



(19) 대한민국특허청(KR)
(12) 등록특허공보(B1)

(45) 공고일자 2012년12월06일
 (11) 등록번호 10-1209000
 (24) 등록일자 2012년11월30일

(51) 국제특허분류(Int. Cl.)
 G01N 27/414 (2006.01) C12Q 1/68 (2006.01)
 (21) 출원번호 10-2010-0060665
 (22) 출원일자 2010년06월25일
 심사청구일자 2010년06월25일
 (65) 공개번호 10-2012-0000343
 (43) 공개일자 2012년01월02일
 (56) 선행기술조사문헌
 WO2009035647 A1
 WO2008011936 A1
 JP2006113057 A

(73) 특허권자
 서울대학교산학협력단
 서울특별시 관악구 관악로 1 (신림동)
 (72) 발명자
 김기범
 서울특별시 강남구 역삼로 314, 303동 504호 (역삼동, 개나리 푸르지오)
 김현미
 서울특별시 관악구 인현12길 46-1, 203동 902호 (봉천동, 은천아파트)
 이민현
 서울특별시 서초구 방배로13길 18, B동 309호 (방배동, 방배아크로타워)
 (74) 대리인
 특허법인씨엔에스

전체 청구항 수 : 총 10 항

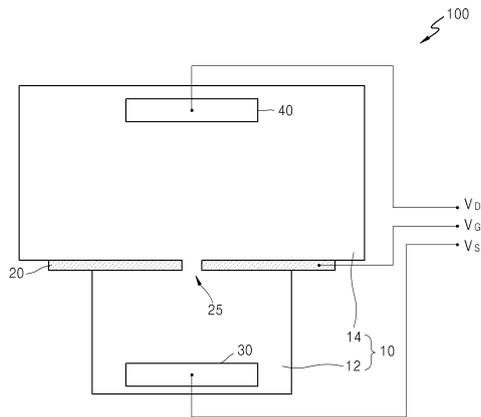
심사관 : 김상우

(54) 발명의 명칭 그래핀 나노 포어 구조를 이용한 이온 소자 및 DNA 분석용 장치

(57) 요약

그래핀 나노 포어 구조를 이용한 이온 소자 및 DNA 분석용 장치가 제공된다. 본 발명의 일 실시예에 따른 그래핀 나노 포어 구조를 이용한 이온 소자는, 제1 영역 및 제2 영역을 포함하는 챔버; 제1 영역에 위치하는 제1 전극; 제1 전극에 대하여 제2 영역에 위치하는 제2 전극; 및 제1 전극 및 제2 전극의 사이에 위치하고, 그래핀층으로 구성되며, 그래핀층을 관통하는 나노 포어를 포함하는 나노 포어 막;을 포함하고, 나노 포어 막, 제1 전극 및 제2 전극에 인가되는 전기적 신호에 의해 나노 포어를 통과하는 이온 전류가 발생하는 것을 특징으로 한다.

대표도 - 도1



이 발명을 지원한 국가연구개발사업

과제고유번호 20100017697

부처명 교육과학기술부

연구사업명 기초연구사업

연구과제명 집적화된 나노포어 이온 트랜지스터 개발과 응용

주관기관 서울대학교 산학협력단

연구기간 2010년 05월 01일 ~ 2015년 04월 30일

특허청구의 범위

청구항 1

제1 영역 및 제2 영역을 포함하는 챔버;

상기 제1 영역에 위치하는 제1 전극;

상기 제1 전극에 대향하여 상기 제2 영역에 위치하는 제2 전극; 및

상기 제1 전극 및 상기 제2 전극의 사이에 위치하고, 그래핀층으로 구성되며, 상기 그래핀층을 관통하는 나노 포어를 포함하는 나노 포어 막;을 포함하고,

상기 나노 포어 막, 상기 제1 전극 및 상기 제2 전극에 인가되는 전기적 신호에 의해 상기 나노 포어를 통과하는 이온 전류가 발생되고, 상기 이온 전류는 상기 제1 전극 및 상기 제2 전극을 통해 감지되는 것을 특징으로 하는 그래핀 나노 포어 구조를 이용한 이온 소자.

청구항 2

제1 항에 있어서,

상기 이온 소자는 상기 나노 포어 막, 상기 제1 전극 및 상기 제2 전극에 인가되는 전압에 의하여 이온 전계 트랜지스터로 동작하는 것을 특징으로 하는 그래핀 나노 포어 구조를 이용한 이온 소자.

청구항 3

제2 항에 있어서,

상기 나노 포어의 내부가 이온 채널(channel)로 동작하는 것을 특징으로 하는 그래핀 나노 포어 구조를 이용한 이온 소자.

청구항 4

제1 항에 있어서,

상기 그래핀층은 단일층의 그래핀 시트(sheet)이거나 또는 다중층의 그래핀 시트들인 것을 특징으로 하는 그래핀 나노 포어 구조를 이용한 이온 소자.

청구항 5

제1 항에 있어서,

상기 나노 포어는 상하측의 지름이 동일한 원기둥 형상이거나 또는 상하측의 지름이 상이한 원뿔대 형상인 것을 특징으로 하는 그래핀 나노 포어 구조를 이용한 이온 소자.

청구항 6

용액을 수용하고, 제1 영역 및 제2 영역을 포함하는 챔버;

상기 제1 영역에 위치하는 제1 전극;

상기 제1 전극에 대향하여 상기 제2 영역에 위치하는 제2 전극; 및

상기 제1 전극 및 상기 제2 전극의 사이에 위치하고, 그래핀층 및 상기 그래핀층을 관통하는 나노 포어를 포함하는 나노 포어 막;

상기 그래핀층, 상기 제1 전극 및 상기 제2 전극에 전기적으로 연결되어, 상기 그래핀층, 상기 제1 전극 및 상기 제2 전극에 제1 전기적 신호를 인가하고, 상기 제1 전극 및 상기 제2 전극으로부터 제2 전기적 신호를 수신하는 전기 신호부;를 포함하고,

상기 제2 전기적 신호를 이용하여 상기 용액 내의 DNA를 검출하는 것을 특징으로 하는 그래핀 나노 포어 구조를

이용한 DNA 분석용 장치.

청구항 7

제6 항에 있어서,

상기 DNA가 상기 나노 포어를 통과할 때 변화하는 상기 제2 전기적 신호를 이용하여, 상기 DNA를 구성하는 하나 또는 그 이상의 염기들을 검출하는 것을 특징으로 하는 그래핀 나노 포어 구조를 이용한 DNA 분석용 장치.

청구항 8

제6 항에 있어서,

상기 DNA를 구성하는 염기에 따라 다른 값을 나타내는 상기 제2 전기적 신호를 순차적으로 검출하여, 상기 DNA의 시퀀싱을 수행하는 것을 특징으로 하는 그래핀 나노 포어 구조를 이용한 DNA 분석용 장치.

청구항 9

제6 항에 있어서,

상기 그래핀층에 인가되는 상기 제1 전기적 신호에 따라 DNA의 이동 속도를 제어하는 것을 특징으로 하는 그래핀 나노 포어 구조를 이용한 DNA 분석용 장치.

