



**(19) 대한민국특허청(KR)**  
**(12) 등록특허공보(B1)**

(45) 공고일자 2014년09월11일  
 (11) 등록번호 10-1437769  
 (24) 등록일자 2014년08월28일

(51) 국제특허분류(Int. Cl.)  
 H01P 7/10 (2006.01)  
 (21) 출원번호 10-2013-0025535  
 (22) 출원일자 2013년03월11일  
 심사청구일자 2013년03월11일  
 (56) 선행기술조사문헌  
 KR1020100015869 A  
 KR1020110019550 A  
 KR1020040047777 A  
 KR1020090113643 A

(73) 특허권자  
 한국과학기술원  
 대전광역시 유성구 대학로 291(구성동)  
 (72) 발명자  
 유경식  
 대전 유성구 대학로 291, (구성동, 한국과학기술원)  
 권경목  
 대전 유성구 대학로 291, (구성동, 한국과학기술원)  
 (뒷면에 계속)  
 (74) 대리인  
 특허법인 무한

전체 청구항 수 : 총 7 항

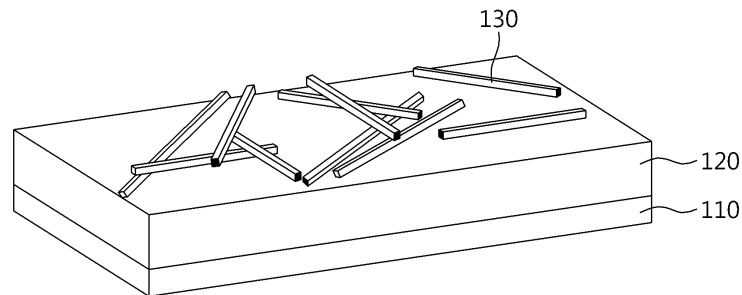
심사관 : 김상철

**(54) 발명의 명칭 평판 공진기 및 그의 제조 방법**

**(57) 요약**

실시예에 따른 평판 공진기는 금속층, 금속층 상에 형성되고 광학 이득(optical gain) 특성을 가지며 금속층에 의해 표면에 전기장을 집중시키는 유전체층 및 유전체층 상에 형성되고 유전체층 표면의 전기장과 상호 작용하여 공진기를 형성하는 복수의 나노 와이어를 포함한다.

**대표도** - 도1a



(72) 발명자  
**정영호**  
대전 유성구 대학로 291, (구성동, 한국과학기술원)  
**심재호**  
대전 유성구 대학로 291, (구성동, 한국과학기술원)

**김민경**  
대전 유성구 대학로 291, (구성동, 한국과학기술원)

이 발명을 지원한 국가연구개발사업  
과제고유번호 2010-0002845  
부처명 교육과학기술부  
연구사업명 이공분야기초연구사업(일반연구자지원사업)  
연구과제명 광전자 집적을 위한 나노스케일 반도체 광원 연구  
기여율 1/1  
주관기관 한국과학기술원  
연구기간 2010.05.01 ~ 2013.04.30

---

**특허청구의 범위**

**청구항 1**

금속층;

상기 금속층 상에 형성되고, 광학 이득(optical gain) 특성을 가지며, 상기 금속층에 의해 표면에 전기장을 집중시키는 유전체층; 및

상기 유전체층 상에 형성되고, 상기 유전체층 표면과 상호 작용하여 공진기를 형성하는 복수의 나노 와이어를 포함하는 평판 공진기.

**청구항 2**

제1항에 있어서,

상기 유전체층은,

상기 유전체층 내부에 존재하는 적어도 하나 이상의 모드(mode) 중에서, 여타의 모드와 비교하여 상기 유전체층의 표면에 전기장을 많이 형성시키는 TE<sub>1</sub> 모드에 상응하는 두께를 갖는 평판 공진기.

**청구항 3**

제2항에 있어서,

상기 복수의 나노 와이어는,

상기 유전체층의 표면에 상기 TE<sub>1</sub> 모드를 차단(cut-off)하여 상기 TE<sub>1</sub> 모드를 반사시키는 거울 영역을 제공하는, 평판 공진기.

**청구항 4**

성장 기판 상에 유전체층 및 금속층을 차례로 형성하여 공진기 구조물을 형성하는 단계;

상기 공진기 구조물의 금속층과 실리콘 기판 사이에 솔더 포일을 삽입하여 상기 공진기 구조물을 상기 실리콘 기판 상에 접합하는 단계;

상기 실리콘 기판 상에 접합된 상기 공진기 구조물로부터 상기 성장 기판을 제거하여 상기 유전체층을 노출시키는 단계; 및

상기 노출된 유전체층 상에 복수의 나노 와이어를 형성하는 단계

를 포함하는 평판 공진기의 제조 방법.

**청구항 5**

제4항에 있어서,

상기 공진 구조물을 형성하는 단계는,

상기 성장 기판 상에 광학 이득(optical gain) 특성을 가지며, 상기 금속층에 의해 표면에 전기장을 집중시키는 유전체 물질로 이루어진 상기 유전체층을 형성하는 단계; 및

상기 유전체층 상에 은(Ag)으로 이루어진 상기 금속층을 형성하는 단계

를 포함하는 평판 공진기의 제조 방법.

**청구항 6**

제5항에 있어서,

상기 유전체층을 형성하는 단계는,

상기 유전체층 내부에 존재하는 적어도 하나 이상의 모드(mode) 중에서, 여타의 모드와 비교하여 상기 유전체층의 표면에 전기장을 많이 집중시키는 TE<sub>1</sub> 모드가 발생하는 두께로 상기 유전체층을 형성하는, 평판 공진기의 제조 방법.

**청구항 7**

제6항에 있어서,

상기 복수의 나노 와이어는,

상기 유전체층의 표면에 상기 TE<sub>1</sub> 모드를 차단(cut-off)하여 상기 TE<sub>1</sub> 모드를 반사시키는 거울 영역을 제공하는, 평판 공진기의 제조 방법.

**명세서**

**기술분야**

[0001] 실시예는 복수의 나노 와이어를 이용한 평판 공진기 및 그의 제조 방법에 관한 것이다.

**배경기술**

[0002] 1960년 시어도어 메이먼(Theodore Harold Maiman)이 최초의 레이저 발진 장치를 발명한 이래 이미징, 정보저장, 의료, 광통신, 센서 등 많은 응용분야에서 레이저가 연구되어 왔다.

[0003] 특히, 전 세계적으로 정보의 양이 급격히 증가하면서 기존 전자 기반의 기술의 한계로 인하여 광 기반의 통신, 집적회로 등에 대한 관심이 크게 증가하여 광 결정 레이저(photonic crystal), 마이크로 디스크(micro disk), 금속-유전체(metal-dielectric) 구조의 레이저, 표면 플라즈몬(surface plasmon) 레이저 등의 연구가 진행되어 왔다. 하지만, 기존 레이저들은 발진을 위한 충분한 품위 값(Quality Factor)을 얻기 위해 확실한 물리적 형태를 필요로 한다. 이런 정교한 물리적 공진기를 형성하기 위해서는 복잡한 패터닝(patterning)과 식각(etching) 공정이 필수적이다.

[0004] 특히, 최근 많이 연구되고 있는 나노(nano) 구조에서는 효율과 경제성이 떨어지는 전자선 리소그래피(e-beam lithography)가 주로 사용된다. 또한, 패터닝 후 식각 과정은 공정의 복잡도를 늘릴 뿐만 아니라, 비방사 표면 재결합(nonradiative surface recombination)을 크게 증가시켜 레이저의 성능을 저하시키는 단점이 있다.

**발명의 내용**

**해결하려는 과제**

[0005] 실시예들은 금속층 상에 유전체층 및 복수의 나노 와이어를 차례로 형성함으로써 유전체층 표면 상에 전기장을 집중시키고, 복수의 나노 와이어를 거울 영역으로 제공함으로써 대면적의 평판 공진기 및 그의 제조 방법을 제공하기 위한 것이다.

**과제의 해결 수단**

[0006] 실시예에 따른 평판 공진기는 금속층, 상기 금속층 상에 형성되고, 광학 이득(optical gain) 특성을 가지며, 상기 금속층에 의해 표면에 전기장을 집중시키는 유전체층 및 상기 유전체층 상에 형성되고, 상기 유전체층 표면

과 상호 작용하여 공진기를 형성하는 복수의 나노 와이어를 포함한다.

