

(19)대한민국특허청(KR)
(12) 등록특허공보(B1)

(51) 。 Int. Cl. G01N 27/00 (2006.01)	(45) 공고일자 (11) 등록번호 (24) 등록일자	2006년07월06일 10-0540027 2005년12월23일
---	-------------------------------------	--

(21) 출원번호	10-1998-0700376	(65) 공개번호	10-1999-0029072
(22) 출원일자	1998년01월19일	(43) 공개일자	1999년04월15일
번역문 제출일자	1998년01월19일		
(86) 국제출원번호	PCT/IB1997/000580	(87) 국제공개번호	WO 1997/44631
국제출원일자	1997년05월20일	국제공개일자	1997년11월27일

(81) 지정국 국내특허 : 아일랜드, 알바니아, 오스트레일리아, 바르바도스, 불가리아, 브라질, 캐나다, 중국, 체코, 에스토니아, 그루지야, 헝가리, 이스라엘, 아이슬란드, 일본,

 AP ARIPO특허 : 케냐, 레소토, 말라위, 수단, 스와질랜드, 우간다, 케냐,

 EA 유라시아특허 : 아르메니아, 아제르바이잔, 벨라루스, 키르기스스탄,

 EP 유럽특허 : 오스트리아, 벨기에, 스위스, 독일, 덴마크, 스페인, 프랑스, 영국, 그리스, 이탈리아, 룩셈부르크, 모나코, 네덜란드, 포르투갈, 스웨덴, 오스트리아, 스위스, 독일, 덴마크, 스페인, 핀란드, 영국,

(30) 우선권주장 08/650168 1996년05월20일 미국(US)

(73) 특허권자 오하라 테츠오
 미국, 매사츄세츠 01821, 빌레리카, 뱅크사이드 드라이브 20

(72) 발명자 오하라 테츠오
 미국, 매사츄세츠 02114, 보스톤, 린덜 플레이스 12,아파트먼트 4

(74) 대리인 김진환
 나영환

심사관 : 홍정혜

(54) 원자간측정방법

요약

주사 터널링 현미경, 원자력(atomic force) 현미경, 또는 커패시턴스 또는 자기장 탐지 시스템 등에서 이용되는 감지 탐침의 향상된 나노미터 규모 위치 데이터를 실시간 그리고 연속적으로 만드는 방법 및 장치가 개발되었다. 이는 탐침에 대하여 상대적으로 움직이는 격자 등의 주기적인 파형을 가진 표면 또는 원자 표면에서 상대적인 탐침 거리와 위치를 측정하기 위한 것이다. 탐침과 표면 사이에는 사인형 전압의 제어 하에 탐침이 빠르게 진동함으로써 감지장(sensing field)이 존재하게 되고, 감지장의 전류에 의하여 생성된 사인형 출력 전압의 위상 및/또는 진폭을 비교하여 가장 가까운 원자 또는 표면 파형의 정점에서의 거리와 방향을 나타내는 위치 신호를 얻게 된다. 필요한 경우, 그 위치 신호를 피드백하여 탐침과 표면

의 상대 운동을 제어할 수 있다. 다음과 같은 특징 즉, 탐침을 구동하는 사인형 전압과 실제 탐침의 진동 위치 사이의, 특히 탐침의 고유 주파수 가까이에서, 위상 지연에 의해 생기는 오차를 제거하여 속도, 주파수 응답, 신뢰도를 향상시킴; 탐침과 표면의 충돌 또는 다른 탐침-대-표면 간격 제어의 문제점을 방지함; 절대 위치 측정이 가능함; 특히 모노리식 결정 웨이퍼 구조에서, 단- 또는 다-탐침의 마이크로 가공의 향상된 설계와 같은 특징중 하나 또는 모두를 통하여 향상된 운전 성능을 얻을 수 있다.

대표도

도 1

명세서

기술분야

본 발명은 주사 터널링 현미경(Scanning Tunneling Microscope, STM), 원자력 현미경(Atomic Force Microscope, AFM), 및 그의 다양한 주사 방식 센서 등에 필수적인 나노미터 규모의 원자간 거리 측정에 관한 것이다. 특히, 파상(波狀)으로 배열된 원자들로 이루어진 표면, 그의 파상의 홀로그래픽 격자, 기존의 다이아몬드 절삭 또는 다른 가공법에 의해 만들어진 격자 표면, 또는 파상의 전기 그리고 자기장 표면 등의 위에서의 주사기 또는 센서의 위치를 원자 단위 이하의 정밀도로 측정할 수 있는 주사기 또는 센서의 위치를 원자 단위 이하의 정밀도로 측정할 수 있는 보다 개선된 방법에 관한 것이다. 이러한 실시간 나노미터 위치 측정은, 1994년 3월 22일에 출원한 미국 특허 출원 일련번호 08/216057호의 연장으로 출원인이 1996년 1월 19일 출원한 미국 특허 출원 일련번호 제08/588651호, 및 1995년 5월 22일 출원된 *IEEE International Conference on Robotics and Automation Proceedings*에 실린 출원인의 논문 "*Real-time subnanometer position with long measurement range*"에 발표된 바 있는 형식의, 표면 제어를 위한 피드백(feedback) 신호로도 이용될 수 있다.

배경기술

전술한 특허출원들과 논문에서 설명되는 바와 같이, 레이저 간섭계(laser interferometry)는 빛의 파장의 수 퍼센트에 이르는 정밀 측정을 위해 현재 널리 이용되고 있으며, 거울과 렌즈 등과 같은 초정밀 표면 또는 공구, 그리고 기억소자 등과 같은 집적회로 웨이퍼의 생산과 가공 등에 응용되고 있다. 예를 들어, 웨이퍼 등의 생산에서는 마이크로미터 이하의 넓이 안에서 평행한 선들을 따라 가공이 진행되어야 하며, 따라서 항상 위치를 인지하고 수 퍼센트의 오차 내에서 가공이 정확히 그 선을 따라 이루어지도록 하는 것이 중요하다. 오늘날 웨이퍼 등의 생산에서 그러한 주사 과정 중 위치를 추적하는데 레이저 간섭계가 사용되고 있다. 그러나 레이저 간섭계는 한 방향의 측정만 가능하며, 매우 값비싸고 안정적인 레이저원과 광학 장치를 필요로 한다. 나노미터 단위의 해상도를 얻기 위해서는 그 장치는 수백 개의 단위로 나누어져야 한다. 레이저 파장은 온도와 공기 유동 조건 변화 등의 이유로 일정하지 않으며, 이는 시스템을 부정확하게 만드는 원인이 된다. 더욱이 그러한 고정밀 측정은 종종 진공 속에서 이루어져야 하며, 이 또한 비용이 많이 들면서 동시에 여러 어려움을 야기시킨다.

고정밀도가 요구되는 또다른 예로 CD 복제에 사용되는 마스터 디스크의 생산을 들 수 있다. 또한 다이아몬드 가공과 위성 망원경 등의 표면 마무리 가공 등에서 유사한 수준의 정밀도가 요구된다.

특히, 비닝(G. Binnig)과 로러(H. Rohrer)의 *Helev. Phys. Acta*, 55. 726(1982)에서 기술된 STM, 그리고 미국 특허 제 4,724,318호의 원자력 현미경의 출현 이후, 원자 단위의 표면 가시화가 가능하게 되어 나노미터 해상도의 위치 제어 시대가 열리게 되었다.

"*Crystalline Lattice for Metrology and Positioning Control*", (Proceedings IEEE Micro Electro Mechanical Systems, pp.239-244)에서 히구치(Higuchi) 등은 위의 장비를 이용하여, 움직이는 테이블에 원자 표면을 노출시킨 후 터널링 현미경 센서가 X 그리고/또는 Y 방향으로 지나가는 표면 위에 있는 원자의 수를 세어 원하는 위치로 움직여가게 하였다. 이때 매번 새로운 곳에서의 위치 고정을 위해 테이블은 사인 파형으로 진동하면서 회전되고 있다.

그러나, 이러한 운전 방식으로는 실시간으로 연속적인 표면 위에서의 센서 위치를 측정하기는 불가능하다. 본 발명이 의도하는 바는 그런 연속적인 위치 측정을 해상도 0.01 나노미터 수준 이하, 즉 레이저 간섭계 위치 측정 해상도의 1 내지 10퍼센트로 가능하게 하는 것이다. 더욱이, 본 발명에서는 히구치 등과는 달리, 테이블 진동을 이용한 위치 고정이 필요 없으며, 기준점 주위에서의 센서 진동에 의해 위치를 결정한다. 해상도의 괄목할만한 개선뿐만 아니라, 복잡하고 온도 변화 등에 의해 오차가 생기기 쉬운 광학 시스템의 필요 없어짐에 따라, 레이저 간섭계 보다 더 많은 이점이 있다.

출원인의 상기 특허출원과 논문에서 서술된 바와 같이, 이러한 목적을 달성하기 위해 새롭게 고안된 접근 방식은, 원자로 이루어진 표면, 전도성의 홀로그래픽 격자, 다른 격자, 및 그외의 주기적인 파형의 표면을 주사하는 탐침(probe)의 위치를 실시간으로 나노미터 규모로 측정하는 방법을 채용하였다. 여기서 표면과 탐침이 상대적으로 운동함에 따라, 표면과 탐침 사이에 감지장(sensing field)이 형성되고; 전술한 주사 과정 중, 사인 형태의 전압을 제어하여 탐침의 원래 기준점 주위에서 탐침을 진동시키고; 그러한 진동 도중 그리고 표면을 지나간 후에 감지장에 의해 생성된 사인 파형의 출력 전압을 측정하고; 제어 전압과 출력 전압의 위상 및/또는 진폭을 비교하고; 탐침에서 가장 가까운 파형 표면의 정상(즉, 정점)까지의 거리와 방향을 나타내는, 즉 표면을 따라 탐침의 위치를 나타내는 위치 신호를, 그러한 비교를 통해 연속적으로 얻을 수 있다.

위에서 매우 중요하고 유용한 새로운 기술이 서술되었지만, 여전히 거기에 개선이 필요한 응용 분야들이 있다. 첫번째 예로, 특히 반도체 산업 응용 분야에서 속도, 주파수 응답, 그리고 신뢰도에서의 개선이 요구되고 있다. 특히, 탐침 진동 주파수가 시스템의 고유 진동수에 가까워지면, 입력 신호와 실제 탐침 진동 사이에 위상 지연이 생긴다. 이 위상 지연은 주위 환경 조건에 민감할 수 있으며 이는 위치 감지의 정확도에 영향을 미친다. 본 발명은 이러한 운전 조건을 크게 개선시켰다.

또, 탐침이 고주파수로 진동할 때 다른 문제점이 발생함을 알 수 있었다. 간격 제어기는 탐침이 격자 표면과 충돌하지 않게 하면서, 동시에 신호를 잃어버리지 않게 나노미터 수준의 거리를 계속 유지해야 한다. 저주파 통과 여파기(low-pass filter)를 사용하거나 또는 평균화시킨 간격 거리를 간격 제어를 위한 피드백 신호로 이용하는 것은 탐침이 아주 짧은 시간 동안 격자 표면을 접촉할 수도 있기 때문에, 바람직하지 않다. 또다른 문제점은 간격을 제어하는 수단이 위치 감지 과정에 어떻게 영향을 주지 않도록 하느냐는 것이다. 터널링 전류와 원자력(atomic force)의 간격 거리에 대한 비선형 거동도 또한 고정밀도의 간격 제어를 위해 극복해야 할 문제점을 안겨준다. 단순화된 선형화 매핑(linearization mapping)이 흔히 쓰이고 있지만, 이러한 제어 방식은 탐침이 격자 표면과 예기치 않게 충돌할 가능성을 오히려 더 높일 수도 있다.

시스템의 기구학적 오차 및/또는 기계적 오차를 보상하기 위해 센서 탐침의 총운동 범위는 검사 표면의 총운동 범위보다 더 커야한다. 대개 그러한 범위는 보통의 디지털/아날로그 변환기 칩이 제공할 수 있는 전압 범위를 넘는다. 일반적으로, D/A 출력을 증폭시키는 방법이 사용되고 있지만, 이 또한 잡음을 증폭시켜, 시스템 해상도가 나빠진다. 본 발명은 이러한 난점도 개선하였다.

전통적으로, 주사 터널링 현미경(STM)분야에서는 식각(etched) 금속선이 탐침으로 이용되어 왔다. 원자력 현미경(AFM)에서는, 대량 생산이 용이하고 기계적 성질을 정확히 복제할 수 있어 마이크로 가공된 탐침이 보통 이용되고 있지만, 이러한 탐침들은 일반적으로 비전도성이며, 탐침축(Z-축) 방향으로 가장 낮은 고유 진동수를 가지고 있다. 따라서, 이러한 탐침이 X 방향으로 진동하면, Z 방향의 진동성 잡음이 유도됨을 알 수 있었다. 이는 위치 측정의 정확성을 떨어뜨리는 원인이 된다. 이 문제점 또한 본 발명에서 고려되었다. 몇몇 산업 응용 분야에서는, 전력 공급이 끊기는 사고가 있어도, 측정을 처음부터 다시 시작할 필요가 없도록 절대적인 위치 측정이 요구된다. 비슷한 이유로 원점의 정의가 중요하게 된다. 그러나, 이제까지 나노미터 또는 그 이하의 정밀도로 그러한 기능을 발휘하게 하는 것은 쉬운 일이 아니었다. 나노미터 수준의 정밀도가 요구된다면 시스템을 적절하게 조정, 배치하는 것이 매우 중요하다. 탐침과 격자 진폭 등과 같은 조정 조건들은 모두 위치 감지의 정확도에 심각한 영향을 미치지만, 지금까지 그 조건들을 입증할 간단한 방법이 존재하지 않았다.

현재, 새로운 발명의 응답 속도는 기계적 장치의 상대적으로 느린 고유 주파수에 의해 결정된다. 만약 더 향상된 위치 측정 속도가 요구된다면, 새로운 접근 방식이 필요한 것이다.

발명의 상세한 설명

본 발명의 목적은 STM, AFM 등과 같이, 원자 표면, 격자 등위에서의 나노미터 규모 실시간 센서 위치 측정(및 제어)을 위해, 전술된 위상 지연, 탐침 충돌 방지, 간격 제어, 탐침 제조와 운전과 관련된 어려움들과 제한들 중 하나 또는 그 이상을 제거할 수 있는, 새롭고 개선된 방법 및 장치를 개발하는 것이다.

그외의 목적들은 이하에 설명되어 있으며, 첨부된 청구 범위에 더 자세히 상술되어 있다.

요약하여, 본 발명은 주기적인 파형의 표면을 주사하는 탐침의 위치를 실시간으로 나노미터의 규모로 측정하는 방법을 포함하며, 여기서 표면과 탐침이 상대적으로 운동함에 따라, 표면과 탐침 사이에 감지장(sensing field)이 형성되고; 전술한 주사 과정 중 사인 형태의 전압을 제어하여 탐침의 원래 기준점 주위에서 탐침을 진동시키고; 상기 진동 도중 그리고 표면을 지나간 후에 감지장에 의해 생성된 사인 파형의 출력 전압을 측정하고; 앞의 사인 파형 출력 전압을 사인 파형 제어 전

압과 곱하여 제어 전압과 출력 전압의 위상 및/또는 진폭을 비교하고; 상기 비교를 통해, 탐침에서 가장 가까운 파형 표면의 정상까지의 거리와 방향을 나타내는, 즉 표면을 따라 탐침의 위치를 가리켜 주는 위치 신호를 얻고 또 사인 파형 제어 전압과 실제 탐침 진동 사이의 어떤 위상 지연도 제거시킬 수 있는 것이 본 발명의 중요한 측면들 중 하나이다.

