(19)대한민국특허청(KR)
(12) 등록특허공보(B1)

(51) 。Int. Cl.
H01L 29/06 (2006.01)

(45) 공고일자 2006년10월19일
(11) 등록번호 10-0636951
(24) 등록일자 2006년10월13일

(21) 출원번호 10-2004-7008565(분할)
(22) 출원일자 2004년06월04일
(62) 원출원 특허10-2001-7009805
원출원일자 : 2001년08월03일
번역문 제출일자 2004년06월04일
(86) 국제출원번호 PCT/US2000/004220
국제출원일자 2000년02월18일

(65) 공개번호 10-2004-0062667
(43) 공개일자 2004년07월07일
심사청구일자 2002년02월22일
(87) 국제공개번호 WO 2000/51186
국제공개일자 2000년08월31일

(81) 지정국 국내특허 : 중국, 일본, 대한민국, 스페인, 러시아,

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

(30) 우선권주장 09/253,506 1999년02월22일 미국(US)

(73) 특허권자 클로손, 조셉, 이. 쥬니어
미국 버지니아 22101-5061 맥린 그레이트 폴스 스트리트 1721

(72) 발명자 클로손, 조셉, 이. 쥬니어
미국 버지니아 22101-5061 맥린 그레이트 폴스 스트리트 1721

(74) 대리인 윤여표
특허법인정직과특허

심사관 : 김상걸

(54) 극미세구조 소자 및 장치

요약

게이트부재(150,153'-157)가 도전 나노튜브(150)에 교차하거나 나노튜브(153'-157)를 둘러쌀 수 있는 극미세소자가 개시된다. 또, 의사 P-채널 나노스위치 구조(150-151-152-153)는 물론 의사 CMOS 나노인버터(170-171-173-174-177-179)가 개시되고, 피코세컨드 영역에서 동작하는 나노멀티바이브레이터(170-171-174-179-170'-171'-174'-179')와 나노멀티바이브레이터 주파수 분주 체인(174-190-190'192-193)가 개시된다. 의사 P-채널 증가모드 파워소자(259,259')는 전체 파워 나노스위치(259,259')에 걸쳐 동시 스위칭을 제공하기 위해 RC 시정수 보상체계(247i,241i)와 함께 사용되는 것이 바람직하다. 나노튜브 분리정렬장치(300,300'), 개선된 원자현미경 탐침(281-282-283-284-285-286-287, 291-292-23-294-295-297-298), 및 헤드(310)가 개시된다.

대표도

도 2a

색인어

나노튜브, 극미세소자

명세서

도면의 간단한 설명

도 1A는 종래기술에 따라 벌크 실리콘 게이트를 갖는 나노튜브를 이용한 스위칭소자의 일 실시예의 단면도이고, 도 1B는 전압-전류 특성도;

도 2A, 2B, 2C는 각각 제로, 포지티브, 네거티브 바이어스 전압에서의 전자친화도가 비교적 높은 배리어와 함께 동작하는 본 발명에 따른 나노튜브의 도면;

도 3A, 3B, 3C는 본 발명에 따라 도전성 나노튜브와 이에 교차된 게이트부재의 사시도, 단면도 및 특성그래프;

도 4A, 4B, 4C는 도전성 나노튜브와 이를 둘러싼 게이트물질의 사시도, 단면도 및 특성그래프;

도 5A, 5B, 5C, 5D는 제 2 실시예의 나노튜브 인버터를 제조하는 각 공정단계도;

도 6A, 6B는 단일 멀티바이브레이터(NMV)와 주파수분주 나노멀티바이브레이터 체인구조도;

도 7은 제1 실시예의 파워 나노스위치에 사용될 단일 도전 나노튜브 단부의 사시도;

도 8A는 제1 실시예의 상단 접점을 갖는 최종 파워 나노스위치와 하우징의 사시도;

도 8B, 8C는 제2 턴오프 게이트구조를 갖는 파워 나노스위치의 제2 및 제3 실시예의 사시도 및 단면도;

도 9A는 파워 나노스위치의 등가 게이트회로;

도 9B, 9C, 9D는 각각 적당한 게이트펄스 파형도;

도 10은 본 발명의 제1 실시예에 따른 원추형 이송탐침의 측면도;

도 11은 본 발명의 제2 실시예에 따른 기다란 이송탐침의 측면도;

도 12A는 본 발명에 따른 나노튜브 분리/정렬 탱크의 사시도이고 도 12B는 그 탱크의 평판형 변형례의 사시도;

도 13은 컴퓨터의 제어하에 극미세구조를 형성하기 위해 나노소자들을 조립 및 조작하는 장치.

발명의 상세한 설명

발명의 목적

발명이 속하는 기술 및 그 분야의 종래기술

본 발명은 고체상태의 극미세구조 소자 및 원자현미경장치 분야에 관한 것이다.

1932년 9월의 미국특허 1,877,140 및 1998년 11월 16일자의 Lilienfeld and Electronic Engineering Times 67페이지에는 극미세구조물에 관해 기재되어 있다. 미국특허 5,418,771 및 Yanagisawa 일행의 미국특허 5,519686 및 5,721,721에는 원자 기록 및 현미경 포지셔닝 기술이 기재되어 있다. S. Tans에 의해 기고된 Nature지 1997년 4월 3일자의 474-

477페이지, 1998년 5월 7일자의 49-52페이지, 1998년 8월 20일자의 761-764 페이지, R.Martel에 의해 기고된 1998년 10월 26일자 Applied Physics Letter 2447-2449페이지, 그리고 A. Hassanien에 의해 기고된 1998년 12월 28일자 Applied Physics Letter 3839-3841페이지에는 벌크 실리콘 게이트를 갖는 소위 나노튜브 "트랜지스터"가 기재되어 있다. L. Venema 일행이 기고한 1997년 11월 3일자 Applied Physics Letter 2629-2631페이지에는 나노튜브 자체를 절단하는 방법이 기재되어 있다. Z. Ren 일행이 기고한 1998년 11월 6일자 Science 1105-1107페이지에는 다수의 자유직립 이격 정렬된 카본 나노튜브들을 제조하는 방법이 기재되어 있다.

발명이 이루고자 하는 기술적 과제

따라서, 본 발명의 목적은 면적밀도, 속도, 안정성 및 균일도가 개선된 장치를 제공하기 위해 나노튜브를 이용하는 방법을 제공하는데 있다.

본 발명의 다른 목적은 기존의 장치와 기술을 약간만 변경하여 나노튜브와 기타 극미세구조물을 수 Å 이내에 위치시킬 수 있는 나노스위치를 제공하는데 있다.

본 발명의 또다른 목적은 종래의 "도핑"이나 나노튜브 자체의 구조적 변경 없이 나노튜브상에 스위칭소자를 보상적으로 제공하는데 있다.

본 발명의 또다른 목적은 나노튜브 종축선을 따라 배향된 필드 성분을 갖는 국부적 전계를 생성하는 게이트구조를 생성하는데 있다.

본 발명의 다른 목적은 CMOS 실리콘 회로와 유사하게 효율적으로 신호를 처리하는 나노인버터를 생성하는데 있다.

본 발명의 또다른 목적은 효율적으로 신호를 처리하기 위해 CMOS 실리콘회로와 유사한 나노멀티바이브레이터 (nanomultivibrator) 또는 플립플롭을 생성하는데 있다.

본 발명의 다른 목적은 초고주파 펄스를 신속히 카운트하는 수단을 제공하기 위한 나노멀티바이브레이터나 플립플롭 또는 카운트다운 체인을 생성하는데 있다.

본 발명의 또다른 목적은 종래의 실리콘보다 수천배 빠르게 스위칭하기 위해 날카롭고 평행하지 않은 높은 회전율(slew rate)을 갖는 나노스위치를 제공하는데 있다.

본 발명의 또다른 목적은 높은 회전율과 파워 조작성능을 갖는 하이파워스위치 및 하우징을 제공하는데 있다.

본 발명의 또다른 목적은 모든 소자를 동시에 도전시켜 극히 높은 회전율을 제공하도록 파워 나노스위치 소자의 RC 시정수 게이트 지연을 보상하는 구조적 방식을 제공하는데 있다.

본 발명의 또다른 목적은 모든 소자가 동시에 도전되고 각각의 동작을 위해 동시에 셧오프(shut-off)되어 모든 동작에 매우 높은 회전율을 제공하도록 파워 나노스위치 소자에서의 RC 시정수 게이트 지연을 보상하는 구조적 방식을 제공하는데 있다.

본 발명의 또다른 목적은 극미세 구조물을 아주 높은 정밀도로 흡인 및 배치할 수 있는 새로운 원자현미경 탐침 설계를 제공하는데 있다.

본 발명의 다른 목적은 수 Å 이내의 극히 높은 정밀도로 극미세소자들을 흡인, 이송, 조작, 포지셔닝 및 배치할 수 있는 장치를 기존의 포지셔닝 장치와 기술을 약간만 변경하여 달성할 수 있도록 기존의 원자 포지셔닝 현미경에 사용할 수 있는 새로운 헤드조립체를 제공하는데 있다.

본 발명의 또다른 목적은 나노튜브들을 분리, 선택, 직선화 및 절단하여 본 발명의 다른 목적들을 달성할 수 있도록 하는 장치와 방법을 제공하는데 있다.

발명의 구성 및 작용

이하, 본 발명의 목적, 특징, 장점들에 대해 첨부 도면을 참조하여 자세히 설명한다.

"나노튜브"란 카본 나노튜브는 물론 적당한 전기기계적 성질을 갖는 구조를 형성할 수 있는 NB, MoS_2 기타 재료나 성분으로 구성된 것을 의미한다.

"극미세구조"란 적어도 일차원적인 나노미터급의 모든 단백질, 화학분자, 폴리머 등의 구조를 의미한다. 나노튜브에 대한 종래의 육각형 그래핀 카이랄 벡터 표시들은 1996년판 Academic Press에 기고된 M. Eresselhaus 일행의 "Science of Fullerness and Carbon Nanotubes"에 기재되어 있다.

극미세구조는 양자역학을 통해서만 완벽하게 이해될 수 있지만, 이것은 다방면에 걸친 계산을 내포하고 많은 경우 본발명을 이해하는데는 불필요하다. 따라서, 본 발명을 쉽게 이용하고 이해하기 위해 기존의 정전기학 용어로 본 발명을 설명하겠지만, 당업자라면 필요시 양자역학적 방식으로 본 발명을 쉽게 재구성할 수 있다고 본다.

