



(19) 대한민국특허청(KR)
(12) 등록특허공보(B1)

(45) 공고일자 2019년06월10일
(11) 등록번호 10-1987556
(24) 등록일자 2019년06월03일

(51) 국제특허분류(Int. Cl.)
H01B 5/00 (2006.01) B23K 26/382 (2014.01)
B32B 3/26 (2006.01) B32B 7/12 (2019.01)
C08J 5/18 (2006.01) C08L 79/08 (2006.01)
H01B 13/00 (2006.01) H01B 3/30 (2006.01)
(52) CPC특허분류
H01B 5/00 (2013.01)
B23K 26/382 (2015.10)
(21) 출원번호 10-2017-0167204
(22) 출원일자 2017년12월07일
심사청구일자 2017년12월07일
(56) 선행기술조사문헌
KR101759093 B1*
KR1020120065792 A*
KR1020150030556 A
KR1020170136677 A
*는 심사관에 의하여 인용된 문헌

(73) 특허권자
고려대학교 산학협력단
서울특별시 성북구 안암로 145, 고려대학교 (안암동5가)
(72) 발명자
한창수
서울특별시 강동구 고덕로 131, 105동 1701호
최욱
서울특별시 동대문구 경동시장로12길 15, 2층 203호
전은석
경기도 용인시 기흥구 언남로29번길 50, 103동 101호
(74) 대리인
특허법인 누리

전체 청구항 수 : 총 12 항

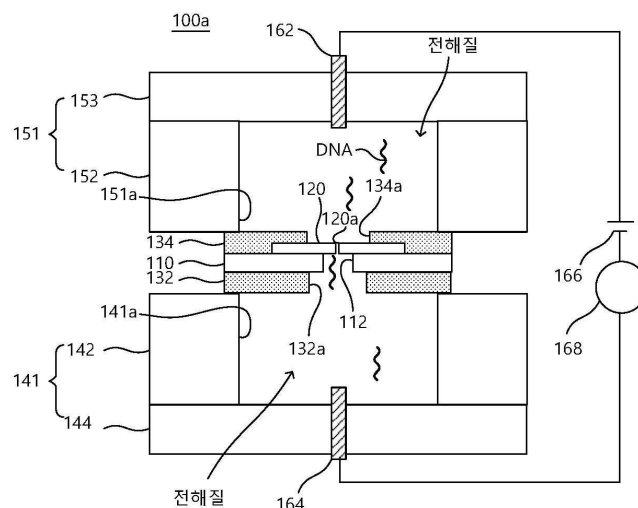
심사관 : 오주철

(54) 발명의 명칭 유연성 나노-포어 소자 및 이의 제조 방법

(57) 요약

본 발명의 일 실시예에 따른 나노-포어 소자는 얇은 유리나 폴리머와 같은 매우 값싸고 손쉽게 구할 수 있는 유연성 유전체 필름을 사용한다. 상기 유연성 유전체 필름의 마이크로 구멍은 펄스 레이저를 이용해 형성될 수 있다. 이에 따라, 상기 나노-포어 소자는 유연성을 가지고 쉽게 깨지지 않을 수 있다. 또한, 상기 유연성 나노-포어 소자는 사용하는 재료 측면에서 매우 값싸고 대량생산이 가능하다는 장점이 있다. 특히 기존의 단단한 기판의 경우에는 복잡한 공정과 비용 이외에도 매우 깨지기 쉬워서 이를 다루기가 매우 어렵다. 또한, 실링을 위한 실장 공정에서, 단단한 기판은 쉽게 파손될 수 있다.

대표도 - 도4



(52) CPC특허분류

B32B 3/266 (2013.01)
B32B 7/12 (2019.01)
C08J 5/18 (2013.01)
C08L 79/08 (2013.01)
G01N 27/3278 (2013.01)
G01N 33/48721 (2013.01)
H01B 13/0026 (2013.01)
H01B 3/306 (2013.01)
C08J 2379/08 (2013.01)

이 발명을 지원한 국가연구개발사업

과제고유번호	2012M3A7B4049863
부처명	과학기술정보통신부
연구관리전문기관	한국연구재단
연구사업명	나노·소재원천기술개발사업
연구과제명	나노소자 기반 능동형 이온제어 원천기술 및 분석기술 개발
기 여 율	1/1
주관기관	고려대학교
연구기간	2012.09.20 ~ 2017.09.19

명세서

청구범위

청구항 1

직경 $1\mu\text{m}$ 내지 $100\mu\text{m}$ 의 마이크로 구멍을 가진 유연성 유전체 필름; 및

상기 유연성 유전체 필름 상에 배치되고 1nm 내지 100nm 의 나노-포어를 적어도 1개 이상 가진 나노-포어 박막을 포함하고,

상기 나노-포어는 상기 마이크로 구멍과 정렬되어 배치되고,

상기 유연성 유전체 필름과 나노-포어 박막 사이에 배치되는 접착층;

상기 유연성 유전체 필름의 하부면에 배치되고 제1 관통홀을 구비한 하부 절연 탄성층; 및

상기 유연성 유전체 필름의 상부면에 배치되고 제2 관통홀을 구비한 상부 절연 탄성층;를 더 포함하고,

상기 제1 관통홀은 상기 제2 관통홀과 정렬되고 상기 유연성 유전체 필름의 상기 마이크로 구멍을 노출하도록 배치되고,

상기 제2 관통홀은 상기 나노-포어 박막의 상기 나노-포어를 노출하도록 배치되고,

상기 유연성 유전체 필름은 폴리이미드인 것을 특징으로 하는 유연성 나노-포어 소자.

청구항 2

제1항에 있어서,

상기 유연성 유전체 필름은 $20\mu\text{m}$ 내지 $200\mu\text{m}$ 의 두께를 가지는 폴리이미드(polyimide)인 것을 특징으로 하는 유연성 나노-포어 소자.

청구항 3

제1항에 있어서,

상기 나노-포어 박막의 두께는 10nm 내지 100nm 인 것을 특징으로 하는 유연성 나노-포어 소자.

청구항 4

삭제

청구항 5

제1항에 있어서,

상기 유연성 유전체 필름의 하부에 배치되는 지지 기판을 더 포함하고,

상기 지지 기판은 상기 유연성 유전체 필름의 상기 마이크로 구멍을 노출하는 관통홀을 포함하는 것을 특징으로 하는 유연성 나노-포어 소자.

청구항 6

제1항에 있어서,

상기 나노-포어 박막은 SiN_x , SiO_2 , TiO_2 , 또는 HfO_2 인 것을 특징으로 하는 유연성 나노-포어 소자.

청구항 7

제1항에 있어서,

상기 나노-포어 박막은 Si, 그래핀, 그래핀옥사이드, h-BN, MoS_2 , MoSe_2 , WS_2 , WSe_2 , HfS_2 , 또는 MoTe_2 중에서 적

어도 하나를 포함하는 단분자 두께의 막 또는 이들의 적층으로 이루어진 것을 특징으로 하는 유연성 나노-포어 소자.

청구항 8

삭제

청구항 9

제1항에 있어서,

상기 하부 절연 탄성층 및 상기 상부 절연 탄성층은 PDMS인 것을 특징으로 하는 유연성 나노-포어 소자.

청구항 10

제1항에 있어서,

상기 하부 절연 탄성층의 하부면에 배치되고 상기 하부 절연 탄성층의 가장 자리와 정렬되어 상기 제1 관통홀을 노출시키는 하부 캐비티를 제공하는 하부 챔버;

상기 상부 절연 탄성층의 상부면에 배치되고 상기 상부 절연 탄성층의 가장 자리와 정렬되어 상기 제2 관통홀을 노출시키는 상부 캐비티를 제공하는 상부 챔버;

상기 상부 챔버에 삽입되는 상부 전극; 및

상기 하부 챔버에 삽입되는 하부 전극;을 더 포함하고,

상기 상부 챔버 및 상기 하부 챔버는 전해질에 의하여 채워지는 것을 특징으로 하는 유연성 나노-포어 소자.

청구항 11

유연성 유전체 필름에 직경 $1\mu\text{m}$ 내지 $100\mu\text{m}$ 의 마이크로 구멍을 형성하는 단계;

상기 유연성 유전체 필름의 상기 마이크로 구멍을 덮도록 나노-포어 박막을 전사하는 단계;

상기 유연성 유전체 필름에 부착된 상기 나노-포어 박막에 1nm 내지 100nm 의 나노-포어를 적어도 1개 이상 형성하는 단계;

상기 유연성 유전체 필름과 상기 나노-포어 박막 사이에 배치되고 접착층을 제공하는 단계;

상기 유연성 유전체 필름의 하부면에 배치되고 제1 관통홀을 구비한 하부 절연 탄성층을 제공하는 단계; 및

상기 유연성 유전체 필름의 상부면에 배치되고 제2 관통홀을 구비한 상부 절연 탄성층을 제공하는 단계;를 포함하고,

상기 유연성 유전체 필름은 폴리이미드인 것을 특징으로 하는 유연성 나노-포어 소자의 제조방법.

청구항 12

제11항에 있어서,

상기 유연성 유전체 필름은 폴리이미드이고,

상기 직경 $1\mu\text{m}$ 내지 $100\mu\text{m}$ 의 마이크로 구멍은 레이저 가공법, 광리소그래피 또는 집속 이온 빔(FIB)으로 형성되는 것을 포함하는 유연성 나노-포어 소자의 제조방법.

