



**(19) 대한민국특허청(KR)**  
**(12) 공개특허공보(A)**

(11) 공개번호 10-2017-0016005  
(43) 공개일자 2017년02월10일

- (51) 국제특허분류(Int. Cl.)  
G01Q 60/24 (2010.01) G01Q 60/00 (2010.01)  
G01Q 60/34 (2010.01)
- (52) CPC특허분류  
G01Q 60/24 (2013.01)  
G01Q 60/00 (2013.01)
- (21) 출원번호 10-2017-7001022(분할)
- (22) 출원일자(국제) 2009년11월13일  
심사청구일자 없음
- (62) 원출원 특허 10-2011-7013543  
원출원일자(국제) 2009년11월13일  
심사청구일자 2014년11월12일
- (85) 번역문제출일자 2017년01월12일
- (86) 국제출원번호 PCT/US2009/064476
- (87) 국제공개번호 WO 2010/057052  
국제공개일자 2010년05월20일
- (30) 우선권주장  
61/114,399 2008년11월13일 미국(US)

- (71) 출원인  
브루커 나노, 인코퍼레이션.  
미국, 93117 캘리포니아, 산타 바바라, 로빈 힐  
로드 112
- (72) 발명자  
후, 안  
미국, 93004 캘리포니아, 밴투라, 스프링필드 에  
비뉴 689  
후, 슈이텡  
미국, 93111 캘리포니아, 에이 산타 바바라 아파  
트먼트, 켈로그 에비뉴 175  
수, 찬민  
미국, 93003 캘리포니아, 밴투라, 이트나 코트  
7023
- (74) 대리인  
성낙훈

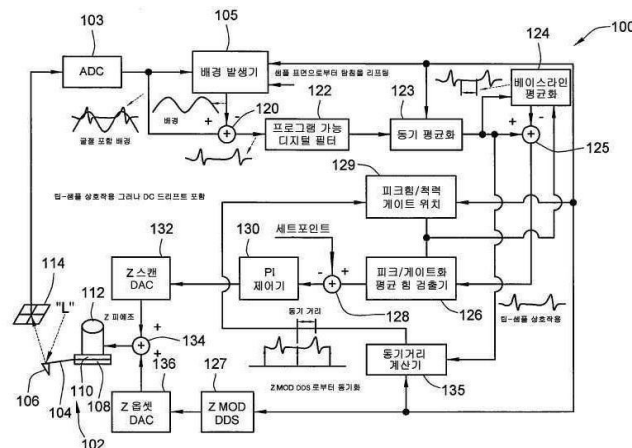
전체 청구항 수 : 총 20 항

(54) 발명의 명칭 **탐침형 원자 현미경 작동 방법 및 장치**

(57) 요약

AFM 이미징(피크 힘 테핑(PFT) 모드)의 개선된 모드 300은 모든 현존하는 AFM 작동 모드들에 의하여 성취될 수 있는 스캔 속도를 유지하면서, 팁-샘플 상호작용 힘을 감소시키기 위하여 가변적인 피드백으로서 힘을 사용한다. 샘플 이미징 및 기계적 특성 매핑은 개선된 해상도 및 높은 샘플 작업량에 의하여 이루어지며, 가스, 유체 및 진공을 포함하는 가변적인 환경에서 작업 가능한 모드를 제공한다.

대표도



(52) CPC특허분류  
*G01Q 60/34* (2013.01)

---

## 명세서

### 청구범위

#### 청구항 1

탐침형 원자 현미경(SPM)을 작동시키는 방법으로서,

탐침 및 샘플 사이에 상대적인 움직임을 생성하는 단계,

탐침의 움직임을 검출하는 단계,

검출된 탐침 움직임으로부터 탐침-샘플 상호작용에 기초한 탐침 굴절을 결정하는 단계로서, 상기 탐침 굴절은 기생(parasitic) 탐침 굴절에 실질적으로 독립적이고, 상기 기생 탐침 굴절은 SPM의 작용과 관련된 배경에 의하여 발생하고, 디지털 제어를 사용하여 검출된 탐침 움직임으로부터 배경을 삭감하는 단계를 포함하는 상기 결정하는 단계, 및

상기 결정하는 단계를 이용하여 상기 SPM을 실시간으로 제어하는 단계를 포함하고,

상기 탐침-샘플 상호작용의 진폭은 상기 기생 탐침 굴절의 진폭보다 적은, 탐침형 원자 현미경(SPM)을 작동시키는 방법.

#### 청구항 2

제1항에 있어서, 상기 탐침-샘플 상호작용과 관련된 즉석 힘(instantaneous force)을 확인하는 단계를 더 포함하는, 탐침형 원자 현미경(SPM)을 작동시키는 방법.

#### 청구항 3

제2항에 있어서, 상기 생성하는 단계는, 상기 탐침 및 샘플 사이에 상대 발진(oscillatory) 움직임을 제공하는 단계를 포함하며, 상기 즉석 힘은 발진 움직임의 한 사이클의 완성 이전에 확인되는, 탐침형 원자 현미경(SPM)을 작동시키는 방법.

#### 청구항 4

제3항에 있어서, 이미징을 하는 과정 동안에 세트포인트를 유지하기 위하여 즉석 힘을 이용하는 단계를 더 포함하는, 탐침형 원자 현미경(SPM)을 작동시키는 방법.

#### 청구항 5

제4항에 있어서, 상기 즉석 힘은 척력(repulsive force)인, 탐침형 원자 현미경(SPM)을 작동시키는 방법.

#### 청구항 6

제4항에 있어서, 상기 즉석 힘에 해당하는 최소 제어 가능한 힘은 약 1000  $\mu\text{N}$  미만인, 탐침형 원자 현미경(SPM)을 작동시키는 방법.

#### 청구항 7

제6항에 있어서, 상기 최소 제어 가능한 힘은 약 10pN 미만인, 탐침형 원자 현미경(SPM)을 작동시키는 방법.

#### 청구항 8

제6항에 있어서, 상기 검출된 탐침 움직임은 동기적으로 평균화되어 최소 제어 가능한 힘을 감소시키는, 탐침형 원자 현미경(SPM)을 작동시키는 방법.

#### 청구항 9

제1항에 있어서, 상기 결정하는 단계는 상기 탐침-샘플 상호작용으로부터 얻어지는 탐침 굴절 크기를 결정하는 단계를 포함하며, 상기 탐침 굴절 크기는 탐침 및 샘플 사이의 힘에 해당하고, 상기 탐침 굴절의 크기는 기생

탐침 굴절의 크기보다 적은, 탐침형 원자 현미경(SPM)을 작동시키는 방법.

**청구항 10**

제1항에 있어서, 상기 기생 탐침 굴절은 탐침이 샘플과 상호작용하지 않을 때 탐침 및 샘플 사이에 상대적인 주기성 움직임에 해당하는, 탐침형 원자 현미경(SPM)을 작동시키는 방법.

**청구항 11**

제10항에 있어서, 상기 배경은 SPM의 작용과 관련된 유체역학 배경에 의하여 발생하는, 탐침형 원자 현미경(SPM)을 작동시키는 방법.

**청구항 12**

제1항에 있어서, 100nm 미만의 해상도를 갖는 이미지를 얻는 단계를 더 포함하는, 탐침형 원자 현미경(SPM)을 작동시키는 방법.

**청구항 13**

제1항에 있어서, 100pN 미만의 최대 트래킹 힘을 갖는 이미지를 얻는 단계를 더 포함하는, 탐침형 원자 현미경(SPM)을 작동시키는 방법.

**청구항 14**

제1항에 있어서, 상기 방법은 약 0.1N/m 미만과 및 1000N/m 사이의 스프링 정수(spring constant)를 갖는 소정의 캔틸레버와 작용 가능한, 탐침형 원자 현미경(SPM)을 작동시키는 방법.

**청구항 15**

제1항에 있어서, 상기 생성하는 단계는 각각의 상호작용 주기 내에서 미리 결정된 동기 거리를 사용하여 피드백 루프에 의해 제어되는, 탐침형 원자 현미경(SPM)을 작동시키는 방법.

**청구항 16**

제1항에 있어서, 상기 디지털 제어기는 상기 배경을 감산하기 위해 록-인(lock-in) 진폭 및 동기 평균화 중 적어도 하나를 수행하는, 탐침형 원자 현미경(SPM)을 작동시키는 방법.

**청구항 17**

제1항에 있어서, 상기 디지털 제어기는 FPGA인, 탐침형 원자 현미경(SPM).

**청구항 18**

탐침형 원자 현미경(SPM)으로서,  
 탐침 및 샘플 사이에 상대적인 움직임을 생성하는 액추에이터,  
 탐침의 움직임을 검출하는 검출기,  
 검출된 탐침 움직임으로부터 탐침-샘플 상호작용에 기초한 탐침 굴절을 결정하는 디지털 제어기로서, 상기 탐침 굴절은 기생(parasitic) 탐침 굴절에 실질적으로 독립적이고, 상기 기생 탐침 굴절은 SPM의 작용과 관련된 배경에 의하여 발생하고, 상기 기생 탐침 굴절은 탐침이 샘플과 상호작용하지 않을 때 탐침 및 샘플 사이에 임의의 상대적인 주기성 움직임에 해당하는, 디지털 제어기를 포함하고,  
 상기 디지털 제어기는 검출된 탐침 움직임으로부터 배경을 삭감하고 상기 탐침 굴절을 이용하여 상기 SPM을 실시간으로 제어하며,  
 상기 탐침-샘플 상호작용의 진폭은 상기 기생 탐침 굴절의 진폭보다 적은, 탐침형 원자 현미경(SPM).

**청구항 19**

제18항에 있어서, 상기 디지털 제어기는 FPGA인, 탐침형 원자 현미경(SPM).

**청구항 20**

탐침형 원자 현미경(SPM)으로서,

탐침 및 샘플 사이에 상대적인 움직임을 생성하는 액추에이터,

탐침의 움직임을 검출하는 검출기,

검출된 탐침 움직임으로부터 탐침-샘플 상호작용에 기초한 탐침 굴절을 결정하는 FPGA를 포함하는 디지털 제어기로서, 상기 탐침 굴절은 기생(parasitic) 탐침 굴절에 실질적으로 독립적이고, 상기 기생 탐침 굴절은 탐침이 샘플과 상호작용하지 않을 때 탐침 및 샘플 사이에 임의의 상대적인 주기성 움직임에 해당하는, 디지털 제어기를 포함하고,

상기 디지털 제어기는 상기 탐침 굴절을 이용하여 상기 SPM을 실시간으로 제어하며,

상기 탐침-샘플 상호작용의 진폭은 상기 기생 탐침 굴절의 진폭보다 적은, 탐침형 원자 현미경(SPM).

**발명의 설명**

**기술 분야**

[0001] 관련 출원의 상호 참조

[0002] 본 출원은 미국의 35 U.S.C. § 119(e)에 따라, 2008년 11월 13일 출원된 미국 특허 가출원 번호 61/114,399에 대한 우선권 출원입니다.

[0003] 본 발명은 원자힘 현미경(AFM: Atomic Force Microscopes)를 포함한 탐침형 원자 현미경(SPMs: Scanning Probe Microscopes)에 관한 것이며, 보다 구체적으로는 고속으로 그리고 낮은 팁 샘플 상호 작용 힘 및 높은 해상력에 힘 제어할 수 있는 원자힘 현미경(AFM) 작용 모드에 관한 것이다.

**배경 기술**

[0004] 원자힘 현미경(AFM)과 같은 탐침형 원자 현미경(SPMs)는 일반적으로 팁으로 이루어지는 탐침을 구비하고, 그리고 상기 팁을 작은 소정의 샘플의 표면과 작은 힘으로 상호작용하도록 하여, 상기의 표면을 원자 크기로 특징화하는 것을 특징으로 한다. 일반적으로, 탐침은 소정의 샘플의 특징들에 따라, 변화를 검출하기 위하여 샘플의 소정 표면으로 도입된다. 팁과 샘플 사이에 상대 스캐닝 이동을 가능하게 함으로써, 상기 샘플의 특정 영역에 대한 표면 특징 데이터를 얻게 되며, 상기 샘플에 대한 맵이 생성될 수 있다.

[0005] 일반적인 원자힘 현미경(AFM)이 도 1에 도시되어 있다. AFM(10)은 캔틸레버(cantilever) (15)로 이루어지는 탐침(17)을 구비하는 탐침 장치(13)로 구성된다. 스캐너(24)는 탐침-샘플 간에 상호 작용이 이루어지는 동안에, 탐침(17)과 샘플(22) 사이에서 상대 움직임(motion)을 생성한다. 이와 같은 방법에 따라, 샘플의 이미지 또는 다른 측정 데이터들이 얻어진다. 스캐너(24)는 일반적으로 세계의 상호 직교 방향(XYZ)으로 소정의 움직임들을 생성하는 한 개 또는 그 이상의 액추에이터로 구성된다. 스캐너(24)는 압전 튜브 액추에이터와 같이, 모두 세계의 축으로 샘플 또는 탐침을 이동시키기 위한, 한 개 또는 그 이상의 액추에이터로 구성되는 단일의 일체형 유니트를 구비하고 있다. 다른 방법으로, 상기 스캐너는 복수개의 별도로 분리된 액추에이터로 이루어지는 개념상 또는 물리적인 조합으로 구성될 수도 있다. 원자힘 현미경은 복수개의 구성 요소, 즉 스캐너를 샘플을 이동시키는 XY 액추에이터 및 탐침을 이동시키는 Z-액추에이터로 나눌 수 있다. 상기와 같은 기구는 *Hansma et al.* U.S. Pat. No. RE 34,489; *Elings et al.* U.S. Pat. No. 5,266,801; and *Elings et al.* U.S. Pat. No. 5,412,980에 공개된 바와 같이, 샘플들의 지형도 또는 다른 특성을 측정하면서, 탐침과 샘플 사이에 상대 움직임이 생성될 수 있다.

[0006] 스캐너(24)는 측정 탐침과 샘플 표면 사이에 상대 움직임을 생성하기 위해 사용되는 압전 스택 ("피에조 스택"으로 칭함) 또는 압전 튜브로 구성된다. 피에조 스택은 스택 상에 설치된 전극들에 인가되는 전압에 따라 한 개 또는 그 이상의 방향으로 이동하는 일종의 장치이다. 피에조 스택은 피에조 스택의 움직임을 가이드하고, 억제하고, 그리고 증폭하기 위한 기구적인 만곡부와 조합되어 사용된다. 상기의 만곡부들은 "고속 스캐닝 SPM 스캐너 및 그를 작동시키기 위한 방법"의 제목을 가지며, 2007년 3월 16일 출원된 출원번호 11/687,304에 공개된 바와 같이, 한 개 또는 그 이상의 축의 강도를 증가시키기 위하여 일반적으로 사용된다. 액추에이터는 탐침, 샘플들 중 한 개에 또는 둘 다에 설치될 수 있다. 가장 일반적으로, 액추에이터 어셈블리는 탐침 또는 샘플을 수

평의 방향 또는 X-Y 평면 방향으로 구동하기 위한 XY 액추에이터 및 탐침 또는 샘플을 수직 또는 Z-방향으로 이동 시키는 Z액추에이터로 구성된다.

[0007] 일반적인 구성에 있어서, 탐침(17)은 캔틸레버(15)에 또는 그의 공진 주파수 근처에서 발진하기 위하여 탐침(17)을 구동하기 위한 발진 액추에이터 또는 드라이버(16)에 결합된다. 대체 가능한 다른 구성에 따라, 캔틸레버(15)의 굴절, 비틀림 또는 다른 특성을 측정할 수 있다. 탐침(17)은 일체형 팁(17)을 구비하는 초정밀로 제작된 캔틸레버로 구성된다.

[0008] 전자 신호는 액추에이터(16) (또는 대안으로 스캐너(24))가 발진을 위해 탐침(17)을 구동시키도록 SPM 제어기(20)의 제어에 따라 AC 신호 소스(18)로부터 적용될 수 있다. 탐침-샘플 상호 작용은 일반적으로, 제어기(20)에 의한 피드백을 통하여 제어된다. 액추에이터(16)는 스캐너(24) 및 탐침(17)에 일반적으로 결합되지만, 자체적으로 액추에이팅되는 캔틸레버/탐침의 부분으로서, 탐침(17)의 캔틸레버(15)에 일체로 구성될 수도 있다.

