

(19) 대한민국특허청(KR)
(12) 공개특허공보(A)

(11) 공개번호 10-2020-0117505

(43) 공개일자 2020년10월14일

(51) 국제특허분류(Int. Cl.)

B81B 7/02 (2017.01) B81B 1/00 (2017.01)
B81C 1/00 (2006.01) C01B 32/158 (2017.01)
H01L 21/02 (2006.01) H01L 29/06 (2006.01)

(52) CPC특허분류

B81B 7/02 (2013.01)
B81B 1/008 (2013.01)

(21) 출원번호 10-2019-0039688

(22) 출원일자 2019년04월04일

심사청구일자 2019년04월04일

(71) 출원인

연세대학교 산학협력단

서울특별시 서대문구 연세로 50 (신촌동, 연세대학교)

한국과학기술원

대전광역시 유성구 대학로 291(구성동)

(72) 발명자

김종백

경기도 고양시 일산동구 노루목로 79, 403동 201호(장항동, 호수마을4단지아파트)

조은환

경기도 광명시 오리로 801, 201동 1201호 (하안동, 이편한세상센트레빌아파트)

(뒷면에 계속)

(74) 대리인

윤병국, 이영규

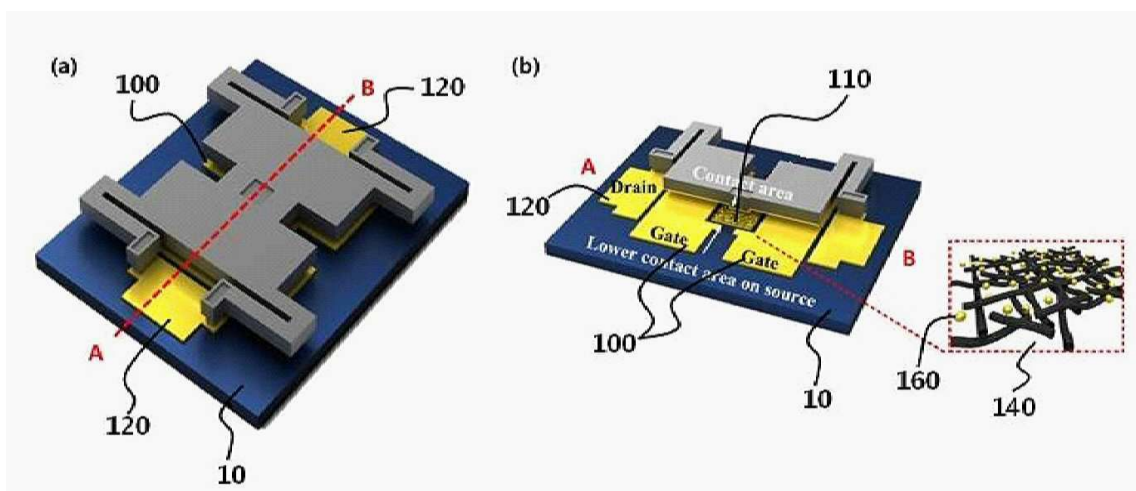
전체 청구항 수 : 총 15 항

(54) 발명의 명칭 금속 나노입자가 코팅된 탄소나노튜브 네트워크를 포함하는 접촉식 마이크로 소자 및 이의 제조 방법

(57) 요약

본 발명은 금속 나노입자가 코팅된 탄소나노튜브 네트워크를 포함하여, 접촉 저항이 낮으면서도 높은 접촉 수명을 갖는 접촉식 마이크로 소자 및 이의 제조 방법에 관한 것으로, 좀 더 구체적으로는 수직방향으로 가해지는 힘에 의해 압축이 가능한 탄소나노튜브 네트워크를 포함하고, 이러한 압축으로 인한 접촉 면적의 변화를 통해 마이크로 소자의 전기 저항이 변화될 수 있으며, 상기 탄소나노튜브 네트워크에 전도성이 높은 금속 나노입자가 코팅되어 낮은 접촉 저항과 높은 접촉 수명을 갖는 마이크로 소자(예를 들어 MEMS 스위치, MEMS relay, 접촉식 스위치 기반의 논리소자, 접촉식 센서 등)를 제공할 수 있다. 대기 및 고전류 접촉 환경(1 μ A)에서 백만 번 이상의 높은 수명을 가지면서도 약한 접촉에서도 낮은 접촉저항을 갖는 장점이 있다.

대표도 - 도1



(52) CPC특허분류

B81C 1/00349 (2013.01)
C01B 32/158 (2017.08)
H01L 21/02282 (2013.01)
H01L 21/02606 (2013.01)
H01L 29/0669 (2013.01)
B81B 2201/01 (2013.01)
B81B 2201/02 (2013.01)

(72) 발명자

이재용

경기도 광명시 도덕로 56, 104동 1405호 (광명동, 중앙하이츠아파트)

윤준보

대전광역시 유성구 대학로 291(구성동)

서민호

대전광역시 유성구 대학로 291(구성동)

이용복

대전광역시 유성구 대학로 291(구성동)

김수본

대전광역시 유성구 대학로 291(구성동)

이 발명을 지원한 국가연구개발사업

| | |
|-------------|---|
| 과제고유번호 | NRF-2018R1A2A1A05023070 |
| 부처명 | 과학기술정보통신부 |
| 과제관리(전문)기관명 | |
| 연구사업명 | 중견연구자지원사업 |
| 연구과제명 | (후속)접촉 기반 MEMS의 장수명 고신뢰성 확보를 위한 나노소재 응용 연구(1/3) |
| 기 여 율 | 1/2 |
| 과제수행기관명 | 연세대학교 산학협력단 |
| 연구기간 | 2018.03.01 ~ 2019.02.28 |

이 발명을 지원한 국가연구개발사업

| | |
|-------------|--|
| 과제고유번호 | 2018K000285 |
| 부처명 | 과학기술정보통신부 |
| 과제관리(전문)기관명 | (재)과학기술일자리진흥원 |
| 연구사업명 | 교육인력양성사업 |
| 연구과제명 | 반도체 테스트팅 장비용 MEMS 스위치(릴레이)의 사업화를 위한 MEMS 릴레이의 신뢰성 향상(2018) |
| 기 여 율 | 1/2 |
| 과제수행기관명 | 한국과학기술원 |
| 연구기간 | 2018.04.01 ~ 2018.12.31 |

명세서

청구범위

청구항 1

기관 상에 위치하는 드레인 전극; 및

상기 드레인 전극과 물리적으로 이격되어 위치하는 소스 전극;을 포함하고,

상기 소스 전극의 표면에는 금속 나노입자가 코팅된 탄소나노튜브 층이 적층되며,

소스 전극에 가해지는 힘에 의해 상기 금속 나노입자가 코팅된 탄소나노튜브 층이 압축되어 전기 저항이 변화되는 것을 특징으로 하는 접촉식 마이크로 소자.

청구항 2

제1항에 있어서,

상기 소스 전극은, 레늄(Re), 루테튬(Ru), 로듐(Rh), 팔라듐(Pd), 은(Ag), 이리듐(Ir), 백금(Pt) 또는 금(Au) 중에서 선택되는 어느 하나 이상인 것을 특징으로 하는, 접촉식 마이크로 소자.

