



(19) 대한민국특허청(KR)  
(12) 공개특허공보(A)

(11) 공개번호 10-2017-0013802  
(43) 공개일자 2017년02월07일

(51) 국제특허분류(Int. Cl.)  
G02B 6/122 (2006.01) G02B 5/00 (2006.01)  
G02B 5/28 (2006.01)  
(52) CPC특허분류  
G02B 6/1226 (2013.01)  
G02B 5/008 (2013.01)  
(21) 출원번호 10-2016-0036323  
(22) 출원일자 2016년03월25일  
심사청구일자 2016년03월25일  
(30) 우선권주장  
1020150106778 2015년07월28일 대한민국(KR)

(71) 출원인  
서울대학교산학협력단  
서울특별시 관악구 관악로 1 (신림동)  
고려대학교 산학협력단  
서울특별시 성북구 안암로 145, 고려대학교 (안암동5가)  
(72) 발명자  
이병호  
서울특별시 서초구 반포대로39길 64-6, 301호 (반포동, 제우하우스)  
김준수  
인천광역시 남구 학익소로61번길 132, 25동 702호 (학익동, 신동아아파트4차)  
(뒷면에 계속)  
(74) 대리인  
리엔목특허법인

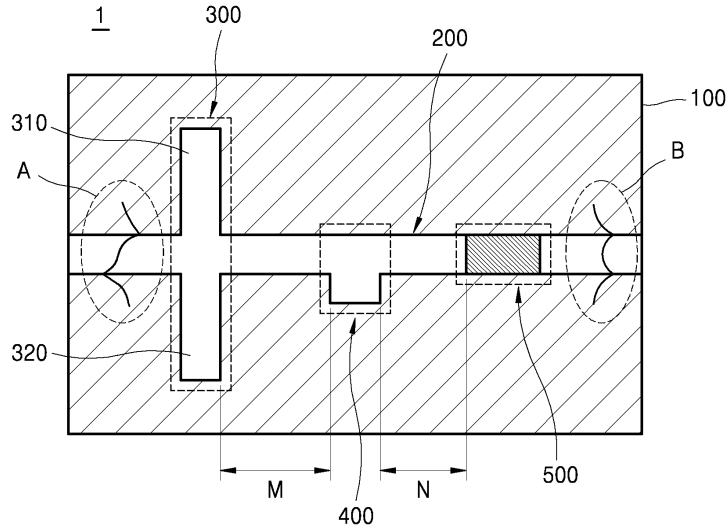
전체 청구항 수 : 총 10 항

(54) 발명의 명칭 플라즈모닉 소자

(57) 요약

본 발명은 플라즈모닉 소자에 관한 것으로, 보다 상세하게는, 도파로 내부에서 모드 변화를 일으키는 수동 소자를 개선시킨 플라즈모닉 소자에 관한 것이다.

대표도 - 도1



- (52) CPC특허분류  
**G02B 5/288** (2013.01)
- (72) 발명자  
**이승열**  
 서울특별시 관악구 신림로 76, 305호 (신림동)  
**박현수**  
 서울특별시 노원구 성발로 232, 101동 901호 (하계동, 우성아파트)

**이규근**  
 서울특별시 관악구 관악로 304, 112동 501호 (봉천동, 현대아파트)  
**김휘**  
 서울특별시 동작구 남부순환로265나길 9, 101호 (사당동)

이 발명을 지원한 국가연구개발사업

과제고유번호	2015002248
부처명	미래창조과학부
연구관리전문기관	서울대학교 산학협력단
연구사업명	기초연구사업/리더연구자지원사업 지적재산경비
연구과제명	액티브 플라즈모닉스 응용 시스템 연구단
기 여 율	1/2
주관기관	서울대학교
연구기간	2015.03.01 ~ 2016.02.29이 발명을 지원한 국가연구개발사업
과제고유번호	2014M3A6B3063710
부처명	미래창조과학부
연구관리전문기관	고려대학교 산학협력단
연구사업명	글로벌 프론티어사업
연구과제명	전자기파동에너지극한제어기술
기 여 율	1/2
주관기관	고려대학교
연구기간	2014.09.01 ~ 2015.08.31

---

## 명세서

### 청구범위

#### 청구항 1

반대칭 SPP 모드를 대칭 SPP 모드로 변환시켜 투과시키는 플라즈모닉 소자에 있어서,  
 소정의 유전율을 갖는 금속 재질로 구성된 바디;  
 상기 바디의 내부를 관통하여 일 방향으로 연장되게 구성되며 SPP 가 전파되는 중앙 도파로;  
 상기 중앙 도파로 상에 형성되는 제1 필터; 컨버터; 및 2 필터;를 포함하며,  
 상기 중앙 도파로는 SPP 가 전파되도록 소정의 제1 유전율 값을 갖는 제1 유전체로 구성되고,  
 상기 컨버터는 상기 제1 필터와 상기 제2 필터 사이에 위치하되,  
 상기 제1 필터는 대칭 SPP 모드의 투과를 차단하고 반대칭 SPP 모드를 통과시키며,  
 상기 제2 필터는 반대칭 SPP 모드의 투과를 차단하고 대칭 SPP 모드를 통과시키며,  
 상기 컨버터는 반대칭 SPP 모드를 대칭 SPP 모드로 변환시키는 플라즈모닉 소자.