[0009] 상기에 설명한 바와 같이, 선택된 탐침(17)은 발진되어, 샘플(22)와 접촉하게 되고 이에 따라, 샘플의 특성들은 탐침(17)의 발진의 한 개 또는 그 이상의 특성들의 변화들을 감지함으로써, 모니터링될 수 있다. 이에 대하여, 굴절 검출 장치(25)가 일반적으로 빔을 탐침(7)의 후면 방향으로 향하도록 하기 위하여 사용되며, 상기 빔은 사분면 사진 검출기(four quadrant photodetector)와 같은 검출기(26) 방향으로 반사된다. 굴절 검출기는 *Hansma et al.* U.S. Pat. No. RE 34,489에 공개된 광학 레이저 시스템과 같은 것이지만, 스트레인 게이지, 용량 센서와 같은 다른 굴절 검출기들로 구성될 수도 있다. 장치(25)의 센싱 광 소스는 일반적으로, 레이저, 보다 바람직하기로는 가시광 또는 적외선 레이저 다이오드로 구성된다. 센싱 광 빔은 헬륨-네온 또는 다른 광 소스, 초발광 다이오드(SLD), LED, 광섬유 또는 작은 점에 초점이 형성될 수 있는 다른 광 소스와 같은 광 소스들에 의하여 생성된다. 빔이 검출기(26)를 가로질러 이동할때, 소정의 신호들이 신호 처리 블록(28)(탐침(17)의 RMS 굴절을 결정하기 위한)에 의하여 처리된다. 상호 작용 신호(예를 들면, 굴절)는 제어기(20)로 전송되며, 이에 따라 탐침(17)의 발진에서 소정의 변화들을 측정하기 위하여 신호들은 소정의 과정을 통하여 처리된다. 제어기(20)는 블록(30)에서 소정의 에러를 검출 및 결정하기 위하여, 팁과 샘플 (또는 레버(15)의 굴절) 사이의 상대적인 상호 작용을 유지하기 위하여, 즉 일반적으로는 탐침(17)의 세트 포인트 발진 특성을 유지하기 위하여, 제어 신호(예를 들면, PI 게인 제어 블록(32)를 이용)를 생성한다. 제어 신호들은 스캐너(24)를 구동하기 이전에, 고전압 증폭기(34)에 의하여 증폭된다. 제어기(20)는 발진 증폭을 세트포인트  $A_0$ 에 유지하기 위하여 사용되며, 이에 따라 팁과 샘플 사이에 일정한 힘을 유지하게 된다. 다른 방법으로는, 세트 포인트 또는 주파수가 사용될 수 있다. 제어기(20)는 세트 포인트에 의하여 정의되는 일정 타겟을 유지하기 위한 피드백 기능을 수행하게 된다.

[0010] 워크스테이션(40)이 제어(20) 및/또는 별도의 제어기 또는 소정의 요소에 연결된 또는 단독의 제어기의 시스템에 제공되어, 이에 따라 제어기로부터 얻어진 데이터들을 수신하고 그리고 스캐닝 동안 얻어진 데이터를 조정하여, 포인트 선택, 곡선 맞춤, 거리 결정 작용등과 같은 데이터 조정 작용을 수행하게 된다. 워크스테이션은 결과적으로 얻어지는 정보들을 메모리에 저장하며, 그와 같은 정보를 추가 연산을 위하여 사용하며, 그리고 소정의 모니터에 디스플레이하며, 그리고 유선 또는 무선의 방법으로, 또 다른 컴퓨터에 전송한다. 메모리는 소정의 컴퓨터 판독 데이터 저장 매체물로 구성되며, 그들을 포함하나 그에 한정되지 않는 컴퓨터 램, 하드 디스크, 네트워크 저장장치, 플래시 드라이브 또는 씨디롬을 포함한다.

[0011] AFMs는 콘택 모드 및 발진 모드를 포함한, 다양한 모드에서 작동할 수 있도록 구성될 수 있다. 그외의 작용은, 표면을 가로지르며 스캔을 수행함에 따라, 탐침 어셈블리의 캔틸레버의 굴절에 따라, 샘플의 표면에 직교하며 샘플 및/또는 탐침을 상하로 이동하면서 작용한다. 상기의 스캔 작업은 일반적으로, 샘플의 표면과 최소한 평행한 x-y 평면 방향에서, 그리고 x-y 평면에 수직 방향인 z-방향으로 수직 운동에 따라 수행된다. 많은 샘플들은 거칠기, 곡면 경사들을 가지며, 이들은 평평한 면과는 다르며, 이에 따라 이들에 대해선 "일반적으로 평행"이라는 용어를 사용한다. 이와 같은 방법에 따라, 수직 움직임과 관련한 데이터가 저장되어, 사용되어, 표면 지형도와 같은 샘플 특성에 해당하는 샘플 표면의 이미지를 형성하게 된다. 태핑 모드(TappingMode™)(TappingMode™는 본 출원 양수인의 등록 상표임)라 불리는 AFM 작용의 한 가지 실제 모드에서, 팁은 탐침의 관련 캔틸레버에서 또는 그의 공진 주파수 근처에서 또는 그들의 조합에서 발진한다. 피드백 루프에 의하여, 이와 같은 발진의 진폭을 일정하게 유지하며, 팁-샘플 분리를 제어하여 팁/샘플 상호 작용으로부터 얻어지는 힘, 즉 "트래킹 힘"을 최소화하게 된다. 또 다른 피드백 구성에 의하여, 페이즈 또는 발진 주파수를 일정하게 유지할 수 있다. 콘택 모드에서, 이러한 피드백 신호들은 수집되고, 저장되어, 샘플을 특성화하기 위한 데이터들로 사용될 수 있다.

[0012] 이와 같은 작용 모드들하고는 상관없이, AFMs는 해상도를 압전 스캐너, 광 레버 굴절 검출기 및 포토리소그래픽 기술을 이용하여 만들어지는 매우 작은 캔틸레버를 이용하여 공기 액체 또는 진공 중에서 대단히 광범위한 절연

또는 전도성 표면 상에서 원자 레벨로 만들 수 있다. 그들 해상도 및 다양성들에 따라, AFMs는 반도체 제조 공정으로부터 생명 공학 연구에 이르기 까지 매우 다양한 영역에서 주요한 측정 장치로 사용될 수 있다. "SPM" 및 SPMs의 구체적 형태에 대한 애크로님(acronyms)은 "원자 힘 현미경"과 같은 현미경 장치 또는 관련 기술에 해당한다.

[0013] 이와 같은 측정 장치들로, AFMs는 해상도 및 수집 속도 사이에 소정의 거래(tradeoff)를 필요로 한다. 현재 이용 가능한 AFMs는 옹스트룀 이하의 해상도로 소정의 표면을 스캔할 수 있다. 이러한 스캐너들은 상대적으로 작은 샘플 영역 만을 스캔할 수 있으며, 심지어 매우 낮은 스캔 속도로 스캔할 수 있다.

[0014] 통상적인 상업용 AFMs는 높은 해상도(예를 들면 512x512 픽셀) 및 낮은 트래킹 힘으로 수 마이크로의 영역을 커버하기 위해서는, 수 분의 시간에 해당하는 전체 스캔 시간이 필요하다. AFM 스캔 속도의 실제 한계는 팁 및/또는 샘플에 손상을 주지 않거나 또는 최소한의 손상을 줄 정도의 낮은 크래킹 힘을 유지하면서, 스캔을 수행할 수 있는 최대 속도에 따라 결정된다. 본 기술 영역에 있어서, 많은 진보가 이루어졌으며, 특히 SPM은 작은 크기의 샘플 및 작은 스캔 크기에 대하여 높은 해상도로 비디오 스캔 속도를 구현하였다.

[0015] 그렇다해도, TappingMode AFM 및 컨택 모드를 포함하는 이와 같은 알려진 작용 모드와 관련한 한계들로 인하여, 많은 개선점들이 필요하다. 컨택 모드에서, 측면 스캔은 상기와 같같은 두가지 내용을 포함할 수 있는 팁과 샘플들 사이에 큰 힘을 만들어 낸다. 생명 공학 샘플 및 폴리머와 같은 소프트한 샘플들을 이미징화할때, 표면이 파괴될 수 있으며, 이에 따라 측정치들을 무용화 만들 수 있으며, 또는 최소한 심각한 변형을 초래하며, 이에 따라 해상도에 많은 손상을 줄 수 있다. "이미징"이란 일반적으로 샘플과 탐침 사이에 상대 스캐닝 움직임을 제공하고 그리고 상기 샘플과 탐침을 상호 상용시켜, 샘플 표면의 복수개의 포인트들에서 SPM 데이터를 얻는 것을 표시하기 위하여 사용된다.

[0016] TappingMode AFM은 낮은 힘 기술에 관한 것이며, 그리고 다루기 까다로운 예민한 샘플들에 대하여, 샘플 표면들을 매핑하기 위하여 가장 광범위하게 사용되는 AFM 중의 한 모드이다. 샘플 상에서 팁의 힘은 수 nN에서 수십 nN이다. 팁을 드래킹하기 보다는 팁을 발진시키면, 전단력이 최소화된다. TapingMode AFM은 샘플 표면에 작용하는 정상적인 힘을 제어하기가 어려운 단점이 있다. 일반적으로 사용자들은 샘플 프로파일서 최상의 재생력을 얻기 위한 팁 샘플 상호 작용 힘을 최소화하기 위하여, 탐침의 자유 공기 굴절/진폭으로부터 작은 변화에 해당하는 세트 포인트를 선택하기 위하여 노력한다. 연질의 샘플에 대한 어려움은, 만약 이미징 힘이 너무 낮으면, 팁이 샘플을 제대로 크래킹하지 못하는 문제점이 있으며 (예를 들면, 스캔 동안에 샘플과 상호 작용을 유지하는 것), 만약 너무 높으면, 샘플의 손상/변형에 의하여 표면 지형도를 정확하게 굴절시키기 못한 상태로 이미지를 얻게 된다. 이와 같은 힘이 우수하게 제어될 수도록 (예를 들면, 더 낮게 그것이 유지될 수록), 더 낮은 빈도의 샘플 및 팁 손상을 가져오며, 이에 따라 해상도가 개선될 수 있다.

[0017] 이러한 각각의 모드들에 있어서 팁 샘플 힘에 대한 검토 결과, 각각에 있어서 한계가 존재한다. TappingMode AFM 또는 Jumping Mode™(US Pat. Nos. 5,229,606, 5,266,801 및 5,415,027를 참조하세요. 상기 기술 전체 내용이 본 발명에 인용되어 있음)의 기술을 이용하여, 탐침을 표면과 상호 작용을 시키면, 팁은 표면과 주기적으로 접촉을 한다. 도 2a는 팁 움직임의 일 주기 "T" 내의 물리적인 공정을 도시한다. 도 2a는 샘플 표면 위치에 대한 팁의 궤적을 도시한다. 도 2b는 다양한 위치에서 팁 궤적을 위한 동일한 시간에서의 해당하는 상호 작용 힘을 도시한다. 피크 위치  $A_{max}$ 에서, 팁은 샘플의 표면과 가장 멀리 떨어져 위치하며, 샘플과 상호 작용하지 않는다. 팁이 수평 축을 향하여 아래로 이동을 계속함에 따라(제로 팁-샘플 분리), 근접 영역 반데르 발스(Van der Waals) 힘, 즉  $F_{a\_vdw}$ 를 얻으며, 팁이 스냅되고, 그리고 반데르 발스(Van der Waals) 인력에 따라 샘플과 접촉하게 된다. 샘플과 접촉한 이후에, 팁은 시간 존  $\sigma T$  동안에 척력 상호 작용 상태에 있게 된다. 상기의 시간 동안에, 팁은 샘플과 연속적으로 접촉하게 된다. 제로 이후의 위치는 팁이 샘플을 변형시킬 수 있음을 뜻하며 그의 위치를 샘플의 표면 아래에 위치하도록 한다.

[0018] 팁이  $\delta T$ 이후에 표면과 떨어지면, 인력이 모세혈관 메니스커스 형상을 만들며, 메니스커스가 파손되어 없어지기 바로 전에, 최대의 접착력  $F_{a\_max}$ 를 얻게 된다. 이후에 팁은 비상호 작용 영역으로 진입하며, 그리고 최대의 이탈 위치로 계속 진행하게 된다.

[0019] 상호 작용 자유 영역에서, 탐침이 표면으로부터 떨어지면, 상호 작용 힘은 도 2b에 도시된 바와 같이, 제로 또는 제로 근처가 되어 베이스라인을 형성한다. 도 2b에 도시된 바와 같이, 수평 축 상부의 힘은 척력에 해당하며, 수평 축 하부의 포인트들은 네트 인력 또는 접착력을 뜻한다. 최대 척력  $F_{r\_max}$ 은 가장 낮은 또는 가장

작은 팁 위치 또는 샘플 표면에 상대적인 분리를 뜻한다. TappingMode™ AFM 및 JumpingMode™ AFM에 공개된 공지의 모드들에 있어서, 진폭  $A_{max}$  또는 팁 발진 진폭의 RMS는 피드백 제어 매개변수로 사용된다. 도 1은 상기의 피드백 제어 장치의 한 가지 보기를 도시한다.

[0020] 계인 제어 피드백 루프, 위치 결정 액추에이터 및 캔틸레버 반응 검출 요소(예를 들면 사면체 포토 디텍터)를 이용하여 구현되는 공지의 제어 방법에 있어서, AFM은 캔틸레버 (예를 들면, 탐침에 해당) 움직임에 해당하는 검출된 탐침 굴절 또는 RMS 신호를 팁-표면 상호 작용의 표시로 이용하고 그리고 상수 또는 RMS 굴절을 유지하기 위한 피드백 루프를 이용한다.

[0021] 종래의 AFM의 주요 한계는, 고해상도의 정량적 기구 특성 정보를 얻는데 있어 한정된 능력이 있는 점이다. AFM은 지형도 이미징에 주로 맞춰 개발되었다. 탄성, 소성 및 접촉 작용을 포함한 정량적 기구 매핑을 구현하는데 있어, 진전을 보이지 않고 있다.

[0022] 그리고, TappingMode™ 제어 방법은 피드백을 이용하여, 팁-표면을 제어하기 위한, 측정된 굴절 신호의 진폭 또는 페이즈를 이용한다. 진폭 및 페이즈 둘은 최소한 한 번의 상호 작용 사이클을 이용하는 탐침/팁 발진의 평균적인 특성이다. 보다 구체적으로는, 이러한 평균적인 특성은 팁 궤적에서 모든 위치들에서 발생하는 탐침/샘플 상호작용에 속한다 (도 2). 따라서, 제어 피드백이 실제로 동시적인 팁-샘플 상호 작용에 따라 이루어지도록 하기 위한 가능성은 없다. 이와 같은 동시적인 상호 작용은 도 2b에 도시된 상호 작용의 소정 포인트(예를 들면, 2 밀리 초 이내)에 해당한다 (하기에 상세히 설명).

[0023] TappingMode™ AFM은 탐침이 샘플을 단속적으로 접촉할때 발생하는 스틱-인 조건으로 알려진 문제점을 극복하기 위하여 만들어졌다. 탐침이 샘플을 접촉할때, 모세 혈관 힘은 팁을 잡아서, 이탈되는 것을 방지한다. 태핑 모드 (TappingMode)에서 탐침 발진의 진폭은 제로로 떨어지며, 이에 따라 피드백 발진을 만들게 된다. 이와 같은 문제점은, TappingMode AFM을 약 10nm 피크-투-피크 이상의 발진 진폭에서 작동시키면서, 40N/m의 최소 액면값을 갖는, 일반적으로 10N/m(뉴톤 미/미터)에서 60N/m의 강도(stiffness)를 갖는 탐침을 이용한 태핑모드 (TappingMode)에서 극복될 수 있다. 이와 같은 조건들 하에서, 탐침이 표면과 접촉을 할때, 태핑 탐침의 운동 에너지는 모세 혈관 힘을 극복하기 위하여 충분한 정적인 탄성 에너지로 변환되어, 각각의 사이클에서 변함없는 진폭을 얻을 수 있도록 한다. 이와 같은 모드에서의 문제점은, 탐침에 저장된 운동 에너지가 모세 혈관 스프링 정수에 비례한다는 것이다. 1N/m과 같은 낮은 스프링 정수 모세혈관을 이용할 때, 태핑 모드는 많은 재료들을 측정할때는 사용이 불가능하다. 왜냐하면, 모세혈관이 그 자신의 공진 발진 에너지를 이용하는 모세혈관 접촉력을 극복할 수 없기 때문이다. 결과적으로, 대개의 태핑 모드 어플리케이션들은 해당 기술 분야에 있어서 레버로 알려진 소정의 강도(stiff)를 갖는 캔틸레버를 이용할 때 만, 사용 가능하다는 것이다.

[0024] 펄스-힘 모드 또는 PFM (US Pat. No. 6,880,386 및 US Pat. No. 7,129,486를 참조)로 알려진 SPM을 작동하기 위한 다른 모드에서, 탐침의 발진 진폭이 조정되어, 팁이 각각의 사이클 동안에 접촉 또는 이탈을 하게 된다. 이와 같은 모드에서, 팁-샘플 상호 작용력을 모니터링하여, 제어가 이루어질 수 있다. 이와 같은 것은 힘 곡선 및 특정 위치에서 재료 특성을 측정하기 위하여 AFM 분야에서 또 다른 일반적인 측정값과 관련한 특성들에 따라 작용을 한다. 힘 측정은 일반적이며, 전체 샘플에 대하여 매핑되며, 힘-부피 이미지로서 알려진 것과 같은 것을 만들어 낸다.