청구항 10

제6 항에 있어서,

상기 나노 포어 막은, 상기 DNA를 구성하는 뉴클레오티드 중 하나만이 상기 나노 포어 내에 포함될 수 있도록 단일층의 그래핀 시트로 이루어진 것을 특징으로 하는 그래핀 나노 포어 구조를 이용한 DNA 분석용 장치.

명세서

기술분야

[0001] 본 발명은 그래핀 나노 포어 구조를 이용한 이온 소자 및 DNA 분석용 장치에 관한 것으로서, 더욱 상세하게는, 이온 전계 효과를 이용한 이온 소자 및 DNA를 레이블링(labeling) 없이 분석할 수 있는 나노 포어를 이용한 DNA 분석용 장치에 관한 것이다.

배경기술

[0002] 최근 전자 정보 기기의 소형화와 함께, 집적도와 처리 속도의 측면에서 실리콘을 대체할 물질을 찾는 것이 요구된다. 그래핀(graphene)은 전하 운반자(carrier)의 이동도(mobility)가 실리콘에서보다 빠르며 많은 전류를 흘릴 수 있어, 저전력에서도 많은 양의 정보를 프로세싱할 수 있고 스위칭 속도를 향상시킬 수 있으며, 소형화에 적합한 물질로 알려져 있다. 이에 따라, 최근 그래핀을 이용한 초고속 나노 메모리 소자, 투명 디스플레이, 차세대 태양 전지 등의 전자 소자의 연구가 활발하게 이루어지고 있다.

발명의 내용

해결하려는 과제

[0003] 본 발명이 이루고자 하는 기술적 과제는, 그래핀 나노 포어 구조를 이용하여 나노 포어 내부가 이온 선택성을 갖도록 함으로써 이온 전계 효과를 나타내는 이온 소자를 제공하는 것이다.

[0004] 또한, 본 발명이 이루고자 하는 다른 기술적 과제는, 그래핀 나노 포어 구조를 이용하여 전기적 신호를 검출하여 DNA를 용이하게 분석할 수 있는 DNA 분석용 장치를 제공하는 것이다.

과제의 해결 수단

[0005] 본 발명의 일 실시예에 따른 그래핀 나노 포어 구조를 이용한 이온 소자가 제공된다. 상기 그래핀 나노 포어 구조를 이용한 이온 소자는, 제1 영역 및 제2 영역을 포함하는 챔버; 상기 제1 영역에 위치하는 제1 전극; 상기 제1 전극에 대향하여 상기 제2 영역에 위치하는 제2 전극; 및 상기 제1 전극 및 상기 제2 전극의 사이에 위치하

고, 그래핀층으로 구성되며, 상기 그래핀층을 관통하는 나노 포어를 포함하는 나노 포어 막;을 포함하고, 상기 나노 포어 막, 상기 제1 전극 및 상기 제2 전극에 인가되는 전기적 신호에 의해 상기 나노 포어를 통과하는 이온 전류가 발생하는 것을 특징으로 한다.

- [0006] 본 발명의 일부 실시예들에 있어서, 상기 이온 소자는 상기 나노 포어 막, 상기 제1 전극 및 상기 제2 전극에 인가되는 전압에 의하여 이온 전계 트랜지스터로 동작할 수 있다.
- [0007] 본 발명의 일부 실시예들에 있어서, 상기 나노 포어의 내부가 이온 채널(channel)로 동작할 수 있다.
- [0008] 본 발명의 일부 실시예들에 있어서, 상기 그래핀층은 단일층의 그래핀 시트(sheet)이거나 또는 다중층의 그래핀 시트들일 수 있다.
- [0009] 본 발명의 일부 실시예들에 있어서, 상기 나노 포어는 상하측의 지름이 동일한 원기둥 형상이거나 또는 상하측의 지름이 상이한 원뿔대 형상일 수 있다.
- [0010] 본 발명의 일 실시예에 따른 그래핀 나노 포어 구조를 이용한 DNA 분석용 장치가 제공된다. 상기 그래핀 나노 포어 구조를 이용한 DNA 분석용 장치는, 용액을 수용하고, 제1 영역 및 제2 영역을 포함하는 챔버; 상기 제1 영역에 위치하는 제1 전극; 상기 제1 전극에 대향하여 상기 제2 영역에 위치하는 제2 전극; 및 상기 제1 전극 및 상기 제2 전극의 사이에 위치하고, 그래핀층 및 상기 그래핀층을 관통하는 나노 포어를 포함하는 나노 포어 막; 상기 그래핀층, 상기 제1 전극 및 상기 제2 전극에 전기적으로 연결되어, 제1 전기적 신호를 인가하고, 그들로부터 제2 전기적 신호를 수신하는 전기 신호부;를 포함하고, 상기 제2 전기적 신호를 이용하여 상기 용액 내의 DNA를 검출하는 것을 특징으로 한다.
- [0011] 본 발명의 일부 실시예들에 있어서, 상기 DNA가 상기 나노 포어를 통과할 때 변화하는 상기 제2 전기적 신호를 이용하여, 상기 DNA를 구성하는 하나 또는 그 이상의 염기들을 검출할 수 있다.
- [0012] 본 발명의 일부 실시예들에 있어서, 상기 DNA를 구성하는 염기에 따라 다른 값을 나타내는 상기 제2 전기적 신호를 순차적으로 검출하여, 상기 DNA의 시퀀싱을 수행할 수 있다.
- [0013] 본 발명의 일부 실시예들에 있어서, 상기 그래핀층에 인가되는 상기 제1 전기적 신호에 따라 DNA의 이동 속도를 제어할 수 있다.
- [0014] 본 발명의 일부 실시예들에 있어서, 상기 나노 포어 막은, 상기 DNA를 구성하는 뉴클레오티드 중 하나만이 상기 나노 포어 내에 포함될 수 있도록 단일층의 그래핀 시트로 이루어질 수 있다.

발명의 효과

- [0015] 본 발명의 그래핀 나노 포어 구조를 이용한 이온 소자에 따르면, 전도성을 갖는 그래핀에 게이트 전압을 인가함으로써, 나노 포어 내부에 이온 채널을 형성하여 나노 크기의 이온 전계 트랜지스터를 구현할 수 있다.
- [0016] 또한, 본 발명의 그래핀 나노 포어 구조를 이용한 DNA 분석용 장치에 따르면, 10nm 이하의 크기를 갖는 나노 포어를 이용하며 나노 포어 표면의 전하를 용이하게 조절 가능하여, DNA의 이동 속도를 효율적으로 조절할 수 있다. 이에 의해, DNA의 분석을 위한 시간을 확보할 수 있으며, 전기적 신호의 크기도 조절할 수 있다.

도면의 간단한 설명

- [0017] 도 1은 본 발명의 일 실시예에 따른 그래핀 나노 포어 구조를 이용한 이온 소자를 도시하는 단면도이다.
- 도 2a 및 도 2b는 본 발명에 따른 이온 소자의 나노 포어 막을 구성하는 그래핀을 설명하기 위한 개략도들이다.
- 도 3은 본 발명에 따른 그래핀 나노 포어 구조를 이용한 이온 소자의 동작 원리를 도시하는 흐름도이다.
- 도 4는 본 발명의 일 실시예에 따른 그래핀 나노 포어 구조를 이용한 DNA 분석용 장치를 도시하는 사시도이다.
- 도 5a 내지 도 5e는 본 발명에 따른 그래핀 나노 포어 막을 제조하기 위한 예시적인 방법을 설명하기 위하여 공정 순서에 따라 도시한 단면도들이다.
- 도 6a 및 도 6b는 본 발명에 따른 나노 포어를 통과하는 DNA를 도시하는 개략도들이다.
- 도 7은 DNA의 시퀀싱 방법을 설명하기 위해 전류의 흐름을 나타내는 그래프이다.
- 도 8은 본 발명에 따른 나노 포어 구조를 이용한 DNA 분석용 장치를 이용한 DNA의 분석 과정을 도시하는 흐름도

이다.