#### 청구항 2

제1항에 있어서,  
 상기 제1 필터는,  
 상기 중앙 도파로의 연장 방향에 대해 수직방향으로 소정의 길이 및 상기 중앙 도파로의 연장 방향으로 소정의 너비를 갖는 수직 도파로로 구성되되,  
 상기 수직 도파로는 상기 중앙 도파로의 연장 방향에 대해 양 측 수직방향으로 서로 대칭되게 연장되는 플라즈모닉 소자.

#### 청구항 3

제1항에 있어서,  
 상기 컨버터는,  
 상기 중앙 도파로의 연장 방향에 대해 일 측 수직방향으로 소정의 깊이를 갖고 상기 중앙 도파로의 연장 방향으로 소정의 너비를 가지며 형성되는 그루브로 구성되는 플라즈모닉 소자.

#### 청구항 4

제1항에 있어서,  
 상기 제2 필터는,  
 상기 중앙 도파로 내에 위치하며 상기 중앙 도파로의 연장 방향으로 소정의 두께를 갖고 제2 유전율 값을 갖는 제2 유전체로 구성되되,  
 상기 제2 유전율 값은 상기 제1 유전율 값보다 작은 플라즈모닉 소자.

#### 청구항 5

제1항에 있어서,  
 상기 제1 필터와 상기 컨버터는 제1 간격을 갖고 이격되게 배치되며,  
 상기 컨버터와 상기 제2 필터는 제2 간격을 갖고 이격되게 배치되는 플라즈모닉 소자.

**청구항 6**

제5항에 있어서,

상기 제1 간격, 및 상기 제2 간격의 크기는,

상기 제1 필터에서 상기 제2 필터 방향으로 반대칭 SPP 모드가 전파될 상기 플라즈모닉 소자 전체의 반대칭 SPP 모드의 반사계수가 0 이 되도록 하는 크기를 갖는 플라즈모닉 소자.

**청구항 7**

소정의 유전율을 갖는 금속 재질로 구성된 바디;

상기 바디의 내부를 관통하여 일 방향으로 연장되게 구성되며 SPP 가 전파되는 중앙 도파로;

상기 중앙 도파로 상에 형성되는 제1 필터; 컨버터; 및 2 필터;를 포함하며,

상기 중앙 도파로는 SPP 가 전파되도록 소정의 제1 유전율 값을 갖는 제1 유전체로 구성되고,

상기 컨버터는 상기 제1 필터와 상기 제2 필터 사이에 위치하되, 상기 제1 필터와 상기 컨버터는 제1 간격을 갖고 이격되게 배치되며, 상기 컨버터와 상기 제2 필터는 제2 간격을 갖고 이격되게 배치되며,

상기 제1 필터는 상기 중앙 도파로의 연장 방향에 대해 수직방향으로 소정의 길이 및 상기 중앙 도파로의 연장 방향으로 소정의 너비를 갖는 수직 도파로로 구성되되, 상기 수직 도파로는 상기 중앙 도파로의 연장 방향에 대해 양 측 수직방향으로 서로 대칭되게 연장되어 대칭 SPP 모드의 투과를 차단하고 반대칭 SPP 모드를 통과시키며,

상기 제2 필터는 상기 제1 유전율보다 작은 제2 유전율 값을 갖고 상기 중앙 도파로의 연장 방향으로 소정의 두께를 가져서 제2 유전체로 구성되어 반대칭 SPP 모드의 투과를 차단하고 대칭 SPP 모드를 통과시키며,

상기 컨버터는 상기 중앙 도파로의 연장 방향에 대해 일 측 수직방향으로 소정의 깊이를 갖고 상기 중앙 도파로의 연장 방향으로 소정의 너비를 가지며 형성되는 그루브로 구성되어 반대칭 SPP 모드를 대칭 SPP 모드로 변환시켜서,