[0025] PFM에 있어서, 힘-거리 곡선의 형상을 분석하여, 그리고 팁과 샘플 사이에 작용하는 힘을 제어하기 위한 데이터를 이용하여, 데이터의 양은 SPM 작용의 다른 모드들과 비교하여, 감소된다. 중요하게는, PFM은  $F_{r,i}$ (하기에 설명)에서 또는 피크 펄스 힘에서 작용할 필요가 있으며, 상기의 값들은 접촉력 감소 굴절을 초과하며, 결합 굴절 또는 초과한다. 그 결과, 높은 척력이 예저 기준으로 필요하다. 상기와 같은 높은 힘은 샘플 또는 팁을 손상시킬 수 있으며, 높은 해상도의 이미지를 획득하는 것을 막는다. PFM은 다른 제한적인 문제점들을 가지며, 특히 스피드 및 해상도 문제점을 가지며, 소프트한 샘플을 이미징하는데 구현될 수 있지만, AFM 이미징 어플리케이션의 모든 유형에 보다 광범위하게 적용될 수 없는 문제점이 있다. 심지어 캔틸레버 탐침이 샘플과 상호 작용할 수 없을 때, 유체 내의 점성력이 보다 큰 굴절을 만들기 때문에, 유체 환경 내에서 이미징하는 기술에 있어서, PFM에 있어서 보다 많은 연구가 필요하다.

[0026] 보다 구체적으로는, 이미징 속도가 표준 PFM AFM에서 제한되는 주요 이유가 도 2c에 도시되어 있다. 도 2c는 팁-샘플 상호 작용력 대 시간의 그래프를 도시한다. 상호 작용 힘은 "A"에서 스냅-접촉으로서 도시되며, 상기 포인트에서 척력 (팁 상에서의 샘플)은 "B"로 시작한다. 피크 척력은 "C"에서 접촉력이 팁이 샘플로부터 릴리즈되

는 포인트 "D"까지 팁 상에 계속 작용한다. 포인트 D는 샘플로부터 떨어질때 캔틸레버 탐침의 굴절 피크를 뜻한다. 포인트 "C" 및 "E"는 굴절 신호에서 피크 값으로 표시된다. 피드백이 팁-샘플 상호 작용을 적절히 제어할 수 있도록 하기 위해서는, 값 "C"가 "E"를 초과해야 한다. PFM에서 또 다른 문제점에 있어서, 스캔을 계속할 필요가 있는 베이스 라인 힘을 결정하기 이전에, 소정의 링다운 기간(공진 주파수에 있어서 탐침 발진의 사이클)이 필요하다. 상기와 같은 작용은, 캔틸레버가, 변조 주파수를 한정하고 그리고 속도를 스캔하기 위한 "링다운" (태핑 모드에서 자유 쇠퇴(decay) 공정)을 수행하도록 대기하기 위한 것이다. 보다 구체적으로는, 변조 주파수는 탐침 공진 주파수 보다 현저히 낮다 (예를 들면, 다섯번째 또는 그 보다 낮은 탐침 공진 주파수).

## 발명의 내용

### 해결하려는 과제

[0027] 바람직한 실시예는 팁을 샘플과 상호 작용하도록, 팁을 샘플 표면에 수직하는 방향으로 이동시키고, 그리고 상기 샘플로부터 이격시키기 위한 것이다. 본 실시예들은 소정의 상호 작용 포인트에서, 보다 바람직하게는 최대 척력을 이용하여 순간적인 상호 작용력(샘플 표면에 직교하는)을 이용하여 피드백 루프를 제어하기 위한 것이다. 이와 같은 작용의 새로운 모드는 변함 없는 상태의 상호 작용을 유지하고 그리고 샘플 상에서 팁의 트래킹을 제어하기 위하여, 피드백 루프를 이용하여, 팁-샘플 상호 작용(종래의 기술 처럼 링다운을 위하여 대기할 필요없이, 본 발명은 베이스 라인 또는 제로 힘 기준을 결정하고, 팁을 즉시 표면으로 강제로 되돌아 가도록 한다)의 즉각적인 반응을 얻을 수 있는 장점이 있다. 팁을 샘플 표면에 수직하는 방향으로 이동시킴에 의하여, 상기와 같은 모드는 XY 표면에 있어서 빠른 스캐닝 또는 다른 상태 탐침 샘플 움직임이 이루어지는 동안에, 마찰력을 실질적으로 최소한으로 제거하는데 있어서, 태핑 모드 AFM의 장점을 얻을 수 있다. 상기 모드를 구현함에 따라, 기생(parasitic) 결합을 최소화할 수 있으며, 이에 따라 PFM 및 태핑 모드 AFM (최소한 10의 3승) 보다 훨씬 더 감도가 우수한 힘 제어를 할 수 있는 장점이 있다. 그렇게 함으로서, AFM 기술에 있어서 가장 낮은 힘 이미징(변갈아가며 변하는 힘을 이용)이 실현되고, 직접 제어되어, AFM이 일반적인 TappingMode™ AFM 속도 (약 1Hz 대역폭)를 넘어서는 속도로 TappingMode™ AFM 보다 높은 개선된 높은 해상력 이미지를 제공할 수 있도록 한다. 추가적으로 얻어지는 장점으로는, 수직 이동의 각각의 사이클이 각각의 픽셀에서 힘 곡선 또는 복수의 힘 곡선을 얻을 수 있도록 하며, 이에 따라 높이 및 기구적인 특성 데이터를 즉시 얻을 수 있도록 하고 매핑할 수 있도록 한다. 이와 같은 방법은 각각의 그리고 모든 개별 힘 곡선을 생성 및 분석하고 그리고 태핑 모드 이미징 속도보다 높은 이미징 속도로 샘플 상에서 각각의 팁 태핑이 이루어지는 동안에, 해당하는 피크 상호 작용 힘을 측정하고 제어할 수 있도록 한다.

### 과제의 해결 수단

[0028] 본 발명의 제1 양상에 따라, SPM을 작동시키기 위한 방법은 탐침과 샘플 사이에 상대적인 움직임을 생성하는 단계와, 탐침의 움직임을 검출하는 단계를 포함한다. 상기와 같은 방법은 검출된 탐침 움직임으로부터, 기생 탐침 굴절(예를 들면, 기생 캔틸레버 움직임)의 독립적인 탐침-샘플 상호 작용을 회복한다.

[0029] 본 발명의 다른 양상에 따르면, SPM을 작동시키기 위한 방법은 샘플에 상대적인 팁의 수직 사이클 이동의 각각의 사이클 동안에, 약 10pN 이하의 최대의 척력 탐침-샘플 상호 작용력을 유지하면서, 이미지를 생성하는 단계를 포함한다. 상기와 같은 상호 작용력은 직접적으로 제어될 수 있으며, 정확하게 측정될 수 있다.

[0030] 본 발명의 또 다른 양상에 따르면, SPM을 작동시키기 위한 방법은 사용자 간섭 없이, 주변 온도, 가스성, 유체성 및 진공을 포함한 환경과는 상관없이 5나노미터 보다 우수한 이미지 해상도를 유지하면서, 5nN 이하의 피크 힘으로 최소한 한 시간 동안 이미지를 생성하는 단계를 포함한다.

[0031] 본 발명의 또 다른 양상에 따르면, SPM을 작동시키기 위한 방법은 각각의 이미징 픽셀을 위한 최소한 한 개의 힘-거리 곡선을 생성하는 단계를 포함한다. 상기의 힘-거리 곡선은 한 개 또는 그 이상의 밴테르바스 접착, 탄성, 팁-샘플 인터페이스의 접착 작용, 경도 및 점탄성에 대하여 정확히 측정을 하기 위하여 사용될 수 있다.

[0032] 본 발명의 또 다른 양상에 따르면, SPM을 작동시키기 위한 피크 힘 태핑 방법은 0.01N/m에서 1000N/m과 동일한 스프링 정수를 갖는 캔틸레버를 이용하는 단계를 포함한다(이와 같은 방법은 약 10kaP에서 100GPa까지의 범위에 걸쳐 기구적인 특성을 매핑할 수 있도록 한다). 적용 가능한 캔틸레버의 이와 같은 범위는 ContactMode AFM (0.01-1 N/m) 및 TappingMode AFM (1 N/m - 40 N/m)에 일반적으로 적용되는 캔틸레버 보다 10의 소정 승수 (several orders of magnitude) 이상으로 폭이 넓다.

[0033] 본 발명에 따른 SPM은 패턴이 형성된 웨이퍼, 주변 온도 및 유체 상태의 생물학적 샘플, 폴리머, 박형 필름 및 데이터 저장 장치 요소를 포함하는 다양한 샘플을 스캔하기 위하여 사용될 수 있다.

[0034] 본 발명의 추가적인 양상에 따르면, SPM을 작동시키기 위한 방법은 탐침의 팁을 샘플과 상호 작용시키는 단계와, 상기 상호 작용을 중지시키는 단계를 포함하며, 이에 따라 쇠퇴(decaying) 탐침 발진을 얻을 수 있다. 상기의 방법은 쇠퇴 탐침 발진의 링다운이 실질적으로 완료되고, 그리고 탐침의 움직임을 검출하기 이전에 상호 작용을 반복한다.

[0035] 본 발명의 상기와 같은 특징들 및 장점들은 다음의 상세한 설명과 첨부된 도면에 따라 더욱 명확해질 것이다. 본 발명의 상세한 설명을 표시하는 상세한 설명 및 구체적인 예시들은 예시적인 목적으로 제한없이 제공되었음이 자명하다. 본 발명의 요지를 변경하지 않는 범위 내에서, 다양한 변화 및 변형이 가능하다. 본 발명은 이와 같은 모든 변경 내용들을 포함한다.

**발명의 효과**

[0036] 본 발명에 따르면, 고속으로 그리고 낮은 팁 샘플 상호 작용 힘 및 높은 해상력으로 힘을 제어할 수 있다.

**도면의 간단한 설명**

[0037] 본 발명의 바람직한 실시예들이 다음 첨부된 도면에 도시되어 있으며, 상기 도면에서 동일한 부재는 동일한 도면 번호가 부여되었다.

도 1은 "중래 기술"이라는 라벨이 붙은 중래의 원자힘 현미경을 도시하는 블록도이다.

도 2a는 발진 AFM 모드에서 팁-샘플 분리 대 시간 관계를 도시하는 그래프이다.

도 2b는 발진 AFM 모드에서 상호 작용 힘 대 시간 관계를 도시하는 그래프이다.

도 2c는 탐침 샘플 상호 작용을 도시하며, 제2 탐침 샘플 상호 작용의 예시를 링다운하는 것을 도시하는 SPM 힘 곡선의 그래프이다.

도 3은 본 발명의 바람직한 실시예에 따른, 피드백 제어에 대한 순간 힘을 결정하는 단계를 도시하는 힘 대 시간 관계의 그래프이다.

도 4a는 시스템 내에서 기생 발진과 주기적으로 변조하는 팁 샘플 상호 작용 힘을 도시하는 탐침 굴절 대 시간 관계를 도시하는 개략도이다.

도 4b는 기생 소스들로 인한 유체역학 배경 발진을 갖는 캔틸레버 반응 대 시간 관계를 도시하는 개략도이다.

도 4c는 유체역학 배경 발진의 삭감 이후에 굴절 에러 대 시간 관계를 도시하는 그래프이다.

도 5a 내지 도 5c는 일련의 그래프로써, 그 중에서 A)는 배경 삭감 이전의 굴절 반응을 도시하며, 그리고 B)는 삭감된 배경을 도시하며, C)는 유체역학 배경 발진의 삭감 이후에 굴절 에러 대 시간의 관계를 도시하는 그래프이다.

도 6a는 바람직한 실시예에 따른 베이스라인 평균화 방법을 도시하는 힘 대 시간 관계의 개략도이다.

도 6b는 팁-샘플 분리 대 시간 관계를 도시하는 그래프이다.

도 6c는 캔틸레버 굴절 대 시간 간계를 도시하는 그래프이다.

도 7은 팁-샘플 상호 작용을 검출하기 위하여, 전체 사이클(RMS)에 대하여 소정의 힘을 평균화하기 위한 중래 기술을 도시하는 힘 대 시간 관계를 도시하는 개략도이다.

도 8a는 바람직한 실시예에 따른 게이트화(gated)된 평균 척력 제어를 도시하는 개략적인 힘 대 시간 곡선이다.

도 8b는 바람직한 실시예에 따른 게이트화된 평균 척력 제어를 가능하게 하기 위하여, 팁-샘플 상호 작용으로 인한 힘 반응과 함께 전송된 입력 동기화 신호의 도면이다.

도 9a는 바람직한 실시예에 따른 동기 평균화에 사용된 일련의 힘 곡선을 도시하는 개략도이다.

도 9b는 도 9a의 힘 곡선에 전송된 굴절과 함께 전송된 동기화 신호를 도시하는 그래프이다.

도 9c는 도 9a의 동기 평균화의 사이클 이후에, 힘 곡선 신호를 도시하는 그래프이다.

- 도 10은 일 실시예에 따른 PFT 모드에서 작동 가능한 AFM의 개략적인 블록도이다.
- 도 11은 바람직한 실시예에 따른 방법을 도시하는 흐름도이다.
- 도 12a는 시스템 세트 포인트 및 측정된 굴절을 도시하는 힘 곡선의 개략적인 그래프이다.
- 도 12b는 한 개의 변조 사이클이 완료된 이후에 힘 상에서 트리깅되는 AFM 작용을 제어하기 위한 종래 기술 방법에 따라 만들어지는 피드백 에러의 개략적인 도면이다.
- 도 12c는 본 발명의 바람직한 실시예에 따라, 도 11b와 유사한 피드백 에러의 개략도이다.
- 도 13은 굴절 배경 삭감을 도시하는 바람직한 실시예에 따른 방법을 도시하는 플로우차트이다.
- 도 14는 바람직한 실시예에 따른 록-인 증폭기를 이용한 캔틸레버 굴절 배경 삭감을 도시하는 플로우 도면이다.
- 도 15는 정상적인 결합 공정에서 굴절 배경 삭감을 도시하는 흐름도이다.
- 도 16은 재봉(sewing) 결합 공정에서 굴절 배경 삭감을 도시하는 흐름도이다.
- 도 17은 바람직한 실시예에 따른, 베이스라인 연산을 도시하는 힘 대 시간 관계의 그래프이다.
- 도 18은 즉석 상호 작용 힘을 결정하기 위하여 사용되는 알고리즘을 도시하는 힘 대 시간 관계의 그래프이다.
- 도 19는 즉석 힘 제어 이미징을 도시하는 흐름도이다.
- 도 20a 및 도 20b는 바람직한 실시예에 따른 즉석 힘 제어 이미징을 이용할 때, 힘 대 시간 및 z-위치를 도시하는 도면이다.
- 도 21a 및 도 21b는 바람직한 실시예에 따른 태핑 모드 AFM 및 즉석 힘 제어 모드를 이용하는 깊은 트랜치(trench) 측정을 도시하는 AFM 이미지를 도시하는 도면이다.
- 도 22a는 바람직한 실시예에 따라 작은 진폭 척력 모드(SARF)를 도시하는 힘 대 팁-샘플 분리의 그래프이다.
- 도 22b는 SARF 모드에 대한 힘 대 시간 관계를 도시하는 그래프이다.
- 도 23a는 바람직한 실시예에 따라 작은 진폭 인력 모드(SAAF)를 도시하는 힘 대 팁-샘플 분리의 그래프이다.
- 도 23b는 SAAF 모드용 힘 대 시간 관계를 도시하는 그래프이다.