발명을 실시하기 위한 구체적인 내용

- [0018] 이하, 첨부된 도면을 참조하여 본 발명의 바람직한 실시예를 상세히 설명하기로 한다.
- [0019] 본 발명의 실시예들은 당해 기술 분야에서 통상의 지식을 가진 자에게 본 발명을 더욱 완전하게 설명하기 위하여 제공되는 것이며, 하기 실시예는 여러 가지 다른 형태로 변형될 수 있으며, 본 발명의 범위가 하기 실시예에 한정되는 것은 아니다. 오히려, 이들 실시예는 본 개시를 더욱 충실하고 완전하게 하고, 당업자에게 본 발명의 사상을 완전하게 전달하기 위하여 제공되는 것이다.
- [0020] 이하의 설명에서 어떤 층이 다른 층의 위에 존재한다고 기술될 때, 이는 다른 층의 바로 위에 존재할 수도 있고, 그 사이에 제3의 층이 개재될 수도 있다. 또한, 도면에서 각 층의 두께나 크기는 설명의 편의 및 명확성을 위하여 과장된 것이며, 도면상에서 동일 부호는 동일한 요소를 지칭한다. 본 명세서에서 사용된 바와 같이, 용어 "및/또는"은 해당 열거된 항목 중 어느 하나 및 하나 이상의 모든 조합을 포함한다.
- [0021] 본 명세서에서 사용된 용어는 특정 실시예를 설명하기 위하여 사용되며, 본 발명을 제한하기 위한 것이 아니다. 본 명세서에서 사용된 바와 같이, 단수 형태는 문맥상 다른 경우를 분명히 지적하는 것이 아니라면, 복수의 형태를 포함할 수 있다. 또한, 본 명세서에서 사용되는 경우 "포함한다(comprise)" 및/또는 "포함하는(comprising)"은 언급한 형상들, 숫자, 단계, 동작, 부재, 요소 및/또는 이들 그룹의 존재를 특정하는 것이며, 하나 이상의 다른 형상, 숫자, 동작, 부재, 요소 및/또는 그룹들의 존재 또는 부가를 배제하는 것이 아니다.
- [0022] 본 명세서에서 제1, 제2 등의 용어가 다양한 부재, 부품, 영역, 층들 및/또는 부분들을 설명하기 위하여 사용되지만, 이들 부재, 부품, 영역, 층들 및/또는 부분들은 이들 용어에 의해 한정되어서는 안됨은 자명하다. 이들 용어는 하나의 부재, 부품, 영역, 층 또는 부분을 다른 영역, 층 또는 부분과 구별하기 위하여만 사용된다. 따라서, 이하 상술할 제1 부재, 부품, 영역, 층 또는 부분은 본 발명의 가르침으로부터 벗어나지 않고서도 제2 부재, 부품, 영역, 층 또는 부분을 지칭할 수 있다.
- [0023] 이하, 본 발명의 실시예들은 본 발명의 이상적인 실시예들을 개략적으로 도시하는 도면들을 참조하여 설명한다. 도면들에 있어서, 예를 들면, 제조 기술 및/또는 공차(tolerance)에 따라, 도시된 형상의 변형들이 예상될 수 있다. 따라서, 본 발명의 실시예는 본 명세서에 도시된 영역의 특정 형상에 제한된 것으로 해석되어서는 아니 되며, 예를 들면 제조상 초래되는 형상의 변화를 포함하여야 한다.
- [0024] 도 1은 본 발명의 기술적 사상에 따른 그래핀 나노 포어 구조를 이용한 이온 소자(100)의 일 실시예를 도시하는 단면도이다.
- [0025] 도 1을 참조하면, 이온 소자(100)는 챔버(10) 및 나노 포어(25)가 형성된 막(membrane)(이하, '나노 포어 막'이라 한다)(20)을 포함한다. 나노 포어 막(20)의 양 측에 챔버(10)의 제1 영역(12) 및 제2 영역(14)이 배치된다. 제1 영역(12) 및 제2 영역(14) 내에는 각각 제1 전극(30) 및 제2 전극(40)이 배치된다. 나노 포어 막(20)은 나노 포어(25)를 포함하며, 나노 포어(25)는 예를 들어 나노 포어 막(20)의 중앙에 위치할 수 있다. 제1 전극(30), 제2 전극(40) 및 나노 포어 막(20)은 외부로부터 전기적 신호를 인가 받고 출력할 수 있다.
- [0026] 챔버(10)는 나노 포어 막(20)에 의해 제1 영역(12) 및 제2 영역(14)으로 분리될 수 있으며, 각각 별개의 챔버로 구성되는 것도 가능하다. 챔버(10)는 전해질 용액을 수용하기 위한 것으로, 챔버(10)의 제1 영역(12) 및 제2 영역(14) 각각에 제1 전극(30) 및 제2 전극(40)을 배치한다. 챔버(10)는 유리, 폴리디메틸실록산(polydimethylsiloxane, PDMS) 및 플라스틱 중 어느 하나 이상의 물질로 이루어질 수 있다. 챔버(10)는 전해질을 포함하는 용액을 수용할 수 있으며, 상기 용액은 유체 상태로 준비될 수 있고 임의의 전도성 용매가 사용될 수 있다. 챔버(10)의 외부에서 챔버(10) 내에 상기 용액을 주입 및 배출할 수 있는 주입부(미도시) 및 배출부(미도시)를 더 포함할 수 있다. 챔버(10)는 미소한 용량을 가질 수 있으며, 어느 한 방향의 길이가 수 마이크로 미터의 치수를 가질 수 있다.
- [0027] 제1 전극(30)은 챔버(10)의 제1 영역(12)에 배치될 수 있고, 제2 전극(40)은 챔버(10)의 제2 영역(14)에 배치될 수 있다. 제1 전극(30) 및 제2 전극(40)은 챔버(10) 내의 용액에 전압을 인가하여, 상기 용액 내의 이온을 유도시켜 결과적으로 전류의 흐름을 발생시킬 수 있다. 제1 전극(30) 및 제2 전극(40)은 알루미늄(Al), 금(Au), 베릴륨(Be), 비스무트(Bi), 코발트(Co), 하프늄(Hf), 인듐(In), 망간(Mn), 몰리브덴(Mo), 니켈(Ni), 납(Pb), 팔라듐(Pd), 백금(Pt), 로듐(Rh), 레늄(Re), 루테튬(Ru), 탄탈(Ta), 텔루르(Te), 티타늄(Ti), 텅스텐(W), 아연(Zn), 지르코늄(Zr), 이들의 질화물, 및 이들의 실리사이드 중 어느 하나 또는 그 이상을 포함할 수 있다. 제1

전극(30) 및 제2 전극(40)은 각각 단일층이거나 또는 복합층일 수 있다. 예를 들어, 제1 전극(30) 및 제2 전극(40)은 은(Ag) 또는 염화은(AgCl)의 복합층일 수 있다. 제1 전극(30) 및 제2 전극(40)은 동일한 물질을 포함하거나 또는 서로 다른 물질을 포함하도록 구성될 수 있다. 또한, 제1 전극(30) 및 제2 전극(40)은 나노 포어 막(20)에 근접하도록 배치될 수 있다.