도 1A에 도시된 종래의 극미세소자는 도 1B에 도시된 것과 같은 복잡한 특성을 갖는다. 앞서 R. Martel과 A. Hassanien에서, 종래의 극미세소자는 전도가 "정공"에 의해 통하는 소자로서 데이타에 적합하지 않음이 설명된다. 가장 심각한 문제는 게이트 전압(V_G)이 점점 네거티브로 되면서 소스-드레인 도전전류(ISD)가 모든 소스-드레인 V_{SD} 전압에 대해 증가되는데 있다. 또, "정공"의 잘못된 설명이 도출될 수도 있다. 실리콘에서는, 원자가 이동 정전하를 형성하는 실리콘에 "도핑"되지만 실리콘의 중성전하 및 국부화된 "정공"과 함께 도핑된다. 여기서는, 나노튜브에는 실질적으로 "도핑"이 없기 때문에 이들 "정공"은 (존재할 경우) 나노튜브에서의 전하 불균형때문에 생기는 것이고, 나노튜브의 평형상태를 구하려면 전계 방정식에 대한 매우 복잡하고 광범위한 해석이 필요하고, 이 전계 방정식은 아주 약간의 바이어스 전압에도 상당히 변화되므로 전계 방정식을 유용하게 이용할 수 있는 명확한 방법은 아직 증명되지 못했다.

그러나, 더 중요한 것은, 나뉴튜브들은 도전 전자들을 갖기 때문에, 정밀 검사를 해보면, 실리콘에서 아날로그 공핍모드 N-채널 절연게이트 필드효과소자에 예상되는 것과는 반대 결과가 나타난다. 이하에서 알 수 있듯이, 이런 불규칙하지만 겉보기에 미해결인 결론의 정확한 특성은 실제 작용력에 아주 근사하고 좀더 완벽하게 이들 불규칙 결과들을 설명할 수 있는 모델을 이용해 설명할 수 있으므로, 본 발명에서는 이 모델을 기초로 한다.

도 2A는 이 모델에 따라 게이트 바이어스 전압이 없는, 즉 V_G=0인 나노튜브의 새로운 해석단면도이다. 본 발명자의 해석에 의하면, 나노튜브(140)의 외부, 내부(141), 도전 나노튜브(140)의 고유 자유 전자들(142), 게이트 절연체로 동작하는 배리어 물질(143), 및 게이트 전위(V_G)에 접속된 게이트전극(144)을 볼 수 있다. 절연체인 게이트 배리어 물질(143)의 전자친화도(X_b)는 아주 중요하고 본 발명자의 분석에 따르면 배리어물질(143)에 접촉하는 곳에서 도전 나노튜브(140)로부터 전자들을 완전히 공핍시키기에는 겉보기로는 충분하다. 여기서는 원주가 약 8Å인 나노튜브가 배리어물질(143)과 접촉하고 이 부분을 145로 표시한다. 나노튜브처럼 도전전자가 풍부한 물질이 전자친화도(X_b)가 충분히 높은 배리어 물질과 접촉하면, 146과 같은 전자가 나노튜브 도체로부터 145 지점에서 인출되고 접점, 본 발명자의 분석에 의하면 146 지점에 국부적으로 모여 갇힌다. 이렇게 되면 고정된 정전하 센터(145)가 생성된다. 전자친화도(Xb)가 높은 배리어물질(143) 표면은 물론 전자친화도가 낮은 물질보다 더 큰 인력을 생성하므로 더 평평해지고 전하전송효과가 더 크다. 중요한 것은, 아무리 직경이 작은 도전 나노튜브(140)라도 기본적으로 항상 유한한 평탄부가 존재하고 이 모델에 놓이는 게이트 배리어물질(143)과 친화적인 작용을 한다. 이런 실시예에서는, 나노튜브의 크기가 (10,10)에 가까우며, 전자친화도(Xb)가 충분히 큰 배리어물질 절연체 SiO_2에 약 8Å의 접촉면적이 예상된다. SiO_2는 그 불규칙 구조내에 많은 댕글링본드가 있는 것으로 실리콘 업계에서 유명하고 약 0.9~1.0 eV의 전자친화도(Xb)를 갖는다.

이들 댕글링본드를 없애기 위해 SiO_2를 비활성화하는 종래의 방법은 비활성제로서 수소를 사용하는 것이고, 수소는 그 전자를 제공하여 SiO_2에 의해 완성되지 않은채 남아있는 댕글링본드를 완성함으로써, SiO_2:H로 공통으로 표시되는 조성물을 형성한다. 이렇게 되면 SiO_2:H의 전자친화도(Xb)가 미처리 SiO_2의 전자친화도 이하로 떨어진다. SiO_2로부터 댕글링본드를 제거하고 전자친화도(Xbs)를 낮추는 다른 효과적인 방법은 댕글링본드들중 어떤 것과도 반응하도록 불소처리를 하여 SiO_2:F로 표시되는 생성물을 형성하는 것이다. 특히 후자의 방법은 전자친화도가 비교적 높은 배리어물질 SiO_2를 비교적 전자친화도가 낮은 물질로 변화시키는데, 이는 댕글링본드에 있는 모든 전자들이 불소에 단단히 결합되기 때문이다. 따라서, 불화된 배리어층 물질의 전자친화도(Xb)는 아주 낮아진다.

도 2A는 도전 나노튜브(140)내의 가용 전자의 약 80%가 146으로 표시된 바와 같은 배리어층 절연체(143)/나노튜브(140) 경계선에 갇혀 움직일 수 없으며 전도도에 기여하지 못함을 보여준다. 그러나, 도 2B에는 소자의 게이트전극(144)에 정전압이 걸리는 것을 보여준다.

전도성 나노튜브(140)내의 자유전자(142)는 양전압으로 되고, 거의 모든 자유 전자들(146')은 나노튜브(140)와 배리어층(143) 사이의 경계면에 갇혀, 전도도가 상당히 저하된다. 도 1B의 실험으로 알 수 있듯이, 게이트전극(144)에 양전압이 인가되면 전도도가 저하되는 실험적 결과가 발생한다.

도 2C와 같이, 게이트전극(144)에 음전압이 인가되면 정반대 효과가 일어나, 인가된 게이트전압은 배리어층 절연체(143)의 고유 전자친화도(Xb)를 극복하여 갇힌 전자들(146")을 나노튜브(140)의 전도부로 방출하여 나노튜브(140)에서 전도에 이용할 수 있는 전자의 수를 증가시킨다. 도 1B를 보면, 100㎷의 소스-드레인 V_{SD} 바이어스에 대해 게이트전극(144)에 V_G=-6V의 바이어스 전압을 인가했을 때 전도도가 약 8% 증가함을 알 수 있다. 비교적 높은 음전압은 통상의 실리콘 회로에서 예상되는 바와 같이 전도성 채널을 핀치오프(pinch off)하는 것 같지는 않은바, 이는 도전성 나노튜브(140)와 게이트전극이 거의 같이 선형이고 전자가 제거될 수 있는 나노튜브의 축선 방향으로는 종방향 전계성분이 없기 때문이다. 따라서, 대칭효과에 의해, "핀치오프" 영향을 없앨 수 있다. 전계는 배리어 물질(143)의 전 표면에 완전히 수직이므로, 전도성 나노튜브(140)에서 전자가 누출되지 않는다.

이 모델에서는 정공이 아닌 전자에 의해 도전이 이루어진다 해도 나노스위치는 최적화되지 않은 의사 P-채널 공핍모드 스위치로 동작한다. "의사"라 불리우는 것은, 이렇게 전하를 가두는 모델에 따른 실제 내부작용은 아주 다르겠지만 겉보기로는 실리콘 P-채널 소자와 동일하게 작용하기 때문이다. 또, 이것은 실리콘소자에서 예상될 수 있는 것과는 반하지만, 본 발명자가 발견한 종래의 실리콘 구조와는 다른 중요한 특징들을 보여주는바, 카본 나노튜브는 전도성 나노튜브와 전자친화도(Xb)가 충분히 높은 게이트부재 사이에 배리어층이 있을 때는 등가적인 의사 P-채널 실리콘 소자로 기능하여 도전성 나노튜브에서 가동 캐리어들을 공핍시킬 수 있다. 본 발명의 특징에 따른 나노튜브는 선택된 영역에서 게이트부재/나노튜브 경계면에서의 배리어 물질의 전자친화도(Xb)를 변화시키기만 해도 이런 작용을 할 수 있다. 따라서, 싱글 나노튜브는 전자친화도(Xb)가 다른 두개의 블록 영역으로 구성될 수 있고 훨씬 더 콤팩트한 배열의 대응 실리콘 소자의 모든 장점들을 가질 수 있다. 실리콘에는 반대 도전형 웰 영역을 만들어야만 하지만, 본 발명에 의한 나노튜브 기술에서는 이 문제가 완전히 배제된다. 따라서, 실리콘 CMOS 인버터는 수 μm^2의 칩 면적을 가질 수 있지만, 나노튜브 인버터는 0-4nm^2의 면적을 가질 수 있어 250,000배 작다. 이것은 소자의 밀도를 상당히 개선할 수 있다.

게이트부재, 및 본 발명의 게이트부재와 전도성 나노튜브 사이의 블로킹층의 설계는 사용하고자 하는 재료에 따라 여러가지 등가 구조로 될 수 있다.

N-채널 공핍모드 나노튜브 스위치의 형태에 관한 제1 실시예가 도 3A에, 전도성 나노튜브(151)의 단면도가 도 3B에 도시되어 있다. "전도성 나노튜브"란 +V와 대지전위 또는 대지전위와 -V의 전위차에 의해 바이어스될 수 있는 나노튜브를 지칭하는 것이고, 전도성 나노튜브(151)를 통해 전류가 흐를 수 있으며, 이 전류의 복조는 게이트부재(150)에 의해 제어되고, 게이트부재(150)에는 적당한 제어전압(V_G)이 인가된다. 전도성 나노튜브(151)는 후술하는 여러가지 구조중의 하나일 수도 있으며 금속성 나노튜브에 한정되지 않는다. 이 나노튜브는 단층형일 수도 있고 복층형일 수도 있다. 다음, 나노튜브를 구성하고, 나노튜브(151)와는 다른 특징을 갖는 게이트부재(150)를 나노튜브(151)와 교차시킨다. 게이트부재(150) 역시 단층형이나 다층형 나노튜브일 수 있다.

본 실시예에서, 블로킹 층의 전자친화도(Xb)와 같은 특징들은 게이트부재(150)와 관련된 것이다.

도 3A, 3B에 도시된 바와 같이, 전도성 나노튜브(151)는 게이트부재(150)와 교차하고, 게이트부재는 단층구조를 취할 수도 있고 또는 하나 이상의 내층 극미세구조(152)와 소정의 전자친화도(Xb)를 갖는 외층 배리어 물질(153)로 구성될 수도 있는바, 극미세구조(152)와 배리어물질(153) 역시 게이트부재(150)라 할 수 있다.