**발명을 실시하기 위한 구체적인 내용**

- [0038] 본 발명의 바람직한 실시예는 스캐닝 속도를 저해함이 없이, 탐침(팁) 및 샘플 사이에 상호 작용 힘이 모니터링되고, 그리고 대략히 낮은 힘으로 팁-샘플 분리를 제어할 수 있는 AFM 작용의 피크 힘 태핑(PFT) 모드에 관한 것이다. 여기에 설명된 기술은 탐침 팁-샘플 힘을 낮게 유지하여 높은 해상력을 제공하고 그리고 샘플 표면의 실시간 특성 매핑을 구현할 수 있다. 바람직한 실시예는 안정되며, 그리고 높은 데이터 일체 특성(개선된 해상도)을 얻기 위한 능력을 유지하면서, 장시간의 힘 제어를 구현할 수 있다. 튜닝이 피요하지 않기 때문에, 기존의 TappingMode™ AFM과 다르게, AFM 설정은 다른 AFM 모드와 비교하여 빠르고, 쉬운 특징을 갖는다.
- [0039] PFT 모드를 구동하기 위한 주요한 개념은 도면에 도시되어 있으며, 하기에 설명하면 다음과 같다.
- [0040] 즉석 상호 작용 힘을 이용하여 AFM 제어가 이루어지기 이전에 해결되어야 할 몇가지 주요한 문제가 있다. 1) 결합에 따른 굴절 배경의 수용, 2) 베이스 라인의 결정, 3) 즉석 힘의 결정이다.
- [0041] 도 2a에 도시된 바와 같이, 샘플(예를 들면, 탐침-샘플 분리를 주기적으로 변조하기 위하여 드라이브를 이용)로부터 탐침에 접근하고 그리고 분리하는 변조 사이클은 주기 T로 표시되어 있다. 체로 포지션(수평 축)은 표면을 표시하며, 그리고 수직 축은 분리를 표시한다. 탐침-샘플 분리가 수평 체로 라인을 가로지를 때, 팁은 δT 영역(팁-샘플 접촉의 윈도우)로 표시된바와 같이, 샘플과 직접적으로 접촉하게 된다. 상기 영역에 해당하는 상호 작용 힘은 도 2b에 도시되어 있다.
- [0042] 도 2a 및 도 2b에 도시된 바와 같이,  $A_{max}$ 는 샘플로부터의 팁 끝부분(apex)의 최대 분리를 뜻하며,  $F_{a\_vdw}$ 는 반데르발스 접착력을 뜻하며,  $F_{a\_max}$ 는 모세혈관 상호 작용과 팁 및 샘플 표면들 사이의 접촉 작용으로 인한 최대 접착을 뜻한다. 척력 및 접착력 둘은 도 2b에 도시된 바와 같이 베이스라인에 상대적으로 계산된다. 본 명세서에 기준으로 제시된 힘은 일반적으로 피라미드 형상으로 구성되는 전체 팁에 작용하는 전체 힘을 뜻한다. 최고로

뾰족한 정점 부분은 척력 영역에 들어갈 수 있으며, 전체 힘은 인력으로 작용한다. 이와 같은 경우에 있어서, 피드백은 소정의 피드백용 동기화 위치 (하기에 구체적으로 설명)에서 정점 척력 상호 작용 힘을 이용하며, 심지어 상기 포인트에서 전체 힘이 인력으로 작용할지라도 동일하다. 이와 같은 작용에 따라, 제어가 탐침의 대단히 뾰족한 정점에서의 원자와 샘플의 우너자 또는 분자들 사이에서 파울리(Pauli) 및 이온 척력으로부터 발생하는 정점 척력 상호 작용에 의하여 결정되기 때문에, 가장 높은 이미징 해상도를 갖는 최소의 상호 작용 힘으로 작용할 수 있는 장점이 있다.

[0043] 캔틸레버 굴절 또는 팁 샘플 상호 작용을 구분하는 것이 매우 중요하다. 캔틸레버 굴절이 팁-샘플 상호 작용 힘으로 측정하기 위하여 사용되지만, 모든 굴절이 팁-샘플 상호 작용 힘을 표시하는 것이 아니다. 즉, 기생 힘은 캔틸레버 굴절에 작용한다. 예를 들면, 도 2c에 도시된 바와 같이, 캔틸레버 굴절은 시간의 함수로 도시되며, 수치는 실제 굴절 데이터를 표시한다. 포인트 "D" 이후의 발진은 시간 흐름에 따라 쇠퇴하는 캔틸레버 자유 공진 때문이다. 이와 같은 공진 굴절은 팁 표면 상호 작용에 의하여 발생하지 않으며, 기생 굴절에 의하여 발생한다 (일반적으로, 기생 캔틸레버 또는 탐침 움직임에 해당한다). 포인트 E는 굴절의 최대 포인트에 해당하며, 상기 포인트에서 팁은 샘플과 상호 작용하지 않는다. 데이터의 "평탄" 부분은 굴절의 낮은 속도의 변화를 가질 수 있으며, 팁은 샘플과 상호 작용하지 않으며, 일반적으로 기생 힘의 기구적인 결합에 따라 발생한다. 그러한 결합은 변조 액추에이터 그 자체에 원인이 있으며, 또는 공기 또는 유체로부터의 댐핑 힘에 의한 캔틸레버 반응에 따른 것이다. 레이저 간섭에 따라 발생할 수도 있다. 이러한 기생 효과는 그 이후 도면에도 추가로 도시되어 있다.

[0044] 알려진 힘 제어 시스템에 있어서, 제어는 소정의 주기에서 발생하는 최대 힘에 따라 이루어진다. 따라서, 척력은 기생 힘과 구분되는 그리고 피드백 루프에 의하여 일반적으로 사용되는 실제 팁-샘플 상호 작용에 있어 이루어지는 기생 굴절의 원인 보다 더 높아야 한다. 이러한 힘의 구분 조건은 팁 및/또는 샘플에 손상을 줄 수 있는 상대적으로 높은 이미징 힘을 필요로 한다.

[0045] 바람직한 실시예에 있어서, RMS 또는 일정한 상수 굴절은 도 3에 따라 결정되는 즉석 상호 작용 힘  $F_{r,i}$ 으로 교체되며, 제어기 세트 포인트는,

[0046] 
$$\delta Fr = F_{r,i} - F_{baseline} \quad \text{방정식 (1)}$$

[0047]  $F_{baseline}$ 는 탐침이 샘플과 접촉하지 않을 때 상호 작용 힘에 해당한다. 그 값은 제로이다. AFM에 있어서, 힘은 일반적으로 캔틸레버에 의하여 표시된다. 이와 같은 경우에,  $F_{baseline}$ 는 팁이 표면과 접촉하지 않을 때, 캔틸레버 굴절에 해당한다.  $F_{r,i}$ 는 팁이 표면과 인접하여 접촉할 때의 상호 작용 힘에 해당한다. 동기화 알고리즘은 각 구동 주기의 개시 시간을 정렬할 때 사용되며, 이에 따라 영역  $\delta T$ (도 2a 및 도 2b)는 척력과 그의 최대 값  $F_{r,max}$ 는과 일치한다.  $F_{r,max}$ 의 발생에 대한 주기의 시작으로부터 시간은 동기화 시간에 해당하며, 이와 같은 동기화 시간은 정교하게 결정되며, 제어된다(하기에 설명). 동기화 시간 거리(동기 거리)는 굴절 반응 및 변조 구도 신호 사이의 페이즈 지연을 측정하여 결정될 수 있다. 일단 동기 거리가 결정되면 (탐침이 xy 방향에서 고정되면), 동일한 동기 거리가 모든 xy 래스터(raster) 스테핑 위치에서 사용된다. 이미징이 이루어진 동안에, 피드백이 작동하여,  $F_{r,i}$ 의 값이 동기 거리에 의하여 결정되는 동안에  $F_{r,i}$  상수를 유지한다. 동기 거리(Sync Distance)는 변조 주기의 시작으로부터 상호 작용의 순간까지의 거리로 일반화될 수 있다.

[0048] 동기화 거리 또는 동기 거리는 정밀하게 제어될 수 있다. 예를 들면, 만약 팁 발진 주기 T가 100  $\mu s$ 라면, 동기화 거리가 48  $\mu s$ 이고, 48번째  $\mu s$ 에서 발생하는 상호 작용 힘은 피드백 제어 매개변수로 사용될 것이다. 피드백 루프는 주기의 개시로부터 48번째  $\mu s$ 에서 즉석 상호 작용 힘을  $F_{r,i}$ ( $i=48 \mu s$ )에서 유지하도록 할 것이다. 보다 일반적인 어플리케이션에서, 상호 작용 영역  $\delta T$  내의 상호 작용 힘에서 소정의 포인트가 피드백용으로 사용될 수 있다.  $\delta T$ 는  $F_{a,vdw}$  영역(반데르 발스 인력 영역) 및  $F_{a,max}$ (모세혈관 접촉 영역)을 포함하기 위하여, 도 2b에서와 같이 표시된 영역을 넘어서 연장형성된다. 모세혈관 접촉 영역은 기능화된 탐침 및 샘플 상의 구체적인 본드(bonds)에 의하여 이루어진 본딩에 의하여 접촉성 상호 작용이 될 수 있다.

[0049] 베이스라인의 정확한 측정을 이루기 위하여, 복수개의 굴절 데이터 포인트들이, 팁이 샘플과 상호작용하지 않을 때 그리고 평균화된 베이스라인 레벨을 생성하기 위해 사용될 때 수집된다. 비-상호 작용 영역(가장 큰 분리/가장 먼 거리)는, 이러한 영역이 피크 힘 위치 이후에 변조 주기의 반 주기 근처에 위치하기 때문에, 동기 거리에 의하여 결정될 수 있다. 동기 거리는 피드백 힘 작동 포인트를 결정하며, 실제적인 힘은  $\delta Fr$ 에 의하여 결정된

다. 상기  $\delta Fr$ 은 음수 또는 양수가 될 수 있다.

- [0050] 굴절 상에서의 드리프트(예를 들면, 열)에 의한 역효과로 인하여, 해당하는 힘  $F_{r,i}$ 는 시간이 경과함에 따라 변한다. 상대적인 힘  $\delta Fr$ (베이스라이 결정에 상대적)은 바람직하게, 그 힘에 의하여 팁-표면 상호 작용의 더 정확한 굴절이 가능하기 때문에,  $F_{r,i}$  대신에 피드백 제어용으로 사용된다. 이와 같은 상대 값은 캔틸레버 굴절에서의 시스템 드리프트에 의하여 역효과를 제거하게 된다.
- [0051]  $\delta Fr$ 은 피드백 루프에 의한 제어 가능한 힘을 뜻하며, 이에 따라  $\delta Fr$ 은 팁이 샘플을 스캔할때 다양한 위치에서 시간이 경과함에 따라 일정하게 남게 된다.
- [0052] 도 4a 내지 도 4c에 도시한 바와 같이, 샘플 표면과 상호 작용할 때, 캔틸레버 반응은 팁 표면 상호 작용 힘 및 배겨 결합의 혼합으로 나타난다. 상기와 같은 반응은 도 4에 "오리지널"로 대칭적으로 도시된다. 실제적인 팁-샘플 상호 작용 힘은  $F_{r,i}$  부분에서 나타나며(도 4c), 상기의 부분은 기생 캔틸레버 또는 탐침 움직임의 배경 내에 묻히게 된다. 오리지널 데이터로부터 배경을 삭감함에 따라 (예를 들면, 상호 작용 힘 및 기생 힘 둘에 따라 포함되는 탐침 움직임), 상호 작용 힘의 크기가 얻어진다. 도면 4B에 도시된 배경은 AFM 시스템으로부터의 공진의 기구적인 결합 및/또는 공기 및 유체와 같은 환경적인 매개물에 대한 캔틸레버 반응에 의하여 만들어 질 수 있다. 배경은 캔틸레버가 샘플에 상대적으로 이동하기 때문에, 레이저 간섭에 의하여 도입될 수 있다. 배경의 일반적인 특성은 주기적인 변화를 디스플레이하는 캔틸레버 구절이 팁 궤적과 유사하다는 것이며, 이와 같은 특성은 팁이 샘플과 상호 작용하지 않을 때도 이루어진다. 배경의 실험적인 데이터의 성공적인 삭감이 도5A 내지 5C에 도시되어 있다.
- [0053] 보다 구체적으로는, 도5A는 오리지널 탐침 굴절 대 시간의 관계를 도시하는 개략도이다. 탐침의 굴절은 팁-샘플 상호 작용을 제어하기 위하여 사용될 수 있는 기생 소스들에 의하여 많이 영향을 받는다. 이러한 주기성 기생 굴절은 보다 일반적인 용어로 "유체역학 배경" 또는 기생 힘으로 정의할 수 있는 저주파 신호로 표현될 수 있다. 상기와 같은 것은 이러한 기생 힘(유체역학 힘, 드래그 힘 및 공기, 축 이탈 움직임, 레이저 영향 및 탐침이 샘플과 상호 작용하지 않을 때 발생하는 주기성 움직임을 포함)에 의한 탐침 굴절에 의하여 크게 발생한다. 바람직한 실시예에 있어서, 제어 시도로 사용되는 실제적인 팁-샘플 상호 작용 힘은 기생 배경 신호(도5B)에 겹쳐서 일어나며, 이에 따라 실제적인 팁-샘플 상호 작용 힘을 검출하는데 있어서 한 방법이 될 수 있다. 또 다른 방법으로는, 최소의 제어 가능한 힘은 탐침 굴절에 대한 배경의 영향에 의하여 결정된다(도5A에, 최소의 제어 가능한 힘<sub>OLD</sub>-약 1000 마이크로 뉴턴 미만에서 10피코-뉴턴 이하의 범위). 상기의 경우에서와 같이, 굴절에 대한 원인이 되는 기생 힘과 팁-샘플 상호 작용에 의한 굴절에 대한 원인 둘에 대하여 상대적으로 낮은 진폭을 갖는 노이즈 신호 "N"이 존재한다.
- [0054] 도5B 및 5C에 도시된 바와 같이, 본 발명에 의한 바람직한 실시예에 따른 주요한 한 개념은 굴절 신호로부터의 기생 배경 신호(도5B)의 삭감이며, 이에 따라 최소의 제어 가능한 힘을 낮출 수 있다. 배경 신호는 팁-샘플 분리를 제어된 거리로 충분히 증가시킴으로서 결정될 수 있으며, 이에 따라 탐침은 샘플과 상호 작용하지 않으며, 예를 들면 기생 힘 만이 탐침의 검출된 굴절의 원인이 될 수 있다. 제어된 거리는 보다 적은 값이 될 수 있지만, 100nm 보다 일반적으로 크며, 긴 거리의 상호 작용 힘이 탐침 굴절의 원인으로 작용할 수 없는 이상적인 거리가 된다. 도5C에 도시된 바와 같이, 기생 배경을 삭감한 이후에, 굴절에 대한 팁-샘플 상호 작용 힘 원인에 따라, 팁-샘플 상호 작용과 관련된 뚜렷한 피크를 갖는 굴절 신호를 만들어 낸다. 비-주기성 노이즈는 항상 존재하게 되며, 이러한 경우에 그러한 노이즈는 도5C에 도시된 바와 같은 최소의 제어 가능한 힘을 결정하게 된다(최소 제어 가능한 힘<sub>NEW</sub>). 0.01N/m의 스프링 정수를 갖는 대단히 연질의 캔틸레버 및 100  $\mu$ m의 캔틸레버 길이에 대하여, 힘은 약 1pN이다.
- [0055] 기생 배경 삭감을 수행할 때 이용될 수 있는 최소의 제어 가능한 힘은 많이 줄어들어(예를 들면, 10의 3승), 소정의 실시예에서 팁-샘플을 분리할 수 있어, 탐침-샘플 상호 작용 힘은 pN 범위로 감소된다. 하드웨어에서 이와 같은 삭감이 이루어지는 방법은 도 10에 도시되어 있다.
- [0056] 그러한 작은 힘을 검출하고, 그리고 본 발명에 따라 작동하는 SPM이 "즉석 힘 제어"로 설명된 방법을 이용하여 샘플을 이미지하는 SPM 피드백 루프 내에서 제어 매개변수로서 힘을 사용하는 것들은 기본적인 내용들이다. 실시간 힘 검출을 이용한 즉석 힘 제어는 개선된 제어를 가능하게 하며, 이에 따라 이미지 해상도를 개선하며, 샘플 손상을 최소화한다. 본 설명에 있어서, 실시간 또는 즉석 힘 검출은 도 3에 도시된 가변적인 힘의 각각의 포인트가 자람직한 실시예에 따라 검출되며, 그리고 SPM 작용을 제어하기 위하여 즉석에서 사용될 수 있다. 즉, 탐침 및 샘플 사이(또는 상기 두 개, 즉 힘 곡선 변조에서 분리 변조의 각 사이클 동안)에 상호 작용의 각 사이

클 동안에 탐침-샘플 상호 작용으로 인하여 탐침에 작용하는 가변되는 힘이 검출되며, AFM에 의하여 사용되어, 실시간으로 샘플을 이미징할 수 있다. 이와 같은 즉석 힘 제어가 사용되어, 탐침-샘플 분리의 변조에 있어 한 사이클이 될 수 있는 기간 내에 상호 작용 포인트에서 AFM 제어를 하기 위하여 사용될 수 있다.

[0057] 제어가 예정된 변조 사이클의 완료 이전에 제공되기 때문에(다음 접근 이전에), 피드백 지연이 많이 많이 감소한다. 상기의 작용은 침부된 도 12a 내지 도 12c의 설명시 상세히 설명될 것이다.

[0058] 피크 힘 태핑 제어에 있어 또 다른 장점은 캔틸레버 공진 주파수 근처에서 작용될 필요가 없는 점이다. 이와 같은 작용은 일시적인 공진 반응으로 인한 캔틸레버 지연을 제거하며, 즉석 상호 작용 제어를 가능하게 한다.

