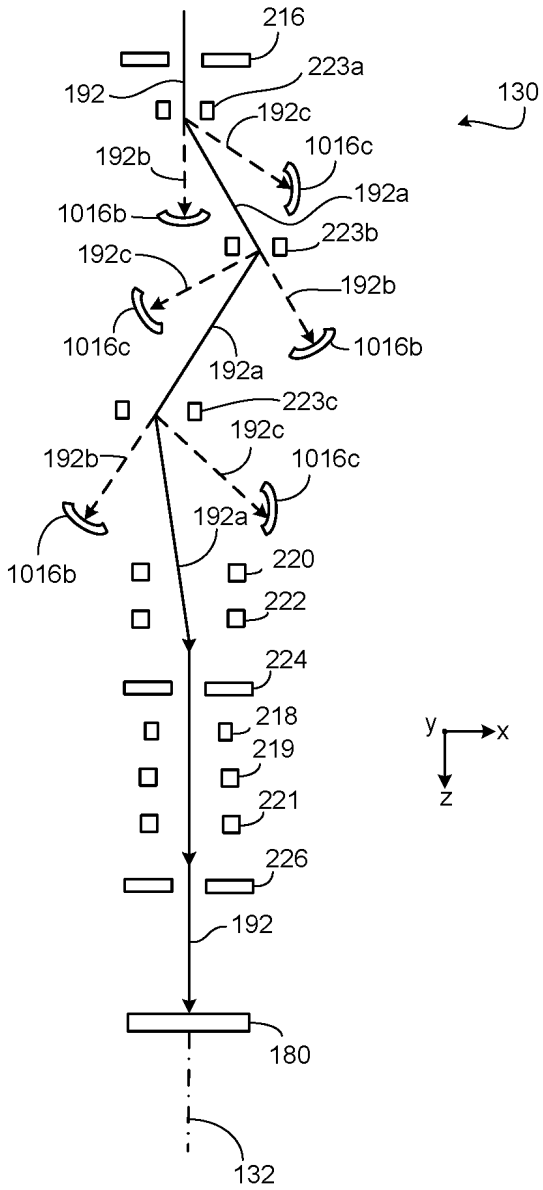
도면31


216
130
223
192a
192b
1016
220
y
x
z
222
192
224
218
219
221
226
180
132

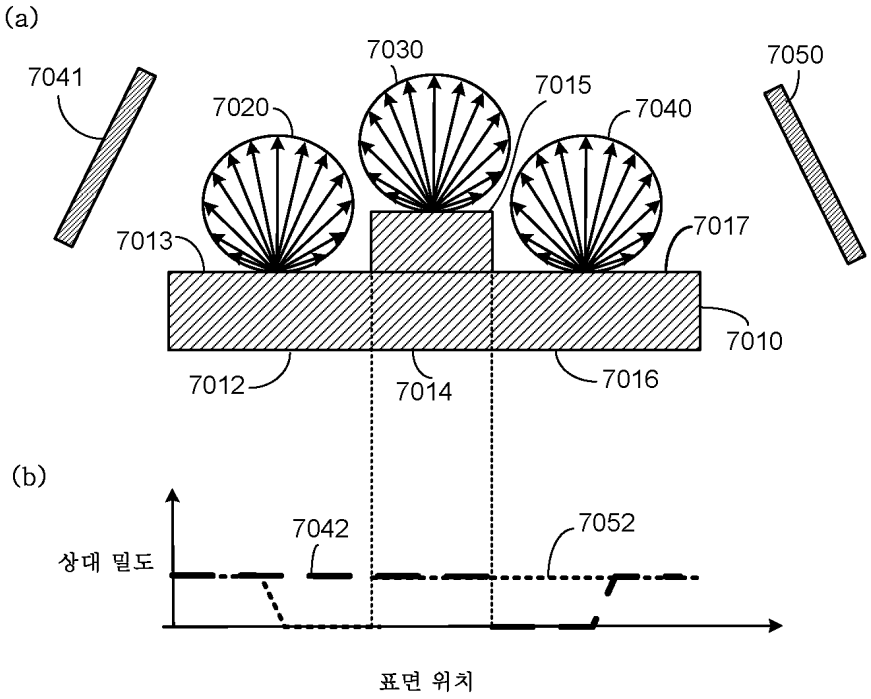
도면32


216
130
223
192
192b
1016b
192c
192a
220
1016c
222
224
218
y
x
219
z
221
226
192
180
132

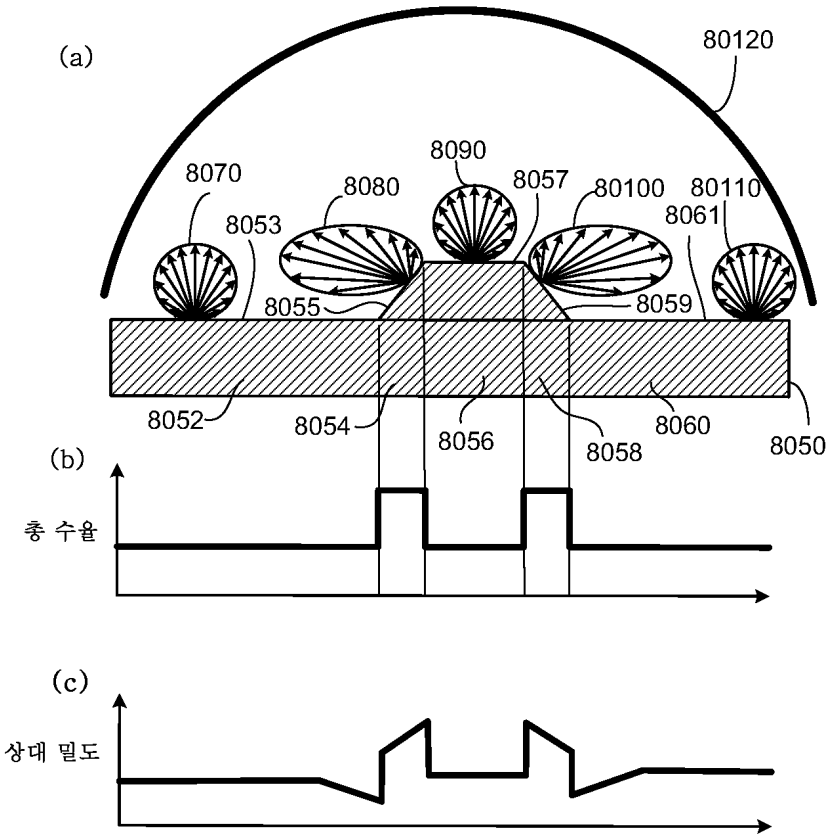
도면33


216
223a
192
130
192c
1016c
192b
192a
1016b
223b
192c
192b
1016c
1016b
192a
223c
192c
192b
1016c
192a
1016b
220
222
224
218
219
221
226
192
180
132
y
x
z