청구항 3

제1항에 있어서,

상기 금속 나노입자는, 금(Au), 은(Ag), 백금(Pt), 티타늄(Ti), 철(Fe), 니켈(Ni) 또는 구리(Cu) 나노입자 중 선택되는 어느 하나 이상인 것을 특징으로 하는, 접촉식 마이크로 소자.

청구항 4

제1항에 있어서,

상기 기관은, 실리콘, 산화규소(SiO_2), 천(fabric), 유리(glass), 사파이어(Al_2O_3), 폴리에틸렌 테레프탈레이트(polyethylene terephthalate, PET) 및 폴리디메틸프로실산(polydimethylsiloxane, PDMS)으로 이루어진 군에서 선택되는 것을 특징으로 하는, 접촉식 마이크로 소자.

청구항 5

제1항에 있어서,

상기 마이크로 소자는, MEMS 스위치, MEMS relay, 접촉식 스위치 기반의 논리소자(micromechanical inverter) 혹은 접촉식 센서인 것을 특징으로 하는, 접촉식 마이크로 소자.

청구항 6

접촉식 마이크로 소자를 제조하는 방법에 있어서,

기관을 준비한 후, 물리적으로 이격되도록 드레인 전극, 소스 전극 및 게이트 전극을 형성하는 단계;

상기 소스 전극의 표면에 탄소나노튜브 층을 형성하는 단계; 및

상기 탄소나노튜브 층에 금속 나노입자를 코팅하는 단계;를 포함하는 접착식 마이크로 소자의 제조 방법.

청구항 7

제6항에 있어서,

상기 게이트 전극과 소스 전극은, 레늄(Re), 루테튬(Ru), 로듐(Rh), 팔라듐(Pd), 은(Ag), 이리듐(Ir), 백금(Pt) 또는 금(Au) 중에서 선택되는 어느 하나 이상인, 접착식 마이크로 소자의 제조 방법.

청구항 8

제6항에 있어서,

상기 금속 나노입자는, 금(Au), 은(Ag), 백금(Pt), 티타늄(Ti), 철(Fe), 니켈(Ni) 또는 구리(Cu) 나노입자 중 선택되는 어느 하나 이상인 것을 특징으로 하는, 접착식 마이크로 소자.

청구항 9

제6항에 있어서,

상기 탄소나노튜브 층을 형성하는 단계는, 탄소나노튜브 분산액을 사용하여 침적코팅(dip coating), 스핀코팅(spin coating) 또는 drop 코팅 방법으로 수행되는 것을 특징으로 하는, 접착식 마이크로 소자의 제조 방법.

청구항 10

제6항에 있어서,

상기 탄소나노튜브 층을 형성하는 단계는, 산소(O_2) 플라즈마를 사용한 전처리가 수행된 이후에 진행되는 것을 특징으로 하는, 접착식 마이크로 소자의 제조 방법.

청구항 11

제6항에 있어서,

상기 탄소나노튜브 층을 형성하는 단계는, 금-탄소나노튜브 분산액을 사용하여 침적코팅(dip coating), 스핀코팅(spin coating) 또는 drop 코팅 방법으로 수행되는 것을 특징으로 하는, 접착식 마이크로 소자의 제조 방법.

청구항 12

제6항에 있어서,

상기 기판은, 실리콘, 산화규소(SiO_2), 천(fabric), 유리(glass), 사파이어(Al_2O_3), 폴리에틸렌 테레프탈레이트(polyethylene terephthalate, PET) 및 폴리디메틸프록실산(polydimethylsiloxane, PDMS)으로 이루어진 군에서 선택되는 것을 특징으로 하는, 접착식 마이크로 소자의 제조 방법.

청구항 13

제6항에 있어서,

상기 금속 나노입자를 코팅하는 단계는, 금속 나노입자 용액을 이용해 침적코팅(dip coating), 스핀코팅(spin

coating) 또는 drop 코팅 방법으로 수행되는 것을 특징으로 하는, 접촉식 마이크로 소자의 제조 방법.

청구항 14

제6항에 있어서,

상기 금속 나노입자를 코팅하는 단계는, 증착(evaporation) 또는 스퍼터링(sputtering) 방법으로 수행되는 것을 특징으로 하는, 접촉식 마이크로 소자의 제조 방법.

청구항 15

제6항 내지 제14항 중 어느 한 항에 기재된 제조 방법으로 제조된 접촉식 마이크로 소자에 있어서,

상기 마이크로 소자는, MEMS 스위치, MEMS relay, 접촉식 스위치 기반의 논리소자(micromechanical inverter) 혹은 접촉식 센서인 것을 특징으로 하는, 접촉식 마이크로 소자.

발명의 설명

기술 분야

[0001] 본 발명은 금속 나노입자가 코팅된 탄소나노튜브 네트워크를 포함하여, 접촉 저항이 낮으면서도 높은 접촉 수명을 갖는 접촉식 마이크로 소자 및 이의 제조 방법에 관한 것으로, 좀 더 구체적으로는 수직방향으로 가해지는 힘에 의해 압축이 가능한 탄소나노튜브 네트워크를 포함하고, 이러한 압축으로 인한 접촉 면적의 변화를 통해 마이크로 소자의 전기 저항이 변화될 수 있으며, 상기 탄소나노튜브 네트워크에 전도성이 높은 금속 나노입자가 코팅되어 낮은 접촉 저항과 높은 접촉 수명을 갖는 마이크로 소자(예를 들어 MEMS 스위치, MEMS relay, 접촉식 스위치 기반의 논리소자, 접촉식 센서, 에너지 헤베스터 등)를 제공할 수 있다.

[0003] [이 발명을 지원한 국가연구개발사업]

[0004] 과제고유번호: No. NRF-2018R1A2A1A05023070

[0005] 부처명: 과학기술정보통신부

[0006] 연구관리 전문기관: 한국연구재단

[0007] 연구사업명: 중견연구자지원사업

[0008] 연구과제명: (후속)접촉 기반 MEMS의 장수명 고신뢰성 확보를 위한 나노소재 응용 연구(1/3)

[0009] 연구기간: 2018.03.01. ~ 2019.02.28.

배경 기술

[0011] CMOS 트랜지스터가 갖는 높은 subthreshold leakage current와 낮은 on-off ratio 등 극복하기 위한 대안으로써 MEMS 스위치에 대한 많은 연구가 진행되고 있다. MEMS 스위치 (microelectromechanical system switch)는 CMOS 트랜지스터와는 달리 전기장(electric field)나 복사(radiation) 등의 외부 환경적인 요소에 대한 영향을 비교적 적게 받고, 높은 on-off ratio와 near zero leakage current 등의 장점을 갖는다.

[0012] 하지만, 이러한 MEMS 스위치는 통상적으로 material transfer, local field emission, oxidation, stiction 등 물리적 접촉에 의한 접촉면의 변형 혹은 손상으로 인해 제한된 접촉수명을 갖기 때문에, MEMS 스위치의 낮은 접촉 수명을 향상시키기 위한 연구(예를 들어 스위치의 구조, 접촉 물질, 회로를 변경하는 등)가 진행되고 있다.