[0059] 도 6에 도시된 바와 같이, 바람직한 실시예에서는, 제로 힘 포인트를 빨리 추출하기 위하여, 힘의 베이스라인 평균 구하기를 실시하여 AFM을 고속에서 작동하도록 하고 그리고 시스템에 의하여 탐침이 짧은 시간 지연 동안 샘플과 상호 작용하도록 한다. 도 2c에 도시된 이전의 기술과 비교하여, 본 AFM의 변조 주파수는 이미징 시스템을 안정화시키기 위하여, 시스템이 탐침 "링다운"이 완성될때까지(탐침이 샘플 표면으로부터 떨어져 점프한 이후에, 탐침 발진이 약 1/e로 쇠퇴) 탐침-샘플 상호 작용을 재설정하기 위하여 대기해야 하는 조건에 의하여 한정되지 않는다. 링다운을 위하여 필요한 시간은 Q/f에 비례적인 캔틸레버 역학에 의하여 결정되지 않는다. 상기 식에서, Q는 캔틸레버의 품질 지수이며, f는 캔틸레버 공진 주파수이며, 일반적으로는 안정화를 위하여 일반적으로 사용되는 캔틸레버에 있어서 수십 밀리초에 해당한다. 바람직한 실시예에 있어서, 도 6에 도시된 바와 같이, 링다운이 이루어지는 즉시, 캔틸레버 공진 주파수의 몇 사이클이 평균화되어, 실시간으로 제로 힘 포인트를 결정하게 되며(즉, 대기 상태(at-rest)의 베이스라인 위치), 그리고 시스템에 의하여, 탐침은 도 2c에 도시된 시스템보다 훨씬 빠른 시간에 샘플과 상호 작용을 하게 된다. 실제에 있어서, 링다운이 이루어진 즉시, 캔틸레버 공진 주파수의 한 사이클의 평균을 실시하고, 제로 포인트(베이스라인)의 신뢰할만한 추정이 실현된다. 결과적으로, 변조 주파수는 시스템 안정을 방해하지 않고 현저하게 증가될 수 있다. 빠른 작동에 따른 장점에 의하여, 시스템 내에서 노이즈 영향을 줄일 수 있다.

[0060] 대단히 민감한 힘 검출을 이용한 측정을 위해서는, 대단히 부드러운 캔틸레버(스프링 정수 0.01N/m에서 0.3N/m)가 일반적으로 사용된다. 이러한 레버들은 보다 낮은 공진 주파수 및 대단히 긴 링다운 시간을 갖는다. 보다 중요하게는, 도 6c에 도시된 바와 같이 접촉 유도 발진(접촉으로부터 스냅된)이 훨씬 강하다. 도 6c에 도시된 바와 같이, 부드러운 캔틸레버의 굴절 반응은 시간의 함수로 표현된다. 톱 케적은 위치 기준(도 6b)으로 표현된다(도 6b). 이에 도시된 바와 같이, 캔틸레버의 발진은 상호 작용 힘보다 훨씬 초과하며, 기본적으로 제어를 불가능하게 만든다. 본 발명에 앞서, 사용자들은 발진이 사라지기를 긴 시간 동안 기다렸으며, 이에 따라  $F_{r,i}$ 는 최대값이 되어, 피드백을 지속적으로 제어 가능하게 하였다. 캔틸레버가 더 민감해질 수록, 링다운을 기다리는 시간은 엄청난 시간 소모가 된다. 본 발명의 바람직한 실시예들은 동기 정렬을 통하여 상호 작용 영역 및 비-상호 작용 영역을 탐침 및 샘플 사이의 가장 근접한 위치로 분리하여, 베이스라인을 결정한다. "상호 작용 영역"에 해당하는 영역은 동기 마커 및 각 사이클의 시작점에서 기준 트리거 신호에 의하여 잠금된다. 본 영역 내에서 굴절의 소정 포인트는 꾸준한 상태 상호 작용 제어를 위하여 피드백 매개변수로 사용될 수 있다. 상호 작용 영역 외부의 모든 굴절 데이터는 소정의 정수로 평균화되며, 그리고 도 3의  $\Delta Fr$ 을 계산하기 위한 베이스라인으로서 사용될 수 있다. 베이스라인 검출과 동기 제어의 조합에 의하여, 상대 힘  $\delta F$ 는 즉시에 정확하게 결정 및 제어된다. 도 6c에 도시된 바와 같이, 이와 같은 제어에 의하여,  $F_{r,i}$ 가 기생 굴절 보다 낮게 된다.

[0061] 꾸준한 상태는 일정한 최대 힘 또는 일정한 최소 힘 또는 탐침/샘플 상대 움직임의 각 사이클에서 상호 작용 힘 곡선 형상의 특성 조합을 말한다.

[0062] 본 발명 기술의 또 다른 주요 장점은 높은 진폭 발진 데이터를 갖는 베이스라인을 결정하기 위한 능력을 말한다. 캔틸레버의 공진 주파수가 공지이기 때문에, 다른 실시예에 있어서, 평균값은 캔틸레버 공진 주파수의 사이클들의 정수배를 분석하여 비-상호작용 영역 내에서 결정된다. 정수 사이클 평균화에 의하여 발진 굴절 데이터를 효과적으로 제거할 수 있으며, 일정한 베이스라인을 얻을 수 있다.

[0063] 캔틸레버 공진 주파수는 주파수 스위프 및 열 튠과 같은 공지의 기술을 이용하여 결정될 수 있다.

[0064] 도 7 내지 도 8b에 도시된 바와 같이, 바람직한 실시예들은 "게이트화된 평균 척력 제어"와 같은 것을 이용하는 것을 특징으로 한다. 도 7은 AFM 작용이 이루어지고 난 이후, 일련의 상호 작용 주기들을 포함한 탐침 굴절을 도시하고 있다. 제어 매개변수로서 힘을 이용하는 기존의 제어 기술들은 톱-샘플 상호 작용의 전체 사이클에 걸쳐 전체 힘을 평균화하게 되며, 이에 따라 힘 세트포인트와 비교하기 위한 RMS 값을 얻게 된다. 해당 기술에 공지된 바와 같이, 힘 곡선에 의하여 표시된 힘들은 복잡하다. 척력 및 인력 둘은 상기에 기술한 바와 같이, 한

사이클 동안 탐침 팁 상에서 작동한다. 예를 들어, 척력을 취소하는 경향이 있는 인력 부분(도 2c에서 C-D)을 포함하여, 힘 감도 및 이미징 해상도는 가장 종종 영향을 받는다.

[0065] 도 8a 및 도 8b에는 게이트화된 평균 척력 제어가 도시되어 있다. 본 실시예에 있어서, 도 8b에 도시된 바와 같이, 시스템 동기화 신호는 힘 곡선(굴절 곡선의 음영 부분 "A"에 해당)의 인력 부분을 제거하여, 힘 곡선의 척력 부분(도 2c에서 B-C)를 "게이트화"하기 위하여 사용된다. 힘 곡선의 척력 부분에 따라 팁-샘플 분리를 제어함에 따라, 힘 감도 및 이미징 해상도는 곡선(즉, 인력 상호 작용 힘은 긴 범위의 상호 작용 힘이며, 그에 따라 훨씬 넓은 영역에 걸쳐 상호작용을 센스하며, 이에 따라 낮은 해상도를 얻는다)의 인력 부분의 역효과를 감소시킴에 따라 증가될 수 있다. 게이트화된 평균화를 수행할 때, 게이트의 작용에 따라, 노이즈를 제거하게 된다. 동기화 신호가 시간화되기 때문에, 척력 영역만이 사용된다. 상기와 같은 작용은 도 3에 도시되고 그와 관련하여 설명한 소정의 동기화 위치에서 게이트를 이용하여 구현될 수 있다.

[0066] 상기의 작용을 더 설명하면, 도 9a 및 도 9b에 도시된 바와 같이, 동기화 평균화가 사용되어, 신호-대-노이즈 비율을 더 개선할 수 있으며, 궁극적으로는 제로 힘 포인트 인접한 곳에서 제어를 수행할 수 있다는 것이다. 다른 팁-샘플 굴절 도면들과 유사하게, 도 9a는 팁이 샘플과 상호 작용함에 따라, 탐침의 복수개의 굴절 사이클을 도시한다. 이전에 설명한바와 같이, 이와 같은 유형의 SPM/AFM 측정을 만들 때, 노이즈 신호는 항상 존재하게 된다. 도 9b에 도시된 바와 같이, 굴절 신호와 해당하는 동기화 신호와 조합시켜, 굴절의 주기 평균화가 이루어진다. 그 결과, 노이즈의 효과는 다음 식에 따라 현저히 감소하였다.

[0067] 
$$\frac{D1+D2+D3+D4+\dots+DN}{N}$$
 방정식 (2)

[0068] N

[0069] 상기의 공식에서,  $D_i$ 는  $i$ -번째 사이클의 데이터를 표시한다. 신호 대 노이즈 비율을 갖는 평균화된 신호는  $\sqrt{N}$ 의 인수에 의하여 개선되며, 이에 따라 최소의 제어 가능한 힘(좁은 록-인 대역폭을 사용 가능)을 감소시킨다(도 9c에 도시).

[0070] 도 10에 도시된 바와 같이, PFT 모드에서 작동 가능한 AFM(100)은 탐침 홀더(108) 내에 설치되고 그리고 팁(106)을 지지하는 캔틸레버(104)를 포함하는 탐침(102)을 구비하고 있다. 이와 같은 경우에, 팁-샘플 작용은 액추에이터(112)(예를 들면, 탐침 홀더(108)에 결합된 XYZ 압전 튜브)에 의하여 변조된다. 그러나, 본 발명의 바람직한 실시예들은 샘플을 Z 방향으로 이동시켜 팁-샘플 분리를 변조하는 AFM 도구들에 적용 가능하는 것이 명하다.

[0071] 이와 같은 작용 동안에, 탐침 굴절은 탐침의 뒤에서 떨어져 그리고 사면체 포터디텍터와 같은 검출기(114)의 방향으로 광선 빔 "L"을 반사시켜 측정된다. 굴절 신호는 아날로그 디지털 변환기(103)로 전송된다. 디지털화된 신호는 높은 속도에서 AFM을 작동시키는 동안에, 팁-샘플 힘을 낮게 유지시키기 위하여 사용될 수 있다.

[0072] 도 10의 실시예에 있어서, 팁-샘플 상호 작용 없이 탐침 굴절은 배경 생성기(105)에 전송된다. 배경 생성기는 팁-샘플이 상호작용하지 않을 때, 배경 신호에 해당하는 주기성 파형을 만든다. 이와 같은 파형은 그의 진폭과 페이즈가 록-인 증폭기에 의하여 결정되는 그리고 그의 입력이 배경 신호에 해당하는 DDS(Direct Digital Synthesis function generator)에 의하여 생성될 수 있다. 이와 같은 파형은 동기화 신호의 도움을 받아, 배경의 복수개의 사이클들을 동기적으로 평균화하여 생성될 수 있다. 비교기 회로(120)는 기생 배경(도 4c 및 도 5c)과 독립적으로 팁-샘플 상호 작용 힘의 대표 신호를 생성하기 위하여, 배경 신호를 삭감하여 전체 굴절 신호를 처리하게 된다. (아날로그 또는 디지털 회로가 설명될 수 있을 지라도, 작용들은 기존의 아날로그 또는 디지털 회로에서 실행될 수 있다. 하지만, 바람직한 실시예는 본 발명을 구현하기 위하여, FPGA를 이용한다.) 이와 같은 신호는 레버의 처리된 링다운 발진을 다수의 선택된 사이클로 한정하기 위하여, 삭감 이후의 굴절 에러를 처리하는 디지털 필터(122)를 통하여 공급된다. 상기 필터링된 신호는 동기 평균화 회로(123)로 전송되며, 이에 따라 신호 대 노이즈 비율을 더 증가시킬 수 있다. 동기화의 도움을 받아 비-상호 작용 영역에서 데이터를 평균화하여, 베이스라인은 베이스라인 평균화 회로(124)로부터 결정된다. 비교기 회로(125)는 캔틸레버 DC 드리프트를 갖지 않는 팁-샘플 상호 작용 힘의 대표 신호를 생성하기 위하여, 베이스라인 신호를 삭감하여 전체 굴절 신호를 처리할 수 있다. 이와 같은 신호는 힘 검출기(126)으로 추가로 더 전송된다.

[0073] 동기 거리 계산기(135)는 굴절, 및 시간 연장의 형태로 구동 및 동기화 제어를 제공하는 Z-변조 DDS(블록 127) 사이의 페이즈 이동을 결정한다. 피크 힘 또는 척력 게이트 위치 생성기(129)는 동기화 마커 및 동기화 시간 거리의 도움에 따라, 힘 검출기(126)용 타이밍 신호를 생성한다. 힘 검출기(126)는 도 8a에 도시된 게이트화된 영

역 내에서 척력 피크 힘 또는 평균화된 척력을 확인하는 방법으로 합산 회로(125)의 출력을 분석하게 된다.

[0074] 이와 같은 방법으로 힘 검출기(126)을 작동시켜, 힘 제어가 힘 곡선(예를 들면, 척력 영역)의 선택된 한 부분에서 트리거되며, 보다 높은 감도가 샘플 및 팁 사이에서 인력의 효과를 감소시켜 얻을 수 있다. 신호 대 노이즈 비율은 검출기(126)으로부터 노이즈를 제외시켜 개선될 수 있다. 게이트화된 척력은 소정의 세트포인트(블록 128)에 비교될 수 있으며, 에러 신호가 생성되어, 제어 블록(예를 들면, PI 제어기 130)으로 전송된다. 제어 신호는 아날로그(변환기 132)로 변환되어, 합산 회로(134)로 전송되어, 동기화 신호가 변환기(136)와 함께 아날로그로 변환된 이후에 블록(127)로부터의 동기화 신호와 조합된다. 합산회(134)의 출력은 Z-위치(이경우에, 탐침)을 활성화시키기 위하여 Z-피에조(112)로 인가되며, 이에 따라 팁과 샘플 사이에 꾸준한 상태 상호 작용을 유지하게 된다. 작동의 해당 방법은 도 13의 설명시에 아래에 상세 기술한다.

[0075] 도 11에는 PFT 모드에 따른 AFM을 작동시키기 위한 방법(300)이 도시되어 있다. 셋업 및 초기화 블록(302)(튜닝이 필요없음) 이후에, 탐침은 발진 상태로 구동되며, 샘플과 결합된다. 바람직하게는, 블록(304)에서, 탐침 및 샘플 사이의 상대적인 XY 움직임은 시작된다(스캐닝).

[0076] 탐침의 움직임이 검출되고, 특히 탐침 굴절이 검출되어, 추가 공정을 위하여 변환기에 전송된다. 블록(306)에서, 상기에 설명한 방법에 따라, 탐침-샘플 상호 작용이 회복되어 시작되고, 바람직하게는 록-인 증폭 더 바람직하게는 굴절의 동기 평균화를 진행하여 유체역학 배경 삭감을 실시하게 된다. 블록(308)(공정 진행을 위한 다수의 링다운 사이클을 선택)에서 출력을 필터링한 이후에, 상기 방법에 따라, 바람직하게는 블록(301) 내에서 힘 곡선의 척력 영역을 이용하여 힘(피크 힘 검출/게이트화된 평균화)을 검출하게 된다. 블록(312)에서, 힘은 세트포인트 힘과 비교되고, 그리고 사용자 상호 작용 힘에 따라 설정된다. Z-액추에이터는 블록(316)에서 제어 신호에 반응을 하게되고, 팁-샘플 분리를 조정하며, 세트 포인트 힘을 유지하게 된다. 제어 신호들은 샘플의 이미지를 생성하기 위하여 사용된다.

[0077] 도 12a 내지 도 12c는 즉석 힘 피드백을 제공하기 위하여, 바람직한 실시예의 기능을 도시하고 있다. 도 12a에는, 복수개의 개략적인 힘 대 시간 곡선이 각기 다른 피크 척력과 함께 도시되어 있다. 상호 작용 Q 및 S는 세트포인트에 의하여 정의된 임계값을 초과하며, 상호 작용 R은 세트포인트 아래의 피크 척력을 도시한다. 피드백 에러가 종래 기술에 의한 힘 피드백 시스템을 설명하기 위하여, 도 12b에 도시되어 있다. 보다 구체적으로는, 척력이 일단 세트포인트를 초과하면, 지연 "d"가 제1 상호작용을 위하여 X 위치에서 피크 척력을 매핑하기 이전에 나타난다. 이와 같은 방법은 척력이 세트포인트를 넘어서기 시작하는 포인트 이후까지는, 피드백 에러가 형성되지 않는 라벨 S로 표시된 상호 작용과 유사하다.

[0078] 이와는 반대로, 도 12c에 도시된 바와 같이, 세트포인트보다 큰 소정 힘에 대한 반응이 즉석에서 검출되어, 상기 반응에 기생 배경 삭감, 베이스라인 평균화 및 게이트화 평균, 척력 제어, 바람직하게는 동기 평균화 등을 포함하여, 상기에 설명된 PFT 모드의 특징들로 인한 보다 줄어든 피드백 지연이 주어진다. 상기의 세트포인트의 이상의 힘을 빨리 확인할 수 있음에 따라, 팁-샘플 상호작용에 해당하는 힘은 최소화될 수 있으며, 이에 따라 높은 속도와 높은 해상도로 AFM 작용의 경우 현저한 장점을 제공할 수 있다. 이와 같은 경우는, 샘플 표면 변화가 응답 시간 및/또는 해상도를 한정할 수 있는 거친 샘플에 필요하다.