청구항 13

제11항에 있어서,

상기 하부 절연 탄성층의 하부면에 배치되고 상기 하부 절연 탄성층의 가장 자리와 정렬되어 상기 제1 관통홀을 노출시키는 하부 챔버를 제공하는 단계;

상기 상부 절연 탄성층의 상부면에 배치되고 상기 상부 절연 탄성층의 가장 자리와 정렬되어 상기 제2 관통홀을 노출시키는 상부 챔버를 제공하는 단계;

상기 상부 챔버에 삽입되는 상부 전극을 제공하는 단계; 및

상기 하부 챔버에 삽입되는 하부 전극을 제공하는 단계;를 더 포함하고,

상기 제1 관통홀은 상기 제2 관통홀과 정렬되고 상기 유연성 유전체 필름의 상기 마이크로 구멍을 노출하도록 배치되고,

상기 제2 관통홀은 상기 나노-포어 박막의 상기 나노-포어를 노출하도록 배치되고,

상기 상부 챔버 및 상기 하부 챔버는 전해질에 의하여 채워지는 것을 특징으로 하는 유연성 나노-포어 소자의 제조 방법.

청구항 14

제13항에 있어서,

상기 하부 절연 탄성층 및 상기 상부 절연 탄성층은 PDMS이고,

상기 상부 챔버 및 상기 하부 챔버는 아크릴 재질인 것을 특징으로 하는 유연성 나노-포어 소자의 제조 방법.

발명의 설명

기술 분야

[0001] 본 발명은 유연성 나노-포어 소자 및 이의 제조 방법에 관한 것으로서, 더욱 상세하게는 DNA와 같은 나노 직경을 지닌 물질을 분석하거나 최소 직경이 100nm 이하 크기의 물질을 감지할 수 있는 유연성 나노 포어 소자 및 유연성 나노 포어 소자의 제조 방법에 관한 것이다.

배경 기술

[0002] 나노-포어 소자는 매우 적은 양의 이온의 통과를 제어하고, 또 나노-포어를 통과하는 물질들을 분석할 수 있다. 나노-포어 소자의 동작 원리는 기존의 쿨터 카운터(Coulter counter)의 원리와 유사하다. 하지만, 포어의 크기가 1 μ m 또는 100nm이하의 미세한 나노-포어를 가진다는 특징이 있다. 최근에는 상기 나노-포어 소자에 관하여 연구가 활발히 진행되고 있다.

[0003] 예를 들면, 나노-포어 소자는 생명체의 이온 채널과 유사한 구조를 가지므로, 상기 나노-포어 소자에 형성된 나노-포어를 통과할 수 있는 DNA와 같은 물질들에 포함된 A,G,T,C와 같은 염기서열의 분석 연구가 진행 중에 있다. DNA와 같은 물질이 나노-포어를 통과할 경우, 정전기적 상호 작용 또는 기하학적 제한 등에 의한 에너지 장벽이 존재한다. 따라서, DNA는 외부의 힘(전기장, 자기장, 압력 등) 의해 에너지 장벽을 극복하여 통과할 수 있다. 이로써 나노-포어 내부를 통과하는 DNA는 나노-포어 내부를 차지함으로써, DNA는 전해질(electrolyte) 내에 존재하는 이온의 이동에 의한 전류의 흐름을 블로킹(blocking)한다. 결과적으로, 나노-포어 내부에 아무것도 없는 경우에 정상적인 이온만이 용이하게 나노-포어를 통과하면, 제1 전위차(potential)가 발생한다. 또한, DNA가 나노-포어의 내부를 차지할 경우, 상대적으로 제1 전위차보다 낮은 제2 전위차가 발생한다. 따라서, DNA가 나노-포어의 내부를 차지할 경우, 측정된 전류(current)가 감소된다. 이를 블로킹 전류(blocking current)라고 한다. 상기 블로킹 전류의 크기를 이용해 DNA를 시퀀싱(sequencing)하려는 연구가 진행되고 있다.

[0004] 이와 더불어 DNA 뿐만 아니라 단백질(protein), 마이크로 RNA, 나노와이어, 폴리머체인, 나노입자 등 나노-포어의 크기보다 작은 나노물질을 통과시키면서 이들을 분석하거나 감지하는 연구 또한 진행 중이다.

[0005] 일반적으로, 나노-포어 소자는 생물학적 나노-포어 소자와 솔리드스테이트(Solid-state) 나노-포어 소자로 분류된다. 생물학적 나노-포어 소자는 일반적으로 지질막(Lipid membrane)에 나노-포어(nano-pore)를 가진 단백질(protein)을 삽입하여 활용된다. 대표적으로는 α -hemolysin의 포어(pore)를 통한 DNA 검색 연구가 있다. 또한, 다른 생물학적 포어(pore) 구조를 이용한 연구도 진행되고 있다.

[0006] 한편, 솔리드스테이트(Solid-state) 나노-포어는 생물학적 나노-포어와 달리 주로 무기재료를 기반으로 하여 제작된다. 솔리드스테이트(Solid-state) 나노-포어는 멤브레인을 지지하는 고정형 기판 위에 부착하는 형태를 가진다. 매우 작은 나노-포어를 정확히 형성하기 위해서 얇은 멤브레인(membrane) 위에 구멍을 뚫는다. 이러한 얇은 멤브레인(Membrane)으로 주로 Si₃N₄, SiO₂ 등이 주로 사용된다. 또한 이러한 얇은 멤브레인(Membrane)으로 그

래핀(Graphene), hBN, MoS₂와 같은 2차원 나노물질이 사용되기도 하였다.

[0007] 그러데, 이러한 솔리드스테이트(Solid-state) 나노-포어의 경우에는 나노 미터 사이즈의 구멍이 뚫리는 멤브레인(Membrane)을 지지하는 기관은 단단한(Rigid) 구조를 가지고 있다. 따라서, 솔리드스테이트(Solid-state) 나노-포어는 구부리거나 휘기에는 적합하지 않다. 또한 기관으로 사용되는 Si, 파이렉스(Pyrex), 퀴츠(Quartz)는 수 μm 정도의 매우 작은 구멍을 뚫는 작업을 필요하다. 따라서, FIB(focused Ion beam) 또는 포토리소그라피(Photolithography)와 같은 고비용이거나 대량생산이 어려운 방법이 사용되고 있다.

[0008] 한국 등록 특허 10-1759093는 산화실리콘 기관 상에 형성된 아몰퍼스 실리콘층을 구비한 절연성 지지 부재 상에 접합된 나노-포어 맴브레인을 개시하고 있다. 그러나, 절연성 지지 부재는 복잡한 공정을 통하여 형성되어, 나노-포어 소자는 많은 시간과 비용을 요한다.

발명의 내용

해결하려는 과제

[0009] 본 발명의 해결하고자 하는 일 기술적 과제는, 나노-포어를 가지는 박막을 지지하는 유연성 유전체 필름을 이용하여 값싸고, 제작이 용이하며, 유연성 나노 포어 소자를 제공하는 것이다.

[0010] 본 발명의 해결하고자 하는 일 기술적 과제는 유연성 나노 포어 소자의 제조 방법을 제공하는 것이다.

과제의 해결 수단

[0011] 본 발명의 일 실시예에 따른 유연성 나노-포어 소자는, 직경 $1\mu\text{m}$ 내지 $100\mu\text{m}$ 의 마이크로 구멍을 가진 유연성 유전체 필름; 및 상기 유연성 유전체 필름 상에 배치되고 1nm 내지 100nm 의 나노-포어를 적어도 1개 이상 가진 나노-포어 박막을 포함한다. 상기 나노-포어는 상기 마이크로 구멍과 정렬되어 배치된다.

[0012] 본 발명의 일 실시예에 있어서, 상기 유연성 유전체 필름은 $20\mu\text{m}$ 내지 $200\mu\text{m}$ 의 두께를 가지는 폴리이미드(polyimide)일 수 있다.

[0013] 본 발명의 일 실시예에 있어서, 상기 나노-포어 박막의 두께는 10nm 내지 100nm 일 수 있다.

[0014] 본 발명의 일 실시예에 있어서, 상기 유연성 유전체 필름과 나노-포어 박막 사이에 배치된 접착층을 더 포함할 수 있다.

[0015] 본 발명의 일 실시예에 있어서, 상기 유연성 유전체 필름의 하부에 배치되는 지지 기관; 및 상기 지지 기관과 상기 유연성 유전체 필름 사이에 배치된 접착층을 더 포함할 수 있다. 상기 지지 기관은 상기 유연성 유전체 필름의 상기 마이크로 구멍을 노출하는 관통홀을 포함할 수 있다.

[0016] 본 발명의 일 실시예에 있어서, 상기 나노-포어 박막은 SiNx, SiO₂, TiO₂, 또는 HfO₂ 일 수 있다.

[0017] 본 발명의 일 실시예에 있어서, 상기 나노-포어 박막은 Si, 그래핀, 그래핀옥사이드, h-BN, MoS₂, MoSe₂, WS₂, WSe₂, HfS₂, 또는 MoTe₂ 중에서 적어도 하나를 포함하는 단분자 두께의 막 또는 이들의 적층으로 이루어질 수 있다.

[0018] 본 발명의 일 실시예에 있어서, 상기 유연성 유전체 필름의 하부면에 배치되고 제1 관통홀을 구비한 하부 절연 탄성층; 및 상기 유연성 유전체 필름의 상부면에 배치되고 제2 관통홀을 구비한 상부 절연 탄성층;를 더 포함할 수 있다. 상기 제1 관통홀은 상기 제2 관통홀과 정렬되고 상기 유연성 유전체 필름의 상기 마이크로 구멍을 노출하도록 배치되고, 상기 제2 관통홀은 상기 나노-포어 박막의 상기 나노-포어를 노출하도록 배치될 수 있다.

[0019] 본 발명의 일 실시예에 있어서, 상기 하부 절연 탄성층 및 상기 상부 절연 탄성층은 PDMS일 수 있다.