전자친화도(Xb)가 높은 배리어물질(153)은 양질의 N-채널 공핍모드 소자를 생성할 수 있는데, 이는 나노튜브(151)와 게이트부재(150) 사이의 접촉 공핍면적이 무시할 정도로 작기 때문이다. 예컨대, 배리어물질(153)이 쇼트키 형성금속, 반도체, 도핑된 반도체 또는 반도체층의 조합체 등의 전도성 물질이라면, 배리어물질(153)의 전자친화도(Xb)가 높아도 내부

게이트구조의 나노튜브(152)와 함께 사용할 수 있고 내부 나노튜브(152)로부터 캐리어들을 완벽히 공핍시킬 수도 있다. 이 경우, 내부 게이트부재 나노튜브(152)는 부도체구조의 지지부재 역할을 하거나 게이트부재(150)에서 전자친화도(Xb)가 높은 배리어물질(153)의 맨드릴 역할을 한다.

갈륨비소(GaAs) 집적회로에 유용한 높은 전자친화도(Xb) 물질을 결합한 것은 내부 나노튜브(152)위의 비도핑 GaAs의 조합층과 이 비도핑 GaAs 층 위의 N+ 도핑 AlGaAs 외층을 이용한 것이다. 이렇게 하면 GaAs/AlGaAs 경계면에서 GaAs 내부에 2차원 전자개스 "2DEG"가 생성되고, 게이트부재(150)에 연결된 게이트 전압 V_G가 게이트부재 밑으로 침투될 수 있도록 하는 전도성이 높은 수단이 제공된다. 이것은, GaAs 집적회로와 나노튜브 집적회로 사이에 여러 "브리지"중의 하나를 형성할 수 있다. 한편, 강하게 도핑된 N+ AgGaAs 층은 내부 나노튜브(152)와 접촉할 수 있고, GaAs층은 N+ AgGaAs 층 외부에 위치할 수도 있다. 또, 이런 나노튜브/GaAs(N+ AgGaAs)/N+ AgGaAs(GaAs) 조합은 극미세 GaAs 집적회로에 전력과 신호를 공급하기 위한 도체로서 완벽하게 사용될 수 있다.

도 3A, 3B에 도시된 바와 같이, 게이트부재(150)의 배리어물질(153)이 나노튜브로부터 전자를 완전히 결핍시키지 않을 정도로 충분히 작은 전자친화도(Xb)를 갖고 게이트를 격리하기에 충분한 배리어 높이를 가지면, 공핍모드의 N-채널 나노스위치를 훨씬 광범위한 물질로 성공적으로 형성할 수 있다. 게이트부재(150)에 제로 바이어스 전압(V_G)이 인가될 때는 전도성 나노튜브(151)는 이처럼 낮은 전자친화도의 배리어 물질(153)의 존재를 거의 감지하지 못한다. 나노튜브(151)내의 전자는 게이트부재(150)의 전자처럼 자유롭게 전도된다. 게이트부재(150)로 공급되는 게이트전압(V_G)이 충분히 음극성이면, 나노튜브(151)와 게이트부재(150) 사이의 접점에 인접한 모든 영역(154)에서 쿨롱 정전반발력에 의해 전도성 나노튜브(151)의 전자가 반발되어 결핍되고 나노튜브(151)의 전류의 흐름이 중단된다. 이런 전달특성이 도 3C에 도시되어 있는바, 음극성 게이트전압 $V_G=-V_{Nth}$에서, 전도성 채널은 이 임계전압을 핀치오프하고 전도가 정지된다. $-V_{Nth}$에서의 I/V_G 곡선의 기울기, 게이트의 "스위칭 회전율", $\Delta I/\Delta V_G$는 적당히 급격한바, 이는 전도성 나노튜브(151)를 충분히 결핍시키는데는 극히 작은 게이트전압(V_G)차 만이 필요하기 때문이다. 종래와 다른 점은, 게이트부재(150)의 전체 도전부가 나노튜브(151)의 종축선 방향의 종방향 성분 E_L와 이 종축선에 수직인 횡방향 성분 E_T를 갖는 공핍층 표면(154)의 전계(E)를 갖는 정전면을 형성하는데 있다. 이런 설계의 단순성은 전세계적으로 수년동안 상당한 노력을 기울어야만 제조 가능한 기초 카본 나노튜브를 완벽히 제조할 수 있다는데 있다. 전도성 나노튜브(151)가 밴드갭 g_1의 반도체 나노튜브이면, 게이트구조(150)는 g_1과는 다른 제2 밴드갭 $g_2(\neq g_1)$을 갖는 다른 반도체 나노튜브일 수 있다. 따라서, N-채널 공핍모드 나노스위치용으로 순수금속, 비금속은 물론 반도체 나노튜브 등을 이용할 수 있고, 나노튜브(151)와 게이트부재(150)를 포함해 광범위한 재료를 배리어물질(153)로 이용할 수 있지만, 나노튜브(151)와 게이트부재(150) 사이의 배리어는 게이트부재(150)에 유용한 게이트전압(V_G)을 제공하기에 충분한 배리어 높이를 가져 브레이크다운이나 누설 없이 나노튜브(151)를 충분히 공핍화 해야만 한다.

이상 설명한 바와 같이, 도 3A, 3B의 구조는 의사 P-채널 나노스위치에는 적당하지 않은데, 기본적으로 전도성 나노튜브(151)와 게이트부재(150)의 배리어물질(153) 사이의 접점 면적이 작기 때문이다. 물론, 도 4A, 4B에 도시된 바와 같이, 전도성 나노튜브와 배리어물질의 접점 면적을 증가시키는 것도 한가지 해결책이다. 배리어물질(153')이 전도성 나노튜브(151')를 완벽히 둘러싸서 충분한 접점면적을 제공하는 것이 바람직하다. 배리어물질(153')이 게이트부재(150')와 접촉했을 때 등전위면을 형성하기에 충분한 전도성을 갖지 않으면, 배리어물질(153')과 전도성 나노튜브(150') 둘레에 전도층(157)을 하나 더 추가할 수 있다. 전술한 바와 같이 충분한 전도성을 갖는 쇼트키 배리어물질 등의 물질에 대해, 게이트부재(150')가 쇼트키 배리어물질(153')에 대해 오옴접촉할 수만 있다면, 추가된 전도층(157)은 불필요하여 생략할 수도 있다. 게이트 임계전압 $V_G=-V_{Pth}$은 특별한 배리어물질(153')의 일함수 Φ_b의 직접적인 결과이다. 이런 배리어 게이트물질(153')에 필요한 조건은, 스위칭곡선(167,168)으로 표시된 것처럼 적당한 게이트전압 $V_G=-V_{pth}$에서 실제 전위배리어가 나노튜브(151')를 공핍화하지 않기에 충분한 배리어 높이를 가지면서도, 나노튜브(151')가 금속, 비금속 또는 반도체 나노튜브인가에 무관하게 제로 게이트 바이어스 전압 V_G에서 나노튜브(151')를 부분적으로는 공핍화하기에 충분히 큰 전자친화도(Xb)를 가져야 하는 것이다. 다른 의사 P-채널 나노스위치, 궁핍모드 소자 역시 도 4A, 4B의 구조를 이용해 제조될 수 있다. 배리어물질(153')이 전자는 가둘 수 있지만, 제로 게이트 바이어스 전압 V_G에서에서 나노튜브(151')로부터 전자를 부분적으로나 전체적으로 공핍화하기에 불충분한 전자친화도(Xb)를 갖는다면, 이런 양전위는 배리어물질(153')을 보조하여 배리어물질(153')에 자유전자를 가둘 수 있고 나노튜브(151')를 핀치오프할 수 있다. 이 경우가 도 4C에 파단곡선(169)로 도시되어 있다. 따라서, 도 4D와 같이, 소자는 좁은 전도도를 가질 수 있다.

*도 5A에 도시된 바와 같이, 이것이 N-채널 및 의사 P-채널 나노스위치의 게이트들이 동일한 네거티브 V_G 스위칭신호로 서로 연결되어 있는 실리콘 CMOS 쌍의 모든 장점들을 가질 수 있는 의사 "CMOS" 나노튜브 스위칭쌍 인버터를 형성하는데 필요한 모든 요소들이다. 최초의 나노튜브(171)는 제로 외부전위 바이어스 전압에서 캐리어들을 공핍화하기에 충분한 전자친화도(X_{b1})를 갖는 초기 배리어물질층(173)으로 코팅되는바, 이 물질은 전술한 바와 같다. 다음, 적절한 측방 폭을 갖는 마스킹 더미 나노튜브(175)를, 도 5A에 도시된 바와 같이, 초기 배리어물질층(173)의 일부분 위에 배치한다. 다음, 특별한 이온을 주입하여 초기 배리어물질층(173)을 제2 전자친화도(X_{b2})를 갖는 제2 배리어물질층(174)으로 변환하고, 제2 전자친화도는 마스크되지 않은 부위에서 전술한 바와 같이 제로 바이어스 전위에서 나노튜브(171)의 캐리어를 공핍화하기에는 불충분하다. 제2 배리어물질층(174)이 완벽히 또는 적어도 상당히 전도 나노튜브(171)를 감싸는 것이 바람직하기 때문에, 회전축으로서의 나노튜브(171)의 종축선을 중심으로 180°원호로 이온소스를 회전시킨다. 임시 나노튜브(175)를 마스크로 사용하고 원하는 이온을 180°원호로 주입하여, 내부 배리어물질층(173)의 마스크되지 않은 거의 모든 부분을 새로운 배리어물질층(174)으로 변환한다. 다른 예로는, 전술한 바와 같이 전도 나노튜브(171)에서 캐리어들을 공핍화하기에 충분한 전자친화도(X_{b1})를 갖는 SiO_2를 초기 배리어물질(173)로 이용하는 것이다. 다음, 마스크되지 않은 부분에 수소이온(H+)이나 불소이온(F-)을 주입하고 종래의 실리콘처럼 적절히 열처리하면, 전술한 바와 같이 배리어 물질(174)은 나노튜브(171)로부터 캐리어들을 공핍화하기에 불충분한 제2 전자친화도(X_{b2})를 갖는다. 이때, 배리어물질(173,174)이 표면특성이 서로 다른 절연체이기 때문에, 이들을 검출할 수 있으며, 도 5B에 도시된 바와 같이, TEM (Tunneling Electron Microscope) 탐침(176)을 이용해 두개 물질(173,174) 사이의 천이부를 검출할 수 있다. 이런 탐침에 인가된 전압은 인가된 전압펄스(예; 4V 미만)에 따라 고에너지 전계를 생성하여 천이부(178)에서 배리어물질(173,174)을 제거할 수 있음은 공지되어 있다(도 5B 참조). 다음, 전체 조립체에 전도성 코팅(177)을 코팅하고, 도 5C와 같이 TEM 탐침(176)을 후퇴시키며, 이 탐침은 천이부(178)를 다시 검출할 수 있고 전압펄스를 이용해 천이부(178)에서 도전성 코팅을 떼어낼 수 있다. 다음, 나노튜브(171)에 바이어스 전압을 인가하고 튜브조립체를 전기에칭조에 담가, 나노튜브(171)와 직접 접촉되어 있는 코팅(177) 부분을 먼저 에칭하고 배리어 물질(173,174) 위의 코팅(177)만을 남겨둔다(도 5D 참조). 한편, 초기 배리어물질(173)용으로는 적절한 쇼트키 형성물질을 이용할 수도 있다. 다음, 다른 형태의 금속이온들을 도 5A에서 노출된 부위(여기서는 배리어물질(173))로 주입하여 합금성분을 변경한다. 게이트부재(170)는 도 3A-4B의 부재(150,150')에 대응하고, 전도성 코팅(177)때문에 N-채널 공핍모드 나노스위치(171-174-177)와 의사 P-채널 개선모드 나노스위치(171-173-177)의 공통게이트를 형성한다. 따라서, 도 5E에서와 같이, 도체 나노튜브(179)는 P- & N-채널 소자들 사이의 노드에서 도체 나노튜브(171)와 접촉하고 인버터의 출력신호를 형성하며, 도체 코팅(177)은 공통 게이트 접속부를 형성하며, 게이트부재(170)는 신호입력부를 형성한다. 따라서, 매우 소형화된 의사 CMOS형 인버터는 도체부재의 도핑 없이 동일한 형식의 모든 나노튜브(170)를 이용해 제작될 수 있고 총 길이 약 50Å의 초소형 배열로 이루어진다.