[0080] 알고리즘

[0081] 배경의 정확한 삭감을 구현하기 위하여, 두 개의 스킵이 개발되었고, 이들은 도 13 및 도 14에 각각 도시되어 있다.

[0082] 도 13에는 캔틸레버 굴절 배경(굴절에 대한 기생 원인)의 삭감을 위한 알고리즘(400)이 도시되어 있다. 블록(402 및 404)은 팁이 샘플로부터 충분히 떨어져, 셋업에 의한 사용자 선택에 따른 표면 상에 척력 임펄스 상호 작용이 없음을 도시하고 있다. 블록(406)은 복수개의 하위 단계들을 포함하고 있다. AFM 시스템은 복수의 사이클을 위하여 캔틸레버 굴절 데이터를 샘플링하고, 그리고 데이터들을 복수개의 세그먼트로 디지털화하며, 여기서 각각의 세그먼트는 주기 T를 각각 갖는다. AFM 방법은 데이터의 각각의 세그먼트를 주기 T의 개시 상태로 정렬하며, 그리고 상기 데이터를 평균화한다. 방법(400)은 주기 T에 대한 배경으로서 평균화된 세그먼트 데이터를 이용한다. 블록(408)은 작동되어, 블록(406)에서 얻어진 배경을, 예를 들면 FPGA 프로세서를 이용하여 각각의 주기 T 내에서 측정된 데이터로부터 삭감하게 된다. 블록(408)은 피드백용 배경 수정 데이터를 이용한다.

[0083] 도 14는 배경 굴절을 삭감하기 위한 또 다른 알고리즘(500)을 도시하고 있다. 리프트 높이를 계산하고 그리고 Z 피드백을 갖는 팁을 들어 올리기 위한 블록(502 및 504)은 팁이 샘플과 상호작용하고 있지 않다는 것을 확인하

기 위하여 사용된다. 블록(506)은 캔틸레버 탐침을 이동시키는 구동 신호에 따라 록-인 증폭기를 그 기준으로서 이용하며, 캔틸레버 굴절 데이터는 록-인 입력으로서 이용한다. 블록(508)에서, 록-인으로부터 얻어지는 진폭 및 페이즈 데이터는 정현 곡선 신호를 발생하기 위하여 사용되며, 이와 같은 신호는 조정되어, 굴절이 일정하게 될 때까지 굴절데이터를 삭감하기 위하여 사용된다(노이즈 한계 내에서). 실시간 삭감은 블록(510) 내에서 이루어진다. 일단, 충분한 삭감이 이루어지면(팁이 표면과 상호작용하지 않을때 일정한 굴절을 이용하여 결정되면), AFM은 블록(512)에서 피드백을 위한 배경 수정 데이터를 이용할 수 있게 된다.

[0084] 도 13 및 도 14에 따라 계산된 배경은 탐침이 샘플 표면에 접근할때, 실질적으로 변화를 한다. 이와 같은 변화는 샘플 표면 거리에 대한 탐침의 기능으로서, 유체역학적인 힘에 의하여 이루어진다. 그리고 상기와 같은 변화는 그것이 실제로 샘플과 상호 작용하기 이전에, 샘플에 대한 탐침의 근접도를 표시하기 위한 표시기로 기능을 할 수 있다. 이와 같은 방법에 따라, 사전에 정의된 배경값이 얻어질때까지, 모터를 이용한 결합이 빠른 속도로 진행될 수 있으며, 그리고 보다 늦은 결합 단계들이 실시될 수 있다.

[0085] 배경 삭감은 도 15 및 도 16에 도시된 바와 같이, 샘플 표면을 이용하여, 탐침의 결합 과정 동안에 바람직하게 실시될 수 있다.

[0086] 두 개의 결합 방법 사이의 차이점은, 도 15에서의 "정상적인" 결합(600)은 샘플 표면을 검출하기 위하여, 탐침을 샘플의 방향으로 구동하기 위하여, 모터 스텝을 이용하여 구현된다는 점이다. 그러나, 도 16은 방법(700)에 있어서, 샘플 표면을 찾을 때, 각각의 스텝 모터에서 Z-피에조를 이용하여 탐침을 이동시키는, 이른바 "재봉" 결합을 도시하고 있다. 도 15에 도시된 바와 같이, 블록(602)의 방법(600)에서는, 모터를 이용하여 예를들면, 0.1nm에서 약 3미크론까지의 고정된 단계에 따라 팁-샘플 분리를 감소시킬 수 있다. 피드백 제어를 온 상태로(본 기술에 따른 힘 검출)하고, 피드백 루프는 액추에이터를 제어하여, 팁을 이동시키도록 하며, 이와 같은 경우 블록(604)의 샘플의 방향으로 이동시킨다. 블록(606)에서, 알고리즘은, 표면이 검출되었는지에 대한 여부를 결정한다(즉, 임계 세트포인트 힘이 도달되었는지를 검출한다). 그러하지 않으면, 도5와 관련하여 상기에 설명한 배경 삭감 작동이 블록(602)에서 모터를 더 스텝핑하기 이전에 실시된다. 만약 그러하다면, 피드백이 분리되고, 리프트 높이는 피크 힘과 최대 음수 접착 힘 위치를 계산하고, 그에 추가하여 소정의 마진(예를 들면, 10nm)을 계산하여 얻을 수 있다. 팁은 블록(601) 내에서 상승될 수 있다(예를 들면, 충돌의 위험을 최소화하기 위하여). 블록(612)에서, 배경 삭감 작동이 실시되며, 본 발명의 기술에 따른 피드백 제어가 블록(614)에서 다시 시작된다.

[0087] 도 16의 블록(708, 712, 714 및 716)이 도 15의 알고리즘(600)의 블록(606, 610, 612 및 614)와 직접 해당한다. 그러나, 표면을 검출하기 이전에, 종래에 알려진 것과 같은 재봉 결합은 블록(704)에서 모터를 스텝 다운시키기 이전에 블록(702)에서 팁을 리프팅시키기 위하여 사용된다. 이와 같은 경우에, 리프팅은 모터 스텝의 1.5배로 이루어진다. 리프팅의 정도는 샘플의 종류에 따라 사용자의 선택에 따라 이루어진다. 그 이후에, 피드백이 블록(706) 내에서 턴온되어, 본 발명의 기술에 따라 힘을 검출하게 된다. 만약 표면이 검출되지 않으면, 알고리즘(700)은 블록(702)에서 또 다른 리프팅을 실시하기 이전에 블록(710)(블록 608과 유사)에서 배경 삭감을 수행한다. 표면이 일단 검출되면, SPM은 블록(716)에서 샘플을 이미징하게 된다.

[0088] 도 17은 팁-샘플 상호작용의 실제적인 상황을 도시하며, 도 6과 관련하여 상기의 작용 설명에 보충적인 설명을 제공한다. 실제적인 팁-샘플 상호 작용은 동기 거리 마커의 인접한 곳에서 발생한다. 상호작용 자유 영역에는, 접착 힘(즉, 링다운)의 브레이크-오프로 인하여, 캔틸레버의 자체 발진이 남아 있다. 이러한 발진에 의하여, 베이스라인이 요동을 치게 되고, 도 3에 도시된 것과 동일한 요동(fluctuation)  $\delta Fr$ 이 발생하게 된다. 이와 같은 변화는 제어기 노이즈가 된다. 베이스라인 요동을 최소화하기 위하여, "베이스라인 평균" 영역 내에 표시된 데이터는 점선으로 표시된 단일 상수로 평균화된다. 이와 같은 일정한 데이터는 각각의 피드백 사이클에서  $\delta Fr$ 를 사용하는데 이용될 수 있다. "베이스라인 평균"에 대한 영역은 데이터 품질에 따라 변할 수 있다. 동기 거리(Sync Distance) 인접한 곳에서 발생하는 실제적인 팁-샘플 상호작용의 평균화를 피하기 위하여, 동기 거리보다 적은 값이다.

[0089] 즉석 상호 작용 힘은 방정식(1)에 의하여 계산되는 힘  $\delta Fr$ 을 이용하여 결정될 수 있으며, 상기에서  $F_{r_i}$ 는 동기 거리에서 순간 값이 된다. 도 18에 도시된 바와 같이, 게이트화된 평균값을 통하여 결정되는 값일 수도 있다(도 7 내지 도 8b를 참조). 게이트화된 평균 스킴은 시간 영역  $\delta t$ 에서의 굴절 값들을 이용하며, 상기의 시간 영역에서 모든 데이터 포인트들을 평균화한다. 상기와 같은 작업을 통하여, 신호 대 노이즈 비율을 개선할 수 있다.  $F_{r_i}$ 는 피드백 제어에서 세트포인트로 작용한다. 상기의 값은 음수의  $\delta Fr$  값으로부터 보다 높은 양수의  $\delta Fr$  값

으로 변한다.  $\delta F_r$ 에 대한 높은 양수는 샘플과의 보다 강한 척력 상호 작용을 뜻한다.

[0090] 도 19는 피크 힘 태핑(PFT) 이미징용으로 사용된 즉석 힘 제어의 절차(800)를 도시하고 있다. 블록(802)에서, 액추에이터는 탐침 또는 샘플을 발진시켜, 0.1nm에서 3 $\mu$ m 범위의 진폭을 갖는 피크 대 피크의 상대성 움직임을 만들어 낸다. 팁은 샘플로부터 많이 떨어져 있으며, 베이스라인 및 배경은 블록(804 및 806) 내에서 결정된다. 배경이 일단 결정되면, 블록(806) 내에서 검출된 굴절로부터 배경이 삭감되고, 이에 따라 최소의 검출 가능한 힘이 가능하면 적게 된다. 블록(808)이 작용하여, 도 15 및 도 16에 도시된 것과 같이 결합의 방법으로 탐침을 샘플과 상호 작용시킨다. 샘플이 일단 탐침과 상호작용을 하면, 주기 T 내에서의 굴절 데이터는 샘플링되고, 그리고 디지털화되어 블록(810) 내에서 동기 거리(도 18), 즉석 힘  $F_{r,i}$ , 및 상대 힘  $\delta F_r$ 이 분석하게 된다. 베이스라인 및 배경은 상기 블록에서 도 14에 따라 다시 점검된다.

[0091] 피드백은 블록(812) 내에서  $\delta F_r$  및  $F_{r,i}$ 을 현재 값으로 유지하기 위하여 사용된다. XY 스캐너가 샘플에 상대적인 탐침의 위치를 재설정하기 위하여 기동되며(블록 814), 지형도 이미지 뿐만 아니라, 탄성, 접촉도 및 에너지 소멸 등으로 표시되는 한 개 또는 그 이상의 기구적인 이미지들을 생성한다.

[0092] 도 20에 도시된 바와 같이, 도 20a의 측정 시간 곡선은 도 20b에서 실제 공간 데이터로 변환된다. 보다 구체적으로, 도 20a는 한 개의 변조 주기에 있어서, 상호 작용 힘을 시간의 함수로 표현하고 있다. 도 20b는 한 개의 변조 주기에 있어서, 상호 작용 힘을 팁-샘플 거리의 함수로 표시하고 있다. 재료의 탄성 특성은 예를 들면, 올리버-파 모델(Oliver-Pharr model), 또는 다른 접촉식 기구 모델을 적용하는 경사(도 20b에서 세그먼트 CDE를 참조. 세그먼트 CDE는 짧은 범위의 척력 상호작용을 도시한다)의 상부 부분을 이용하여 기존의 방법에 따라 계산될 수 있다. (*Oliver W C and Pharr G M 2004 Measurement of Hardness and Elastic Modulus by Instrumented Indentation: Advances in Understanding and Refinements to Methodology J. Mater. Res. 19 3-20-2004를 참조*). 반데르 바스 인력은 접근 곡선로부터 결정될 수 있으며(도 20a 및 도 20b에서 세그먼트 BC<sub>in</sub>), 샘플로부터 팁이 멀어질때 발생하는 모세현관 접촉 또는 계산될 수 있다. ("*Theoretical Investigation of the Distance Dependence of Capillary and Van der Waals forces in Scanning Force Microscopy*" Stifter et al., *Physical Review B, Vol. 62 No. 20, 11/15/2000*을 참조). 팁을 XY 평면에 대하여 이동시키고, 이러한 측정을 반복으로 수행하여, 탄성도, 반데르 발스 접촉, 모세현관 접촉 (세그먼트 EF는 입력 및 모세현관 힘에 해당한다) 등과 같은 측정 샘플 특성들이 전체 샘플 표면에 대하여 이미지화될 수 있다. 접근 곡선 및 인출(이탈) 곡선의 차이점을 이용하여, 샘플의 경도를 이미지화할 수 있다.

[0093] 도 20b는 두 개의 유형의 데이터, 즉 직접 측정 데이터 및 추출 데이터를 도시하고 있다. 직접 측정 데이터는 각각의 사이클 내에서 즉석으로 결정되는 상호 작용 힘과 같은 매개변수들이다. 추출된 데이터는 곡선의 소정 부위로부터 각각의 상호 작용 사이클 내에서 계산된다. 상기의 데이터는 변형되고, 도 20b에서 포인트 C에서 포인트 D로의 침투 깊이에 의하여 계산된다. 또 다른 실시예는 접근 곡선(BCD) 및 철회(withdraw) 곡선(EFG) 내의 포함된 영역에 의하여 형성되는 소멸 에너지에 관한 것이다. 또 다른 실시예는 도 20b의 B 및 F 사이의 차이에 따라 계산되는 접촉 힘이다. 추출된 데이터는 피드백 제어 매개 변수로서 사용될 수 있다. 예를 들면, 변형이 피드백 매개변수로서 선택되면, 도 1의 제어 루프는 일정한 피크 힘 대신에, 일정한 변형에 따라 이미지를 만들어 낸다. 다른 추출 데이터는 피드백 루프에서 동일한 목적을 수행한다.

[0094] 즉석 힘 제어 이미징의 한 가지 중요한 어플리케이션은 깊은 트랜치 측지이다. TappingMode™ AFM이 사용되어, 깊은 트랜치(약 3:1 또는 그 이상의 종횡비, 이미지에 대한 가장 어려운 트랜치는 100nm 이하의 폭, 일반적으로 10nm-100nm를 갖는다)를 이미지하기 위하여 사용되면, 측벽에서의 강한 인력은 진폭 변화를 일으킬 수 있으며, 그에 따라 트랜치 깊이를 잘못 측정할 수 도 있다. 직접 척력을 피드백으로서 사용하면, 피드백은 팁이 샘플과 접촉할때 Z-축에 대하여 반응한다. 그 결과, 힘 제어 피드백은 TappingMode™ AFM 보다는 더 신뢰성 있게 깊은 트랜치를 측정할 수 있다. 도 21a 및 도 21b는 이러한 측정의 예를 도시한다. 상기의 측정 방식은 동일한 샘플 위치에서 동일한 탐침과 동일한 샘플을 이용한다. 즉석 힘 제어 피드백은 트랜치 바닥부(도 21b)에 이르는 팁을 이용하여 실제적인 트랜치 깊이 측정을 가능하게 한다. 다른 측면으로, TappingMode™ AFM은 팁을 충분히 이동시키고, 이에 따라 대단히 얇은 깊이의 측정으로 만들 수 있으며, 트랜치 바닥부는 측정되지 않는다 (도 21a).

[0095] 도 22a 내지 도 23b에 도시된 바와 같이, 본 발명의 추가적인 특징들을 설명하면 다음과 같다. 도 22a 및 도 22b에 있어서, AFM가 작동되어, 팁-샘플 상호작용이 척력 영역(작은 진폭 척력 모드), 즉 표면으로부터 수 나노미터 떨어진 곳에 항상 머물수 있도록 충분히 작은(나노미터) 크기의 진폭으로 Z를 변조한다. 이와 같은 것은

피드백으로서, 피크 대 피크 힘 차이( $F_a - F_b$ , 피크 대 피크 Z 변조에 해당) 또는 록-인 증폭기의 진폭 출력을 이용하여 이루어진다. 피드백 매개변수는 힘의 경사도가 경사져 있는 것에 해당하는, 즉 진폭이 충분히 적으면, 척력 경사도에 비례한다. 이와 같은 경우에 있어서, 피드백은 짧은 범위의 화학적 결합 힘, 즉 원자 해상도에 해당하는 힘에 민감한 상태가 된다. 그 결과, 본 발명의 기술은 고해상도 이미징에 적합하다.

[0096] 도 23a 및 도 23b는 도 22a 및 도 22b에 도시된 구성과 유사한 구성을 도시하고 있지만, 힘 곡선의 척력 부분이 포함되어 있다(작은 진폭 척력 모드). 이 경우에 있어서, 시스템은 팁-샘플 상호 작용이 항상 척력 영역에 머물 정도로 충분히 작은 진폭에서 Z를 변조한다. 피크 대 피크 힘 차이  $F_a - F_b$  또는 록-인 증폭기의 진폭 출력은 힘 경사도가 선형이 될 수 있도록 진폭이 충분히 적어서, 피드백 매개변수가 척력 경사도에 비례하면, 피드백으로서 사용될 수 있다. 이와 같은 기술은 팁이 샘플과 접촉하지 않기 때문에, 샘플에는 가장 적에 손상을 준다. 작은 진폭 척력 모드와 비교하여, 피드백 구성은 역으로 된다.