[0028] 나노 포어 막(20)은 그래핀으로 구성된다. 나노 포어 막(20)은 중앙부에 형성된 나노 포어(25)를 포함하며, 나노 포어(25)는 나노 포어 막(20)을 관통한다. 그래핀은 탄소 원자 한 층으로 이루어진 벌집 구조의 2차원 박막을 말하며, 나노 포어 막(20)은 단일층(monolayer) 또는 다중층(multilayer)의 그래핀을 포함할 수 있다. 나노 포어 막(20)을 구성하는 그래핀에 대해서는 도 2a 및 도 2b를 참조하여 하기에 상세히 설명한다.

[0029] 나노 포어 막(20), 제1 전극(30) 및 제2 전극(40)은 외부 장치(미도시)에 연결되어 각각에 전기적 신호, 예를 들어 전압을 인가받고, 이로부터 전기적 신호, 예를 들어 전류를 출력할 수 있다. 나노 포어 막(20)에 인가되는 전압은 게이트 전압(V_G), 제1 전극(30)에 인가되는 전압은 소스 전압(V_S), 제2 전극(40)에 인가되는 전압은 드레인 전압(V_D)으로 지칭할 수 있다. 외부 장치(미도시)는 도전성 부재, 예를 들어 도전성 와이어를 통해 나노 포어 막(20), 제1 전극(30) 및 제2 전극(40)과 전기적으로 연결될 수 있으며, 특히 나노 포어 막(20)과 연결되는 부분은 탐침(probe)(미도시)에 의해 연결될 수 있다. 또는, 상기 도전성 부재는 나노 와이어일 수 있으며, 상기 나노 와이어는 금속으로 일정한 패턴을 형성한 후 이온 주입(ion implantation) 또는 스퍼터링(sputtering)을 이용하여 도전으로 증착될 수 있다.

[0030] 외부 장치(미도시)에 의해 인가되는 게이트 전압(V_G), 소스 전압(V_S) 및 드레인 전압(V_D)에 의해 상기 이온 소자(100)는 이온 전계 트랜지스터(ionic field effect transistor, IFET)로 동작할 수 있다. 이온 전계 트랜지스터는 채널을 이동하는 캐리어들이 전자 또는 홀이 아닌 전해질 이온들이라는 점을 제외하고는 통상적인 반도체 전계 효과 트랜지스터와 그 원리가 유사하다. 따라서, 전자의 이동이 아닌 이온의 이동에 의한 이온 전류가 흐르게 되며 나노 포어(25)는 이온의 이동에 대한 채널로서 작용한다. 챔버(10) 내에 전해질 용액을 수용하는 경우, 이온화된 양이온 및 음이온이 챔버(10)에 인가되는 소스 전압(V_S), 및 드레인 전압(V_D)에 의해 어느 한 방향으로 이동할 수 있게 되며, 나노 포어 막(20)에 인가되는 게이트 전압(V_G)에 의해 트랜지스터의 온(on) 상태 및 오프(off) 상태를 제어할 수 있다.

[0031] 도 2a 및 도 2b는 본 발명의 기술적 사상에 따른 이온 소자의 나노 포어 막을 구성하는 그래핀을 설명하기 위한 개략도들이다.

[0032] 도 2a를 참조하면, 흑연(graphite)의 구조를 도시하며, 그래핀은 상기 흑연 구조의 한 층에 의해 형성되는 구조이다. 흑연은 탄소 원자(C)가 벌집의 단면처럼 연속적인 육각형의 구조를 가지고 있으며, 이러한 구조가 층층이 쌓여있는 결정 구조이다. 층 내의 탄소 원자(C)들은 공유결합으로 강하게 결합되어 있으나(A결합), 층간 결합력이 약하여 층을 구분하여 쉽게 부스러질 수 있다(B결합).

[0033] 도 2b를 참조하면, 그래핀은 탄소 원자(C) 한 층으로 이루어진 벌집 구조의 2차원 박막을 말한다. 탄소 원자(C)는 sp^2 혼성궤도에 의해 화학 결합하면 이차원의 탄소 육각평면을 형성한다. 탄소는 최외각 전자가 4개로, 결합을 할 때 4개의 전자가 혼성되어 결합에 참여한다. 탄소의 결합에는, sp^3 결합을 하는 방법과 sp^2 결합을 하는 방법이 있으며, sp^3 결합만으로 이루어진 것이 정사각형의 다이아몬드이고 sp^2 결합만으로 이루어진 물질이 흑연(graphite) 또는 흑연의 한 층인 그래핀이다. 예를 들면, 원래 s 궤도(orbital)와 p 궤도에만 존재해야 할 전자들이, s와 p 궤도를 합친 sp^2 및 sp^3 의 혼성 오비탈을 갖게 된다. 상기 sp^2 혼성 오비탈은 s 궤도에 전자 하나와 p 궤도에 전자 두 개를 가지므로, sp^2 혼성 오비탈은 총 전자 3개를 가지게 되고, 이때 각 전자의 에너지 준위는 동일하다. 각기 s와 p 오비탈을 갖는 것보다 이와 같이 혼성 오비탈을 갖는 것이 안정하기 때문에 혼성 오비탈 상태에 있게 된다. 이와 같은 평면 구조를 가지는 탄소 원자(C)의 집합체가 그래핀이며, 단일층의 두께는 탄소 원자(C) 하나의 크기에 불과하여 약 0.3nm이다. 그래핀은 그 특성이 금속성으로, 층방향으로 전도성을 가지며 열전도성이 우수하고, 전하 캐리어(carrier)의 이동도(mobility)가 커서 고속 전자 소자를 구현할 수 있다. 그래핀 시트(sheet)의 전자 이동도는 약 20,000 내지 50,000 cm^2/Vs 의 값을 가지는 것으로 알려져 있다. 그래핀은 역학적 견고성과 화학적 안정성이 뛰어나고, 반도체와 도체의 성질을 모두 가지고 있으며, 직경이 작고 길이가 길어, 평판 표시 소자, 트랜지스터, 에너지 저장체 및 나노 크기의 전자소자의 응용성이 크다. 그래핀을 이용하면 종래의 반도체 공정 기술을 이용하여 소자를 제조하기 용이하며, 특히 대면적 집적화가 용이한

이점이 있다.