새로운 하부 장치(sub-set)와 하부 조합(sub-combination), 그리고 보다 나은 최적의 형식 형상화와 설계가 이하에서 설명된다.

도면의 간단한 설명

본 발명은 다음 도면들과 관련지어 서술될 것이다. 도 1 내지 도 10b는 출원인의 전술된 이전 특허출원에 이미 실린 것을 재발췌하였고, 도 11a 내지 도 21은 본 발명의 개선 사항에 보다 특별히 연관되어 있다.

도 1은 주사 터널링 현미경 센서, 탐지 회로, 및 상대적으로 움직여 지나가는 원자 표면이 포함된 등각 도면이다.

도 2는 발명에 이용된 원자력 현미경 센서의 단순한 개략도이다.

도 3a는 도식적인 위치 측정을 위해 STM이 이용되는 복잡 등각 도면이며, 그래프는 I-V 변환기 출력, X 제어 신호, 그리고 Y 제어 신호를 나타낸다.

도 3b는 위치 측정 계산 흐름도이다.

도 4는 본 발명을 X 테이블 제어를 위한 위치 센서로 사용하는 하나의 응용 예를 나타낸 도면이다.

도 5는 홀로그래픽 격자와 선형 주사 센서로 일차원 위치 정보를 얻어내는 발명의 구상도이다.

도 6은 이차원 위치 측정 계산 흐름도의 예를 나타낸 도면이다.

도 7a와 도 7b는 자기적 및 전기적 파형 또는 교대하는 표면장에 사용하기 위하여 발명을 일부 수정한 것을 나타낸 도면이다.

도 8은 유사하게, 실제 파형을 띤 격자의 커패시티(Capacity) 탐지 구상도이다.

도 9는 발명을 시험하기 위해 사용된 흑연 시편의 STM 결과를 나타낸 도면이다.

도 10a와 도 10b는 탐침 센서의 실제 원자 표면 데이터를 이용한 컴퓨터 모의 실험 결과와 그에 따른 터널링 전류 출력을 나타낸 도면이다.

도 11a는 그것의 위상-고정-루프(phase-lock-loop)를 자세히 설명한 설명도이고, 도 11b는 주파수 합성기를 더하여 개선시킨 위치 측정 계산 실험도이다.

도 12는 기준 추적(reference tracking) 모드에서 주파수 합성기를 더하여 개선시킨 위치 탐지 흐름도이다.

도 13a는 위치 측정 결과에 영향을 주지 않는 새로운 신뢰도 있는 간격 거리 제어기를 나타낸 도면이다.

도 13b는 도 13a에서 서술된 방법을 이용하여 얻어진 실험 데이터를 도시하는 도면이다.

도 14a는 발명에 유용하게 쓰인 마이크로 가공된 새로운 탐침의 설계도이다.

도 14b는 새롭게 설계되고 마이크로 가공된 탐침의 등각 도면이다.

도 15는 유사한 도면과 탐침 진동을 위해 적분 작동기와 마이크로 가공된 탐침을 이용한 회로도이다.

도 16은 큰 변위와 정밀한 작동기 제어를 위한 새로운 향상된 시스템을 나타낸 도면이다.

도 17a 와 17b는 절대 위치의 탐지를 가능하게 하는 주사 방식의 등각 도면이다.

도 18은 초기 장치 조정을 위한, 매우 정확한 각도 측정 기술을 도시하는 도면이다.

도 19는 변위 센서가 더 필요 없이 탐침 진동 진폭을 측정할 수 있는 방법을 도시하는 유사한 도면이다.

도 20a는 위치 측정 속도를 향상시키는 장치/방법의 유사한 도면이다.

도 20b는 다중 송신 신호의 타이밍을 기술하는 파형도이다.

도 21은 고속 위치 측정을 위한 장치/방법을 도시하는, 도 20a와 유사한 도면이다.

도 22는 새로운 두개의 탐침 형상의 사용을 서술하는 블록도이다.

도 23은 탐침 변위/각도의 측정과 보상 방법을 보여주는 블록도이다.

도 24는 하나의 탐침을 이용하고, 또 탐침을 Y 방향으로 진동시켜 신호 대 잡음비를 증가시킨 향상된 절대 위치 탐지법을 도시하는 도면이다.

도 25는 매우 비선형적인 특성을 가진 환경에서의 간격 거리 제어 블록도이다.

도 26은 다른 형식의 위치 측정 형상들을 도시하는 도면이다.

실시예

위에서 본 발명의 개선점 중 하나로 든, 전술한 출원인의 이전 특허출원에서 보여지고 기술된 바와 같은 바람직한 장치의 형식이, 도 1에서 STM과 함께 사용된 모습으로 보여지고 있다. 날카로운 텅스텐이나 Pt-Ir선 또는 기타와 같은 주사 센서 탐침(2)이, 예를 들어 테이블 또는 표면 T(도 4)위에 위치된 전도성의 파형 원자 표면 표본 위에서 STM 모드로 작동되고 있는 것을 볼 수 있다. 센서 끝이 표본 표면(3)의 수 나노미터 위에 위치하면, 센서 끝과 표본 표면 바닥에 있는 전극 2 사이에 작용하는 바이어스 전압(V)에 의해 터널링 전류가 생성된다.

터널링 전류는 I-V 변환기에 공급되어 출력 전압(V_{out})을 생성시키는데, 이 출력 전압은 센서 탐침(2)과 표면(3)의 원자들 사이의 거리의 함수이다. 탐침(2)을 표본 표면 위에서 X, Y 방향으로 주사함으로써, 표면의 지형적 정보가 얻어지며 따라서 원자 표면의 형상이 재구성된다.

본 발명에 의하면, 센서 탐침(2)은 전기적으로 절연되어 있지만 기계적으로 연결된 진동하는 원통형 압전 작동기(1)에 의해 도 3a에 자세히 도시되는 바와 같이 원 또는 직선의 형태로 기준 원점 주위로 진동한다. 압전 작동기는 X와 Y 방향으로 작용하는 사인 파형 제어 전압에 의해 구동된다. 도면에 도시되는 바와 같이, 압전 작동기를 위해 한 쌍의 X 방향 전극(사인 전압- $Asin\omega t$), 한 쌍의 Y 방향 전극(코사인 전압- $Asin(\omega t + \phi)$, 여기서 ϕ 는 $\pi/2$), 그리고 터널링 전류를 생성시키는데 필요한 수 나노미터 거리의 높이 조절을 위해 Z 방향의 위에 위치한 전극이 있다.

도 3a의 파형 그래프에 도시하고 있는 바와 같이, 따라서 출력 전압(V_{out})은 사인 형태를 가지고 있으나 그 위상과 진폭은 압전 작동기 제어 신호와 같지 않다. V_{out} 의 위상과 진폭을 압전 진동기를 구동하는 제어 전압과 비교함으로써, 탐침의 위치(가장 가까운 원자의 정상으로부터의 방향과 거리)가 얻어지고, 따라서 표면 위에서 탐침의 위치가 해석되어 나타난다.

도 3b에서, 관련된 주파수의 사인 파형 제어 전압과 출력 전압의 진폭과 위상의 비교가 각각 곱셈기(multiplier)(C, C')에 의해 이루어진다. 위상 탐지 과정(PD)과, 진폭 탐지 과정(AD)을 통과 후 「필수적이지는 않으나, 예를 들어 블랙(Harold S. Black)의 *Modulation Theory*(D. Van Nostrand Co., 1953, pp. 141)와, 호로비츠(Paul Horowitz)와 힐(Winfield Hill)의 *The Art of Electronics*(Cambridge University Press, 1993, pp. 1031)에서 기술된 바와 같은 AM 복조 형식에 바람직하다」, 탐침 위치 정보 신호가 생성되며, 그 수학적 증명은, 앞에서 인용된 바 있는 1995년 5월 22일에 출판된

IEEE International Conference on Robotics and Automation Proceedings의 논문에서 찾을 수 있다. 이 신호는 표시, 기록될 수 있으며 및/또한 도 4에 도시된 바와 같이 표본(3)을 움직이는 테이블(T)의 모터 제어와 같이 제어용 피드백(F)으로도 이용될 수 있다.

테이블이 빠른 속도로 움직일 경우, V_{out} 에서 도플러 또는 유사한 주파수 변화가 압전기 구동 전압 주파수에 의해 일어날 수 있다. 그러나, 이는 잘 알려져 있듯이 운동-감지 피드백에 의해 보상될 수 있다.

이러한 과정과 그 수학적 기초에 대한 좀 더 자세한 이해를 돕기 위해, 도 3a와 도 3b의 탐침(2)의 선형 주사 과정의 경우를 예로 들어보자. 함수 V_{out} 은 탐침(2)과 원자 구조 또는 다른 주기적인 구조(3)(주파수 ω' 의)의 반대점(미지의 위치 X_0 에 있는) 사이의 간격에서 야기되는, 터널링 전류(진폭 A의)에 의해 생성되는 출력 전압(V_{out})과, 도 3a에 도시된 바와 같이 주파수(ω) 및 반지름(r)의 탐침 진동의 다음 관계식에 의해 수학식 1로 표현된다;

[수학식 1]

$$V_{out} = -V_o + AJ_o(\gamma\omega') \cos(\omega' X_0) - 2A \sin(\omega' X_0) \sum_{m=1}^{\infty} J_{2m-1}(\gamma\omega') \sin\{(2m-1)\omega t\} + 2A \cos(\omega' X_0) \sum_{m=1}^{\infty} J_{2m}(\gamma\omega') \cos(2m\omega t)$$

여기서 V_o 는 평균 탐침-표면 간격에서의 터널링 전류에 의해 생성되는 전압이며, m 은 정수, 그리고 J 는 베셀(Bessel)함수이다(이는 앞에서 인용된 출원인의 IEEE 논문 식(5)에 해당된다). 수학식 1에서 출력 신호(V_{out})는 탐침(2)의 진동 주파수 이상의 많은 주파수 성분을 담고 있음과 n 차 주파수 성분의 진폭은 $J_n(r\omega')$ 에 비례함을 볼 수 있다.

위치 측정의 목표는 앞에서 설명한 바와 같이, 전압 신호(V_{out})로부터 X_0 의 값을 얻어내는 것이다. 도 3a의 전압 V_{out} 이 좌측에서 입력으로 들어가는 도 3b로 돌아가서, 먼저 일차원 위치 X_0 를 구하는 방법을 고려해 보자. 도 3b의 C에 있는 곱셈기가 수학식 1의 전압 V_{out} 과 탐침 제어 신호 $\sin(\omega t)$ 를 곱해 주게 되고, 이는 주파수 ω 로 탐지되고 저주파 통과(low-pass) 여파기를 지나게 되면 자동적으로 다음 수학식 2로 표현되는 신호를 만들게 된다. 이 신호는 원자 또는 다른 표면의 가장 가까운 정점으로부터의 탐침 위치 X_0 의 값을 나타낸다;

[수학식 2]

$$-A \sin(\omega' X_0) J_1(\gamma\omega')$$

[수학식 3]

$$-A \cos(\omega' X_0) J_2(\gamma\omega')$$

이 수학식 1을 $\cos(2\omega t)$ 로 곱해줌으로써 얻어진다(수학식 2와 3은 앞에서 언급된 출원인의 IEEE 논문 (6)에 해당한다). 이 두 결과로 완전한 위치 측정(X_0)이 이루어진다.

이차원 위치 탐지에서는, 유사한 방법이 Y 방향으로 적용된다. 도 3b와 도 6에서, 곱셈기 C의 탐침 작동 제어 신호 발생기 출력에서 보여지는 두꺼운 선이 관계적으로 X와 Y를 모두 나타낸다.

탐침의 원형 주사 방식에서는, 출력 신호(V_{out})이 수학식 4로 해석된다;

[수학식 4]

$$V_{out} = \dots - 2A \sin(\omega' X_{01}) J_1(\gamma \omega') \sin(\omega t) \\ - 2A \sin(\omega' Y_{01}) J_1(\gamma \omega') \cos(\omega t) \\ + 2A \{ \cos(\omega' X_{01}) - \cos(\omega' Y_{01}) \} J_2(\gamma \omega') \cos(2\omega t) \\ \dots$$

이 수학적 식 4에서 출력 신호는 역시 사인 파형이며, 도 10b의 실험 결과에서 입증되듯 각 성분(수학적 식 4의 $\sin(\omega t)$ 나 $\cos(\omega t)$ 와 같은)이 진폭은 위치 정보 X_{01} , Y_{01} 을 나타냄을 볼 수 있다.

도 5의 경우에서, 진폭 탐지 방식 대신 위상 탐지 방식이 이용되면, 곱셈기 C'(도 3b)는 I-V 변환기에서 나온 출력 전압 (V_{out})과 $\cos(0.5\omega t)$ 를 곱하게 되며, 이는 수학적 식 5 및 수학적 식 6으로 표현된다;

[수학적 식 5]

$$V_{out} \cos(0.5\omega t) = -V_0 \cos(0.5\omega t) + A \sum_{i=0}^{\infty} B(i) \cos \{ (i+0.5)\omega t + \theta(X_0) \}$$

[수학적 식 6]

$$B(i) = \sqrt{J_{p(i)}^2(\gamma \omega') \cos^2(\omega' X_0) + J_{q(i)}^2(\gamma \omega') \sin^2(\omega' X_0)}$$

$$\theta(X_0) = \tan^{-1} \left[\frac{J_q(\gamma \omega') \sin(\omega' X_0)}{J_p(\gamma \omega') \cos(\omega' X_0)} \right]$$

$$p = [0, 2, 2, 4, 4, \dots], \quad q = [1, 1, 3, 3, 5, \dots]$$

p 와 q 는 i 에 해당하는 벡터들이다. 특정 i 에 대해 $J_{p(i)}(\gamma \omega') = J_{q(i)}(\gamma \omega')$ 이 되도록 진동 진폭 r 이 선택되면,

[수학적 식 7]

$$B(i) = J_{p(i)}(\gamma \omega'),$$

$$\theta(X_0) = \omega' X_0$$

따라서, 도 3b에서와 같이, 위상 탐지(PD) 이후, $\omega' X_{01}$ 로 나타낼 수 있는 신호 F가 자동적으로 만들어진다.

도 9는 출원인이 원자 표면(3)위의 1-2 나노미터 범위에서 Pt-Ir선 탐침 끝 (2)을 약 1초간 주사하여 만든, 1.2×1.2 나노미터 크기의 Union Carbide Grade B 흑연의 고평향성 파이롤리틱 흑연(high-oriented pyrolytic graphite, HOPG) 표면 원자의 STM-지형도 이미지이다. 이때, 매트록사(Matlock Company)에서 제조한 길이 0.5인치, 지름 0.25인치의 압전 원통에 200Hz의 사인 파형 제어 전압을 인가하였다. 원통에 탐침(2)이 에폭시를 이용하여 부착되었으며, 도 1의 X 그리고 Y 사인 파형 압전 제어 신호로부터 탐침을 절연하기 위하여 절연 세라믹 원판(7)이 삽입되었다. 도 10a의 컴퓨터 화면에서, 흑연 원자들은 작은 원들과 같은 윤곽선으로 나타나며, 이들은 x, y 제어 신호의 제어 아래 있는 탐침 끝(2)의 회전 진동에서 비롯된 동심원 또는 유사원들에 의해 둘러싸여 왔다. 진동 탐침의 1회 주사에 의해 만들어진(고주파-통과(high-pass)여과 후) 해당(위상과 진폭은 다르지만) 터널링 전류가 도 10b에 도시되고 있다. 앞에서 설명된 바와 같이, 탐침(2)은 예를 들어 앞에서 인용된 특허에서 기술된 형식과 같은 AFM의 외팔보 원자력 상호 작용장 형식(cantilever atomic force interaction field type) 센서 S(도 2)로 대체될 수 있다.