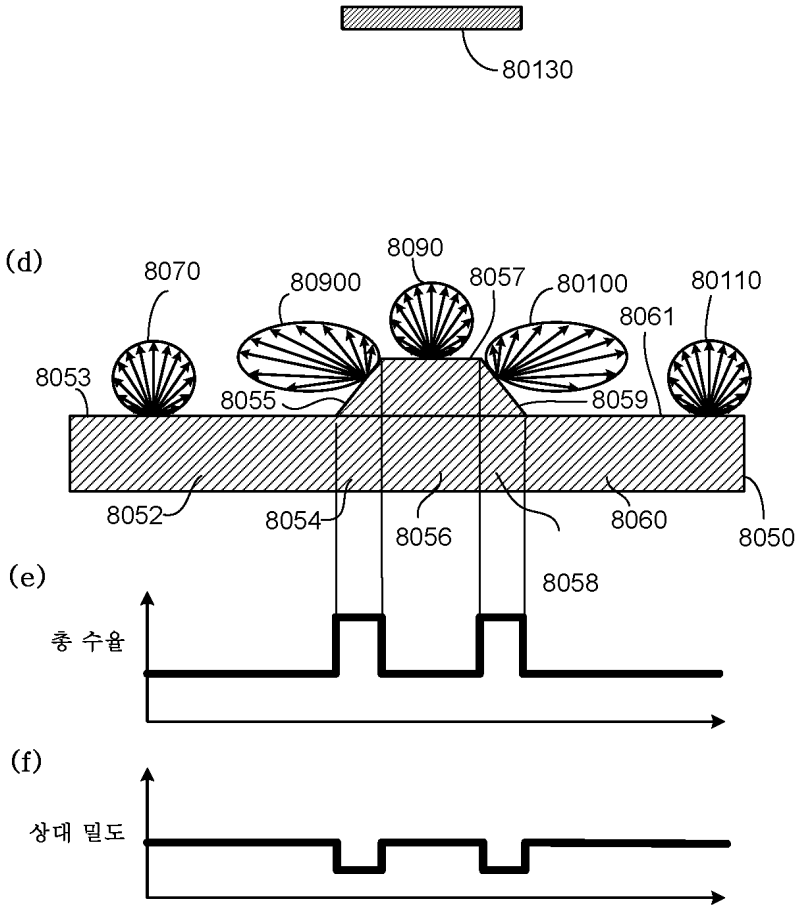
도면34


(a)
7041
7030
7050
7020
7015
7040
7013
7017
7010
7012
7014
7016
(b)
상대 밀도
7042
7052
표면 위치

도면35

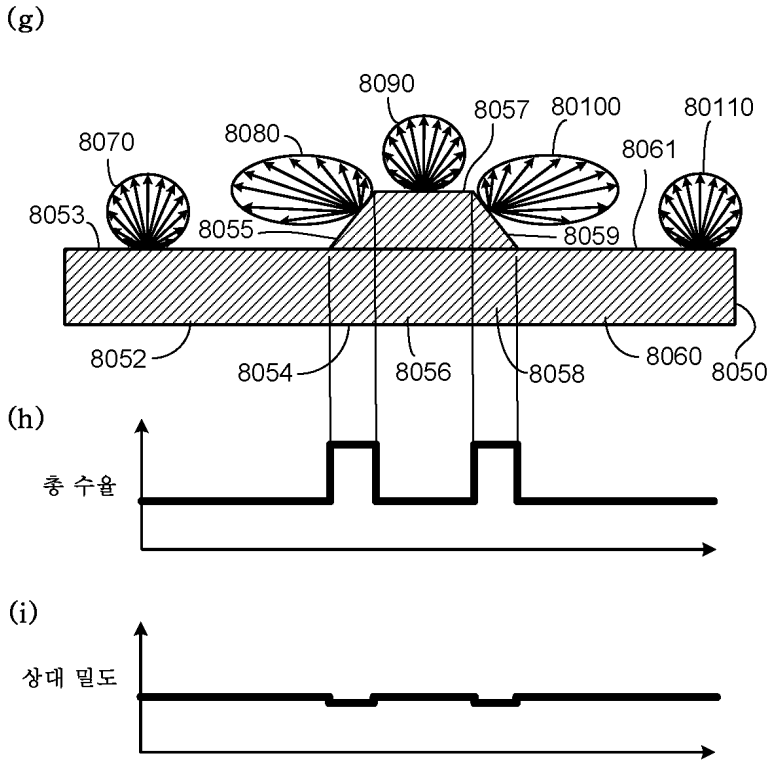

(a)
80120
8090
8070
8080
8057
80100
80110
8053
8061
8055
8059
8052
8054
8056
8058
8060
8050
(b)
충 수율
(c)
상대 밀도

도면35d

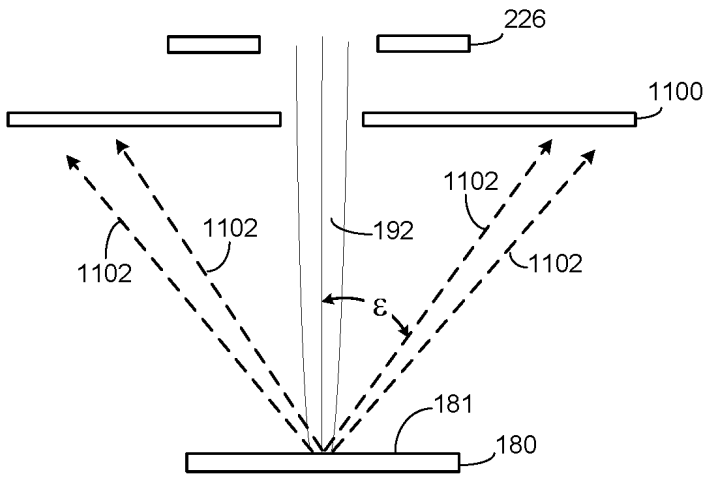

80130
(d)
8070
80900
8090
8057
80100
80110
8061
8053
8055
8059
8052
8054
8056
8060
8050
(e)
8058
총 수율
(f)
상대 밀도

도면35g

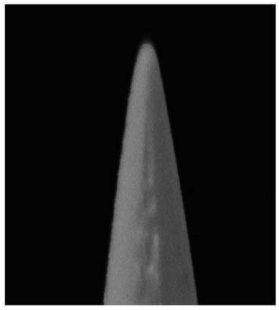

8940


(g)
8090
8057
80100
80110
8070
8080
8061
8053
8055
8059
8052
8054
8056
8058
8060
8050
(h)
총 수율
(i)
상대 밀도