[0013] Seo, Min-Ho, et al.(1000-Fold Lifetime Extension of a Nickel Electromechanical Contact Device via Graphene. ACS applied materials & interfaces 10.10 (2018): 9085-9093) 혹은 Rana, Sunil, et al.(Nano-crystalline graphite for reliability improvement in MEM relay contacts. Carbon 133 (2018): 193-199) 등

은 전도성을 가지며 기계적 강성이 우수한 탄소 기반 나노 물질을 사용하여 MEMS 스위치의 수명을 향상시키고자 하는 연구 결과를 보고한 바가 있는데, 이는 접촉 힘에 따른 변형가능성이 없어 낮은 접촉면적을 가지며 동시에 수 kΩ 수준의 높은 접촉 저항을 가져 라디오 프리퀀시(radio-frequency) 소자나 logic application으로 활용하는데 한계가 있다.

[0014] CHEN, Yenhao, et al.(Characterization of contact resistance stability in MEM relays with tungsten electrodes. Journal of Microelectromechanical Systems, 2012, 21(3) 511-513) 혹은 PARSA, Roozbeh, et al. (Laterally actuated platinum-coated polysilicon NEM relays. Journal of Microelectromechanical Systems, 2013, 22(3) 768-778)등은 고강도 금속 혹은 합금을 접촉 전극으로 사용하여 MEM relay의 수명을 향상시키고자 하는 연구 결과를 보고한 바가 있는데, 구체적으로는 텅스텐(tungsten), 티타늄 질화물(titanium nitride) 혹은 플라티늄(platinum) 등의 고강도 전도성 물질을 사용한 접촉식 마이크로 소자를 제시하였다.

[0015] 하지만, 이 경우에는 수십 kΩ에서 수 MΩ의 높은 전기저항을 갖거나, 접촉 물질의 산화가 쉽게 발생하는 등의 단점으로 인해 고전류 접촉환경이나 대기 중에서 사용하기 곤란한 문제점이 여전히 존재한다.

[0016] 또한 금(Au, gold)의 경우에는 낮은 접촉저항과 높은 전기 전도도로 인해 접촉식 마이크로 소자의 접촉물질로 주목을 받아왔지만, 대표적인 무른 금속에 해당하므로(즉, 경도가 낮아) 접촉 시에 미세 용착(micro welding), 정지마찰(stiction), 물질 전달(material transfer) 등이 쉽게 발생하여 접촉수명이 낮아지는 단점이 있다.

[0017] 이러한 금의 낮은 접촉수명을 극복하기 위해서 접촉식 마이크로 소자의 구조를 변경하여 접촉면을 새롭게 만들거나 접촉 시 전압 차에 의한 충격을 줄여 접촉 수명을 늘리는 연구가 일부 보고되고 있으나, 이러한 접근 방식은 추가적인 구조의 형성을 요구하기 때문에 전체적인 마이크로 소자의 크기를 증가시키고, 집적도를 떨어뜨리는 문제점이 발생하게 된다.

선행기술문헌

비특허문헌

[0019] (비특허문헌 0001) Seo, Min-Ho, et al., "1000-Fold Lifetime Extension of a Nickel Electromechanical Contact Device via Graphene." ACS applied materials & interfaces 10.10 (2018): 9085-9093.

(비특허문헌 0002) Rana, Sunil, et al., "Nano-crystalline graphite for reliability improvement in MEM relay contacts." Carbon 133 (2018): 193-199.

(비특허문헌 0003) CHEN, Yenhao, et al., "Characterization of contact resistance stability in MEM relays with tungsten electrodes", Journal of Microelectromechanical Systems, 2012, 21.3: 511-513.

(비특허문헌 0004) PARSA, Roozbeh, et al., "Laterally actuated platinum-coated polysilicon NEM relays", Journal of Microelectromechanical Systems, 2013, 22.3: 768-778.

발명의 내용

해결하려는 과제

[0020] 본 발명에서는 이러한 종래 기술의 문제점을 보다 효과적으로 해결하기 위해, 수십 nm 이하 두께의 탄소나노튜브 네트워크를 접촉식 마이크로 소자의 접촉면에 형성하고, 상기 탄소나노튜브를 전도성이 높은 금속 나노입자로 코팅함으로써, 대기 중에서 높은 접촉 수명을 가질 뿐만 아니라 낮은 접촉저항을 갖는 접촉식 마이크로 소자를 제공하는 것을 목적으로 한다.

과제의 해결 수단

[0022] 본 발명의 일 실시 형태에 따른 접촉식 마이크로 소자는, 기판 상에 위치하는 드레인 전극; 및 상기 드레인 전극과 물리적으로 이격되어 위치하는 소스 전극;을 포함하고, 상기 소스 전극의 표면에는 금속 나노입자가 코팅

된 탄소나노튜브 층이 적층되며, 소스 전극에 가해지는 힘에 의해 상기 금속 나노입자가 코팅된 탄소나노튜브 층이 압축되어 전기 저항이 변화되는 것을 특징으로 한다.

[0023] 상기 소스 전극은, 레늄(Re), 루테튬(Ru), 로듐(Rh), 팔라듐(Pd), 은(Ag), 이리듐(Ir), 백금(Pt) 또는 금(Au) 중에서 선택되는 어느 하나 이상이고, 상기 금속 나노입자는, 금(Au), 은(Ag), 백금(Pt), 티타늄(Ti), 철(Fe), 니켈(Ni) 또는 구리(Cu) 나노입자 중 선택되는 어느 하나 이상이며, 상기 기판은, 실리콘, 산화규소(SiO_2), 천(fabric), 유리(glass), 사파이어(Al_2O_3), 폴리에틸렌 테레프탈레이트(polyethylene terephthalate, PET) 및 폴리디메틸프로실산(polydimethylsiloxane, PDMS)로 이루어진 군에서 선택되는 것이 바람직하다.

[0024] 상기 마이크로 소자는, MEMS 스위치, MEMS relay, 접촉식 스위치 기반의 논리소자(micromechanical inverter) 혹은 접촉식 센서일 수 있다.

[0025] 본 발명의 다른 실시 형태로 접촉식 마이크로 소자를 제조하는 방법을 들 수 있는데, 기판을 준비한 후, 물리적으로 이격되도록 드레인 전극, 소스 전극 및 게이트 전극을 형성하는 단계; 상기 소스 전극의 표면에 탄소나노튜브 층을 형성하는 단계; 및 상기 탄소나노튜브 층에 금속 나노입자를 코팅하는 단계;를 포함한다.

[0026] 상기 소스 전극은, 레늄(Re), 루테튬(Ru), 로듐(Rh), 팔라듐(Pd), 은(Ag), 이리듐(Ir), 백금(Pt) 또는 금(Au) 중에서 선택되는 어느 하나 이상이고, 상기 금속 나노입자는, 금(Au), 은(Ag), 백금(Pt), 티타늄(Ti), 철(Fe), 니켈(Ni) 또는 구리(Cu) 나노입자 중 선택되는 어느 하나 이상이며, 상기 기판은, 실리콘, 산화규소(SiO_2), 천(fabric), 유리(glass), 사파이어(Al_2O_3), 폴리에틸렌 테레프탈레이트(polyethylene terephthalate, PET) 및 폴리디메틸프로실산(polydimethylsiloxane, PDMS)로 이루어진 군에서 선택되는 것이 바람직하다.