도 5E의 CMOS형 나노인버터를 이용하면 , 교차결합된 나노멀티바이브레이터(NMV; nanomultivibrator)를 형성하기가 간단하다. 먼저, 도 5E의 나노인버터 2개를 취하여 하나를 다른 하나에 대해 180°회전시켜 게이트와 출력 연결부들이 도 6A처럼 정렬되도록 한다. 이 때, 좌측의 나노인버터가 도 5E에 도시된 것이다. 우측의 회전된 나노인버터도 그 구조는 동일하므로 '을 붙여 표시한다. 좌측의 나노인버터의 입력도체 나노튜브(170)는 우측의 나노인버터의 공통노드(179')에 접속되고, 싱글 도체 나노튜브들(170-179')이 이런 기본적인 교차결합을 구성한다. 마찬가지로, 좌측 나노인버터의 공통 노드(179)는 우측 나노인버터의 출력게이트(170')에 교차결합된다. 각종 영역들에 대한 전위를 표시하는데는 "-V"와 대지란 용어를 사용하는데, 이 표현은 각기 대지 및 +V와 등가적이라고 할 수 있는바, 이는 어느 것을 "대지"로 선택하는냐 하는 문제일 뿐이다. 게이트전압은 원하는 스위칭을 이루기 위해 네거티브이기 때문에, 처음 지적한 대지와 -V가 더 정확할 수 있다. 그러나, 종래의 공학에서는 +V와 대지를 사용하기 때문에 CMOS에서는 이런 표시도 동일하게 사용될 수 있다.

초기 도전 나노튜브(171)용으로 (10,10) 금속 나노튜브를 사용하고, 약 30Å 두께의 배리어층(173-174)과 약 10Å의 최종 도전코팅(177)을 추가하면, 도 5E의 인버터는 약 50Å의 직경과 50Å의 길이를 가질 수 있다. 두개의 나노인버터들 사이의 간격이 약 15Å라면, 약 130Åx75Å의 셀피치와 총면적 100㎚² 의 나노멀티바이브레이터(NMV)가 형성되고, 이것은 현재 제작되는 어떤 멀티바이브레이터보다도 체적에 있어 10^8배 작다.

나노멀티바이브레이터의 성능을 예상할 수 있다. 도전기판상의 도전 와이어의 커패시턴스(C)는 1996년 뉴욕에서 발간된 Wiley 2판의 163-165페이지에 기재된 W. Scott의 "The Physics of Electricity and Magnetism"에서 볼 수 있는 바와 같이

$$C=2\pi\varepsilon_0 L/Ln\{d+(d^2-R^2)^{1/2})/R\}$$

ε_0=8.85x10^{-12}F/m, d=25Å으로 도체축과 평면 사이의 간격, R=6.5Å으로서 도체의 반경, 나노인버터의 길이를 50Å, 다른 인버터까지의 출력라인의 길이를 130Å라 하면 나노인버터 노드의 총 커패시턴스(C)는 2x10^{-18}F이다. 이런 나노튜브 도체의 검사 저항이 전체 평균길이에 대해 400-750Ω/Å 범위에 있다고 하면, 180Å의 총 인버터 및 출력저항 길이에 대해 RC=0.1~0.3x10^{-12}sec의 RC 시정수 또는 현재의 실리콘소자보다 더 빠른 피코초 범위의 시정수를 얻는다. 이런 추정값은 1999년 I.S.S.C.C의 Jonshon의 계산법과 기타 비슷한 구조의 다른 계산법에서 각자 계산했다.

도 6A와 같은 나노멀티바이브레이터(NMV)를 여러개 체인 형태로 결합하여 카운트-다운 주파수분주기를 형성할 수 있다. 도 6A의 구조를 기본으로 하여 거울상 구조의 인접 멀티바이브레이터 단위를 형성하면, 끝에 있는 나노인버터들을 제외하고 다수의 거울 역전 나노멀티바이브레이터들(NMV^i)로 도 6B와 같은 전원연결을 갖는 인접 도체 나노튜브 쌍들이 카운팅 채널 형태로 생긴다. 노드 및 입출력 연결부에 대응하는 영역에는 두개의 기다란 도체 나노튜브들(190,190')이 생길 수 있다. 각각의 나노멀티바이브레이터(NMV)용 교차결합 연결부를 형성하려면, TEM 탐침을 후퇴시키고 전도 나노튜브들(190,190') 사이의 네번째 공간마다 4~6.5V의 전압을 인가하는데, 이전압은 이 지점에서 나노튜브들(190,190')을 절단하기에 충분하다. 이에 대해서는 1997년 발간된 71권 18호의 Applied Physics Letters의 2629-2631페이지의 L. Venema의 "Length control of individual carbon nanotubes by nanostructuring with a scanning tunneling microscope"를 참고한다. 이런 절단점을 도면에 "X"로 표시한다. 따라서, 나노튜브들(190,190')에 대응하는 교차결합 연결부들을 형성하는데 짧은 구간의 나노튜브를 이용하지 않고 하나의 기다란 구간을 이용한 뒤 이를 적절한 길이로 절단한다. 그러므로, 입력 전압 및 적절한 전원전압에 입력신호를 인가하는데, 현재의 어떤 기술에서 가능한 것보다 훨씬 더 짧은 간격으로 원하는 어떤 길이의 체인도 절단하는 나노멀티바이브레이터(NMV)를 이용할 수 있다.

전자산업에서는 파워소자가 중요한 역할을 하고 스위칭 회전율이 극히 높은 파워소자들은 통신이나 파워전송 등의 분야에서 아주 유용하다. 도 4A, 4B의 의사 P-채널소자의 설계를 파워소자의 설계에 쉽게 적용할 수 있다.

전도 나노튜브들은 이런 파워소자용으로 종래의 실리콘기술의 단점들은 전혀 없이 모든 장점들을 구비할 수 있다. 여러개, 또는 수십, 수백, 수백만, 수조개의 다수의 전도 나노튜브들을 금속, 비금속, 반도체 등에 상관없이 병렬로 배치하고 적당히 게이트시키면, 파워소자를 구성할 수 있다. 도 4A, 4B의 게이트부재(150')의 주목적은 하나의 전도성 나노튜브(151')에 전위를 제공하는데 있다. 다수의 나노스위치 튜브들을 병렬로하여 공통 게이트 및 공통 단자 접속부와 연결하기만 해도, ON 저항이 낮아지고 파워 조작능력이 증가된 나노스위치가 가능하다. 도 8A의 대형 파워소자에서는, 파워소자를 통해 거시적으로 게이트되어, 도 4A, 4B의 게이트 부재의 많은 제한요소들을 완화할 수 있다.

도 4A, 4B의 나노스위치를 이러한 대형 파워소자 구조로 변형하는 방법은 도 7로부터 시작한다. 순수금속, 비금속 또는 반도체로 된 나노튜브(241)를 배리어물질(243)과 도체(247)로 감싼다. 배리어물질(243)이 도체이면, 도전 나노튜브(241)의 양단에서 배리어물질(243)과 도체(247)를 오목하게 하는 것이 바람직하다. 도 4A, 4B의 실시예와 마찬가지로, 배리어물질(243)은 쇼트키 형성물질, 절연재, 반도체 재료 등, 어떤 종류의 도핑에 무관하게 Ⅲ-Ⅴ 및 Ⅱ-Ⅴ족 원소를 포함한 어떤 것도 가능하고, 배리어물질(243)의 전자친화도(Xb)가 제로 게이트전위(V_G)에서 도전 나노튜브(241)를 적어도 부분적으로 공핍화하기에 충분하면서 게이트 제어전압((V_G)에 유용한 게이트기능을 제공하기에 충분한 배리어 높이를 제공하기만 하면 된다. 필요한 도체(247)는 배리어물질(243)에 게이트전위면을 제공하기만 하면 되고, 어떤 경우에는 배리어물질(243)의 일부분으로 될 수도 있다. 유일한 조건은, 도체(247)나 배리어물질(243)은 게이트신호(V_G)에 비교적 낮은 게이트 RC 시정수를 제공하고 쇼트키 배리어를 선택할 경우 쇼트키 배리어물질의 일부분을 허용하기에 충분히 배리어물질(243)이 전도성을 띠어야 한다는 것이다. 그러나, 아래 별도로 설명하는 바와 같이, 이런 RC 시정수 조건은 대형 파워소자에서의 모든 RC 시정수 지연들을 효과적으로 없애도록 보상되어 파워스위치의 모든 요소들을 동시에 완벽히 스위칭할지라도, 상당히 스위칭 회전율이 높은 파워스위치를 제공할 수 있다.

