



(19) 대한민국특허청(KR)
(12) 공개특허공보(A)

(11) 공개번호 10-2024-0047149
(43) 공개일자 2024년04월12일

(51) 국제특허분류(Int. Cl.)

H10K 50/80 (2023.01) H10K 30/00 (2023.01)

H10K 50/00 (2023.01) H10K 99/00 (2023.01)

(52) CPC특허분류

H10K 50/852 (2023.02)

H10K 30/10 (2023.02)

(21) 출원번호 10-2022-0126432

(22) 출원일자 2022년10월04일

심사청구일자 2022년10월04일

(71) 출원인

연세대학교 산학협력단

서울특별시 서대문구 연세로 50 (신촌동, 연세대학교)

(72) 발명자

여중석

인천광역시 연수구 컨벤시아대로130번길 100, 1806동 2503호(송도동, 송도 더샵 그린워크 3차)

이지혜

경기도 과천시 별양로 12, 316동 602호(원문동, 래미안 슈르)

김영민

경기도 수원시 권선구 고색로 26-6, 204호(고색동)

(74) 대리인

특허법인우인

전체 청구항 수 : 총 31 항

(54) 발명의 명칭 단일 원자 치환을 통한 양자 터널링 기반으로 전자적 또는 광학적으로 동작하는 분자 소자

(57) 요약

본 실시예들은 단일 원자 치환을 통한 양자 터널링 기반으로 나노미터 스케일의 금속 박막-금속 구조체로 공진 캐비티를 형성하고, 캐비티 내의 물질을 원자 수준으로 다르게 하여 고유 에너지 레벨 변화를 통한 터널링 신호의 미세 조절이 가능하고, 캐비티 내의 물질은 자극 반응형(stimuli responsive) 원자 및 분자 요소가 포함될 수 있고, 터널링 신호 증폭을 위한 구조적 개선도 가능하여 신호 처리 오류를 줄일 수 있고, 극한의 작은 캐비티에서 신호의 이동을 조절할 수 있는 미세 전자/광학 소자로의 응용이 가능한 분자 소자를 제공한다.

대 표 도 - 도1



(52) CPC특허분류

H10K 30/81 (2023.02)

H10K 50/11 (2023.02)

H10K 50/805 (2023.02)

H10K 71/12 (2023.02)

H10K 71/164 (2023.02)

H10K 85/60 (2023.02)

이 발명을 지원한 국가연구개발사업

과제고유번호	1711147692
과제번호	2019K1A3A1A14067200
부처명	과학기술정보통신부
과제관리(전문)기관명	한국연구재단
연구사업명	국제화기반조성사업
연구과제명	자체 발광 메타표면의 개발: 온칩 나노포토닉스와 바이오센서로의 응용(3/4)
기 여 율	1/1
과제수행기관명	연세대학교
연구기간	2021.11.01 ~ 2022.10.31

명세서

청구범위

청구항 1

분자 소자에 있어서,

금속 박막으로 형성된 제1 공진체;

금속 구조체로 형성된 제2 공진체; 및

상기 제1 공진체 및 상기 제2 공진체 사이에서 양자 터널링 현상이 일어나는 공진 캐비티를 포함하는 분자 소자.

청구항 2

제1항에 있어서,

상기 제2 공진체의 상기 금속 구조체는 나노 파티클, 나노 큐브, 다각형의 구조체, 나노 막대, 이들의 조합을 포함하는 것을 특징으로 하는 분자 소자.

청구항 3

제1항에 있어서,

상기 공진 캐비티는 나노미터 또는 서브나노미터 수준의 크기로 설정되는 것을 특징으로 하는 분자 소자.

청구항 4

제1항에 있어서,

상기 공진 캐비티는,

상기 제1 공진체를 이루는 원자와 공유 결합(covalent bond)하는 원소를 포함하는 제1 링커;

상기 제2 공진체를 이루는 원자와 공유 결합하는 원소를 포함하는 제2 링커;

상기 제1 링커에 연결되고 탄소를 포함하는 유기 화합물로 카복실산염(COO^-)을 포함하는 제1 스페이서;

상기 제2 링커에 연결되고 탄소를 포함하는 유기 화합물로 카복실산염(COO^-)을 포함하는 제2 스페이서; 및

상기 제1 스페이서의 카복실산염(COO^-)과 상호 결합하고 상기 제2 스페이서의 카복실산염(COO^-)과 상호 결합하는 중심 원자를 포함하는 것을 특징으로 하는 분자 소자.

청구항 5

제4항에 있어서,

상기 공진 캐비티는 상기 제1 공진체 및 상기 제2 공진체 사이에 원자 또는 분자 수준의 특정 물질을 도입하여 전자 신호 또는 광학 신호를 전달하는 것을 특징으로 하는 분자 소자.

청구항 6

제5항에 있어서,

상기 제1 공진체 및 상기 제2 공진체는 상기 전자 신호를 전달하기 위해서 전하 주입(charge injection)이 가능한 전극(electrode) 역할을 수행하는 것을 특징으로 하는 분자 소자.

청구항 7

제6항에 있어서,

상기 제1 공진체 및 상기 제2 공진체는 전도도(conductivity)가 수십 10^6 S/m이 넘는 금속 재료를 사용하고, 이온 마이그레이션(Ion-migration)에 따른 유전체 내 금속 필라멘트 형성이 가능한 구리 및 은을 제외하는 것을 특징으로 하는 분자 소자.

청구항 8

제4항에 있어서,

상기 분자 소자는 상기 공진 캐비티의 상기 중심 원자를 치환하며,

상기 중심 원자의 종류에 따라 고유의 에너지 레벨이 결정되는 것을 특징으로 하는 분자 소자.

청구항 9

제8항에 있어서,

상기 분자 소자는 HOMO(highest occupied molecular orbital)-LUMO(lowest unoccupied molecular orbital)의 위치, HOMO-LUMO의 갭(bandgap), MO(molecular orbital)에 나타난 전자 구름(electron cloud)의 분포가 편재(localization) 또는 비편재(delocalization) 여부, 프런티어(Frontier) MO (HOMO, LUMO) 레벨이 페르미 레벨(Fermi level)에 가까운지, 이들의 조합을 기준으로 소재(material)의 특성에 따라 상기 제1 공진체 및 상기 제2 공진체 사이를 흐르는 양자 터널링 신호를 조절하는 것을 특징으로 하는 분자 소자.

청구항 10

제8항에 있어서,

상기 중심 원자에 구리(Cu) 원자가 위치하면, 비편재된(delocalized) LUMO 레벨을 통해 코히런트 온 공진 터널링(Coherent on-resonant tunneling)을 하며, 프런티어 오비탈(Frontier orbital)이 페르미 레벨(Fermi level)과 기준 거리 이내여서 오비탈을 통해 상기 양자 터널링 현상이 일어나는 것을 특징으로 하는 분자 소자.

청구항 11

제8항에 있어서,

상기 중심 원자에 나트륨(Na) 원자가 위치하면, 비편재된(delocalized) HOMO 레벨을 통해 코히런트 온 공진 터널링(Coherent on-resonant tunneling)을 하며, 프런티어 오비탈(Frontier orbital)이 페르미 레벨(Fermi level)과 기준 거리 이내여서 오비탈을 통해 상기 양자 터널링 현상이 일어나는 것을 특징으로 하는 분자 소자.

청구항 12

제8항에 있어서,

상기 중심 원자에 마그네슘(Mg) 원자가 위치하면,

편재된(localized) 프런티어 오비탈 LUMO가 페르미 과 기준 거리 이외여서 오비탈을 통하지 않는 코히런트 오프 공진 터널링(coherent off resonant tunneling) 현상이 나타나고,

상기 나타난 코히런트 오프 공진 터널링은 상기 코히런트 온 공진 터널링 보다 커런트 레벨(current level)이 작은 것을 특징으로 하는 분자 소자.

청구항 13

제5항에 있어서,

상기 제1 공진체 및 상기 제2 공진체는 상기 광학 신호를 전달하기 위해서 표면 플라즈몬 여기가 가능한 금속을 사용하는 것을 특징으로 하는 분자 소자.

청구항 14

제13항에 있어서,

상기 제1 공진체 및 상기 제2 공진체는 Au, Ag, Cu, Al, Pd, Pt, TiN, 또는 이들의 조합된 재료를 사용하는 것을 특징으로 하는 분자 소자.

청구항 15

제13항에 있어서,

상기 제1 공진체에 여기된 표면 플라즈몬의 에너지는 비방사 채널(non-radiative channel)을 통해 에너지 소실(dissipation)을 일으켜 핫 캐리어(hot carrier)를 생성하고,

비평형 분포(Non-equilibrium distribution)를 갖는 상기 핫 캐리어가 상기 원자를 매개로 한 상기 공진 캐비티를 통해 상기 제2 공진체로 전달되는 것을 특징으로 하는 분자 소자.

청구항 16

제13항에 있어서,

분자 오비탈(molecular orbital)이 페르미 레벨(Fermi level)과 기준 거리 이내로 가까운 구리(Cu) 원자 또는 나트륨(Na) 원자가 상기 중심 원자에 위치하면, 상기 중심 원자를 통해 상기 핫 캐리어의 전달이 이루어지는 것을 특징으로 하는 분자 소자.

청구항 17

제13항에 있어서,

상기 공진 캐비티를 이루는 상기 제1 링커, 상기 제2 링커, 상기 제1 스페이서, 상기 제2 스페이서, 상기 중심 원자에 위치한 물질에 따라 상기 공진 캐비티의 굴절률(refractive index)이 결정되는 것을 특징으로 하는 분자 소자.

청구항 18

제13항에 있어서,

상기 제1 공진체 및 상기 제2 공진체의 크기, 재료, 모양과 상기 광학 신호의 에너지 커플링 여부에 따라 상기 광학 신호의 온 또는 오프를 결정하는 것을 특징으로 하는 분자 소자.

청구항 19

제18항에 있어서,

커플링된 광학 신호가 상기 제1 공진체, 상기 공진 캐비티, 상기 제2 공진체를 거쳐 통과하면, 투과(transmittance) 에너지의 인텐시티(intensity) 및 주파수(frequency)를 변조하고, 색상(color) 변조 소자에 활용되는 것을 특징으로 하는 분자 소자.

청구항 20

제1항에 있어서,

상기 공진 캐비티의 분자 접합(molecule junction) 형성은 머캡토카르복실릭산(mercaptocarboxylic acid)(헤드 그룹(head group): -SH group, 터미널 그룹(terminal group): -COOH group) 용액(solution)을 상기 제1 공진체 및 상기 제2 공진체에 침지(immersion)하여 S-Au의 자발적 반응을 통해 기능화시키고, 도입될 원소를 포함하는 용액으로 분자 접합을 형성하는 것을 특징으로 하는 분자 소자.

청구항 21

제1항에 있어서,

상기 공진 캐비티 내부에 존재하는 분자층(molecule layer)은 자기 조립 단층(Self-Assembled Monolayer, SAM)을 통해 확보하고, 탄소로 이루어진 물질을 혼합하여 분자들의 응집(aggregation) 및 비정렬(misalignment) 없이 안정적인 분자층을 형성하는 것을 특징으로 하는 분자 소자.

