(19) 대한민국특허청(KR)
(12) 공개특허공보(A)

(11) 공개번호 10-2023-0000806
(43) 공개일자 2023년01월03일

(51) 국제특허분류(Int. Cl.)
G02B 6/122 (2006.01) *G02B 6/12* (2022.01)
(52) CPC특허분류
G02B 6/1225 (2013.01)
G02B 2006/12035 (2013.01)
(21) 출원번호 10-2021-0083389
(22) 출원일자 2021년06월25일
심사청구일자 2021년06월25일

(71) 출원인
고려대학교 산학협력단
서울특별시 성북구 안암로 145, 고려대학교 (안암동5가)
(72) 발명자
박홍규
서울특별시 서초구 신반포로 270, 133동 2003호(반포동, 반포자이아파트)
소재필
경기도 하남시 하남유니온로 70, 105동 402호(신장동, 하남유니온시티에일린의뜰)
정광용
강원도 원주시 봉화서부로 11, 110동 1701호(단계동, 원주봉화산푸르지오아파트)
(74) 대리인
특허법인 천지

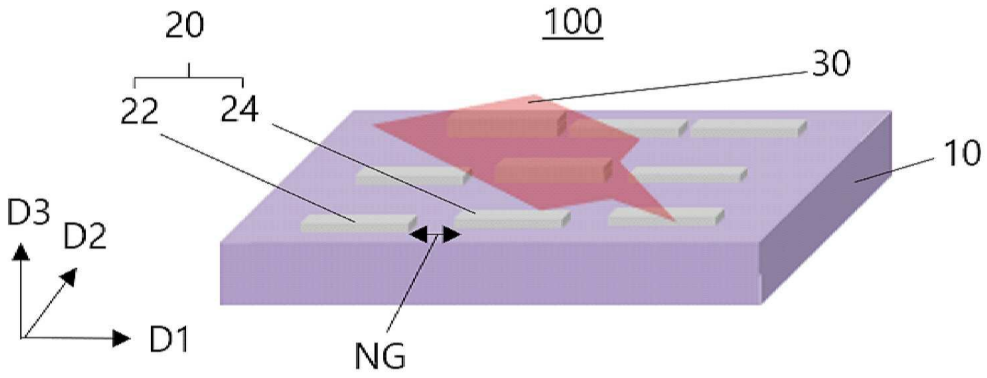
전체 청구항 수 : 총 15 항

(54) 발명의 명칭 **단일 광자를 제어하는 나노구조체 및 이를 포함하는 광소자 어셈블리**

(57) 요 약

단일 광자원의 위치 및 편광 방향을 모두 제어하는 단일 광자를 제어하는 나노구조체가 제공된다. 본 발명의 일 실시예는, 기판 및 상기 기판 상에, 서로 이격되어 배치된 제1 절연막과 제2 절연막을 구비하는 적어도 하나 이상의 절연막부를 포함하고, 상기 제1 절연막과 상기 제2 절연막 사이가, 제1 나노갭(nanogap)으로 정의되는 단일 광자를 제어하는 나노구조체이다.

대 표 도 - 도1



(52) CPC특허분류
G02B 2006/12166 (2013.01)
G02B 2207/101 (2013.01)

명 세 서

청구범위

청구항 1

기판;

상기 기판 상에, 서로 이격되어 배치된 제1 절연막과 제2 절연막을 구비하는 적어도 하나 이상의 절연막부; 를 포함하고,

상기 제1 절연막과 상기 제2 절연막 사이가, 제1 나노갭(nanogap)으로 정의되는

단일 광자를 제어하는 나노구조체.

청구항 2

제1항에 있어서,

상기 나노구조체 상에,

단층(monolayer)의 전이금속 디칼코게나이드(transition metal dichalcogenide; TMDC)가 배치되는

단일 광자를 제어하는 나노구조체.

청구항 3

제2항에 있어서,

상기 전이금속 디칼코게나이드는,

WSe_2, WS_2, $MoSe_2$, MoS_2, $MoTe_2$ 및 이들의 조합으로 이루어진 군에서 선택된 어느 하나를 포함하는

단일 광자를 제어하는 나노구조체.

청구항 4

제2항에 있어서,

상기 단층의 전이금속 디칼코게나이드는 상기 제1 나노갭을 덮는

단일 광자를 제어하는 나노구조체.

청구항 5

제1항에 있어서,

상기 제1 절연막과 상기 제2 절연막은 제1 방향으로 이격되는,

단일 광자를 제어하는 나노구조체.

청구항 6

제5항에 있어서,

상기 제1 방향으로,

상기 제1 나노갭의 폭은 90 nm(나노미터) 미만인

단일 광자를 제어하는 나노구조체.

청구항 7

제6항에 있어서,

상기 단일 광자는,

상기 제1 나노갭에서 상기 제1 방향으로 편광되는

단일 광자를 제어하는 나노구조체.

청구항 8

제5항에 있어서,

상기 제1 방향으로,

상기 제1 나노갭의 폭은 90 nm(나노미터) 이상인

단일 광자를 제어하는 나노구조체.

청구항 9

제8항에 있어서,

상기 단일 광자는,

상기 제1 나노갭에서 상기 제1 방향과 교차하는 제2 방향으로 편광되는

단일 광자를 제어하는 나노구조체.

청구항 10

제1항에 있어서,

상기 기판은

실리콘, SOI(silicon on insulator), SiO_2/Si 기판(SiO_2/Si substrate), 실리콘게르마늄, 안티몬화 인듐, 납 텔루르 화합물, 인듐비소, 인듐 인화물, 갈륨 비소, 안티몬화 갈륨 및 이들의 조합으로 이루어진 군에서 선택된 어느 하나인

단일 광자를 제어하는 나노구조체.

청구항 11

제1항에 있어서,

상기 절연막부는, 실리콘질화막 또는 실리콘산질화막인

단일 광자를 제어하는 나노구조체.

청구항 12

단일 광자를 제어하는 나노구조체의 제조방법으로서,

기판 상에, 서로 이격된 제1 절연막과 제2 절연막을 구비하는 적어도 하나의 절연막부를 형성하는 단계; 및

상기 나노구조체 상에, 스탬핑 방법(stamping method)으로 단층의 전이금속 디칼코게나이드를 전사하는 단계;를 포함하고,

상기 제1 절연막과 상기 제2 절연막 사이가 제1 나노갭으로 정의되는

단일 광자를 제어하는 나노구조체의 제조방법.

청구항 13

제12항에 있어서,

상기 스탬핑 방법은, 폴리디메틸실록산 스탬프(polydimethylsiloxane stamp)로 전사하는 방법인 단일 광자를 제어하는 나노구조체의 제조방법.

청구항 14

제12항에 있어서,

상기 제1 나노갭에서, 상기 단층의 전이금속 디칼코게나이드가 상기 스탬핑 방법에 의해 스트레인을 인가받는 단일 광자를 제어하는 나노구조체의 제조방법.

청구항 15

제1항 내지 제11항 중 어느 한 항에 따른 단일 광자를 제어하는 나노구조체; 및

상기 단일 광자를 제어하는 나노구조체 상에 배치된 광결정 공진기(photonic crystal resonator); 를 포함하는 광소자 어셈블리.

발명의 설명

기 술 분 야

[0001] 본 발명은 단일 광자를 제어하는 나노구조체 및 이를 포함하는 광소자 어셈블리에 관한 것으로, 보다 구체적으로 단일 광자의 위치 및 편광 방향을 모두 제어할 수 있는 단일 광자를 제어하는 나노구조체 및 이를 포함하는 광소자 어셈블리에 관한 것이다.

배 경 기 술

[0002] 기존의 광통신 기술에서는 발신자와 수신자가 정보를 주고받는 과정에서 정보를 전달하는 기본 단위인 광자가 매우 많아 도청자가 정보를 탈취하여도 발신자와 수신자는 이를 감지하지 못해 보안에 매우 취약한 문제점이 있었다.

[0003] 이러한 문제점을 해결하기 위해, 광자의 개수를 줄여 한 번에 빛 알맹이를 하나씩 방출하는 단일 광자를 이용한 통신 기술이 개발되어 정보 탈취 시도 시 즉각 이를 감지하여 정보를 보호하고자 하는 연구가 시작되었다. 상기 단일 광자는 양자 암호 및 양자 정보 처리 기술에 있어서 핵심이 되는 기본 소자이다.