[0098] 장점

[0099] PFT 모드 AFM 작용의 장점은 무수히 많다. 안정적인 긴 기간의 힘 제어만 가능하면, 드리프트-자유 샘플 이미징은 즉석 높이, 강도, 접촉성, 탄성도 및 TappingMode™ AFM에서의 소성 기구 특성 측정 등 수많은 것과 함께 성취될 수 있다. 본 기술은 DC 드리프트(PFT 모드는 매 수백 마이크로 세컨드마다 그 자신의 주파수를 발생한다)에 의하여 영향을 받지 않기 때문에, 꾸준한 작용은 전문적인 관리자가 없어도 영향을 받지 않는다. 이에 따라, SPM을 이미지 일체성에 어떠한 영향을 주지 않고도 수시간, 심지어 수일 동안(큰 샘플과 긴 시간)을 작동할 수 있도록 한다. 수분 또는 수 시간이 필요한 결정 성장 및 폴리머 페이즈 변화 모니터링과 같은 인-프로세스 측정에 매우 유용하다. 피크 포스 태핑 이미지는 2kHz 이상의 작용 대역폭에서 생성될 수 있다. 태핑 모드 대역폭은 약 1kHz이며, 왜냐하면 캔틸레버 동역학이 속도를 제어하기 때문이다. 예를 들면, 공진 상태로 돌아가기 위해서 안정화하는데 최소한 수 밀리세컨드가 필요하다(진폭 에러가 클수록, 더 늦어진다). 공개된 실시예는 탄성도, 접촉성, 에너지 소멸이 등을 독립적으로 측정할 수 있기 때문에, 페이즈 보간 문제를 해결할 수 있다. 이러한 모든 인자들은 캔틸레버 발진 페이즈의 원인이 된다.

[0100] PFT 모드는 일단 탐침이 샘플로부터 릴리즈되면, 캔틸레버 링다운 완료를 기다릴 필요가 없기 때문에, 캔틸레버 역동역학에 민감하지 않다. 이에 따라, 진공 상태에서 고속의 이미징을 가능하게 하고, 그리고 캔틸레버 옵션 중에서 임의의 선택을 가능하게 한다. 이와 같은 차이에 의하여, 상호 작용힘의 크기를 10의 몇 승으로 매핑을 가능하고 하며, 척력 해상도가 사용되어, 인공적인 자유 셀룰러 이미징을 만든다.

[0101] PFT 모드가 탐침의 공진 주파수에서 작동해야 할 필요가 없다는 사실은 유체 내에서 이미징을 할 때 큰 장점이 된다. 유체 내에서 다양한 기생 결합 힘들로 인하여, 캔틸레버 튜닝이 유체 이미지를 얻는데 있어 중요한 이슈가 된다. PFT 모드는 캔틸레버를 튜닝할 필요성을 완전히 배제한다(베이스라인 평균화, 배경 삭감 등). 힘 제어의 범위 및 훨씬 넓은 스프링 상수 범위(일반적으로, 태핑 모드 AFM에 대해서는 0.3N/m 보다 크며, PFT 모드는 0.01N/m 만큼 낮은 스프링 정수를 갖는 캔틸레버를 이용할 수 있다)를 갖는 캔틸레버를 이용하는 능력은 이미징 제어에 생물학적인 샘플 이미징에 더 많은 여지를 제공한다.

[0102] 이와 같은 것은, PFT 모드가 모세 혈관 접촉 힘을 극복하기 위해서 캔틸레버 내에 저장된 발진 에너지에 따라 결정된다는 사실 때문이다. 본 발명의 기술이 외부 액추에이션 요소(피드백 회로의, 바람직하게는 피크 힘에서 트리깅하는)를 이용하기 때문에, 모세혈관 힘을 극복하기 위한 메커니즘은 태핑 모드에서 보다 훨씬 더 강력하며, 캔틸레버 그 자체의 정적 탄성 에너지(발진 탐침의 운동 에너지에 의하여 공급)는 모세혈관 힘을 극복하는데 있어서 팁을 샘플로부터 멀어지도록 당긴다. 그 결과로, 모세혈관 레이어가 존재하는 상태에서, 캔틸레버 스프링 정수가 안정적으로 작동하도록 하는데 있어서 어떠한 제한이 없다. 이에 따라, PFT 모드는 최소한 0.01N/m 만큼 낮은 스프링 정수를 갖는 캔틸레버를 이용하여 안정된 태핑 제어 작동을 가능하게 한다.

[0103] 피크 힘 태핑 제어의 또 다른 장점은 AFM 작동의 한 개 모드에서 0.01N/m에서 100N/m까지 캔틸레버를 이용하는 능력이다. 탄성 모듈에서 10kPa에서 100GPa까지 단일의 도구 상에서 가장 넓은 범위의 재료를 맵핑할 수 있는 높은 해상도의 기구적인 특성을 가능하게 하는 것이다.

[0104] 즉석 힘 피드백이 주어진다면, 팁 크래싱이 제거될 수 있다. 굴절이 유체역학적으로 교정되기 때문에, 튜닝이 필요하지 않으며, 그에 따라 사용자에게 의한 빠르고 사전에 준비된 셋업이 이루어질 수 있다.

[0105] AFM 작동의 현재 존재하는 모드와 비교하여, 낮은 평균 트래킹 힘 및 팁 상에서의 측면 힘의 제거의 조합에 따

라 PFT 모드에 의하여 제공되는 낮은 힘 높은 속도의 이미징은 다양한 샘플에 있어서, 높은 속도의 이미징 기법에 중요한 진전을 제공한다. 예를 들면, 단일의 분자 탄성이 측정될 수 있으며, 유체 속의 좁은 DNA 샘플도 측정될 수 있다 (예를 들면, 2nm 폭의 DNA). 비교해본 결과, 유체 속에서 DNA를 이미징할 때, 태핑 모드 AFM은 최소한 2nm 더 낮은 해상도를 갖는다. 태핑 모드 AFM에 있어서는, 유체 내에서 DNA 강도를 측정하는 것은 그것이 측정 정량화 능력을 태핑 모드 AFM이 구비하고 있지 않기 때문에 모험이 될 수 있지만, 상대적인 기구 특성 측정을 제공하는 것이 기본적으로 가능하다(예를 들면, 페이즈 이미지에서 상수를 구하는 방법에 따라 이루어짐). 본 발명의 기술을 이용하여, 분자 레벨까지 특성을 측정하는 것이 가능하다.

[0106] 결론적으로, PFT 모드는 팁 및/또는 샘플에 손상을 주지 않고 태핑 모드 AFM에서 얻어지는 것만큼 우수한 또는 그 보다 더 우수한(해상도(예를 들면, 100nm 이하, 보다 바람직하게는 측면 방향으로 약 1nm 이하) 등) 데이터를 필요할 수 있다. 본 발명의 기술은 기존에 알려진 힘 피드백 기술에 대하여 현저한 속도 개선을 제공하며, 보다 작은 레버의 이용이 필요하지 않고 가능하다. 보다 큰 레버(>60 μm 길이)는 PFT 모드에서 낮은 공간에서 작동될 수 있어, 레버 반응은 이른바 작은 캔틸레버 (>10kHz)를 이용할 때 얻을 수 있는 것보다 훨씬 넘어서는 대역폭을 얻을 수 있다.

[0107] 본 발명의 바람직한 실시예의 추가적인 장점으로는, 힘 곡선이 매 픽셀마다 생성되어, 이미지가 일반적으로 태핑 모드 AFM 이미지를 능가하는 정보를 제공할 수 있다는 점이다. 모든 픽셀을 이용함으로써, 사용자는 강도, 접착력, 찬성도, 소성도, 등에 대한 정보를 정량적으로 얻을 수 있다는 것이다. 베이스라인 팁-샘플 분리가 모든 픽셀에 대하여 다시 제로화하기 때문에, 드리프트가 최소화되어, 생산성 및 이미지 신뢰도에서 많은 개선을 이룰 수 있다.

[0108] 본 발명에 따른, PFT 모드는 대단히 낮은 힘 이미징을 제공하여, 실시간 특성 매핑(즉, 즉석 초점 제어)을 이용하여 높은 해상도를 얻을 수 있는 것이다. 힘 제어는 장시간에 걸쳐 최소의 사용자 간섭 또는 사용자 간섭 없이 샘플을 이미징하는데 있어 안정적(기본적으로, 드리프트 자유)이다. 시스템은 튜닝 과정이 필요없기 때문에, 빠르고, 간단한 셋업이 가능하다(베이스라인 평균화 및 유체역학 배경 수정). 힘에 대한 정교한 제어를 인하여, 팁의 충돌을 방지하고, 본 발명의 기술/시스템은 샘플 표면에서의 측면 힘을 제거할 수 있다. 시스템은 일단 샘플로부터 릴리즈되고 난 이후에, 탐침이 샘플과 상호 작용하기 이전에 탐침 링다운을 기다릴 필요가 없기 때문에 캔틸레버 동역학에 예민하지 않다. 상기에 설명한 바와 같이, 다양한 종류의 캔틸레버가 사용가능하여, 사용자가 태핑 모드 AFM 속도(>2kHz로) 높이, 강도, 접착, 탄성, 소성에 대하여 즉석 측정이 가능하다. 본 발명의 SPM은 이와 같은 특성을 이용하여, 유체 내에서 2nm 폭의 DNA 샘플들을 이미징화할 수 있으며, 단일 분자 탄성과 같은 기구적인 특성 측정을 가능하게 한다.

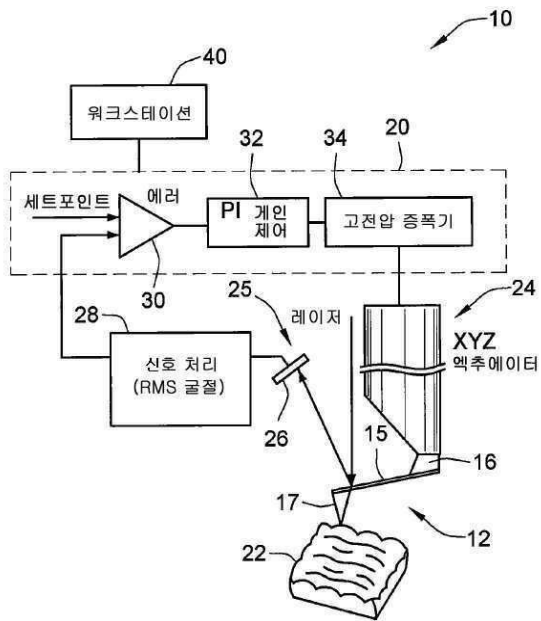
[0109] 본 발명을 실시하는데 있어 발명자에 의한 최상의 모드가 설명되었지만, 본 발명에 대한 여러 가지 시도는 한정되지 않는다. 본 발명의 특징들에 대한 다양한 추가, 수정 및 재구성 등은 하기에 설명되는 본 발명의 정신과 범위를 넘어서지 않는 범위 내에서 가능하다.

### 부호의 설명

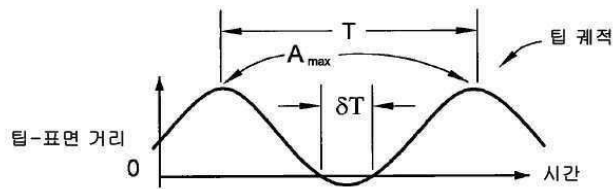
- [0110] 100: AFM
- 103: ADC
- 105: 배경 생성기