물론, 카본 나노튜브를 제조하는 여러 다른 방법들이 있고 본 발명은 이런 방법 자체에 관한 것은 아니지만, 몇몇 방법들은 나노튜브 로프를 생성하고 이들 공정들은 직접적으로 본 발명에 관련이 있지는 않다. 그러나, 여기서 실시되는 본 발명의 모든 형식에 크게 응용될 수 있는 호환성 있는 방법들의 일례는, 1998년 11월 6일자 Science지 282권 5391호 1105-1107페이지에 기재된 Z.Ren의 "Synthesis of Large Arrays of Well-ALigned Carbon Nanoubes on Glass"이다. 여기서, 자유직립 정렬 및 이격된 카본 나노튜브들은 니켈 코팅 유리기판에서 한번에 수 ㎠까지 성장한다. 특히 도 3B는 이격된 나노-텔레폰 폴들의 집합을 보여준다. 나노튜브들이 분리되어 있는 이 특별한 공정에 의하면, 각종 유전체, 반도체 및

도전재에 화학증착법 등의 기존의 실리콘 처리기술을 이용할 수 있다. 나노튜브들을 종래의 실리콘 기술로 처리할 수 있도록 별도로 형성하는 종래의 어떤 기술도 이용할 수 있다. 이런 나노튜브 제조법을 이용하면 종래의 실리콘 처리기술을 이용해 카본 나노튜브(241)의 표면에 SiO_2, SiO_x 배리어물질(243)을 형성할 수 있다.

실제, 수개에서 수조개까지의 많은 전도 나노튜브들(241)을 한묶음으로 모은다. Z. Ren의 방법이나 기타 유사한 방법을 이용하면, 증착공정 이후 튜브들을 기판에서 분리수거하고, 이들을 뒤에 묶어 집적화하기 위해 작은 그룹으로 묶는 것은 간단한 일이다. 각각의 전도성 나노튜브(241)의 외부 도체(247)를 금이나 기타 높은 전도성 물질로 제조하면, 전도성 나노튜브들(241)의 양단을 연결하여 한묶음으로 또는 여러개의 그룹으로 묶을 수 있다. 대형의 아주 높은 파워소자의 경우에는 도 8A에 도시된 큰 거시적인 묶음을 사용할 수 있다. 여기서는 하키용 퍽 형태의 나노튜브(241) 묶음(251)이 도시되어 있는데, 이것이 공통 파워소자 패키지이기 때문이다. 의사 P-채널 증가모드 파워 나노스위치소자(259)는 도전성 나노튜브(241) 묶음(251), 및 모든 나노튜브들(241)의 도체들(257)을 제1 공통단자(G_1)에 연결하는 외부 게이트전극 밴드(250)를 포함한다. 나노튜브 묶음(251)과의 접점에서 약간 들어올려진 것으로 도시된 전도성 상판(258), 및 전도성 하판(257)은 나노튜브 묶음(251) 의 상하면과 노출단부들에 접촉한다. 도 7에 도시된 바와 같이, 각각의 전도성 나노튜브 조립체의 최종 직경이 60Å 급이라면, 직경 100㎜(4인치)의 퍽에서 약 $2.48x10^4$ 나노튜브의 묶음은 $7.8x10^{17}Å^2$의 면적을 가질 것이다.종래의 나노트랜지스터에서 가용 길이의 나노튜브 각각의 저항이 정확히 $10^6\Omega$이면, P-채널 파워 나노스위치는 $4.0x10^{-7}\Omega$을 가질 것이다. 100,000A에서 나노스위치의 전압강하는 0.04V이고, 이 값은 종래의 어떤 고체상태 스위칭소자가 단지 4KW 전력소비로 얻을 수 있는 값보다 훨씬 적은 값이다. 또, 본 발명의 의사 P-채널 증강모드 파워 나노스위치는 대칭이기 때문에, AC와 DC 전류 둘다에 사용할 수 있고 실리콘 파워스우치에서 공통으로 발견되는 특징인 "턴오프" 래칭문제가 없다. 이런 의사 P-채널 파워 나노스위치는 그러므로 전력전송이나 전력변환에 유용할 수 있다.

또, 본 소자의 게이트 회전율은 무엇보다도 각각의 도전 나노튜브(241)의 특성에 기초하여 극히 날카롭다고 예상된다. 그러나, 게이트부재(250)의 제1 게이트 단자(G_1)가 나노튜브 묶음(251)에서 오프셋되어 있으므로, 게이트부재(250)의 제1 게이트단자(G_1)로부터 전체 소자를 가로질러 나노튜브(241)의 각각에 게이트신호펄스를 전송하는데는 측방은 물론 반경방향으로도 비대칭적이다. 이것이 도 9A에 도시되어 있다. 여기서, 턴온 게이트신호(G_1)는 실제로는 무한의 회전율이 아니라 유한의 회전율을 갖는다. 제1 게이트단자(G_1)를 통해 게이트부재(250)에 인가된 유한 회전율의 게이트신호는 가장 가까이 인접한 나노튜브 그룹(241_1)을 둘러싼 도체(247_1)를 통과해야만 한다. 턴온 게이트신호는 도체(247_2)를 통해 그 다음 인접한 나노튜브 그룹(241_2)으로 전송된다. 게이트부재(250)로 입력된 제1 게이트단자(G_1)의 게이트신호는 도체(247_3)를 통해 그 다음 나노튜브 그룹(241_3)으로 전송되고, 도체(247_4)를 통해 가장 멀리 있는 나노튜브 그룹(241_4)으로 전송된다. 게이트부재(250)의 전도도가 아주 높으면, 나노튜브 그룹(241_4)이 하키퍽 패키지의 중앙에 위치할 것이다. 각각의 나노튜브(241)의 게이트가 배리어물질(243)을 포함하기 때문에, 게이트부재(250) 및 단자(G_1)로 연결된 제1 게이트회로와 나노튜브(241) 사이에 기본적으로 커패시턴스가 존재한다. 따라서, 게이트부재(250)의 외부단자(G_1)에 턴온 게이트신호를 인가하고 의사 P-채널 파워 나노스위치 조립체(250)에 이 게이트신호를 전송하는 사이에 기본적으로 RC 시정수 지연이 항상 생긴다. 그러므로, 이들 나노스위치들이 각각 보일 수 있는 극히 높은 회전율은 이런 실제 게이트 RC 시정수에 의해 크게 완화될 것이다.

그러나, 파워 나노스위치 나노튜브의 여러 구간 및 그룹들의 임계값을 잘 선택하면 본 발명의 시정수의 영향을 조절하여, 특정 시간에 제1 입력단자(G_1)에 가장 가까운 나노스위치 그룹(241_1)의 스위칭 임계값(V_{th1})이 가장 높은 값을 갖고, 그 다음 나노스위치 그룹(241_2)은 더 낮은 임계값(V_{th1})을 가지며, 제1 이력단자에서 가장 멀리 있는 나노스위치 그룹(241_4)은 가장 낮은 임계값(V_{th4})을 갖도록 할 수 있다. 게이트 회전율 및/또는 게이트 회전율 형상 및 각종 임계값을 적절히 선택하여, 각각의 나노튜브 그룹들을 정확히 동일하게 시동할 수 있다. 또, 게이트 회전율과 게이트펄스 형상을 각종 그룹들 사이의 시간차를 최소화하도록 조절하여 소자를 최적화할 수도 있다. 편의상 도면에는 4개의 그룹만이 도시되어 있지만, 수백, 수천개의 그룹들을 형성하여 게이트 RC 시정수를 원하는대로 조절 및 보상할 수 있다. 따라서, 각 나노튜브 스위치의 극히 높은 회전율도 최종 의사 P-채널 파워스위치에서 원하는대로 보전될 수 있다. 이렇게 되면 상당히 높은 전도 회전율을 갖는 파워스위치가 형성된다.

각종 구간의 게이트 임계치(V_{th})는 절연체의 두께를 변화시키는 등의 종래의 방법에 의해 조절될 수 있다. 배리어물질(243)로서 절연체를 선택하면, 절연체의 두께를 배치 단위로 변화시킬 수 있어, 각각의 나노튜브의 전체에 걸쳐 싱글 배치 내에서 두께가 균일하도록 할 수 있다. 수백개 이상의 도전 나노튜브 스위치 배치들을 서로 다른 특성으로 분리 형성하면,

미세히 구분된 임계치들을 갖는 나노튜브 스위치들을 형성하여 소정의 특성과 성질을 갖는 나노튜브 파워스위치를 설계할 수 있다. 또, 임계전압 조절수단에 나노튜브의 직경이 포함될 수 있다. 임계치를 조절하는 다른 방법은 배리어물질(243)의 쇼트키 배리어물질용으로 아주 미세하게 구분된 다른 성분들의 합금을 형성하여 일함수(ϕ_b)를 조정하고 서로 다른 임계치를 갖는 나노튜브 스위치를 형성하는 것이다.

도 9B는 RC 시정수가 관련된 파워소자의 일정한 회전율 게이트펄스가 불규칙하고 여러 나노튜브 그룹(241_x)의 임계치를 변화시켜서 적절히 보상될 수 있음을 보여준다. 그러나, 도 8A처럼 직경 100mm 정도의 대형소자에서는 더 날카로운 게이트펄스를 이용할 수 있고 어떤 경우에는 이것이 바람직하다. 도 9C에서, 게이트 턴온펄스의 첫번째 구간은 대지전위로부터 매우 높은 회전율로 강하한다. 이때문에, 더 먼 부분들이 거의 임계치까지 게이트전압으로 충전되어 먼 부분일수록 "예비충전"될 수 있다. 게이트펄스는 급격히 강하한 뒤, 좀더 천천히 강하하여 말단부위를 충전한다. 인접 그룹의 임계치(V_{thl})까지 강하하도록 게이트펄스를 선택하여, 다른 모든 그룹들이 각각의 임계치에 도달하고 모든 소자들이 동시에 온되도록 한다.

도 8A의 파워 나노스위치 역시 도 8B, 8C에 도시된 것처럼 동시에 턴오프되도록 최적화될 수 있다. 도 9A의 제2 외부 게이트입력(G_2)에서는 턴오프 단자로서의 게이트입력(G_2)에 가장 가까운 그룹(241_4)이 최저 임계전압(V_{th4})을 갖고 이 외부게이트 턴오프단자(G_2)에서 가장 먼 부분의 임계전압(V_{th1})은 최고로 된다. 이 경우, 최적화된 턴오프소자의 턴오프 게이트펄스는 도 9D와 같이 되는 것이 바람직한바, 이 게이트펄스는 높은 초기 회전율로 인접 그룹(241_4)의 임계치까지 급격히 제로값을 향해 상승하여 G_2에서의 게이트 턴오프 신호를 가장 말단그룹(241_1)으로 전송하여 말단그룹들을 예비충전하기 시작하며, 나노튜브들의 가장 인접한 그룹들(241_4)이 턴오프될 때 다른 모든 그룹들이 전체 파워 나노소자에 동시에 턴오프되도록 회전율이 더 낮아진다.

지금까지의 카본 나노튜브 기술의 문제점들중의 하나는 나노튜브를 쉽게 취급하고 분리하는데 있었다. 나노튜브들의 전도성이 높을수록, 반데발스 힘이 커지고 건조한 판에 놓인 끈적끈적한 스파게티처럼 나노튜브들이 서로는 물론 기판에 들러붙게 된다.