원자 표면 이외에, 예를 들어 1차원 주사를 보여주고 있는 도 5의 전도성 코팅이 된 홀로그래픽 격자(3')과 같은 실제적으로 파형을 띤 표면 또한 본 발명의 나노미터 센서 위치 기술을 이용하여 주사될 수 있음이 이미 지적되었다. 또한 이 기술이 다른 종류의 파형 표면 또는 패선, 또는 그외의 표면에 대해 사용될 수 있음은 명확하다.

센서 탐침은 커패시턴스 정보를 만들 수 있으며, 그 예로 도 8에서 전도성 물질로 코팅된 격자(3)위에서, 직선 진동을 하는 날카로운 전극이 표면 전극(2')과 캐패시턴스적으로 상호 작용을 하는 것을 볼 수 있다.

물론, 본 발명은 도 1 내지 도 5에서와 같은 일차원 위치 선정에만 국한되는 것은 아니다. 도 6은 도 3과 같은 방법으로 제어 전압과 출력 전압의 X와 Y 성분을 유도하는 방식을 보여준다. 더욱이, 앞서 언급한 바와 같이, 파형의 또는 주기적인 요철을 가진 주사 대상 표면은 실질적으로 파형을 가진 표면뿐만 아니라, 주기적인 자기적 또는 전기적 파형이나 요철 또한 포함될 수 있다. 도 7a에서, 주기적인 자기적 파형이 연속적인 N극과 S극 영역에 의해 생성되어, 자기 센서가 직선 진동하면서, 표면이 만들어 내는 자기적 파형과의 자기적인 상호작용에 의하여 사인 형태의 출력 전압이 얻어지는 것을 볼 수 있다. 도 7b에서는 유사한 전기파형이 반대 극성을 가진 페로일렉트릭(feroelectric) 또는 다른 종류의 연속 영역에 의해 만들어지는 것을 볼 수 있다. 여기서는 일레로, 외팔보-형식 전기력 탐지 방식이 사용되는 모습이 보여진다.

이제, 본 발명의 방법 및 장치에서 볼 수 있는 개선점에 관하여 논의하기 위해 도 11b를 보자. 이 도 11b는 도 3a와 도 3b의 합성과 비슷한 것으로, 응답 속도와 정밀도를 향상시킨 본 발명의 위치 탐지 방법을 보여준다. 간결한 설명을 위해, 위상 탐지 방식만이 기술되지만, 이는 진폭 탐지 방식에 똑같이 적용된다. 압전 작동기(1)의 실제 변위가 먼저 변이 센서에 의해 탐지된다. 이 신호는 주파수 합성기에 공급되고, 주파수 합성기는 탐침 진동과 동조되는 신호($\cos(0.5\omega t)$ 와 $2.5\omega t$) 또는 진폭 탐지 방식에서는 $\sin(\omega t)$ 또는 $\cos(2\omega t)$ 를 출력한다. 주파수 합성기에서 나오는 위상 출력 ($2.5\omega t$)를 기준으로 이용하는 위상 탐지 과정(PD) 이후에 곱셈기(C')의 곱셈에 의하여 위치 신호가 얻어진다.

이러한 주파수 합성기(FS)의 기본적인 개략도가 위상-고정 루프(Phase-Locked Loop, PLL)에 기초하여 도 11a에 도시된다. PLL(점선으로 둘러싸인 부분)은, 루프 필터, 적분기, 진동기를 포함한다. 그 위상 출력은 곱셈기(C')의 입력과 출력 신호 사이의 위상 차이를 감지하여 입력 위상과 들어맞도록 제어된다. 도 11a에서와 같이, PLL의 출력 신호를 사인 함수 생성기에 공급함으로써, 주파수 합성이 쉽게 이루어질 수 있다.

이 새로운 방식은 환경 조건 변화에 따른 탐침 진동의 위상 변화가 교정될 수 있기 때문에, 탐침 진동 주파수가 그 고유 진동수와 비슷하더라도 위치 측정에 있어서 안정적이며 고정 밀도의 결과를 거둘 수 있다.

도 12는 도 11b와 비슷하지만, 앞에서 기술된 도 4의 형상화 방식과 관련되어 논의된 바와 같은 탐침과 표면의 상대 운동을 제어하기 위하여 위치 신호가 피드백되는 것을 보여준다 이는 특히 격자의 정점/골의 운동을 추적하기 위해서이다. 이 경우 센서 탐침 위치는 다음 수학적식과 같이 표현된다.

[수학적식 8]

$$x = r \sin(\omega t) + x_A$$

여기서 x_A 는 센서 탐침 진동의 중심 위치이다. 만약

[수학적식 9]

$$X_0 + x_A = \frac{n\pi}{\omega'}$$

$$n = 0, \pm 1, \pm 2 \dots$$

이면, 위상탐지(PD) 이후의 신호

[수학적식 10a]

$$\tan^{-1} \left[\frac{J_a(i)(r\omega') \sin(\omega' X_0 + \omega' x_A)}{J_b(i)(r\omega') \cos(\omega' X_0 + \omega' x_A)} \right]$$

는 진동 진폭 변화에 관계없이 항상 n이 된다. 따라서, 도 3b의 위상 탐지 출력 신호가 n이 되도록 센서 탐침 진동의 중심 위치가 제어되면, 그 위치는 $X_0 = -x_A + n\pi/\omega'$ 이 된다. 역시, x_A 는 알려져 있다고 가정한다. 유사하게, 만약

[수학식 10b]

$$X_0 + x_A = \frac{\pi}{2\omega'} + \frac{n\pi}{\omega'}$$

$$n = 0, \pm 1, \pm 2 \dots$$

이면, 위상검출(PD) 이후의 신호는 진동 진폭이 변화에 관계없이 항상 $\pi/2 + n\pi$ 가 된다. 이 경우에는 센서 탐침 진동의 중심 위치, $X_0 + x_A$ 가 격자의 제로(zero) 교차점 위에서 "고정(locked)" 되어 있다. 이렇게 "고정"된 조건에서는, X_0 의 위치는 x_A 의 값을 이용하여 수학식 10b에 의하여 계산될 수 있다.

이 위치 탐지 개선 방식은, 그 어떤 탐침 진동 진폭 변화 또는 오차에도 민감하지 않아서 더 높은 정확도를 가진다.

하나의 탐침을 이용하는 방식이 기술되었지만, 탐침들을 더 부가적으로 사용할 수도 있다. 예를 들어 도 22에서, 두 개의 탐침, 즉 탐침 A와 탐침 B가 거리 $X_1 = (2n\pi + \theta)/\omega'$ (여기서 n은 임의의 정수)를 가지고 직선의 격자 표면을 따라 배치되어 있음을 볼 수 있다. 각 탐침은 다른 위상을 갖고 같은 주파수 ω 로 진동된다. 이는 각각 다음 수학식 11과 같이 표현할 수 있다.

[수학식 11]

$$x_A(t) = r \sin(\omega t)$$

$$x_B(t) = r \sin(\omega t + \theta)$$

따라서, I-V 변환기 2의 출력을 I-V 변환기 1로부터 빼면, 출력 전압은 $\theta = \frac{\pi}{2}$, $x_1 = \pi/2\omega'$ 일 때, 다음 수학식 12와 같이 된다.

[수학식 12]

$$V_{out} = \dots$$

$$\begin{aligned} & -2A \sin(\omega' X_0) \sum_{m=1}^{\infty} J_{2m-1}(r\omega') \sin\{(2m-1)\omega t\} \\ & + 2A \cos(\omega' X_0) \sum_{m=1}^{\infty} (-1)^{m+1} J_{2m-1}(r\omega') \cos\{(2m-1)\omega t\} \\ & \dots \end{aligned}$$

수학식 12가 다음 수학식 13과 같이 됨이 명백해진다.

[수학식 13]

$$V_{out} = \dots$$

$$-2AJ_{2m-1}(r\omega') \sum_{m=1}^{\infty} \cos\{(2m-1)\omega t + (-1)^{m+1}\omega' X_0\}$$

$$\dots$$

위치 정보(X_0)는 위상 탐지(도 3b, 도 11b, 및 도 12의 PD) 이후에 얻어진다. Θ 와 Θ' 의 값을 변화함으로써, 이 방법으로 여러 가지 변화된 방식이 가능하다.

더 복잡해짐에도 불구하고, 이 방식의 한 이점은 위치 측정을 위해 오직 일차(first order) 주파수만이 필요함에 따라 I-V 변환기의 필요 주파수 대역폭이 줄어들 수 있다는 것이다. 하나의 탐침을 이용할 경우, 수학적 2와 3에서 나타내듯 I-V 변환기는 두 배 더 높은 주파수 대역폭을 가져야 한다. 각 탐침에 공통적으로 나타나는 잡음의 효과도 이 방식으로 제거된다.

도 26은 X, Y 직각 위치 측정을 위해 이차원 격자에 적용된 다른 형식의 위치 측정 방식을 보여준다. 첫 번째 경우에는 두 개의 센서 탐침이 기준점 위에서의 운동 방향에 대하여 서로에 대각선으로 위치하고 있는 것을 볼 수 있다. 그 격자 양식은 다음과 같이 표현될 수 있다;

[수학적 식 14]

$$Z = A_1 \cos[\omega'(x_j + X_{0j})] + A_1 \cos[\omega'(y_j + Y_{0j})], \quad j = 1, 2$$

이제, 오직 탐침 1에만 초점을 맞추면 출력 전압(V_{out1})에 $\cos(0.5\omega t)$ 를 곱하여, 다음을 얻을 수 있다.

[수학적 식 15]

$$V_{out1} \cos(0.5\omega t) = \{A \cos(\omega' Y_{01}) - V_{01}\} \cos(0.5\omega t)$$

$$+ A \sum_{i=0}^{\infty} B(i) \cos\{i + 0.5\omega t + \theta(X_{01})\}$$

여기서,

[수학적 식 16]

$$B(i) = \sqrt{J_{p(i)}^2(r\omega') \cos^2(\omega' X_{01}) + J_{q(i)}^2(r\omega') \sin^2(\omega' X_{01})}$$

$$\theta(X_0) = \tan^{-1} \left[\frac{J_q(r\omega') \sin(\omega' X_{01})}{J_p(r\omega') \cos(\omega' X_{01})} \right]$$

$$p = [0, 2, 2, 4, 4, \dots], \quad q = [1, 1, 3, 3, 5, \dots]$$

그리고 p 와 q 는 i 에 대응하는 벡터이다. 특정한 i 에 대하여 $J_{p(i)}(r\omega') = J_{q(i)}(r\omega')$ 이 되도록 진동 진폭 r 이 정해지면,

[수학적 식 17]

$$B(i) = J_{p(i)}(r\omega'),$$

$$\theta(X_{01}) = \omega' X_{01}$$

이 된다. 따라서 x 방향의 위치 정보 X_{01} 은 위상 탐지(예를 들어 도 3b의 PD)를 통하여 얻어진다. 유사한 방법으로, Y 방향의 위치 정보 Y_{02} 는 탐침(2)을 통하여 얻어진다.

다탐침(multi-probe)을 이용한 X, θ 위치 측정을 위한 1차원 격자를 또한 볼 수 있다. 이 두 번째 경우, 각 탐침은 미리 정해진 방향으로 진동하고 위치는 같은 방향으로 측정된다. 따라서 회전 중심이 알려져 있다고 가정하면, 두 측정 결과를 비교하여 기대되는 위치 측정을 할 수 있다.

앞에서 설명된 간격-제어 문제를 고려해 보자. 도 13a에서 출력 신호(V_{out})에 담긴 위치 정보를 효과적으로 분리해 내는, 개선된 간격 제어 장치를 볼 수 있다. 이는 리셋 가능한(resettable) 정점 탐지 회로 RPD를 포함하고 있으며, 이는 또한 디지털 계산으로 이루어질 수도 있다. 이 회로는 최대 출력 전압을, 탐침 진동 한 주기보다 조금 더 오랜 시간 동안 저장한다. 회로가 갖는 최고치는 압전 작동기의 Z 축전압에 먼저 피드백되어져, 그 최고치를 미리 정한 수준에서 유지하면서 탐침은 격자 표면으로부터 최소의 간격을 유지할 수 있다. 그 동안 출력 전압(V_{out})은 위치 탐지 회로에 공급된다. 간격 제어 주파수 응답은 탐침 진동 주파수보다 훨씬 더 느리기 때문에, 이 방식은 그에 따르는 위치 측정 과정에 영향을 주지 않는다.

도 13b는 도 13a에서 기술된 방식으로 얻어진 실험 데이터를 보여준다. 도 14a에서 기술된 마이크로 가공된 탐침이 사용되었다. 상단의 그래프는 격자가 이동하기 전의 V_{out} 를 보여준다. 탐침은 약 3kHz로 진동된다. X 축은 시간(200 μ sec/div) 그리고 Y 축은 V_{out} 을 나타낸다. 하단의 그래프는 격자 위치가 약간 움직인 후의 결과를 보여준다. 신호 양식의 변화를 볼 수 있다. 따라서 본 발명의 새로운 제어 방식이 위치 정보의 손실 없이 적당한 간격 거리를 유지함이 명확해졌다.

도 25는 비선형 함수 매핑(mapping)을 이용한 간격 제어 방식을 보여준다. 터널링 전류 대 간격 거리 곡선이 저 출력 전압 영역에서 선형에 가깝게 매핑되었다. 그러나 그 매핑에서도 여전히 간격 거리가 매우 작아지면 대응 함수가 급격히 올라가게 된다. 이 매핑 함수는 먼저 정점 탐지기 신호에 적용된다. 이러한 매핑으로부터 나온 출력 신호는 Z 전압 제어기를 통한 간격 제어의 피드백 신호로 사용된다. 이는 매우 안정적인 제어 방식이며, 탐침이 격자 표면에 충돌하지 않도록 보증한다.

개선된 간격 제어 방식에 관하여 좀 더 논의하자면, 도 16은 압전 또는 일렉트로스트릭티브(electrostrictive) 작동기와 같은 고체 상태의 작동기 응용에서, 큰 작동 범위에서 디지털 제어 시스템을 이용하여 높은 정밀도를 유지하면서 간격 거리를 제어하는 방식을 보여준다. 이는 두 개의 디지털/아날로그(D/A) 변환기를 사용하여 이루어진다. Z 방향으로의 필요한 제어 전압을 계산한 후 이 제어 신호는 두 개의 D/A를 통하여 전송된다. 여파기 F1과 F2를 통과한 V_1 과 V_2 는 고압 합산 증폭기(high voltage summing amplifier)를 통하여, 각각 R/R1(=1)과 R/R2(=10)만큼 증폭된 후 더해진다. 만약 D/A가 16비트 해상도와 +/- 10V 출력 범위를 가지면, 이 방식에서는 고압 증폭기에서의 출력 Z-축 전압이 +/- 110V 사이를 연속적으로 변화할 수 있다. 이런 높은 전압 영역에도 불구하고, 출력 해상도는 D/A의 해상도에 의하여 결정되므로 약 0.3mV이다.