청구항 22

분자 소자에 있어서,

금속 박막으로 형성된 제1 공진체;

금속 구조체로 형성된 제2 공진체; 및

상기 제1 공진체 및 상기 제2 공진체 사이에서 양자 터널링 현상이 일어나는 공진 캐비티를 포함하며,

상기 제1 공진체 및 상기 제2 공진체 사이에 집적(integration)하는 물질은 재료(material)의 고정된 특성에 의해 의존하는 것이 아니라 외부의 자극에 의해 광학적 특성, 전기적 특성, 또는 재료적 특성을 변화시킬 수 있는 물질을 사용하며, 상기 외부의 자극은 빛, 전기장, 또는 자기장에 따라 상기 양자 터널링 현상에 따른 양자 터널링 신호를 동적으로 제어하는 것을 특징으로 하는 분자 소자.

청구항 23

제22항에 있어서,

상기 빛에 의해 에너지 준위(energy level), 파이 컨쥬게이션(pi-conjugation), 쌍극자 모멘트(dipole moment), 이온 상태(ionic state), 입체 형태(steric conformation), 시스 또는 트랜스(cis/trans)에 따른 이성질체 형태(isomeric conformation)를 바꿀 수 있는 광전환성 분자(photoswitchable molecule)을 활용하여 상기 공진 캐비티를 통해 전송되는 상기 양자 터널링 신호를 동적으로 조절하는 것을 특징으로 하는 분자 소자.

청구항 24

제23항에 있어서,

상기 공진 캐비티는 아조벤젠(Azobenzene)을 포함하는 것을 특징으로 하는 분자 소자.

청구항 25

제22항에 있어서,

상기 전기장에 의해 상기 공진 캐비티에 위치한 물질의 특성 중 MO(molecular orbital)에 나타난 편재(localization) 또는 비편재(delocalization)를 바꿀 수 있는 전기 활성 분자(electroactive molecule)를 활용하여 상기 공진 캐비티를 통해 전송되는 상기 양자 터널링 신호를 동적으로 조절하는 것을 특징으로 하는 분자 소자.

청구항 26

제25항에 있어서,

상기 공진 캐비티는 금속 중심을 가진 유기금속 화합물(organometallic compound with metallic center) 또는 반대 이온이 있는 메틸 비올로겐(methyl viologen with counter ion)을 포함하는 것을 특징으로 하는 분자 소자.

청구항 27

제22항에 있어서,

상기 자기장에 의해 분자 또는 상기 분자를 포함한 구조체의 스핀 상태를 변화시킬 수 있는 물질을 활용하여, 상기 스핀 상태에 따라 존재하는 상태 밀도(density of states)가 달라지게 되어 투과(transmission)될 수 있는 오비탈이 변화하고, 이에 따라 상기 양자 터널링 신호를 동적으로 조절하는 것을 특징으로 하는 분자 소자.

청구항 28

제27항에 있어서,

상기 캐비티는 단분자 자석(single molecule magnet) 또는 메탈로센(metallocene)을 포함하는 것을 특징으로 하는 분자 소자.

청구항 29

분자 소자에 있어서,

금속 박막으로 형성된 제1 공진체;

금속 구조체로 형성된 제2 공진체; 및

상기 제1 공진체 및 상기 제2 공진체 사이에서 양자 터널링 현상이 일어나는 공진 캐비티를 포함하며,

상기 제1 공진체 및 상기 제2 공진체는 전극 역할을 수행하며,

상기 제2 공진체는 원 기둥 또는 다각 기둥의 기둥 형상으로 형성되고,

상기 제1 공진체가 상기 제2 공진체의 표면을 180도 내지 360도의 범위에서 일부 또는 전체를 둘러싸는 구조로 형성되어 상기 공진 캐비티의 면적을 확보하는 것을 특징으로 하는 분자 소자.

청구항 30

제29항에 있어서,

상기 제1 공진체 및 상기 제2 공진체는 3면 또는 4면에서 접촉 접합(contact junction)을 이루고,

코어셸 구조를 적용할 때 상기 제2 공진체에서 나노 선의 형태로 외부로 노출되는 단자를 갖도록 하는 것을 특징으로 하는 분자 소자.

청구항 31

제29항에 있어서,

상기 제1 공진체 및 상기 제2 공진체 사이의 절연 분자(insulating molecule) 물질은 등각 코팅(conformal coating)이 4면으로 가능한 분자 드롭 캐스팅(molecule drop casting) 또는 침지(immersion), 또는 나노구조체를 멤브레인(membrane) 위에 플로팅(floating) 후 원자층 증착(Atomic Layer Deposition, ALD)을 활용하여 코팅하는 것을 특징으로 하는 분자 소자.

발명의 설명

기술 분야

[0001] 본 발명이 속하는 기술 분야는 단일 원자 치환을 통한 양자 터널링 기반으로 전자적 또는 광학적 동작하는 분자 소자에 관한 것이다.

배경 기술

[0002] 이 부분에 기술된 내용은 단순히 본 실시예에 대한 배경 정보를 제공할 뿐 종래기술을 구성하는 것은 아니다.

[0003] 초미세공정을 통해 제작된 초소형 전자 소자들은 나노미터 또는 그 이하의 스케일의 미세 선폭을 가지게 된다. 그에 따라 양자적 특징이 수반된다. 미세소자에서 동작 에너지가 매우 작아지게 되어, 불확정성의 원리에 따라 터널링 현상에 의한 에너지 전달 여부는 분간하기 힘들어진다. 따라서, 기존의 미세공정 방식으로 신호 전달이 가능한 초소형 소자를 제작하는 것은 한계가 있다.

선행기술문헌

특허문헌

[0004] (특허문헌 0001) US 9,680,039 (2017.06.13)

(특허문헌 0002) US 7,834,264 (2010.11.16)

(특허문헌 0003) KR 10-2227004 (2021.03.08)

발명의 내용

해결하려는 과제

- [0005] 본 발명의 실시예들은 초소형 집적화 소자에서 발생하는 양자적 특징에 의한 문제점을 해결하기 위해, 전자/광학 신호가 지나갈 수 있는 양단의 폭 사이를 초미세공정을 통해 작게 만들어도 소자 기술/소재 기술/공정 기술을 통해 안정적인 신호 전달이 가능한 양자 터널링 기반 기술을 제공하고, 서브 나노미터 스케일의 선폭에서 소재(material)의 양자적 특징을 이용하여 초소형, 초고속, 초정밀한 특성을 확보하는데 주된 목적이 있다.
- [0006] 본 발명의 명시되지 않은 또 다른 목적들은 하기의 상세한 설명 및 그 효과로부터 용이하게 추론할 수 있는 범위 내에서 추가적으로 고려될 수 있다.

과제의 해결 수단

- [0007] 본 실시예의 일 측면에 의하면, 분자 소자에 있어서, 금속 박막으로 형성된 제1 공진체; 금속 구조체로 형성된 제2 공진체; 및 상기 제1 공진체 및 상기 제2 공진체 사이에서 양자 터널링 현상이 일어나는 공진 캐비티를 포함하는 분자 소자를 제공한다.
- [0008] 상기 제2 공진체의 상기 금속 구조체는 나노 파티클, 나노 큐브, 다각형의 구조체, 나노 막대, 이들의 조합을 포함할 수 있다.
- [0009] 상기 공진 캐비티는 나노미터 또는 서브나노미터 수준의 크기로 설정될 수 있다.
- [0010] 상기 공진 캐비티는, 상기 제1 공진체를 이루는 원자와 공유 결합(covalent bond)하는 원소를 포함하는 제1 링커; 상기 제2 공진체를 이루는 원자와 공유 결합하는 원소를 포함하는 제2 링커; 상기 제1 링커에 연결되고 탄소를 포함하는 유기 화합물로 카복실산염(COO^-)을 포함하는 제1 스페이서; 상기 제2 링커에 연결되고 탄소를 포함하는 유기 화합물로 카복실산염(COO^-)을 포함하는 제2 스페이서; 및 상기 제1 스페이서의 카복실산염(COO^-)과 상호 결합하고 상기 제2 스페이서의 카복실산염(COO^-)과 상호 결합하는 중심 원자를 포함할 수 있다.
- [0011] 상기 공진 캐비티는 상기 제1 공진체 및 상기 제2 공진체 사이에 원자 또는 분자 수준의 특정 물질을 도입하여 전자 신호 또는 광학 신호를 전달할 수 있다.
- [0012] 상기 제1 공진체 및 상기 제2 공진체는 상기 전자 신호를 전달하기 위해서 전하 주입(charge injection)이 가능한 전극(electrode) 역할을 수행할 수 있다.
- [0013] 상기 제1 공진체 및 상기 제2 공진체는 전도도(conductivity)가 수십 10^6 S/m이 넘는 금속 재료를 사용하고, 이온 마이그레이션(Ion-migration)에 따른 유전체 내 금속 필라멘트 형성이 가능한 구리 및 은을 제외할 수 있다.
- [0014] 상기 분자 소자는 상기 공진 캐비티의 상기 중심 원자를 치환하며, 상기 중심 원자의 종류에 따라 고유의 에너지 레벨이 결정될 수 있다.
- [0015] 상기 분자 소자는 HOMO(highest occupied molecular orbital)-LUMO(lowest unoccupied molecular orbital)의 위치, HOMO-LUMO의 갭(bandgap), MO(molecular orbital)에 나타난 전자 구름(electron cloud)의 분포가 편재(localization) 또는 비편재(delocalization) 여부, 프런티어(Frontier) MO (HOMO, LUMO) 레벨이 페르미 레벨(Fermi level)에 가까운지, 이들의 조합을 기준으로 소재(material)의 특성에 따라 상기 제1 공진체 및 상기 제2 공진체 사이를 흐르는 양자 터널링 신호를 조절할 수 있다.
- [0016] 상기 중심 원자에 구리(Cu) 원자가 위치하면, 비편재된(delocalized) LUMO 레벨을 통해 코히런트 온 공진 터널링(Coherent on-resonant tunneling)을 하며, 프런티어 오비탈(Frontier orbital)이 페르미 레벨(Fermi level)과 기준 거리 이내여서 오비탈을 통해 상기 양자 터널링 현상이 일어날 수 있다.
- [0017] 상기 중심 원자에 나트륨(Na) 원자가 위치하면, 비편재된(delocalized) HOMO 레벨을 통해 코히런트 온 공진 터널링(Coherent on-resonant tunneling)을 하며, 프런티어 오비탈(Frontier orbital)이 페르미 레벨(Fermi level)과 기준 거리 이내여서 오비탈을 통해 상기 양자 터널링 현상이 일어날 수 있다.
- [0018] 상기 중심 원자에 마그네슘(Mg) 원자가 위치하면, 편재된(localized) 프런티어 오비탈 LUMO가 페르미 레벨과 기준 거리 이외여서 오비탈을 통하지 않는 코히런트 오프 공진 터널링(coherent off resonant tunneling) 현상이

나타날 수 있고, 상기 나타난 코히런트 오프 공진 터널링은 상기 코히런트 온 공진 터널링 보다 커런트 레벨 (current level)이 작은 것일 수 있다.