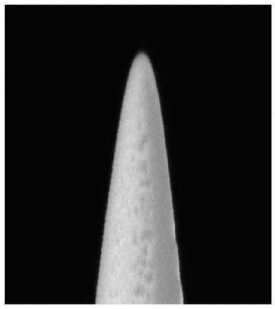
도면36


226
1100
1102
1102
192
1102
1102
ε
181
180

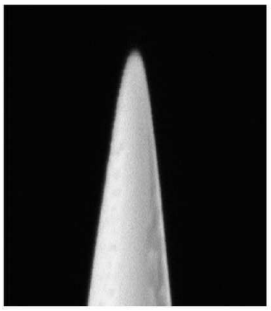
도면37a



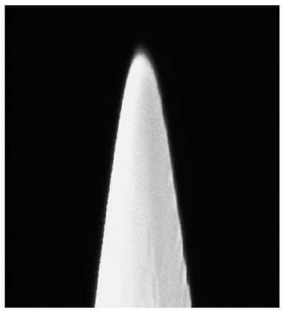
도면37b



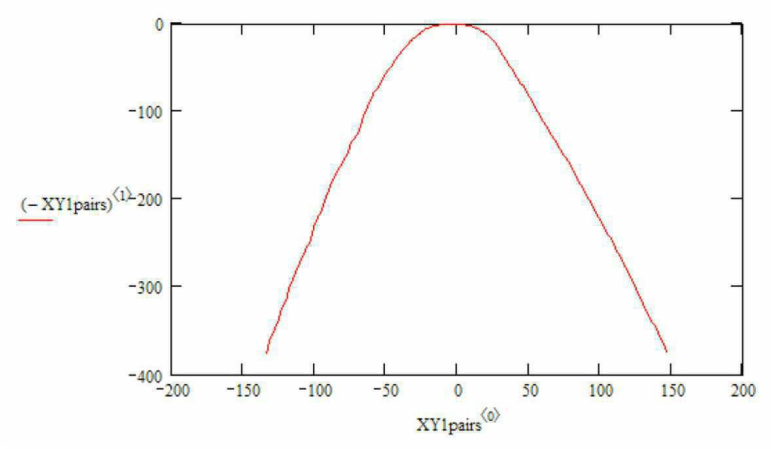
도면37c



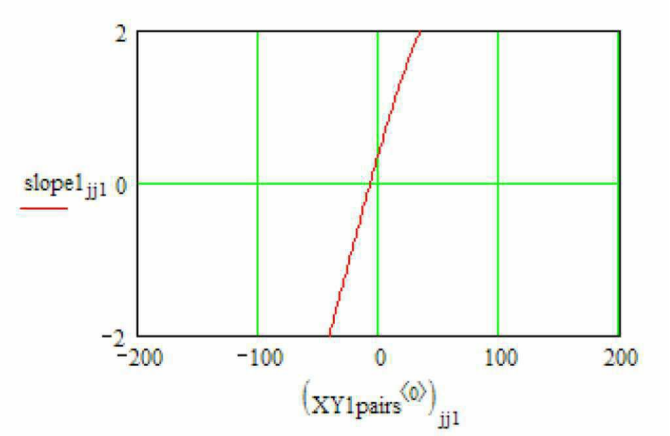
도면37d



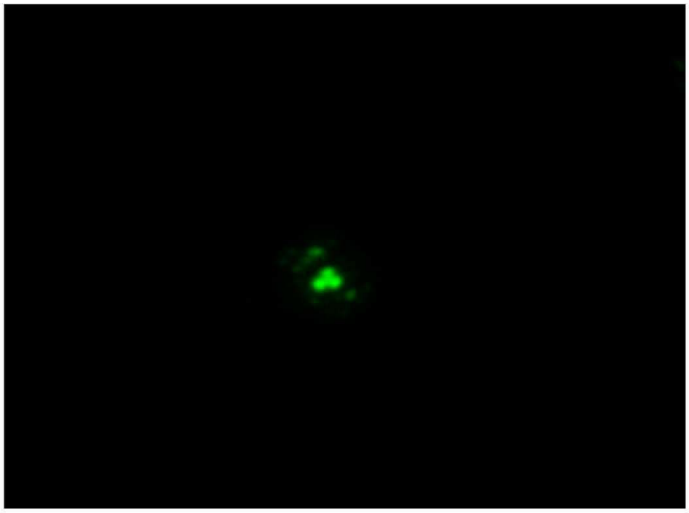
도면38



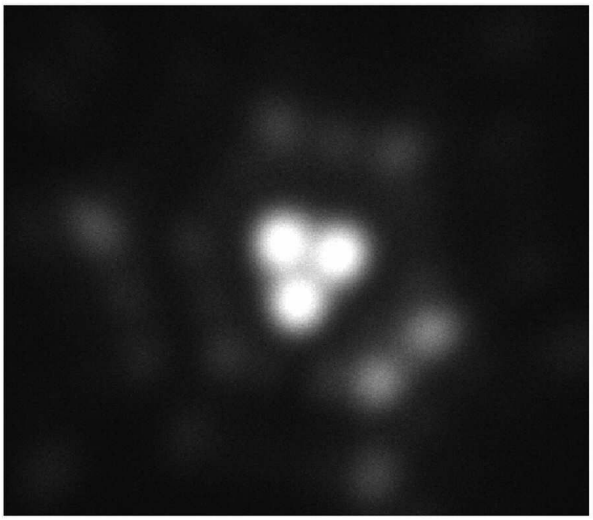
도면39



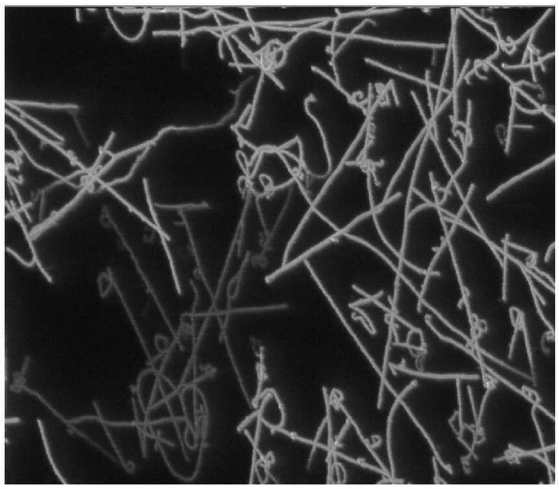
도면40