- [0034] 도 3은 본 발명의 기술적 사상에 따른 그래핀 나노 포어 구조를 이용한 이온 소자의 동작 원리를 도시하는 흐름도이다.
- [0035] 도 1과 함께, 도 3을 참조하면, 먼저 외부 장치(미도시)에서 1 전극(30), 제2 전극(40) 및/또는 그래핀의 나노 포어 막(20)에 일정 전압을 인가하는 단계(S110)가 진행된다. 예를 들어, 양의 게이트 전압(V_G) 및 드레인 전압(V_D)과 음의 소스 전압(V_S)을 인가할 수 있다. 본 단계(S110)에서 게이트 전압(V_G)에 별도의 전압을 인가하지 않고, 소스 전압(V_S) 및 드레인 전압(V_D)만을 인가할 수도 있다.
- [0036] 전압이 인가되면, 나노 포어(25) 내부에 전기적 이중층이 형성되는 단계(S120)가 진행될 수 있다. 게이트 전압(V_G)이 인가되면, 나노 포어(25) 측면의 나노 포어 막(20)을 이루는 그래핀의 표면이 특정 전하를 띠게 되며, 반대 전하를 갖는 이온들로 구성된 전기적 이중층이 형성된다. 이와 같이 표면 전하를 가리는 현상은 드바이 길이(Debye length)에 의해 해석 가능하며, 드바이 길이는 용액 내의 전해질의 농도의 제곱근에 반비례한다.
- [0037] 상기 전기적 이중층이 형성되면, 나노 포어(25) 내부는 이온 선택성을 갖게 된다(S130). 나노 포어(25)의 크기가 작은 경우, 나노 포어(25)의 내부에서 전기적 이중층이 겹쳐지게 되어 나노 포어(25)의 내부가 반대 이온들에 의해 채워지며, 나노 포어(25)가 이온 선택성을 가질 수 있게 된다. 이 경우, 나노 포어(25) 내에 존재하는 이온의 종류와 양이 용액의 농도에 따라 변하지 않게 되어 이온 컨덕턴스의 포화가 일어나게 농도 구간이 발생하게 되며, 이와 같은 이온 선택성은 이온 트랜지스터로 동작하는 기반이 된다.
- [0038] 나노 포어(25)가 상기와 같이 이온 선택성을 갖게 되면, 나노 포어(25)내의 이온 전류의 흐름을 제어할 수 있게 된다(S140). 인가되는 게이트 전압(V_G), 소스 전압(V_S) 및 드레인 전압(V_D)의 크기에 따라 특정 전하의 이온을 흐르게 할 수 있으며, 이온 전류의 양도 제어할 수 있다. 예를 들어, 게이트 전압(V_G)에 양의 전압을 인가하는 경우, 나노 포어(25) 내에 음이온의 채널이 형성될 수 있으며, 상기 게이트 전압(V_G)에 음의 전압을 인가하는 경우, 양이온의 채널이 형성될 수 있다.
- [0039] 도 4는 본 발명의 기술적 사상에 따른 그래핀 나노 포어 구조를 이용한 DNA 분석용 장치(200)의 일 실시예를 도시하는 사시도이다.
- [0040] 도 4에서, 도 1과 동일한 참조 부호는 동일 부재를 나타내며, 따라서 여기서는 이들에 대한 상세한 설명은 생략한다. 도 4를 참조하면, DNA 분석용 장치(200)는 챔버(10) 및 나노 포어(25)가 형성된 나노 포어 막(20)을 포함한다. 나노 포어 막(20)의 양 측에 챔버(10)의 제1 영역(12) 및 제2 영역(14)이 배치된다. 제1 영역(12) 및 제2 영역(14) 내에는 각각 제1 전극(30) 및 제2 전극(40)이 배치된다. 나노 포어 막(20)은 나노 포어(25)를 포함하며, 나노 포어(25)는 예를 들어 나노 포어 막(20)의 중앙에 위치할 수 있다. 챔버(10) 외부에는 전기적 신호를 주고 받을 수 있는 전기 신호부(50)가 배치된다.
- [0041] 챔버(10)의 내부에는 DNA와 같은 생체 분자를 포함하는 용액이 수용된다. 본 DNA 분석용 장치(200)는 생체 분자의 분석을 위해 사용될 수 있으며, 분석의 대상은 DNA에 한정되지 않으며, DNA, RNA, 펩타이드(peptide) 또는 단백질일 수 있다. 상기 용액은 염산(HCl), 염화나트륨(NaCl) 또는 염화칼륨(KCl) 등의 전해질 용매를 사용할 수 있다. 염화칼륨(KCl)의 경우 양이온과 음이온의 이온 이동도(mobility)의 차이가 거의 없는 특징을 갖는다.
- [0042] 본 실시예의 DNA 분석용 장치(200)는 도 1을 참조하여 상술한 이온 전계 효과를 이용하여 DNA를 분석할 수 있으며, 전기 신호부(50)에 의해 인가되는 게이트 전압(V_G), 소스 전압(V_S) 및 드레인 전압(V_D)에 의해 DNA가 이동을 제어할 수 있다. DNA 분석용 장치(200)를 이용하여 DNA를 분석하는 원리에 대해서는 도 6a 내지 도 7을 참조하여 하기에 상세히 기술한다.
- [0043] 도 5a 내지 도 5e는 본 발명의 기술적 사상에 따른 그래핀 나노 포어 막을 제조하기 위한 예시적인 방법을 설명하기 위하여 공정 순서에 따라 도시한 단면도들이다.
- [0044] 그래핀 시트를 형성하는 방법은 여러 가지가 공지되어 있다. 흑연 결정으로부터의 기계적 박리법 또는 실리콘 카바이드(SiC) 결정 열분해 방법에 의하여 형성할 수 있다. 예를 들어, 기계적 박리법의 일종인 스카치 테이프 방법(Scotch tape method)은, 미세 기계적 박리 방법으로 흑연 시료에 스카치 테이프를 붙인 다음, 스카치 테이프를 떼어내어 스카치 테이프 표면에서 흑연으로부터 떨어져 나온 그래핀 시트를 얻는 방식이다. 실리콘 탄화

물(SiC) 결정 열분해 방법은, SiC 단결정을 가열하면 표면의 SiC가 분해되어 실리콘(Si)이 제거되며, 남아있는 탄소에 의해 그래핀 시트가 형성되는 원리를 이용한다. 이외에, 증착 공정을 이용하여 그래핀을 형성할 수도 있다. 예를 들어, 사파이어 기판 상에 분자 빔 에피택시(molecular beam epitaxy, MBE) 또는 화학기상증착법(chemical vapor deposition, CVD)를 이용하여 그래핀 에피택시(epitaxy)를 성장시키며, 그래핀과 사파이어 기판 사이의 결정학적 적합성(crystallographic compatibility) 때문에 에피택시의 성장이 용이하게 달성될 수 있다. 그 밖에도, 고정렬 열분해 흑연 (highly ordered pyrolytic graphite, HOPG)의 박편화, 산화 흑연 박편의 화학적 환원, 열 박편화 (thermal exfoliation), 정전기적 증착 (electrostatic deposition), 흑연의 액상 박편화 (liquid phase exfoliation of graphite), 아크 방전 (arc-discharging) 및 용매열 합성법 (solvothermal method) 등이 사용될 수 있다. 본 실시예에서는 CVD 방법을 이용한 공정을 사용하여 제조 공정을 예시적으로 설명하기로 한다.