- [0019] 상기 제1 공진체 및 상기 제2 공진체는 상기 광학 신호를 전달하기 위해서 표면 플라즈몬 여기가 가능한 금속을 사용할 수 있다.
- [0020] 상기 제1 공진체 및 상기 제2 공진체는 Au, Ag, Cu, Al, Pd, Pt, TiN, 또는 이들의 조합된 재료를 사용할 수 있다.
- [0021] 상기 제1 공진체에 여기된 표면 플라즈몬의 에너지는 비방사 채널(non-radiative channel)을 통해 에너지 소실 (dissipation)을 일으켜 핫 캐리어(hot carrier)를 생성하고, 비평형 분포(Non-equilibrium distribution)를 갖는 상기 핫 캐리어가 상기 원자를 매개로 한 상기 공진 캐비티를 통해 상기 제2 공진체로 전달될 수 있다.
- [0022] 분자 오비탈(molecular orbital)이 페르미 레벨(Fermi level)과 기준 거리 이내로 가까운 구리(Cu) 원자 또는 나트륨(Na) 원자가 상기 중심 원자에 위치하면, 상기 중심 원자를 통해 상기 핫 캐리어의 전달이 이루어질 수 있다.
- [0023] 상기 공진 캐비티를 이루는 상기 제1 링커, 상기 제2 링커, 상기 제1 스페이서, 상기 제2 스페이서, 상기 중심 원자에 위치한 물질에 따라 상기 공진 캐비티의 굴절률(refractive index)이 결정될 수 있다.
- [0024] 상기 제1 공진체 및 상기 제2 공진체의 크기, 재료, 모양과 상기 광학 신호의 에너지 커플링 여부에 따라 상기 광학 신호의 온 또는 오프를 결정할 수 있다.
- [0025] 커플링된 광학 신호가 상기 제1 공진체, 상기 공진 캐비티, 상기 제2 공진체를 거쳐 통과하면, 투과 (transmittance) 에너지의 인텐시티(intensity) 및 주파수(frequency)를 변조하고, 색상(color) 변조 소자에 활용될 수 있다.
- [0026] 상기 공진 캐비티의 분자 접합(molecule junction) 형성은 머캅토카르복실릭산(mercaptoparboxylic acid)(헤드 그룹(head group): -SH group, 터미널 그룹(terminal group): -COOH group) 용액(solution)을 상기 제1 공진체 및 상기 제2 공진체에 침지(immersion)하여 S-Au의 자발적 반응을 통해 기능화시키고, 도입될 원소를 포함하는 용액으로 분자 접합을 형성할 수 있다.
- [0027] 상기 공진 캐비티 내부에 존재하는 분자층(molecule layer)은 자기 조립 단층(Self-Assembled Monolayer, SAM)을 통해 확보하고, 탄소로 이루어진 물질을 혼합하여 분자들의 응집(agggregation) 및 비정렬(misalignment) 없이 안정적인 분자층을 형성할 수 있다.
- [0028] 본 실시예의 다른 측면에 의하면, 분자 소자에 있어서, 금속 박막으로 형성된 제1 공진체; 금속 구조체로 형성된 제2 공진체; 및 상기 제1 공진체 및 상기 제2 공진체 사이에서 양자 터널링 현상이 일어나는 공진 캐비티를 포함하며, 상기 제1 공진체 및 상기 제2 공진체 사이에 집적(integration)하는 물질은 재료(material)의 고정된 특성에 의해 의존하는 것이 아니라 외부의 자극에 의해 광학적 특성, 전기적 특성, 또는 재료적 특성을 변화시킬 수 있는 물질을 사용하며, 상기 외부의 자극은 빛, 전계, 또는 자기장에 따라 상기 양자 터널링 현상에 따른 양자 터널링 신호를 동적으로 제어하는 것을 특징으로 하는 분자 소자를 제공한다.
- [0029] 상기 빛에 의해 에너지 준위(energy level), 파이 컨쥬게이션(pi-conjugation), 쌍극자 모멘트(dipole moment), 이온 상태(ionic state), 입체 형태(steric conformation), 시스 또는 트랜스(cis/trans)에 따른 이성질체 형태(isomeric conformation)를 바꿀 수 있는 광전환성 분자(photoswitchable molecule)를 활용하여 상기 공진 캐비티를 통해 전송되는 상기 양자 터널링 신호를 동적으로 조절할 수 있다.
- [0030] 상기 공진 캐비티는 아조벤젠(Azobenzene)을 포함할 수 있다.
- [0031] 상기 전기장에 의해 상기 공진 캐비티에 위치한 물질의 특성 중 MO(molecular orbital)에 나타난 편재 (localization) 또는 비편재(delocalization)를 바꿀 수 있는 전기 활성 분자(electroactive molecule)를 활용하여 상기 공진 캐비티를 통해 전송되는 상기 양자 터널링 신호를 동적으로 조절할 수 있다.
- [0032] 상기 공진 캐비티는 금속 중심을 가진 유기금속 화합물(organometallic compound with metallic center) 또는 반대 이온이 있는 메틸 비올로겐(methyl viologen with counter ion)을 포함할 수 있다.
- [0033] 상기 자기장에 의해 분자 또는 상기 분자를 포함한 구조체의 스핀 상태를 변화시킬 수 있는 물질을 활용하여, 상기 스핀 상태에 따라 존재하는 상태 밀도(density of states)가 달라지게 되어 투과(transmission)될 수 있는

오비탈이 변화하고, 이에 따라 상기 양자 터널링 신호를 동적으로 조절할 수 있다.

[0034] 상기 캐비티는 단분자 자석(single molecule magnet) 또는 메탈로센(metallocene)을 포함할 수 있다.

[0035] 본 실시예의 또 다른 측면에 의하면, 분자 소자에 있어서, 금속 박막으로 형성된 제1 공진체; 금속 구조체로 형성된 제2 공진체; 및 상기 제1 공진체 및 상기 제2 공진체 사이에서 양자 터널링 현상이 일어나는 공진 캐비티를 포함하며, 상기 제1 공진체 및 상기 제2 공진체는 전극 역할을 수행하며, 상기 제2 공진체는 원 기둥 또는 다각 기둥의 기둥 형상으로 형성되고, 상기 제1 공진체가 상기 제2 공진체의 표면을 180도 내지 360도의 범위에 서 일부 또는 전체를 둘러싸는 구조로 형성되어 상기 공진 캐비티의 면적을 확보하는 것을 특징으로 하는 분자 소자를 제공한다.

[0036] 상기 제1 공진체 및 상기 제2 공진체는 3면 또는 4면에서 접촉 접합(contact junction)을 이루고, 코어셸 구조를 적용할 때 상기 제2 공진체에서 나노 선의 형태로 외부로 노출되는 단자를 갖도록 할 수 있다.

[0037] 상기 제1 공진체 및 상기 제2 공진체 사이의 절연 분자(insulating molecule) 물질은 등각 코팅(conformal coating)이 4면으로 가능한 분자 드롭 캐스팅(molecule drop casting) 또는 침지(immersion), 또는 나노구조체를 멤브레인(membrane) 위에 플로팅(floating) 후 원자층 증착(Atomic Layer Deposition, ALD)을 활용하여 코팅할 수 있다.

발명의 효과

[0038] 이상에서 설명한 바와 같이 본 발명의 실시예들에 의하면, 금속 박막-금속 나노 구조체로 이루어진 공진 캐비티(resonant cavity)에 원자 또는 분자 수준의 특정 물질을 도입하여 신호 전달 체계를 구성하고, 도입된 물질에 따라 캐비티의 고유 에너지 레벨 및 분자 오비탈 특성을 변화시킬 수 있는 효과가 있다.

[0039] 본 발명의 실시예들에 의하면, 외부 요인(빛, 전기자, 자기장)에 의해 에너지 레벨이 변화할 수 있는 물질이 될 수 있어, 이를 통해 신호 전달 여부를 결정하고, 양자 터널링 신호를 동적으로 제어할 수 있는 효과가 있다.

[0040] 본 발명의 실시예들에 의하면, 신호의 증폭을 위해 기존의 2면의 접합부를 구성하는 것이 아닌 3면, 또는 그 이상의 면에서 접합부를 구성할 수 있어 신호 처리 오류를 줄일 수 있는 효과가 있다.

[0041] 본 발명의 실시예들에 의하면, 초미세공정의 양산화 기술에 응용될 수 있고, 초미세선폭을 구성하는 기존 소자에서 양자적 특징에 의해 발생하는 한계점을 금속 원자를 매개로 한 공진 캐비티 구조체를 이용해 극복할 수 있는 효과가 있다.

[0042] 본 발명의 실시예들에 의하면, 서로 다른 에너지원(전자 또는 광자)을 이용하더라도 동일한 구조를 통해 소자를 구현하기 때문에 응용 가능성을 높일 수 있는 효과가 있다.

[0043] 여기에서 명시적으로 언급되지 않은 효과라 하더라도, 본 발명의 기술적 특징에 의해 기대되는 이하의 명세서에서 기재된 효과 및 그 잠정적인 효과는 본 발명의 명세서에 기재된 것과 같이 취급된다.

도면의 간단한 설명

[0044] 도 1은 본 발명의 일 실시예에 따른 분자 소자를 예시한 도면이다.

도 2 및 도 3은 본 발명의 일 실시예에 따른 분자 소자의 공진 캐비티를 예시한 도면이다.

도 4 내지 도 6은 본 발명의 일 실시예에 따른 분자 소자의 치환된 원자에 따라 전자 신호 전달 원리를 예시한 도면이다.

도 7은 본 발명의 일 실시예에 따른 분자 소자의 치환된 원자에 따라 접촉(contact) 모드 AFM(Atomic Force Microscope)을 통해 획득한 I-V 곡선을 예시한 도면이다.

도 8은 본 발명의 일 실시예에 따른 분자 소자의 광학 신호 전달 원리를 예시한 도면이다.

도 9는 금속 박막 표면 위에 특정 원자가 존재할 때(step 1) 및 분자-나노파티클이 존재할 때(step 2)의 광학 신호 측정 결과를 예시한 도면이다.

도 10 내지 도 12는 본 발명의 일 실시예에 따른 분자 소자의 치환된 원자에 따라 광학 신호 전달 원리를 예시한 도면이다.

도 13은 본 발명의 일 실시예에 따른 분자 소자의 커플링된 파티클 크기에 따른 광학 주파수 유지성을 예시한

도면이다.

도 14는 본 발명의 일 실시예에 따른 분자 소자에 따라 양자 터널링 신호를 수동 제어하는 것을 예시한 도면이다.

도 15는 본 발명의 다른 실시예에 따른 분자 소자에 따라 양자 터널링 신호를 능동 제어하는 것을 예시한 도면이다.

도 16 및 도 17은 본 발명의 또 다른 실시예에 따른 분자 소자의 신호 증폭을 위해 활성 영역을 늘리는 개선된 구조를 예시한 도면이다.