[0004] 단일 광자를 이용한 통신 기술 연구의 일환으로, 2차원 물질에 있는 자연적 원자 결함에 의해 단일 광자가 생성됨을 발견한 사례가 다수 문헌에서 보고되었다. 하지만 2차원 물질은 광 방출 효율이 높고 외부 구조와 결합시키기 유리한 장점을 갖고 있지만, 단일 광자의 위치 및 편광 방향을 제어하기 매우 어려운 문제점이 있었다. 이러한 문제점을 해결하기 위해, 단일 광자의 위치를 제어하기 위해, 2차원 물질에 인공적인 변형을 가해 2차원 물질의 결함을 형성하여, 단일 광자의 위치를 제어하기 위한 연구가 진행되었다.

[0005] 예를 들어, 비특허문헌 1(S.Kumar et al., *Nano Lett.*, 15, 7567-7573)은 기판 패터닝에 의해 생성된 변형 구배가 단층 및 이중층의 WSe_2에 공간적 및 스펙트럼적으로 분리된 양자 방출기를 생성하는 점을 단순히 개시할 뿐, 2차원 반도체 물질에 가해지는 국소 스트레인의 분포를 제어하여 단일 광자의 위치 및 편광 방향을 모두 제어할 수 있는 나노구조체를 전혀 개시 또는 암시하지 못하고 있고, 상기 나노구조체를 광결정 공진기와 결합하여 과단일 광자원의 방출 효율을 높여주는 기술적 과제를 전혀 개시하지 못하고 있다.

[0006] 비특허문헌 2(A. Branny et al., *Nat. Comm.*, 8:15053)도 마찬가지로, 스트레인을 2차원 반도체 물질에 인가하여 단일 광자의 위치를 제어하는 기술적 과제를 개시하였지만, 2차원 반도체 물질에 가해지는 국소 스트레인의 분포를 제어하여 단일 광자의 편광 방향을 제어할 수 있는 기술적 과제를 전혀 개시하지 못하고 있고, 단일 광자원의 위치 및 편광 방향을 제어할 수 있는 나노구조체를 광결정 공진기와 결합하여 단일 광자원의 방출 효율을 높이는 점을 전혀 개시하지 못하고 있다.

[0007] 비특허문헌 3(J. Kern et al., *Adv. Mater.*, 28, 7101)은 서로 다른 2개의 금 나노로드(gold nanorod) 사이에 정의되는 나노갭에 단층의 WSe_2를 배치시켜 단일 광자의 위치를 제어하는 점을 단순히 개시할 뿐, 2차원 반도체 물질에 가해지는 국소 스트레인의 분포를 제어하여 단일 광자의 위치 및 편광 방향을 모두 제어할 수 있는 나노구조체를 전혀 개시 또는 암시하지 못하고 있고, 상기 나노구조체를 광결정 공진기와 결합하여 단일 광자원의 방출 효율을 높이는 점을 전혀 개시하지 못하고 있다.

[0008] 즉, 비특허문헌 1 내지 3은 모두 단일 광자의 편광 방향을 제어할 수 있는 것까지는 나아가지 못하는 문제점이 있었다. 본 발명자는 거듭된 연구 끝에, 세계 최초로 단일 광자의 위치 및 편광 방향을 모두 제어할 수 있는 나노구조체를 발명하였고, 상기 나노구조체 상에 광결정 공진기를 배치시켜 단일 광자에서 나온 빛을 증폭시킬 수 있는 광소자 어셈블리까지 발명의 범위를 확장하였다.

선행기술문헌

비특허문헌

[0009] (비특허문헌 0001) S.Kumar et al., Nano Lett., 15, 7567-7573 (2015.10.19.)

(비특허문헌 0002) A. Branny et al., Nat. Comm., 8:15053 (2017.05.22.)

(비특허문헌 0003) J. Kern et al., Adv. Mater., 28, 7101 (2016.06.15.)

발명의 내용

해결하려는 과제

[0010] 본 발명의 목적은 상기 문제점을 해결하기 위해, 전이금속 디칼코게나이드에 스트레인을 가할 수 있는, 제1 나노갭(nanogap)을 원하는 위치에 제작하여 단일 광자의 위치 및 편광 방향을 모두 제어할 수 있는, 단일 광자를 제어하는 나노구조체를 제공하는 것이다.

[0011] 본 발명의 다른 목적은, 단층의 전이금속 디칼코게나이드를 나노구조체 상에 전사할 때, 종래의 용액에 기초한 전사 방법에서 벗어나 스탬핑 방법(stamping method)을 사용함으로써, 단층의 전이금속 디칼코게나이드가 국소 스트레인을 받을 수 있는 단일 광자를 제어하는 나노구조체의 제조방법을 제공하는 것이다.

[0012] 본 발명의 또 다른 목적은, 상기 단일 광자를 제어하는 나노구조체 상에 광결정 공진기를 결합하여 단일 광자의 특성이 유지되면서 특정 파장의 빛을 증폭시켜 단일 광자원의 방출 효율을 높일 수 있는 광소자 어셈블리를 제공하는 것이다.

[0013] 본 발명의 목적들은 이상에서 언급한 목적으로 제한되지 않으며, 언급되지 않은 본 발명의 다른 목적 및 장점들은 하기의 설명에 의해서 이해될 수 있고, 본 발명의 실시예에 의해 보다 분명하게 이해될 것이다. 또한, 본 발명의 목적 및 장점들은 청구범위에 나타낸 수단 및 그 조합에 의해 실현될 수 있음을 쉽게 알 수 있을 것이다.

과제의 해결 수단

[0014] 상기 목적을 달성하기 위한 본 발명의 일 실시예는, 기판, 상기 기판 상에, 서로 이격되어 배치된 제1 절연막과 제2 절연막을 구비하는 적어도 하나 이상의 절연막부를 포함하고, 상기 제1 절연막과 상기 제2 절연막 사이가, 제1 나노갭(nanogap)으로 정의되는 단일 광자를 제어하는 나노구조체이다.

[0015] 상기 목적을 달성하기 위한 본 발명의 다른 실시예는, 단일 광자를 제어하는 나노구조체의 제조방법으로서, 기판 상에, 서로 이격된 제1 절연막과 제2 절연막을 구비하는 적어도 하나의 절연막부를 형성하는 단계 및 상기 나노구조체 상에, 스탬핑 방법(stamping method)으로 단층의 전이금속 디칼코게나이드를 전사하는 단계를 포함하고, 상기 제1 절연막과 상기 제2 절연막 사이가 제1 나노갭으로 정의되는 단일 광자를 제어하는 나노구조체의 제조방법이다.

[0016] 상기 목적을 달성하기 위한 본 발명의 또 다른 실시예는, 상기 단일 광자를 제어하는 나노구조체, 상기 단일 광자를 제어하는 나노구조체 상에 배치된 광결정 공진기(photonic crystal resonator)를 포함하는 광소자 어셈블리이다.

발명의 효과

[0017] 본 발명에 따르면, 단일 광자를 제어하는 나노구조체를 통해 원하는 위치에 국소 스트레인을 가하여 단일 광자의 생성 위치를 제어할 수 있고, 나노갭의 폭에 따라 달라지는 국소 스트레인의 분포에 따라 단일 광자에서 방출되는 빛의 편광 방향을 제어할 수 있다. 이로 인해 광결정 공진기와 같은 외부 광구조와 쉽게 결합할 수 있어 단일 광자원을 이용한 집적 광소자를 개발하는데 있어 핵심적인 수단을 제시하였을 뿐만 아니라, 양자 암호 통

신 분야에 널리 응용될 수 있는 초석을 마련하였다.

[0018] 상술한 효과와 더불어 본 발명의 구체적인 효과는 이하 발명을 실시하기 위한 구체적인 내용을 설명하면서 함께 기술한다.

도면의 간단한 설명

[0019] 도 1은 본 발명의 일 실시예에 따른 단일 광자를 제어하는 나노구조체를 나타낸 도면이다.

도 2는 단층의 WSe_2에 제1 나노갭에 의해 스트레인이 인가되어 단일 광자의 위치가 조절되는 것을 나타낸 모식도이다.

도 3은 단층의 WSe_2가 제1 나노갭의 폭에 따라 단일 광자의 편광 방향이 조절되는 것을 나타낸 모식도이다.

도 4는 본 발명의 일 실시예에 따른 나노구조체의 제조방법을 나타낸 도면이다.