[0045] 도 5a를 참조하면, 기판(60) 상에 희생층(70) 및 촉매층(80)을 적층한다. 기판(60)은, 예를 들어 실리콘(Si) 기판일 수 있다. 희생층(70)은, 예를 들어 실리콘 산화물(SiO₂)을 포함할 수 있으며, 화학 기상 증착법(chemical vapor deposition, CVD) 또는 반응성 스퍼터링(reactive sputtering) 등의 증착 방법을 이용하여 적층할 수 있다. 촉매층(80)은 그래파이트(graphite)화를 위한 촉매로, 니켈(Ni), 전이 금속 카바이드(transition-metal carbide) 또는 이들의 나노 입자(particle)를 포함할 수 있으며, 박막인 경우 스퍼터링(sputtering) 또는 전자빔 증발기(electro beam evaporator)와 같은 물리기상증착법(physical vapor deposition, PVD)을 사용하여 증착할 수 있다. 희생층(70) 및 촉매층(80)은 200nm 내지 400nm의 두께로 증착될 수 있다. 다음으로, 기판(60)의 하면에 마스크층(90)을 적층한다. 마스크층(140)은 예컨대 실리콘 질화물(Si₃N₄)을 포함할 수 있다.

[0046] 도 5b를 참조하면, 촉매층(80) 상에 그래핀층(20a)을 형성한다. 그래핀층(20a)은 탄화수소(hydrocarbon)의 CVD에 의해 형성할 수 있으며, 예컨대, 약 1000도에서 메탄(CH₄), 수소(H₂) 및 아르곤(Ar)의 혼합 기체를 주입하여 그래핀층(20a)을 증착할 수 있다.

[0047] 도 5c를 참조하면, 기판(60)의 하면의 마스크층(90)에 패턴을 형성한다. 별도의 마스크층(미도시)을 사용하여 패턴을 형성하고, 이를 이용하여 마스크층(90)을 식각하여 상기 패턴을 형성할 수 있다. 상기 식각은 반응성 이온 식각법(reactive ion etching, RIE)을 이용할 수 있다. 다음으로, 패턴된 하면의 마스크층(90)을 이용하여 기판(60)을 식각한다. 기판(60)의 식각은 수산화칼륨(KOH)를 이용한 비등방성 습식 식각법을 이용할 수 있다. 본 단계에서 기판(60)의 중앙부를 식각함으로써, 후 공정에서의 나노 포어(25, 도 5d 참조)의 형성이 용이해질 수 있다.

[0048] 도 5d를 참조하면, 희생층(70), 촉매층(80) 및 그래핀층(20a)의 적층구조 상에 포토 레지스트층(미도시)을 적층한 후, 전자빔 리소그래피(e-beam lithography)를 이용하여 나노 포어(25) 형성을 위한 패턴을 형성한다. 상기 패턴을 이용하여, 희생층(70), 촉매층(80) 및 그래핀층(20a)의 적층구조를 식각하여 나노 포어(25)를 형성한다. 이 경우, 별도의 포토 레지스트층(미도시)의 도포없이 직접 전자빔을 이용하여 나노 크기의 나노 포어(25)를 형성할 수도 있다. 집속 이온빔(focused ion beam, FIB)과 같은 이온빔 밀링(ion-beam milling) 또는 투과전자현미경(transmission electron microscope, TEM)의 집속 빔을 사용하여 나노 포어(25)를 직접 형성할 수도 있다. 또한, 나노 와이어와 같은 나노 구조를 마스크로 이용하여 식각할 수도 있다.

[0049] 도 5e를 참조하면, 식각 공정을 통해, 기판(60) 상면의 희생층(70) 및 촉매층(80)을 순차적으로 식각한다. 이에 의해 도 5e와 같이, 그래핀층(20a) 하부 막들의 잔존 부분을 포함한 상태로 소자의 제조에 사용될 수 있다. 또는, 이후의 추가적인 공정을 통해 상기 희생층(70) 및 촉매층(80)을 모두 습식 식각하여 제거할 수 있으며, 예컨대 불산(HF)을 이용하여 식각할 수 있다. 이 경우, 촉매층(80)이 모두 제거되면, 그래핀층(20a)이 잔존하며, 이후 그래핀층(20a)을 소자 제작을 위한 기판(미도시)에 이동시켜 본 발명의 이온 소자 또는 DNA 분석 장치를 제조할 수 있다. 그래핀층(20a)은 도 1 및 도 4의 나노 포어 막(20)에 상응한다.

[0050] 도 6a 및 도 6b는 본 발명의 기술적 사상에 따른 나노 포어(25)를 통과하는 DNA를 도시하는 개략도들이다.

[0051] 도 6a는 나노 포어 막(20)이 단일층의 그래핀층의 나노 포어 막(20)으로 구성된 경우를 도시하고, 도 6b는 나노 포어 막(20)이 2개의 그래핀층(20a, 20b)으로 구성된 다중층의 경우를 도시했다. 본 도면의 다중층은 그래핀층이 2개인 경우를 도시하였으나, 본 발명은 이에 한정되지 않으며 나노 포어 막(20)은 3개 이상의 그래핀층으로 구성될 수도 있다. DNA를 포함하는 용액 내의 DNA는 도시된 바와 같이 나노 포어(25)를 통과하게 된다. 용액에 포함된 DNA가 나노 포어(25)를 통과할 때, 나노 포어(25) 내의 정전기적 상호 작용(electrostatic

interaction) 또는 기하학적인 제한 등의 요소들에 의한 에너지 장벽(energy barrier)이 존재한다. 용매 및 나노 포어 막(20)에 인가되는 전압에 의해 DNA는 상기 장벽을 극복하며 일 방향으로 통과할 수 있다. DNA는 뉴클레오티드(nucleotide)들의 중합체이며, 뉴클레오티드는 5탄당, 인산 및 염기로 구성되어 있으며, 상기 인산기는 인산기를 구성하는 산소와 인과의 전기 음성도의 차이에 의해 음전하를 갖는다. 따라서, 상술한 이온 전계 효과에 의해 그 이동을 조절할 수 있다. 분석의 대상이 되는 DNA, RNA, 펩타이드 또는 단백질이 갖는 전하는 고유전하를 이용하거나, 특정 전하를 갖도록 용액의 pH를 제어할 수 있다. DNA가 나노 포어(25)를 통과하는 경우, 나노 포어(25) 내에 흐르는 이온에 의한 전류를 차단하게 되어 차단 신호(blockade signal)가 발생하게 되는데, 이에 의해 DNA의 구성 염기인 아데닌(A), 티민(T), 구아닌(G) 및 시토닌(C)의 종류에 따라 다른 전류값을 나타낼 수 있다. 상기 전류는 도 4의 DNA 분석 장치(200)의 제1 전극(30) 및 제2 전극(40)으로부터 측정될 수 있으며, 이를 통해 DNA의 구성 염기를 분석할 수 있다.