- [0007] 일측에 따르면, 상기 유전체층은 상기 유전체층 내부에 존재하는 적어도 하나 이상의 모드(mode) 중에서, 상기 유전체층의 표면에 상대적으로 가장 많은 전기장을 형성시키는 모드가 발생하는 두께를 가질 수 있다.
- [0008] 일측에 따르면, 상기 복수의 나노 와이어는 상기 유전체층의 표면에 상대적으로 가장 많은 전기장을 집중시키는 모드를 차단(cut-off)하여 상기 모드를 반사시키는 거울 영역을 제공할 수 있다.
- [0009] 실시예에 따른 평판 공진기의 제조 방법은 성장 기관 상에 유전체층 및 금속층을 차례로 형성하여 공진기 구조물을 형성하는 단계, 상기 공진기 구조물의 금속층과 실리콘 기관 사이에 솔더 포일을 삽입하여 상기 공진기 구조물을 상기 실리콘 기관 상에 접합하는 단계, 상기 실리콘 기관 상에 접합된 상기 공진기 구조물로부터 상기 성장 기관을 제거하여 상기 유전체층을 노출시키는 단계 및 상기 노출된 유전체층 상에 복수의 나노 와이어를 형성하는 단계를 포함한다.
- [0010] 일측에 따르면, 상기 공진 구조물을 형성하는 단계는 상기 성장 기관 상에 광학 이득(optical gain) 특성을 가지며, 상기 금속층에 의해 표면에 전기장을 집중시키는 유전체 물질로 이루어진 상기 유전체층을 형성하는 단계 및 상기 유전체층 상에 은(Ag)으로 이루어진 상기 금속층을 형성하는 단계를 포함할 수 있다.
- [0011] 일측에 따르면, 상기 유전체층을 형성하는 단계는 상기 유전체층 내부에 존재하는 적어도 하나 이상의 모드(mode) 중에서, 상기 유전체층의 표면에 상대적으로 가장 많은 전기장을 집중시키는 모드가 발생하는 두께로 상기 유전체층을 형성할 수 있다.
- [0012] 일측에 따르면, 상기 복수의 나노 와이어는 상기 유전체층의 표면에 상대적으로 가장 많은 전기장을 집중시키는 모드를 차단(cut-off)하여 상기 모드를 반사시키는 거울 영역을 제공할 수 있다.

**발명의 효과**

- [0013] 실시예에 따른 평판 공진기에 따르면, 금속층 상에 유전체층을 형성함으로써 유전체층 표면 상에 전기장을 집중시키고, 유전체층 상에 복수의 나노 와이어를 형성하여 거울 영역으로 제공함으로써 유전체층 표면 상에 존재하는 모드를 반사시켜 통해 공진할 수 있다.
- [0014] 실시예에 따른 평판 공진기의 제조 방법에 따르면, 금속층, 유전체층 및 복수의 나노 와이어를 무식각하여 평판 공진기를 제조함으로써, 식각에 따른 손실 없이 대면적의 평판 공진기를 제조할 수 있다.

**도면의 간단한 설명**

- [0015] 도 1a 및 도 1b는 실시예에 따른 공진기 구조를 나타내는 도면들이다.
- 도 2는 실시예에 따른 공진기의 모델링 구조를 나타내는 도면이다.
- 도 3은 MDA 슬랩 도파로 및 MDAA 슬랩 도파로에 대한 주파수(frequency)-파수벡터(wave vector,  $\beta$ )를 나타내는 그래프이다.
- 도 4a 내지 도 4d는 금속층 유무에 따른 공진기 특성을 나타내는 그래프이다.
- 도 5a 내지 도 5e는 실시예에 따른 공진기의 제조 방법을 설명하기 위한 도면들이다.
- 도 6a 및 도 6b는 실시예에 따른 공진기의 상부를 촬영한 전자현미경 사진이다.
- 도 7a 및 도 7b는 실시예에 따른 복수의 나노 와이어를 확대하여 촬영한 전자현미경 사진이다.
- 도 8a 내지 도 8d는 실시예에 따른 공진기의 특성을 나타내는 그래프이다.
- 도 9a 및 도 9b는 실시예에 따른 공진기의 발진 형태를 측정 및 촬영한 그래프이다.

**발명을 실시하기 위한 구체적인 내용**

- [0016] 이하에서, 첨부된 도면을 참조하여 본 발명에 따른 실시예들을 상세히 설명한다. 그러나, 본 발명이 실시예들에 의해 제한되거나 한정되는 것은 아니다. 또한, 각 도면에 제시된 동일한 참조 부호는 동일한 부재를 나타낸다.

- [0017] 도 1a 및 도 1b는 실시예에 따른 공진기 구조를 나타내는 도면들이다.
- [0018] 도 1a를 참조하면, 실시예에 따른 공진기는 금속층(110), 유전체층(120) 및 복수의 나노 와이어(130)를 포함한다.
- [0019] 실시예에 따른 공진기에서, 금속층(110), 유전체층(120) 및 복수의 나노 와이어(130)는 레이저 발진에 이용되는 공진기가 될 수 있다.
- [0020] 금속층(110)은 금속 물질로 이루어진 것으로, 일 예로 은(Ag)로 이루어질 수 있다.
- [0021] 유전체층(120)은 금속층(110) 상에 형성되고, 광학 이득(optical gain) 특성을 가지며, 금속층(110)에 의해 표면 상에 전기장을 집중시킬 수 있다. 이를 위해 유전체층(120)은 광학 이득 특성을 갖는 물질로 이루어질 수 있으며, 일 예로, 인듐갈륨비소인(InGaAsP)로 이루어질 수 있다.
- [0022] 도 1a에 도시된 바와 같이, 금속층(110) 상에 유전체층(120)이 형성된 경우, 유전체층(120) 내부에 적어도 하나 이상의 모드(mode)가 존재할 수 있다. 구체적으로, 유전체층(120) 내부에 TEM(Transverse ElectroMagnetic) 모드, TE(Transverse Electric) 모드, TM(Transverse Magnetic) 모드 중 적어도 하나의 모드가 존재할 수 있다.
- [0023] 예를 들어, 유전체층(120) 내부에는 SPP모드,  $TM_1$  모드,  $TE_0$  모드,  $TE_1$  모드 등이 복수의 모드들이 존재할 수도 있고,  $TE_0$  모드와 같이 하나의 모드만 존재할 수도 있다.
- [0024] 한편, 금속층(110) 상에 광학 이득 특성을 갖는 유전체층(120)이 형성될 경우, 유전체층(120)의 두께에 따라 그 내부에 존재하는 모드가 달라질 수 있으며, 유전체층(120)의 두께에 따라 표면에 가장 많은 전기장을 집중시키는 모드가 달라질 수 있다. 따라서, 유전체층(120)은 전기장이 집중되는 정도를 고려하여 그 두께를 가질 수 있다.
- [0025] 일 예로, 유전체층(120)이 350nm의 두께를 갖는 경우, SPP 모드,  $TM_1$  모드,  $TE_0$  모드,  $TE_1$  모드 등이 존재한다고 가정할 때, 유전체층(120)은 이 모드들 중  $TE_1$  모드에서 표면에 상대적으로 가장 많은 전기장이 집중될 수 있다. 이를 고려하여 유전체층(120)의 두께를 350nm로 결정할 수 있으며, 유전체층(120)은 다른 모드들에 비해 상대적으로 가장 많은 전기장이 집중되는  $TE_1$  모드를 이용할 수 있다.
- [0026] 복수의 나노 와이어(130)는 유전체층(120) 상에 형성되어, 유전체층(120) 표면과 상호 작용하여 공진기를 형성할 수 있다. 구체적으로, 복수의 나노 와이어(130)는 유전체층(120)의 표면에 가장 많은 전기장을 집중시키는 모드를 차단(cut-off)하고, 그 모드를 반사시키는 거울 영역을 제공할 수 있다. 따라서, 이 거울 영역에 의해 유전체층(120)의 표면 상에 형성된 모드가 반사됨으로써 공진할 수 있다.
- [0027] 실시예에 따르면, 유전체층(120) 표면 상에 가장 많은 전기장이 집중될 경우, 이 전기장에 의해 유전체층(120) 표면과 복수의 나노 와이어(130) 간의 상호 작용이 극대화되어 공진할 수 있다.
- [0028] 도 1b를 참조하면, 공진기의 평면도로, 유전체층(120) 상에 복수의 나노 와이어(130)가 형성된 것을 확인할 수 있다. 이 같은 구조를 갖는 공진기에서, 유전체층(120) 표면에 가장 많은 전기장이 집중될 경우, 유전체층(120) 표면에 강한 광학 모드가 여기되며, 복수의 나노 와이어(130)에 의해 반사가 일어남에 따라 공진할 수 있다.
- [0029] 도 2는 실시예에 따른 공진기의 모델링 구조를 나타내는 도면이다.
- [0030] 도 2를 참조하면, 공진기의 모델링 구조는, 거울 영역(mirror region)과 공진기 영역(cavity region)을 포함하며, 거울 영역 사이에 공진기 영역이 형성된 구조를 가질 수 있다.
- [0031] 거울 영역은 공진기에서 복수의 나노 와이어(230)를 포함하는 영역이 될 수 있으며, 공진기 영역은 공진기에서 복수의 나노 와이어를 미포함하는 영역이 될 수 있다. 여기서, 공진기의 유전체층(220)은 350nm의 두께로 이용하였다.
- [0032] 거울 영역은 금속층(210) 상에 유전체층(220), 복수의 나노 와이어(230), 공기층이 차례로 형성된, MDAA(Metal-Dielectric-Anisotropic indefinite medium-air) 슬랩 도파로로 모델링될 수 있다.
- [0033] 또한, 공진기 영역은 금속층(210) 상에 유전체층(220), 공기층이 차례로 형성된, MDA(Metal-Dielectric-Air) 슬랩 도파로로 모델링될 수 있다.