[0020] 본 발명의 일 실시예에 있어서, 상기 하부 절연 탄성층의 하부면에 배치되고 상기 하부 절연 탄성층의 가장 자리와 정렬되어 상기 제1 관통홀을 노출시키는 하부 챔버를 제공하는 하부 챔버; 상기 상부 절연 탄성층의 상부면에 배치되고 상기 상부 절연 탄성층의 가장 자리와 정렬되어 상기 제2 관통홀을 노출시키는 상부 챔버를 제공하는 상부 챔버; 상기 상부 챔버에 삽입되는 상부 전극; 및 상기 하부 챔버에 삽입되는 하부 전극;을 더 포함할 수 있다. 상기 상부 챔버 및 상기 하부 챔버는 전해질에 의하여 채워질 수 있다.

[0021] 본 발명의 일 실시예에 따른 유연성 나노-포어 소자의 제조방법은, 유연성 유전체 필름에 직경 $1\mu\text{m}$ 내지 100

μm 의 마이크로 구멍을 형성하는 단계; 상기 유연성 유전체 필름의 상기 마이크로 구멍을 덮도록 나노-포어 박막을 전사하는 단계; 및 상기 유연성 유전체 필름에 부착된 상기 나노-포어 박막에 1 nm 내지 100 nm 의 나노-포어를 적어도 1개 이상 형성하는 단계;를 포함한다.

[0022] 본 발명의 일 실시예에 있어서, 상기 유연성 유전체 필름은 폴리이미드이고, 상기 직경 $1\mu\text{m}$ 내지 $100\mu\text{m}$ 의 마이크로 구멍은 레이저 가공법, 광리소그래피 또는 집속 이온 빔(FIB)으로 형성될 수 있다.

[0023] 본 발명의 일 실시예에 있어서, 상기 유연성 유전체 필름의 하부면에 배치되고 제1 관통홀을 구비한 하부 절연 탄성층을 제공하는 단계; 상기 유연성 유전체 필름의 상부면에 배치되고 제2 관통홀을 구비한 상부 절연 탄성층을 제공하는 단계; 상기 하부 절연 탄성층의 하부면에 배치되고 상기 하부 절연 탄성층의 가장 자리와 정렬되어 상기 제1 관통홀을 노출시키는 하부 챔버를 제공하는 단계; 상기 상부 절연 탄성층의 상부면에 배치되고 상기 상부 절연 탄성층의 가장 자리와 정렬되어 상기 제2 관통홀을 노출시키는 상부 챔버를 제공하는 단계; 상기 상부 챔버에 삽입되는 상부 전극을 제공하는 단계; 및 상기 하부 챔버에 삽입되는 하부 전극을 제공하는 단계;를 더 포함할 수 있다. 상기 제1 관통홀은 상기 제2 관통홀과 정렬되고 상기 유연성 유전체 필름의 상기 마이크로 구멍을 노출하도록 배치되고, 상기 제2 관통홀은 상기 나노-포어 박막의 상기 나노-포어를 노출하도록 배치되고, 상기 상부 챔버 및 상기 하부 챔버는 전해질에 의하여 채워질 수 있다.

[0024] 본 발명의 일 실시예에 있어서, 상기 하부 절연 탄성층 및 상기 상부 절연 탄성층은 PDMS이고, 상기 상부 챔버 및 상기 하부 챔버는 아크릴 재질일 수 있다.

발명의 효과

[0025] 본 발명의 실시예들에 따른 유연성 나노-포어 소자는 가격이 저렴하고 간단한 공정에 의해서 유연성 유전체 필름에 마이크로미터 크기의 구멍을 형성한 후, 나노-포어 박막을 전사하여 형성된다. 이에 따라, 본 발명의 실시예들에 따른 유연성 나노-포어 소자는 기존의 실리콘(Si) 기반의 나노-포어 소자에 비해 매우 적은 노이즈를 가지고 있으며 높은 측정 해상도를 구현할 수 있다.

[0026] 또한, 본 발명의 실시예들에 따른 유연성 나노-포어 소자는 전체적으로 경제성 및 응용성이 높은 소자를 제공할 수 있다. 또한 유연성 유전체 필름은 1회용, 부착형, 다중 소자형 등의 다양한 변형 및 진보가 용이한 소자이다.

도면의 간단한 설명

[0027] 도 1은 본 발명의 일 실시예에 따른 유연성 나노-포어 소자를 나타내는 단면도이다.
 도 2는 도 1의 유연성 나노-포어 소자의 나노-포어 및 마이크로 포어를 나타내는 TEM 이미지이다.
 도 3은 본 발명의 일 실시예에 따른 유연성 나노-포어 소자의 제조방법을 설명하는 도면들이다.
 도 4는 본 발명의 또 다른 일 실시예에 따른 유연성 나노-포어 소자를 설명하는 개념도이다.
 도 5는 본 발명의 또 다른 실시예에 따른 유연성 나노-포어 소자를 나타내는 단면도이다.
 도 6은 본 발명의 또 다른 실시예에 따른 유연성 나노-포어 소자를 나타내는 단면도이다.
 도 7은 본 발명의 일 실시예에 따른 유연성 유전체 필름을 나타내는 현미경의 이미지들이다.
 도 8은 본 발명의 일 실시예에 따른 나노-포어 소자의 전류-전압 특성 및 전해질의 농도에 따른 컨덕턴스를 나타내는 도면이다.
 도 9는 본 발명의 또 다른 실시예에 따른 이온 전류를 시간에 따라 측정한 결과들이다.
 도 10은 도 9의 이온 전류의 파워 스펙트럼이다.
 도 11은 본 발명의 일 실시예에 따른 폴리이미드 기반 나노-포어 소자의 DNA 전위(translocation)를 나타내는 결과이다.

발명을 실시하기 위한 구체적인 내용

[0028] 본 발명의 일 실시예에 따른 나노-포어 소자는 얇은 유리나 폴리머와 같은 매우 값싸고 손쉽게 구할 수 있는 유연성 유전체 필름을 사용한다. 상기 유연성 유전체 필름의 마이크로 구멍은 펄스 레이저를 이용해 형성될 수 있

다. 이에 따라, 상기 나노-포어 소자는 유연성을 가지고 쉽게 깨지지 않을 수 있다. 또한, 상기 유연성 나노-포어 소자는 사용하는 재료 측면에서 매우 값싸고 대량생산이 가능하다는 장점이 있다. 특히 기존의 단단한 기관의 경우에는 복잡한 공정과 비용 이외에도 매우 깨지기 쉬워서 이를 다루기가 매우 어렵다. 또한, 실링을 위한 실장 공정에서, 단단한 기관은 쉽게 파손될 수 있다.

[0029] 본 발명의 일 실시예에 따른 나노-포어 소자는 매우 값싸게 제조할 수 있다. 따라서, 1회만 사용하는 소자로도 활용이 가능하다. 상기 유연성 유전체 필름을 사용하기 때문에 제조 공정의 유연성 확보가 용이하고, 복수의 나노-포어 소자를 하나의 유연성 유전체 필름 상에 제작하는데도 상대적으로 유리하다.

[0030] 하나의 유연성 유전체 필름에 제작된 복수의 나노 포어 소자는 다양한 측정신호를 통해 보다 효과적으로 통과하는 피검사체를 분석할 수 있다. 따라서 복수의 나노 포어 소자는 DNA, 마이크로 RNA의 Sequencing뿐 아니라 다양한 나노물질들을 분석하는 장치로 활용할 수 있다.

[0031] 본 발명의 일 실시예에 따른 유연성 나노-포어 소자는, 100nm이하 직경의 나노-포어를 적어도 1개 이상 가지고 100 nm이하의 두께를 갖는 나노-포어 박막; 및 상기 나노-포어 박막을 지지하는 힘이 가능한 유연성 유전체 필름을 포함할 수 있다. 상기 유연성 유전체 필름은, 반도체 기관에 비하여 깨지지 않아 취급 용이성을 제공할 수 있다. 상기 유연성 유전체 필름은, 원하는 사이즈로 용이하게 절단할 수 있다. 또한, 상기 유연성 유전체 필름은 피검사체를 저장하는 챔버와 결합하는 경우에도 용이하게 실링될 수 있으며 파손 가능성을 감소시킬 수 있다.

[0032] 상기 유연성 유전체 필름은 두께가 200 μm 이하인 폴리머 재질로 이루어진 필름으로 펄스 레이저 등에 의하여 용이하게 가공될 수 있다. 상기 유연성 유전체 필름은 화학적 안정성 및 내열성을 구비한 폴리이미드일 수 있다.

[0033] 상기 유연성 유전체 필름 상에는 SiO_2 , SiN_x , HfO_2 , TiO_2 와 같은 나노-포어 박막이 배치될 수 있다. 상기 나노-포어 박막은 100nm이하의 두께를 가진다. 상기 나노-포어 박막은 100nm 이하의 나노-포어를 적어도 하나 가질 수 있다.

[0034] 또한 상기 나노-포어 박막은 이차원물질인 Si, 그래핀, 그래핀옥사이드, h-BN, MoS_2 , MoSe_2 , WS_2 , WSe_2 , HfS_2 , MoTe_2 , 및 MXenes를 중에서 적어도 하나를 포함할 수 있다. 상기 나노-포어 박막은 두께가 1nm ~ 10nm 사이의 단분자층에 의해 이루어지거나 이를 적층 또는 하이브리드화한(예: 그래핀 + h-BN, 그래핀 + MoS_2) 물질일 수 있다. 특히, 상기 나노-포어 박막의 두께가 얇아질수록 검출영역이 작아져서 더 미세한 물질을 검출하는데 효과가 있다. 또한 상기 유연성 유전체 필름 및 상기 나노-포어 박막의 힘에 따른 새로운 측정기능을 기대해볼 수 있다. 구체적으로, 상기 유연성 유전체 필름 및 상기 나노-포어 박막은 상하부의 압력 차이에 의하여 힘에 따라, 상기 나노-포어의 직경이 가변될 수 있다. 이로써 DNA의 이동속도나 검출되는 컨덕턴스(Conductance) 변화에도 차이가 생길 수 있어서 검출성능을 향상시키는데 도움이 될 수 있다.