발명을 실시하기 위한 구체적인 내용

- [0045] 이하, 본 발명을 설명함에 있어서 관련된 공지기능에 대하여 이 분야의 기술자에게 자명한 사항으로서 본 발명의 요지를 불필요하게 흐릴 수 있다고 판단되는 경우에는 그 상세한 설명을 생략하고, 본 발명의 일부 실시예들을 예시적인 도면을 통해 상세하게 설명한다.
- [0046] 기존의 소자 구조에 기반한 미세화는 인접한 구조 간 발생하는 간섭 발생 및 공정의 복잡성 증가 등의 한계가 존재한다.
- [0047] 분자 전자 소자(molecular electronics)는 원자 및 분자 레벨에서의 컨트롤을 통해 물질의 특성을 변화시킬 수 있고, 특성에 따라 다양한 기능을 가지기 때문에 버텀-업(bottom-up) 방식의 미세 소자 구현이 가능하여 기존의 소형 스케일 실리콘 집적 소자를 대체할 수 있을 것으로 기대된다.
- [0048] 분자 소자는 분자 전자 소자, 분자 광학 소자 등에 적용될 수 있다.
- [0049] 분자 전자 소자의 예시로 분자 전자 메모리 소자는 전자 소자의 동작 원리를 분자 차원에서 이해하여 분자 고유의 메모리 기능을 실현할 수 있도록 분자를 이용하여 신호 처리, 정보 처리 및 정보 저장을 수행하는 전기 회로 소자이다. 분자 논리 소자, 분자 기억 소자, 분자 트랜지스터 등에 적용될 수 있다.
- [0050] 분자 광학 소자는 유기 소재의 광학 특성을 이용한 광학 소자이며, 태양 전지 및 디스플레이 등에 적용될 수 있다.
- [0051] 본 실시예에 따른 분자 소자는 크게 세 가지 기술적 특징을 갖는다. 첫 번째 특징은 나노미터 또는 그 이하의 스케일에서 형성되는 캐비티 구조체와 해당 구조체 내부에 도입되는 원자의 종류에 따른 전자/광학 신호의 미세 조절이 가능한 요소 기술에 관한 것이다. 두 번째 특징은 외부 자극(빛, 전기장, 자기장)에 따라 양자 터널링 신호를 동적으로 조절할 수 있는 요소 기술에 관한 것이다. 세 번째 특징은 신호 처리의 효율성 증대를 위한 광학/전자 신호 증폭 방법으로 활성 영역(active area)을 늘리는 구조 개선에 관한 것이다.
- [0052] 도 1은 본 발명의 일 실시예에 따른 분자 소자를 예시한 도면이다.
- [0053] 분자 소자(10)는 금속 박막으로 형성된 제1 공진체(100), 금속 구조체로 형성된 제2 공진체(200), 제1 공진체(100) 및 제2 공진체(200) 사이에서 양자 터널링 현상이 일어나는 공진 캐비티(300)를 포함한다.
- [0054] 제2 공진체(200)의 금속 구조체는 나노 파티클, 나노 큐브, 다각형의 구조체, 나노 막대, 이들의 조합을 포함할 수 있다.
- [0055] 제1 공진체(100)의 금속 박막(metallic nanofilm)과 제2 공진체(200)의 나노 큐브(nanocube), 나노 막대(nanorod) 구조체 조합은 나노 파티클(nanoparticle)과는 달리 공진체 간의 거리를 균일하게 만들 수 있다.
- [0056] 공진 캐비티는 양자 터널링 현상이 일어날 수 있는 수 나노미터 또는 서브나노미터 수준의 크기로 설정될 수 있다. 캐비티를 형성하는 두 금속 나노 공진체는 크기, 두께, 모양 변화가 가능하다.
- [0057] 공진 캐비티는 제1 공진체 및 제2 공진체 사이에 원자 또는 분자 수준의 특정 물질을 도입하여 전자 신호 또는 광학 신호를 전달할 수 있다.
- [0058] 제1 공진체 및 제2 공진체는 전자 신호를 전달하기 위해서 전하 주입(charge injection)이 가능한 전극(electrode) 역할을 수행할 수 있다. 전자 소자에서 전하 주입이 가능한 전극 금속은 전도도(conductivity)가 수십 10^6 S/m이 넘는 금속 재료를 사용하고, 이온 마이그레이션(Ion-migration)에 따른 유전체 내 금속 필라멘트 형성이 가능한 구리 및 은을 제외할 수 있다. 예컨대, 금: 44.2×10^6 , 알루미늄: 36.9×10^6 , 몰리브덴: 18.7

$\times 10^6$ 등이 사용 가능하다.

- [0059] 도 2 및 도 3은 본 발명의 일 실시예에 따른 분자 소자의 공진 캐비티를 예시한 도면이다.
- [0060] 공진 캐비티(300)는 제1 공진체를 이루는 원자와 공유 결합(covalent bond)하는 원소를 포함하는 제1 링커(311), 제2 공진체를 이루는 원자와 공유 결합하는 원소를 포함하는 제2 링커(312), 제1 링커에 연결되고 탄소를 포함하는 유기 화합물로 카복실산염(COO^-)을 포함하는 제1 스페이서(321), 제2 링커에 연결되고 탄소를 포함하는 유기 화합물로 카복실산염(COO^-)을 포함하는 제2 스페이서(322), 및 제1 스페이서의 카복실산염(COO^-)과 상호 결합하고 제2 스페이서의 카복실산염(COO^-)과 상호 결합하는 중심 원자(330)를 포함할 수 있다.
- [0061] 제1 링커(311) 및 제2 링커(312)의 예시로는 Au-S 등이 있다. 제1 링커(311) 및 제2 링커(312)는 제1 공진체와 제2 공진체를 이루는 원자와 공유 결합을 이룰 수 있는 원소를 포함한다.
- [0062] 중심 원자(330)의 예시로는 Cu, Mg, Na 등이 있다. 중심 원자(330)는 제1 스페이서와 제2 스페이서의 카복실산염(COO^-)과 상호 결합 가능한 여러 종류의 원자로 치환이 가능하다.
- [0063] 도 4 내지 도 6은 본 발명의 일 실시예에 따른 분자 소자의 치환된 원자에 따라 전자 신호 전달 원리를 예시한 도면이고, 도 7은 본 발명의 일 실시예에 따른 분자 소자의 치환된 원자에 따라 접촉(contact) 모드 AFM(Atomic Force Microscope)을 통해 획득한 I-V 곡선을 예시한 도면이다.
- [0064] 분자 소자는 공진 캐비티의 중심 원자를 치환하며, 중심 원자의 종류에 따라 고유의 에너지 레벨이 결정될 수 있다.
- [0065] 분자 소자는 HOMO(highest occupied molecular orbital)-LUMO(lowest unoccupied molecular orbital)의 위치, HOMO-LUMO의 갭(bandgap), MO(molecular orbital)에 나타난 전자 구름(electron cloud)의 분포가 편재(localization) 또는 비편재(delocalization) 여부, 프런티어(Frontier) MO (HOMO, LUMO) 레벨이 페르미 레벨(Fermi level)에 가까운지(터널링 배리어 높이(tunneling-barrier height)), 이들의 조합을 기준으로 소재(material)의 특성에 따라 제1 공진체 및 제2 공진체 사이를 흐르는 양자 터널링 신호를 조절할 수 있다.
- [0066] 공진체 사이에 위치한 소재(material)가 결정한 에너지 갭 (HOMO-LUMO의 차이), 배리어 위치 (페르미 레벨에 가까운 정도), 오비탈의 편재(localization) 정도에 따라 에너지 수송이 결정된다.
- [0067] 에너지 갭이 작을 수록, 프런티어 MO (HOMO/LUMO)가 페르미 레벨에 가까울수록, 비편재된(delocalized) MO를 가질 수록 에너지 수송이 빠르다.
- [0068] 비편재된(delocalized) MO는 빠른 채널(Fast channel) (Coherent tunneling)이고, 편재된(localized) MO는 느린 채널(Slow channel) (Incoherent hopping)에 해당한다.
- [0069] 도 4 내지 도 6을 참조하면, 중심 원자에 구리(Cu) 원자가 위치하면, 비편재된(delocalized) LUMO 레벨을 통해 코히런트 온 공진 터널링(Coherent on-resonant tunneling)을 하며, 프런티어 오비탈(Frontier orbital)이 페르미 레벨(Fermi level)과 기준 거리 이내여서 오비탈을 통해 양자 터널링 현상이 일어날 수 있다.
- [0070] 도 4 내지 도 6을 참조하면, 중심 원자에 나트륨(Na) 원자가 위치하면, 비편재된(delocalized) HOMO 레벨을 통해 코히런트 온 공진 터널링(Coherent on-resonant tunneling)을 하며, 프런티어 오비탈(Frontier orbital)이 페르미 레벨(Fermi level)과 기준 거리 이내여서 오비탈을 통해 상기 양자 터널링 현상이 일어날 수 있다.
- [0071] 도 4 내지 도 7을 참조하면, 중심 원자에 마그네슘(Mg) 원자가 위치하면, 바이어스에 따라 서로 다른 구동 원리를 나타내고, 정 바이어스(positive bias)에서는 코히런트 오프 공진 터널링(coherent off resonant tunneling)을 수행하며, 부 바이어스(negative bias)에서는 편재된(localized) LUMO를 통한 인코히런트 터널링(incoherent tunneling) 현상이 나타날 수 있다.
- [0072] 중심 원자에 마그네슘(Mg) 원자가 위치하면, 편재된(localized) 프런티어 오비탈 LUMO가 페르미 레벨과 기준 거리 이외여서 오비탈을 통하지 않는 코히런트 오프 공진 터널링(coherent off resonant tunneling) 현상이 나타날 수 있고, 나타난 코히런트 오프 공진 터널링은 코히런트 온 공진 터널링 보다 커런트 레벨(current level)이 작은 것일 수 있다.
- [0073] 도 8은 본 발명의 일 실시예에 따른 분자 소자의 광학 신호 전달 원리를 예시한 도면이고, 도 9는 금속 박막 표면 위에 특정 원자가 존재할 때(step 1) 및 분자-나노파티클이 존재할 때(step 2)의 광학 신호 측정 결과를 예

시한 도면이고, 도 10 내지 도 12는 본 발명의 일 실시예에 따른 분자 소자의 치환된 원자에 따라 광학 신호 전달 원리를 예시한 도면이다.