[0034] 참고를 위해, 표 1에서와 같이, 유전체층(220)의 두께에 따른 TE(Transverse Electric) 모드의 수를 나타낸다.

표 1

유전체층의 두께	모드의 수
105nm~	1
330nm~	2
560nm~	3
785nm~	4
1010nm~	5

[0036] 공진기 영역인 MDA 슬랩 도파로에서는 TE<sub>0</sub> 모드 및 TE<sub>1</sub> 모드가 존재하고, 거울 영역인 MDAA 슬랩 도파로에서는 TE<sub>1</sub> 모드만 존재할 수 있다.

[0037] 도 3은 MDA 슬랩 도파로 및 MDAA 슬랩 도파로에 대한 주파수(frequency)-파수벡터(wave vector, β)를 나타내는 그래프이다.

[0038] 거울 영역인 MDAA 슬랩 도파로에서 복수의 나노 와이어의 비율(filling ratio)에 따른 주파수-파수벡터를 나타내는 그래프이다. 또한, 삽입된 필드(field)는 TE 모드에 해당하는 전계(field E<sub>x</sub>) 분포를 나타낸 것이다.

[0039] 도 3을 참조하면, MDA 슬랩 도파로에서 발생한 TE<sub>1</sub> 모드("TE<sub>1</sub> of MDAA")는 해당 슬랩 도파로를 따라 진행하다 파수 벡터(wavevector, β)의 불연속성에 의해 강한 반사가 일어난다. 즉, 거울 영역에 포함된 복수의 나노 와이어(230)가 TE<sub>1</sub> 모드를 반사시켜 레이저 발진을 한다.

[0040] 도 4a 내지 도 4d는 금속층 유무에 따른 공진기 특성을 나타내는 그래프이다.

[0041] 실시예에 따른 공진기는 금속층 상에 유전체층을 형성함으로써, 유전체층 표면에 상대적으로 가장 많은 전기장이 집중되도록 하는 것으로, 금속층의 유무에 따라 유전체층 표면에 집중되는 전기장이 달라질 수 있다.

[0042] 도 4a는 공기층 상에 유전체층과 공기층이 차례로 형성된, ADA(Air-Dielectric-Air) 슬랩 도파로를 모델링하고, ADA 슬랩 도파로에서 TE<sub>1</sub> 모드에 대한 정규화된 포인팅 벡터(P<sub>z</sub>)를 나타내는 그래프이다. 또한, 도 4b는 금속층 상에 유전체층과 공기층이 차례로 형성된 MDA(Metal-Dielectric-Air) 슬랩 도파로를 모델링하고, MDA 슬랩 도파로에서 TE<sub>1</sub> 모드에 대한 정규화된 포인팅 벡터(P<sub>z</sub>)를 나타내는 그래프이다.

[0043] ADA 슬랩 도파로 및 MDA 슬랩 도파로에서, 각각에 포함된 유전체층은 광학 이득을 갖는 인듐갈륨비소인(InGaAsP)로 이루어졌으며, 유전체층의 두께는 350nm를 이용하였다. 유전체층의 두께는 인듐갈륨비소인(InGaAsP)에 대한 광 이득 대역폭과 복수의 나노 와이어에 의해 반사가 잘 일어나는 파장 대역에 일치하는 두께를 가질 수 있다.

[0044] 유전체의 두께가 350 nm일 때, 인듐갈륨비소인(InGaAsP)에 대한 광 이득 대역폭 내에서 SPP, TM<sub>1</sub>, TE<sub>0</sub>, TE<sub>1</sub>의 모드가 존재하며 그 중 표면에 가장 많은 전기장이 존재하는 것은 TE<sub>1</sub> 모드이다. 따라서, TE<sub>1</sub> 모드를 금속층의 유무에 따라 비교하였다.

[0045] 도 4a를 참조하면, ADA 슬랩 도파로의 경우, 약 65 내지 80%의 전기장이 유전체층(Dielectric)에 존재하고, 파장(Y)의 변화에 따른 각 영역의 전기장 비율의 변화가 적은 것을 알 수 있다. 이는, ADA 슬랩 도파로에 포함된 공기층에서 전기장이 소멸되기 때문이다.

[0046] 반면, 도 4b를 참조하면, MDA 슬랩 도파로의 경우, 60% 이상의 전기장이 유전체층(Dielectric)에 존재하고, 파장(Y)의 변화에 따른 각 영역의 전기장 비율 변화가 큰 것을 알 수 있다. 이는, MDA 슬랩 도파로에 포함된 금속층에 의해 전기장이 유전체층 표면에 집중되기 때문이다.

- [0047] 도 4c는 각 영역에서 ADA 슬랩 도파로와 MDA 슬랩 도파로에서 TE<sub>1</sub> 모드에 대한 전기장 비율을 나타내는 그래프이다. 여기서, ADA 슬랩 도파로의 경우, MDA 슬랩 도파로와의 비교를 위하여, 유전체층 중 일 면에 있는 공기층의 전기장만 고려하였다.
- [0048] ADA 슬랩 도파로 및 MDA 슬랩 도파로에서 유전체층의 두께는 모두 350nm를 이용하였으며, 유전체층을 구성하는 인듐갈륨비소인(InGaAsP)의 광 이득 대역폭을 고려하여 파장 1300nm 내지 1500nm의 전기장 비율을 고려하였다.
- [0049] 도 4c를 참조하면, 파장이 1450nm 일 때 ADA 슬랩 도파로의 경우, 공기층에 16% 정도의 전기장이 존재하지만, MDA 슬랩 도파로의 경우, 공기층에 35%의 전기장이 존재하는 것을 알 수 있다. 즉, MDA 슬랩 도파로가 ADA 슬랩 도파로에 비해 공기층에 2배 이상의 전기장이 존재한다. 따라서, MDA 슬랩 도파로 상에 복수의 나노 와이어가 형성될 경우, 유전체층과 복수의 나노 와이어 간의 상호 작용이 커지는 반면, 유전체층에 존재하는 전기장 비율은 큰 차이가 없음을 알 수 있다.
- [0050] 또한, MDA 슬랩 도파로에 존재하는 TE<sub>0</sub>의 경우, 대부분의 전기장이 유전체층 내에 집중되어 있어 표면의 복수의 나노 와이어에 의해 반사가 거의 일어나지 않는다. 이를 종합해 볼 때, MDA 슬랩 도파로와 같이 금속층과 유전체층을 함께 사용하고, 350nm의 두께를 갖는 유전체층에서 TE<sub>1</sub> 모드를 사용할 경우, 유전체층의 표면에 강한 전기장을 집중시킬 수 있음을 확인 할 수 있다.
- [0051] 도 4d는 복수의 나노 와이어를 포함하는 ADA 슬랩 도파로 및 MDA 슬랩 도파로의 파장 및 반사율을 나타내는 그래프이다. 이 경우, 복수의 나노 와이어는 지름 120nm의 은 나노 와이어로, ADA 슬랩 도파로 및 MDA 슬랩 도파로 상에 각각 한 개가 포함되었다. 이 같이, 은 나노 와이어가 포함된 ADA 슬랩 도파로 및 MDA 슬랩 도파로에 대하여, 2차원 유한요소 시간영역(2-Dimensional Finite-Difference Time Domain, 2D-FDTD) 전산모사를 통해 반사율을 계산하였다.
- [0052] 구체적으로, 2차원 유한요소 시간영역(2D-FDTD) 계산은 MDA 슬랩 도파로의 유전체층 표면에 지름 120nm의 은 나노 와이어가 놓여 있을 때, TE<sub>1</sub> 모드를 입사시켜 반사율을 계산하였다.
- [0053] ADA 슬랩 도파로의 경우, 양 쪽 공기층 영역으로 전기장이 분산되어 반사율이 10 % 미만인 반면, MDA 슬랩 도파로의 경우, 유전체층의 표면에 상대적으로 전기장의 분포가 집중되어 유전체층의 두께가 350 nm일 때, 파장 1450 nm에서 강한 반사가 일어나는 것을 확인할 수 있다.
- [0054] 도 5a 내지 도 5e는 실시예에 따른 평판 공진기의 제조 방법을 설명하기 위한 도면들이다.
- [0055] 도 5a를 참조하면, 평판 공진기의 제조 방법은 성장 기판(511) 상에 유전체층(512) 및 금속층(513)을 차례로 형성하여 공진기 구조물을 형성하는 단계를 포함한다. 구체적으로, 인화인듐(InP)으로 이루어진 성장 기판(511) 상에 MOCVD(metal-organic chemical vapor deposition)을 이용하여 인듐갈륨비소인(InGaAsP)를 증착하여 유전체층(512)을 형성한다. 이 경우, 유전체층(512)은 이론적 계산을 통해 TE<sub>1</sub> 모드가 광학 이득 대역폭 내에 존재하도록 설계된 것으로, 350nm의 두께를 가질 수 있다.
- [0056] 또한, 유전체층(512) 상에 은(Ag)을 증착하여 금속층(513)을 형성한다. 이 금속층(513)은 다른 금속과의 본딩시, 금속간 화합물(Intermetallic Compound)을 형성할 수 있다. 금속층(513) 형성시, 박막의 높은 품질을 얻기 위해 느린 속도로 은(Ag)을 증착하였다.
- [0057] 도 5b 및 도 5c를 참조하면, 평판 공진기의 제조 방법은 도 5a에 도시된 구조물을 실리콘 기판(520) 상에 접합하는 단계를 포함한다. 구체적으로, 실리콘 기판(520) 상에 주석(Sn)-비스무트(Si) 계의 솔더 포일(530)을 접합한 후, 금속층(513)이 솔더 포일(530)과 마주하도록 도 5a에 도시된 구조물을 위치시켜 실리콘 기판(520) 상에 접합할 수 있다. 금속층(513)과 솔더 포일(530)은 금속 접합에 의해 금속간 화합물(Intermetallic Compound)을 형성할 수 있다.
- [0058] 도 5d를 참조하면, 평판 공진기의 제조 방법은 실리콘 기판(520) 상에서 성장 기판(511)을 제거하는 단계를 포함한다. 구체적으로, 습식 식각(wet etching)을 이용하여 성장 기판(511)을 제거하여 유전체층(512)을 노출시킬