반대칭 SPP 모드를 대칭 SPP 모드로 변환시켜 투과시키는 플라즈모닉 소자의 제조 방법으로서,

- (a) 상기 제1 필터를 구성하는 수직 도파로의 길이 및 너비를 결정하는 단계;
- (b) 상기 제2 필터의 두께를 결정하는 단계;
- (c) 상기 컨버터의 너비 및 깊이를 결정하는 단계;
- (d) 하기 수학적 식 1 을 만족시키는 상기 간격 1 의 값을 결정하는 단계;

$$\frac{|t|^2}{1-|r'|^2} = \left| r + \frac{t^2}{r'} \frac{|r'|^2}{1-|r'|^2} \right|$$

(수학적 식 1)

(  $r$  : 제1 필터와 컨버터를 묶은 블록의 반대칭 SPP 모드에 대한 좌측 반사계수,

$r'$  : 제1 필터와 컨버터를 묶은 블록의 반대칭 SPP 모드에 대한 우측 반사계수

$t$  : 제1 필터와 컨버터를 묶은 블록의 반대칭 SPP 모드에 대한 투과계수)

(e) 상기 (a) 단계에서 결정된 상기 간격 1 의 값을 하기 식 2 에 대입하고, R 이 0 이 되도록 하는 상기 간격 2 의 값을 결정하는 단계;를 포함하는 플라즈모닉 소자의 제조 방법.

$$R = r + \frac{t^2 \gamma \exp(ik_a L_2)}{1 - r' \gamma \exp(ik_a L_2)}$$

(수학식 2)

( $\gamma$  : 제2 필터에 의해 반사된 반대칭 SPP 모드가 겪는 위상변화

$k_a$  : 반대칭 SPP 모드의 전파상수

$L_2$  : 제2 간격의 크기)

**청구항 8**

제7항에 있어서,

상기 (a) 단계는,

상기 수직 도파로의 너비와 길이를 변화시킴에 따라서 대칭 및 반대칭 SPP 모드의 투과량이 변화하는 것을 시뮬레이션하여 대칭 SPP 모드의 투과량이 최소화되고 반대칭 SPP 모드의 투과량을 확보하는 영역을 선택하도록 이루어지는 플라즈모닉 소자의 제조 방법.

**청구항 9**

제7항에 있어서,

상기 (b) 단계는,

Fabry-Perot 공진에 의한 진동 양상을 보이는 상기 제2 필터에 대한 대칭 SPP 모드의 투과량 양상에 따라서, 상기 대칭 SPP 모드의 투과량이 최대값을 갖도록 하는 상기 제2 필터의 두께값 중에서 어느 하나이되,

반대칭 SPP 모드가 컷오프되는 임계 두께 이상의 두께값 중 최소의 두께값을 상기 제2 필터의 두께로 선택하는 플라즈모닉 소자의 제조 방법.

**청구항 10**

제7항에 있어서,

상기 (c) 단계는,

상기 컨버터의 너비와 길이를 변화시킴에 따라서 입사된 반대칭 SPP 모드에 대한 대칭 SPP 모드의 투과율을 시뮬레이션하여 변환 효율에 따라서 상기 컨버터의 너비와 길이를 선택하는 플라즈모닉 소자의 제조 방법.

**발명의 설명**

**기술 분야**

[0001] 본 발명은 플라즈모닉 소자에 관한 것으로, 보다 상세하게는, 도파로 내부에서 모드 변화를 일으키는 수동 소자를 개선시킨 플라즈모닉 소자에 관한 것이다.

**배경 기술**

[0002] 플라즈몬은 금속 내부 자유전자밀도의 진동에 해당되는 collective excitation이다. 전자밀도는 전자기장과 상호작용하므로 광자와 플라즈몬은 결합할 수 있으며 금속 표면의 플라즈몬과 광자가 결합된 표면 모드(coupled surface mode)를 표면 플라즈몬 폴라리톤이라고 부른다. 이러한 표면 모드는 회절한계 이상으로 빛을 집속하는

것이 가능하도록 하므로 광학 저장매체나 광 집적회로, 비선형 광학 연구 등에서 그 응용 가능성이 높다고 평가된다.