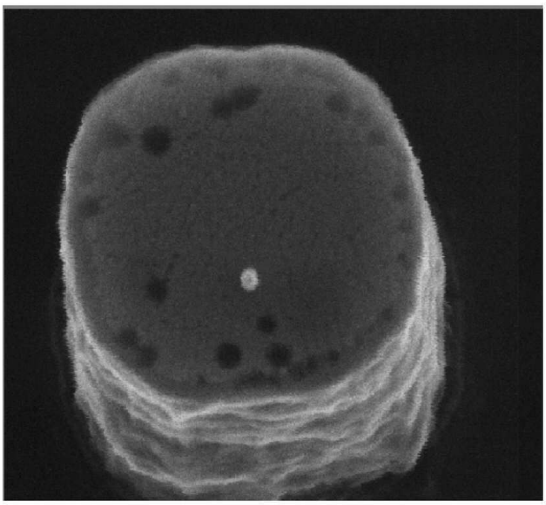
도면41



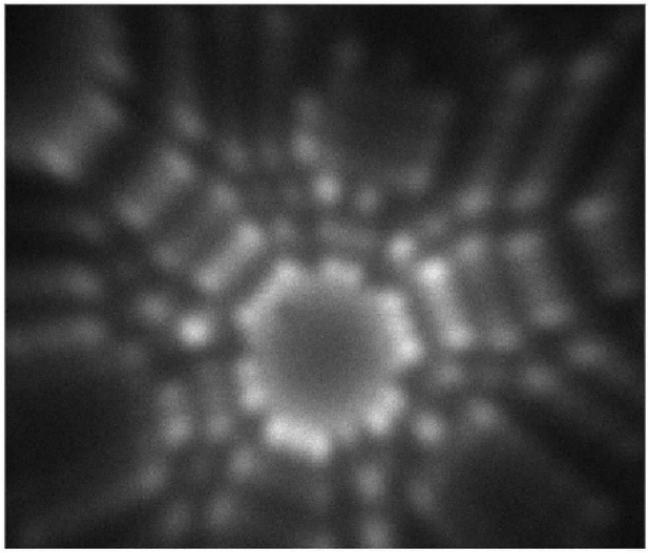
도면42



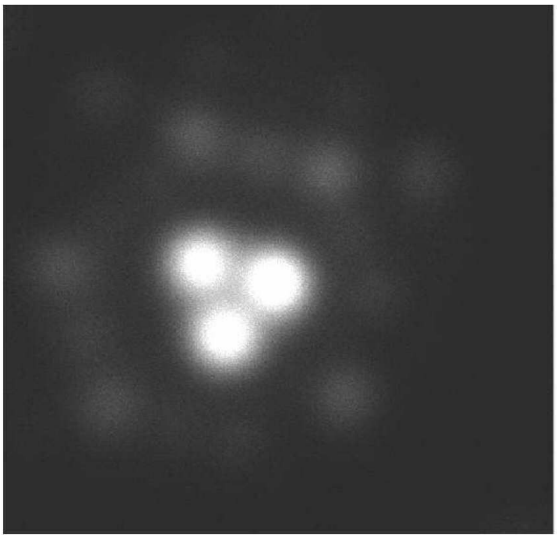
도면43



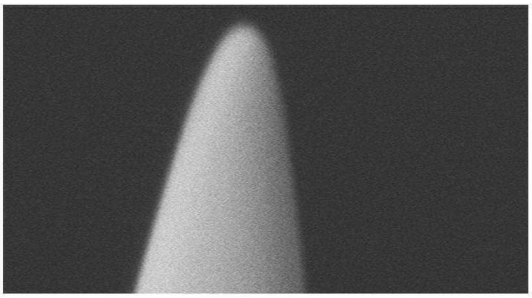
도면44



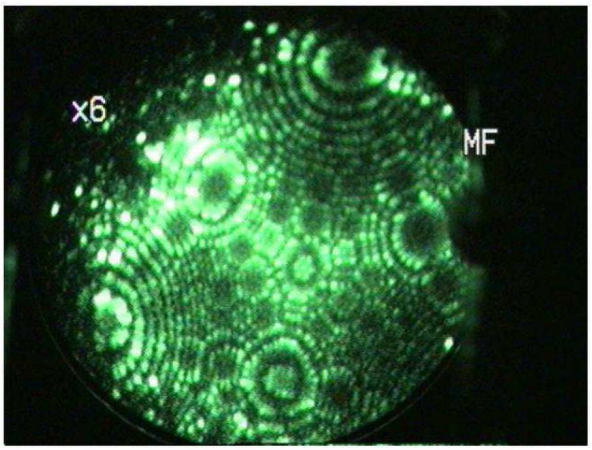
도면45



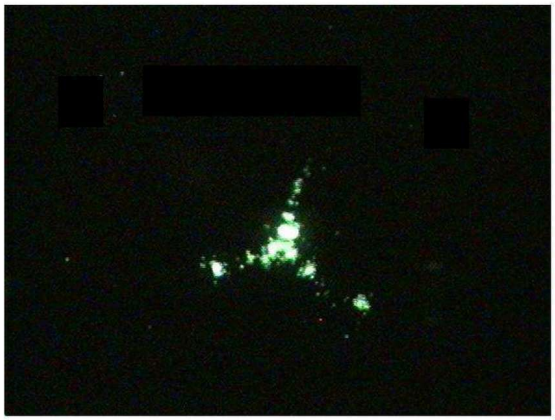
도면46



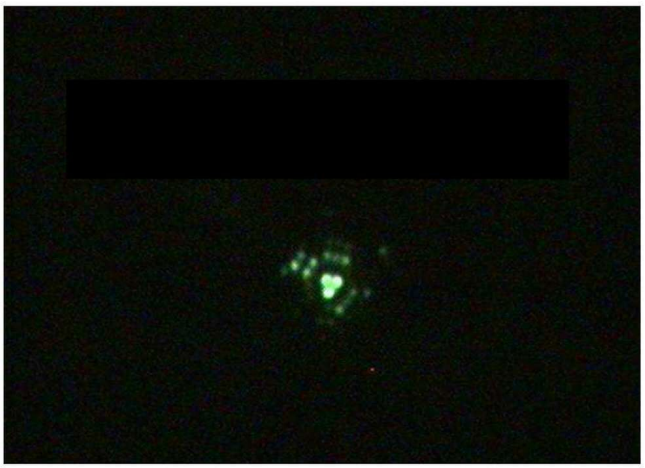
도면47



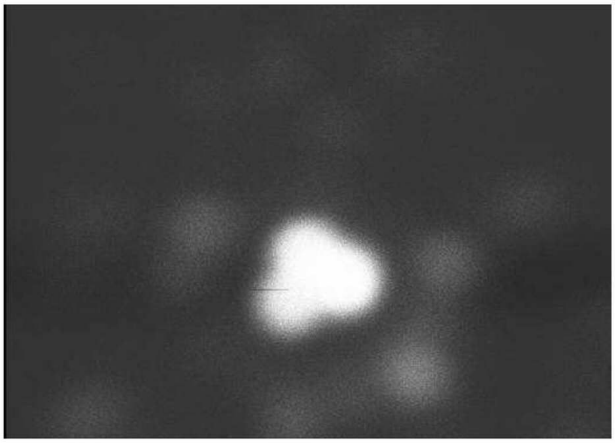
도면48



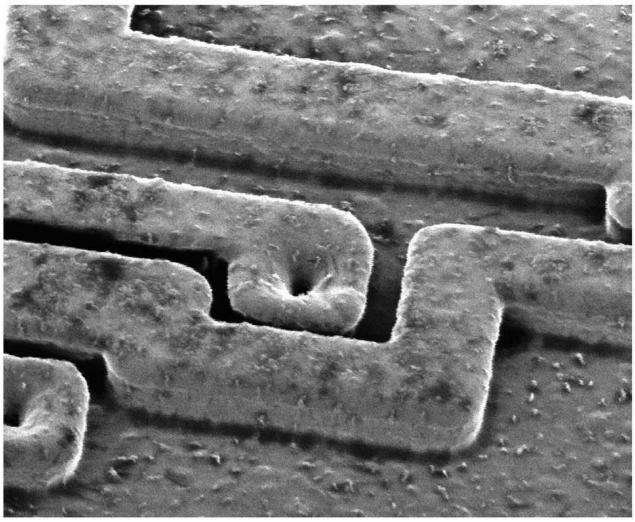
도면49



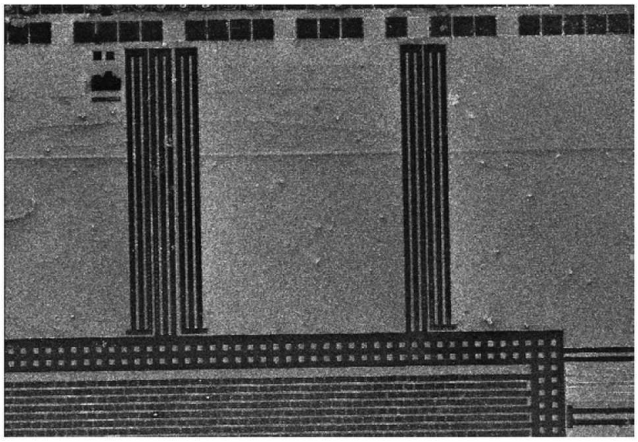