도 5는 본 발명의 일 실시예에 따른 광소자 어셈블리를 나타낸 도면이다.

도 6은 제1 나노갭에서 단일 광자가 방출되는 것을 나타낸 광발광 세기의 mapping(a), 영역 및 파장에 따른 광발광 세기(b), 광자 상관관계 함수(c)를 통해 원하는 위치에 단일 광자원을 배치시킬 수 있음을 나타낸 도면이다.

도 7은 제1 나노갭의 폭의 크기에 따라서 단일 광자의 편광 방향이 달라지는 것을 나타내는 도면이다. 공초점 레이저 주사현미경(Confocal microscopy)을 이용하여 광발광 세기 맵(PL intensity map)을 측정하였다.

도 8은, 압력이 가해진 PDMS의 형태를 유한 요소 방법(Finite-element method)을 사용하여 시뮬레이션으로 나타낸 것이다.

도 9는 본 발명의 일 실시예에 따른 광소자 어셈블리에서 캐비티의 어레이를 나타낸 도면이다.

도 10은 본 발명의 일 실시예에 따른 광소자 어셈블리의 특성을 증명하는 실험들을 나타낸 것이다.

발명을 실시하기 위한 구체적인 내용

[0020] 이하, 본 발명이 속하는 기술 분야에서 통상의 지식을 가진 자가 용이하게 실시할 수 있도록 본 발명의 각 구성을 보다 상세히 설명하나, 이는 하나의 예시에 불과할 뿐, 본 발명의 권리범위가 다음 내용에 의해 제한되지 아니한다.

[0021] 본 발명의 일 실시예는 기판, 상기 기판 상에, 서로 이격되어 배치된 제1 절연막과 제2 절연막을 구비하는 적어도 하나 이상의 절연막부를 포함하고, 상기 제1 절연막과 상기 제2 절연막 사이가, 제1 나노갭(nanogap)으로 정의되는 단일 광자를 제어하는 나노구조체이다.

[0022] 이하에서는, 도면을 참고하여 본 발명의 구성을 보다 상세히 설명한다.

[0024] **1. 단일 광자를 제어하는 나노구조체(100) 및 그의 제조방법**

[0025] 도 1은 본 발명의 일 실시예에 따른 단일 광자를 제어하는 나노구조체를 나타낸 도면이다.

[0026] 도 1을 참고하면, 본 발명에 따른 단일 광자를 제어하는 나노구조체(100)는 기판(10) 및 절연막부(20)를 포함할 수 있다.

[0027] 구체적으로, 본 발명에 따른 단일 광자를 제어하는 나노구조체(100)는 상기 기판(10) 상에 서로 이격되어 배치된 제1 절연막(22)과 제2 절연막(24)을 구비하는 적어도 하나 이상의 절연막부(20)를 포함할 수 있다. 상기 제1 절연막(22)과 상기 제2 절연막(24)은 막대 구조체(rod structure)에 해당할 수 있다. 본 명세서에서 막대 구조체는 막대 형상의 나노구조체로 정의된다.

[0028] 본 발명에 따른 제1 나노갭(NG)은 상기 제1 절연막(22)과 상기 제2 절연막(24) 사이에 있는 구멍(hole) 또는 트렌치(trench)로 정의될 수 있다. 구체적으로, 상기 제1 나노갭(NG)은 상기 기판(10), 상기 제1 절연막(22) 및 상기 제2 절연막이 정의하는 트렌치에 해당할 수 있다. 다만 본 발명의 기술사상이 상기 구멍 또는 트렌치의 형상에 제한되는 것은 아니고, 식각 방법에 따라 다양한 형상이 적용될 수 있다.

[0029] 본 발명에 따른 단층의 전이금속 디칼코게나이드(30)는 상기 단일 광자를 제어하는 나노구조체(100) 상에 배치

될 수 있다.

[0030] 구체적으로, 상기 전이금속 디칼코게나이드는, WSe_2, WS_2, $MoSe_2$, MoS_2, $MoTe_2$ 및 이들의 조합으로 이루어진 군에서 선택된 어느 하나를 포함할 수 있다. 다만 본 발명의 기술사상이 상기 전이금속 디칼코게나이드의 종류에 제한되는 것은 아니고, 원자 수준으로 얇은 2차원 반도체 물질로 스트레인(strain)이 가해지면 단일 광자를 생성할 수 있는 반도체 물질이면 모두 적용될 수 있다.

[0031] 구체적으로, 상기 단층의 전이금속 디칼코게나이드(30)는 상기 제1 나노갭(NG)을 덮을 수 있다. 상기 단층의 전이금속 디칼코게나이드(30)는 상기 제1 절연막(22)의 상면의 일부, 상기 제2 절연막(24)의 상면의 일부 및 상기 제1 나노갭(NG)을 덮을 수 있다.

[0032] 본 명세서에서 제1 방향(D1)은 상기 제1 절연막(22)과 제2 절연막(24)이 이격되는 방향으로 정의되고, 제2 방향(D2)은 상기 제1 방향(D1)과 교차하는 방향으로 정의되고, 제3 방향(D3)은 상기 제1 방향(D1) 및 상기 제2 방향(D2)과 교차하는 방향으로 정의된다. 예를 들어, 제1 내지 제3 방향(D1, D2, D3)은 서로 수직 관계에 해당할 수 있고, 제3 방향(D3)은 막의 두께 방향으로 정의된다.

[0033] 상기 제1 절연막(22)과 상기 제2 절연막(24)은 상기 제1 방향(D1)으로 이격될 수 있다. 달리 설명하면, 상기 제1 방향(D1)은 상기 제1 절연막(22)과 상기 제2 절연막(24)이 길게 연장되는 방향에 해당할 수 있다.

[0034] 본 발명의 일 실시예에 따르면, 상기 제1 방향(D1)으로, 상기 제1 나노갭(NG)의 폭은 90nm(나노미터) 미만에 해당할 수 있고, 바람직하게는 10 내지 90nm(나노미터) 미만에 해당할 수 있고, 더욱 바람직하게는 60 내지 90nm 미만에 해당할 수 있다.

[0035] 상기 제1 방향(D1)으로 상기 제1 나노갭(NG)의 폭이 상기 수치 범위 내를 만족할 경우, 2차원 반도체 물질인 단층의 전이금속 디칼코게나이드(30)에 국소 스트레인(local strain)이 가해질 수 있다. 구체적으로, 상기 제1 나노갭(NG)에서 상기 단층의 전이금속 디칼코게나이드(30)에 가해지는 스트레인은 0.20 내지 0.40%에 해당할 수 있고, 바람직하게는 0.22 내지 0.36%, 더욱 바람직하게는 0.26 내지 0.34%에 해당할 수 있다.

[0036] 한편, 상기 단층의 전이금속 디칼코게나이드(30)가 상기 기판(10)에 배치될 경우에는 스트레인이 0%이고, 상기 절연막부(20)에 배치될 경우에는 스트레인이 0.10 내지 0.20%, 바람직하게는 0.14 내지 0.18%, 더욱 바람직하게는 0.16 내지 0.17%에 해당할 수 있다. 즉, 상기 단층의 전이금속 디칼코게나이드(30)는 기판(10)과 절연막부(20) 및 제1 나노갭(NG)에 따라 가해지는 국소 스트레인을 서로 달리 받음으로써, 단일 광자의 편광 방향이 조절될 수 있다.

[0037] 구체적으로, 본 발명에 따른 단일 광자의 편광 방향은, 제1 방향(D1)으로, 상기 제1 나노갭(NG)의 폭이 90nm(나노미터) 미만일 때, 상기 제1 방향(D1)으로 편광될 수 있다.

[0038] 본 발명의 다른 실시예에 따르면, 상기 제1 방향(D1)으로 상기 제1 나노갭(NG)의 폭은 90 nm(나노미터) 이상에 해당할 수 있고, 바람직하게는 90 내지 150 nm(나노미터), 더욱 바람직하게는 90 내지 130nm(나노미터)에 해당할 수 있다. 상기 제1 방향(D1)으로 상기 제1 나노갭(NG)의 폭이 상기 수치 범위 내를 만족할 경우, 2차원 반도체 물질인 단층의 전이금속 디칼코게나이드(30)에 국소 스트레인(local strain)이 가해질 수 있다. 구체적으로, 상기 제1 나노갭(NG)에서 상기 단층의 전이금속 디칼코게나이드(30)에 가해지는 스트레인은 0.20 내지 0.40%에 해당할 수 있고, 바람직하게는 0.22 내지 0.34%, 더욱 바람직하게는 0.24 내지 0.29%에 해당할 수 있다.