수 있다.

- [0059] 도 5e를 참조하면, 평판 공진기의 제조 방법은 유전체층(512) 상에 복수의 나노 와이어(514)를 형성하는 단계를 포함한다. 이 경우, 복수의 나노 와이어(514)는 비교적 광학 손실이 적은 단결정의 은(Ag) 나노 와이어가 될 수 있다. 복수의 나노 와이어(514)는 스핀 코팅(spin coating), 드롭 캐스팅(drop casting) 및 프린팅(printing) 중 어느 하나의 방법으로 형성될 수 있다.
- [0060] 상술한 바와 같이, 평판의 유전체층(512) 상에 복수의 나노 와이어(514)를 스핀 코팅(spin coating)하거나, 드롭 캐스팅(drop casting) 또는 프린팅(printing)하여 형성함으로써, 별도의 패터닝 공정 및 식각 공정을 실시할 필요가 없다. 따라서, 무식각의 제조 방법을 이용하여 식각 공정에 따른 손상이 적은, 대면적의 평판 공진기를 제조할 수 있다.
- [0061] 도 6a 및 도 6b는 실시예에 따른 평판 공진기의 상부를 촬영한 전자현미경 사진이다. 구체적으로, 도 5a 내지 도 5e에 도시된 제조 방법으로 제조된 제1 및 제2 평판 공진기의 유전체층을 촬영한 전자 현미경 사진이다.
- [0062] 도 6a 및 도 6b를 참조하면, 제1 및 제2 평판 공진기에서 각 유전체층 상에 복수의 나노 와이어가 불규칙한 패턴으로 형성된 것을 확인할 수 있다.
- [0063] 도 7a 및 도 7b는 실시예에 따른 복수의 나노 와이어를 촬영한 전자현미경 사진이다. 도 7a 및 도 7b는 도 6a 및 도 6b에서 촬영한 제1 및 제2 평판 공진기에서, 복수의 나노 와이어를 확대 촬영한 전자 현미경 사진이다.
- [0064] 도 7a를 참조하면, 제1 평판 공진기에서 복수의 나노 와이어는 은(Ag) 나노 와이어가 여러 층이 겹쳐진 패턴을 갖는 것으로, 높은 품질 값(Q factor) 및 낮은 문턱 값을 갖는 것이다.
- [0065] 반면, 도 7b에 도시된 복수의 나노 와이어는 은(Ag) 나노 와이어가 단일 층을 갖는 것으로, 도 7a의 복수의 나노 와이어에 비해 상대적으로 낮은 품질 값과 높은 문턱 값을 갖는 것을 알 수 있다. 이 같이, 공진기의 문턱 값 및 품질 값은 복수의 나노 와이어의 밀집도에 영향을 받는 것으로, 제2 평판 공진기는 제1 평판 공진기에 비해 복수의 나노 와이어의 밀집도가 낮아 반사가 적게 일어나기 때문에 높은 문턱 값과 낮은 품질 값을 가진다.
- [0066] 도 8a 내지 도 8d는 실시예에 따른 평판 공진기의 특성을 나타내는 그래프이다.
- [0067] 도 8a는 실시예에 따른 평판 공진기의 레이저 발진 특성을 나타내는 것이다. 도 8a에 도시된 바와 같이, 공진기에 여기 광을 증가시켜 주입할 경우, 공진기는 단일 파장의 레이저 발진을 하는 것으로 관찰되었다. 특히, 발진 파장인 1440 nm 는 앞서 설명한 바와 같이, 전산 모사 및 이론적 계산을 최대 반사가 일어나는 지점과 일치할 수 있다.
- [0068] 도 8b는 실시예에 따른 평판 공진기의 선폭 특성과 중심 파장 특성을 나타내는 것이다. 구체적으로, 공진기에 여기 광을 변화시켜 주입할 경우, 공진기는 문턱 값 주위에서 레이저 발진을 시작하면서 방출되는 빛에 간섭으로 인해 선폭이 빠른 속도로 감소되는 것으로 관찰되었다. 여기서, 문턱 값에서의 선폭이 ~3nm 정도로 측정된 경우, 이것으로부터 실험적 품질 값(Q factor)은 ~ 480 정도로 추정되었다.
- [0069] 도 8b를 참조하면, 중심 파장 역시 선폭과 마찬가지로 문턱 값 주위에서 전도대(conduction band)에 전하가 빠른 속도로 차면서 밴드 필링 효과(band filling effect)가 일어나 짧은 파장 방향(Blue shift)으로 급격하게 이동하는 것으로 관찰되었다. 여기서, 40 mW 이상의 높은 여기 광을 주입 하여도 장파장 쪽으로 중심 파장이 이동하지 않는 것은 금속 접합을 통해 광원에 의한 열을 효과적으로 방열하고 있기 때문이다.
- [0070] 도 8c는 정확한 문턱 값을 확인하기 위하여 주입된 여기 광의 최대 값(peak)에 대한 레이저 모드의 최대 값을 측정한 것으로, 폭 10ns 주기 5000  $\mu$ s인 여기 광의 최대 값 변화에 따른 발광 광 최대값의 선형 치수(linear scale)를 나타낸다. 도 8c에서와 같이, 문턱 값(threshold)은 ~12 mW로 관찰되었다.