[0035] 상기 유연성 유전체 필름과 상기 나노-포어 박막은 표면 에너지의 차이에 의해 접촉제없이 부착될 수 있다. 보다 확실한 실링을 위해 접착제가 상기 유연성 유전체 필름과 상기 나노-포어 박막 사이에 배치될 수 있다.

[0036] 지지 기관은 상기 유연성 유전체 필름이 매우 얇으므로 이를 지지할 수 있다. 이 때, 상기 지지 기관은 상기 유연성 유전체 필름보다 두꺼우며 유연성 유전체 필름의 마이크로 구멍보다 같거나 더 큰 관통홀을 갖는다. 상기 지지 기관은 소자를 보다 쉽게 가공하고, 상기 나노-포어 박막의 나노-포어를 제조하는데 용이하도록 하기 위한 것이다.

[0037] 본 발명의 일 실시예에 따른 나노-포어 소자의 제조 방법에 따르면, 유연성 유전체 필름에 μm 이상의 크기를 가진 마이크로 구멍을 펄스 레이저(Laser)로 만들 수 있으며, 집속 이온 빔(FIB), 포토리소그리파(Photolithography) 등 다양한 방법으로 형성할 수 있다. 바람직하게는 펨토초 레이저(Femtosecond Laser), 나노초 레이저(Nanosecond Laser)와 같은 펄스 레이저 가공이 단순하고 빠르게 적은 개수의 마이크로 구멍을 형성하는 데 효과적이다.

[0038] 상기 유연성 유전체 필름 상에 나노-포어 박막을 전사하여 부착한다. 이 상기 나노-포어 박막은 100nm이하 바람직하게는 20nm이하의 구멍을 적어도 1개 이상 가질 수 있다. 이때, 부착의 용이성을 위해 상기 유연성 유전체 필름과 상기 나노-포어 박막 사이에 접착층이 배치될 수 있다. 상기 접착층은 상기 유연성 유전체 필름에 코팅될 수 있다. 그리고 상기 나노-포어 박막의 나노 포어의 가공 방법은 TEM, FIB, SEM등을 이용해 만들어질 수 있

지만, 이에 한정되지 않는다.

- [0039] 이하, 첨부된 도면들을 참조하여 본 발명의 바람직한 실시예를 상세히 설명하기로 한다. 본 발명의 이점 및 특징, 그리고 그것들을 달성하는 방법은 첨부되는 도면들과 함께 상세하게 후술 되어 있는 실시예를 참조하면 명확해질 것이다. 그러나 본 발명은 여기서 설명되는 실시예에 한정되는 것이 아니라 서로 다른 형태로 구체화될 수도 있다. 오히려, 여기서 소개되는 실시예는 개시된 내용이 철저하고 완전해질 수 있도록 그리고 당업자에게 본 발명의 사상이 충분히 전달될 수 있도록 하기 위해 제공되는 것이며, 본 발명은 청구항의 범주에 의해 정의될 뿐이다. 명세서 전문에 걸쳐 동일 참조 부호는 동일 구성 요소를 지칭한다. 따라서, 동일한 참조 부호 또는 유사한 참조 부호들은 해당 도면에서 언급 또는 설명되지 않았더라도, 다른 도면을 참조하여 설명될 수 있다. 또한, 참조 부호가 표시되지 않았더라도, 다른 도면들을 참조하여 설명될 수 있다.
- [0040] 도 1은 본 발명의 일 실시예에 따른 유연성 나노-포어 소자를 나타내는 단면도이다.
- [0041] 도 2는 도 1의 유연성 나노-포어 소자의 나노-포어 및 마이크로 포어를 나타내는 TEM 이미지이다.
- [0042] 도 1 및 도 2를 참조하면, 상기 유연성 나노-포어 소자(100)는, 직경 $1\mu\text{m}$ 내지 $100\mu\text{m}$ 의 마이크로 구멍(112)을 가진 유연성 유전체 필름(110); 및 상기 유연성 유전체 필름(110) 상에 배치되고 1nm 내지 100nm 의 나노-포어(120a)를 적어도 1개 이상 가진 나노-포어 박막(120)을 포함한다. 상기 나노-포어(120a)는 상기 마이크로 구멍(112)과 정렬되어 배치된다.
- [0043] 상기 유연성 유전체 필름(110)은, 폴리머 필름으로, 구체적으로 폴리이미드(Polyimide), PTFE(Poly Tetra Fluoro Ethylene), PE, 또는 PET일 수 있다. 상기 유연성 유전체 필름(110)의 두께는, $20\mu\text{m}$ 내지 $200\mu\text{m}$ 일 수 있다. 상기 유연성 유전체 필름(110)의 마이크로 구멍(112)의 직경은 $1\mu\text{m}$ 내지 $100\mu\text{m}$ 일 수 있다. 상기 유연성 유전체 필름(110)은 하나의 변의 길이가 수 밀리미터 내지 센치미터인 사각형으로 절단될 수 있다.
- [0044] 상기 나노-포어 박막(120)은, 그 중심 부위에 배치된 적어도 하나의 나노-포어(120a)를 구비할 수 있다. 상기 나노-포어(120a)는 상기 나노-포어 박막(120)을 관통할 수 있다. 상기 나노-포어(120a)의 직경은 1nm 내지 100nm 일 수 있다. 바람직하게는, 상기 나노-포어(120a)의 직경은 5nm 내지 10nm 일 수 있다.
- [0045] 상기 나노-포어 박막(120)의 두께는, 10nm 내지 100nm 일 수 있다. 상기 나노-포어(120a)는 전자-빔 밀링(electron-beam milling)에 의하여 형성될 수 있다. 상기 나노-포어 박막(120)의 재질은, SiN_x , SiO_2 , TiO_2 , 또는 HfO_2 와 같은 유전체일 수 있다. 또는, 상기 나노-포어 박막(120)은 Si, 그래핀(graphene), 그래핀옥사이드(Graphene Oxide), h-BN(Hexagonal Boron Nitride), MoS_2 , MoSe_2 , WS_2 , WSe_2 , HfS_2 , 또는 MoTe_2 중에서 적어도 하나를 포함하는 단분자막 또는 이들의 적층으로 이루어질 수 있다. 상기 나노-포어 박막(120)은 별도로 다른 기판에서 형성되어 상기 유연성 유전체 필름(110) 상으로 전사(transfer)될 수 있다.
- [0046] 도 2를 참조하면, Si 기판에 증착된 SiN_x 박막은 상기 나노-포어 박막(120)으로 사용된다(a). 상기 나노-포어 박막(120)의 두께는 20nm 이며, 나노-포어(120a)의 직경은 8nm 이다. 상기 나노-포어 박막(120)은 상기 유연성 유전체 필름(110) 상에 전사된다. 상기 유연성 유전체 필름(110)은 폴리이미드(Polyimide) 필름이며, 상기 유연성 유전체 필름(110)의 두께는 $75\mu\text{m}$ 이며, 상기 마이크로 구멍(112)의 직경은 $15\mu\text{m}$ 이다(b).
- [0047] 도 3은 본 발명의 일 실시예에 따른 유연성 나노-포어 소자의 제조방법을 설명하는 도면들이다.
- [0048] 도 3(a) 내지 (f)를 참조하면, 유연성 나노-포어 소자(100)의 제조방법은, 유연성 유전체 필름(110)에 직경 $1\mu\text{m}$ 내지 $100\mu\text{m}$ 의 마이크로 구멍(223)을 형성하는 단계; 상기 유연성 유전체 필름(110)의 상기 마이크로 구멍(112)을 덮도록 나노-포어 박막(120)을 전사하는 단계; 및 상기 유연성 유전체 필름(110)에 부착된 상기 나노-포어 박막(120)에 1nm 내지 100nm 의 나노-포어(120a)를 적어도 1개 이상 형성하는 단계;를 포함한다. 상기 유연성 유전체 필름(110)은 폴리이미드이고, 상기 직경 $1\mu\text{m}$ 내지 $100\mu\text{m}$ 의 마이크로 구멍(112)은 레이저 가공법, 광리소그래피 또는 집속 이온 빔(FIB)으로 형성될 수 있다.
- [0049] 도 3 (a)(b)를 참조하면, 상기 유연성 유전체 필름(110)은 일변의 길이가 수 밀리미터 내지 수 센치미터를 가진 사각형 형태로 절단될 수 있다. 상기 유연성 유전체 필름(110)의 절단은 레이저 가공 또는 펀치와 같은 기계적 가공에 의하여 수행될 수 있다. 상기 유연성 유전체 필름(110)의 두께는 $20\mu\text{m}$ 내지 $200\mu\text{m}$ 일 수 있다. 직경 $1\mu\text{m}$ 내지 $100\mu\text{m}$ 의 마이크로 구멍(112)이 상기 유연성 유전체 필름(110)에 형성될 수 있다. 상기 마이크로 구멍(112)은 펄스 레이저를 이용하여 형성될 수 있다. 상기 유연성 유전체 필름(112)의 재질은 폴리머이고, 구체적으로 폴리이미드(Polyimide), PTFE(Poly Tetra Fluoro Ethylene), PE, 또는 PET 필름일 수 있다.