[0052] 일반적으로 10nm 이하의 나노 포어(25)를 사용하는 경우, DNA의 단일 가닥(single stranded) 및 이중 가닥(double stranded)의 구별이 가능한 것으로 알려져 있으며, 본 발명에 따른 DNA 분석용 장치에 의하면 10nm 이하의 나노 포어(25)를 사용하므로 상기와 같은 구별이 가능할 것이다. 또한, 나선 구조를 갖는 DNA는 나선의 지름이 약 2nm이며, DNA를 구성하는 뉴클레오티드 하나의 길이가 약 0.3nm이다. 본 발명에 따른 DNA 분석용 장치(200, 도 4 참조)에서, 도 6a와 같이 나노 포어 막(20)에 단일층의 그래핀을 사용하는 경우, 나노 포어 막(20)의 두께가 뉴클레오티드의 길이와 비슷하게 된다. 따라서, DNA가 이동할 때, 나노 포어(25) 내에 하나의 뉴클레오티드만 존재할 수 있어 염기 서열 시퀀싱의 분해능이 향상될 수 있다. 이와 달리, 나노 포어 막(20)에 도 6b에 도시된 바와 같이 다중층의 그래핀을 사용하는 경우, 단일층의 경우보다 향상된 기계적(mechanical) 내구성을 가질 수 있다. DNA의 분석을 위해서는 DNA가 나노 포어(25)를 통과하는 통과 시간이 충분하여야 한다. 본 발명에 따른 DNA 분석용 장치의 경우, 인가되는 전압을 제어하여, 이온 트랜지스터의 채널에 해당하는 나노 포어(25) 내부의 전하를 조절함으로써, DNA의 이동 속도를 제어할 수 있다. 구체적인 제어 과정은 도 8을 참조하여 하기에 설명한다.

[0053] 도 7은 DNA의 시퀀싱 방법을 설명하기 위해 전류의 흐름을 나타내는 그래프이다.

[0054] 도 7을 참조하면, 상기 차단 신호에 의해 수신되는 전류와 전기적 신호를 이용하여, DNA 염기 서열을 시퀀싱(sequencing)하는 예시적인 방법을 나타낸다. 상기 전기적 신호를 검출 전류라 칭하면, DNA를 구성하는 각 염기들(A, T, G, C)은 다른 크기의 검출 전류를 나타낼 수 있다. 따라서 상기 검출 전류의 크기를 통해 DNA의 각각의 염기에 대한 순차적인 검출이 가능하며, 이에 의해 상기 DNA의 염기 서열의 시퀀싱이 가능하게 된다. 이 경우, 상기 전기적 신호의 용이한 분석을 위해서, 검출되는 전류량이 많고 염기 서열에 따른 전류값의 차이가 클 것이 요구된다. 본 발명에 따른 DNA 분석용 장치의 경우, 도 6a 및 도 6b의 나노 포어 막(20)에 인가되는 게이트 전압(V_g)을 제어함으로써, 나노 포어(25)를 통과하는 전류의 양도 조절 가능할 수 있어, DNA의 시퀀싱이 용이해질 수 있다.

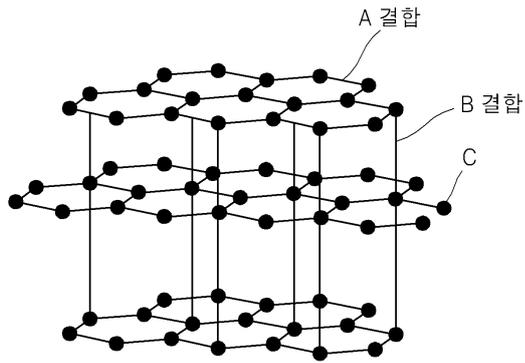
[0055] 도 8은 본 발명의 기술적 사상에 따른 나노 포어 구조를 이용한 DNA 분석용 장치를 이용한 DNA의 분석 과정을 도시하는 흐름도이다.

[0056] 도 4와 함께, 도 8을 참조하면, 도 4의 DNA 분석용 장치(200)를 준비하고, 챔버(10) 내에 용액을 수용시킨 후, 전기 신호부(50)에서 챔버(10) 내의 제1 전극(30), 제2 전극(40) 및/또는 나노 포어 막(20)에 전기적 신호, 예컨대 일정의 전압을 인가하는 단계(S110)가 진행된다. 예를 들어, 양의 게이트 전압(V_g) 및 드레인 전압(V_D)과 음의 소스 전압(V_S)을 인가할 수 있다. 이에 의해, 챔버(10)의 용액 내의 DNA가 이동하는 단계(S115)가 진행되며, 챔버(10)의 제1 영역(12)에서 제2 영역(14)으로 DNA가 이동될 수 있다. 본 단계(S110)에서는 게이트 전압(V_g)에 별도의 전압을 인가하지 않을 수도 있다.

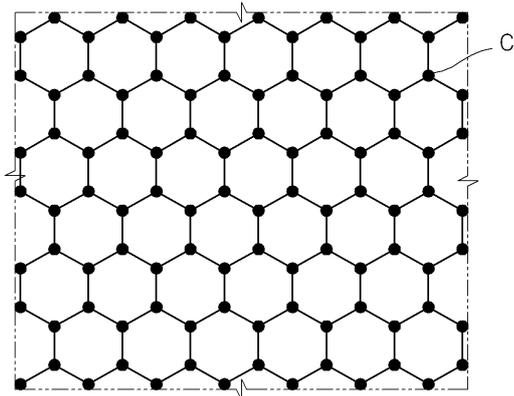
[0057] 다음으로, 전기 신호부(50)에서 전기적 신호, 예컨대 전류를 수신하고 분석하는 단계(S220)가 진행된다. 상기 전기적 신호는 이온의 흐름에 의해 발생하는 전류일 수 있다. DNA가 나노 포어(25)를 통과하는 경우, 상술한 차단 신호가 발생하게 되어 상기 전류의 수신을 통해, DNA의 검출이 가능하며 염기 서열의 시퀀싱이 가능하다. DNA의 검출이 인지된 경우, DNA의 분석을 위해 이동 속도를 느리게 하거나 정지하게 할 필요가 있을 수 있다.

[0058] 다음 단계에서, 나노 포어 막(20)에 인가되는 전기적 신호인 게이트 전압(V_g)을 조절하는 단계(S230)가 진행된다. 상기 전류의 수신 및 분석 단계(S220)에서 수신된 전류를 통해 DNA를 검출한 후 분석을 위해 DNA의 이동을 조절하기 위함이다. 본 단계(S230)에 의해 나노 포어(25) 내의 DNA의 이동 속도를 제어하는 단계(S235)가 수행