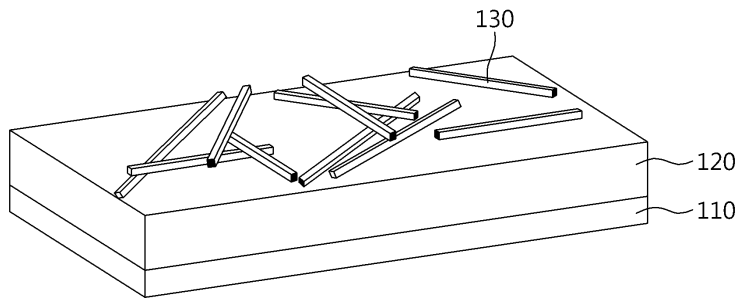
- [0071] 도 8d는 주입된 여기 광에 따른 레이저 발진 모드 세기(intensity)의 총 합을 로그 스케일로 나타낸 것이다. 문턱 에너지가 없는 이상적인 공진기와 실시예에 따른 공진기에 대한 발진 모드 세기 합의 차이는 비방사 표면 재결합(nonradiative surface recombination), 열에 의한 비방사 재결합(Auger recombination) 등에 의한 비방사 재결합, 자발 방출이 일어나는 정도(Purcell factor), 자발 방출이 유도 방출로 연결되는 정도(coupling factor)에 의해 결정될 수 있다.
- [0072] 실시예에 따른 공진기는 무식각의 제조 방법으로 제조되고, 각 특성들이 저온(77 K)에서 측정되었으므로, 표면 재결합과 열에 의한 재결합은 크지 않다. 따라서, 문턱 에너지가 없는 이상적 공진기와 실시예에 따른 공진기의 차이는 큰 모드 볼륨으로 인한 낮은 페셀 팩터(Purcell factor)와 다중 모드(multi-mode)로 인한 낮은 커플링 팩터(Coupling factor)에서 기인한 것으로 판단된다.
- [0073] 도 9a 및 도 9b는 실시예에 따른 공진기의 발진 형태를 측정 및 촬영한 그래프이다. 평판 공진기의 발진 원리를 확인하기 위하여, 적외선 CCD를 이용하여 실시예에 따른 평판 공진기의 레이저 발진 모습을 촬영하였다.
- [0074] 도 9a는 평판 공진기 상에서 선형 편광판을 각도 별로 회전시키며 평판 공진기의 레이저 발진 파워를 측정하는 것이며, 도 9b는 선형 편광판을  $0^\circ$  및  $90^\circ$  로 회전시킨 후 촬영한 이미지와, 선형 편광판 없이 촬영한 이미지이다.
- [0075] 도 9a 및 도 9b를 통해, 공진기에서 레이저가 선형적으로 편광된 상태에서 발진하는 것을 알 수 있다. 또한, 전산 모사 및 이론적 계산과 함께 공진기의 레이저 발진 원리가 나노 와이어에 의해 발생하는 표면 플라즈몬(Surface plasmon)이 아닌, MDAA(Metal-Dielectric Anisotropic Indefinite medium-Air) 슬랩 도파로의 TE 모드에 의한 패브리 페롯(Fabry-Perot) 형태의 공진기에 의한 것임을 알 수 있다.
- [0076] 이상과 같이 본 발명은 비록 한정된 실시예와 도면에 의해 설명되었으나, 본 발명은 상기의 실시예에 한정되는 것은 아니며, 본 발명이 속하는 분야에서 통상의 지식을 가진 자라면 이러한 기재로부터 다양한 수정 및 변형이 가능하다.
- [0077] 그러므로, 본 발명의 범위는 설명된 실시예에 국한되어 정해져서는 아니 되며, 후술하는 특허청구범위뿐 아니라 이 특허청구범위와 균등한 것들에 의해 정해져야 한다.

**부호의 설명**

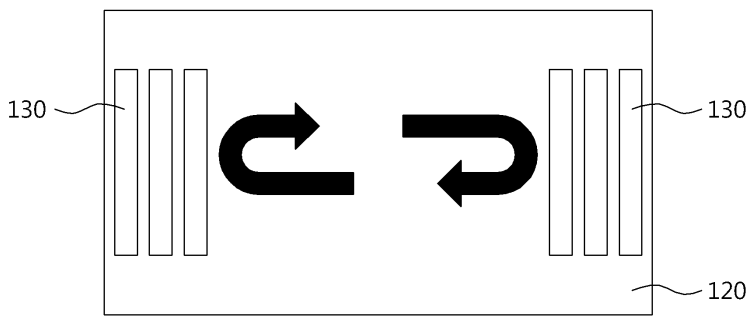
- [0078] 110: 금속층                                120: 유전체층
- 130: 나노 와이어                            210: 금속층
- 220: 유전체층                               230: 복수의 나노 와이어
- 511: 성장 기관                              512: 유전체층
- 513: 금속층                                   514: 복수의 나노 와이어
- 520: 실리콘 기관                            530: 솔더 포일