- [0074] 제1 공진체 및 제2 공진체는 광학 신호를 전달하기 위해서 표면 플라즈몬 여기가 가능한 금속을 사용할 수 있다. 제1 공진체 및 제2 공진체는 Au, Ag, Cu, Al, Pd, Pt, TiN, 또는 이들의 조합된 재료를 사용할 수 있다.
- [0075] 도 8을 참조하면, 제1 공진체에 여겨된 표면 플라즈몬의 에너지는 비방사 채널(non-radiative channel)을 통해 에너지 소실(dissipation)을 일으켜 핫 캐리어(hot carrier)를 생성하고, 비평형 분포(Non-equilibrium distribution)를 갖는 핫 캐리어가 원자를 매개로 한 공진 캐비티를 통해 제2 공진체로 전달될 수 있다.
- [0076] 도 9를 참조하면, 캐비티를 구리로 치환한 경우 광학 반응이 높다. 낮은 배리어 높이를 형성하고, 페르미 레벨 주변의 비편재 분자 오비탈을 통해 광 에너지가 쉽게 전달된다.
- [0077] 도 9를 참조하면, 캐비티를 마그네슘으로 치환한 경우 광학 반응이 제로에 가깝다. 높은 배리어 높이를 형성하고, 광 에너지가 나노파티클로 전달되지 않는다.
- [0078] 도 9를 참조하면, 캐비티를 나트륨으로 치환한 경우 광학 반응이 낮다. 높은 배리어 높이를 형성하나, 초과 전하(excessive charge) ($2\text{COO}^- + \text{Na}^+ = -1$ 전하)에 의해 낮은 신호 전달이 발생한다.
- [0079] 도입된 단일 원자에 따라 배리어 높이(barrier height)를 컨트롤하여 광 신호의 전달 특성을 바꿀 수 있음을 확인할 수 있다.
- [0080] 분자 오비탈(molecular orbital)이 페르미 레벨(Fermi level)과 기준 거리 이내로 가까운 구리(Cu) 원자 또는 나트륨(Na) 원자가 중심 원자에 위치하면, 중심 원자를 통해 각각 핫 캐리어(hot electron 및 hot hole)의 전달이 이루어질 수 있다. 페르미 레벨에 가까운 분자 오비탈이 없는 마그네슘은 캐리어 전달 효율이 급격히 떨어져 신호 전달이 어렵다.
- [0081] 공진 캐비티를 위치한 제1 링커, 제2 링커, 제1 스페이서, 제2 스페이서, 중심 원자에 위치한 물질에 따라 공진 캐비티의 굴절률(refractive index)이 결정될 수 있다.
- [0082] 제1 공진체 및 제2 공진체의 크기, 재료, 모양과 광학 신호의 에너지 커플링 여부에 따라 광학 신호의 온 또는 오프를 결정할 수 있다.
- [0083] 공진체에 강하게 커플링된 광학 신호는 소멸파(eyanescence wave) 또는 핫 전자(hot electron)의 형태로 MO의 위치 및 오비탈의 전자 분포에 따라 전달된다.
- [0084] 평평한 금속 필름 표면에 플라즈몬의 운동량과 일치하는 빛을 조사한 경우, 플라즈몬은 필름의 바깥쪽에서 들뜨고 (표면 플라즈몬공명, surface plasmon resonance, SPR), 소멸파(eyanescence wave)가 금속 필름을 통과한다. 통과한 에너지는 분자에 의해 결정된 MO 에너지에 따라 신호가 다음 구조체로 전달된다.
- [0085] 나노미터 크기의 금속 구조체에서 발생한 표면 플라즈몬을 국소표면플라즈몬 공명 (Localized surface plasmon resonance, LSPR)이라고 하며 이 경우 들뜬 핫 전자(hot electron)가 분자에 의해 결정된 MO를 따라 신호가 다음 구조체로 전달된다.
- [0086] 커플링된 광학 신호가 제1 공진체, 공진 캐비티, 제2 공진체를 거쳐 통과하면, 투과(transmittance) 에너지의 인텐시티(intensity) 및 주파수(frequency)를 변조할 수 있다. 이를 통해 색상(color) 변조 소자에 활용될 수 있다.
- [0087] 공진 캐비티의 분자 접합(molecule junction) 형성은 머캅토카르복실릭산(mercaptoparboxylic acid)(헤드 그룹(head group): -SH group, 터미널 그룹(terminal group): -COOH group) 용액(solution)을 상기 제1 공진체 및 상기 제2 공진체에 침지(immersion)하여 S-Au의 자발적 반응을 통해 기능화시키고, 도입될 원소를 포함하는 용액으로 분자 접합을 형성할 수 있다. 이러한 공정은 마이크로플루이딕 칩 안에서 이루어질 수 있고, 없더라도 솔루션 상태에서 제작 가능하다.
- [0088] 공진 캐비티 내부에 존재하는 분자층(molecule layer)은 자기 조립 단층(Self-Assembled Monolayer, SAM)을 통해 확보하고, 탄소로 이루어진 물질을 혼합하여 분자들의 응집(aggregation) 및 비정렬(misalignment) 없이 안정적인 분자층을 형성할 수 있다. 자기 조립 단층은 흡착(adsorption)에 의해서 표면들에 자발적으로 형성된 분자 조립체들을 의미한다.
- [0089] 도 13은 본 발명의 일 실시예에 따른 분자 소자의 커플링된 파티클 크기에 따른 광학 주파수 유지성을 예시한

도면이다.

- [0090] 조사해 주는 파장과 나노박막(nanofilm)-에어 갭(air gap)-나노파티클(nanoparticle) 구조와의 커플링 조건에 따라 투과 광 파장(transmitted light wavelength)이 달라진다. 특히, 633 nm의 광원을 쬔 때, 3 nm의 파장 변화가 가장 크고($\Delta=40$ nm), 810 nm의 경우 35 nm의 파장 변화가 가장 크다($\Delta=75$ nm).
- [0091] 이러한 결과를 기반으로 1) 파장을 고정하고, 파티클을 사이즈를 다르게 하거나, 2) 파티클의 사이즈를 고정하고 조사해주는 파장을 다르게 하여 서로 다른 파장 대역을 생성 할 수 있었다.
- [0092] 본 특허의 주요 핵심 기술을 응용하여 에어 갭(air gap)을 다른 물질로 치환하거나 갭의 크기를 능동적으로(active) 조절하게 되면 방출되는 피크 파장(peak wavelength) 및 파장 이동(peak wavelength shift)를 조절할 수 있다.
- [0093] 본 실시예들에 의하면 서브 나노미터(sub-nanometer), 나노미터(nanometer)의 갭(gap)을 만들 수 있는 금속 나노구조체(metallic nanostructure)와 이 구조를 연결할 수 있는 카본 유기물을 포함하며 갭에 위치한 원자의 종류 변화만으로도 신호 변조가 가능하여, 화학적 백본 분자(chemically backbone molecule)의 변화없이 분자 접합(molecule junction)의 터널링 신호를 변조시킬 수 있다.
- [0094] 도 14는 본 발명의 일 실시예에 따른 분자 소자에 따라 양자 터널링 신호를 수동 제어하는 것을 예시한 도면이고, 도 15는 본 발명의 다른 실시예에 따른 분자 소자에 따라 양자 터널링 신호를 능동 제어하는 것을 예시한 도면이다.
- [0095] 양자 터널링 신호를 수동 제어하는 것은 매개 소재에 따라 다른 캐비티 내 에너지 레벨을 제어하는 것이고, 양자 터널링 신호를 능동 제어하는 것은 외부 자극(빛, 전기장, 자기장)에 따른 물질 특성을 변화시키는 것이다.
- [0096] 분자 소자는 금속 박막으로 형성된 제1 공진체, 금속 구조체로 형성된 제2 공진체, 제1 공진체 및 제2 공진체 사이에서 양자 터널링 현상이 일어나는 공진 캐비티를 포함하며, 제1 공진체 및 제2 공진체 사이에 집적(integration)하는 물질은 재료(material)의 고정된 특성에 의해 의존하는 것이 아니라 외부의 자극에 의해 광학적 특성, 전기적 특성, 또는 재료적 특성을 변화시킬 수 있는 물질을 사용한다. 외부의 자극은 빛, 전기장, 또는 자기장에 따라 양자 터널링 현상에 따른 양자 터널링 신호를 동적으로 제어한다.
- [0097] 분자 소자는 빛에 의해 에너지 준위(energy level), 파이 컨쥬게이션(pi-conjugation), 쌍극자 모멘트(dipole moment), 이온 상태(ionic state), 입체 형태(steric conformation), 시스 또는 트랜스(cis/trans)에 따른 이성질체 형태(isomeric conformation)를 바꿀 수 있는 광전환성 분자(photoswitchable molecule)을 활용하여 공진 캐비티를 통해 전송되는 양자 터널링 신호를 동적으로 조절할 수 있다. 공진 캐비티는 아조벤젠(Azobenzene)을 포함할 수 있다.
- [0098] 분자 소자는 전기장에 의해 공진 캐비티에 위치한 물질의 특성 중 MO(molecular orbital)에 나타난 편재(localization) 또는 비편재(delocalization)를 바꿀 수 있는 전기 활성 분자(electroactive molecule)를 활용하여 공진 캐비티를 통해 전송되는 양자 터널링 신호를 동적으로 조절할 수 있다. 공진 캐비티는 금속 중심을 가진 유기금속 화합물(organometallic compound with metallic center) 또는 반대 이온이 있는 메틸 비올로겐(methyl viologen with counter ion)을 포함할 수 있다.
- [0099] 분자 소자는 자기장에 의해 분자 또는 분자를 포함한 구조체의 스핀 상태를 변화시킬 수 있는 물질을 활용하여, 스핀 상태에 따라 존재하는 상태 밀도(density of states)가 달라지게 되어 투과(transmission)될 수 있는 오비탈이 변화하고, 이에 따라 양자 터널링 신호를 동적으로 조절할 수 있다. 캐비티는 단분자 자석(single molecule magnet) 또는 메탈로센(metallocene)을 포함할 수 있다.
- [0100] 도 16 및 도 17은 본 발명의 또 다른 실시예에 따른 분자 소자의 신호 증폭을 위해 활성 영역을 늘리는 개선된 구조를 예시한 도면이다.
- [0101] 분자 소자는 금속 박막으로 형성된 제1 공진체, 금속 구조체로 형성된 제2 공진체, 제1 공진체 및 제2 공진체 사이에서 양자 터널링 현상이 일어나는 공진 캐비티를 포함하며, 제1 공진체 및 제2 공진체는 전극 역할을 수행한다.
- [0102] 제2 공진체는 원 기둥 또는 다각 기둥의 기둥 형상으로 형성되고, 제1 공진체가 제2 공진체의 표면을 180도 내지 360도의 범위에서 일부 또는 전체를 둘러싸는 구조로 형성되어 공진 캐비티의 면적을 확보한다.
- [0103] 제1 공진체 및 제2 공진체는 3면 또는 4면에서 접촉 접합(contact junction)을 이루고, 코어셸 구조를 적용할

때 제2 공진체에서 나노 선의 형태로 외부로 노출되는 단자를 갖도록 할 수 있다.

- [0104] 제1 공진체 및 제2 공진체 사이의 절연 분자(insulating molecule) 물질은 등각 코팅(conformal coating)이 4면으로 가능한 분자 드롭 캐스팅(molecule drop casting) 또는 침지(immersion), 또는 나노구조체를 멤브레인(membrane) 위에 플로팅(floating) 후 원자층 증착(Atomic Layer Deposition, ALD)을 활용하여 코팅할 수 있다.
- [0105] 분자 소자는 수동 제어와 능동 제어를 모두 가능한 구조로 구현될 수 있고, 수동 제어 및/또는 능동 제어를 가능하게 하면서 3차원 영역이 개선된 구조가 결합된 구조로 구현될 수도 있다.
- [0106] 본 실시예에 따른 분자 소자는 기존의 FET 및 OFET가 가진 특성, 기존 2-단자(terminal) 금속(metal)-분자(molecule)-금속(metal) 구조가 가진 특성을 서브 나노미터, 나노미터 스케일의 캐비티에서 관찰하기 위해 금속 나노구조체(metallic nanostructure)의 조합이 이루는 캐비티 사이 분자의 원자 종류 변화만으로 양자 터널링 신호의 조절 및 증폭 방법에 대한 기술 개발에 초점을 맞추고 이를 기반으로 전자 광학 소자로의 응용에 활용 가능하다.
- [0107] 본 실시예에 따른 분자 소자는 분자 자체가 아닌 원자, 이온 등 원자 사이즈(atomic size)의 재료가 집적(integration)이 가능한 템플릿(template)을 제공하고 원자 정밀도(atomic precision)로 해당 재료의 치환을 통해 분자 전체의 재료적 특성을 변조할 수 있다.
- [0108] 현 실리콘 기반 기술이 근본적으로 해결해야 하는 스케일링 이슈 및 소스-드레인 전자 터널링(source-drain electron tunneling) 한계를 버텀 업(bottom up) 방식의 해당 기술요소로 접근하고 기능적(functionality) 조절을 할 수 있다.
- [0109] 두 구조체 사이 단일 양이온(single cation)의 집적(integration)에 의해 결정되는 분자 오비탈(MO)에 의한 광학 신호와 전기 신호의 동시 조절이 가능한 플랫폼을 제공한다. 분자 전체가 아닌 (1-2 nm) 단일 원자 한 개의 변조만으로 분자 전체의 광학/전기적 특성을 유도하여 신호를 변조할 수 있는 플랫폼 제공한다. 캐비티 내 원자 접합(atomic junction)을 갖는 구조체를 통해 전기적 신호 뿐만 아니라 광학적 신호 또한 변화시켜 동시에 조절할 수 있다.
- [0110] 분자 소자는 수동 또는 능동 전자 소자, 바이오 화학 분자 센서 등에 적용될 수 있다. 분자 소자를 통해 전자의 양자 효과를 사용하여 단일 전자의 동작을 제어하고 분자 다이오드, 분자 메모리, 분자 와이어, 분자 전계 효과 트랜지스터 및 분자 스위치와 같은 정보 감지, 처리, 전송 및 저장 기능을 실현할 수 있다.
- [0111] 분자 소자가 적용된 다양한 전자 장치에 포함된 복수의 구성요소들은 상호 결합되어 적어도 하나의 모듈로 구현될 수 있다. 구성요소들은 장치 내부의 소프트웨어적인 모듈 또는 하드웨어적인 모듈을 연결하는 통신 경로에 연결되어 상호 간에 유기적으로 동작한다. 이러한 구성요소들은 하나 이상의 통신 버스 또는 신호선을 이용하여 통신한다.
- [0112] 분자 소자가 적용된 다양한 전자 장치는 하드웨어, 펌웨어, 소프트웨어 또는 이들의 조합에 의해 로직회로 내에서 구현될 수 있고, 범용 또는 특정 목적 컴퓨터를 이용하여 구현될 수도 있다. 장치는 고정배선형(Hardwired) 기기, 필드 프로그램 가능한 게이트 어레이(Field Programmable Gate Array, FPGA), 주문형 반도체(Application Specific Integrated Circuit, ASIC) 등을 이용하여 구현될 수 있다. 또한, 장치는 하나 이상의 프로세서 및 컨트롤러를 포함한 시스템온칩(System on Chip, SoC)으로 구현될 수 있다.
- [0113] 분자 소자가 적용된 다양한 전자 장치는 하드웨어적 요소가 마련된 컴퓨팅 디바이스에 소프트웨어, 하드웨어, 또는 이들의 조합하는 형태로 탑재될 수 있다. 컴퓨팅 디바이스는 각종 기기 또는 유무선 통신망과 통신을 수행하기 위한 통신 모듈 등의 통신장치, 프로그램을 실행하기 위한 데이터를 저장하는 메모리, 프로그램을 실행하여 연산 및 명령하기 위한 마이크로프로세서 등을 전부 또는 일부 포함한 다양한 장치를 의미할 수 있다.
- [0114] 본 실시예들은 본 실시예의 기술 사상을 설명하기 위한 것이고, 이러한 실시예에 의하여 본 실시예의 기술 사상의 범위가 한정되는 것은 아니다. 본 실시예의 보호 범위는 아래의 청구범위에 의하여 해석되어야 하며, 그와 동등한 범위 내에 있는 모든 기술 사상은 본 실시예의 권리범위에 포함되는 것으로 해석되어야 할 것이다.