[0027] 상기 탄소나노튜브 층을 형성하는 단계는, 탄소나노튜브 분산액 또는 금-탄소나노튜브 분산액을 사용하여 침적 코팅(dip coating), 스핀코팅(spin coating) 또는 drop 코팅 방법으로 수행되는 것이 바람직하고, 상기 탄소나노튜브 층을 형성하는 단계는, 산소(O_2) 플라즈마를 사용한 전처리가 수행된 이후에 진행되는 것이 더욱 바람직하며, 상기 금속 나노입자를 코팅하는 단계는 금속 나노입자 용액을 이용해 침적코팅(dip coating), 스핀코팅(spin coating) 또는 drop 코팅 방법으로 수행되거나, 증착(evaporation) 또는 스퍼터링(sputtering) 방법으로 수행되는 것이 바람직하다.

[0028] 이러한 방법으로 제조된 접촉식 마이크로 소자는, MEMS 스위치, MEMS relay 접촉식 스위치 기반의 논리소자(micromechanical inverter) 혹은 접촉식 센서로 사용될 수 있다.

발명의 효과

[0030] 본 발명에 따른 접촉식 마이크로 소자는, 수십 nm 이하 두께의 탄소나노튜브 네트워크(CNT network)가 접촉면에 형성되며 상기 탄소나노튜브 네트워크에 전도성이 높은 금속 나노입자가 코팅되는 것을 기술적 특징으로 포함하고 있어, 추가적인 면적을 필요로 하지 않는다는 장점뿐만이 아니라, 대기 및 고전류 접촉 환경(1 μA)에서 백만 번 이상의 높은 수명을 가지면서도 약한 접촉에서도 낮은 접촉저항을 갖는 현저한 효과가 존재한다.

[0031] 또한, MEMS 스위치와 같은 본 발명의 접촉식 마이크로 소자는 수직방향의 힘에 의해 압축이 가능하여, 수직 방향의 압축(Compressive) 힘에 의해 접촉면적이 증가하여 마이크로 소자의 전기 저항이 조절될 수 있다

도면의 간단한 설명

[0033] 도 1은 본 발명의 접촉식 마이크로 소자의 구조를 도식적으로 나타낸 것이다.

도 2는 본 발명의 접촉식 마이크로 소자의 제조 과정을 도식적으로 나타낸 것이다.

도 3은 본 발명의 접촉식 마이크로 소자의 소스 전극에 형성된 탄소나노튜브 층의 탄소나노튜브 네트워크를 SEM으로 관찰한 이미지이다.

도 4는 본 발명의 접촉식 마이크로 소자의 작동 원리를 도식적으로 나타낸 것이다.

도 5 내지 6은 본 발명의 접촉식 마이크로 소자의 작동 및 성능 시험 결과를 나타낸 그림이다.

발명을 실시하기 위한 구체적인 내용

- [0034] 이하에서는 본 발명의 실시예와 도면을 참조하여 본 발명을 좀 더 상세히 설명한다. 이들 실시예는 오로지 본 발명을 보다 구체적으로 설명하기 위해 예시적으로 제시한 것일 뿐, 본 발명의 범위가 이들 실시예에 의해 제한되지 않는다는 것은 이 기술분야에서 통상의 지식을 가지는 자에 있어서 자명할 것이다.
- [0035] 또한, 달리 정의하지 않는 한, 본 명세서에서 사용되는 모든 기술적 및 과학적 용어는 본 발명이 속하는 기술 분야의 숙련자에 의해 통상적으로 이해되는 바와 동일한 의미를 가지며, 상충되는 경우에는, 정의를 포함하는 본 명세서의 기재가 우선할 것이다.
- [0036] 도면에서 제안된 발명을 명확하게 설명하기 위해서 설명과 관계없는 부분은 생략하였으며, 명세서 전체를 통하여 유사한 부분에 대해서는 유사한 도면 부호를 붙였다. 그리고 어떤 부분이 어떤 구성 요소를 "포함"한다고 할 때, 이는 특별히 반대되는 기재가 없는 한 다른 구성 요소를 제외하는 것이 아니라 다른 구성 요소를 더 포함할 수 있는 것을 의미한다.
- [0038] 도 1에는 본 발명의 금속 나노입자가 코팅된 탄소나노튜브 네트워크의 제조 방법을 통해 제조된 접촉식 마이크로 소자의 구조가 도시되어 있다.
- [0039] 기판(10) 상에 게이트 전극(100)과 소스 전극(110) 및 드레인 기본 전극(120)을 형성한다. 이러한 기판 상의 기본 전극들(게이트 전극, 드레인 전극 및 소스 기본 전극)은 공지의 금속 증착 방법(예를 들어, 화학기상증착, evaporation, 전해도금 등)의 방법을 통해서 수행될 수 있으며, 각각 형성된 전극들은 적절한 패터닝 공정(포토리소그래피 혹은 에칭 공정 등)을 통해서 서로 이격 되도록 형성될 수 있다.
- [0040] 이때 각 전극은 레늄(Re), 루테튬(Ru), 로듐(Rh), 팔라듐(Pd), 은(Ag), 이리듐(Ir), 백금(Pt) 또는 금(Au) 등과 같은 노블 금속 재질 중에서 선택될 수 있으며, 기판 역시 실리콘, 산화규소(SiO_2), 천(fabric), 유리(glass), 사파이어(Al_2O_3), 폴리에틸렌 테레프탈레이트(polyethylene terephthalate, PET) 및 폴리디메틸프록실산(polydimethylsiloxane, PDMS)로 이루어진 군에서 적절히 선택될 수 있다.
- [0041] 필요에 따라, 각 전극을 기판(10)에 효과적으로 형성될 수 있도록 하기 위해 크롬(Cr) 등과 같은 중간 금속을 기판에 먼저 형성한 후, 상기 노블 금속을 적층하는 방식으로 수행되는 것도 가능하다.
- [0042] 이렇게 기판 상에 형성된 전극들 위로 탄소나노튜브 분산액을 코팅하여 탄소나노튜브 네트워크(CNT network)를 형성한다. 이때, 전극 및 기판 위로 탄소나노튜브 네트워크가 보다 효과적으로 형성될 수 있도록 전처리를 수행하는 것이 바람직하는데, 이러한 전처리는 산소(O_2) 플라즈마를 사용한 표면 세정 단계와 유기 아미노산 코팅층을 형성하는 표면 개질 단계를 포함할 수 있다.
- [0043] 상기 표면 개질 단계에 의해 기판 및 전극에 형성되는 유기 아미노산 코팅층(150)은, 염기성 아미노산 고분자인 poly-L-라이신(lysine), poly-D-라이신(lysine) 또는 poly-E-라이신(lysine)을 포함하는 염기성 아미노산 고분자 수용액을 사용하여, 침적코팅(dip coating), 스핀코팅(spin coating) 또는 drop 코팅 방법으로 수행될 수 있다.
- [0045] 이러한 표면 개질에 사용되는 염기성 아미노산 고분자인 poly-L-라이신(lysine) 등은 후속 과정에서 형성되는 탄소나노튜브 네트워크를 보다 견고하게 형성하는데 도움을 주게되는데, 이러한 표면 개질의 구체적인 작용 기전은 명확하지 않으나, 상기 염기성 아미노산 고분자가 갖는 정전기적 인력에 기인하는 것으로 파악된다.
- [0046] 기판과 전극 위로 탄소나노튜브 용액을 도포하여 탄소나노튜브 네트워크를 형성한다. 이러한 탄소나노튜브 용액의 도포 역시 침적코팅(dip coating), 스핀코팅(spin coating) 또는 drop 코팅 방법으로 수행될 수 있으며, 탄소나노튜브 용액은 증류수, IPA, DMF 등의 일반적인 용매를 사용하여 희석된 것을 사용할 수 있다.
- [0047] 또한, 상기 탄소나노튜브 용액으로는, 탄소나노튜브 분산액과 금 나노입자 분산액을 혼합하여 제조한 "금-탄소나노튜브 분산액"을 사용하는 것도 가능하며, 후술될 화학적 환원을 이용해 제작되는 "표면에 금(Au)이 환원된 탄소나노튜브 분산액"을 사용하는 것도 가능하다.
- [0048] 이렇게 형성된 탄소나노튜브 네트워크를 원하는 영역인 소스 전극에만 형성될 수 있도록, 제1 포토레지스트를