따라서, 본 발명의 다른 특징에 의하면, 나노튜브나 기타 극미세구조물을 원하는 위치에 수 Å 정도로 정확하게 분리위치시키는 장치를 제공한다. 과거 십년에 걸쳐, Kasanuki의 미국특허 5,418,771, Yanagisawa의 미국특허 5,519,686 및 5,721,721 등에 기재된 노력에 의해, 수 Å 정도의 원하는 위치의 원자직경내에서 X-Y 평면에 탐침을 위치시킬 수 있는 원자 기록 및 현미경 기술 및 장치가 개발되었다. 따라서, 이런 장치에 의해 기록/현미경 탐침들을 원자직경내에서 X-Y 평면에 정밀하게 위치시킬 수 있음은 물론, 원하는 만큼 회전시킬 수 있게 되었다. 이들 장치의 기능에 따라 이들 장치들은 "스캔 탐침 현미경"인 SPM(scanning probe microscope), "스캔 터널링 현미경"인 STM(scanning tunneling microscope), "원자력 현미경"인 AFM(atomic force microscope), " 근접 필드 광학현미경"인 NFOM(near field optical microscope)로 구분될 수 있는바, 상기 약자는 각종 형식의 탐침들을 정밀하게 제어하고 수 Å의 X-Y 위치정밀도로 기능하는 장치들의 용도를 설명한다.

본 발명의 한가지 특징은, 종래의 기본적인 탐침 포지셔닝 장치들을 변경한 새로운 탐침과 탐침 헤드를 설계하여, 단백질이나 개별 분자들과 같은 극미세구조나 나노튜브의 극미세 조작과 극미세 이송 등의 전혀 새로운 기능을 수행하는데 있다.

도 10은 이런 이송 탐침의 제1 실시예를 보여준다. 여기서, 일반적인 원추형 TEM 탐침과 비슷한 탐침(281)은 그 상단부로부터 팁까지 이어진 나선형 도체(282)를 갖는다. 나선형 도체(282)의 상단부(283)는 전류원에 연결된다. 탐침(281)은 중합 탄화플루오르 등과 같이 반데발스 힘이 극히 낮은 박막 절연재(285)로 구성된다. 절연 탐침 표면이나 탐침에 증착된 금속, 또는 금속막 저항처럼 나선형으로 가공되거나 에칭된 금속 표면에 나선형 도체가 권선된다. 나노튜브가 감기면, 나노튜브가 그 자체의 작은 사이즈, 큰 강도 및 높은 전도성 때문에 도체로서 사용될 수 있다. 한편, 나선형 도체(282) 측면에 리턴 도체(284)를 부착할 수도 있다. 탐침(281)에 전압이 인가되면, 팁(287)의 286 부위에 정전 전계가 집중되어 그 밑의 나노재료가 도전체이건 유전체이건 상관 없이 이 나노재료에 스위치 가능한 힘이 유도된다. 또, 시간에 따라 변하는 전류가 나선형 도체(282)에 생성되면, 탐침의 팁(287) 바로 밑의 부분(286)에서 최대값을 갖는 자속필드(286)가 생성되어, 금이나 땜납 나노볼 등의 전도성 극미세구조물을 흡인하여 원하는 위치로 이송하여 배치할 수 있다.

기다란 나노튜브에 대한 다른 전송 탐침 조립체의 제2 실시예가 도 11에 도시되어 있다. 단면이 V형이고 측방향으로 기다란 끌 모양의 탐침(291)은 도 10의 탐침(281)과 마찬가지로, 도 10의 282, 283, 284에 대응하는 나선형 도체(292), 전류원(293) 및 리턴 도체(294)를 갖는다. 전계 및/또는 자계는 도 10에 도시된 점 방식이 아닌 선형 방식으로 기다란 팁(297)

밑의 부분(298)에 집중된다. 이런 끌모양의 탐침의 길이는 원하는 카본 나노튜브의 길이와 대략 동일하다. 도 11의 탐침 조립체는 나노튜브 등 기다란 전도성 극미세구조물을 흡인하여 원하는 위치로 이송 및 배치할 수 있다. 이 탐침은 Kasanuki의 동일 특허에 개시된 것 처럼 1111, 1112와 비슷한 회전수단과 함께 사용하기에 특히 적합하다. 이 회전체를 이용하면, 이송 탐침(291)의 길이에 일치하는 길이의 나노튜브를 흡인하여 이송 및 배치에 적절한 각도로 회전시킬 수 있다.

도 10, 11의 실시예 어떤 것에서도, 나선형 도체(282,292)에 인가된 전류는 DC, 사인파형 AC, 삼각 톱니파 또는 AC 성분을 갖는 어떤 파형도 가능하다. 나노튜브 등의 극미세 구조물이 탐침에 적절히 흡착되었는지의 여부는 전류의 "이조(detuning)"를 감시하거나 "미세한" 와전류 검출모드에 의해 검출하는데, 이때 낮은 레벨의 AC 신호를 이용할 수 있다. AC 레벨이 높으면, 탐침에 반발력이 생겨 극미세구조물을 전도성을 갖는 기판에 내려놓을 수 있고, 이 기판이 전도성을 갖지 않을 경우에는 뒤에 제거할 수 있는 도체로 극미세구조물을 코팅하여 반발력을 얻을 수 있다. 따라서, 전계와 자계의 결합을 이용해 모든 종류의 극미세구조물을 아주 정밀하게 흡착, 분석 및 배치할 수 있다.

본 발명자는 플루오르카본을 포함한 플루오르화 화합물 등 반데발스 힘이 약한 재료에 나노튜브를 담가 나노튜브들을 서로 분리하고 실용상 중요한 부위를 형성하는 방법을 안출했다. 나노튜브 묶음을 둘러싸고 분리하는 플로오르카본 용매를 이용해도 나노튜브에 고유한 문제인 접착성을 완전히 해결할 수는 없다.

도 12A는 나노튜브 분리/정렬 탱크(300)를 보여준다. 이 탱크(300)는 플루오르카본 등 반데발스 힘이 낮은 용매로 채워진다. 이 용매의 밀도와 기타 성질은, 용매조(301)에 나노튜브들이 잘 부유하도록 나노튜브와 비슷한 성질을 갖도록 선택한다. 이 탱크(300)는 대략 삼각형 단면으로 기다란 것이 바람직하다. 탱크(300)의 일측면에는, 용매조(301)내에 평평한 음파를 생성할 수 있는 기다란 음향 트랜스듀서(303)를 설치한다. 탱크(300)의 형상, 신호발생기(304)의 주파수 및 탱크내의 용매를 적절히 선택하면 탱크(300)내에 평평한 정재파를 생성할 수 있다. 사용중에 나노튜브들은 용매중에 부유하고, 나노튜브를 손상시키거나 열화시키지 않는 주파수와 진폭으로 신호발생기(304)가 동조된다. 나노튜브들이 적절한 밀도로 부유되면, 나노튜브들이 신호발생기(304)에 의해 부유되고 트랜스듀서(303)에 의해 분리되어 용매조(301) 표면으로 떠오른다. 평평한 음파(305)의 기능은, 나노튜브들(302)을 부드럽게 조금씩 표면까지 밀어서 중앙 노드가 최저 에너지 상태에 있도록 하는데 있다. 따라서, 나노튜브들은 어느정도 구부러져 있더라도 똑바로 펴지고 나노튜브의 최저 에너지 상태인 중앙 노드에서 용매탱크(300)의 종방향에 완전히 일치하게 된다.

도 12B는 직사각형 음향판(300')을 갖는 변형례가 도시되어 있는데, 이 음향판의 일단부에는 도 12A와 같은 기능을 하는 평면형 음향 트랜스튜서(303)와 신호발생기(304)가 부착되어 있고 극미세 구조물이 놓이는 평면 음향노드(302')를 형성한다. 도 12B의 장치는 전술한 본 발명의 실시예와는 다른 용도로 사용될 수 있는바, I-빔 부재 등과 같은 구조물로 작용할 수도 있다.

본 발명의 다른 특징은 이들 특징들을 서로 결합하여, 나노튜브들을 포함한 극미세 구조물을 이송하여 최종적으로 회로를 포함한 구조로 위치시키는 실용수단을 구성하는데 있다. 앞에서 설명한 바와 같이, 본 발명은 Kasanuki와 Yanagisawa의 종래의 기술의 기록/현미경 탐침 포지셔닝 장치를 나노튜브의 이송 및 배치 목적으로 전혀 새로운 방식으로 이용한다. 본 발명에 따른 변형된 장치의 일례가 도 13에 도시되어 있는바, 이 장치는 Yanagisawa의 탐침 포지셔닝 장치의 여러개의 탐침을 Kasanuki의 탐침 회전장치에 극히 정밀하게 결합한 것이다. 탐침들(316,315,314,312)을 서로 정렬/고정한 것이 다중탐침헤드 조립체(310)이다. 당 기술분야에 일반적이듯이, 모든 탐침들은 수직 포지셔닝 능력을 가지며, 이는 완전히 종래의 기술이고 도시되지 않았다. 나노튜브 분리/정렬 탱크(300)나 판(300')에 나노튜브들이나 기타 극미세 구조물들을 준비한다. 길이와 형태가 다른 여러개의 나노튜브들이 필요하면, 각각의 형태에 맞게 이런 탱크들(300)을 여러개 준비할 수 있지만, 편의상 하나만 도시한다.

헤드조립체(310)는, 도 11의 기다란 이송탐침(312), 관련 회전/수직 포지셔닝 메카니즘(311), 도 10의 원추형 이송탐침(314), 표준형 STM 탐침(315) 및 다른 기준 포지셔닝 STM 탐침(316)을 포함한다. 적당한 인코딩 포지셔닝 매체(317) 위에 기준 포지셔닝 탐침(316)을 배치하여, Yanagisawa에 의해 지적된대로 전체 헤드 조립체(310)의 위치를 X-Y 방식으로 수 Å까지 결정할 수 있다. 기판(318)은 일체화된 나노튜브 기판이고 그 위에 놓일 수 있고 전기적 특성이 변화하는 나노튜브를 공핍화하기에 불충분한 전자친화도(X)를 갖는 것이 바람직하다. 기판(318)은 또한 나노튜브들을 최종 위치에 유지하기에 충분한 반데발스 힘을 갖는다.