일반적으로 신호가 증폭되면 잡음 또한 증폭된다. 이 영향을 최소화하기 위하여, 여파기 F2가 저주파수-통과(low-pass) 여파기를 형성한다. F1은 고압 증폭기에서의 과도 응답을 최소화시키는 전달 함수(transfer function)를 갖도록 선택된다.

앞에서 설명한 종전의 탐침 제조 방식의 한계와 그 개선점이 도 14a에 도시되어 있다. 이는 <100>-방향의 실리콘 결정 웨이퍼(도 14a의 단계(1))로 만들어진 탐침의 생산 공정을 보여준다. 이 방식은 수산화칼륨(KOH)과 같은 식각제(etchant)를 이용하면-(단계(3)) <111> 표면의 식각률(etch rate)이 다른 모든 결정 평면보다 훨씬 느리게 된다는 사실을 이용하였다. 보호층에 의하여 마스크 패턴을 만든 후 (단계(2)), 54.7도의 경사를 가진 <111> 결정 평면을 남기고 비등방성 식각이 행해진다. 이 방법에서는 또한 마스크 패턴의 볼록한 가장자리와 같은 열린 공간의 모양이 이러한 식각(단계(3))으로 아래로 갈수록 폭이 좁아지는 언더컷(undercut) 형태가 되는 사실을 이용하였다. 그 결과, 창끝과 같은 모양의 탐침이 만들어진다. 최종적으로 매우 얇은 (<50nm) 금속 막이 증착되어(단계(4)) 전극이 되고, 탐침이 적당한 모양으로 잘려져(단계(5)), 기저 장치에 부착된다. 이 탐침은 두께 방향으로 가장 낮은 고유 주파수를 가지게 되어 본 발명의 개선된 성능을 얻는데 이 상적인 기여를 한다. 전통적인 원자력 현미경(AFM) 탐침과 비교하여 이 탐침은 전선 연결 공간의 제약이 없어 기저에 부착하기 쉽다.

도 14b는 이 새로운 탐침 설계의 또다른 장점을 도식적으로 보여준다. 탐침 끝모양은 더 나아가서, 비등방성 식각과 언더컷의 결과로 약간의 곡률을 가진 대칭형의 얇은 스크류드라이버 머리 형태로 만들어질 수 있다. 대칭적인 설계 덕분에, 탐침은 격자 표면과의 각도의 초기 세팅에서 더 큰 허용 오차를 가질 수 있다. 두 번째로, 이 탐침 설계는 국부적으로 평균화

된 신호 출력을 만드는 전통적인 포인트 탐침에 비하여 실제 탐침 면적을 증가시켰다. 이는 최종 위치 측정 결과에서 신호 대 잡음비를 늘리는데 기여한다. X 방향보다 Y 방향으로 탐침을 훨씬 빨리 진동시키면 유사한 효과를 얻을 수 있으며, 이 또한 도면에 표시되어 있다.

도 15에, 도 14a와 도 14b의 설계를 기초로 한 모노리식 탐침 센서/작동기가 도시되어 있다. 진동 작동기는, 압전막 증착 또는 마그네토스트릭티브(magnetostrictive)막 증착으로, 커패시턴스적(capacitance) 작동 또는 다른 형식의 고체 작동기를 위한 한 쌍의 전극을 만들어 제조할 수 있다. 도 15에 도시된 바와 같이, 압전막으로된 탐침 장치는 관통형(Pierce type) 진동기 회로의 일부가 되고 있다(그러나, 물론 이 회로에만 국한되는 것은 아니다). 진동 정보는 작동기 조종기에 양(+)으로 피드백되어, 안정된 진폭을 가능하게 한다.

절대 위치 측정으로 위치 탐지의 향상을 가져오는 문제는 앞에서 인용되었다. 도 17a와 도 17b는 본 발명을 이용하여 그러한 절대적 위치 정보를 얻는 방법을 나타낸다. 도 17a에서는, 같은 기저 평면에서는 서로 인접하여 형성된 두 개의 홀로그래픽 격자를 나타낸다. 이 두 개의 홀로그래픽 격자는 서로 약간 다른 주기 (p, p')을 가지고 있다. 두 개의 탐침이 격자들 위에서 진동하면, 측정된 위치는 같은 값을 표시한다. 그러나 격자 주기의 약간의 차이로 인하여, 가장 가까운 정점까지의 거리와 각 격자 주기의 비는 다른 값을 가진다. 사실, 그 비의 차이는 원점으로부터의 절대 거리의 함수이다. 이는 두 개의 신호가 비슷한 주파수 성분을 가질 때 일어나는 비팅(beatting) 효과를 생각하면 쉽게 이해할 수 있다. 따라서 이 비의 차이를 계산함으로써, 나노미터 정밀도의 절대 위치 정보를 얻을 수 있다.

도 17b는 원점의 정확한 위치를 정의하는 방법을 보여준다. 이 경우, 격자의 끝에는 평평한 면이 형성되어 있다. 수학적 1에서, 탐침 진동의 중심이 격자 영역에서 평면 영역으로 움직임에 따라 진폭 탐지(도 3b의 AD)의 출력이 0이 됨이 분명하다. 그러므로 출력 전압(V_{out})의 고주파 성분의 진폭을 측정함으로써 절대 원점의 위치를 정할 수 있다. 도 17a의 두 격자 방법과 원점 결정 방법을 조합하면, 완전한 절대 위치 측정이 가능하다.

더욱이, 도 24는 하나의 탐침이 두 개의 격자 표면을 번갈아 가면서 X와 Y 방향으로 동시에 진동함으로써 절대 위치를 측정하는 방법을 보여준다. 각 격자 영역에서 가장 가까운 정점까지의 거리와 격자 주기 사이의 비를 비교하여 절대 위치를 얻을 수 있다.

만일 격자 표면에 탐침 진동 평면과 약간 경사진 표면이 있으면, 탐침 작동기가 Z 방향으로 움직일 때 탐침 좌표의 원점이 격자 좌표로부터의 상대적인 위치를 바꾸게 되고, 이는 위치 측정의 오차를 야기한다. 따라서, 그 각도를 아는 것이 적절한 교정을 위하여 중요하다. 도 18은 그러한 각도를 측정하는 방법을 보여준다. 이 경우, 격자 표면과 마이크로 가공된 탐침 표면이 레이저 또는 LED 광원의 단순한 광학적 거울로 이용된다. 도면에서 볼 수 있듯, 두 영역으로 나누어진 광탐지기(photo detector)를 통과하는 빛의 세기(intensity)의 차이가 격자 표면과 탐침 진동 평면 사이의 각도뿐만 아니라 x 방향의 탐침 운동도 나타낸다.

그러므로, 본 발명은 별도의 각도 센서없이 각도 측정을 가능하게 하였다. 격자 표면의 경사도 α가 수학적 1에서 기술된 출력 전압(V_{out})에 arcsin(ωt)라는 항을 부가시킴에 따라, sin(ωt)과 sin(3ωt) 성분의 진폭은 다음과 같이 된다;

[수학적 18]

$$E = \alpha r - 2A \sin(\omega' X_0) J_1(r\omega')$$

$$F = -2A \sin(\omega' X_0) J_3(r\omega')$$

결과적으로, 출력 신호, $E - EJ_1(r\omega')/J_3(r\omega') = \alpha r$ 이 경사도 α를 나타낸다. 물론, 표본 표면이 단순히 편평하다면, 경사도 α를 얻기 위해서 sin(ωt) 성분의 진폭만 측정하면 된다. 이 방법은 각도 변화에 상당히 민감하므로, 일반적 용도의 각도 측정에도 또한 매우 유용하다.

더욱이, 전술된 위상 탐지 방식에서, 탐침 진동 반경이 특정 ρ 에 대하여 $J_{\mu(\rho)}(r\omega') = J_{q(\rho)}(r\omega')$ 을 만족하도록 선택하면 편리하다. 그러나, 정확한 탐침 진동 진폭을 아는 것이 쉬운 일은 아니다. 본 발명은 또한 외부 탐침 변위 센서를 사용하지 않고 탐침 진동을 정확히 측정하는 개선책을 제시한다.

예를 들어, 수학적 1에서, sin(2ωt)와 sin(4ωt)의 진폭은 다음과 같이 표현된다.

[수학식 19]

$$A = 2A \cos(\omega' X_0) J_2(r\omega')$$

$$B = 2A \cos(\omega' X_0) J_4(r\omega')$$

따라서, 출력 신호는 다음과 같이 되며;

[수학식 20]

$$\frac{A}{B} = \frac{J_2(r\omega')}{J_4(r\omega')}$$

이는 탐침 진동 진폭 r 의 함수로 나타난다.

센서 전극들의 전기적 주사 속도가 v 라면, 터널링 전류 증폭기를 통하여 나오는 출력 전압(V_{out})은, 탐침 좌표가 첫 번째 탐침 전극에 고정되어 있다고 가정할 경우 다음과 같이 표현될 수 있다.

[수학식 21]

$$V_{out} = -V_0 + A \cos[\omega' \{v \cos(\theta t) + X_0(t)\}]$$

마지막 전극의 위치가 $x = \frac{2\pi}{\omega'} \frac{n-1}{n}$ (n 은 탐침 전극의 수)라면, 도 3b의 위상 탐지기(PD)에 V_{out} 를 넣어 주어 위치 X_0 를 알아낼 수 있다.

도 20a는 고속 탐침 주사의 방법 및 장치를 보여준다. 탐침 구조는 다탐침 전극으로 만들어져 있으며, 이들은 각각의 I-V 변환기에 연결되어 있다. 다탐침들은 격자의 정점/골 선에 약간 경사지도록 위치되어 있다. 따라서, I-V 변환기의 출력 전압을 전자적으로 주사(다중 송신)함으로써, 초고속 위치 측정 시스템이 가능하게 된다. 도 20b는 이 발명의 또다른 이점을 설명해 준다. I-V 변환기의 출력 전압이 같은 시간 간격으로 주사되도록 전기 펄스 타이밍이 만들어진다. 이는 하나의 탐침을 한 방향으로만 일정 속도로 움직이는 것과 대등한 것이 된다. 따라서 다중 송신된 신호 출력은 $\sin(\omega vt + \omega X_0)$ 를 표현한다. 여기서 ω 는 격자의 공간 주파수, v 는 주사 속도이고 X_0 은 측정되는 위치이다. 위상 정보는 위치를 알아내고, 이는 위상 탐지 회로에 의해 쉽게 알아낼 수 있음은 명백하다.

도 21은 다전극(탐침) 위치 탐지 장치의 또다른 방식을 보여준다. 도 20의 모양과 달리, 변형된 이 형태에서는 서로 이웃한 전극들이 층을 지어 다탐침을 형성하고 있다.

이러한 기술의 형태에 더욱 변형된 형태가 있을 수 있으며, 이는 첨부된 청구의 범위에서 정의되는 본 발명의 기본 사상과 영역에 속한다고 간주한다.

(57) 청구의 범위

청구항 1.

탐침과 주기적 파형의 표면이 상대적으로 움직일 때 상기 표면을 주사하는 탐침의 나노미터 규모의 위치를 실시간으로 측정하는 방법으로서,

탐침(2)과 표면(3) 사이에 감지장을 형성하는 단계와,

사인 형태의 제어 전압(X, Y)에 의하여 주사 도중 탐침(2)의 기준 원점 주위에서 탐침(2)을 진동시키는 단계와,

상기 진동 도중 그리고 표면을 지난 후에 감지장에 의하여 생성된 사인 형태의 출력 전압(V_{out})을 측정하는 단계와,

상기 사인 형태의 출력 전압을 상기 사인 형태의 제어 전압에 의해 곱함으로써 상기 제어 전압과 출력 전압의 위상 및/또는 진폭을 비교하는 단계와,

상기 비교 단계를 통하여, 가장 가까운 파상 표면의 정점으로부터 탐침의 방향과 거리를 나타내는 신호, 즉 표면(3)에서의 탐침(2)의 위치를 나타내는 위치 신호를 연속적으로 얻어내는 단계와,

상기 사인형 제어 전압과 실제 탐침 진동 사이의 위상 지연을 제거하는 단계를 포함하는 것인 위치 측정 방법.

청구항 2.

제1항에 있어서, 상기 위상 지연 제거 단계는 상기 탐침 진동과 동기화된 사인 형태의 신호를 공급하기 위하여 탐침(2)의 실제 진동 변위를 탐지하고 이러한 탐지에 응답하여 주파수 합성기를 제어함으로써 이루어지고,

상기 곱셈에 있어 상기 사인 형태의 제어 전압 대신 상기 동기화된 신호를 이용하는 것인 위치 측정 방법.

청구항 3.

제1항에 있어서, 상기 위치 신호는 상기 탐침(2)과 표면(3)의 상대적인 운동을 제어하기 위하여 피드백되는 것인 위치 측정 방법.

청구항 4.

제1항에 있어서, 상기 탐침 진동의 중심 위치는 그 위치의 위상 탐지 후의 출력 신호가 항상 $n\pi$ 또는 $\pi/2 + n\pi$ 가 되게 맞추어지도록 제어되는 것인 위치 측정 방법.

청구항 5.

제1항에 있어서, 이격되어 진동하는 한 쌍의 탐침 중에서, 한 탐침은 X축과 같은 1차원을 따라 위치 신호를 얻고, 다른 한 탐침은 Y축과 같이 수직인 차원을 따라 앞의 탐침과 동일한 주파수이지만 상이한 위상으로 진동되는 것인 위치 측정 방법.

청구항 6.

제5항에 있어서, 상기 탐침들은 표면 위에서의 운동 방향에 대하여 서로 대각선으로 위치된 것인 위치 측정 방법.

청구항 7.

제1항에 있어서, 이격되어 유사하게 진동하는 한 쌍의 탐침들이 이용되는 것인 위치 측정 방법.

청구항 8.

제7항에 있어서, 각각의 탐침은 1차원을 따라 진동됨으로써 그 차원의 위치 측정을 위한 주사가 이루어지는 것인 위치 측정 방법.

청구항 9.

제1항에 있어서, 탐침-대-표면 간격이 탐지되고, 그 탐지로부터 생성된 신호가 피드백되어, 탐침이 표면과 충돌하는 것을 방지하는 것인 위치 측정 방법.

청구항 10.

제9항에 있어서, 상기 탐지 단계는 표면의 정점에 해당하는 최대 출력 전압을 탐침 진동의 한 주기보다 다소 오래 확보하고, 그 전압을 피드백하여 탐침-대-표면 최소 간격을 제어하는 단계를 포함하는 것인 위치 측정 방법.

청구항 11.

제10항에 있어서, 상기 최대 출력 전압을 확보한 것이 표면의 다음 정점을 위하여 리셋되는 것인 위치 측정 방법.

청구항 12.

제9항에 있어서, 출력 신호 대 간격(gap)이 비선형적으로 매핑되고, 최소 간격에서 급격히 상승하며, 상기 매핑으로부터의 출력 신호가 피드백 신호로 이용되는 것인 위치 측정 방법.

청구항 13.

제1항에 있어서, 상기 탐침은 마이크로 가공에 의하여 창끝과 같은 모양(spear-head like shape)으로 만들어지는 것인 위치 측정 방법.

청구항 14.

제13항에 있어서, 금속막 전극 표면이 상기 탐침에 붙여지는 것인 위치 측정 방법.

청구항 15.

제13항에 있어서, 상기 탐침 끝은 약간의 곡률을 가지고 면도날 같이 대칭적으로 얇게 만들어지는 것인 위치 측정 방법.