사용하여 패터닝함으로써, 소스 전극에만 상기 탄소나노튜브 네트워크를 보호하는 포토레지스트 패턴을 형성한 후, 산소(O_2) 플라즈마를 사용하여 나머지 영역의 탄소나노튜브 네트워크를 제거한 후, 소스 전극 위의 포토레지스트 패턴을 제거함으로써, 소스 전극에만 선택적으로 상기 탄소나노튜브 네트워크를 형성할 수 있다.

- [0049] 이렇게 소스 전극(110)에 선택적으로 탄소나노튜브 네트워크를 포함하는 탄소나노튜브 층(140)을 형성한 후, 탄소나노튜브 층(140)에 금속 나노입자(160)를 코팅할 수 있다. 이때 금속 나노입자(160)는 금(Au), 은(Ag), 백금(Pt), 티타늄(Ti), 철(Fe), 니켈(Ni) 또는 구리(Cu) 나노입자 중에서 선택될 수 있다.
- [0050] 탄소나노튜브 층(140)에 금속 나노입자(160)를 코팅하는 방법으로는, 금속 나노입자 용액을 이용해 침적코팅(dip coating), 스핀코팅(spin coating) 또는 drop 코팅 방법으로 수행될 수 있으며, 이때 적절한 패터닝 공정(포토리소그래피 혹은 lift-off 등)을 통해서 탄소나노튜브 층(140)에만 금속 나노입자가 코팅될 수 있다.
- [0051] 금속 나노입자(160)를 코팅하는 다른 방법으로는, 금속 나노입자를 탄소나노튜브 층(140)에 물리적 증착하는 방법으로, 증착(evaporation) 또는 스퍼터링(sputtering) 방법이 사용될 수 있으며, 이때 적절한 패터닝 공정(포토리소그래피 혹은 lift-off 등)을 통해서 탄소나노튜브 층(140)에만 금속 나노입자가 코팅될 수 있다.
- [0052] 금속 나노입자(160)를 코팅하는 또 다른 방법으로는, 화학적 환원을 이용하는 방법이 있다. 이러한 화학적 환원 방법은, 탄소나노튜브의 표면에 금(Au)을 환원시키는 방법이다. 구체적으로, 탄소나노튜브 분산액에 $H AuCl_4$ 용액을 넣어 교반한 후, 시트르산나트륨(sodium citrate) 용액을 처리하게 되면, 탄소나노튜브 분산액 내에 탄소나노튜브의 표면에 금(Au)이 환원되어 "표면에 금(Au)이 환원된 탄소나노튜브 분산액"을 제작할 수 있다. 탄소나노튜브 층을 형성하는 단계에서 탄소나노튜브 용액으로 "표면에 금(Au)이 환원된 탄소나노튜브 분산액"을 사용하게 되면 금(Au)이 코팅된 탄소나노튜브 층을 형성할 수 있다.
- [0053] 이렇게 탄소나노튜브 층(140)에 금속 나노입자(160)를 코팅한 후, 포토레지스트를 전면 도포한 후, 공지의 도금, 증착 및 패터닝 공정을 사용하여 드레인 전극(130)을 형성하는데, 이때 상기 드레인 전극(130)은 도 1에서 확인되듯이, 게이트 전극(100)과 소스 전극(110)이 형성된 구조의 위쪽으로 소정간격 이격되어 형성되며, 상기 드레인 기본 전극(120)에만 도통되도록 형성된다.
- [0055] 도 2는 본 발명의 금속 나노입자가 코팅된 탄소나노튜브 네트워크를 포함하는 접촉식 마이크로 소자의 제조 과정을 단계별로 도시한 것으로, 기판(10) 상에 전극 물질을 형성한 후 패터닝 함으로써 게이트 전극(100), 소스 전극(110) 및 드레인 기본 전극(120)을 형성한다(S100).
- [0056] 이렇게 기판(10) 상에 전극을 형성한 후, 산소(O_2) 플라즈마를 사용한 표면 세정 단계를 수행하고, 탄소나노튜브 용액을 도포하여 탄소나노튜브 네트워크를 포함하는 탄소나노튜브 층(140)을 형성한다(S200).
- [0057] 이때 탄소나노튜브 용액의 도포는 침적코팅(dip coating), 스핀코팅(spin coating) 또는 drop 코팅 방법으로 수행될 수 있으며, 탄소나노튜브 용액은 상용화된 multi-wall 탄소나노튜브 용액을 사용할 수 있으며, 유기용매인 DMF를 사용하여 약 1.5~3mg/ml의 농도로 희석하여 사용하는 것이 바람직하다.
- [0058] 또는 상기 탄소나노튜브 용액으로, 상술된 "금-탄소나노튜브 분산액" 또는 "표면에 금(Au)이 환원된 탄소나노튜브 분산액"을 사용할 수 있다. 이와 같은 "금-탄소나노튜브 분산액" 또는 "표면에 금(Au)이 환원된 탄소나노튜브 분산액"을 사용하는 경우에는, 후술될 금속 나노입자를 코팅하는 단계를 거치지 않고도 탄소나노튜브 층에 금속 나노입자가 코팅되는 효과를 얻을 수 있다.
- [0059] 이렇게 형성된 탄소나노튜브 네트워크를 원하는 영역인 소스 전극(110)에만 형성될 수 있도록, 포토레지스트를 사용하여 패터닝함으로써, 소스 전극에만 상기 탄소나노튜브 네트워크를 보호하는 포토레지스트 패턴을 형성한 후, 산소(O_2) 플라즈마를 사용하여 나머지 영역의 탄소나노튜브 네트워크를 제거한다(S300).
- [0060] 소스 전극(110)에 선택적으로 탄소나노튜브 네트워크를 포함하는 탄소나노튜브 층(140)을 형성한 후, 상기 탄소나노튜브 층(140)에 금속 나노입자(160)를 코팅한다(S400). 구체적으로 금속 나노입자 용액을 이용해 침적코팅(dip coating), 스핀코팅(spin coating) 또는 drop 코팅 방법으로 탄소나노튜브 층(140)에 금속 나노입자(160)를 코팅할 수 있으며, 이때 적절한 패터닝 공정(포토리소그래피 혹은 lift-off 등)을 통해서 탄소나노튜브 층(140)에만 금속 나노입자(160)를 코팅할 수 있다.
- [0061] 상기 금속 나노입자 용액으로는 100nm 이하의 지름을 가지는 금속 나노입자가 증류수, IPA, DMF 등의 일반적인

용매에 분산된 것을 사용할 수 있다.