도면50



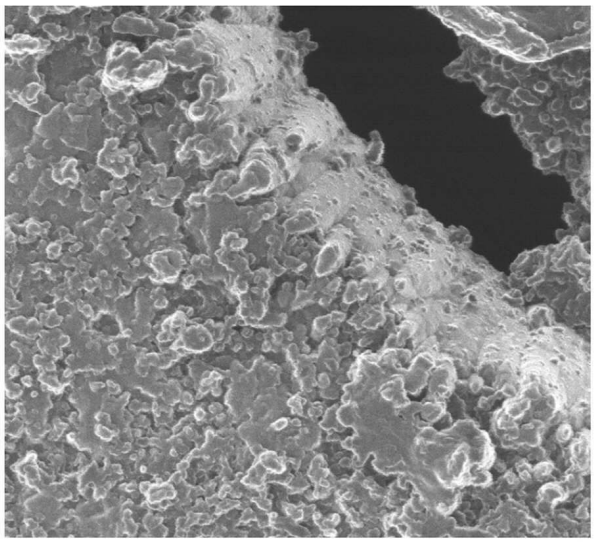
도면51



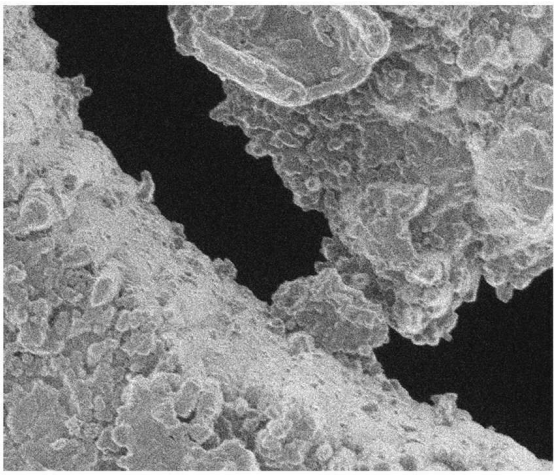
도면52



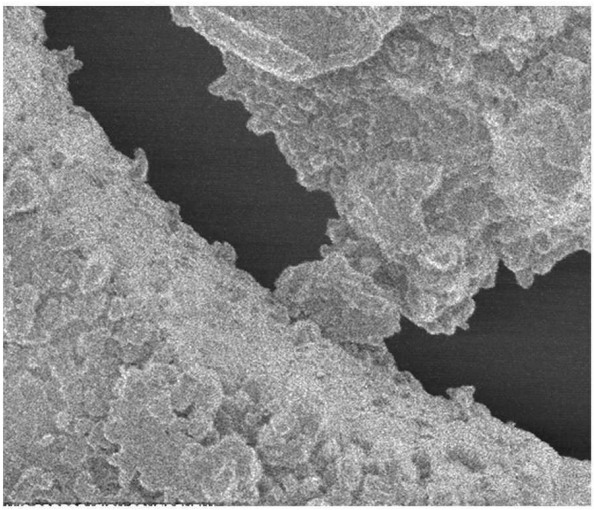
도면53



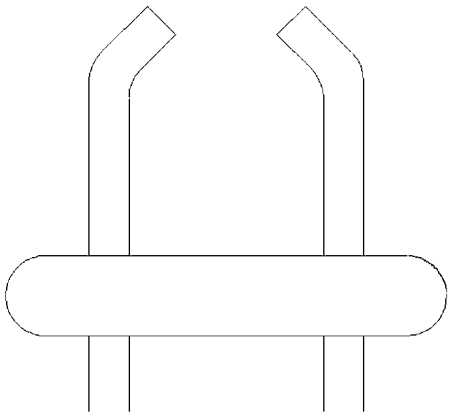
도면54



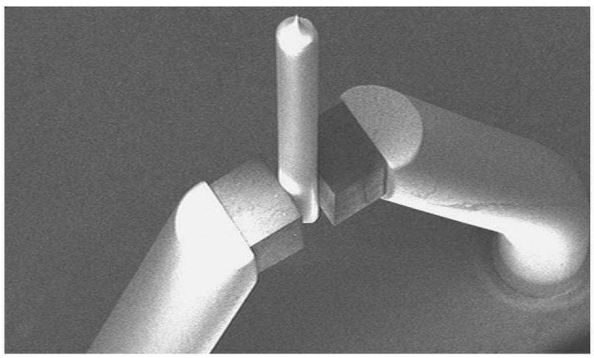
도면55



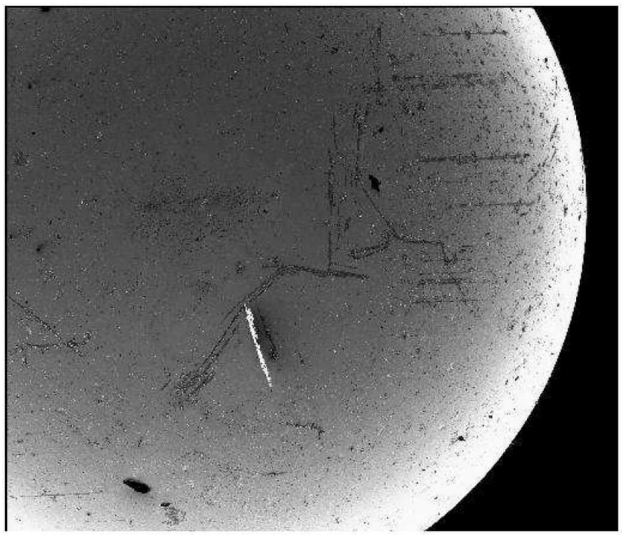
도면56



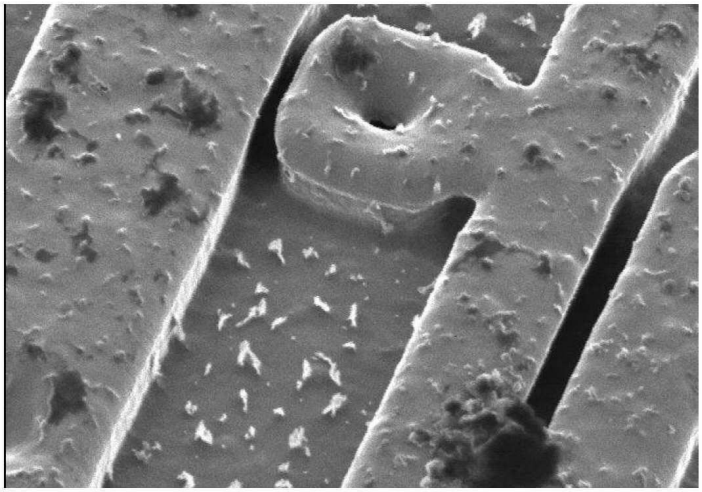
도면57



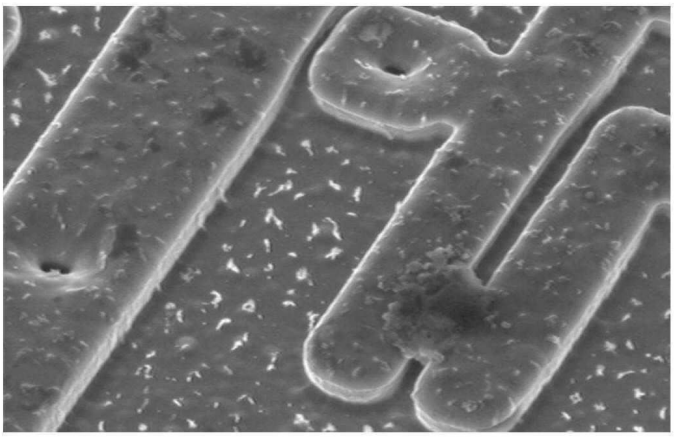
도면58



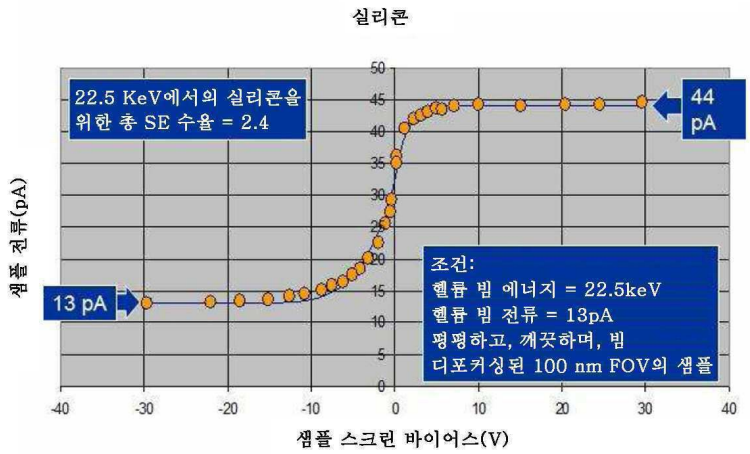