- [0050] 도 3 (c)를 참조하면, 임시 기판(20)은 기판(24) 상에 예비 나노-포어 박막(22)을 포함할 수 있다. 상기 기판(24)의 하부면은 포토리소그라피에 공정에 의하여 형성된 포토 레지스터 마스크를 이용하여 습식 식각에 의하여 선택적으로 제거되어 상기 예비 나노-포어 박막(22)의 일부를 노출시키는 홀(26)을 포함할 수 있다. 상기 습식 식각은 KOH 수용액에 의하여 수행될 수 있다. 상기 식각된 홀(26)의 지름은 수백 마이크로미터 내지 수 밀리미터일 수 있다.
- [0051] 상기 예비 나노-포어 박막(22)은 상기 기판(22) 상에 화학 기상 증착 공정에 의하여 형성된 박막일 수 있다. 상기 기판(24)은 실리콘 기판이고, 상기 예비 나노-포어 박막(22)은 SiNx , SiO_2 , TiO_2 , 또는 HfO_2 와 같은 유전체일 수 있다. 상기 예비 나노-포어 박막(22)의 두께는 10nm 내지 100nm일 수 있다.
- [0052] 본 발명의 변형된 실시예에 따르면, 상기 기판(24)은 유리 기판이고, 상기 예비 나노-포어 박막(22)은 비정질 실리콘 또는 다결정 실리콘 일 수 있다.
- [0053] 본 발명의 변형된 실시예에 따르면, 상기 기판(24)은 실리콘 기판이고, 상기 예비 나노-포어 박막(22)은 그래핀(graphene), 그래핀옥사이드(Graphene Oxide), h-BN(Hexagonal Boron Nitride), MoS_2 , MoSe_2 , WS_2 , WSe_2 , HfS_2 , 또는 MoTe인 경우, 그래핀(graphene), 그래핀옥사이드(Graphene Oxide), h-BN(Hexagonal Boron Nitride), MoS_2 , MoSe_2 , WS_2 , WSe_2 , HfS_2 , 또는 MoTe_2 일 수 있다. 상기 예비 나노-포어 박막(22)은 화학기상 증착법에 의하여 형성될 수 있다.
- [0054] 상기 임시 기판(20)에서 상기 예비 나노-포어 박막(22)은 상기 유연성 유전체 필름(110)의 일면을 바라보도록 배치될 수 있다.
- [0055] 상기 예비 나노-포어 박막(22)과 상기 유연성 유전체 필름(110)의 일면 사이에 물이 삽입될 수 있다. 상기 물은 상기 예비 나노-포어 박막(22)과 상기 유연성 유전체 필름(110)을 서로 접촉시킬 수 있다.
- [0056] 도 3 (d)를 참조하면, 접착된 임시 기판(20)과 상기 유연성 유전체 필름(110)은 대기압에서 섭씨 100도 근처의 핫플레이트에서 수 시간 내지 수십 시간 동안 가열 상태로 유지될 수 있다.
- [0057] 도 3 (e)를 참조하면, 상기 예비 나노-포어 박막(22)의 노출된 부위는 섭씨 100도의 열처리 후 상기 기판(24)에서 분리되어 상기 유연성 유전체 필름(110) 상으로 전사되어 상기 나노-포어 박막(120)을 형성할 수 있다.
- [0058] 도 3 (f)를 참조하면, 상기 유연성 유전체 필름(110) 상에 전사된 나노-포어 박막(120)은 투과전자현미경(TEM) 장치에 로딩되고, 전자-빔 밀링 공정에 의하여 1 nm 내지 100 nm 의 나노-포어(120a)가 형성될 수 있다. 상기 나노-포어(120a)는 상기 유연성 유전체 필름(110)의 마이크로 구멍(112)과 정렬될 수 있다. 상기 유연성 유전체 필름(110) 및 상기 나노-포어 기판은 취급 과정에서 파손 가능성을 획기적으로 감소시킬 수 있다.
- [0059] 도 4는 본 발명의 또 다른 일 실시예에 따른 유연성 나노-포어 소자를 설명하는 개념도이다.
- [0060] 도 4를 참조하면, 유연성 나노-포어 소자(100a)는, 직경 $1\mu\text{m}$ 내지 $100\mu\text{m}$ 의 마이크로 구멍(112)을 가진 유연성 유전체 필름(110); 및 상기 유연성 유전체 필름(110) 상에 배치되고 1 nm 내지 100 nm 의 나노-포어(120a)를 적어도 1개 이상 가진 나노-포어 박막(120)을 포함한다. 상기 나노-포어(120a)는 상기 마이크로 구멍(112)과 정렬되어 배치된다.
- [0061] 하부 절연 탄성층(132)은, 상기 유연성 유전체 필름(110)의 하부면에 배치되고 제1 관통홀(132a)을 구비한다. 상부 절연 탄성층(134)은, 상기 유연성 유전체 필름(110)의 상부면에 배치되고 제2 관통홀(134a)을 구비한다. 상기 제1 관통홀(132a)은 상기 제2 관통홀(134a)과 정렬되고 상기 유연성 유전체 필름(110)의 상기 마이크로 구멍(112)을 노출하도록 배치될 수 있다. 상기 제2 관통홀(134a)은 상기 나노-포어 박막(120)의 상기 나노-포어(120a)를 노출하도록 정렬되어 배치된다.
- [0062] 상기 하부 절연 탄성층(132)은 상기 유연성 유전체 필름(110)의 하부면과 접촉하여 실링(sealing)을 수행한다. 또한, 상기 상부 절연 탄성층(134)은, 상기 유연성 유전체 필름(110)의 상부면과 접촉하여 실링을 수행한다. 또한, 상기 하부 절연 탄성층(132)은 하부 챔버(141)의 개방된 상부면과 접촉하여 하부 캐비티(141a)를 밀봉한다. 상기 상부 절연 탄성층(134)은 상부 챔버(151)의 개방된 하부면과 접촉하여 상부 캐비티(151a)를 밀봉한다.
- [0063] 상기 하부 절연 탄성층(132) 및 상기 상부 절연 탄성층(134)은 실링(sealing)을 수행할 수 있다. 상기 상부 챔버(151)에 의한 국부적인 압력은 상기 상부 절연 탄성층(134)을 통하여 상기 유연성 유전체 필름(110)에 전달되나, 상기 나노-포어 박막(120)에는 전달되지 않을 수 있다. 따라서, 상기 하부 절연 탄성층(132) 및 상기 상부

절연 탄성층(134)은 실장 공정에서 상기 나노-포어 박막(120)의 손상을 억제할 수 있다. 상기 하부 절연 탄성층(132) 및 상기 상부 절연 탄성층(134)은 PDMS (polydimethylsiloxane) 일 수 있다. 상기 하부 절연 탄성층(132) 및 상기 상부 절연 탄성층(134)의 두께는 수십 마이크로 내지 수 밀리미터일 수 있다. 상기 하부 절연 탄성층(132)의 제1 관통홀(132a)은 펀치에 의하여 형성될 수 있다. 상기 제1 관통홀(132a)의 직경은 상기 마이크로 구멍(112)의 직경보다 클 수 있다. 상기 제1 관통홀(132a)은 상기 마이크로 구멍(112)을 노출시킬 수 있다.

[0064] 상기 상부 절연 탄성층의 제2 관통홀(134a)은 펀치에 의하여 형성될 수 있다. 상기 제2 관통홀(134a)의 직경은 상기 나노-포어 박막(120)의 일 변의 길이보다 작을 수 있다. 이에 따라, 상기 상부 절연 탄성층의 제2 관통홀(134a)은 상기 나노-포어 박막(120)의 일부를 노출시킬 수 있다.

[0065] 상기 하부 챔버(141)는, 상기 하부 절연 탄성층(132)의 하부면에 배치되고 상기 하부 절연 탄성층(132)의 가장자리와 정렬되어 상기 제1 관통홀(132a)을 노출시키는 하부 캐비티(141a)를 제공할 수 있다. 상기 하부 챔버(141)은 하부 챔버 몸체(142)와 뚜껑(144)을 포함할 수 있다. 상기 하부 챔버(141)은 아크릴 재질일 수 있다.

[0066] 상부 챔버(151)은, 상기 상부 절연 탄성층(134)의 상부면에 배치되고 상기 상부 절연 탄성층(134)의 가장자리와 정렬되어 상기 제2 관통홀(134a)을 노출시키는 상부 캐비티(151a)를 제공할 수 있다. 상기 상부 챔버(151)은 상부 챔버 몸체(152)와 뚜껑(153)을 포함할 수 있다. 상기 상부 챔버(151)은 아크릴 재질일 수 있다.

[0067] 상부 전극(162)은, 상기 상부 챔버(151)에 삽입될 수 있다. 하부 전극(164)은, 상기 하부 챔버(141)에 삽입될 수 있다. 상기 상부 전극(162) 및 상기 하부 전극(164) 각각은 Ag 와이어일 수 있다. 상기 Ag 와이어의 표면은 AgCl로 코팅될 수 있다.

[0068] 전해질은 상기 상부 챔버(151) 및 상기 하부 챔버(141)를 채울 수 있다. 상기 전해질은 분석하고자 하는 피검사체(DNA 물질)를 포함할 수 있다. 상기 전해질은 KCl 수용액일 수 있다.

[0069] 직류 전원(166)은 상기 상부 전극(162)과 상기 하부 전극(164) 사이에 직류 전압을 인가한다. 전류계(168)는 상기 상부 전극(162)과 상기 하부 전극(164) 사이에 흐르는 전류를 측정할 수 있다.

[0070] 도 5는 본 발명의 또 다른 실시예에 따른 유연성 나노-포어 소자를 나타내는 단면도이다.

[0071] 도 5를 참조하면, 상기 유연성 나노-포어 소자(200)는, 직경 $1\mu\text{m}$ 내지 $100\mu\text{m}$ 의 마이크로 구멍(112)을 가진 유연성 유전체 필름(110); 및 상기 유연성 유전체 필름(110) 상에 배치되고 1nm 내지 100nm 의 나노-포어(120a)를 적어도 1개 이상 가진 나노-포어 박막(120)을 포함한다. 상기 나노-포어(120a)는 상기 마이크로 구멍(112)과 정렬되어 배치된다.