- [0003] 가장 간단한 플라즈모닉 소자 중 하나로 SPP가 전파되는 통로인 도파로를 들 수 있다. 도파로는 형태와 크기에 따라 분산관계 (dispersion relation)와 전파 거리 (propagation length) 등의 전파 특성이 달라지며, 도파로 설계를 통해 이러한 특성들을 조절하는 것도 가능하다. 도파로는 여러 개의 전파 모드를 가질 수 있는데 각각의 모드를 결합시키는 구조가 없는 한 각각의 모드들은 독립적인 전파 채널로 동작하며 이를 이용한 멀티플렉싱도 가능하다.
- [0004] 필요에 따라 독립적으로 동작하던 전파 모드들을 상호작용시켜 한 채널의 SPP를 다른 채널로 옮기는 것이 필요한 경우가 있을 수 있는데, 예를 들면 특정위치에서 SPP가 느린 속도로 진행하며 물질과 오랜 시간 상호작용해야 하는 경우 처음부터 느린 SPP 전파채널만 이용하면 에너지 손실이 너무 크게 발생하여 SPP가 발생하는 위치부터 해당 위치까지 SPP를 보내기 어렵게 된다. 이러한 경우 손실이 작은 SPP 채널을 통해 목적지 근방까지 이동하고 모드 변환장치를 통해 느린 SPP로 변환시켜주면 훨씬 효율적일 것이다.
- [0005] 모드 간 상호작용을 만들기 위해서는 SPP 전파방향으로의 대칭성을 깨는 도파로 단면 변형이 필요하다.
- [0006] 일반적으로 도파로 단면이 일정하지 않으면, 각각의 전파 모드가 더 이상 독립적이지 않으므로 여러 투과 및 반사 모드로의 전이가 발생하게 된다. 따라서 아주 단순한 국소적 단면 변형만으로도 모드 간 상호작용을 만들 수 있다. 그러나 복잡도가 너무 낮은 구조는 대체적으로 효율에 한계가 있고 의도하지 않은 모드의 투과 및 반사를 피하는 것이 대부분의 경우 불가능하다. 정교한 설계를 통해 선택적인 모드 변환을 일으키는 것도 가능한데 단열적 도파로 단면 변화, 격자에 의한 모드 간 전이현상, 형상 최적화를 이용하는 방법이 이에 속한다. 단열적 도파로 단면변화나 격자를 이용한 설계의 경우는 섭동으로 고려해도 될 정도의 약하고 느린 변화만을 주기 때문에 위상 맞춤 조건 등을 이용하여 정확히 원하는 모드의 투과 반사만이 주로 일어나도록 할 수 있다. 그러나 이러한 설계가 가능하기 위해서는 나노 소자로서는 부적합할 정도로 긴 길이를 요구하기 때문에 실용성에서 큰 단점이 있다. 형상 최적화를 이용한 설계는 적당한 소자 크기를 유지하면서도 변환 효율이 매우 좋을 수 있으나 일반적으로 최적화된 형상이 매우 복잡하기 때문에 전자빔 공정과 같은 초정밀 공정을 요구하게 되어 생산성이 떨어지게 된다. 이에 크기가 작으면서도 단순한 형태를 가지며 선택적 모드 변환이 가능한 소자의 설계가 필요하다.

**선행기술문헌**

**특허문헌**

- [0007] (특허문헌 0001) 공개특허 1997-0019144

**발명의 내용**

**해결하려는 과제**

- [0008] 본 발명은 전술한 문제점을 해결하기 위해 안출된 것으로서, 본 발명의 목적은, 본 발명은 도파로 내부에서 모드 변화를 일으키는 수동 소자를 개선시킨 플라즈모닉 소자를 제공하는데 있다.

**과제의 해결 수단**

- [0009] 상술한 목적을 달성하기 위하여, 본 발명에 따른 플라즈모닉 소자는, 반대칭 SPP 모드를 대칭 SPP 모드로 변환시켜 투과시키는 플라즈모닉 소자로서, 소정의 유전율을 갖는 금속 재질로 구성된 바디; 상기 바디의 내부를 관통하여 일 방향으로 연장되게 구성되며 SPP 가 전파되는 중앙 도파로; 상기 중앙 도파로 상에 형성되는 제1 필터; 컨버터; 및 2 필터;를 포함하며, 상기 중앙 도파로는 SPP 가 전파되도록 소정의 제1 유전율 값을 갖는 제1 유전체로 구성되고, 상기 컨버터는 상기 제1 필터와 상기 제2 필터 사이에 위치하되, 상기 제1 필터는 대칭 SPP 모드의 투과를 차단하고 반대칭 SPP 모드를 통과시키며, 상기 제2 필터는 반대칭 SPP 모드의 투과를 차단하고 대칭 SPP 모드를 통과시키며, 상기 컨버터는 반대칭 SPP 모드를 대칭 SPP 모드로 변환시키는 구성을 갖는다.
- [0010] 바람직하게는, 상기 제1 필터는, 상기 중앙 도파로의 연장 방향에 대해 수직방향으로 소정의 길이 및 상기 중앙 도파로의 연장 방향으로 소정의 너비를 갖는 수직 도파로로 구성되되, 상기 수직 도파로는 상기 중앙 도파로의

연장 방향에 대해 양 측 수직방향으로 서로 대칭되게 연장된다.