도면

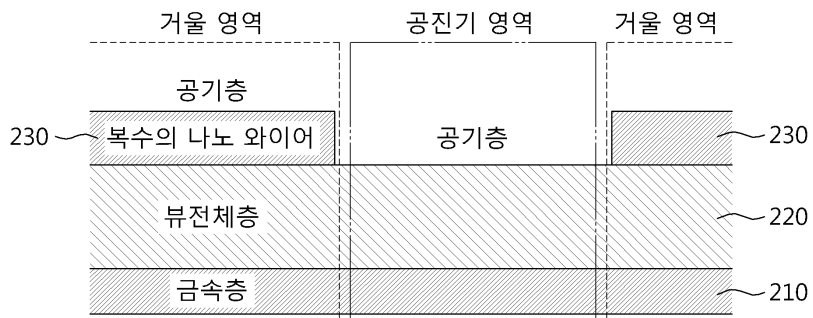
도면1a



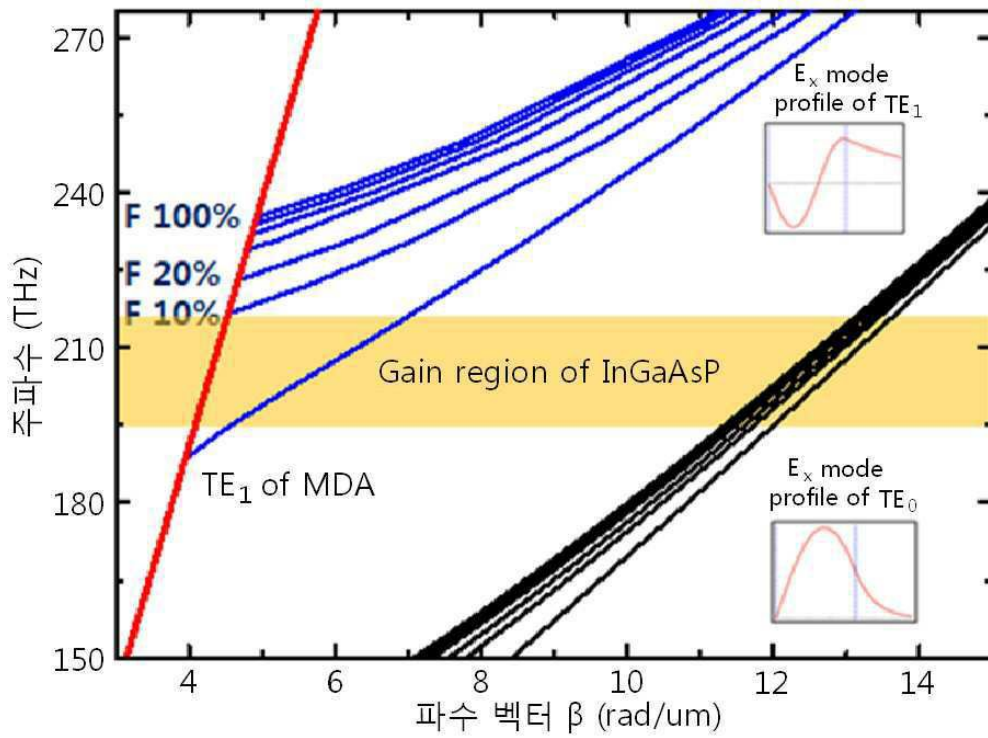
도면1b



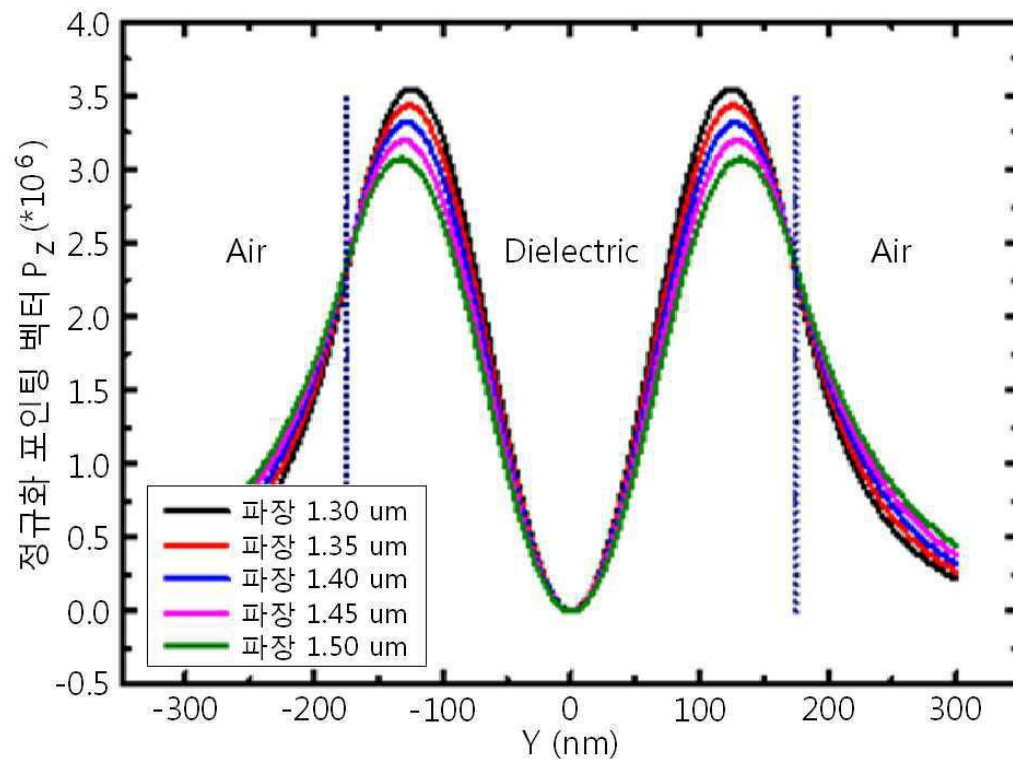
도면2



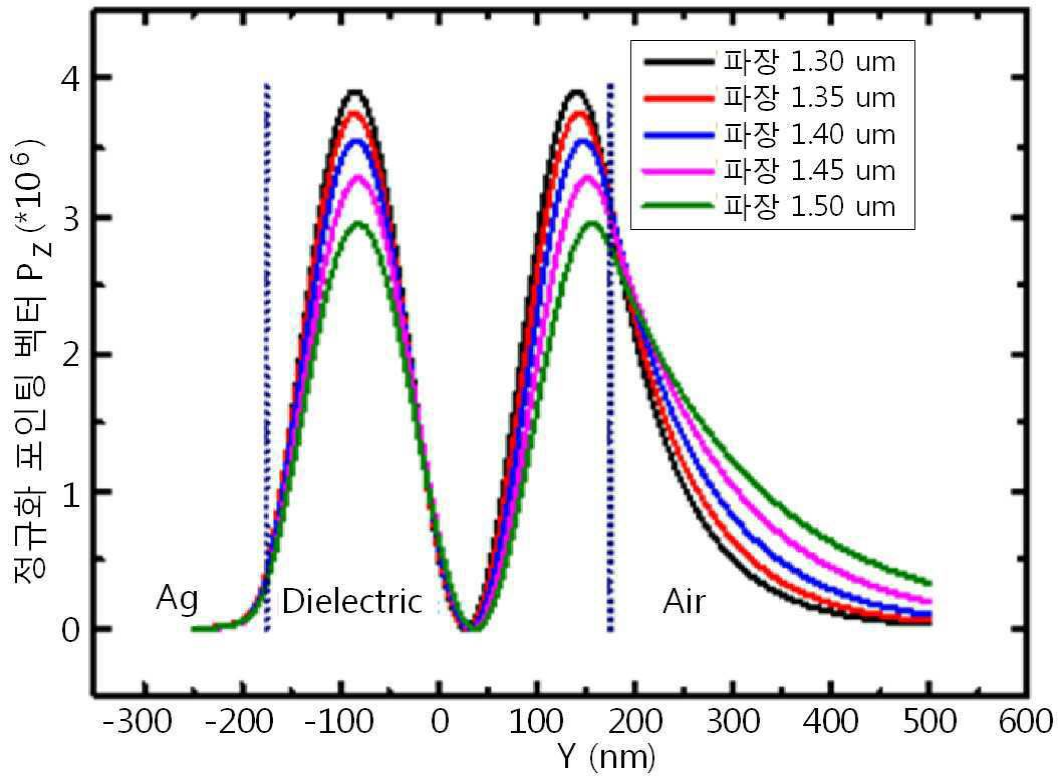
도면3



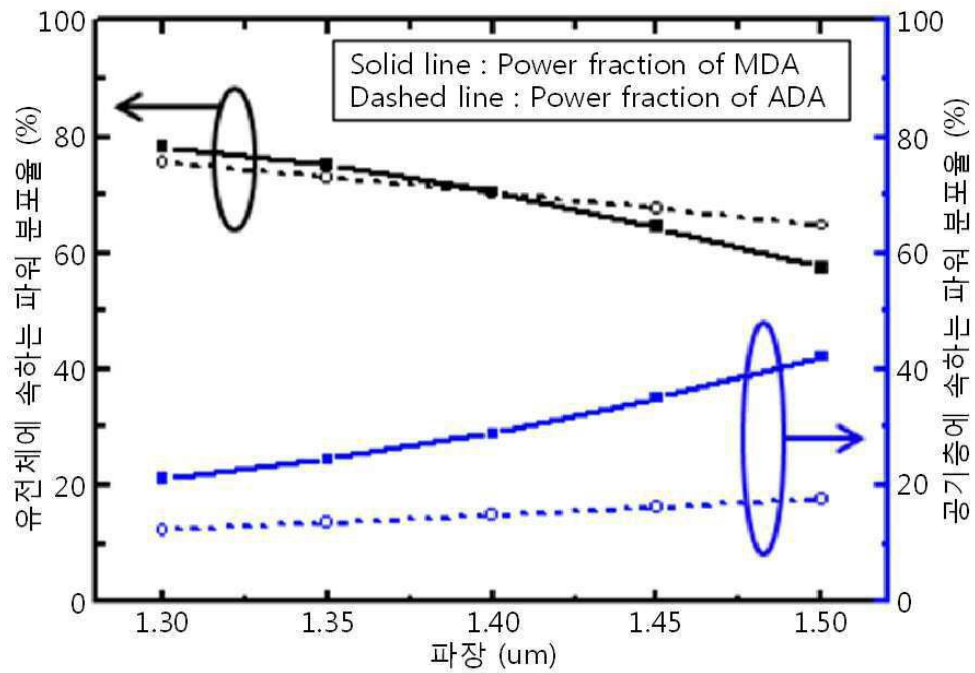
도면4a



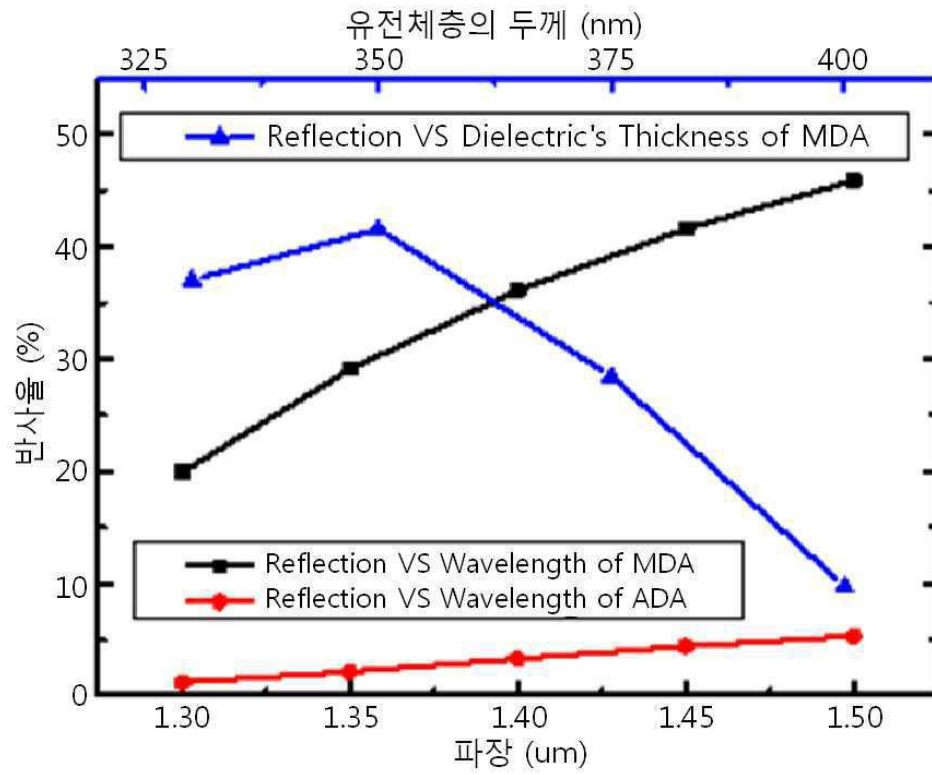
도면4b



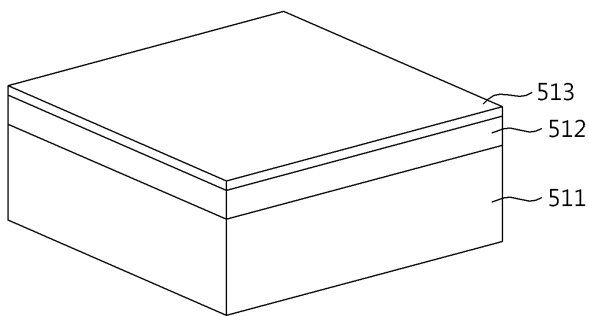