[0072] 접착층(214)은 상기 유연성 유전체 필름(110)과 상기 나노-포어 박막(120) 사이에 배치될 수 있다. 상기 접착층(214)은 상기 유연성 유전체 필름(110) 상에 코팅된 양면 테이프 접착제일 수 있다. 상기 유연성 유전체 필름(110)의 마이크로 구멍은 상기 접착층(214)에도 형성될 수 있다.

[0073] 도 6은 본 발명의 또 다른 실시예에 따른 유연성 나노-포어 소자를 나타내는 단면도이다.

[0074] 도 6를 참조하면, 상기 유연성 나노-포어 소자(300)는, 직경 $1\mu\text{m}$ 내지 $100\mu\text{m}$ 의 마이크로 구멍(112)을 가진 유연성 유전체 필름(110); 및 상기 유연성 유전체 필름(110) 상에 배치되고 1nm 내지 100nm 의 나노-포어(120a)를 적어도 1개 이상 가진 나노-포어 박막(120)을 포함한다. 상기 나노-포어(120a)는 상기 마이크로 구멍(112)과 정렬되어 배치된다.

[0075] 지지 기관(316)은 상기 유연성 유전체 필름(110)의 하부에 배치될 수 있다. 접착층(318)은 상기 지지 기관(316)과 상기 유연성 유전체 필름(110) 사이에 배치될 수 있다. 상기 지지 기관(316)은 상기 유연성 유전체 필름의 상기 마이크로 구멍을 노출하는 관통홀(316a)을 포함할 수 있다. 상기 접착층(318)은 상기 유연성 유전체 필름(110)과 상기 지지기관(316)을 부착하기 위해 사용될 수 있으며, 양면부착형의 테이프일 수 있다. 상기 지지 기관(316)은 상기 유연성 유전체 필름(110)을 지지하고 처짐을 방지할 수 있다. 상기 지지 기관(316)은 상기 유연성 유전체 필름(110)과 동일한 재질이나 상기 유연성 유전체 필름보다 더 두꺼울 수 있다.

[0076] 하부 절연 탄성부(132)는 상기 지지 기관(316)의 하부면에 배치되고, 상기 유연성 유전체 필름(110)의 마이크로 구멍(112)을 노출시킬 수 있다.

[0077] 도 7은 본 발명의 일 실시예에 따른 유연성 유전체 필름을 나타내는 현미경의 이미지들이다.

[0078] 도 7을 참조하면, 좌측 이미지들은 사각형상의 마이크로 구멍을 나타내고 우측 이미지들은 원형의 마이크로 구

명을 나타낸다.

[0079] 도 7을 참조하면, 사각형상의 마이크로 구멍은 75 μm 두께의 폴리이미드에 펄스 레이저를 이용하여 형성되었다. 사각형상의 마이크로 구멍의 직경은 15 μm 이다. 원형상의 마이크로 구멍은 75 μm 두께의 폴리이미드에 펄스 레이저를 이용하여 형성되었다. 원형상의 마이크로 구멍의 직경은 약 7 μm 이다.

[0080] 도 8은 본 발명의 일 실시예에 따른 나노-포어 소자의 전류-전압 특성 및 전해질의 농도에 따른 컨덕턴스를 나타내는 도면이다.

[0081] 도 8을 참조하면, 나노-포어(120a)의 직경은 8nm이고, 나노-포어 박막(120)의 두께는 20 nm이고, 재질은 실리콘 질화막이다. 유연성 유전체 필름(110)은 폴리이미드이고, 두께는 75 μm 이고, 마이크로 구멍(112)의 직경은 15 μm 이다. 전해질은 1M KCl 이고, Tris-EDTA 버퍼 용액(buffer solution)을 포함한다. Tris-EDTA 버퍼 용액은 10mM Tris-HCl과 pH 8.0에서 1mM EDTA(ethylenediaminetetraacetic acid)를 포함한다. 상부 전극(162)과 하부 전극(164)은 Ag/AgCl이고, 상부 전극(162)은 상부 챔버(151)에 삽입되고, 하부 전극(164)은 하부 챔버(141)에 삽입된다.

[0082] 상기 나노-포어 소자(100a)의 전류-전압 특성은 전해질(KCl)의 농도에 따라 측정되었다. 전류-전압 특성은 1V 내지 +1V의 인가 전압의 범위에서 선형적인 옴릭 행동(linear Ohmic behavior)을 보인다. 이온 컨덕턴스(ionic conductance)는 직선 기울기 값으로부터 산출된다. 이온 컨덕턴스는 KCl의 농도가 감소함에 따라 감소한다. 상기 나노-포어 소자(100a)의 이온 컨덕턴스는 1M KCl에서 25.1 nS이다. 우리는 실험값과 이론값을 비교하였다.

[0083] 상기 나노-포어(120a)의 지름에 따른 이온 컨덕턴스(G_{nanopore})는 다음과 같이 주어진다.

[0084] [수학식1]

$$G_{\text{nanopore}} = \sigma_{\text{KCl}} \left(\frac{4h_{\text{eff}}}{\pi d^2} + \frac{1}{d} \right)^{-1}$$

[0085]

[0086] 여기서, σ_{KCl} (11.1 S/m)은 섭씨 20도에서 전해질의 몰 전도도(molar conductivity)이다. h_{eff} 는 상기 나노-포어 박막(120)의 두께이다. d 는 나노-포어(120a)의 지름이다. 이론적인 나노-포어(120a)의 지름은 7.58nm이다. 실험값과 이론값의 차이는 모래 시계 형상의 나노-포어 형상에 기인한다고 해석된다.

[0087] 우리는 실험값이 이론값과 일치하도록 컴퓨터 시뮬레이션을 수행하였다. 이 컴퓨터 시뮬레이션은 실험 조건과 동일한 조건에서 수행되었다. 결국, 우리는 실험값과 이론값은 20mV의 바이어스의 경우에 서로 일치하는 것을 확인하였다.

[0089] 도 9는 본 발명의 또 다른 실시예에 따른 이온 전류를 시간에 따라 측정한 결과들이다.

[0090] 도 10은 도 9의 이온 전류의 파워 스펙트럼이다.

[0091] 도 9를 참조하면, (a)는 나노-포어 소자에서 유연성 유전체 필름 대신에 실리콘 기판인 경우이고, (b)는 나노-포어 소자에서 유연성 유전체 필름으로 폴리이미드가 사용된 경우이고, (c)는 나노-포어 소자에서 유연성 유전체 필름 대신에 내열 유리 필름을 사용한 경우이다. 나노-포어 박막(120)은 모든 경우(a,b,c)에 동일한 구조의 실리콘 질화막이다. 전류 신호는 10 kHz의 저주파 통과 필터를 사용하여 250 kHz 샘플링 레이트로 측정되었다. 실리콘 기반 소자(a)에 비하여, 폴리이미드 기반 소자(b) 및 내열 유리 기반 소자(c)는 낮은 피크 노이즈를 보인다. 내열 유리 기반 소자(c)의 피크 노이즈는 12 pA ($I_{\text{rms}} = 2.6 \text{ pA}$)이다. 폴리이미드 기반 소자(b)의 피크 노이즈는 20 pA ($I_{\text{rms}} = 5.5 \text{ pA}$)이다. 실리콘 기반 소자(a)의 피크 노이즈는 700 pA ($I_{\text{rms}} = 156.7 \text{ pA}$)이다.

[0092] 도 10을 참조하면, 노이즈 특성을 분석하기 위하여, 우리는 노이즈 파워 스펙트럼(S)을 다음과 같은 주파수(f)에 대하여 다항식(polynomial)으로 표시하였다.

[0093] [수학식1]

$$S = Af^{-1} + B + Cf + Df^2$$

[0094]

[0095] 여기서, A, B, C, 그리고 D는 플리커 노이즈(flicker noise), 존슨 그리고 샷 노이즈(Jonson and shot noise), 유전체 노이즈(dielectric noise), 및 전기 노이즈(electric noise)에 각각 대응한다.

[0096] [표1]

Noise parameters	Si substrate	Pyrex Substrate	PI substrate
A	2.71E+01	6.11E-03	3.77E-02
B	2.78E-02	1.14E-04	9.12E-04
C	1.57E-04	5.89E-08	8.13E-07
D	4.34E-09	-8.02E-12	-4.25E-11

[0097]

[0098] 내열 유리 기반 소자(c)와 폴리이미드 기반 소자(b)는 모든 노이즈 파라미터들에 대하여 낮은 값을 보인다. 유전체 노이즈(C)는 특히 내열 유리 기반 소자(c)와 폴리이미드 기반 소자(b)에서 더 낮은 값을 가진다. 유전체 노이즈(C)는 소자 노이즈의 고주파 영역을 결정하고, 기판 정전용량(substrate capacitance)을 최소화시키어 감소시킬 수 있다. 폴리이미드 기반 소자(b)는 내열 유리 기반 소자(c)와 실질적으로 동일한 노이즈 성능을 제공할 수 있다. 따라서, 폴리머 기반 나노-포어 소자는 낮은 노이즈 특성을 제공한다.

[0099] 도 11은 본 발명의 일 실시예에 따른 폴리이미드 기반 나노-포어 소자의 DNA 전위(translocation)를 나타내는 결과이다.