청구항 16.

제14항에 있어서, 상기 탐침은 모노리식 탐침 센서/작동기(actuator)로 이용되도록 실리콘 등과 같은 결정 웨이퍼로부터 만들어지는 것인 위치 측정 방법.

청구항 17.

제16항에 있어서, 상기 탐침은 전자 진동기 회로의 일부로서 연결되는 것인 위치 측정 방법.

청구항 18.

제7항에 있어서, 약간 다른 주기를 가진 이웃한 한 쌍의 격자 위에서 상기 한 쌍의 탐침이 진동되고, 가장 가까운 표면 파형 정점으로부터의 거리와 각 격자 주기 사이의 상이한 비(ratio)들을 얻어내고, 그 비의 값 차이를 계산함으로써 절대 위치 정보를 얻어내는 것인 위치 측정 방법.

청구항 19.

제1항에 있어서, 상기 탐침은 한 쌍의 이웃한 격자 표면 위에서 X와 Y 양방향으로 동시에 진동하고, 가장 가까운 표면 파형 정점에서의 거리와 각 격자 주기간의 거리의 비들을 비교하여 절대 위치 정보를 얻어내는 것인 위치 측정 방법.

청구항 20.

제1항에 있어서, 격자 표면이 어떤 평면에 약간 경사져 있으며, 상기 탐침이 그 평면 위에서 진동되고, 그 경사각은 탐침과 격자로부터 빛을 반사시키고 반사광의 세기 차이를 탐지함으로써 측정되는 것인 위치 측정 방법.

청구항 21.

제1항에 있어서, 상기 탐침은 많은 집합의 탐침 전극으로 이루어져 있으며, 각 전극은 주사 전류 출력 신호를 만들고, 다(多)전류 신호를 그에 해당하는 사인형 출력 전압으로 멀티플렉싱 또는 동시 변환하여 위치 신호를 얻어내는 것인 위치 측정 방법.

청구항 22.

제21항에 있어서, 상기 탐침은 연속적으로 층지어진 전극들이 다수의 인접한 탐침의 스택을 이루는 형태로 만들어지는 것인 위치 측정 방법.

청구항 23.

탐침과 주기적 파상의(undulating) 표면이 상대적으로 움직일 때 상기 표면을 주사하는 센서 탐침의 나노미터 규모의 위치를 실시간으로 측정하는 장치로서,

상기 탐침(2)의 조합으로, 탐침과 표면(3) 사이에 전류를 형성하는 수단과,

사인 형태의 제어 전압에 의하여 주사 도중 탐침의 기준 원점 주위에서 탐침(2)을 진동시킬 수 있는 수단과,

상기 진동 도중 그리고 표면(3)을 지난 후에 전류에 의하여 생성된 사인 형태의 출력 전압(V_{out})을 측정하는 수단과,

이 사인 형태의 출력 전압과 사인 형태의 제어 전압을 곱하는 수단에 의하여 제어 전압과 출력 전압의 위상 및/또는 진폭을 비교하는 수단과,

상기 비교를 통하여, 가장 가까운 표면 파상이나 원자의 정점으로부터 탐침의 방향과 거리, 즉 표면에서의 탐침의 위치를 나타내는 위치 신호를 연속적으로 얻어내는 수단과,

사인형 제어 전압과 실제 탐침 진동 사이의 위상 지연을 제거하는 수단을 포함하는 위치 측정 장치.

청구항 24.

제23항에 있어서, 상기 위상 지연 제거 수단은 탐침의 실제 진동 변위를 측정하는 회로와, 그 측정에 반응하여 그 진동에 동기화된 사인형의 합성된 신호를 제공하는 주파수 합성기, 및 사인형 제어 전압 대신 상기 동기화된 신호를 상기 곱셈 수단으로 입력하는 수단을 포함하는 것인 위치 측정 장치.

청구항 25.

제24항에 있어서, 상기 주파수 합성기는 위상 고정 루프를 이용하는 것인 위치 측정 장치.

청구항 26.

제23항에 있어서, 탐침과 표면의 상대적인 운동을 제어하기 위하여 위치 신호를 피드백하도록 피드백 회로가 이용되는 것인 위치 측정 장치.

청구항 27.

제23항에 있어서, 탐침 진동의 기준 원점을, 그 기준 원점에 대한 위상 탐지 후 출력 신호가 항상 $n\pi$ 또는 $\pi/2 + n\pi$ 가 되게 조정되도록 제어하는 위한 수단이 이용되는 것인 위치 측정 장치.

청구항 28.

제23항에 있어서, 이격되어 진동하는 한 쌍의 탐침 중에서, 한 탐침은 X축과 같은 1차원을 따라 위치 신호를 얻고, 다른 한 탐침은 Y축과 같이 수직인 차원을 따라 앞의 탐침과 동일한 주파수이지만 상이한 위상으로 진동되는 것인 위치 측정 장치.

청구항 29.

제28항에 있어서, 상기 탐침들은 표면 위에서의 운동 방향에 대하여 서로 대각선으로 위치되는 것인 위치 측정 장치.

청구항 30.

제23항에 있어서, 이격되어 유사하게 진동하는 한 쌍의 탐침들이 이용되는 것인 위치 측정 장치.

청구항 31.

제30항에 있어서, 각각의 탐침을 하나의 차원을 따라 진동시키는 수단에 의하여 그 차원의 위치 측정을 위한 주사가 이루어지는 것인 위치 측정 장치.

청구항 32.

제23항에 있어서, 탐침-대-표면 간격을 탐지하고, 탐지로부터 신호를 생성하는 수단과 그 신호를 피드백하여, 탐침이 표면과 충돌하는 것을 방지하는 수단이 이용되는 것인 위치 측정 장치.

청구항 33.

제32항에 있어서, 탐지 수단이 표면의 정점에 해당하는 최대 출력 전압을 탐침 진동의 한 주기 보다 다소 오래 확보하는 회로와, 그 전압을 피드백하여 탐침-대-표면 최소 간격을 제어하는 수단을 포함하는 것인 위치 측정 장치.

청구항 34.

제33항에 있어서, 상기 전압 확보 회로가 표면의 다음 정점에 의하여 리셋되는 것인 위치 측정 장치.

청구항 35.

제32항에 있어서, 출력 신호 대 간격을 비선형적으로 매핑하고, 최소 간격에서 급격히 상승하며, 상기 매핑으로부터의 출력 신호가 피드백 신호로 사용되는 수단이 이용되는 것인 위치 측정 장치.

청구항 36.

제23항에 있어서, 상기 탐침은 마이크로 가공에 의하여 창끝과 같은 모양으로 만들어지는 것인 위치 측정 장치.

청구항 37.

제36항에 있어서, 금속막 전극 표면이 탐침에 인가되는 것인 위치 측정 장치.

청구항 38.

제36항에 있어서, 상기 탐침 끝은 약간의 곡률을 가지고 면도날 같이 대칭적으로 얇게 만들어지는 것인 위치 측정 장치.

청구항 39.

제37항에 있어서, 상기 탐침은 모노리식 탐침 센서/작동기로 이용되도록 실리콘 등과 같은 결정 웨이퍼로부터 만들어지는 것인 위치 측정 장치.

청구항 40.

제39항에 있어서, 상기 탐침은 전자 진동기 회로의 일부로서 연결되는 것인 위치 측정 장치.

청구항 41.

제30항에 있어서, 약간 다른 주기를 가진 이웃한 한 쌍의 격자 위에서 한 쌍의 탐침이 진동되고, 가장 가까운 표면 파형 정점으로부터의 거리와 각 격자 주기 사이의 다른 비를 얻어내고, 그 비의 값 차이가 절대 위치 정보를 알려주는 것인 위치 측정 장치.

청구항 42.

제23항에 있어서, 상기 탐침은 한 쌍의 이웃한 격자 표면 위에서 X와 Y 양방향으로 동시에 진동하고, 가장 가까운 표면과 형 정점에서의 거리와 각 격자의 격자 주기 사이의 비가 절대 위치 정보를 알려주는 것인 위치 측정 장치.

청구항 43.

제23항에 있어서, 격자 표면이 어떤 평면에 약간 경사져 있으며, 상기 탐침이 그 평면 위에서 진동되고, 상기 탐침과 격자로부터 빛을 반사시키는 수단 및 반사광의 세기 차이를 탐지하는 수단으로 이루어진 계산 수단에 의하여 그 경사도를 측정하는 수단이 이용되는 것인 위치 측정 장치.

청구항 44.

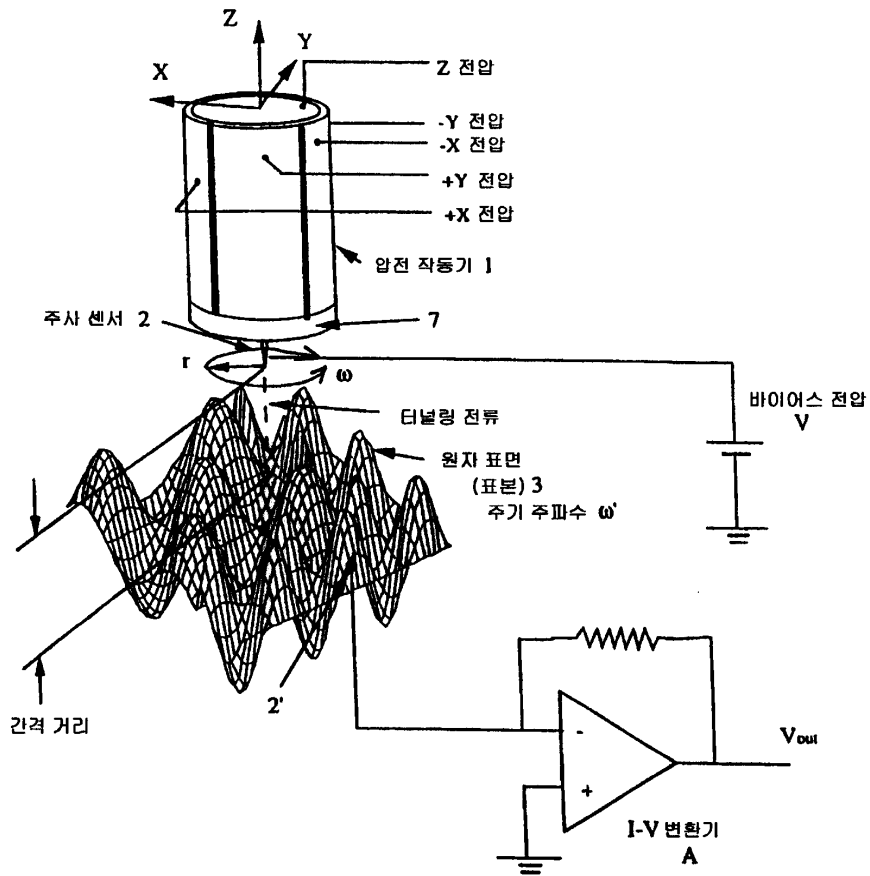
제23항에 있어서, 상기 탐침은 많은 집합의 탐침 전극으로 이루어져 있으며, 상기 각각의 전극은 주사 전류 출력 신호를 만들고, 다(多)전류 신호를 그에 해당하는 사인형 출력 전압으로 멀티플렉싱 또는 동시 변환하여 위치 신호를 얻어내는 수단을 이용하는 것인 위치 측정 장치.

청구항 45.

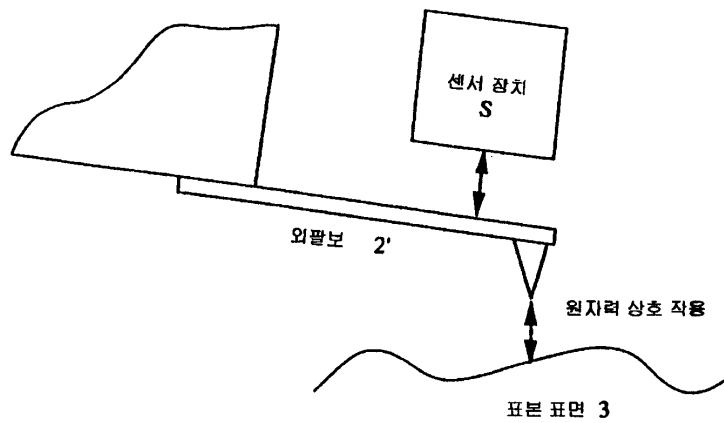
제44항에 있어서, 상기 탐침은 연속적으로 층지어진 전극들이 많은 인접한 탐침의 스택을 이루는 형태로 만들어지는 것인 위치 측정 장치.