- [0011] 바람직하게는, 상기 컨버터는, 상기 중앙 도파로의 연장 방향에 대해 일 측 수직방향으로 소정의 깊이를 갖고 상기 중앙 도파로의 연장 방향으로 소정의 너비를 가지며 형성되는 그루브로 구성된다.
- [0012] 바람직하게는, 상기 제2 필터는, 상기 중앙 도파로 내에 위치하며 상기 중앙 도파로의 연장 방향으로 소정의 두께를 갖고 제2 유전율 값을 갖는 제2 유전체로 구성되며, 상기 제2 유전율 값은 상기 제1 유전율 값보다 작은 값을 갖는다.
- [0013] 바람직하게는, 상기 제1 필터와 상기 컨버터는 제1 간격을 갖고 이격되게 배치되며, 상기 컨버터와 상기 제2 필터는 제2 간격을 갖고 이격되게 배치된다.
- [0014] 바람직하게는, 상기 제1 간격, 및 상기 제2 간격의 크기는, 상기 제1 필터에서 상기 제2 필터 방향으로 반대칭 SPP 모드가 전파될 상기 플라즈모닉 소자 전체의 반대칭 SPP 모드의 반사계수가 0 이 되도록 하는 크기를 갖는다.
- [0015] 본 발명의 일 실시예에 의한 플라즈모닉 소자의 제조 방법은, 소정의 유전율을 갖는 금속 재질로 구성된 바디; 상기 바디의 내부를 관통하여 일 방향으로 연장되게 구성되며 SPP 가 전파되는 중앙 도파로; 상기 중앙 도파로 상에 형성되는 제1 필터; 컨버터; 및 2 필터;를 포함하며, 상기 중앙 도파로는 SPP 가 전파되도록 소정의 제1 유전율 값을 갖는 제1 유전체로 구성되고, 상기 컨버터는 상기 제1 필터와 상기 제2 필터 사이에 위치하되, 상기 제1 필터와 상기 컨버터는 제1 간격을 갖고 이격되게 배치되며, 상기 컨버터와 상기 제2 필터는 제2 간격을 갖고 이격되게 배치되며, 상기 제1 필터는 상기 중앙 도파로의 연장 방향에 대해 수직방향으로 소정의 길이 및 상기 중앙 도파로의 연장 방향으로 소정의 너비를 갖는 수직 도파로로 구성되며, 상기 수직 도파로는 상기 중앙 도파로의 연장 방향에 대해 양 측 수직방향으로 서로 대칭되게 연장되어 대칭 SPP 모드의 투과를 차단하고 반대칭 SPP 모드를 통과시키며, 상기 제2 필터는 상기 제1 유전율보다 작은 제2 유전율 값을 갖고 상기 중앙 도파로의 연장 방향으로 소정의 두께를 가져서 제2 유전체로 구성되어 반대칭 SPP 모드의 투과를 차단하고 대칭 SPP 모드를 통과시키며, 상기 컨버터는 상기 중앙 도파로의 연장 방향에 대해 일 측 수직방향으로 소정의 깊이를 갖고 상기 중앙 도파로의 연장 방향으로 소정의 너비를 가지며 형성되는 그루브로 구성되어 반대칭 SPP 모드를 대칭 SPP 모드로 변환시켜서, 반대칭 SPP 모드를 대칭 SPP 모드로 변환시켜 투과시키는 플라즈모닉 소자의 제조 방법으로서,
- [0016] (a) 상기 제1 필터를 구성하는 수직 도파로의 길이 및 너비를 결정하는 단계;
- [0017] (b) 상기 제2 필터의 두께를 결정하는 단계;
- [0018] (c) 상기 컨버터의 너비 및 깊이를 결정하는 단계;
- [0019] (d) 하기 수학적 식 1 을 만족시키는 상기 간격 1 의 값을 결정하는 단계;

$$\frac{|t|^2}{1-|r'|^2} = \left| r + \frac{t^2}{r'} \frac{|r'|^2}{1-|r'|^2} \right|$$

- [0020]
- [0021] (수학적 식 1

- [0022]  $r$  : 제1 필터와 컨버터를 묶은 블록의 반대칭 SPP 모드에 대한 좌측 반사계수,
- [0023]  $r'$  : 제1 필터와 컨버터를 묶은 블록의 반대칭 SPP 모드에 대한 우측 반사계수
- [0024]  $t$  : 제1 필터와 컨버터를 묶은 블록의 반대칭 SPP 모드에 대한 투과계수)