부호의 설명

- [0115] 10: 분자 소자

100: 제1 공진체

200: 제2 공진체

300: 공진 캐비티

도면

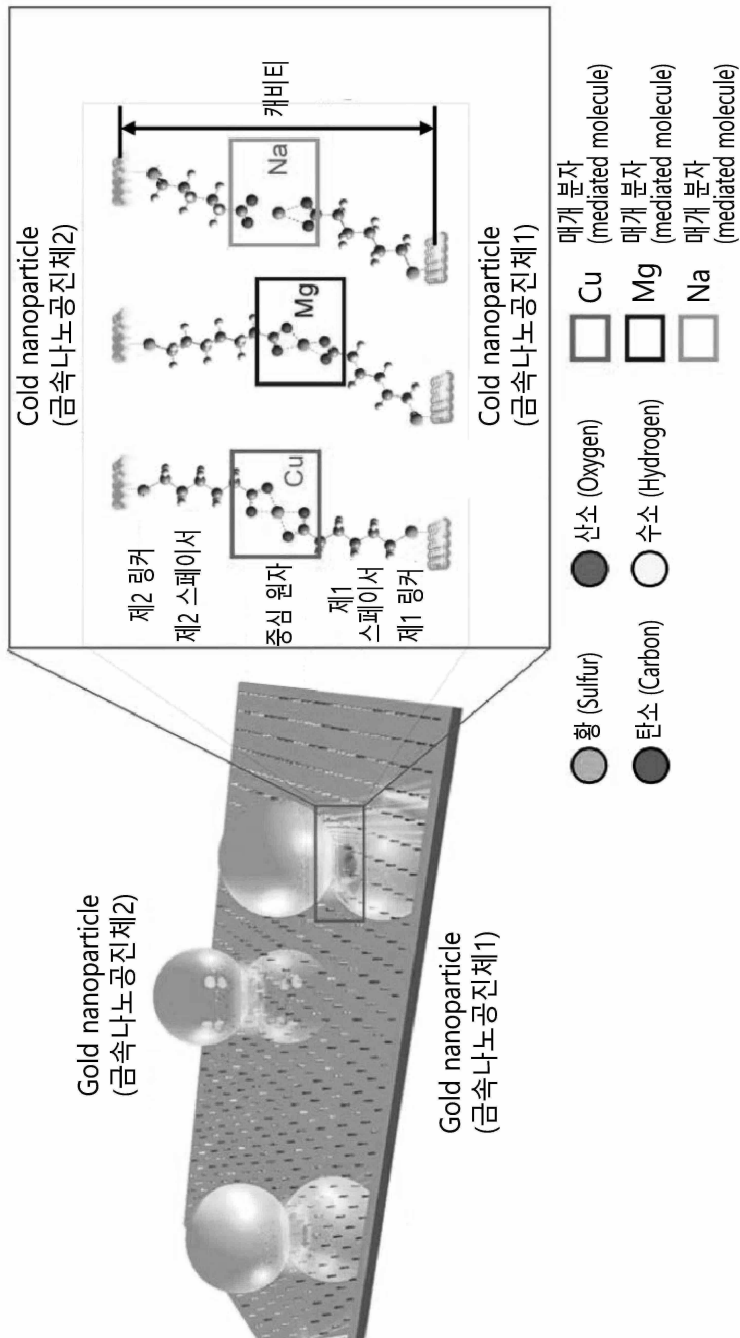
도면1



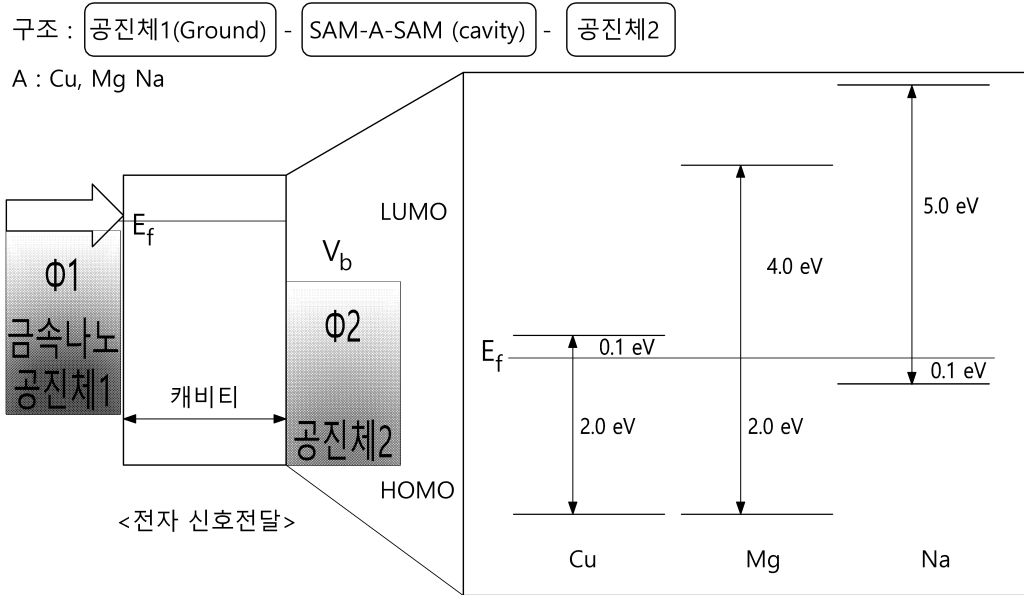
도면2



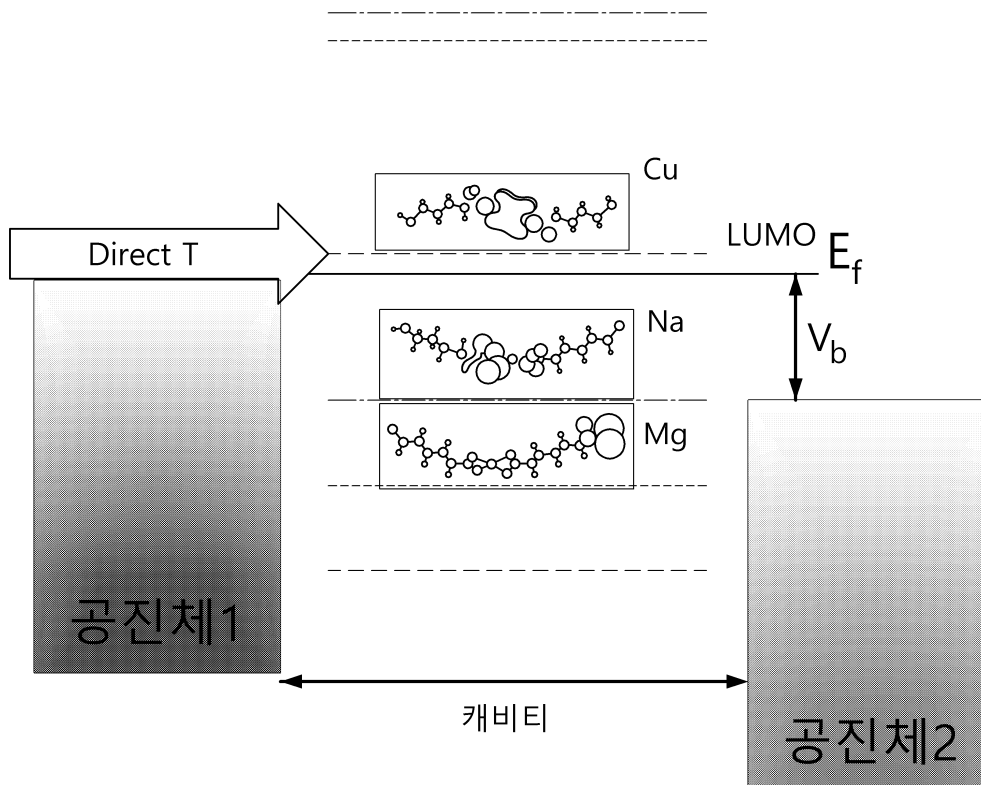
도면3



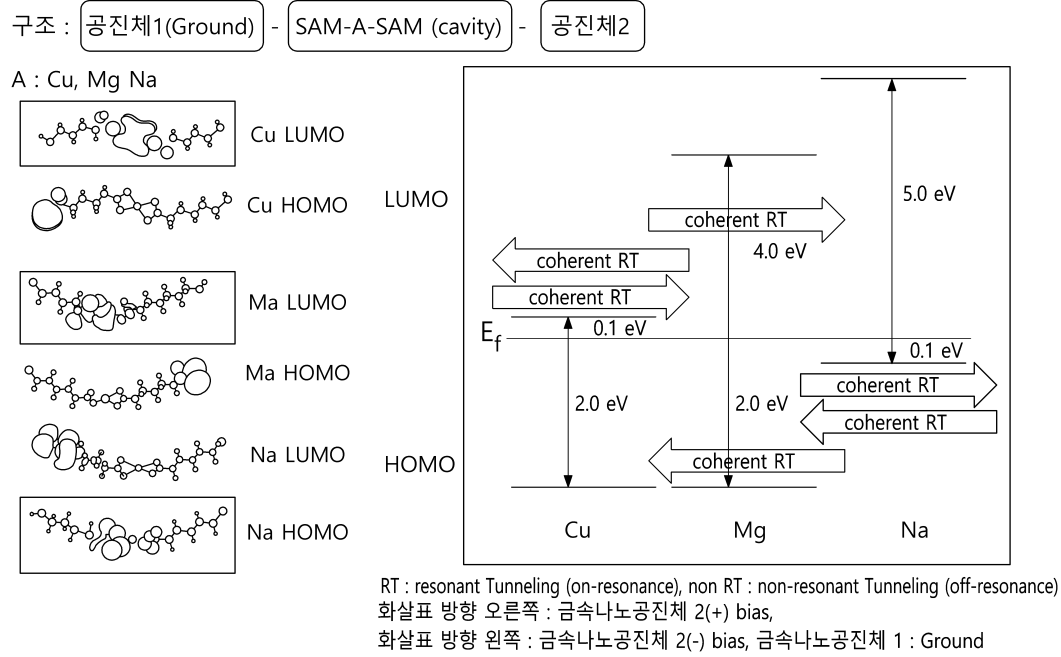
도면4



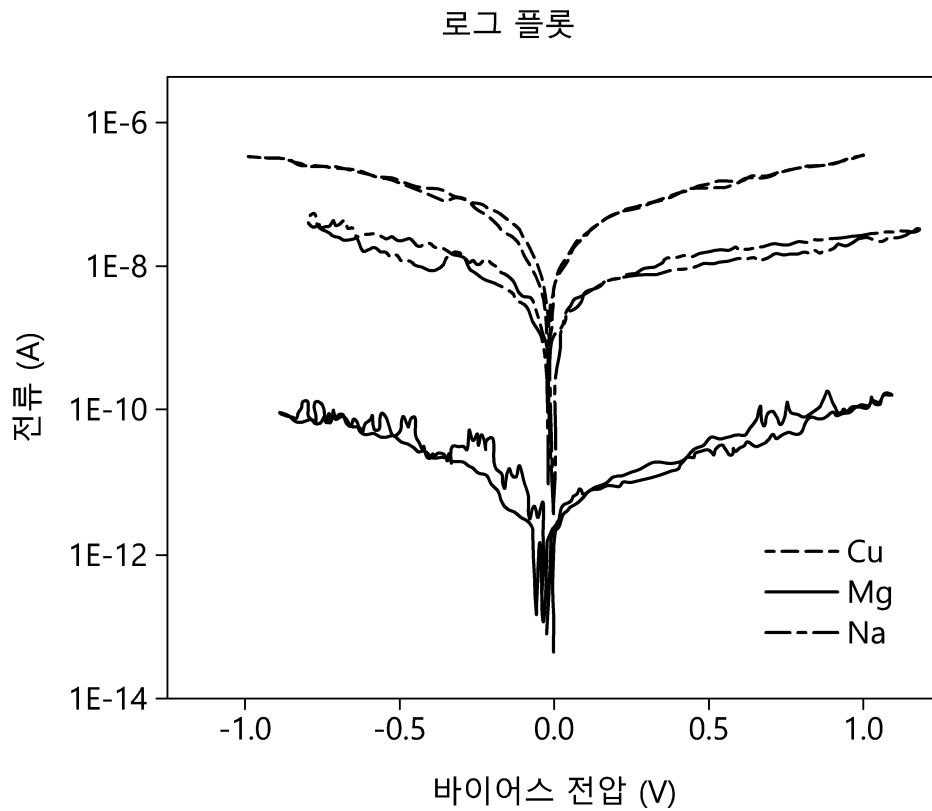