*여러가지 길이의 나노튜브들이 놓이면, 헤드 조립체(310)상의 기다란 이송탐침들(312)과 관련 회전메커니즘(311)을 여러개 이용할 수 있지만, 편의상 하나만 도시한다. 회전 메커니즘(311)은 중앙컴퓨터(320)에서 제어되는 회전/수직 포지션 회로(321)에 의해 제어된다. 이송 탐침(314)은 전압전류원(319')과 회로 모니터(319)에 연결되고, 헤드(312)는 관련 전압전류원(313')과 모니터(313)에 연결된다. 하나의 나노튜브만이 기다란 이송탐침(312)에 적절한 길이로 부착되었는지의

여부를 판단하는데는 전압전류원(313')에서의 "미세 와이어" 와전류 분석법을 이용한다. 두개의 나노튜브가 탐침(312)에 잘못 부착되면, 이송 탐침(312)의 나선형 유도코일(292)의 이조 정도에 의해 그 잘못부착상태가 표시된다. 그 뒤, AC 구동 전류가 감소되거나 조절되어 나노튜브들중 하나를 떼어놓을 수 있다.

그뒤, 하나의 나노튜브만이 이송탐침(312)과 적절히 정렬되었음을 확인한 뒤, 컴퓨터(315)는 인코딩 포지션 탐침(316)과 연계되어 이송탐침(312)을 회로 기판(318)의 소정 위치로 이동시키고 나노튜브를 원하는 각도로 회전시킨 뒤, 헤드를 하강시키고 나노튜브를 해제하여 정확한 위치와 각도로 나노튜브를 놓는다. 저항연결을 위해 소형 나노볼이 필요하면, 동일한 방식으로 원추형 이송탐침(314)을 이용할 수 있다.

표준형 STM 탐침(315)은 기판(318)상의 나노회로 구조물 위를 지나가면서 지금까지 배치된 각종 나노튜브들의 위치 정밀도를 검사한다. 표준형 STM 탐침(315)은 필요할 경우 각종 나노튜브 조립체들을 조금씩 제위치로 이동시킬 수 있다. 또, 전술한 바와 같이, 표준형 STM 탐침(315)에 4~6.5V의 전압을 인가하여 나노튜브를 절단할 수도 있고, 더 낮은 전압을 인가하여 특정 부위의 불필요한 유전체나 기타 코팅을 없앨 수도 있다.

특별한 형태의 여러개의 나노회로들을 쌓을 필요가 있으면, 본 발명의 다른 변형례를 이용할 수 있는바, 이 장치가 다음 위치로 급속히 회전하여 그 다음 요소들을 배치할 수 있도록 기준 매체(317)에 영구 표시를 할 수 있다. 또, 본 장치는 천천히 작동될 수도 있고, 중앙컴퓨터(320)를 통해 자체적으로는 없는 프로그램으로 동작할 수도 있는바, 이 경우 종래의 자동차 제조공정에서와 같이 각종 분리/정렬 탱크(300)의 충전에만 인간의 조작이 필요하다.

발명의 효과

따라서, 기존의 기술을 완전히 다른 불분명한 목적으로 이용하는 많은 경우, 나노튜브 등의 극미세구조물들을 N채널 및 의사 P채널소자로 만들 수 있도록 변형하여 동일한 나노튜브들에 적용할 수 있으며, 단순하거나 복잡한 논리 게이트/카운트 회로에 적용할 수 있음음 물론 성능이 뛰어난 파워소자를 쉽게 구현할 수 있다. 전술한 바와 같이, 본 발명은 나노튜브나 나노회로에 한정되지 않으며, DNA, 단백질, 고분자, 화학분자 등 특수한 방식으로 이송 및 정렬되어야 하는 모든 극미세구조를 포함할 수 있다.

본 발명은 전자분야, 계측분야, 컴퓨터, 생명공학, 의약분야, 화학분야, 배전 및 변환분야, 우주선에 적당한 고강도 구조물에 적용할 수 있다.

(57) 청구의 범위

청구항 1.

원자현미경 포지셔닝 장치에서 극미세구조의 X-Y 축 이송 및 조작을 위한 헤드조립체에 있어서:

상기 헤드조립체용의 기준 인코딩 STM 탐침 및, 헤드조립체의 정확한 X-Y 평면위치를 결정하기 위해 상기 기준 인코딩 STM 탐침과 함께 사용되는 기준 인코딩 포지셔닝 매체;

극미세구조의 형성을 위한 기판;

회전회로에 의해 제어되는 회전 기구와 연결되고, 바로 밑에 형성되는 적어도 하나의 전기장과 시변 자기장을 집중시키기 위한 적어도 하나의 탐침으로서, 원추형이고 기다란 테이퍼 끝 형태로 되어 있고, 접점을 갖는 도체로 구성되면서 절연 커버와 나선형 자기코일을 구비하며, 구동회로 및 구동전류 센서회로에 연결되는 적어도 하나의 탐침; 및

상기 기준 인코딩 STM 탐침, 상기 구동회로 및 구동전류 센서회로는 물론, 상기 적어도 하나의 탐침, 상기 회전 기구 및 회전회로에 연결된 컴퓨터;를 포함하고,

상기 컴퓨터에 저장된 소정의 프로그램과 프로그래밍 명령에 따라 상기 기판에 소정의 극미세구조를 형성하기 위해 원자 직경내의 정밀도로 필요한 위치에 소정의 방식으로 나노튜브를 포함한 극미세구조물들을 흡인, 조작, 배치 및 내려놓을 수 있는 것을 특징으로 하는 헤드조립체.

청구항 2.

원자현미경 포지셔닝 장치에서, 극미세구조의 이송 및 조작을 위한 헤드조립체에 있어서,

바로 밑에 형성되는 시변 자기장을 집중시키기 위한 탐침을 포함하는 것을 특징으로 하는 헤드조립체.

청구항 3.

제2항에 있어서,

상기 탐침은 접점을 갖는 도체로 구성되면서 절연 커버와 그 위에 나선형 자기 코일을 구비한 것을 특징으로 하는 헤드조립체.

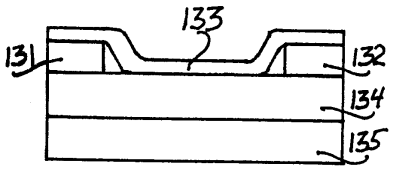
청구항 4.

제3항에 있어서,

상기 탐침은 원추형이고 끌 형태이고, 상기 나선형 코일은 상기 탐침의 측면 위에 형성되어 있는 것을 특징으로 하는 헤드조립체.