도면

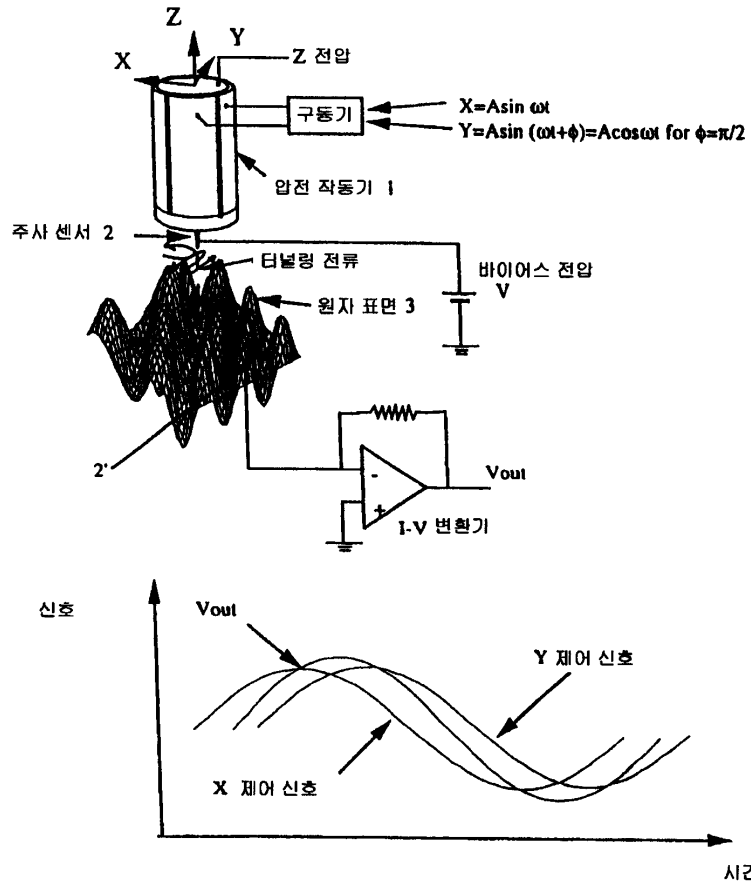
도면1



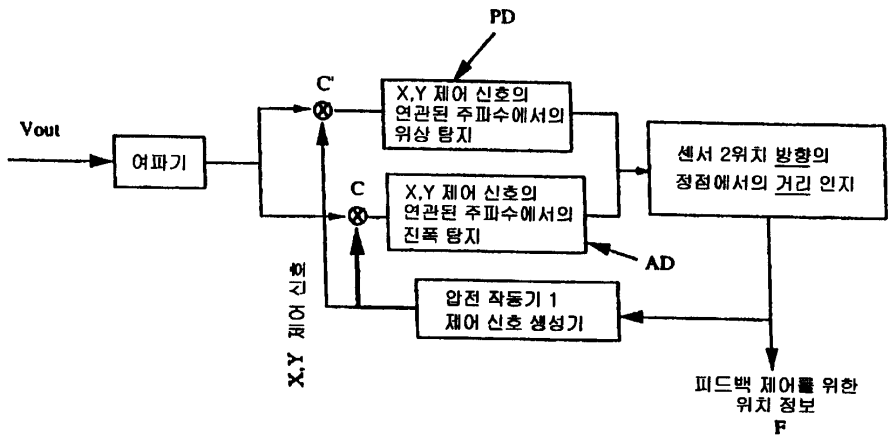
도면2



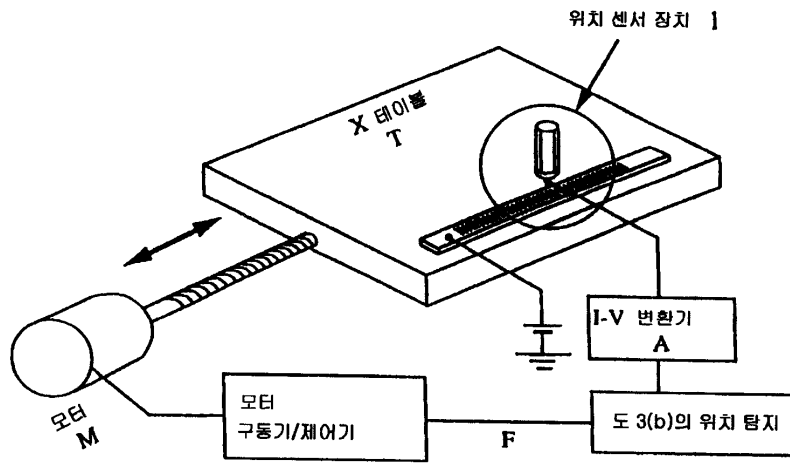
도면3a



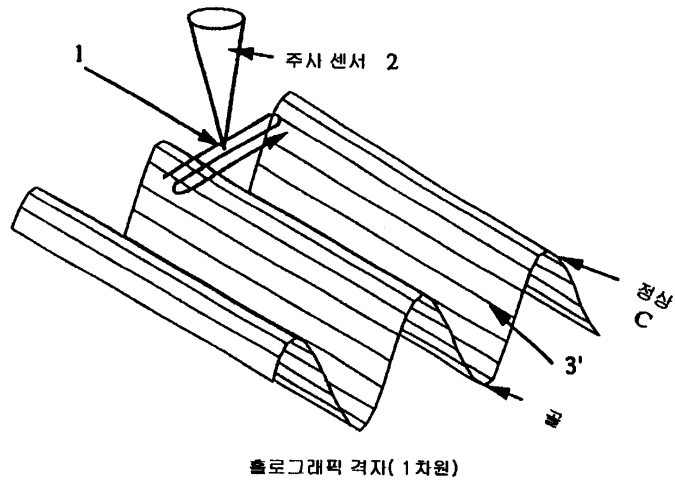
도면3b



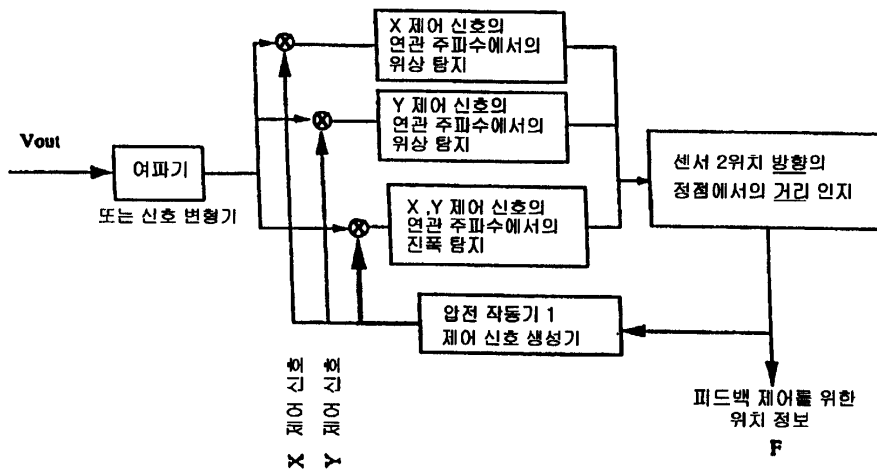
도면4



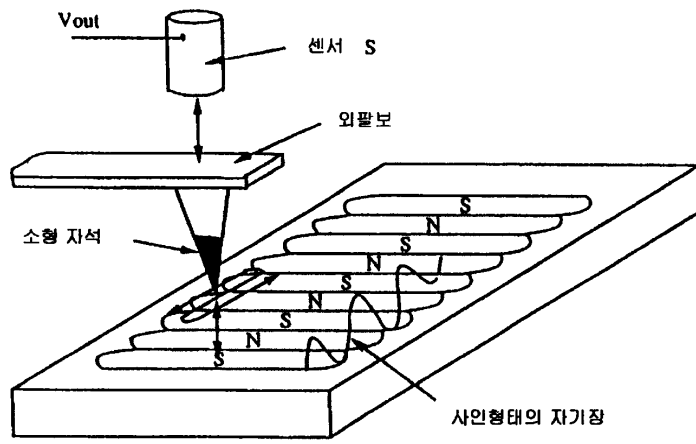
도면5



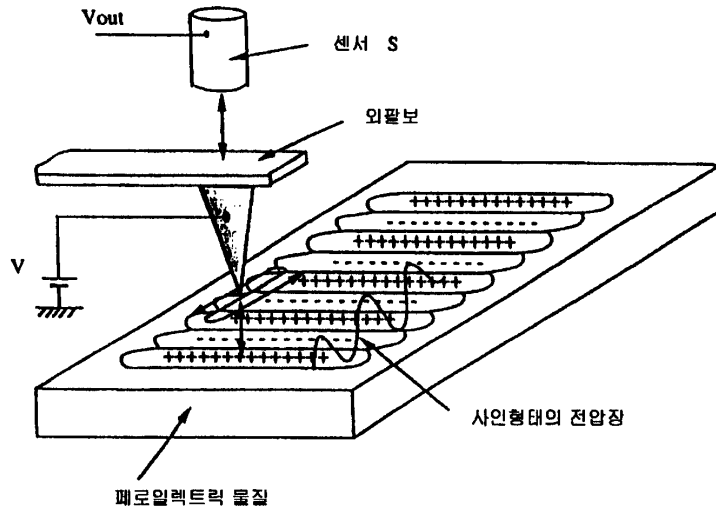
도면6



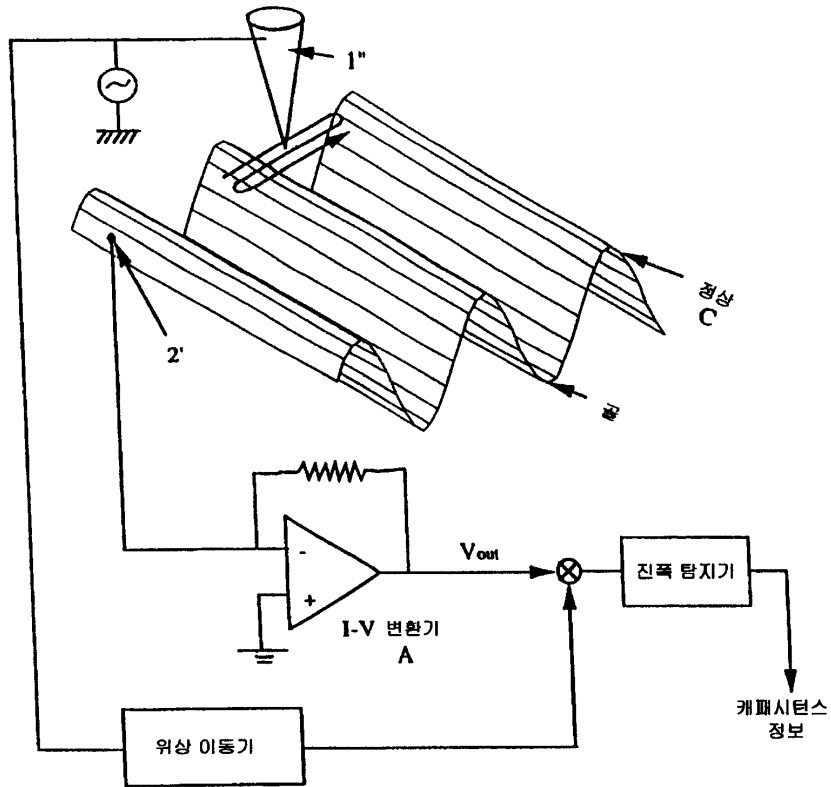
도면7a



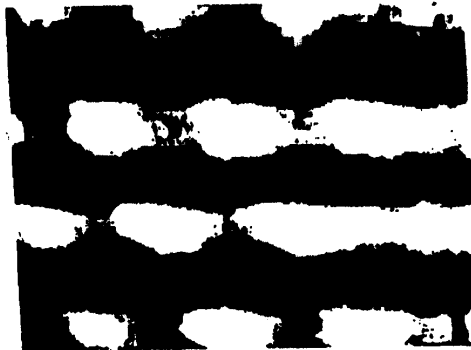
도면7b



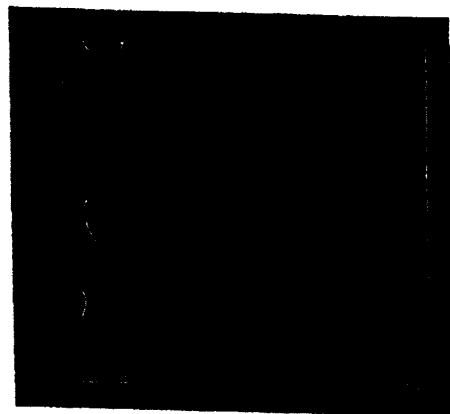
도면8



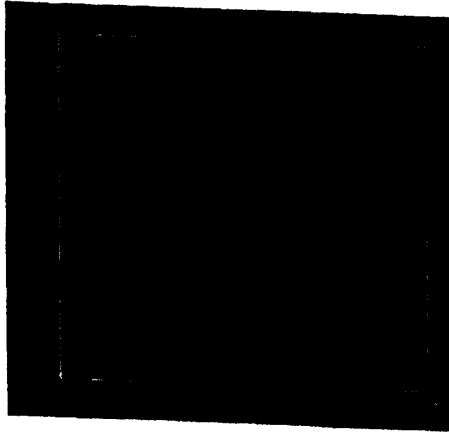
도면9