도면5



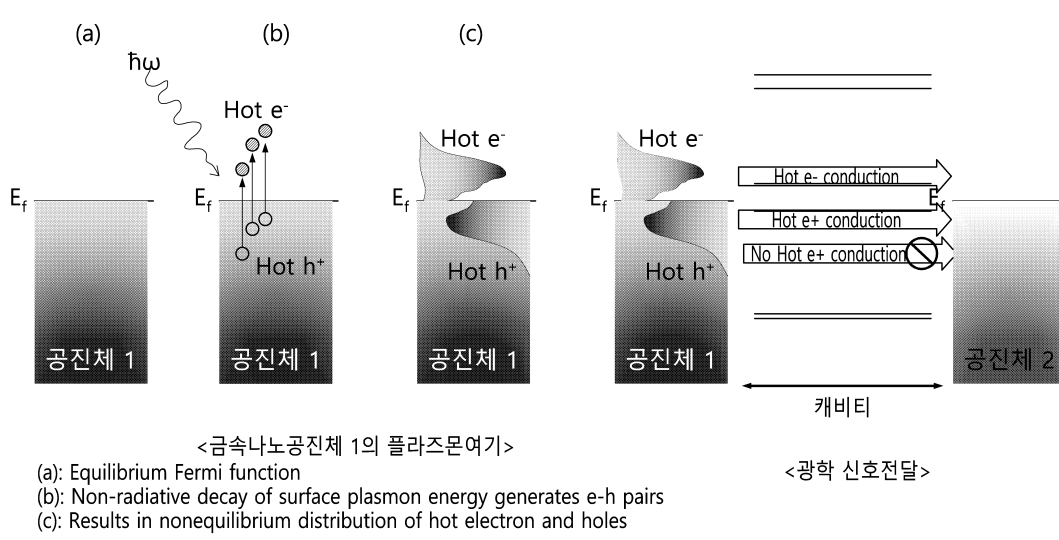
도면6



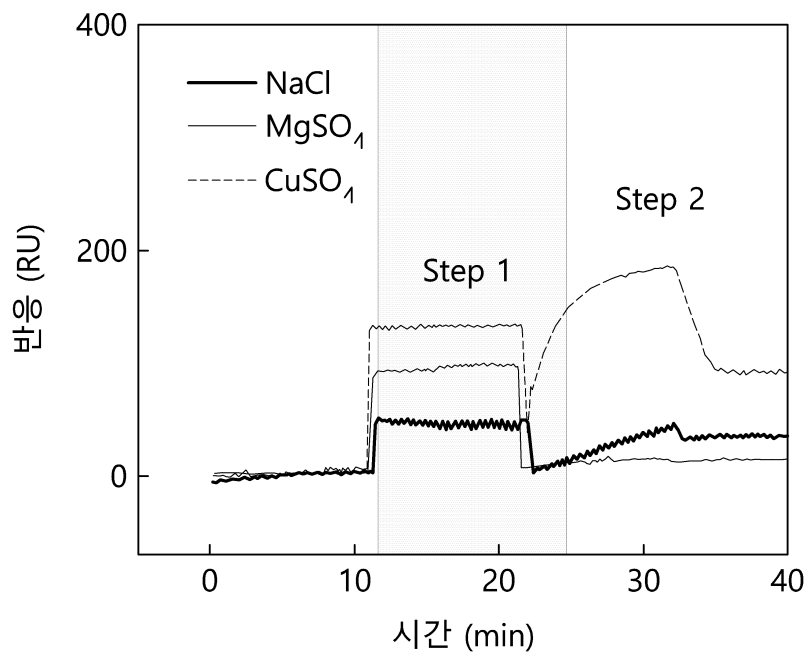
도면7



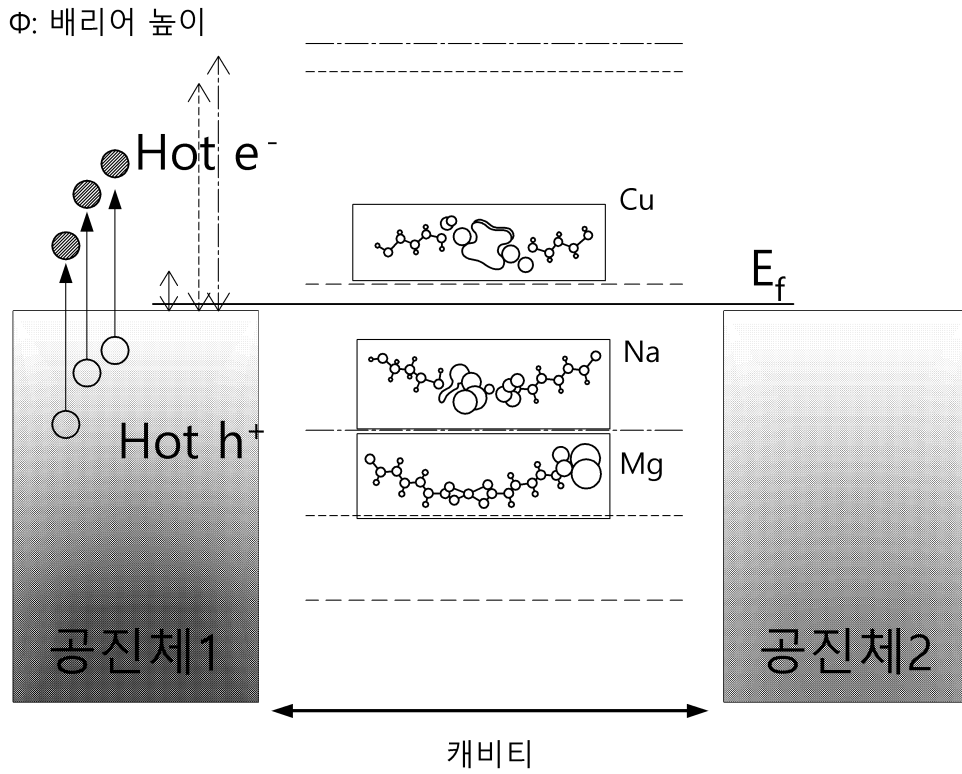
도면8



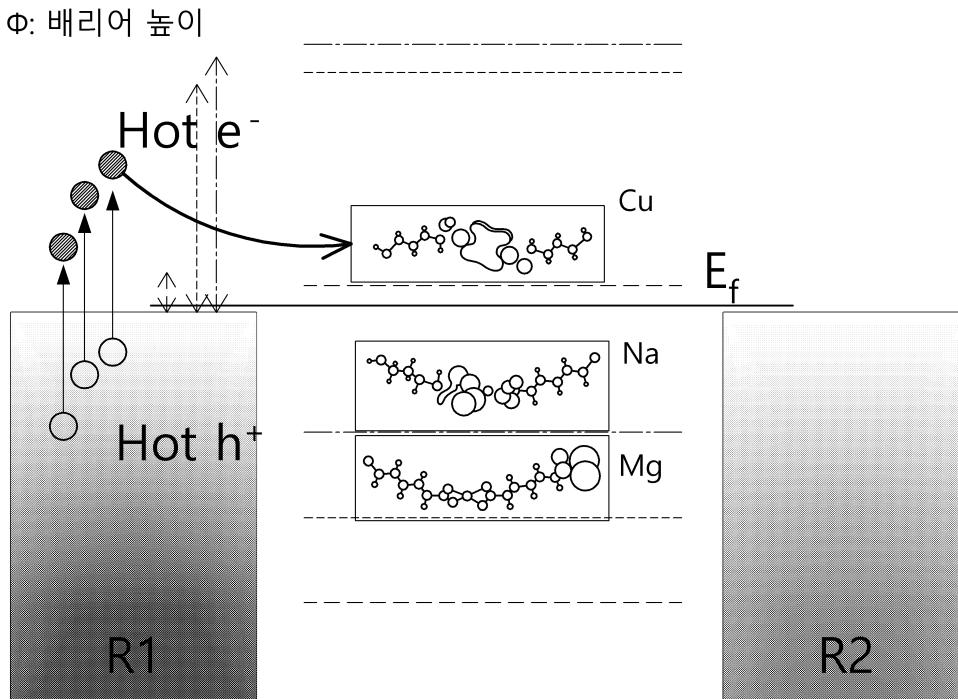
도면9



도면10

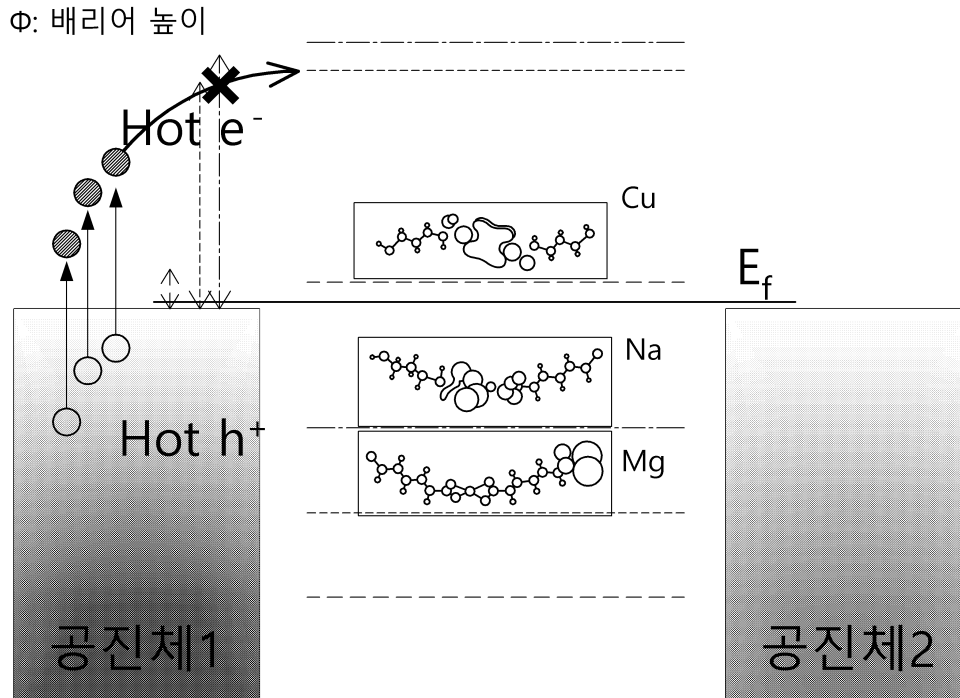


도면11



구리 매개 광학 터널링 시스템 (Cu-mediated optical tunneling system)