도면4c



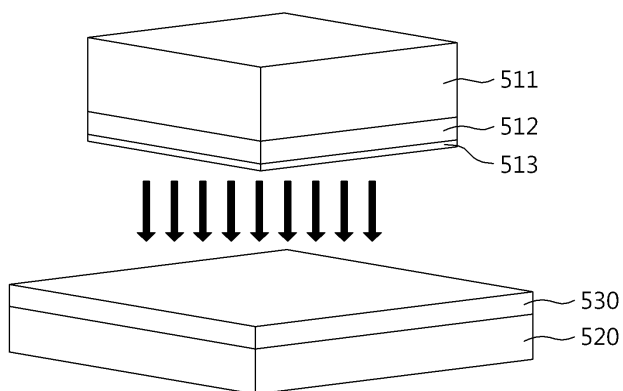
도면4d



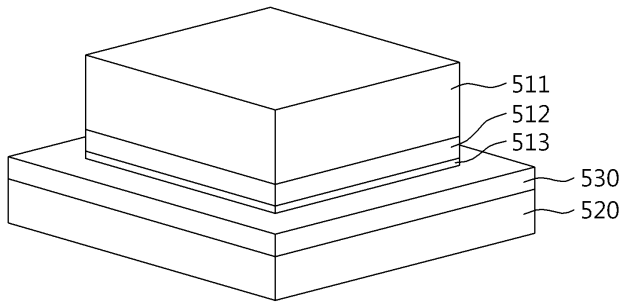
도면5a



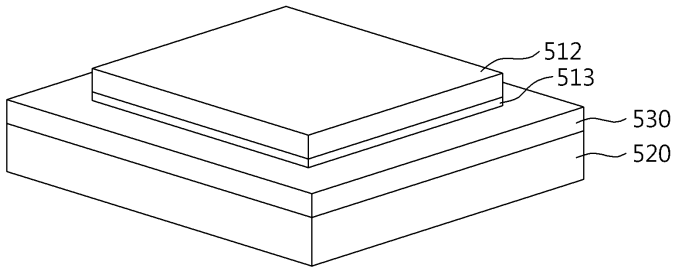
도면5b



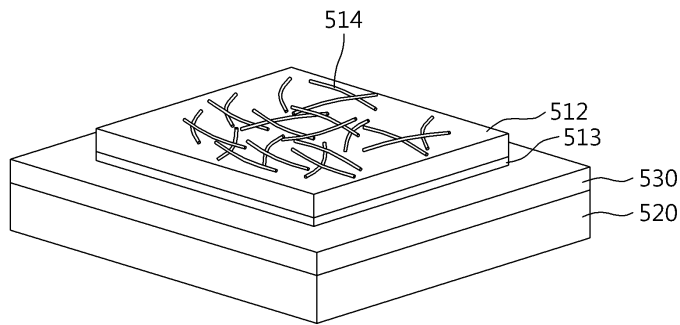
도면5c



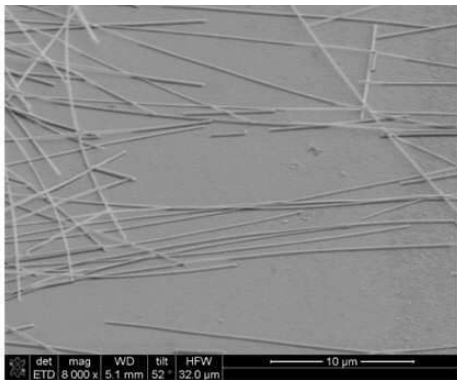
도면5d



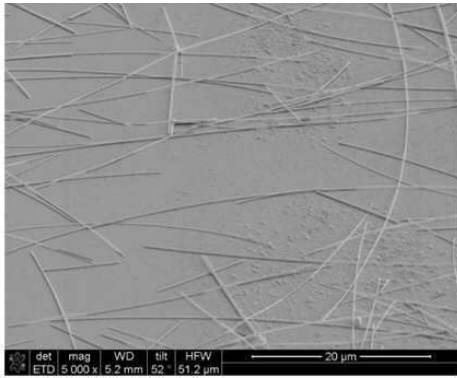
도면5e



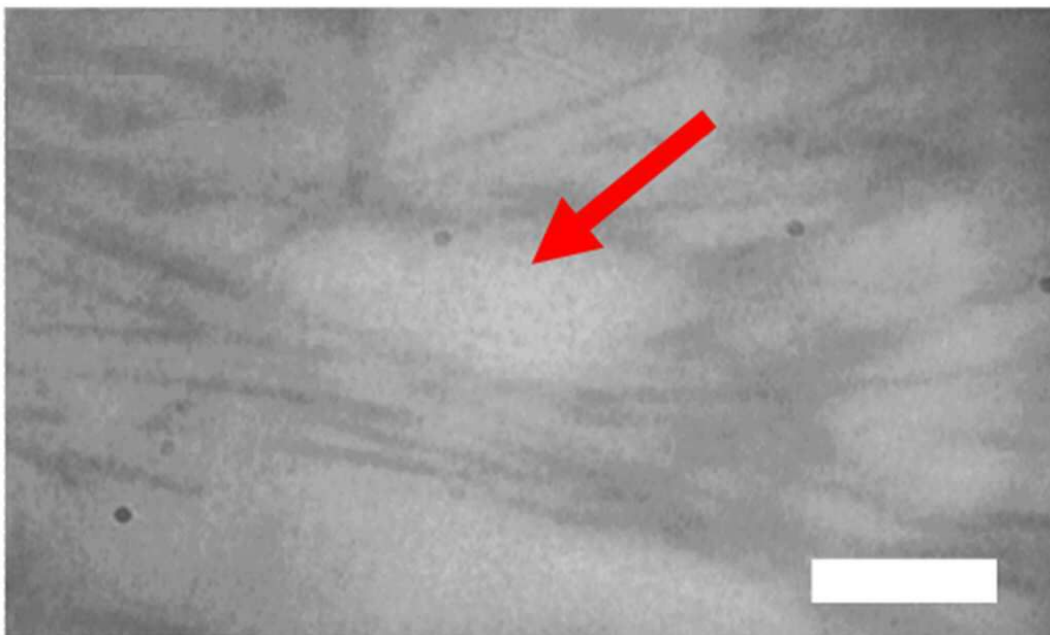