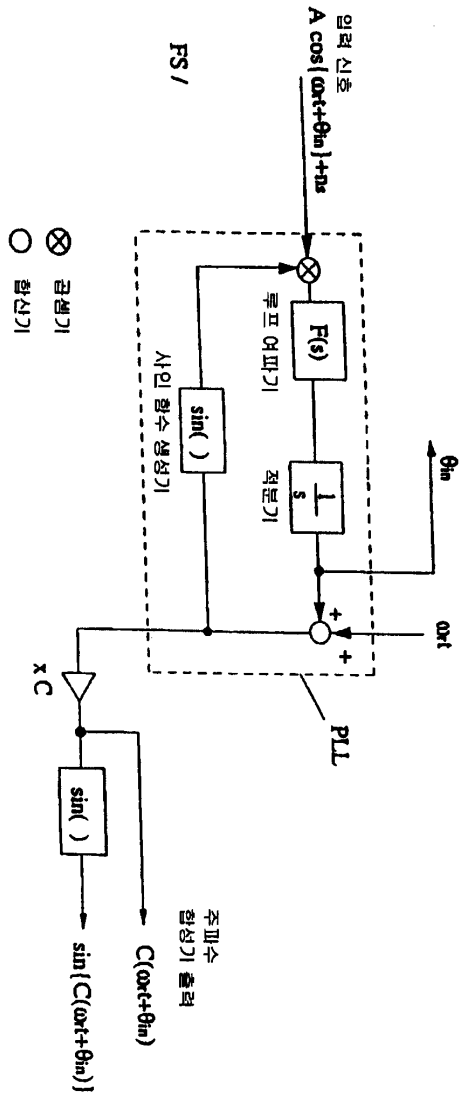
도면10a



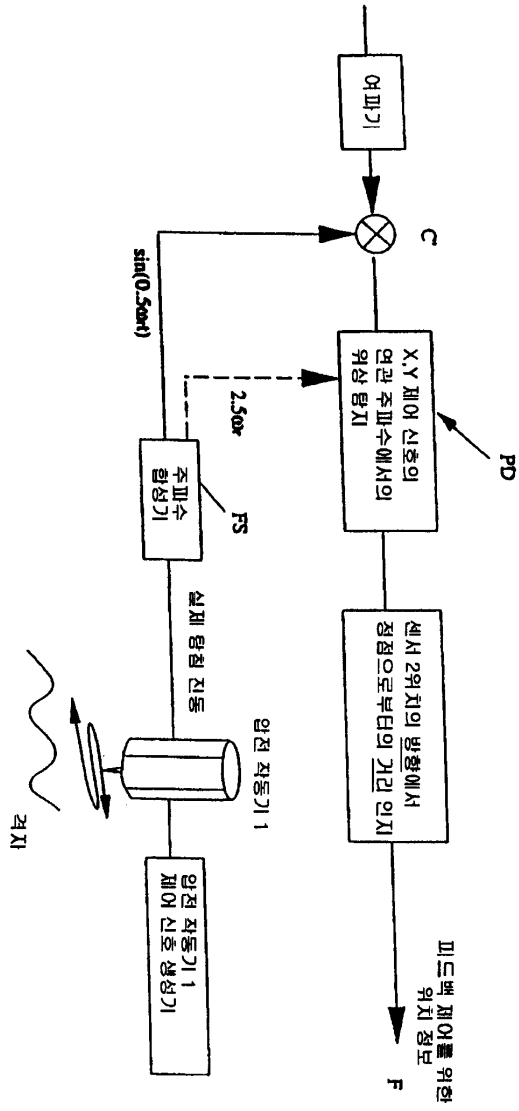
도면10b



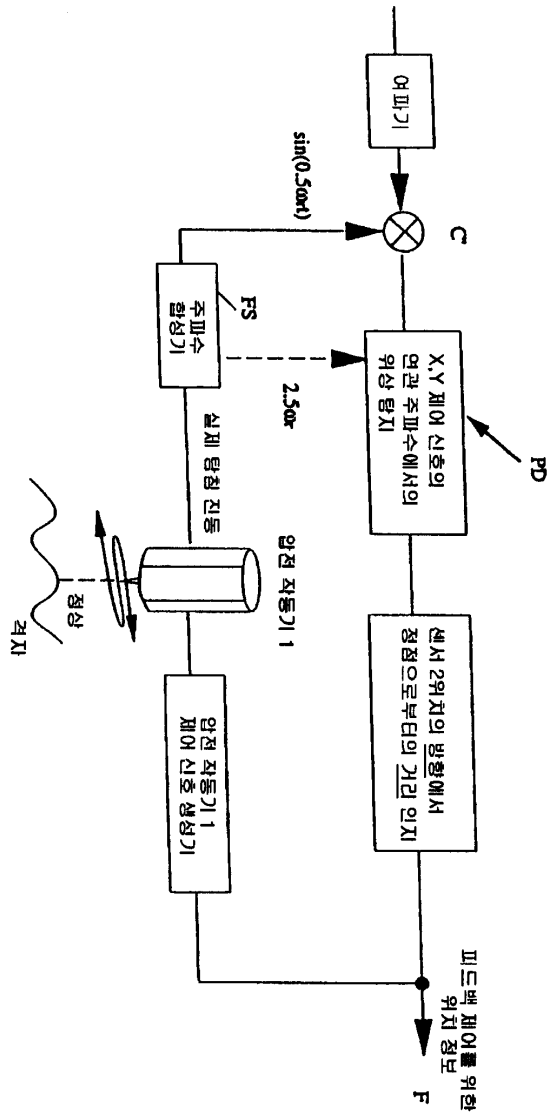
도면11a



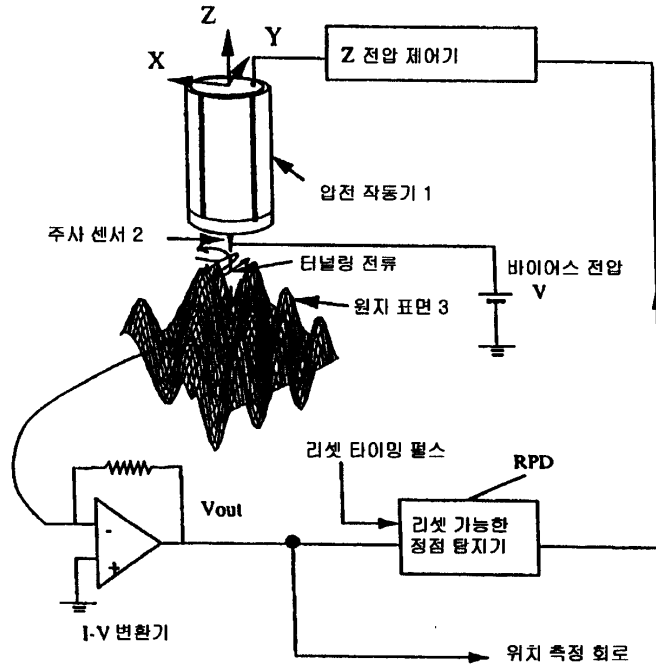
도면11b



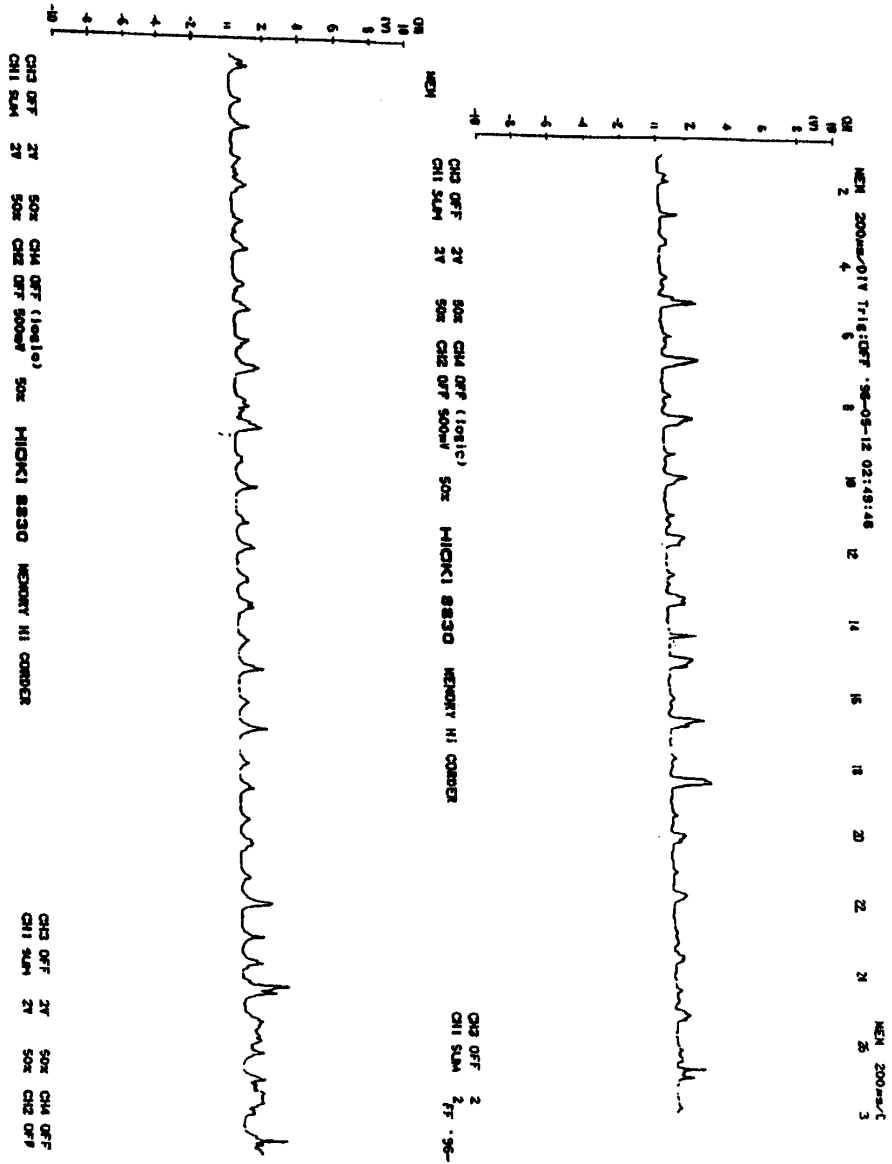
도면12



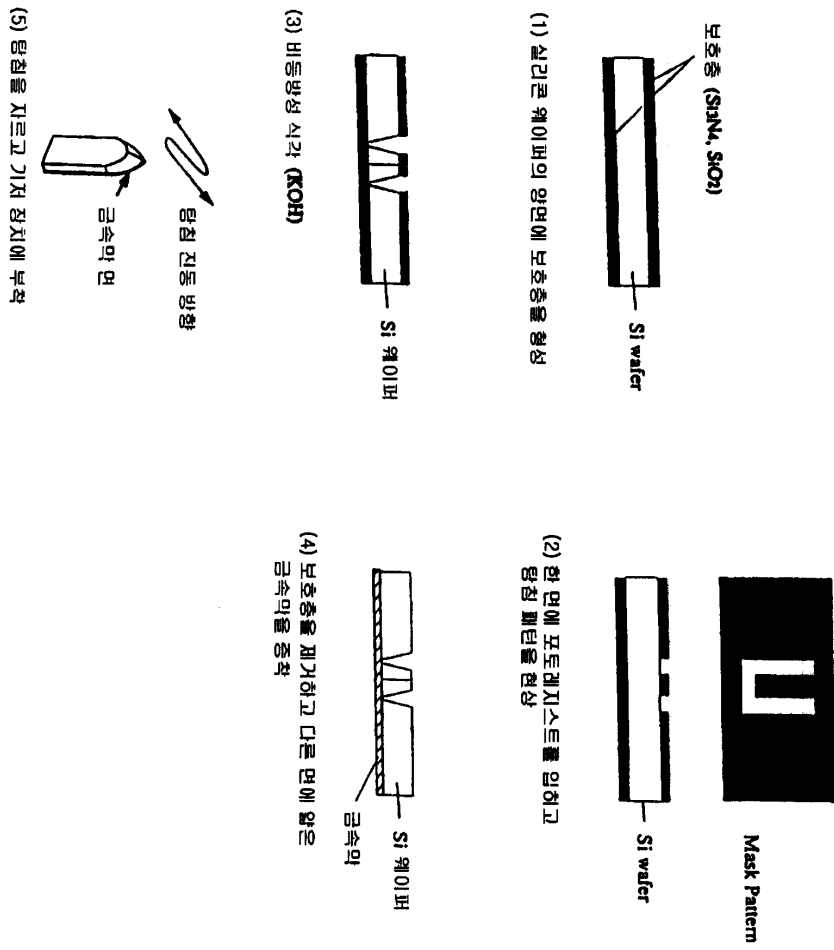
도면13a



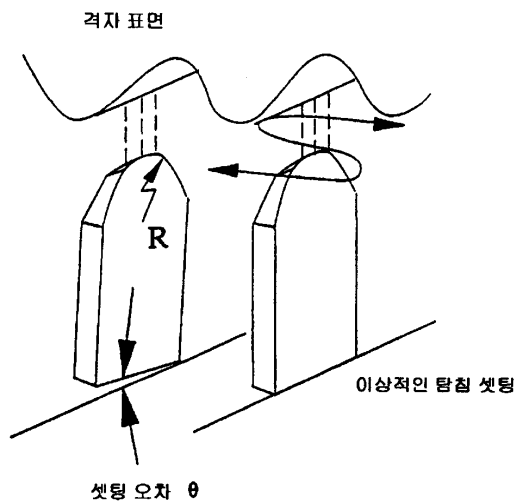
도면13b



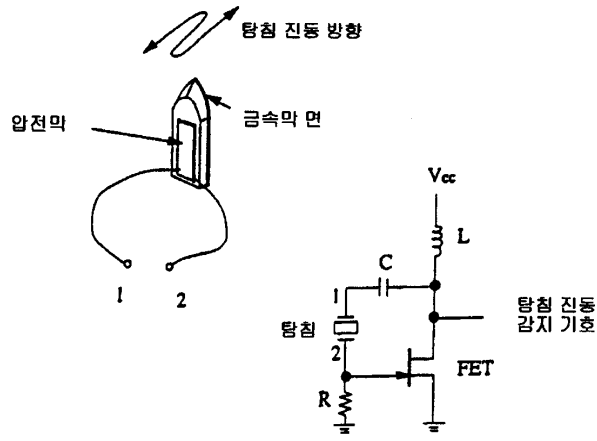
도면14a



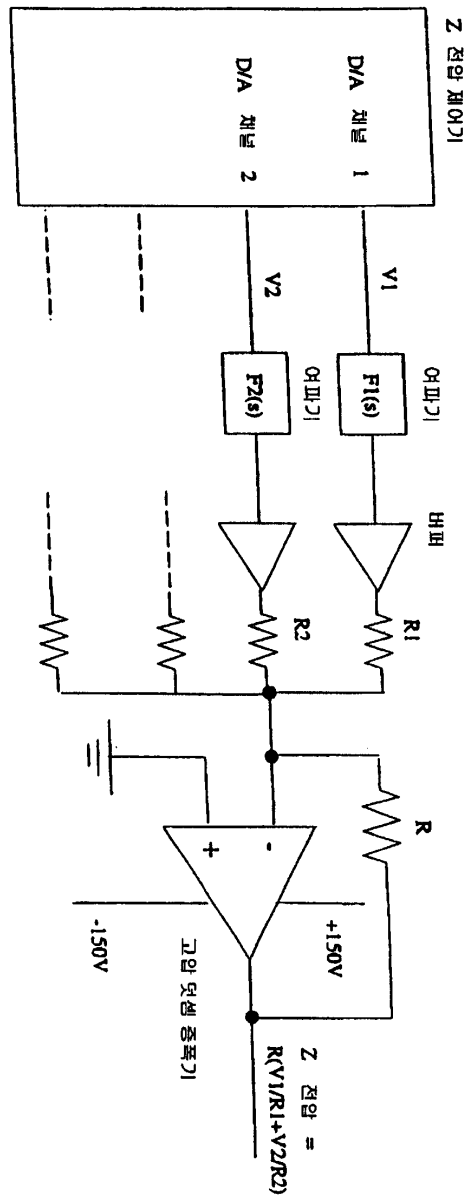
도면14b



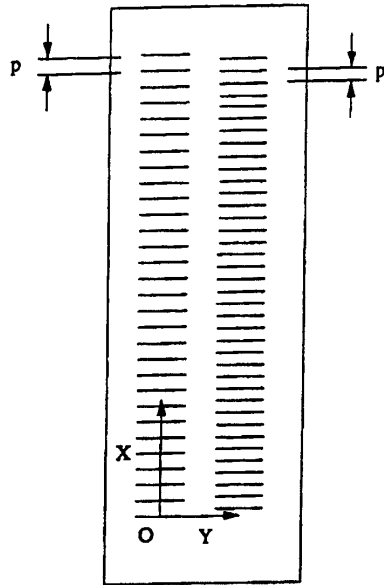
도면15



도면16

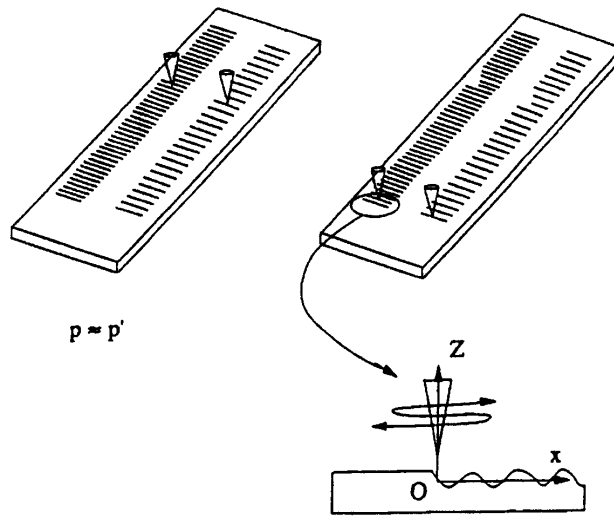


도면17a