- [0025] (e) 상기 (d) 단계에서 결정된 상기 간격 1 의 값을 하기 식 2 에 대입하고, R 이 0 이 되도록 하는 상기 간격 2 의 값을 결정하는 단계;를 포함한다.

$$R = r + \frac{t^2 \gamma \exp(ik_a L_2)}{1 - r' \gamma \exp(ik_a L_2)}$$

[0026]

[0027] (수학식 2)

[0028]  $\gamma$  : 제2 필터에 의해 반사된 반대칭 SPP 모드가 겪는 위상변화

[0029]  $k_a$  : 반대칭 SPP 모드의 전파상수

[0030]  $L_2$  : 제2 간격의 크기

[0031] 바람직하게는, 상기 (a) 단계는,

[0032] 상기 수직 도파로의 너비와 길이를 변화시킴에 따라서 대칭 및 반대칭 SPP 모드의 투과량이 변화하는 것을 시뮬레이션하여 대칭 SPP 모드의 투과량이 최소화되고 반대칭 SPP 모드의 투과량을 확보하는 영역을 선택하도록 이루어진다.

[0033] 바람직하게는, 상기 (b) 단계는, Fabry-Perot 공진에 의한 진동 양상을 보이는 상기 제2 필터에 대한 대칭 SPP 모드의 투과량 양상에 따라서, 상기 대칭 SPP 모드의 투과량이 최대값을 갖도록 하는 상기 제2 필터의 두께값 중에서 어느 하나를 상기 제2 필터의 두께로 선택하되, 반대칭 SPP 모드가 컷오프되는 임계 두께 이상의 두께값 중 최소의 두께값을 상기 제2 필터의 두께로 선택한다.

[0034] 바람직하게는, 상기 (c) 단계는, 상기 컨버터의 너비와 깊이를 변화시킴에 따라서 입사된 반대칭 SPP 모드에 대한 대칭 SPP 모드의 투과율을 시뮬레이션하여 변환 효율에 따라서 상기 컨버터의 너비와 깊이를 선택한다.

[0035] 바람직하게는, 상기 (d) 단계는, 간격 1을 바꾸어 가며 제1 필터와 컨버터를 묶은 블록에 대한 투과 및 반사계수를 조사하고 수학식 1의 좌변과 우변을 비교하여 두 값이 같아지도록 하는 간격 1을 선택한다. 이 과정을 통해 수학식 1이 만족되게 되어야만 (e) 단계를 통해 반대칭 SPP 모드의 반사를 제거할 수 있다.

[0036] 바람직하게는, 상기 (e) 단계는, 간격 2를 바꾸어 가며 전체 구조에 대한 반대칭 SPP 모드의 반사율인 R이 0이 되도록 하는 간격 2를 선택한다.

### 발명의 효과

[0037] 본 발명에서 제안하는 구조를 갖는 플라즈모닉 소자에서는 입력되는 모드에 대해 단 하나의 출력 모드만이 방출된다. 이는 부수적으로 발생된 노이즈를 제거하기 위해 필요한 각종 필터나 광 아이솔레이터 (optical isolator)의 필요성을 줄여줄 수 있으므로 광학 시스템 설계가 더 간단해 질 수 있다. 또한, 본 발명에 따른 구조는 극히 단순한 형태를 가지는 부분들의 조합만으로 구성되기 때문에 형상 최적화 기법에 비해 훨씬 단순한 형태를 가지는 이점이 있다. 마지막으로 모드 변환장치가 전체적으로 공진구조이기 때문에 전체 길이가 매우 짧을 수 있어 소형화에도 유리하다.

### 도면의 간단한 설명

[0038] 도 1 은 본 발명에 따른 플라즈모닉 소자의 전체 구조를 나타낸 개념도이다.

도 2 는 제1 필터를 구성하는 수직 도파로의 너비와 길이에 따른 대칭 및 반대칭 SPP 모드의 투과량을 나타낸 도면이다.

도 3 은 제2 필터의 두께에 따른 반대칭 SPP 모드의 투과량을 나타낸 도면이다.

도 4 는 제2 필터의 두께에 따른 대칭 SPP 모드의 투과량을 각각 나타낸 도면이다.

도 5 는 컨버터의 깊이와 너비에 따른 대칭 SPP 모드의 투과율을 나타낸 도면이다.

도 6 은 플라즈모닉 소자의 구조를 나타낸 도면이다.

도 7 은 간격 1 을 변화시킴에 따라서 식 2 의 좌변과 우변의 변화를 나타낸 도면이다.

도 8 은 간격 1 을 결정하고, 간격 2 를 변화시킴에 따라서 플라즈몬 소자의 반대칭 SPP 모드 of 반사율의 변화를 나타낸 도면이다.