도면59a



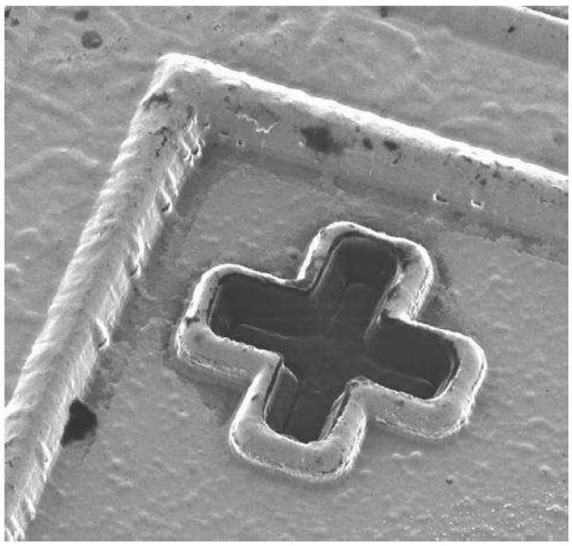
도면59b



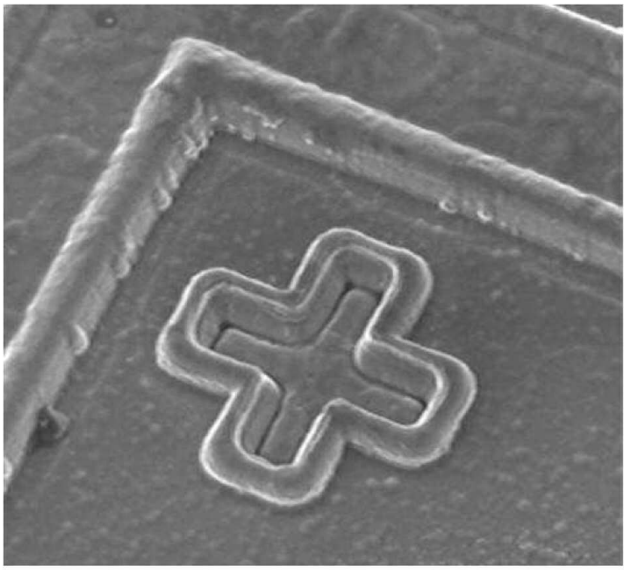
도면60



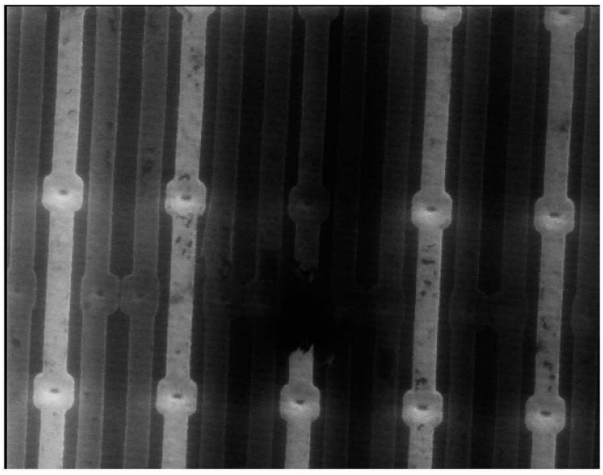
도면61a



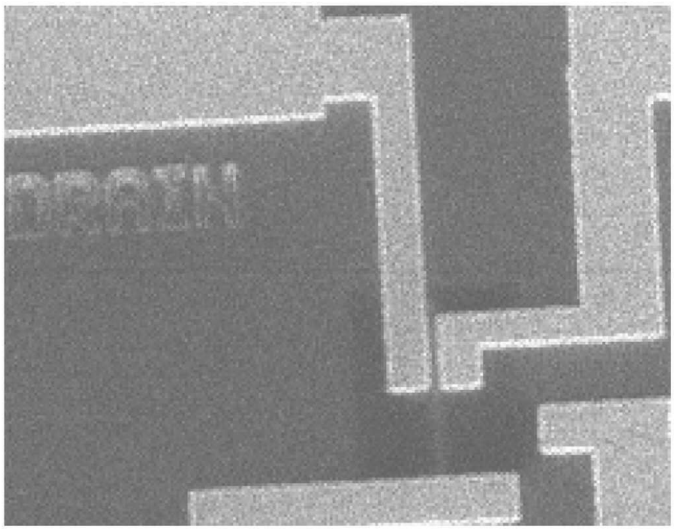
도면61b



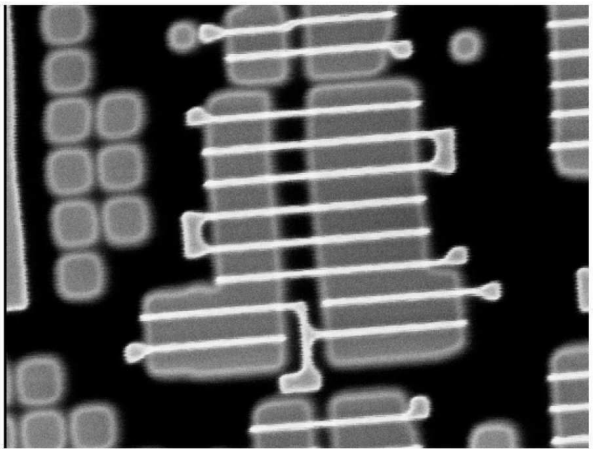
도면62



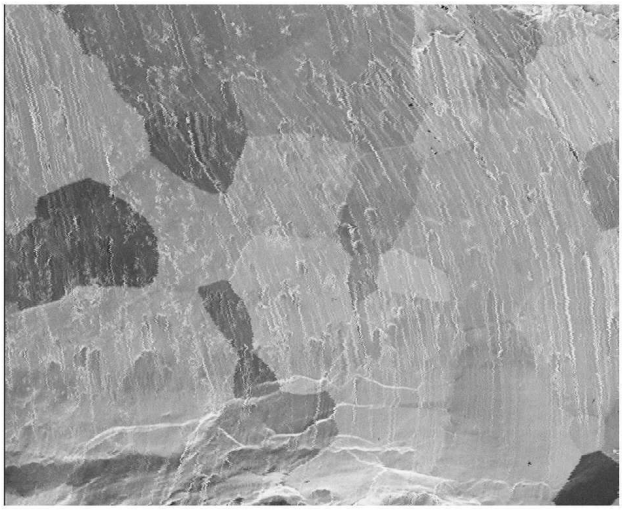
도면63



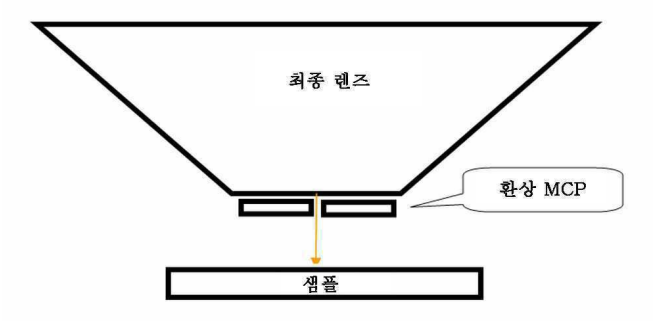
도면64



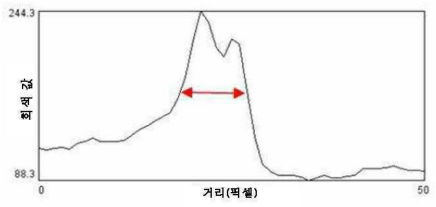
도면65



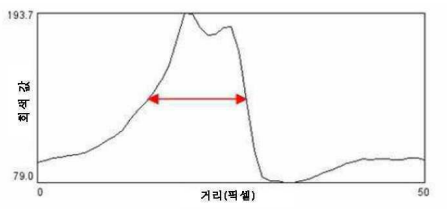
도면66