[0039] 상기 제1 방향(D1)으로 상기 제1 나노갭(NG)의 폭이 90 nm(나노미터) 이상일 때, 본 발명에 따른 단일 광자는 상기 제1 나노갭(NG)에서 상기 제1 방향(D1)과 교차하는 제2 방향(D2)으로 편광될 수 있다. 예를 들어, 상기 제2 방향(D2)은 상기 제1 방향(D1)과 수직 방향에 해당할 수 있다.

[0040] 본 발명에 따른 기판(10)은, 실리콘, SOI(silicon on insulator), SiO_2/Si 기판(SiO_2/Si substrate), 실리콘게르마늄, 안티몬화 인듐, 납 텔루르 화합물, 인듐비소, 인듐 인화물, 갈륨 비소, 안티몬화 갈륨 및 이들의 조합으로 이루어진 군에서 선택된 어느 하나일 수 있다.

[0041] 본 발명에 따른 기판(10)의 두께는 0.5 내지 1.5㎛(마이크로미터)일 수 있고, 바람직하게는 1.0 내지 1.5㎛(마이크로미터)일 수 있다. 다만 본 발명의 기술사상이 기판의 두께 범위에 제한되는 것은 아니고 다양한 기판의 두께가 적용될 수 있다.

[0042] 본 발명에 따른 절연막부(20)는 실리콘질화막 또는 실리콘산질화막일 수 있다. 구체적으로, 상기 제1 절연막(22) 및 상기 제2 절연막(24)은 실리콘질화막 또는 실리콘산질화막일 수 있다.

[0043] 본 발명에 따른 제1 절연막(22)의 두께는 100 내지 200 nm(나노미터)일 수 있고, 바람직하게는 130 내지 170 nm(나노미터), 더욱 바람직하게는 140 내지 160 nm(나노미터)일 수 있다.

[0044] 본 발명에 따른 제2 절연막(24)의 두께는 100 내지 200 nm(나노미터)일 수 있고, 바람직하게는 130 내지 170 nm(나노미터), 더욱 바람직하게는 140 내지 160 nm(나노미터)일 수 있다. 상기 제2 절연막(24)의 두께는 상기 제1 절연막(22)의 두께와 동일하거나 상이할 수 있다. 하지만 본 발명에 따른 단일 광자를 제어하는 나노구조체의 제조공정 상, 상기 제1 절연막(22)의 두께와 상기 제2 절연막(24)의 두께는 동일한 것이 바람직하다.

[0045] 본 발명의 일 실시예에 따르면, 상기 제1 절연막(22)과 상기 제2 절연막(24)은 서로 구성이 동일하거나 상이할 수 있지만, 본 발명에 따른 단일 광자를 제어하는 나노구조체의 제조 공정 상 상기 제1 절연막(22)과 상기 제2 절연막(24)의 각각 구성은 동일함이 바람직하다.

[0046] 도 2는 단층의 WSe_2에 제1 나노갭에 의해 스트레인이 인가되어 단일 광자의 위치가 조절되는 것을 나타낸 모식도이다. 전술한 부분과 반복된 설명은 간략히 설명하거나 생략한다.

[0047] 도 2를 참고하면, 상기 단층의 전이금속 디칼코게나이드(30)에 국소적으로 스트레인이 인가될 경우, 강한 양자 구속 효과(quantum confinement effect)에 의해 원하는 위치에 단일 광자가 생성될 수 있다. 구체적으로, 반도체 나노 결정의 경우 입자의 반지름이 보어 반지름보다 작아질 경우, 외부 에너지에 의해 여기된 전자가 정공과 약한 결합을 형성하는데, 이러한 전자와 전공의 결합 상태를 엑시톤(exciton)으로 칭한다. 따라서, 본 발명에 따르면 원하는 위치에서 단층의 전이금속 디칼코게나이드(30)를 통해 단일 광자를 생성할 수 있다.

[0048] 도 3은 단층의 WSe_2가 제1 나노갭의 폭에 따라 단일 광자의 편광 방향이 조절되는 것을 나타낸 모식도이다.

[0049] 도 3을 참고하면, 제1 나노갭(NG)이 좁을 경우, 단일 광자는 제1 방향(D1)으로 편광될 수 있고, 제1 나노갭(NG)이 상대적으로 넓을 경우, 단일 광자의 편광 방향이 상기 제1 방향(D1)과 교차하는 제2 방향(D2)일 수 있다. 예를 들어, 상기 제2 방향(D2)은 상기 제1 방향(D1)과 수직 관계이다.

[0050] 도 4는 본 발명의 일 실시예에 따른 단일 광자를 제어하는 나노구조체의 제조방법을 나타낸 도면이다.

[0051] 도 4를 참고하면, 본 발명의 다른 실시예는, 단일 광자를 제어하는 나노구조체의 제조방법으로서, 기판(10) 상에, 서로 이격된 제1 절연막(22)과 제2 절연막(24)을 구비하는 적어도 하나의 절연막부(20)를 형성하는 단계 및 상기 단일 광자를 제어하는 나노구조체(100) 상에, 스탬핑 방법(stamping method)으로 단층의 전이금속 디칼코게나이드(30)를 전사하는 단계를 포함하고, 상기 제1 절연막과 상기 제2 절연막 사이가 제1 나노갭(NG)으로 정의되는 단일 광자를 제어하는 나노구조체의 제조방법이다.

[0052] 상기 스탬핑 방법은, 폴리디메틸실록산 스탬프(polydimethylsiloxane stamp)로 전사하는 방법일 수 있다. 상기 폴리디메틸실록산 스탬프는 완전 건조된 상태임이 바람직하다. 종래의 용액에 기초한 전사 방법으로 단층의 전이금속 디칼코게나이드를 나노구조체에 전사할 경우, 단일 광자가 검출되지 않는 문제점이 있었다. 단층의 전이금속 디칼코게나이드에 스트레인이 가해지지 않기 때문이다. 따라서, 본 발명에 따르면 상기와 같은 스탬핑 방법을 이용함으로써, 제1 나노갭을 덮는 단층의 전이금속 디칼코게나이드에 스트레인을 가하여 단일 광자를 확인할 수 있었다. 즉, 상기 제1 나노갭에서, 상기 단층의 전이금속 디칼코게나이드가 상기 스탬핑 방법에 의해 스트레인을 인가받을 수 있다.

[0053] 도 4를 참고하여 더 상세히 설명하면, 본 발명의 또 다른 실시예에 따른 단일 광자를 제어하는 나노구조체의 제조방법은, (S1) 기판(10) 상에 프리절연막(20p)을 형성하는 단계, (S2) 상기 프리절연막(20p) 상에 서로 이격되어 배치된 제1 식각방지막(32a)과 제2 식각방지막(32b)을 구비하는 적어도 하나 이상의 식각방지막부(32)를 형성하는 단계, (S3) 상기 식각방지막부(32)를 이용하여 상기 프리절연막(20p)을 식각하는 단계 및 (S4) 상기 식각방지막부(32)를 제거하는 단계를 포함한다. 전술한 부분과 반복된 설명은 간략히 설명하거나 생략한다.

[0054] 본 발명에 따른 프리절연막(20p)은 실리콘질화막 또는 실리콘산질화막일 수 있다. 구체적으로, 절연막부(20)는 상기 프리절연막(20p)에서 유래된 것으로 상기 식각방지막부(32)에 의해 패터닝된 막에 해당할 수 있다.

[0055] 상기 (S1) 단계에서 상기 프리절연막(20p)을 형성하는 방법으로 물리 기상 증착법(physical vapor deposition), 화학 기상 증착법(chemical vapor deposition) 및 원자층 증착법(atomic layer deposition)으로 이루어진 군에서 선택된 어느 하나의 방법이 이용될 수 있고, 바람직하게는 저압 화상 기상 증착법(low pressure chemical vapor deposition)이 이용될 수 있다.

[0056] 상기 (S2) 단계는, 상기 프리절연막(20p) 상에 식각방지막부(32)를 형성하여 상기 제1 방향(D1)으로 서로 이격

된 제1 식각방지막(32a) 및 상기 제2 식각방지막(32b)을 형성하는 단계일 수 있다.