- [0062] 탄소나노튜브 층(140)에 금속 나노입자(160)를 코팅하는 다른 방법으로는, 금속 나노입자(160)를 탄소나노튜브 층(140)에 물리적 증착하는 방법으로, 증착(evaporation) 또는 스퍼터링(sputtering) 방법이 사용될 수 있으며, 이때 적절한 패터닝 공정(포토리소그래피 혹은 lift-off 등)을 통해서 탄소나노튜브 층(140)에만 금속 나노입자(160)가 코팅될 수 있다.
- [0063] 금속 나노입자(160)를 코팅하는 또 다른 방법으로는, 화학적 환원을 이용하는 방법이 있다. 화학적 환원 방법은 HAuCl_4 용액을 통해 탄소나노튜브의 표면에 금(Au)을 환원시킨 후, 표면에 금(Au)이 환원된 탄소나노튜브를 이용해 금-탄소나노튜브 분산액을 제작한다. 탄소나노튜브 층을 형성하는 단계(S200)에서 표면에 금-탄소나노튜브 분산액을 이용해 금(Au)이 코팅된 탄소나노튜브 층을 형성할 수 있다.
- [0064] 탄소나노튜브 층(140)에 금속 나노입자(160)를 코팅한 후, 포토레지스트를 전면 도포한 후, 공지의 도금, 증착 및 패터닝 공정을 사용하여 드레인 전극(130)을 형성하는데, 이때 상기 드레인 전극(130)이 드레인 기본 전극(120)과 연통될 수 있도록 제1 포토레지스트 패턴(310) 및 제2 포토레지스트 패턴(410)을 도 2와 같이 형성한다(S500).
- [0065] 이렇게 형성된 제1 포토레지스트 패턴 및 제2 포토레지스트 패턴 위로 도금 혹은 증착 공정을 통해서 드레인 전극(130)을 형성한 후 포토레지스트 패턴을 제거함으로써, 게이트 전극(100)과 소스 전극(110)이 형성된 구조의 위쪽으로 소정간격 이격되어 드레인 전극(130)을 형성된다(S800).
- [0066] 필요에 따라 상기 제1 포토레지스트 패턴 및 제2 포토레지스트 패턴을 형성하고(S500), 제1 포토레지스트 패턴 및 제2 포토레지스트 패턴 위에 금(Au)을 증착시키고 추가적인 제3 포토레지스트 패턴(510)을 형성한 후(S600), 상기 탄소나노튜브 층(140)이 형성된 소스 전극(110)의 위쪽으로 상기 드레인 전극(130)과 전기적으로 연결되는 덤플(170)을 형성하는 것도 가능하다(S700).
- [0067] 상기 드레인 전극(130)이 니켈(Ni) 금속으로 형성될 경우에, 상기 덤플(170)은 금(Au)으로 형성되는 것이 바람직하며, 이렇게 형성된 덤플(170)은, 본 발명의 접촉식 마이크로 소자에 압력과 같은 수직 힘이 작용하거나, 게이트 전극과 드레인 전극 사이의 전압 차이에 의해 발생하는 정전기적 인력으로 인해 소자가 구동되어 MEMS 스위치의 역할을 수행하게 된다.
- [0068] 상기 덤플(170)이 형성되지 않은 경우에도, 수직 힘이 작용하거나, 게이트 전극과 드레인 전극 사이의 전압 차이에 의해 발생하는 정전기적 인력 등으로 인해 드레인 전극(130)이 소스 전극(110)과 물리적으로 접촉하게 되며, 이때 상기 소스 전극(110) 위쪽으로 형성된 금속 나노입자가 코팅된 탄소나노튜브 층과 직접적으로 접촉하도록 소자가 구동되어 MEMS 스위치의 역할을 수행하게 된다.
- [0069] 이렇게 소스 전극(110) 위로 형성된 금속 나노입자가 코팅된 탄소나노튜브 층 내의 탄소나노튜브 네트워크를 SEM으로 관찰한 결과를 도 3에 나타내었다(도 3(a)는 금속 나노입자가 코팅되지 않은 탄소나노튜브 네트워크이며, 도 3(b)는 금속 나노입자가 코팅된 탄소나노튜브 네트워크이다).
- [0070] 드레인 전극(130)에서 소스 전극(110)으로의 수직 방향으로 힘이 가해지거나, 게이트 전극과 드레인 전극 사이의 전압 차이에 의해 발생하는 정전기적 인력 등으로 인해 드레인 전극(130)이 소스 전극(110)과 물리적으로 접촉하게 될 경우에는, 드레인 전극(130)이 상기 소스 전극(110) 위로 형성된 금속 나노입자가 코팅된 탄소나노튜브 층과 물리적으로 접촉하게 되는데, 탄소나노튜브 층(140) 내의 금속 나노입자가 코팅된 탄소나노튜브 네트워크의 배향 구조가 임의의 랜덤 구조에서 압축 방향으로의 전이가 발생하게 되며(도 4의 모식도 참조), 이로 인해 접촉식 마이크로 소자의 저항이 급격히 감소하게 된다.
- [0071] 즉, 본 발명의 접촉식 마이크로 소자는, 도 4의 (a) 및 (b)에 도식적으로 제시된 것처럼 금속 나노입자가 코팅된 탄소나노튜브 네트워크가 게이트 전극에 인가되는 전압에 따라 접촉 이후에도 압축되어 넓은 접촉면적을 갖게 된다. 특히 금속 나노입자는 탄소나노튜브보다 전도성이 좋기 때문에, 본 발명의 금속 나노입자가 코팅된 탄소나노튜브 네트워크는 탄소나노튜브와 금속 나노입자가 접촉에 참여하게 되고, 이로 인해 단순한 탄소나노튜브 네트워크보다 낮은 접촉 저항을 갖는다.
- [0073] [실시예]
- [0074] 앞서 살펴본 본 발명의 금속 나노입자가 코팅된 탄소나노튜브 층을 포함하는 접촉식 마이크로 소자를 제작하였

다.