[0100] 도 11을 참조하면, DNA 전위(translocation)를 수행하기 위하여, 상기 나노-포어 소자(100)는 젖음성(wettability)을 향상시키기 위하여 산소 플라즈마(oxygen plasma)로 처리되었다. 이중 가닥(double-stranded) DNA 샘플(48.5 kbps λ-DNA)은 1 nM로 희석된다. 이온 전류가 안정화된 후, 상기 이중 가닥(double-stranded) DNA 샘플(48.5 kbps λ-DNA)은 상부 챔버(151)에 삽입된다. 상부 챔버(151) 및 하부 챔버(141)에 각각 배치된 상부 전극(162) 및 하부 전극(164)은 전압을 인가한다. 시간에 따라 이온 전류를 모니터링하여, DNA가 상부 챔버(151)에서 하부 챔버(141)로 통과하는 것을 실시간으로 측정한다.

[0101] 도 11 (a)을 참조하면, DNA 전위(translocation)에 따라, 이온 전류의 컨덕턴스(G)가 시간에 따라 표시된다. DNA 전위(translocation)에 따른 전위 신호의 신호대잡음비는 최대 5 정도이다.

[0102] 폴리이미드 기반 나노-포어 소자에서 DNA 전위 이벤트(translocation events)를 조사하기 위하여, 마진널 히스토그램(marginal histogram)이 표시된다(b). λ-DNA가 8nm의 나노-포어를 200 mV의 바이어스 전압에서 통과한다.

[0103] 도 11(b)를 참조하면, 우측 패널은 단일 가우시안 피크로 피팅된 컨덕턴스 봉쇄(conductance blockade)의 히스토그램이다. 피팅된 곡선의 피크는 3.8 nS에 위치한다. 이것은 λ-DNA에 대한 평균 컨덕턴스 봉쇄(conductance blockade)에 대응한다.

[0104] 도 11(b)를 참조하면, 상부 패널은 0.186 msec의 중심값을 가진 전위 시간(translocation time)에 대한 단일 가우시안 피크를 나타낸다.

[0105] 이상, 첨부된 도면들을 참조하여 본 발명의 실시예들을 설명하였지만, 본 발명이 속하는 기술분야에서 통상의 지식을 가진 자는 본 발명이 그 기술적 사상이나 필수적인 특징을 변경하지 않고서 다른 구체적인 형태로 실시될 수 있다는 것을 이해할 수 있을 것이다. 그러므로 이상에서 기술한 실시예들에는 모든 면에서 예시적인 것이며 한정적이 아닌 것으로 이해해야만 한다.

부호의 설명

[0106] 100: 유연성 나노-포어 소자(100)