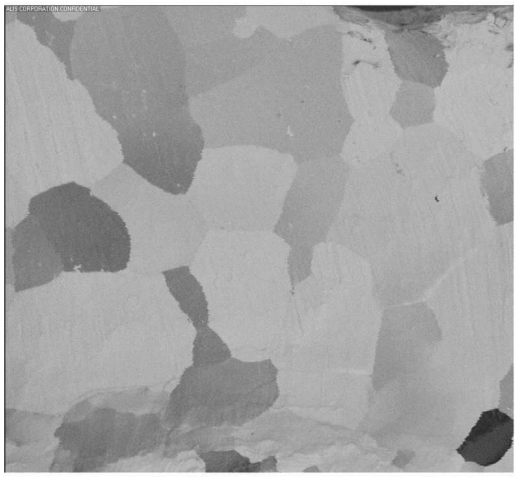
도면67a



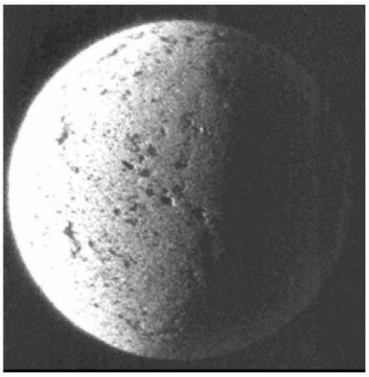
도면67b



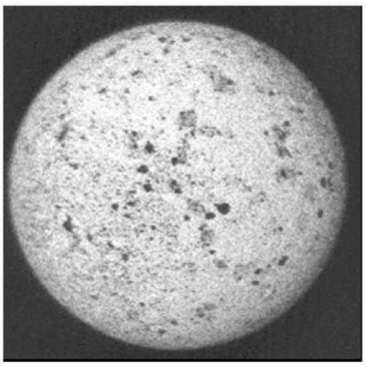
도면68



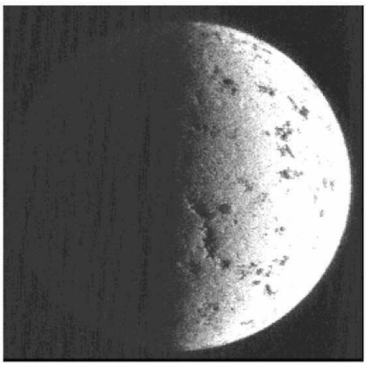
도면69a



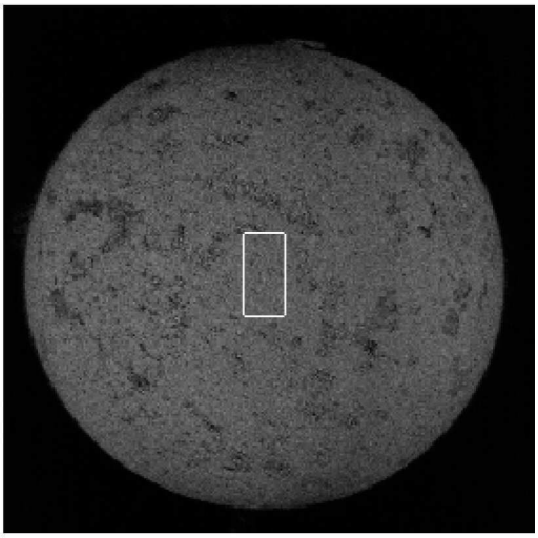
도면69b



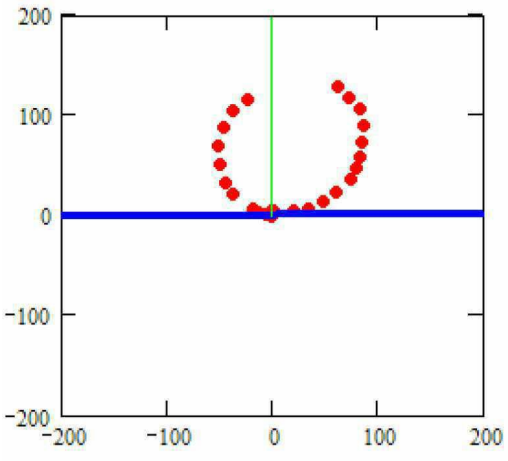
도면69c



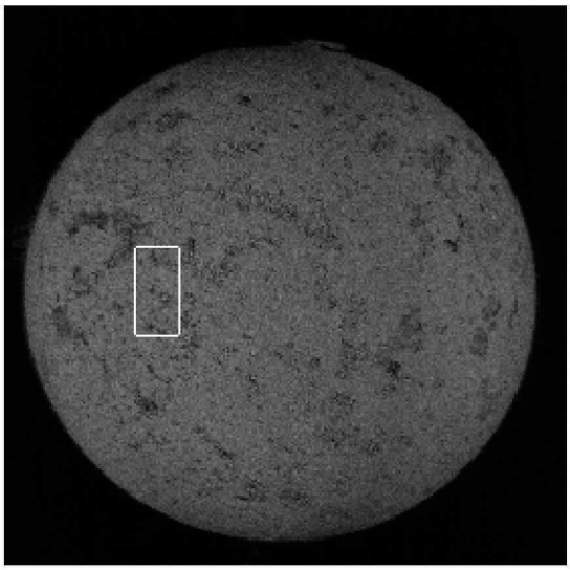
도면70a



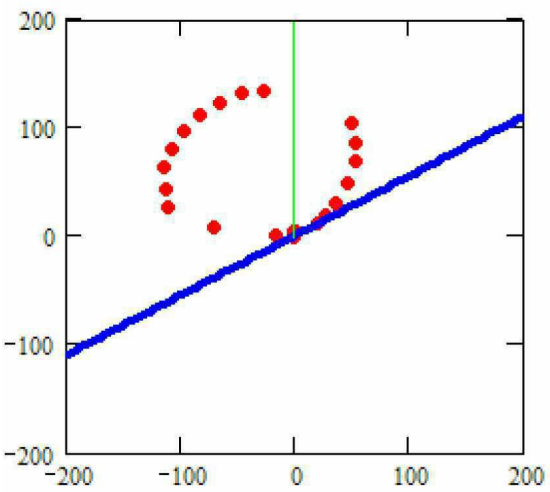
도면70b



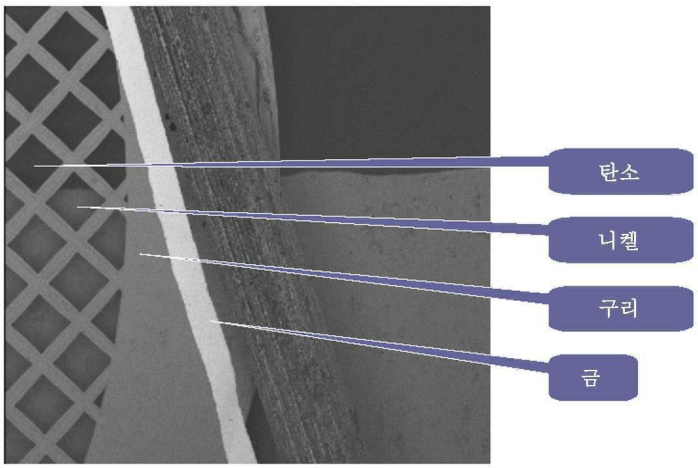
도면71a