- [0075] SiO₂ 기판 위에 Cr/Au (10 nm/ 100 nm)를 evaporation 을 통해 증착하여 게이트, 드레인 기본 전극 및 소스 전극을 형성하였다. 산소(O₂) 플라즈마를 사용한 표면 세정 단계와 유기 아미노산 코팅층을 형성하는 표면 개질 단계 거쳤으며, 상기 표면 개질 단계에 의해 기판 및 전극에 형성되는 유기 아미노산 코팅층은, 염기성 아미노산 고분자인 poly-L-라이신(lysine) 수용액을 사용하여 침적코팅(dip coating)을 수행하였다. 이후 CNT dispersion solution을 dip-coating 하여 전면에 탄소나노튜브 층을 형성한 후, 산소(O₂) 플라즈마를 통해 접촉부 소스 전극을 제외한 나머지 부분의 탄소나노튜브 층을 제거하였다.
- [0076] 이때 사용된 탄소나노튜브 용액은 상용화된 multi-wall CNT 용액을 사용하였으며, 유기용매인 DMF를 사용하여 2mg/ml의 농도로 희석하여 사용하였다.
- [0077] 이후, 금(Au) 나노입자 용액을 이용해 스핀코팅(spin coating)을 수행하고, lift-off 공정을 통해 탄소나노튜브 층에만 금(Au) 나노입자를 코팅하였다.
- [0078] 이후 photolithography를 통해 스위치의 구조물 제작을 위한 photoresist mold를 제작하였고 상부에 드레인 전극의 형성을 위한 전기도금을 수행하였으며, 전기도금의 seed layer로써 Au(100nm)를 증착한 후, nickel 전기도금(7 μm)을 통해 접촉식 마이크로 소자를 제작하였다.
- [0079] **[비교예 1]**
- [0080] 실시예 1과 동일한 방법으로 접촉식 마이크로 소자를 제작하되, 탄소나노튜브 층을 형성하는 단계와 금(Au) 나노입자를 코팅하는 단계를 수행하지 않고, 접촉식 마이크로 소자를 제작하였다. 즉 탄소나노튜브 네트워크가 형성되지 않은 스위치를 제작하였다.
- [0081] **[비교예 2]**
- [0082] 실시예 1과 동일한 방법으로 접촉식 마이크로 소자를 제작하되, 금(Au) 나노입자를 코팅하는 단계를 수행하지 않고, 접촉식 마이크로 소자를 제작 하였다. 즉, 탄소나노튜브 네트워크만 형성된 스위치를 제작하였다.
- [0084] **[실험예 1: 접촉식 마이크로 소자의 성능 확인]**
- [0085] 본 발명의 접촉식 마이크로 소자의 성능을 확인하기 위해, 비교예 1, 비교예 2 및 실시예의 접촉식 마이크로 소자의 소스 전극과 드레인 전극에 파라미터 분석기를 연결한 후, 25℃의 상온에서 50%의 상대습도 조건에서 게이트 전극에 전압을 가하여 소스 전극과 드레인 전극을 사이의 전류 흐름을 측정하였으며, 그 결과를 도 5에 도시하였다(도 5(a)는 비교예 1의 결과이며, 도 5(b)는 비교예 2의 결과이고, 도 5(c)는 실시예의 결과이다).
- [0086] 도 5에서 확인되듯이, I_{DS} (drain-source current)-V_G (gate voltage) sweep 실험을 통해 비교예 1, 비교예 2 및 실시예의 접촉식 마이크로 소자의 on 전압과 off 전압을 측정하였다.
- [0087] 각각의 경우에 대해서 확인되듯이, 65 V(비교예 1, Au-Au), 72 V(비교예 2, with CNT)와 34 V(실시예, with Au-NP and CNT)에서 접촉(On) 하였고, 40 V(비교예 1, Au-Au), 66 V(비교예 2, with CNT)와 32 V(실시예, with Au-NP and CNT)에서 Off 되었다. 탄소나노튜브 네트워크가 형성된 마이크로 소자의 경우(비교예 2 및 실시예) slight contact이 이루어지며 게이트 전압이 증가함에 따라 탄소나노튜브 네트워크가 압축되어 접촉면이 넓어짐에 따라 마이크로 소자의 On 저항이 낮아질 수 있음을 실험적으로 확인하였다.
- [0088] 이는 게이트 전극에 가해지는 전압이 증가함에 따라, 본 발명의 접촉식 마이크로 소자의 소스 전극과 드레인 전극 사이에 전압 차이로 인한 정전기적 인력이 발생하고, 이러한 인력이 증가함에 따라 약한 접촉이 발생하고, 계속 전압이 증가함에 따라 드레인 전극 상에 형성된 탄소나노튜브 층이 압축되어 저항이 급격히 감소하여 전류의 흐름이 급격히 증가함을 의미한다
- [0089] 특히, 실시예의 경우 탄소나노튜브 뿐만 아니라 전도성이 우수한 금(Au) 나노입자가 접촉에 참여하기 때문에 약한 접촉에도 비교적 낮은 접촉 저항을 갖게 되어 탄소나노튜브 네트워크가 형성되지 않은 비교예 1과 유사하게 작동함을 알 수 있다. 이는 실시예가 논리소자(micromechanical inverter)에도 활용될 수 있음을 의미한다.

[0091] [실험예 2: 접촉식 마이크로 소자의 내구성 확인]

[0092] 본 발명의 접촉식 마이크로 소자의 대기 중의 사용 내구성에 대해서 확인하기 위해, 비교예 1, 비교예 2 및 실시예를, 앞서 실험예 1에서 사용한 시스템을 사용하여, 25℃의 상온 및 50%의 상대습도 조건에서 게이트에 전압을 가해서 소스 전극과 드레인 전극을 접촉(On)시켰다가 원복(Off)하는 과정을 1 cycle로 하여 접촉 소자의 작동 횟수를 측정하였으며, 그 결과를 도 6에 정리하였다(1 V의 고정 전압, 1μA 전류에서 300 Hz의 접촉 분리)

[0093] 도 8의 Au NP는 금(Au) 나노입자만이 코팅된 마이크로 소자에 대한 결과를 의미하며(Ko, Seung-Deok, et al. "Investigation of the Nanoparticle Electrical Contact Lubrication in MEMS Switches." Journal of Microelectromechanical Systems 26.6 (2017): 1417-1427.의 데이터 인용), Au-Au는 비교예 1, CNT는 비교예 2, Au-NP CNT는 실시예의 결과를 의미한다.

[0094] 도 8에서 확인 되듯이, 탄소나노튜브 층이 포함되지 않은 접촉식 마이크로 소자(비교예 1)에 비해, 본 발명의 접촉식 마이크로 소자의 수명이 훨씬 증가하였음을 확인할 수 있다.

[0095] 실험예 1 및 실험예 2의 결과를 통해 본 발명의 금속 나노입자가 코팅된 탄소나노튜브 네트워크를 포함하는 접촉식 마이크로 소자는 높은 내구성을 가지면서도, 약한 접촉에도 낮은 접촉저항을 나타내어 탄소나노튜브 네트워크를 포함하지 않은 접촉식 마이크로 소자와 유사하게 작동되는 것을 알 수 있었다.

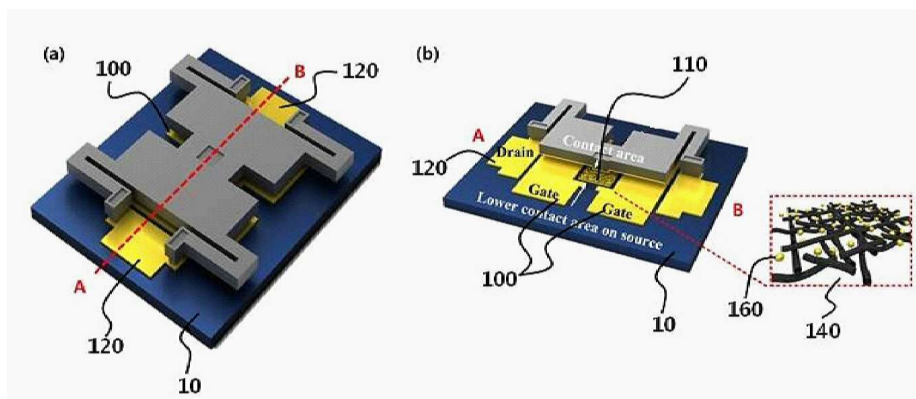
[0097] 본 명세서에서는 본 발명자들이 수행한 다양한 실시예 가운데 몇 개의 예만을 들어 설명하는 것이나 본 발명의 기술적 사상은 이에 한정하거나 제한되지 않고, 이 기술분야에서 통상의 지식을 가진 자에 의해 변형되어 다양하게 실시될 수 있음은 물론이다.