110: 유연성 유전체 필름

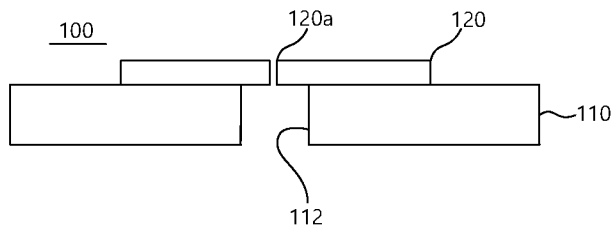
112: 마이크로 구멍

120: 나노-포어 박막

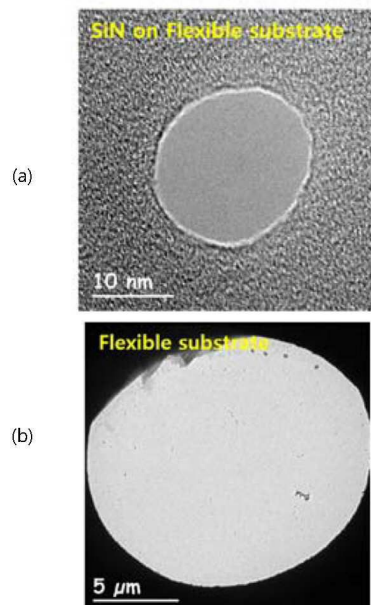
120a: 나노-포어

도면

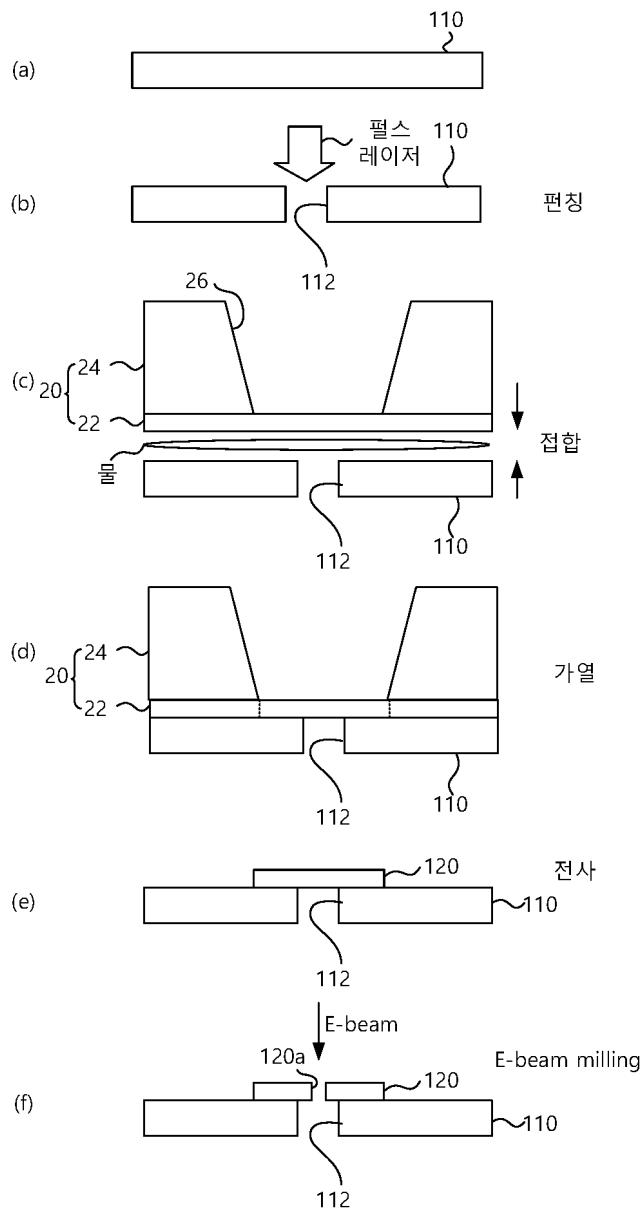
도면1



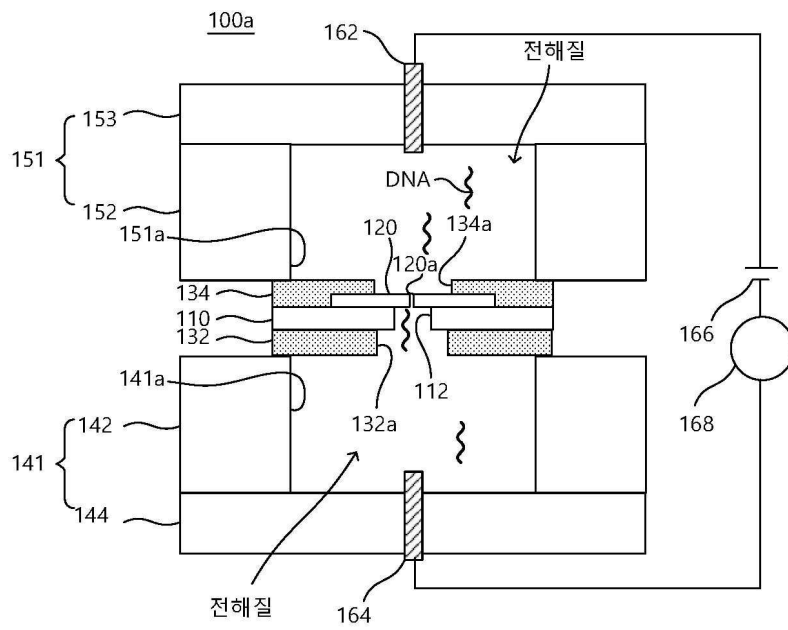
도면2



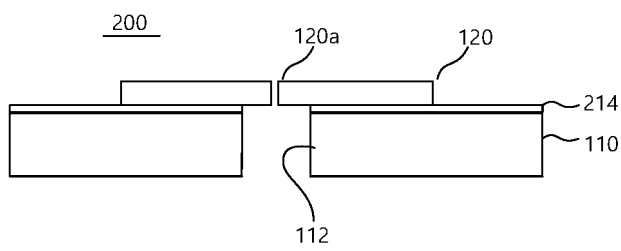
도면3



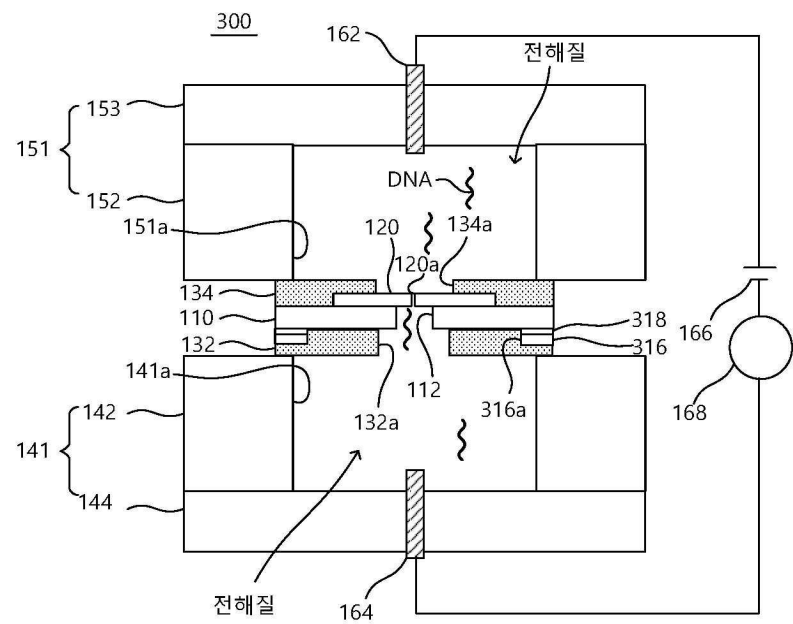
도면4



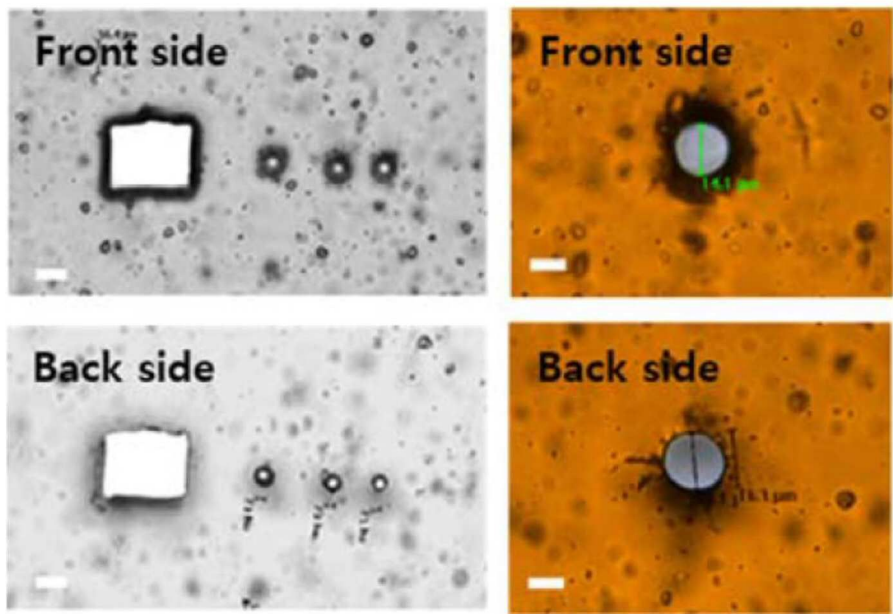
도면5



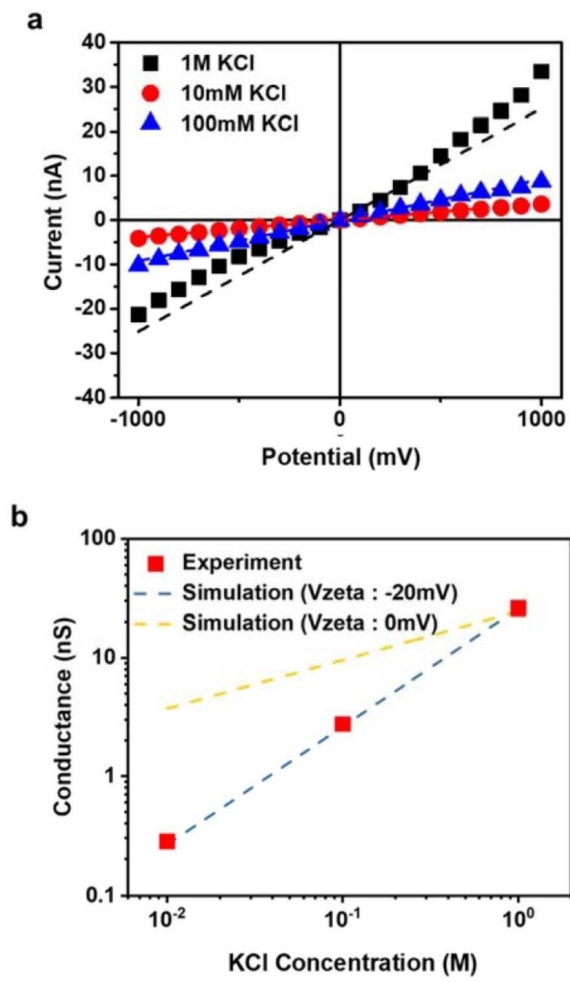
도면6



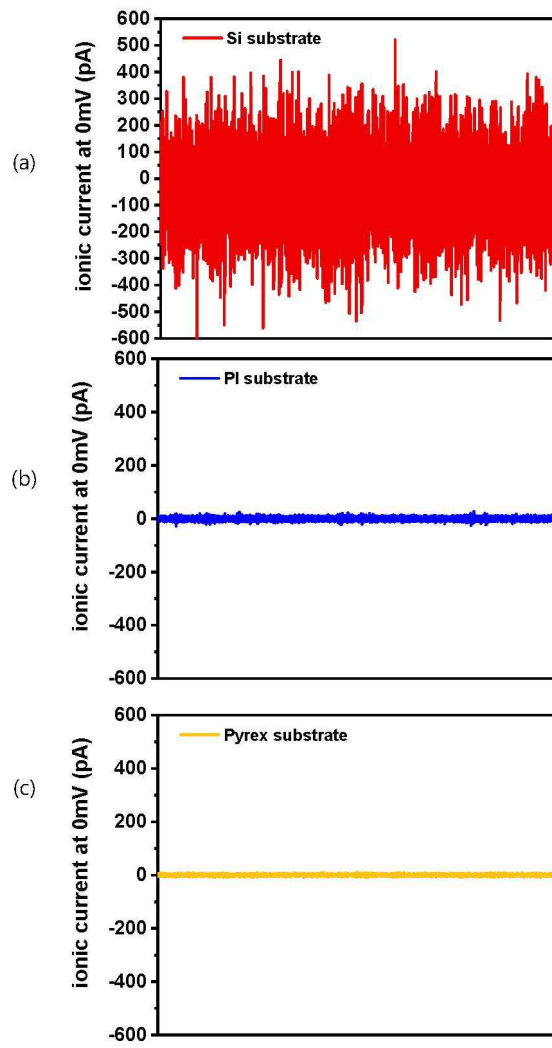
도면7



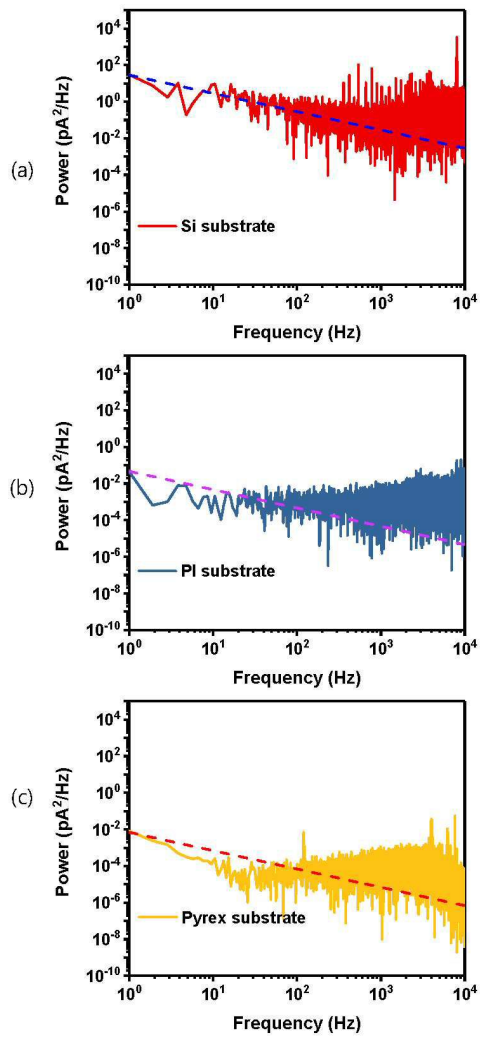
도면8



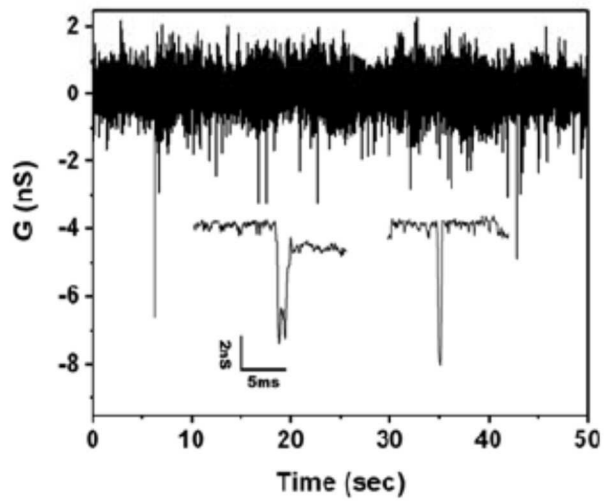
도면9



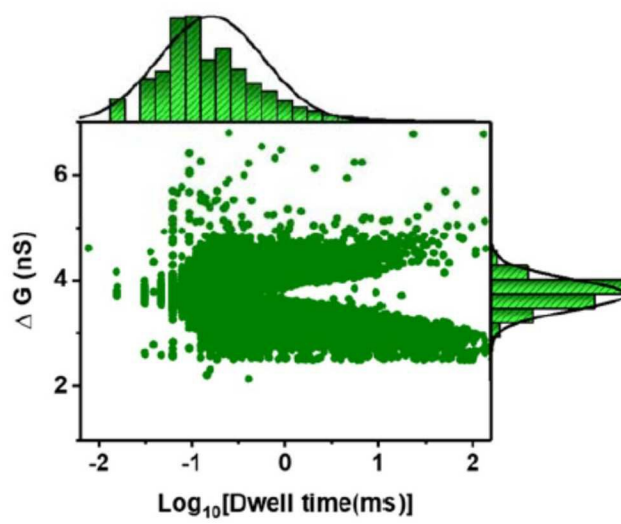
도면10



도면11



(a)



(b)