[0057] 상기 식각방지막부(32)는 상기 프리절연막(20p) 대비 식각률(etch rate)이 낮아 상기 식각방지막부(32)를 마스크로 하여 상기 프리절연막(20p)을 선택적으로 식각할 수 있다. 상기 식각방지막부(32)는 예를 들어, 크롬 마스크(Cr mask)일 수 있다. 다만 본 발명의 기술사상이 이에 제한되는 것은 아니고, 프리절연막보다 식각률이 낮은 물질이 식각방지막부에 적용될 수 있다.

[0058] 본 발명에 따른 식각방지막부(32)의 두께는 10 내지 30nm(나노미터)일 수 있고, 바람직하게는 20 내지 30nm(나노미터)일 수 있다.

[0059] 도 4에 구체적으로 도시되진 않았지만, 상기 (S3) 단계는, 상기 식각방지막부(32) 상에 포토레지스트 막을 형성한 후, 전자빔리소그래피으로 상기 포토레지스트막을 노광하고, 이후 노광된 부분을 현상하여 상기 프리절연막(20p)을 선택적으로 패터닝하는 단계일 수 있다.

[0060] 상기 (S4) 단계는, 상기 식각방지막부(32)를 시약을 이용하여 제거하는 단계일 수 있다. 상기 시약은 바람직하게는 Cr 식각용 시약(Cr etchant)에 해당할 수 있다.

[0061] 전술한 바와 같이, 본 발명에 따른 단일 광자를 제어하는 나노구조체의 제조방법은, (S5) 스탬프(42)를 이용하여 상기 단층의 전이금속 디칼코게나이드(30)를 상기 식각방지막부(32)가 제거된 나노구조체 상에 전사하는 단계를 더 포함할 수 있다.

[0063] **2. 광소자 어셈블리(200)**

[0064] 본 발명의 다른 실시예는, 상기 단일 광자를 제어하는 나노구조체(100)를 포함하는 광소자 어셈블리(200)이다.

[0065] 도 5는 본 발명의 일 실시예에 따른 광소자 어셈블리를 나타낸 도면이다.

[0066] 도 5를 참고하면, 본 발명에 따른 광소자 어셈블리(200)는 상기 단일 광자를 제어하는 나노구조체(100) 및 상기 단일 광자를 제어하는 나노구조체(100) 상에 배치된 광결정 공진기(150)를 포함한다.

[0067] 본 발명에 따른 단일 광자를 제어하는 나노구조체로 단일 광자의 위치 및 편광 방향이 모두 제어됨으로써, 단일 광자를 방출시키는 특성은 그대로 유지된 상태로, 상기 광결정 공진기(photonic crystal resonator)를 이용하여 단일 광자원에서 나온 특정 파장의 빛을 증폭시킬 수 있다.

[0068] 한편, 단일 광자원의 방출 효율을 높여줄 수 있는 광결정 공진기와의 결합 효율을 높이기 위해서는 단일 광자원과 공진기 사이의 상대적인 위치 및 편광 방향을 최대한 일치시키는 것이 필수적이다. 본 발명에 따르면, 단일 광자원의 위치 및 편광 방향이 모두 제어되어 단일 광자의 방출 효율을 극대화할 수 있는 이점이 있다.

[0069] 또한, 본 발명에 따른 단층의 전이금속 디칼코게나이드는 2차원 물질로 두께가 매우 얇기 때문에, 상기 광결정 공진기와 결합하기 용이한 장점이 있다. 따라서, 본 발명에 따르면 양자 암호 통신 분야에서 널리 응용될 수 있는 광소자를 구현할 수 있다.

[0070] 이하, 본 발명이 속하는 기술 분야에서 통상의 지식을 가진 자가 용이하게 실시할 수 있도록 본 발명의 실시예에 대하여 상세히 설명하나, 이는 하나의 예시에 불과할 뿐, 본 발명의 권리범위가 다음 내용에 의해 제한되지 아니한다.

[0072] **[제조예 1: 단일 광자를 제어하는 나노구조체의 제조]**

[0073] 1㎛(마이크로미터) 두께의 SiO_2/Si 기판 웨이퍼 상에, 150 nm(나노미터) 두께의 프리절연막(Si_3N_4)을 형성하였다. 전자빔 리소그래피, 전자빔 증발 및 리프트-오프(lift-off) 공정을 거쳐 20nm(나노미터) 두께의 크롬 마스크(Cr mask)를 상기 프리절연막 상에 형성하였다. 상기 크롬 마스크를 이용하여 반응성 이온 식각 공정으로 상기 프리절연막을 식각하였다. 그 이후, 크롬 마스크를 크롬 식각용 시약(Sigma Aldrich)으로 제거하였다. 크롬 마스크가 제거된 결과물에 단층의 WSe_2를 PDMS(GelPak) 스탬핑 방법으로 전사하여 단일 광자를 제어하는 나노구조체를 제조하였다. 상기 단일 광자를 제어하는 나노구조체는, 서로 이격되는 식각된 프리절연막 사이에 적어도 하나의 제1 나노갭을 포함한다.

[0075] **[실험예 1: 제1 나노갭에서의 단일 광자원의 위치 제어 확인 실험]**

[0076] 도 6은 제1 나노갭에서 단일 광자가 방출되는 것을 나타낸 광발광 세기의 mapping(a), 영역 및 파장에 따른 광발광 세기(b), 광자 상관관계 함수(c)를 통해 원하는 위치에 단일 광자원을 배치시킬 수 있음을 나타낸 도면이

다.

[0077] 도 6(a)는 공초점 레이저 주사현미경(Confocal microscopy)으로 밝은 지점으로 관찰되는 제1 나노갭에서 광발광 세기의 mapping을 나타낸 것이다. 도 6(a)를 참고하면, 제1 나노갭에서 엑시톤 쏠림 현상에 의해 강하게 발광하는 지점들이 생성됨을 알 수 있다.

[0078] 도 6(b)는 제1 나노갭에서만 강한 엑시톤 피크가 나타나는 것을 입증하는 도면이다. 파장에 따른 광발광 세기는 2.3 mW의 파워를 갖는 532 nm continuous-wave laser를 이용하여 에너지를 여기 하였을 때 방출되는 빛을 100 배율 대물렌즈, 분광 격자(grating) 및 charge-coupled device(CCD)를 이용하여 측정되었다.

[0079] 도 6(b)를 참고하면, 단일 광자를 제어하는 나노구조체의 다른 영역과 달리, 오직 제1 나노갭에서 강한 엑시톤 피크가 나타남을 알 수 있고, 구체적으로 광원이 742nm의 파장에서 1nm 이하의 좁은 선폭(linewidth)을 갖는 스펙트럼을 보임을 알 수 있다.

[0080] 제1 나노갭에서와 달리, 제1 영역(Region 1)은 기판을 의미하고, 제2 영역(Region 2)은 막대 구조체를 의미하고, 제3 영역(Region 3) 또한 막대 구조체를 의미한다.

[0081] 도 6(c)는 단일광자원임을 확인하는 광자 상관관계 함수를 측정한 결과를 나타낸 것이다.

[0082] 도 6(c)를 참고하면, 광자 상관관계 함수를 측정한 결과, 지연 시간(delay time)이 0일 때, $g^{2}(0)$이 0.1 미만에 해당하여, 제1 나노갭에 배치된 단층의 전이금속 디칼코게나이드가 단일 광자원이 됨을 알 수 있다.

[0084] **[실험예 2: 단일 광자의 편광 방향 제어 확인 실험]**

[0085] 도 7은 제1 나노갭의 폭의 크기에 따라서 단일 광자의 편광 방향이 달라지는 것을 나타내는 도면이다. 공초점 레이저 주사현미경(Confocal microscopy)을 이용하여 광발광 세기 맵(PL intensity map)을 측정하였다.

[0086] 도 7(a)는 단일 광자의 편광 방향이 수평 방향임을 나타내는 광발광 세기 맵이다. 도 7(b)는, 도 7(a)의 흰색 점선 원으로 표시된 영역에서 단일 광자원을 기준으로 편광판의 각도에 따른 광발광 스펙트럼을 나타낸 도면이다. 선형 편광판을 charge-coupled device(CCD) 앞에 놓고 각도를 돌려가며 도 6에서와 같이 측정한다.