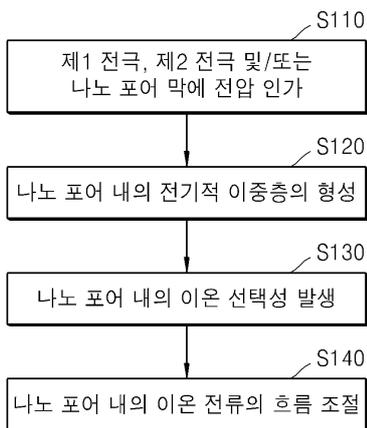
도면2a



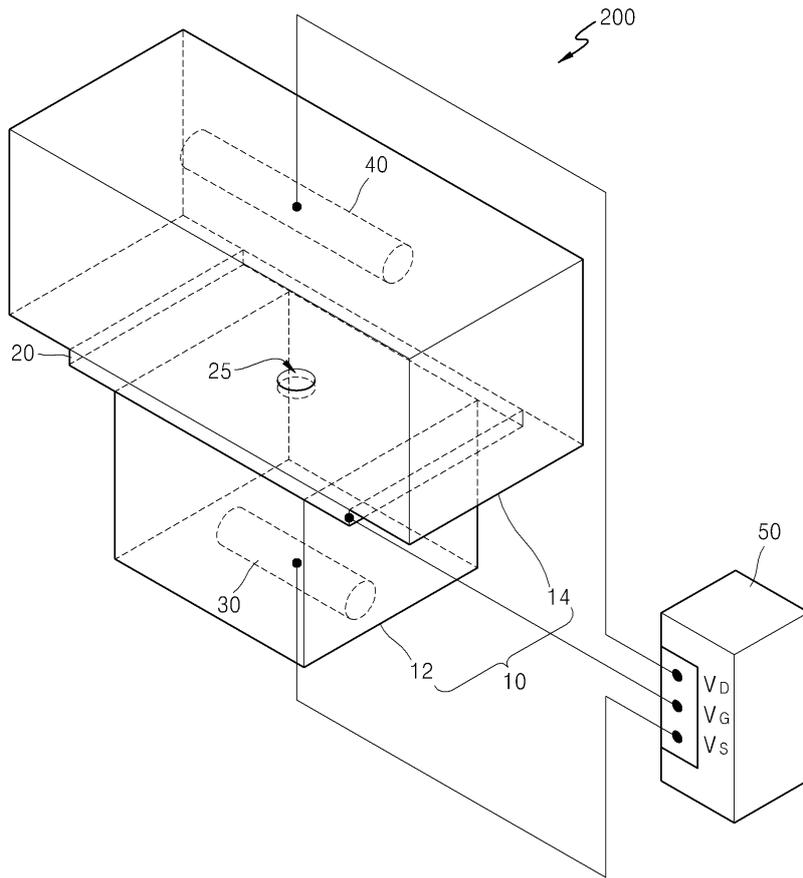
도면2b



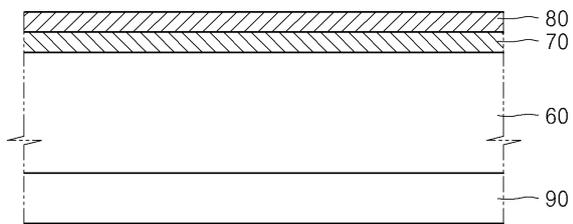
도면3



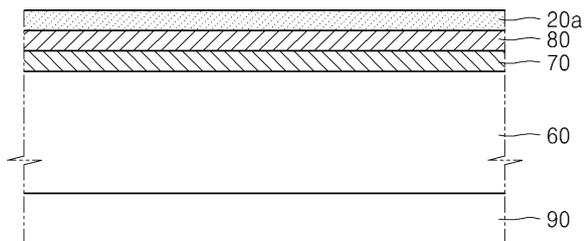
도면4



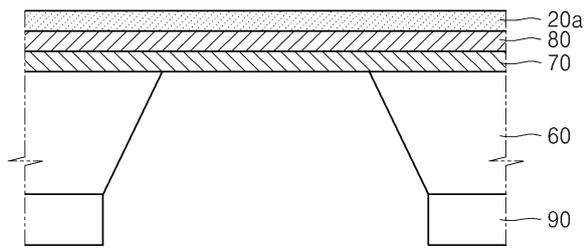
도면5a



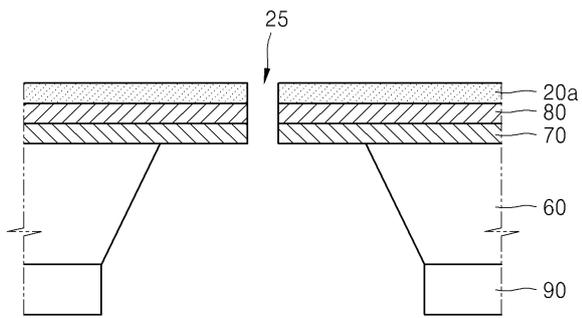
도면5b



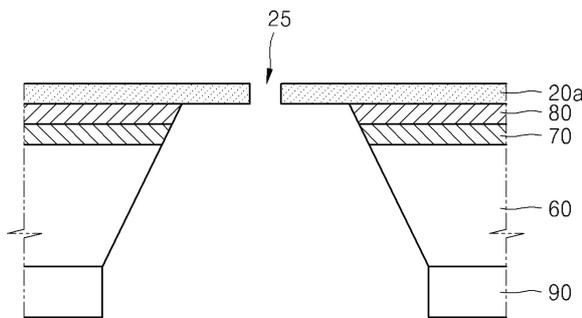
도면5c



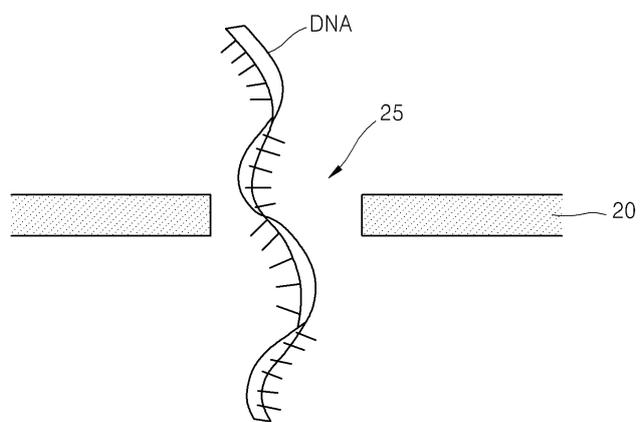
도면5d



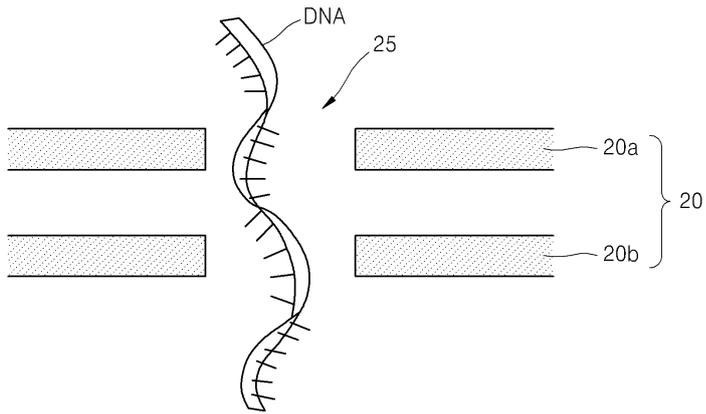
도면5e



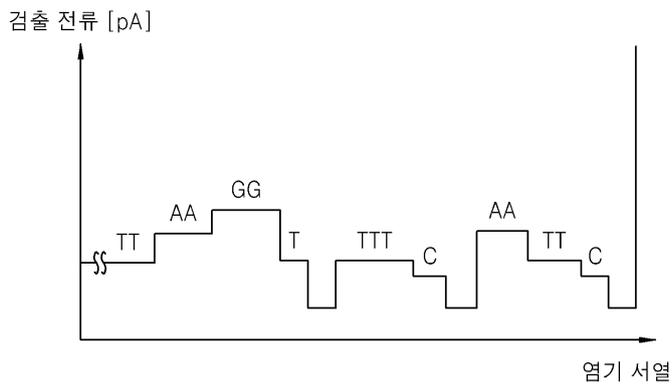
도면6a



도면6b



도면7



도면8