도면

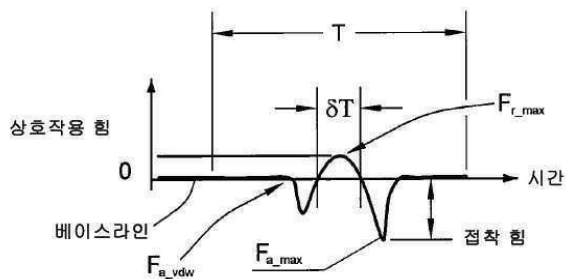
도면1



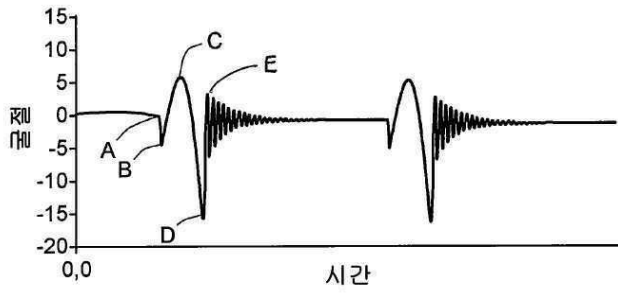
도면2a



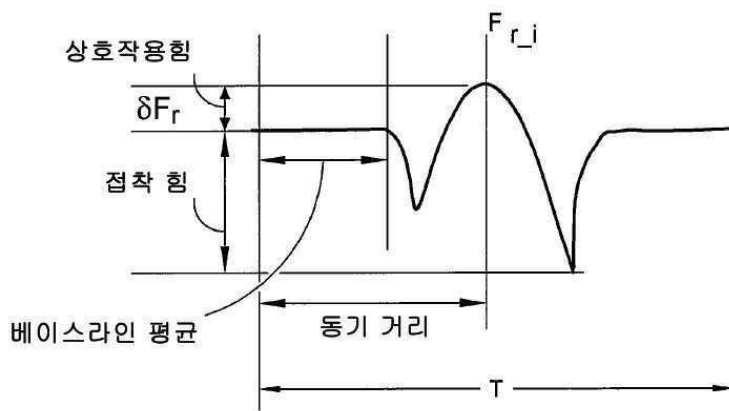
도면2b



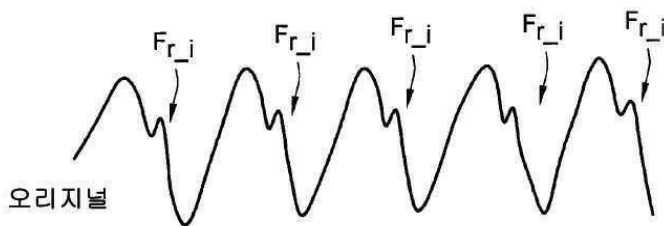
도면2c



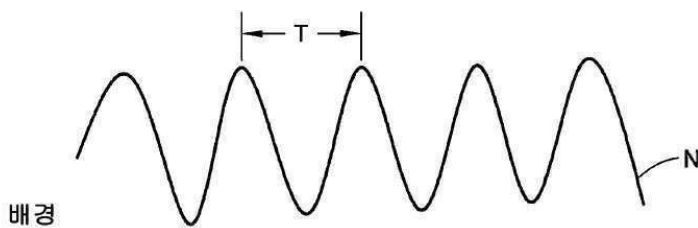
도면3



도면4a



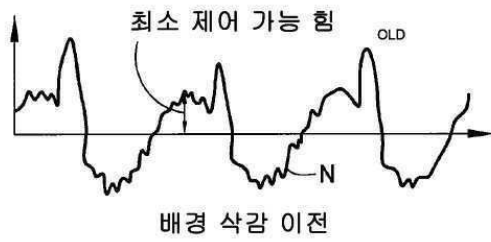
도면4b



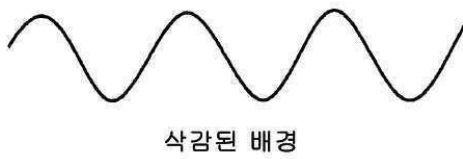
도면4c



도면5a



도면5b



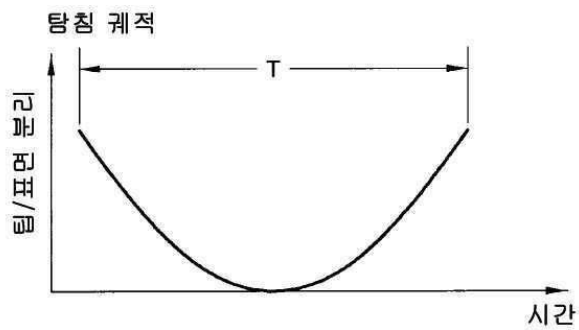
도면5c



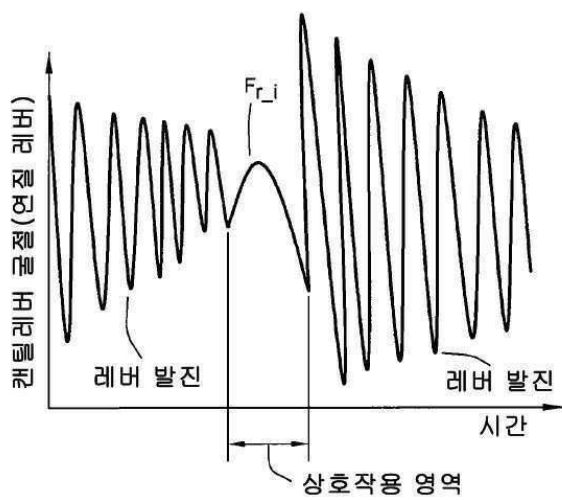
도면6a



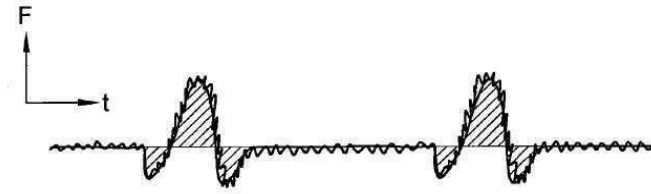
도면6b



도면6c



도면7



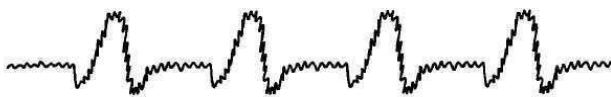
도면8a



도면8b



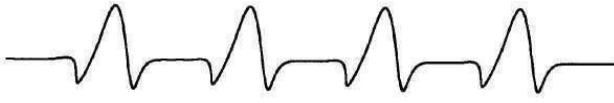
도면9a



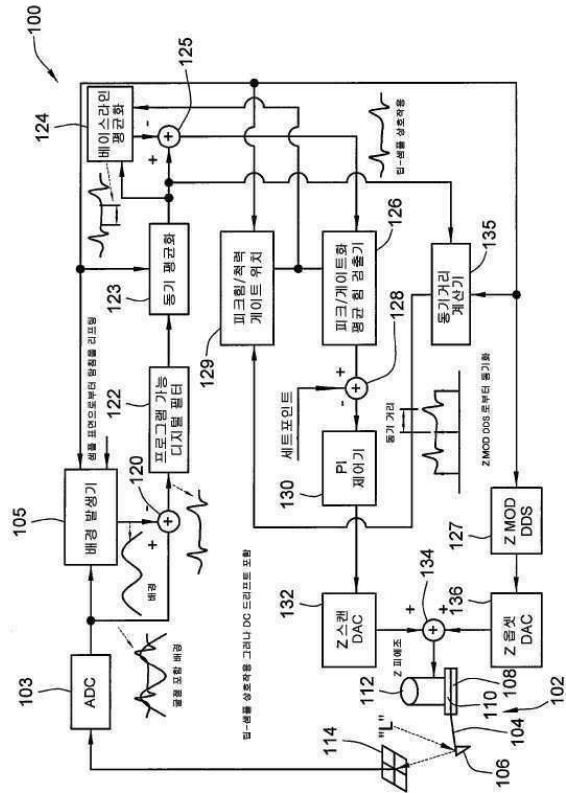
도면9b



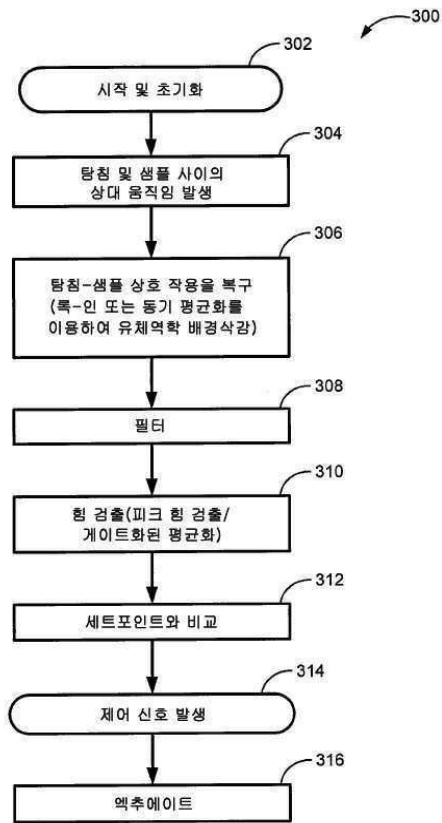
도면9c



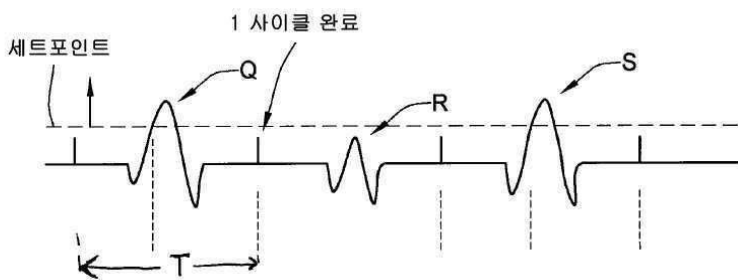
도면10



도면11



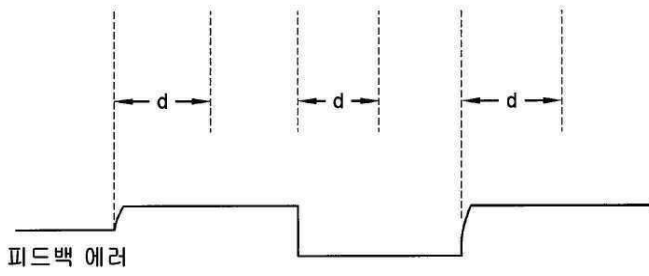
도면12a



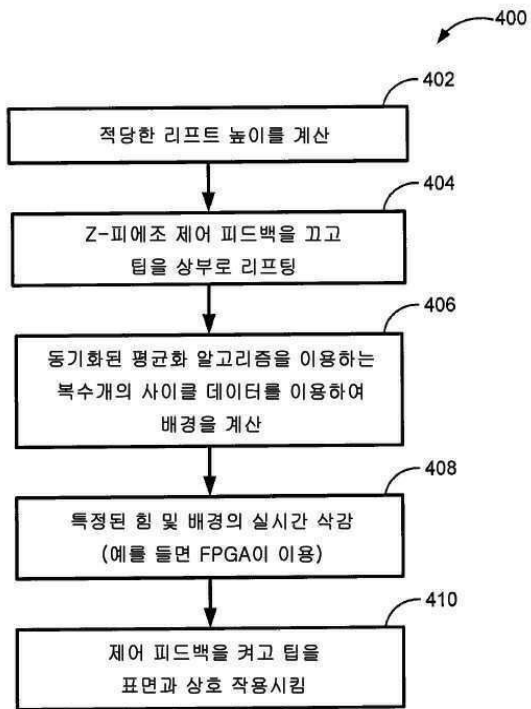
도면12b



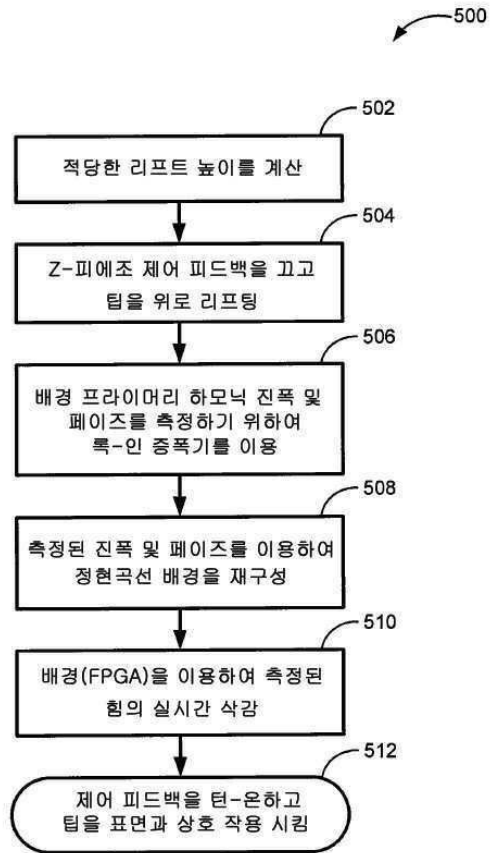
도면12c



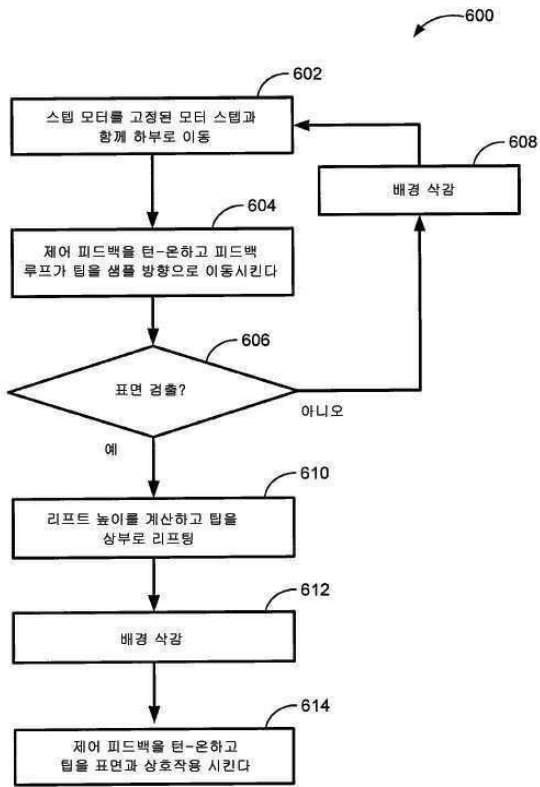
도면13



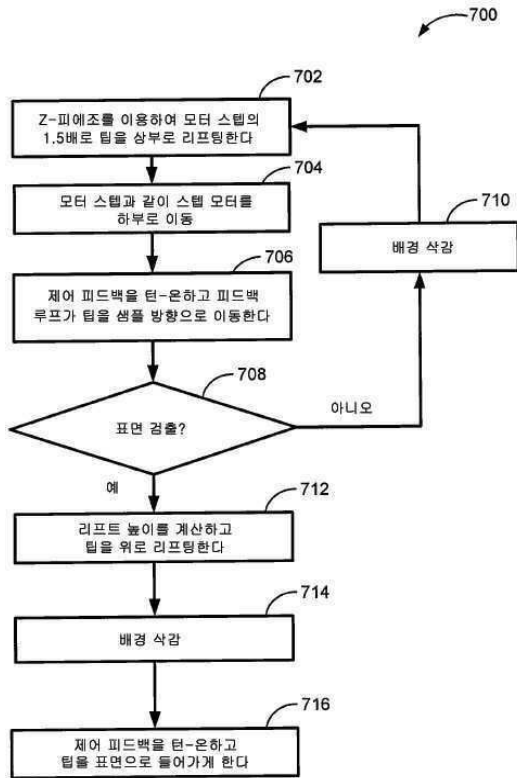
도면14



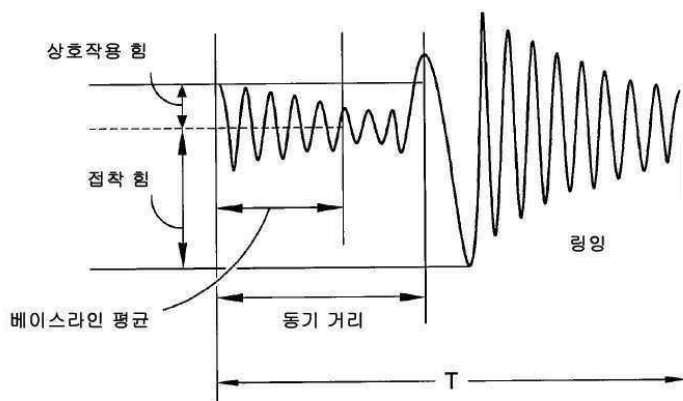
도면15



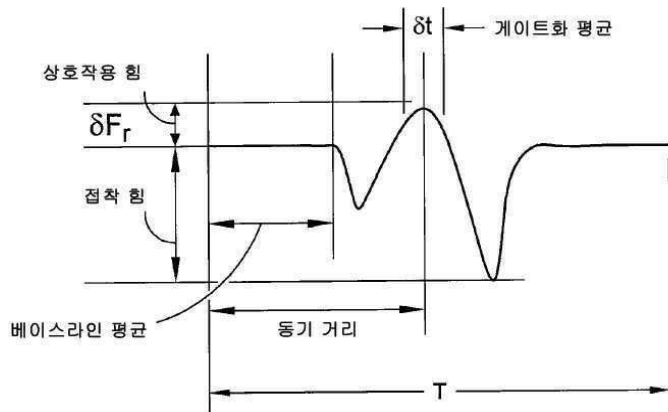
도면16



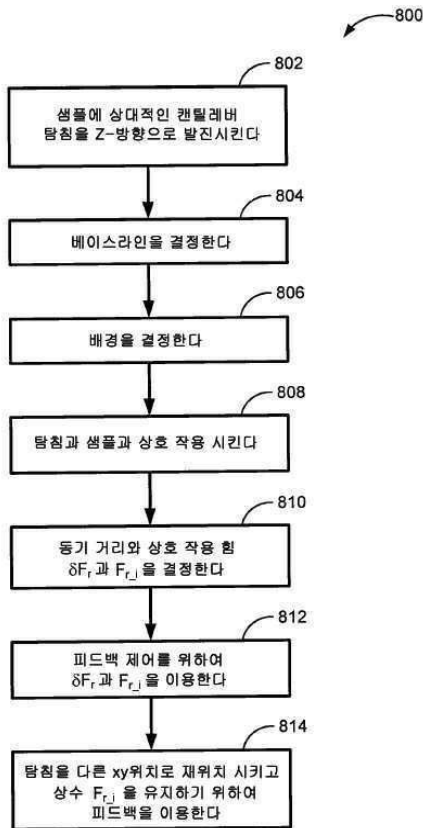
도면17



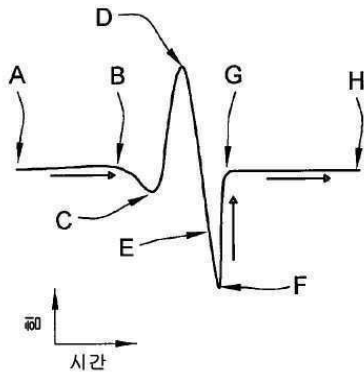
도면18



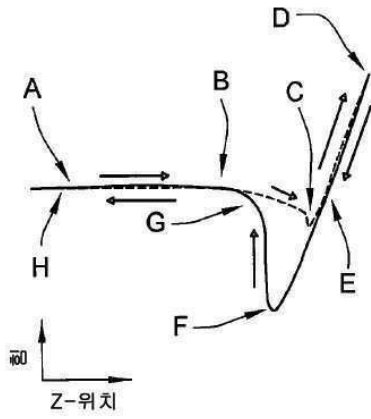
도면19



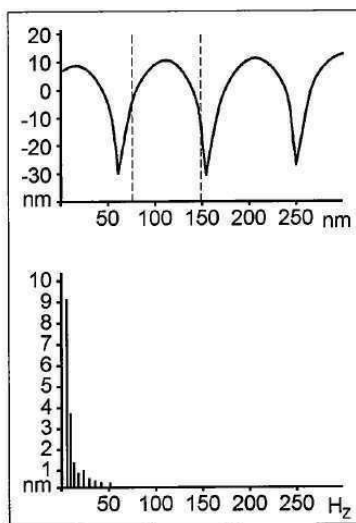
도면20a



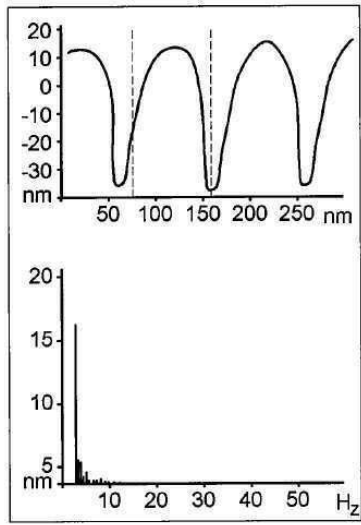
도면20b



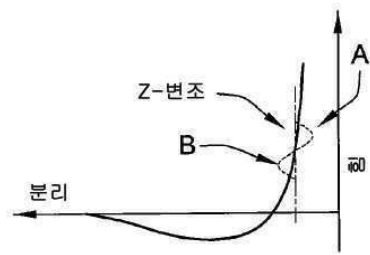
도면21a



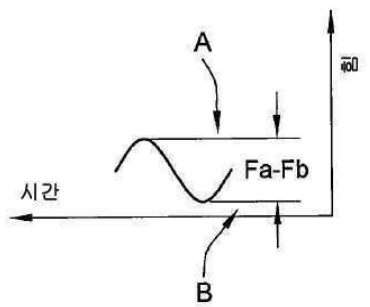
도면21b



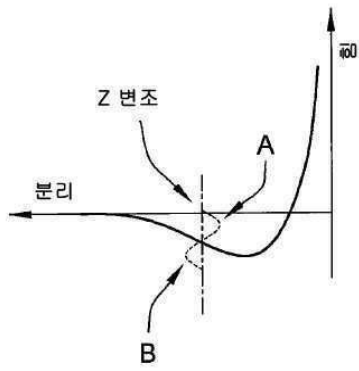
도면22a



도면22b



도면23a



도면23b