[0087] 도 7(a) 및 7(b)를 참고하면, 제1 방향으로 제1 나노갭의 폭의 크기가 70 nm로 상대적으로 작을 때, 단일 광자의 편광 방향이 제1 방향으로 제어됨을 알 수 있다. 구체적으로, 제1 나노갭에서 방출된 단일 광자를 선형 편광판에 통과시켜 생성된 단일 광자의 편광 방향이 제1 나노갭의 폭의 크기에 따라 제어됨을 실험적으로 확인할 수 있다.

[0088] 도 7(c)는 단일 광자의 편광 방향이 수직 방향임을 나타내는 광발광 세기 맵이다. 도 7(d)는, 도 7(c)의 흰색 점선 원으로 표시된 영역에서 단일 광자원을 기준으로 편광판의 각도에 따른 광발광 스펙트럼을 나타낸 도면이다.

[0089] 도 7(c) 및 7(d)를 참고하면, 제1 나노갭의 폭의 크기가 110 nm로 상대적으로 클 때, 단일 광자의 편광 방향이 제1 방향과 수직된 제2 방향으로 제어됨을 알 수 있다. 구체적으로, 제1 나노갭에서 방출된 단일 광자를 선형 편광판에 통과시켜 생성된 단일 광자의 편광 방향이 제1 나노갭의 폭의 크기에 따라 제어됨을 실험적으로 확인할 수 있다.

[0091] **[실험예 3: 스탬핑 전사 방법에 의한 효과 입증 실험]**

[0092] 도 8은, 압력이 가해진 PDMS의 형태를 유한 요소 방법(Finite-element method)을 사용하여 시뮬레이션으로 나타낸 것이다. 구체적으로, 도 8(a)는 상기 제조예 1에 따른 나노구조체에서 제1 방향(D1)으로 제1 나노갭의 폭이 60nm으로 좁을 때, 상기 제1 방향과 수직된 방향으로 100nm일 때, 도 8(b)는 제1 방향으로 제1 나노갭의 폭이 140nm, 상기 제1 방향과 수직된 방향으로 100nm이다. 도 8(c)는 도 8(a)의 x축(black-line)과 y축(red-line)을 따라 변형(deformation)을 측정한 것이다. 도 8(d)는 도 8(b)의 x축(black-line)과 y축(red-line)을 따라 변형(deformation)을 측정한 것이다.

[0093] 도 8(a) 및 도 8(c)를 참고하면, 제1 방향(D1)으로 제1 나노갭의 폭이 60nm 로 상대적으로 좁을 때, PDMS의 y축으로의 변형이 x축으로의 변형보다 더 크게 나타남을 알 수 있다.

[0094] 도 8(b) 및 도 8(d)를 참고하면, 제1 방향(D1)으로 제1 나노갭의 폭이 140nm로 상대적으로 클 때, PDMS의 x축으로의 변형이 y축으로의 변형보다 더 크게 나타남을 알 수 있다.

[0095] 이를 종합하여 해석하면, PDMS가 전사된 후, 단층의 WSe_2의 형태가 PDMS의 형태를 따라가는 점에 비추어 보면, 이방성 스트레인(anisotropic strain)이 인가된 단층의 WSe_2는 제1 나노갭의 폭(제1 방향)의 크기에 의존적임에 따라, 엑시톤의 위치를 제어할 수 있고, 단일 광자의 서로 다른 2개의 편광 방향을 제어할 수 있다.

[0097] **[제조예 2: 광소자 어셈블리의 제조]**

[0098] 상기 제조예 1과 동일한 방법으로 나노구조체를 제조하되, 전자빔 리소그래피 및 반응성 이온 에칭을 이용하여 두께가 1㎛인 SiO_2/Si 기판 웨이퍼 상에 두께가 200nm인 프리절연막(Si_3N_4)을 제조하였다. 단, 3-셀 광결정 나노빔 캐비티는 격자상수가 280nm, 규칙적으로 배치된 홀의 직경이 195nm, 감소된 홀의 직경이 95nm인 것으로 정의되고, 나노빔 구조체의 슬래브 두께와 폭은 각각 200nm, 420nm으로 정의된다. Si_3N_4층 아래의 희생막 SiO_2는 완충된 산화물 식각액을 사용하여 선택적으로 습식 식각되었다. 그 후, 프리-스탠딩(free-standing)하고 있는 Si_3N_4 광결정 슬래브는, PDMS 팁을 이용하는 전사 방법에 의해, 스트레인이 인가된 단층의 WSe_2에 전사되어 최종적으로 광소자 어셈블리가 제조되었다.

[0100] **[실험예 4: 광소자 어셈블리에서 캐비티의 어레이]**

[0101] 도 9는 본 발명의 일 실시예에 따른 광소자 어셈블리에서 캐비티의 어레이를 나타낸 도면이다.

[0102] 도 9(a)는 광소자 어셈블리에서 단일 광자원과 근접한 공명 진동수를 갖는 1차원 광결정 공진기 나노빔 캐비티(1D photonic crystal nanobeam cavity)의 어레이를 나타낸 SEM 사진이다.

[0103] 도 9(a)를 참조하면, 광결정 캐비티가 제1 나노갭에 전사되어 1차원 나노 빔에서 3개의 missing air hole로 구성됨을 알 수 있다.

[0104] 도 9(b)는 1차원 광결정 나노빔 캐비티가 상기 제조예에 따른 나노구조체 상에 전사된 것을 나타낸 광학 현미경 사진이다.

[0105] 도 9(b)를 참고하면, 상기 제조예 2에 따른 광소자 어셈블리에서 검은색 화살표와 빨간색 화살표는, 각각 Si_3N_4로 이루어진 막대 구조체, 광결정 구조체를 의미하는 것을 알 수 있다.

[0106] 도 9(c)는 도 9(b)의 고해상도 래스터 스캐닝 발광 이미지(high-resolution raster scanning PL image)로 펌프 저력은 1.12㎼W, 스케일 바는 3㎛인 조건에서 측정되었다.

[0107] 도 9(b) 및 도 9(c)를 참고하면, 광결정 캐비티와 커플링된 단일 광자원(3)이 광결정 캐비티와 커플링되지 않은 단일 광자원(1)보다 발광 세기가 두드러지게 더 밝음을 알 수 있고, 이는 PDMS 스탬프를 이용한 전사 과정에서 압력의 차이에 기인한 것으로 추정된다.

[0109] **[실험예 5: 광소자 어셈블리의 특성 실험]**

[0110] 도 10은 본 발명의 일 실시예에 따른 광소자 어셈블리의 특성을 증명하는 실험들을 나타낸 것이다.

[0111] 도 10(a)는 도 9(b)의 단일광자원(3번)에서 실온(room temperature; RT)과 4K에서 측정된 발광 세기의 스펙트럼을 나타낸 것이다.

[0112] 도 10(a)를 참고하면, 단일광자원(3번)에서 실온(room temperature; RT)와 4K에서 측정된 발광 스펙트럼을 비교하면, 단일 광자원(3)은 광결정 캐비티 모드와 잘 매칭됨을 알 수 있다. 특히, 본 발명에 따른 광소자 어셈블리를 통해 파장 740 nm 내지 750nm에서 방출되는 단일 광자의 세기가 증폭됨을 알 수 있다.

[0113] 도 10(b)는 도 9(b)의 단일광자원(1번)의 지연 시간인 t(ns)에 따른 광자 상관 함수 $g^{(2)}(t)$을 나타낸 것이다.

[0114] 도 10(b)를 참고하면, 지연 시간이 0ns일 때 $g^{(2)}(0)$의 값이 0.384 ± 0.095을 나타내어, 본 발명의 일 실시예에 따른 광소자 어셈블리도 단일 광자를 방출시킴을 알 수 있다.

[0115] 도 10(c)는 도 9(b)의 단일광자원(3번)을 기준으로 편광판의 각도에 따른 측정된 발광 스펙트럼을 나타낸 것이다.

[0116] 도 10(c)를 참고하면, 단일 광자원(3번)은 Si_3N_4로 이루어진 막대 구조체를 따라, 선형으로 편광된 방향을 나타내고 있다. 이를 해석하면, 단일 광자원과 캐비티 모드와의 편광 매칭이 이루어짐을 알 수 있다.