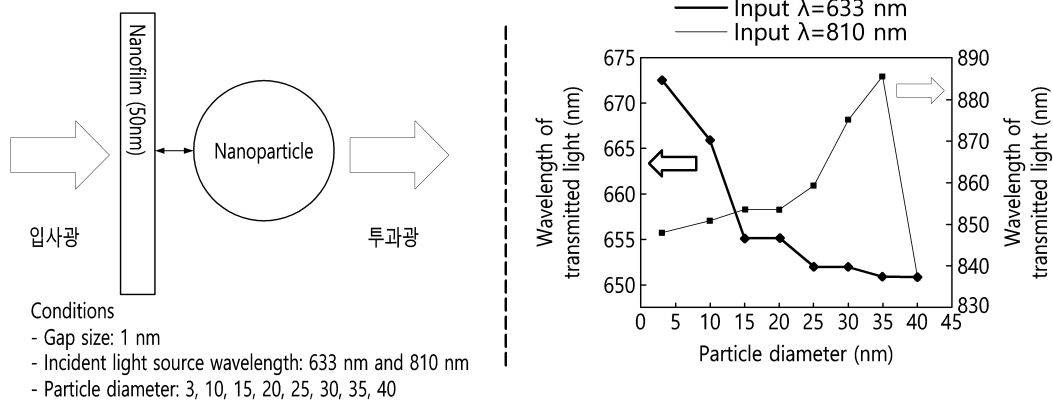
도면12



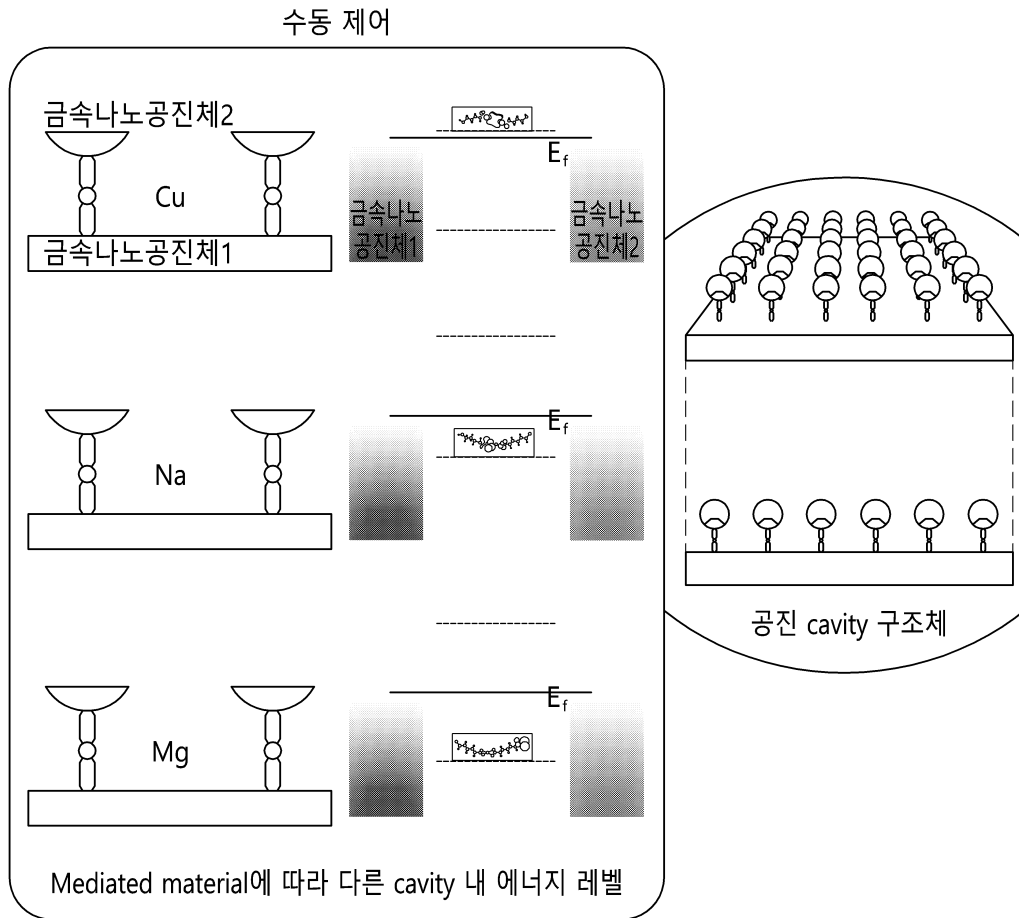
마그네슘 매개 광학 터널링 시스템 (Mg-mediated optical tunneling system)

도면13

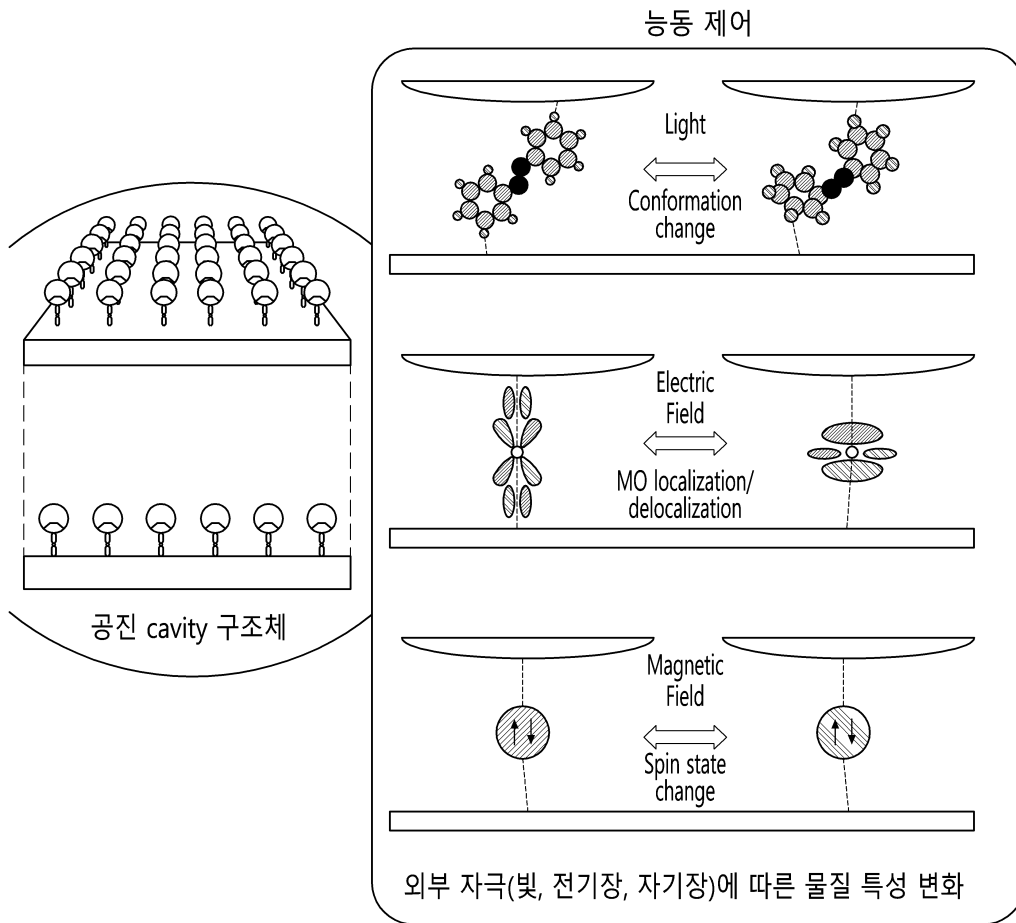
커플링된 파티클 크기에 따른 광학 주파수 유지성



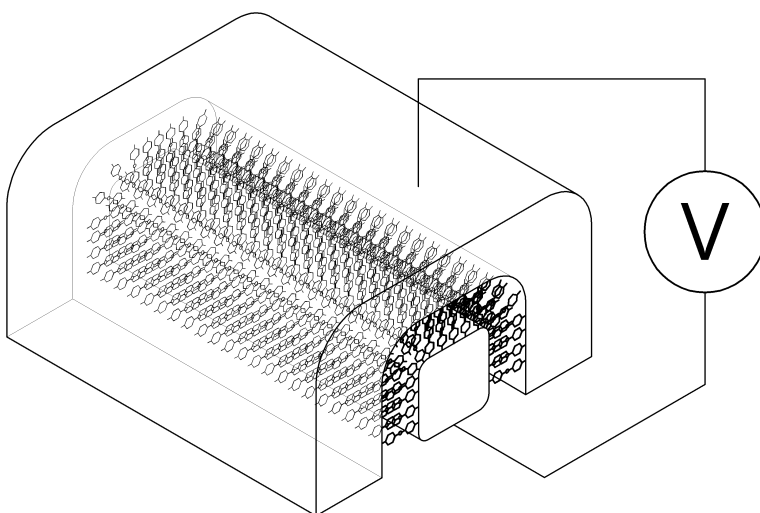
도면14



도면15



도면16



도면17