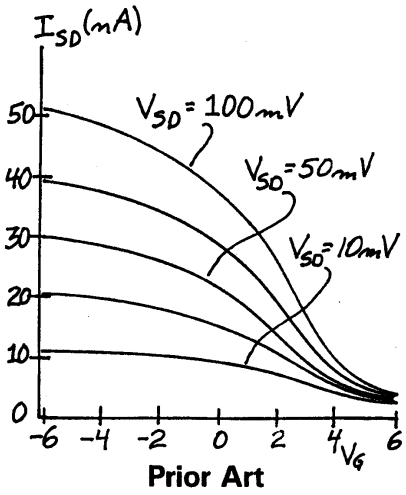
도면

도면1a

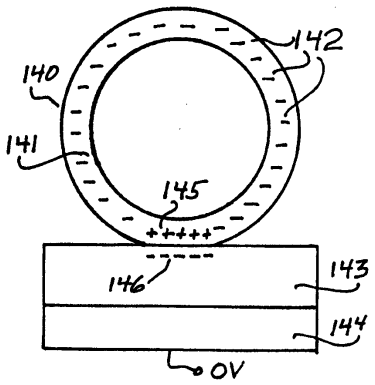


Prior Art

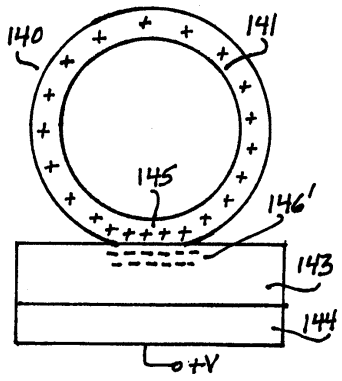
도면1b



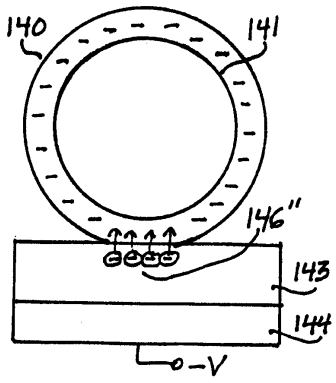
도면2a



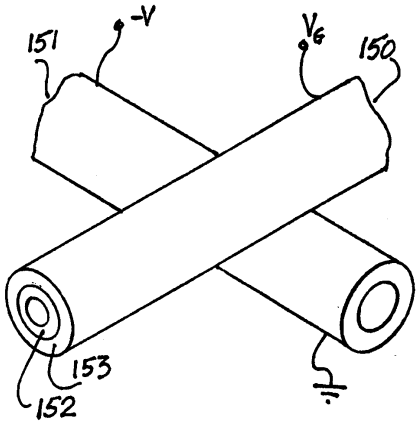
도면2b



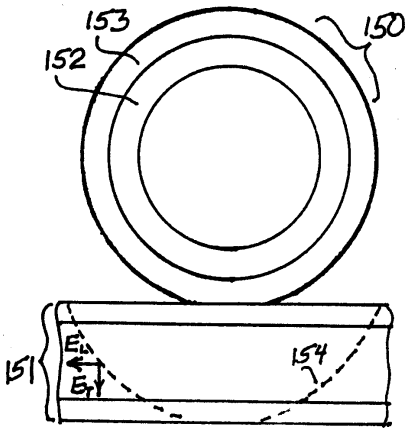
도면2c



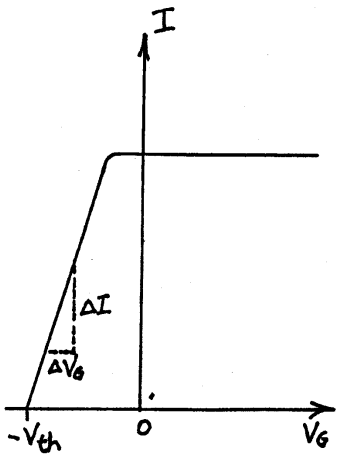
도면3a



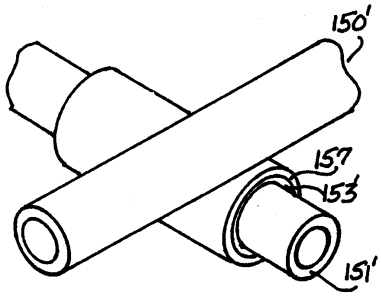
도면3b



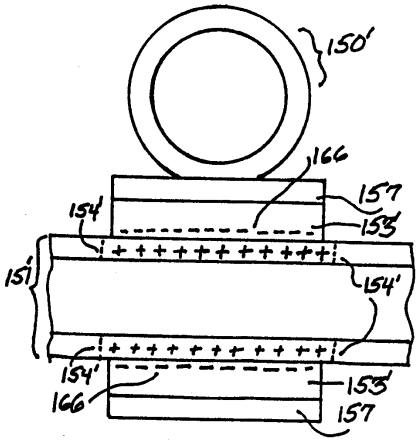
도면3c



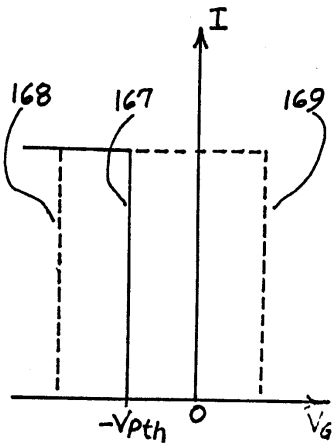
도면4a



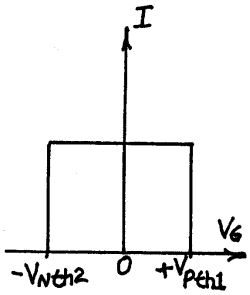
도면4b



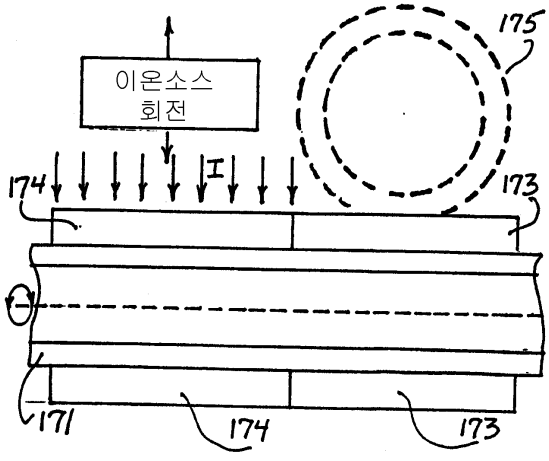
도면4c



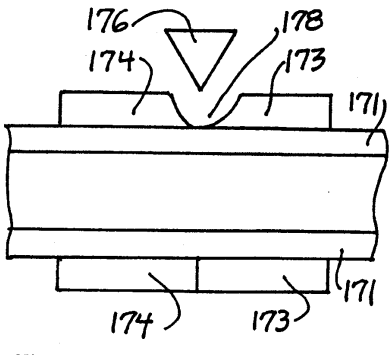
도면4d



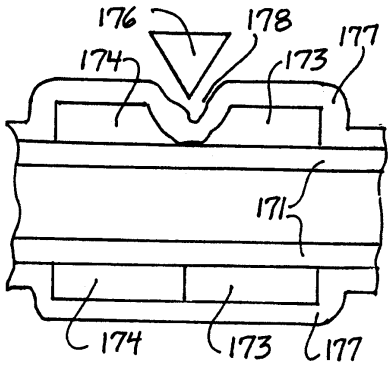
도면5a



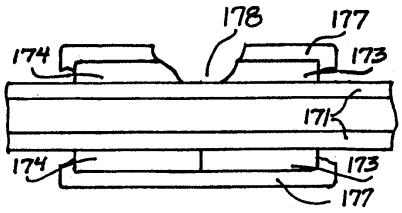
도면5b



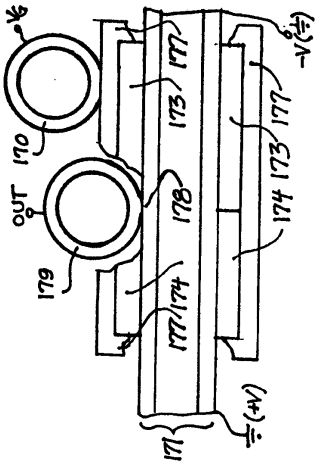
도면5c



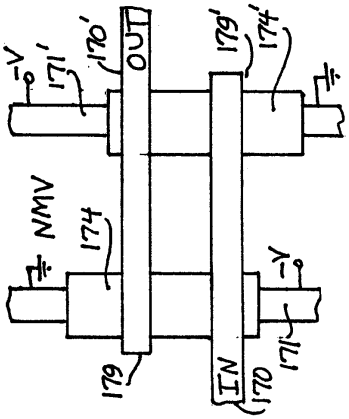
도면5d



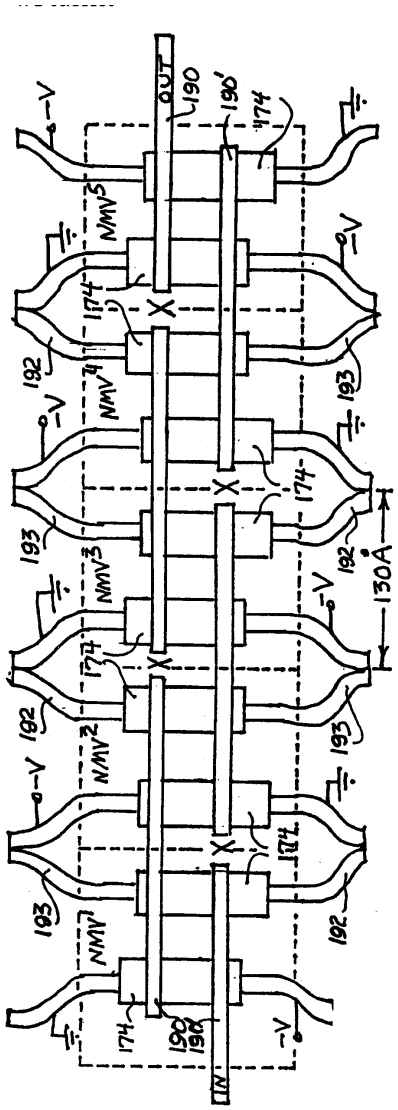
도면5e


(+)전원
111
112
113
114
115
116
117
118
119
120
121

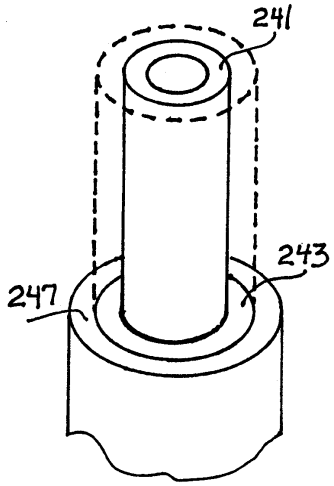
도면6a


OUT
IN
171
172
173
174
175
176
177
178
179
180
181

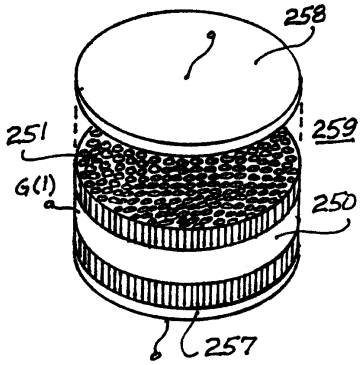
도면6b


OUT
190
190'
174
-V
NMV3
NMV4
NMV2
NMV1
192
193
130Å
IN

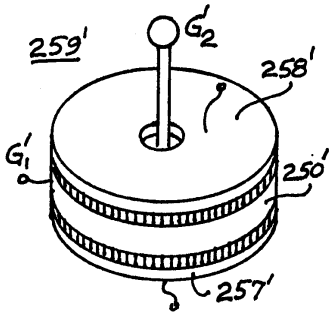
도면7


241
243
247

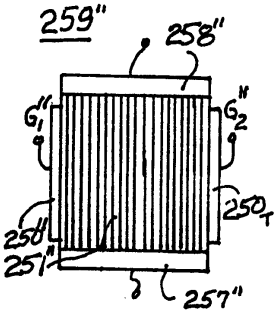
도면8a



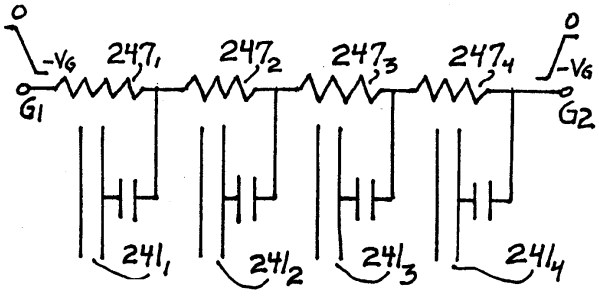
도면8b



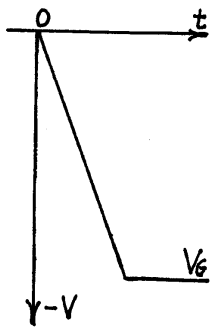
도면8c



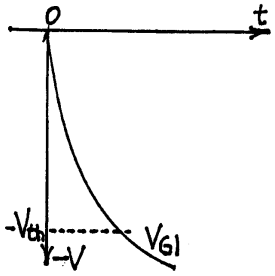
도면9a



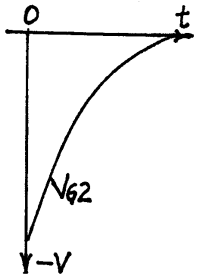
도면9b



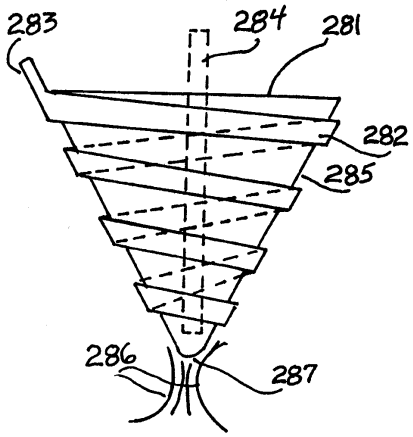
도면9c



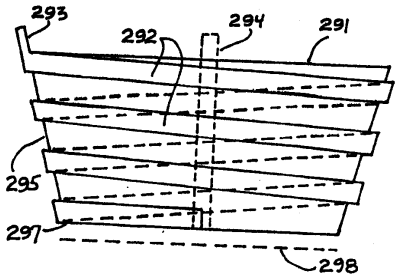
도면9d



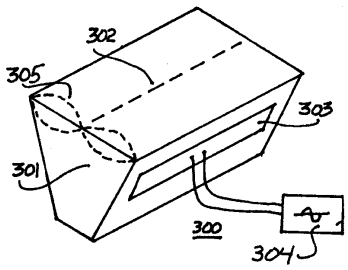
도면10



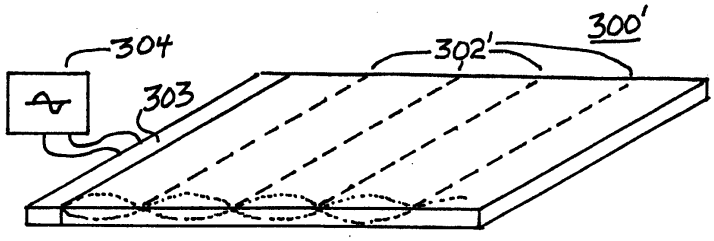
도면11



도면12a



도면12b



도면13