[0117] 도 10(d)는 펌프 레이저 파워에 따른 발광 세기의 함수로, 단일광자원 1(black-line), 단일광자원 2(red-line) 및 단일광자원 3(blue-line)에 대해 측정된 발광 세기의 강도를 나타낸 것이다.

[0118] 도 10(d)를 참고하면, 피팅 곡선은 1.45 μW (black-line), 1.11 μW (red-line) 및 1.74 μW (blue-line)의 포화 펌프 전력을 나타내며 2.22 × 10^5 count/s (black-line), 1.70 × 10^5 count / s (red-line) 및 2.67 × 10^5 count / s (blue-line)의 포화 방출 강도를 보임을 알 수 있다. 이를 종합하여 해석하면, 단일 광자원(3)이 광결정 캐비티와 커플링되어 광결정 캐비티와 커플링되지 않은 단일 광자원(1)보다 발광 세기가 더 큼을 알 수 있고, 본 발명에 따른 광소자 어셈블리를 통해 단일 광자의 방출 효율이 향상된 소자를 구현할 수 있었다.

[0119] 이상에서 본 발명의 바람직한 실시예들에 대하여 상세하게 설명하였지만 본 발명의 권리 범위는 이에 한정되는 것은 아니고 다음의 청구범위에서 정의하고 있는 본 발명의 기본 개념을 이용한 당업자의 여러 변형 및 개량 형태 또한 본 발명의 권리 범위에 속하는 것이다.

부호의 설명

[0120] 10: 기판 20: 절연막부

22: 제1 절연막 24: 제2 절연막

30: 단층의 전이금속 디칼코게나이드 NG: 제1 나노갭

D1: 제1 방향 D2: 제2 방향

D3: 제3 방향 20p: 프리절연막

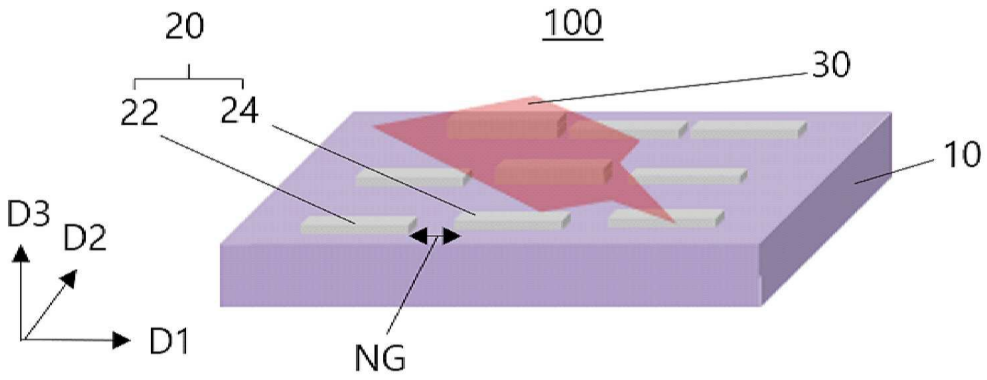
32: 식각방지막부 32a: 제1 식각방지막

32b: 제2 식각방지막 42: 스탬프

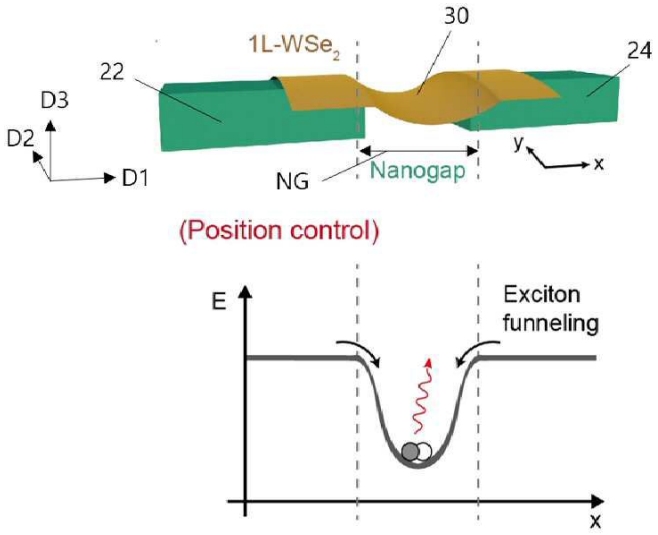
100: 단일 광자를 제어하는 나노구조체 200: 광소자 어셈블리

도면

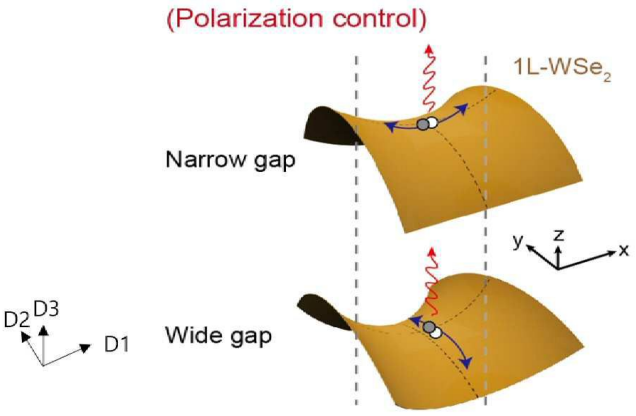
도면1



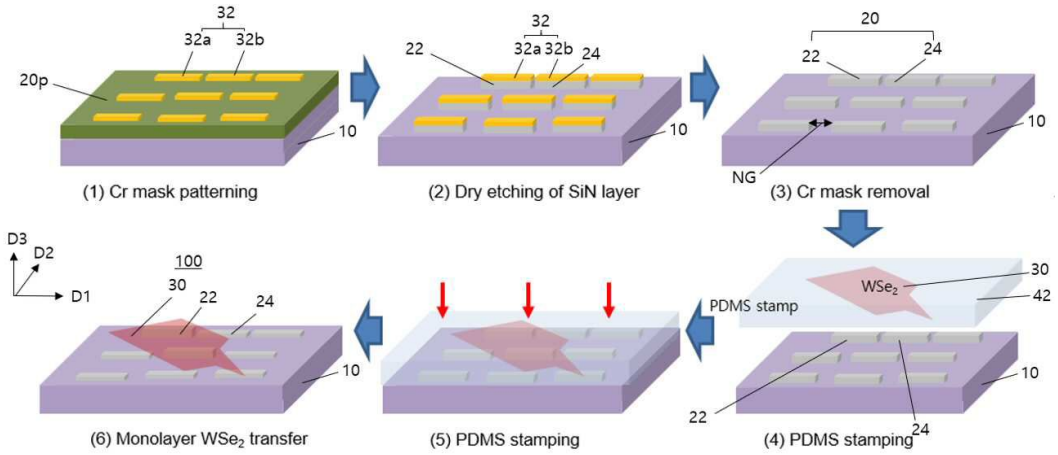
도면2


1L-WSe2
30
22
24
D3
D2
D1
NG
Nanogap
y
x
(Position control)
E
Exciton
funneling
x

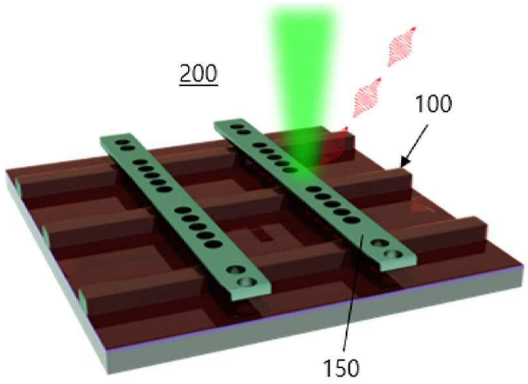
도면3


(Polarization control)
1L-WSe2
Narrow gap
y
z
x
D2
D3
D1
Wide gap

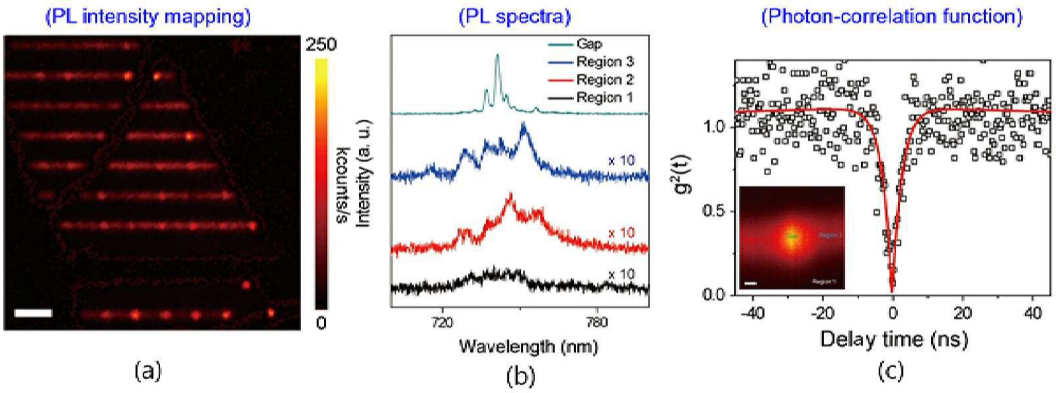
도면4


32
32a
32b
20p
10
(1) Cr mask patterning
22
24
(2) Dry etching of SiN layer
20
NG
(3) Cr mask removal
WSe2
PDMS stamp
30
42
(4) PDMS stamping
(5) PDMS stamping
100
(6) Monolayer WSe2 transfer