도 9 는 플라즈모닉 소자의 자기장 세기 분포를 도시한 도면이다.

**발명을 실시하기 위한 구체적인 내용**

- [0039] 이하, 첨부된 도면을 참조하여, 본 발명에 따른 바람직한 실시예에 대하여 설명한다. 본 실시예는 제한적인 것으로 의도된 것이 아니다.
- [0040] 아래에서는 첨부된 도면을 참고로 하여 본 발명의 실시 예에 대하여 본 발명이 속하는 기술 분야에서 통상의 지식을 가진 자가 용이하게 실시할 수 있도록 상세히 설명한다. 그러나 본 발명은 여러 가지 상이한 형태로 구현될 수 있으며 여기에서 설명하는 실시 예에 한정되지 않는다. 그리고 도면에서 본 발명을 명확하게 설명하기 위해서 설명과 관계없는 부분은 생략하였으며, 명세서 전체를 통하여 유사한 부분에 대해서는 유사한 도면 부호를 붙였다.
- [0041] 명세서 전체에서, 어떤 부분이 어떤 구성요소를 "포함"한다고 할 때, 이는 특별히 반대되는 기재가 없는 한 다른 구성요소를 제외하는 것이 아니라 다른 구성요소를 더 포함할 수 있는 것을 의미한다.
- [0042] 이하에서는 본 발명의 일 실시예에 따른 플라즈모닉 소자(1)의 구조와 함께,를 최적화 설계된 플라즈모닉 소자(1)의 제조 방법을 함께 설명한다. 본 발명에 따른 플라즈모닉 소자(1)는, 바디(100)와, 바디(100)를 관통하는 중앙 도파로(200)와, 상기 중앙 도파로(200) 상에 형성되는 제1 필터(300), 컨버터(400), 및 제2 필터(500)를 포함한다.
- [0043] 바디(100)는 전체적으로 금속 재질로 구성되며, 소정의 길이 및 폭을 갖는다. 이하에서는 도 1 을 참조하여, 도 1 의 가로 방향은 길이 방향으로 지칭하며, 상하 방향은 폭 방향으로 설명한다. 한편, 바람직하게는, 바디(100)는 은(Ag) 재질로 구성될 수 있다.
- [0044] 중앙 도파로(200)는 바디(100)의 내부를 관통하여 바디(100)의 길이 방향으로 연장되고 소정의 폭을 갖게 구성된다. 중앙 도파로(200)는 SPP 가 전파되도록 소정의 제1 유전율 값을 갖는 유전체로 구성된다. 바람직하게는, 일 실시예에 의하면, 중앙 도파로(200)를 구성하는 유전체는 실리콘 ( $\epsilon=12.15$ )으로 구성될 수 있으며, 그 폭은 200 nm 일 수 있다.
- [0045] 중앙 도파로(200)를 통해 SPP 가 전파된다. 도 1 에서, 좌측의 A 는 반대칭 SPP 가 전파되는 것을 나타내며, 우측의 B 는 대칭 SPP 가 전파되는 것을 나타낸다.
- [0046] 제1 필터(300)는 중앙 도파로(200) 상에 형성된다. 제1 필터(300)는 최우선적으로 대칭 SPP 모드가 투과하지 못하도록 하며, 이차적으로는 반대칭 SPP 모드 of 투과를 최대화하는 방향으로 최적화 설계된다. 이를 통해 대칭 SPP 모드 of 반사를 차단하고 반대칭 SPP 모드 of 상쇄간섭으로 제거될 확률을 높이도록 설계된다.
- [0047] 바람직하게는, 제1 필터(300)는 중앙 도파로(200)의 폭 방향 양 측으로 돌출된 2 개의 수직 도파로로 이루어진 notch 필터로 설계될 수 있다. 즉, 제1 필터(300)는 중앙 도파로(200)에 대해 각각 양 측에 형성된 제1 수직 도파로(310) 및 제2 수직 도파로(320)로 구성될 수 있다. 각각의 수직 도파로는 바디(100)의 폭 방향으로 소정의 길이를 갖고, 바디(100)의 길이 방향으로 소정의 너비를 갖는다.
- [0048] 제1 필터(300)의 최적화 설계는 중앙 도파로(200)에 수직인 수직 도파로의 너비와 길이에 따라서 투과량이 달라지는 것을 이용한다. 이러한 설계는 수직 도파로의 너비와 길이를 변화시킴에 따라서 대칭 및 반대칭 SPP 모드 of 투과량이 변화하는 것을 시뮬레이션하여, 대칭 SPP 모드 of 투과량이 최소화되면서 반대칭 SPP 모드 of 투과량이 상당량 확보되는 조건을 만족시키는 영역을 선택하는 방식으로 이루어진다.
- [0049] 예컨대, 도 2 의 경우, 너비 240 nm, 길이 330 nm 에서 대칭 SPP 모드 of 투과는 3 % 미만이며, 반대칭 SPP 모드 of 투과는 70 % 가 되었다.
- [0050] 이어서, 제2 필터(500)는 반대칭 SPP 모드 of 투과를 차단하고 대칭 SPP 모드는 통과하도록 설계한다. 바람직하게는, 반대칭 SPP 모드 of 투과를 완전히 차단하고, 대칭 SPP 모드는 완전히 통과하도록 설계됨이 바람직하다.