도면6a



도면6b

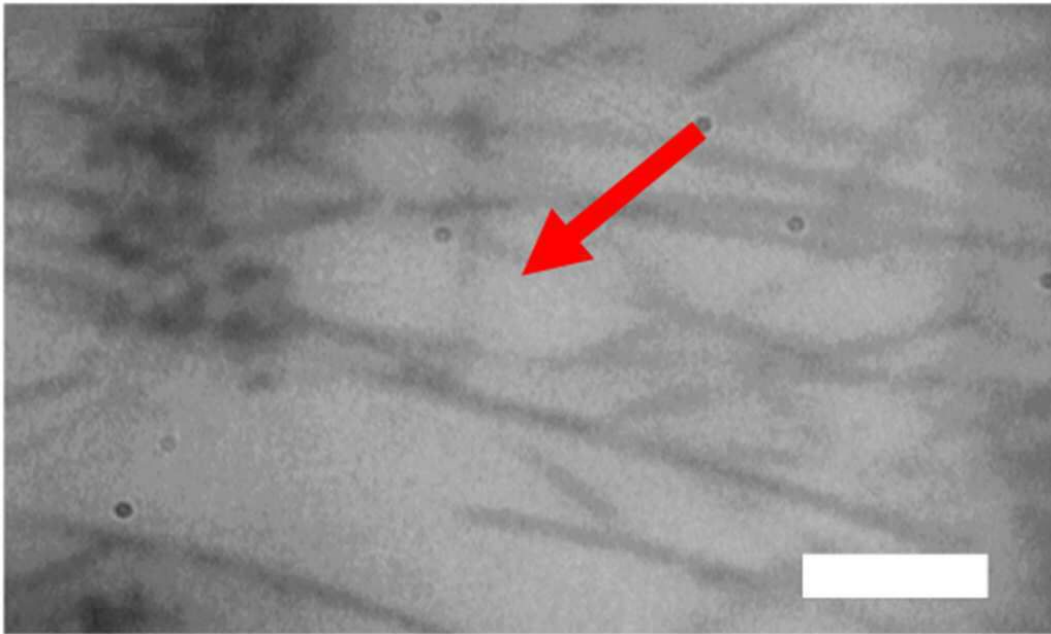


도면7a

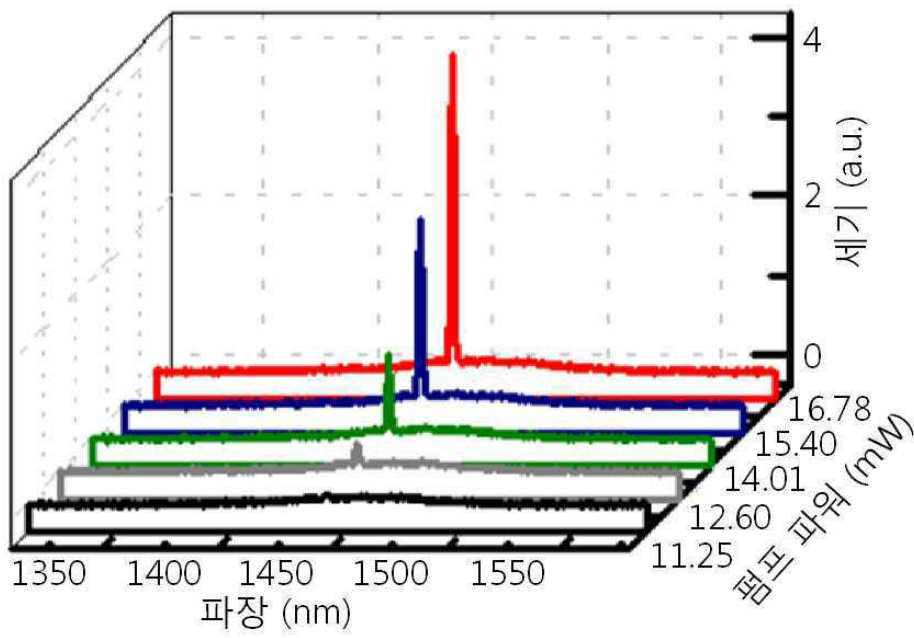




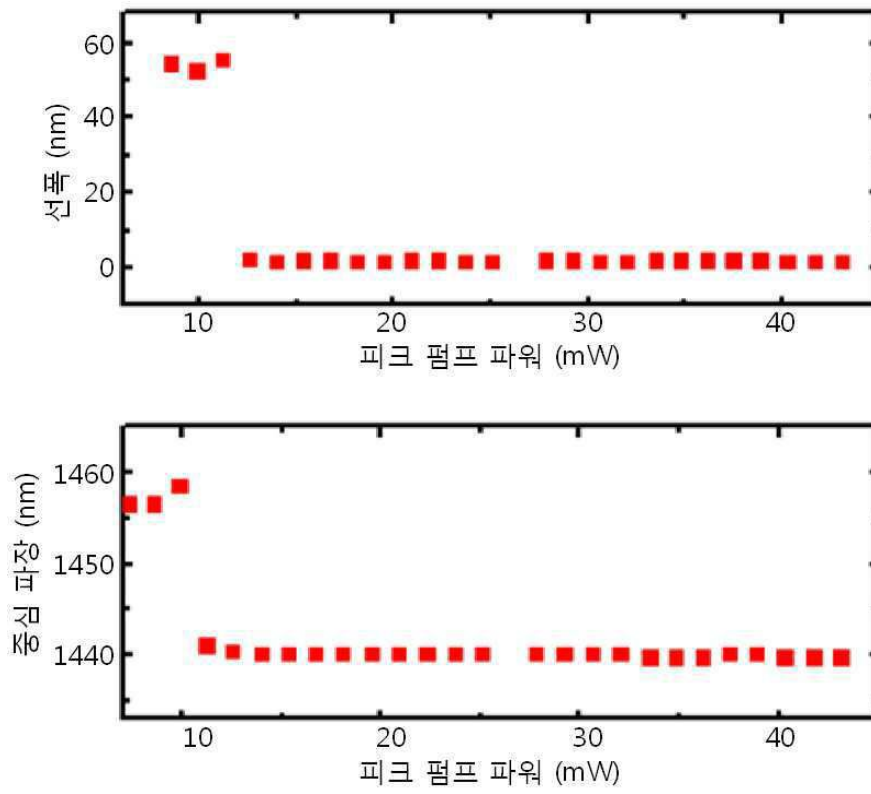
도면7b



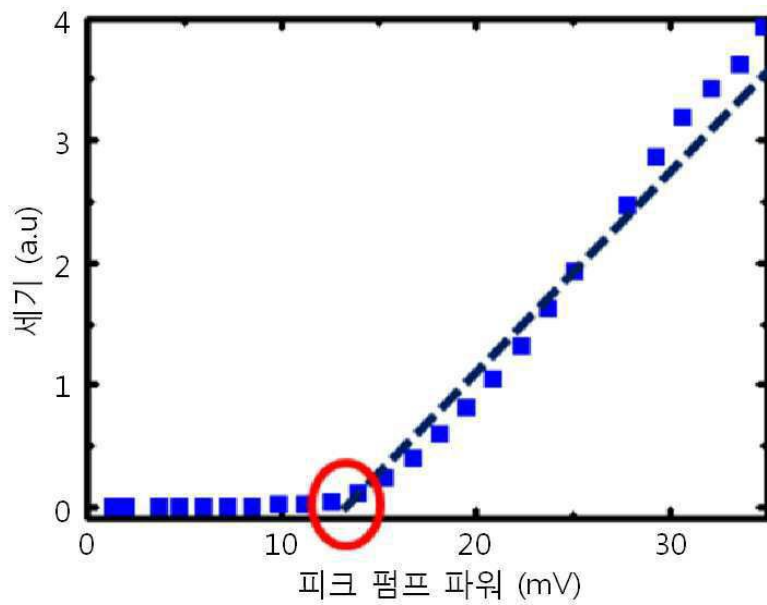
도면8a



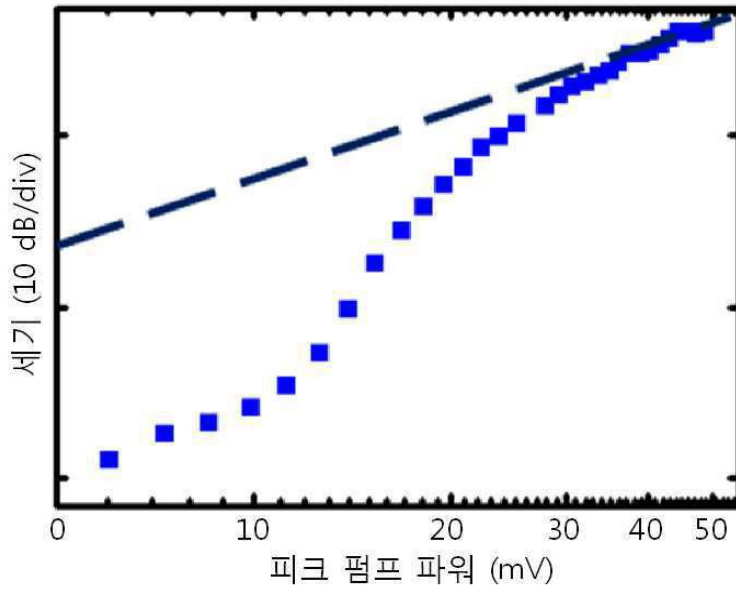
도면8b



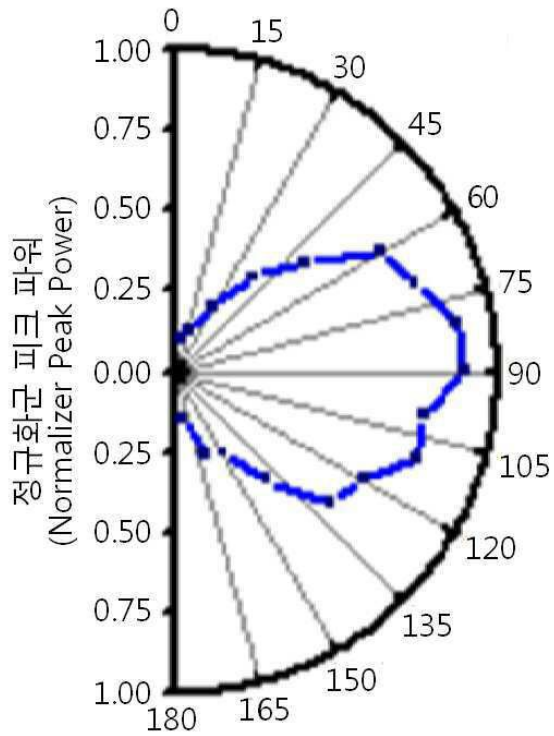
도면8c



도면8d



도면9a



도면9b