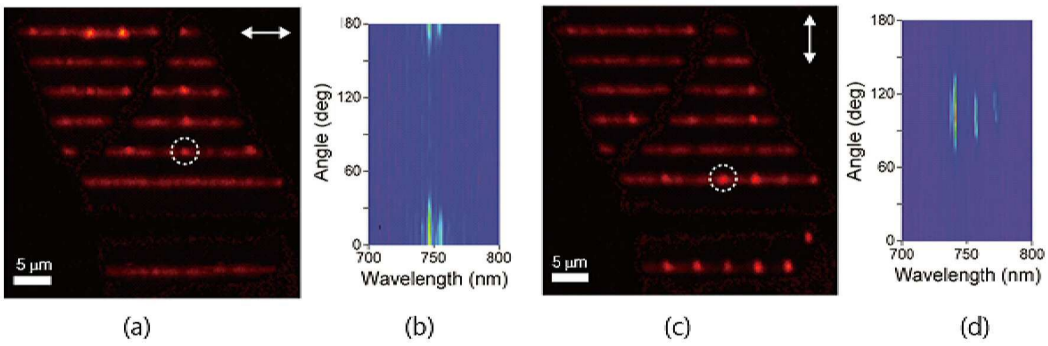
도면5


200
100
150

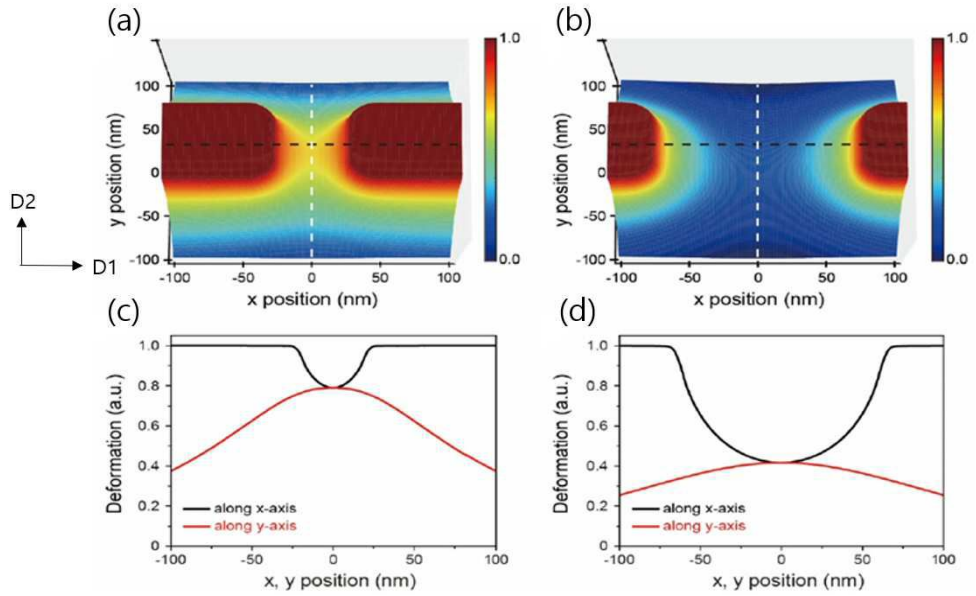
도면6


(PL intensity mapping)
250
0
kcounts/s
Intensity (a. u.)
(a)
(PL spectra)
Gap
Region 3
Region 2
Region 1
x 10
x 10
x 10
720
780
Wavelength (nm)
(b)
(Photon-correlation function)
g²(t)
1.0
0.5
0.0
-40
-20
0
20
40
Delay time (ns)
(c)

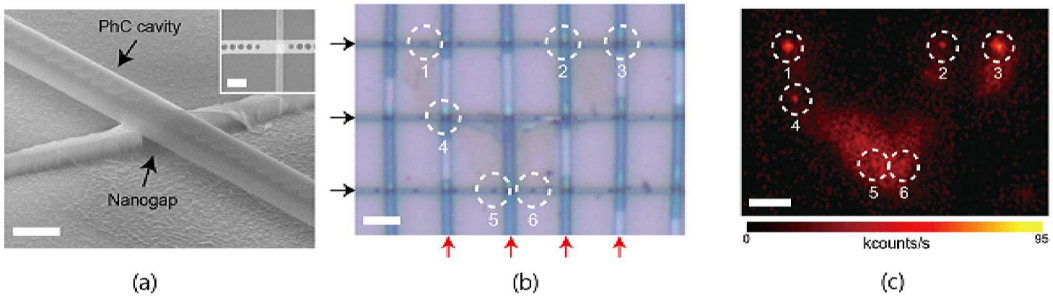
도면7


5 μm
(a)
180
120
60
0
Angle (deg)
700
750
800
Wavelength (nm)
(b)
5 μm
(c)
180
120
60
0
Angle (deg)
700
750
800
Wavelength (nm)
(d)

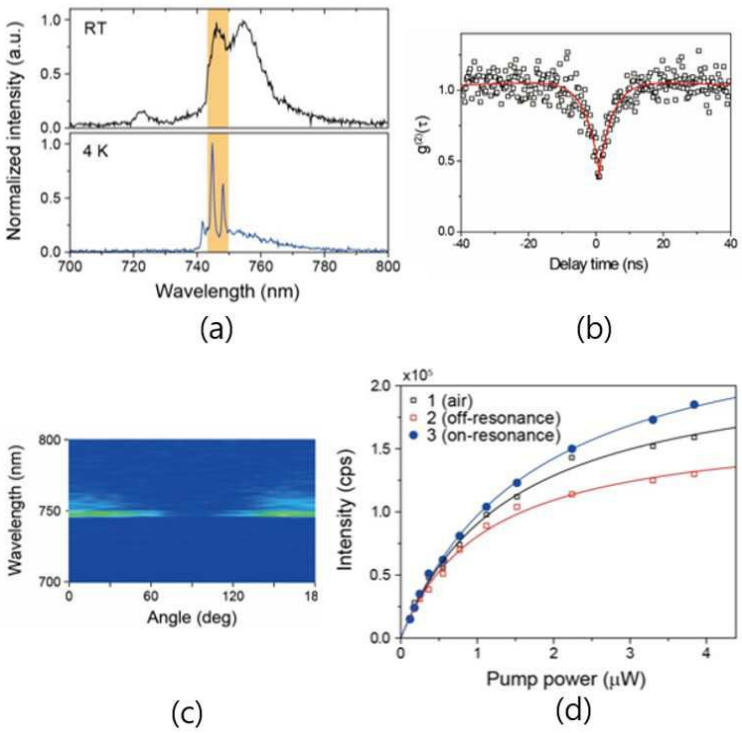
도면8


(a)
(b)
(c)
(d)
D2
D1
y position (nm)
x position (nm)
Deformation (a.u.)
x, y position (nm)
along x-axis
along y-axis
1.0
0.0

도면9


PhC cavity
Nanogap
1
2
3
4
5
6
kcounts/s
0
95
(a)
(b)
(c)

도면10


RT
4 K
Normalized intensity (a.u.)
Wavelength (nm)
(a)
$g^{(2)}(\tau)$
Delay time (ns)
(b)
Wavelength (nm)
Angle (deg)
(c)
x10⁵
1 (air)
2 (off-resonance)
3 (on-resonance)
Intensity (cps)
Pump power (μW)
(d)