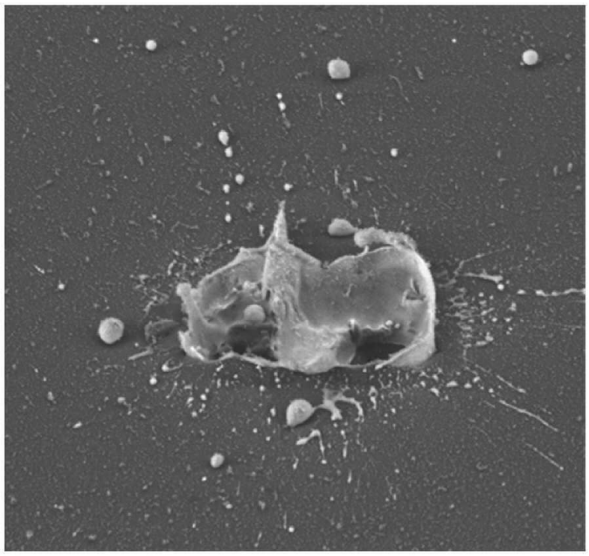
도면71b



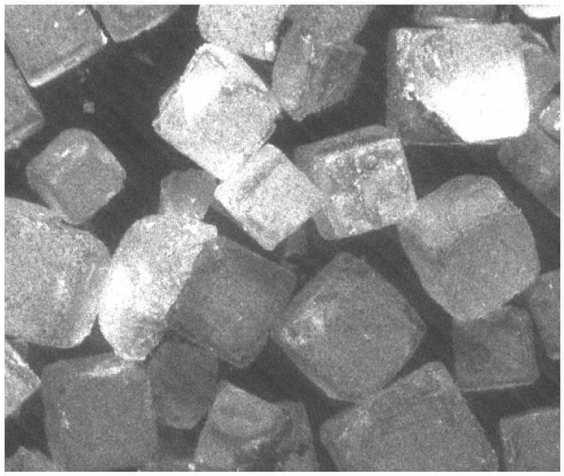
도면72



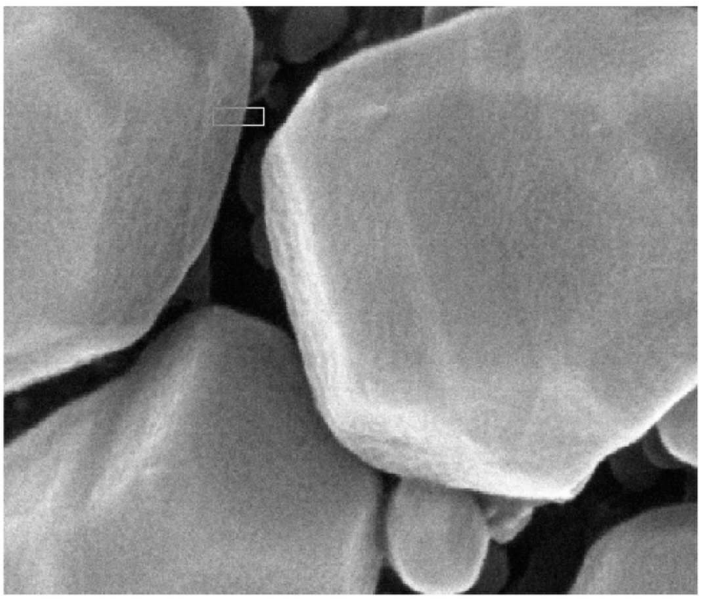
도면73



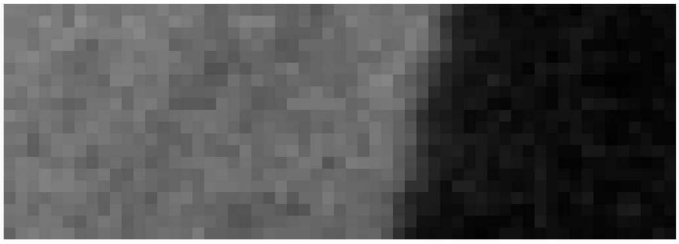
도면74



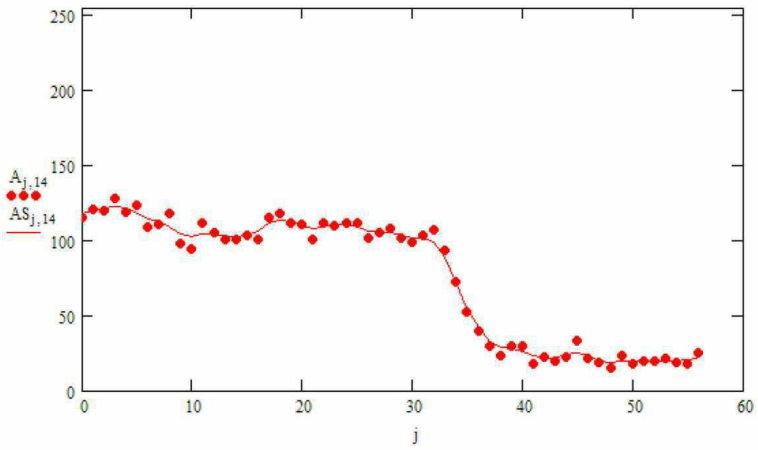
도면75



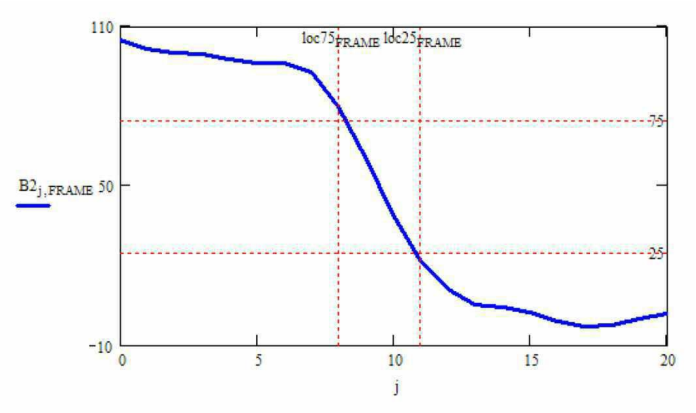
도면76



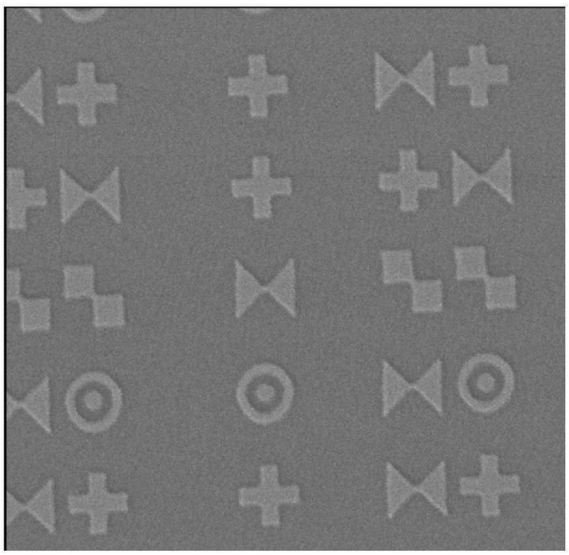
도면77



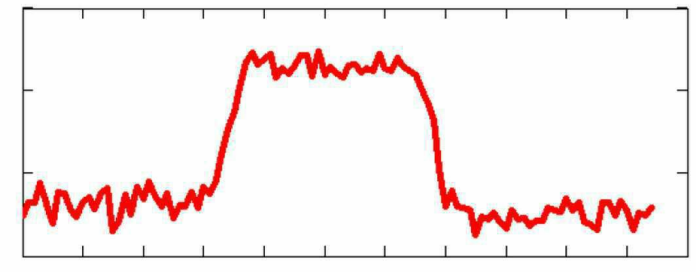
도면78



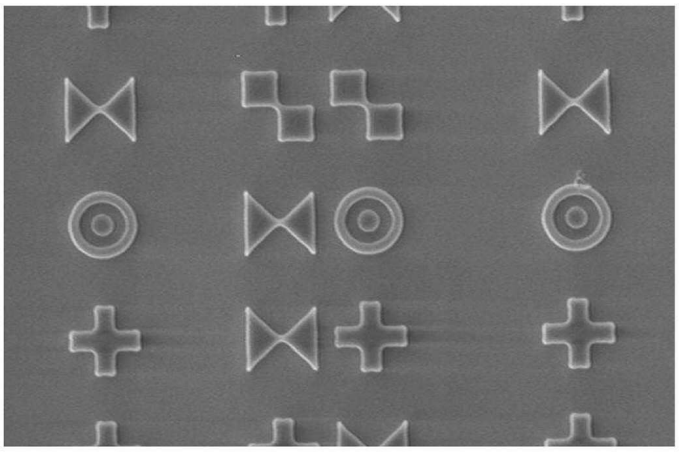
도면79



도면80



도면81



도면82