부호의 설명

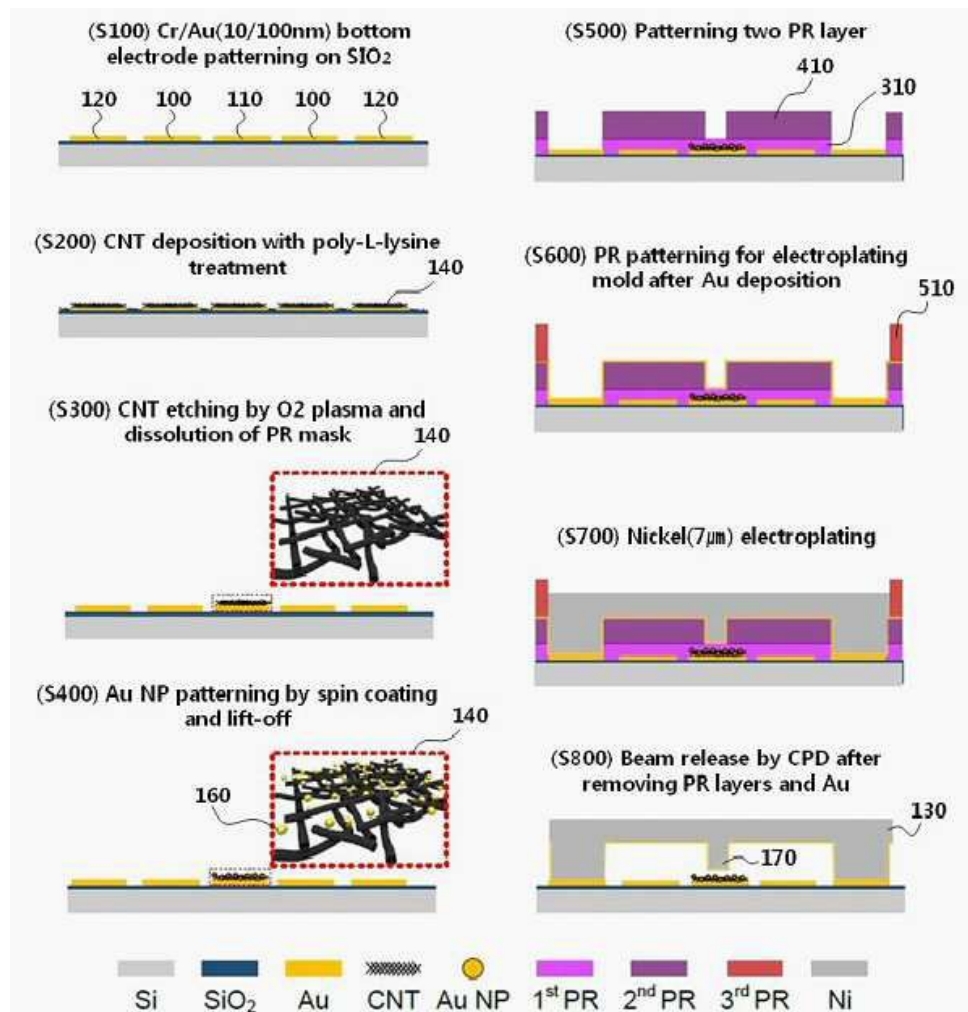
[0099] 10: 기판 100: 게이트 전극
110: 소스 전극 120: 드레인 기본 전극
130: 드레인 전극 140: 탄소나노튜브 층
160: 금속 나노입자 170: 덤플

도면

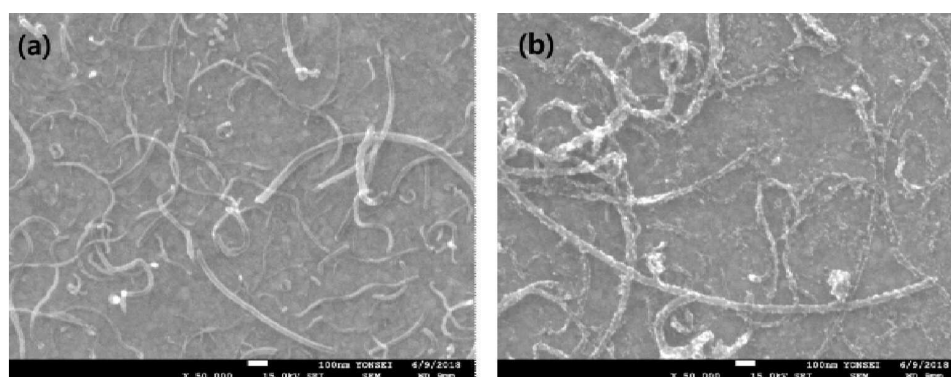
도면1



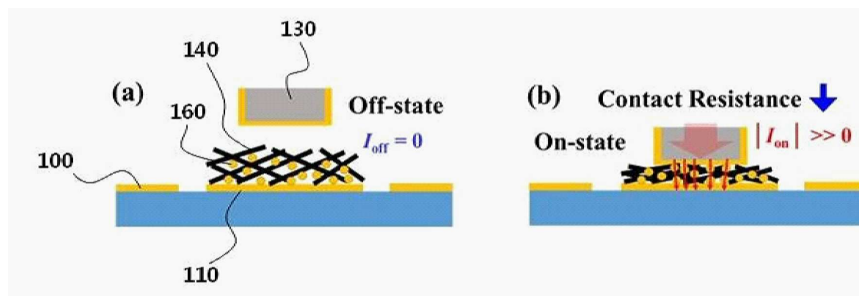
도면2



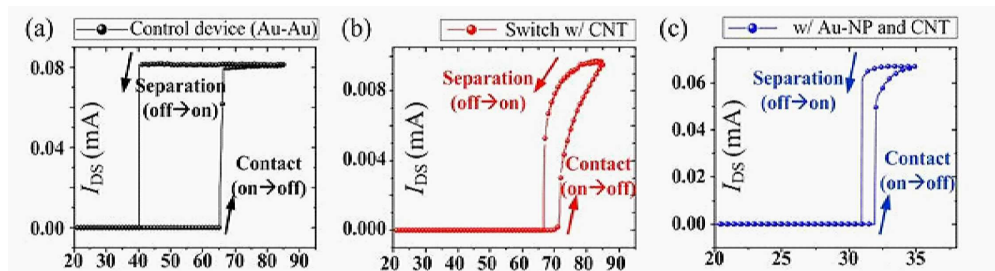
도면3



도면4



도면5



도면6