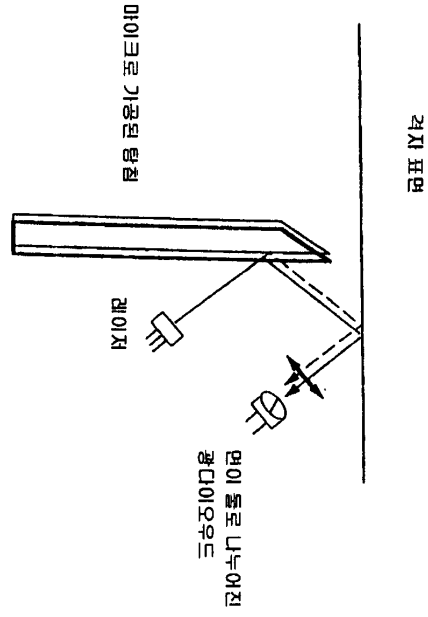
절대 위치 측정이 가능한 1차원 위치 탐지

도면17b

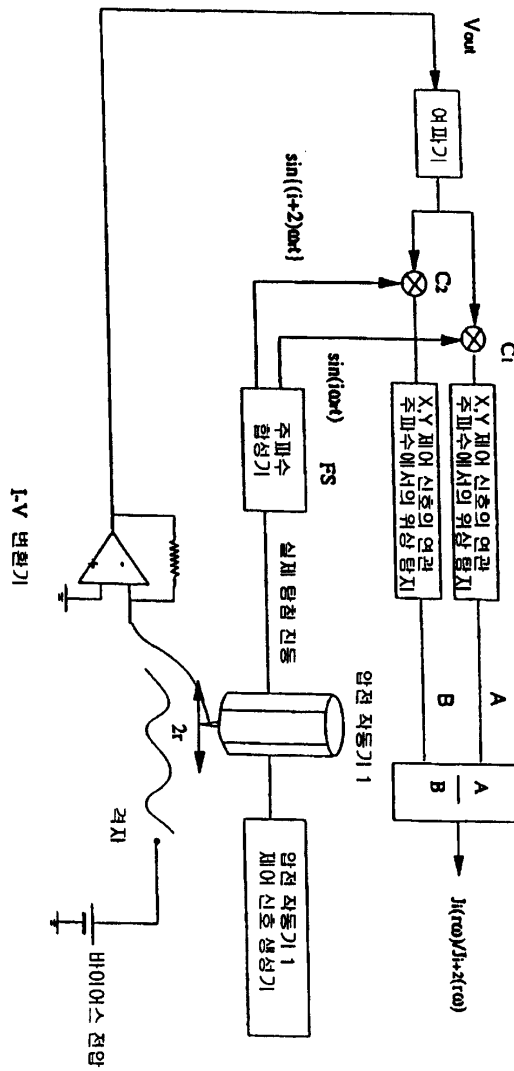


좌표 원점

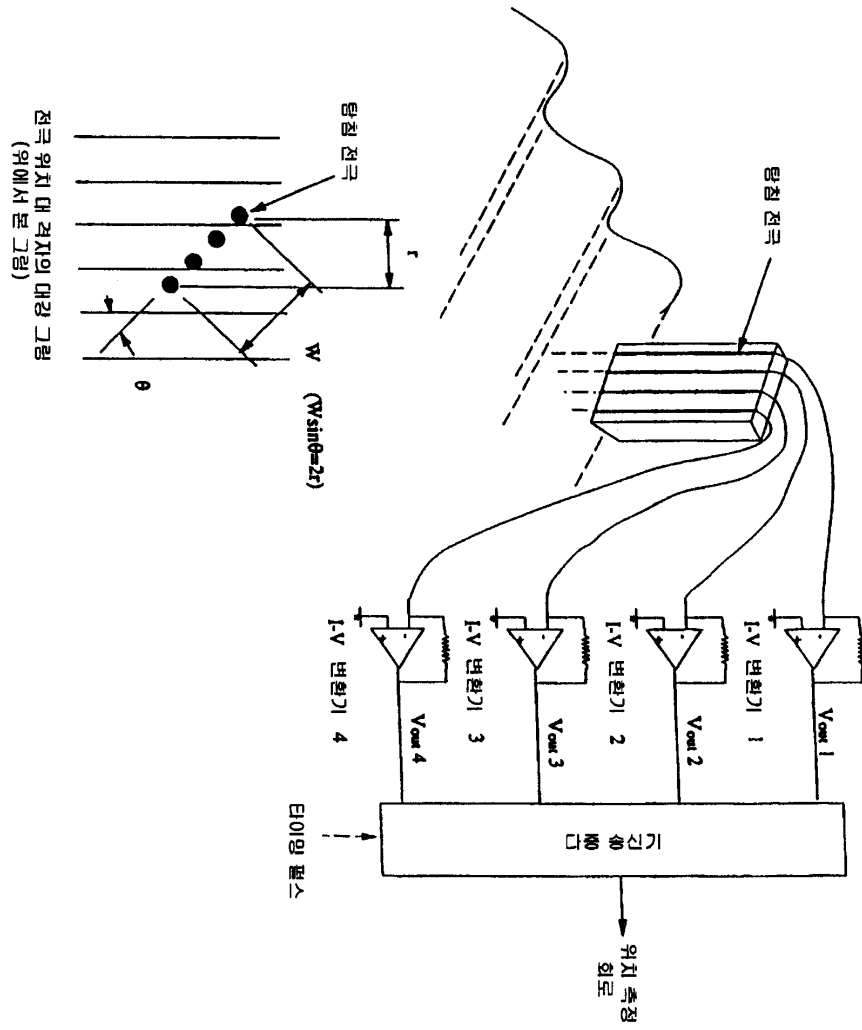
도면18



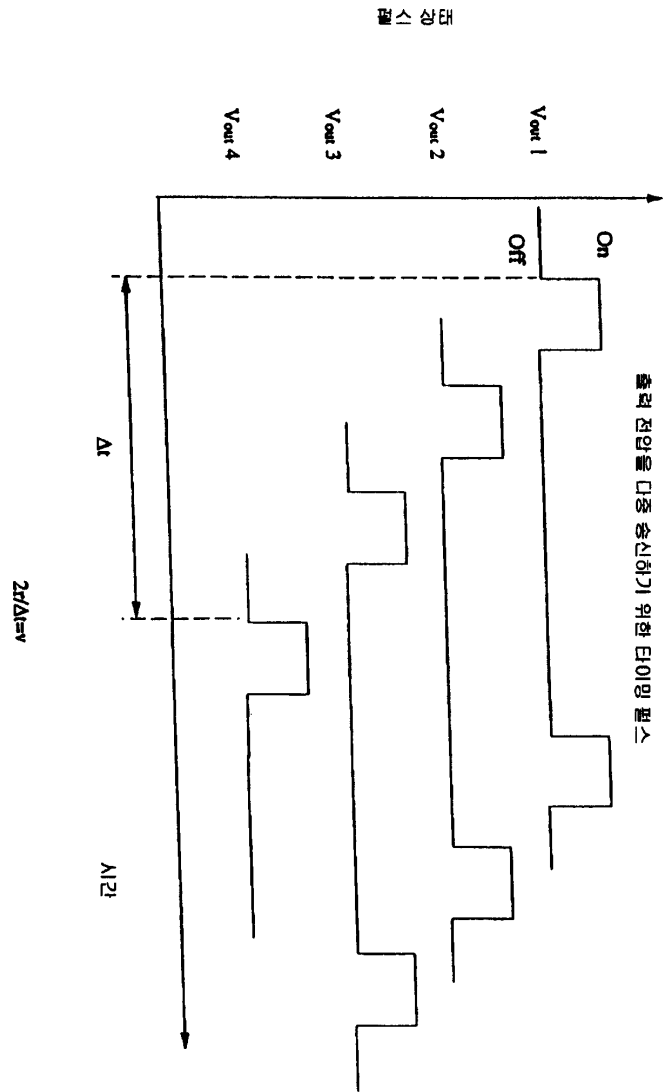
도면19



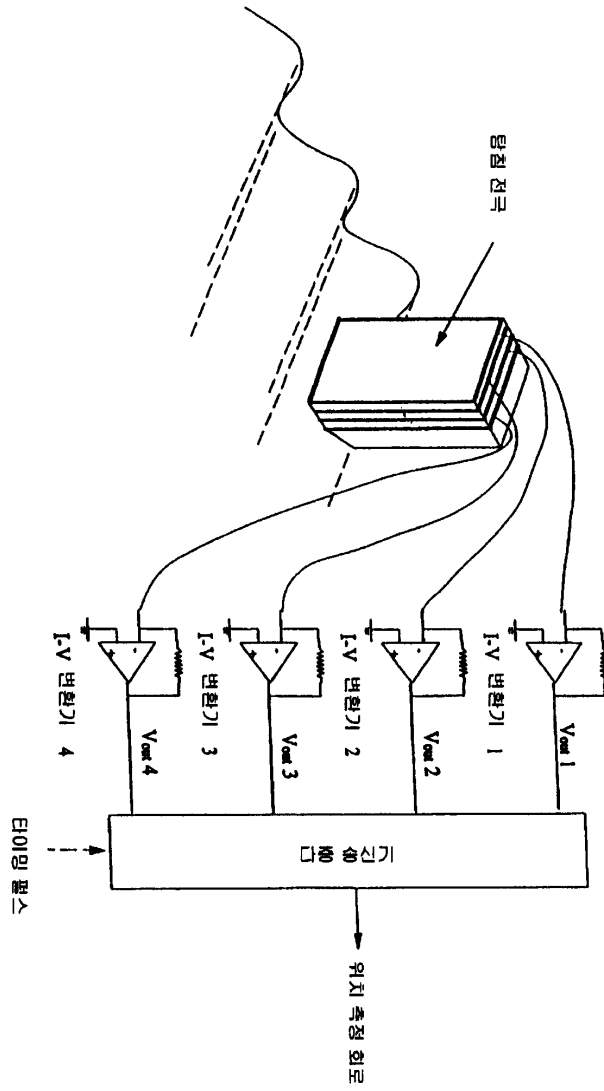
도면20a



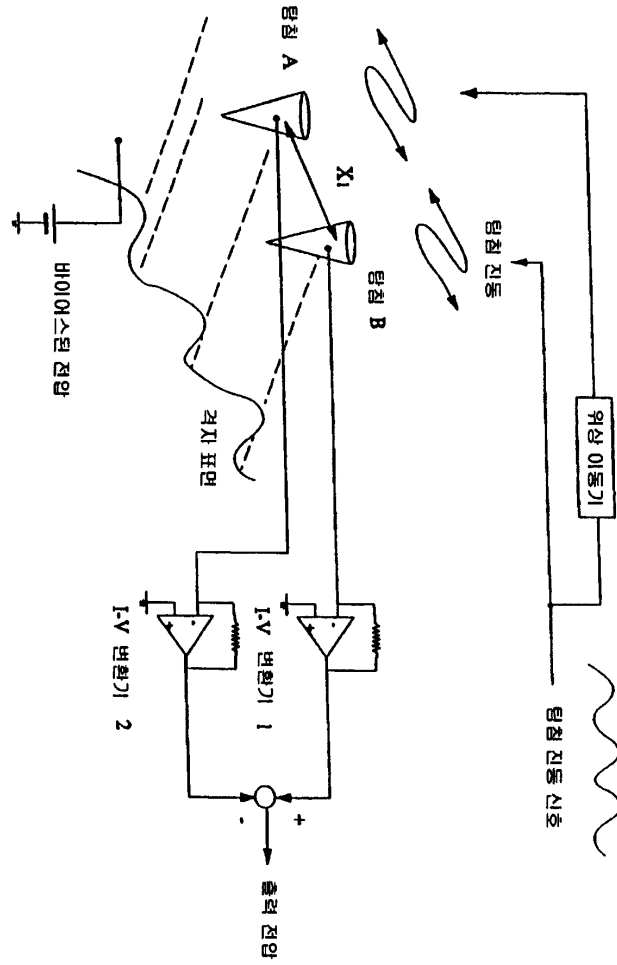
도면20b



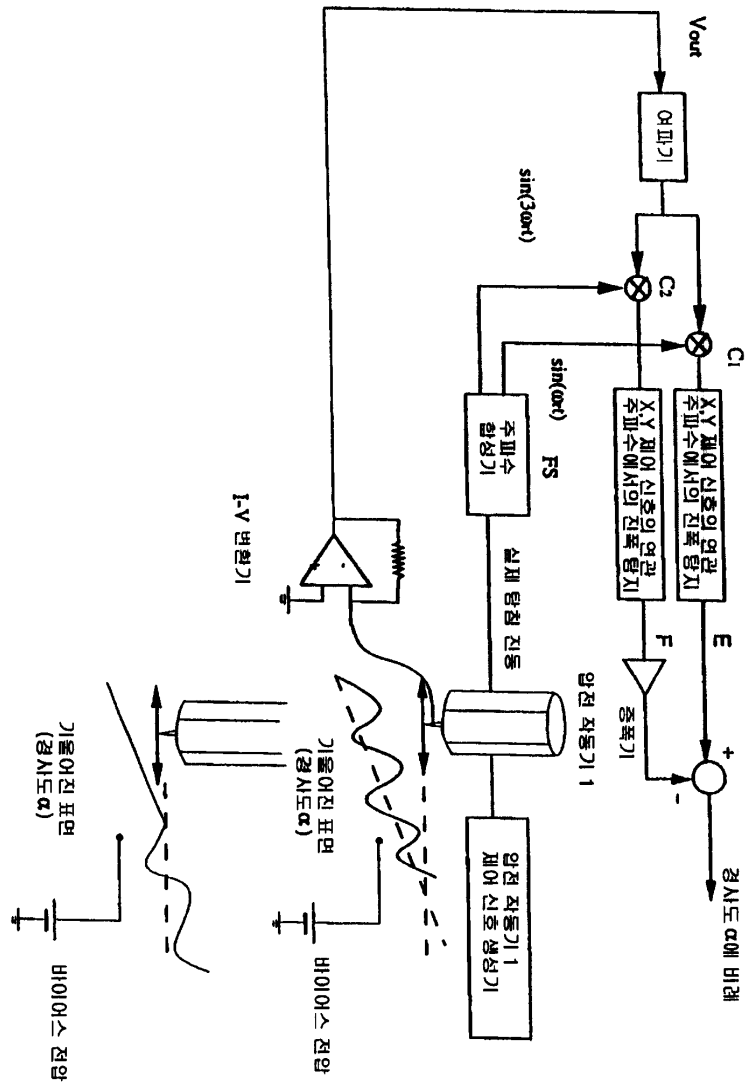
도면21



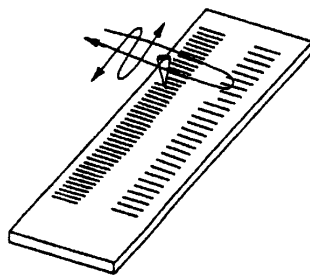
도면22



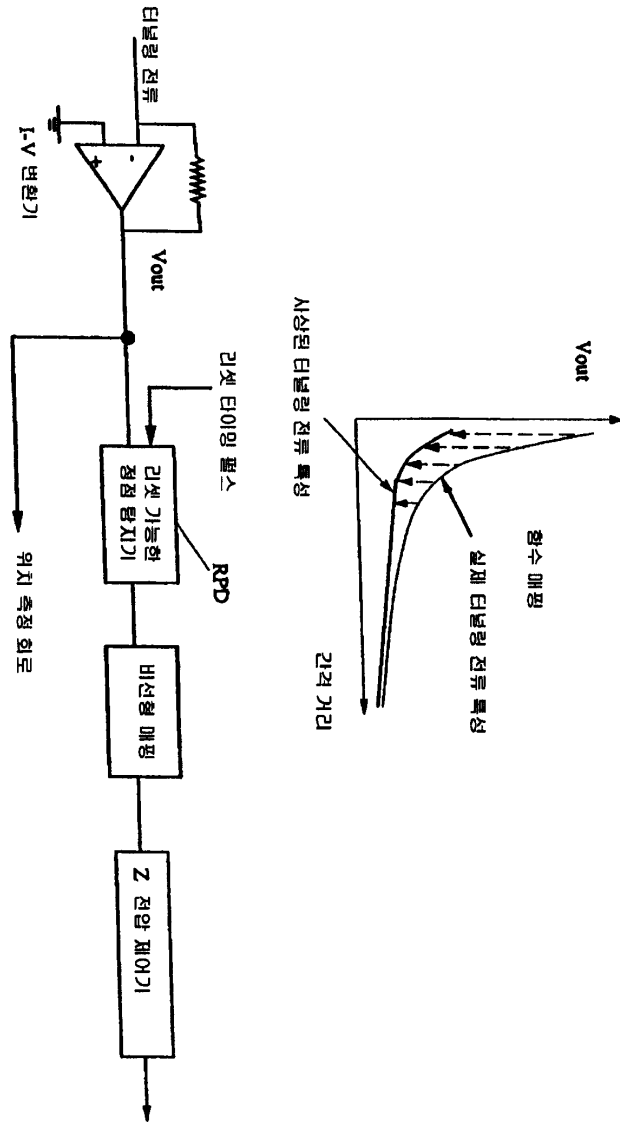
도면23



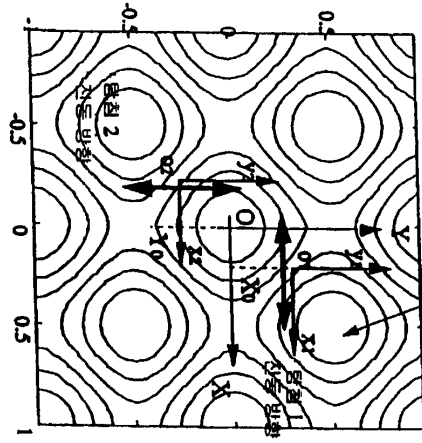
도면24



도면25



도면26



2차원 격자 (위에서 본 그림)