따라서, 반대칭 SPP 모드의 투과를 차단하고 설계를 단순화하도록 한다.

- [0051] 제2 필터(500)는 제1 유전체로 구성되는 중앙 도파로(200)의 일 구간을 다른 부분과 상이한 유전율을 갖는 제2 유전체 재질로 치환하여, 반대칭 SPP 모드가 특정 주파수 아래에서 컷오프(cutoff) 되는 현상을 이용한다. 제2 필터(500)를 구성하는 제2 유전체의 유전율이 높을수록 컷오프되는 주파수가 낮아지게 되므로, 제2 유전체의 유전율이 작아지면 존재하던 반대칭 SPP 모드가 사라질 수 있다.
- [0052] 이에 따라서, 제2 필터(500)는 반대칭 SPP 모드에 대해 장벽과 같은 역할을 하게 된다. 도 3 에 도시된 바와 같이, 장벽의 두께에 따라서 반대칭 SPP 모드의 투과율이 터널링 현상과 흡사한 경향을 보이며 감소하는 것을 확인할 수 있다. 반대칭 SPP 모드의 투과를 막기 위해 필요한 제2 필터(500)의 두께는 대략 150 nm 이상이다. 이를 편의상 임계 두께라고 한다.
- [0053] 한편, 도 4 에 도시된 바와 같이, 대칭 SPP 모드의 투과율과 제2 필터(500)의 두께와의 관계는 Fabry-Perot 공진에 의한 진동 양상을 보인다. 도 4 에서는 제2 필터(500)의 두께가 470 nm 의 배수일 때 거의 완전한 투과가 일어나는 것을 확인할 수 있다.
- [0054] 상기 임계 두께 이상의 두께를 갖되, 470nm 의 배수의 두께일 때 제2 필터(500)는 반대칭 SPP 모드의 투과를 차단하며 대칭 SPP 모드를 완전히 투과시킨다. 설계상 최소한의 두께를 가지는 것이 바람직하므로, 제2 필터(500)의 두께로는 470 nm 가 선택됨이 바람직하다.
- [0055] 이어서, 컨버터(400)는 공간 구조가 없는 단일 구조 기준으로 대칭 SPP 모드와 반대칭 SPP 모드간 변환 효율이 가장 높도록 설계된다. 제2 필터(500)가 대칭 SPP 모드를 완전히 투과시키도록 설계되므로 컨버터(400) 자체의 변환 효율이 높은 것이 전체 모드 변환의 효율에 더욱 기여할 수 있다.
- [0056] 컨버터(400)는 중앙 도파로(200)의 폭 방향 일 측에 형성된 사각형 그루브로 구성되며, 바디(100)의 길이방향으로 소정의 너비를 갖고, 바디(100)의 폭 방향으로 소정의 깊이를 갖는다.
- [0057] 컨버터(400)의 구체적인 설계는 제1 필터(300)의 설계와 유사한 방식으로 이루어질 수 있다. 즉, 반대칭 SPP 모드를 입사시키고, 컨버터(400)의 너비와 깊이를 각각 조절하였을 때 대칭 SPP 모드의 투과율이 어떻게 나타나는지 시뮬레이션 한다. 예컨대, 도 5 에 나타난 바와 같이, 너비가 200 nm 이고, 깊이가 70 nm 일 때, 효율이 43 % 로 최적화 됨을 알 수 있다.
- [0058] 이어서, 상기 제1 필터(300)와 상기 컨버터(400) 사이의 제1 간격(M)의 크기를 결정하고, 컨버터(400)와 제2 필터(500) 사이의 제2 간격(N)의 크기를 결정한다. 제1 간격(M)과 제2 간격(N)의 크기를 결정함으로써, 플라즈모닉 소자(1) 전체의 구조에서 반대칭 SPP 모드의 반사가 제거되도록 한다.
- [0059] 먼저, 제1 간격(M)은, 제2 간격(N)을 조절함에 따라서 반대칭 SPP 모드의 반사가 제거될 수 있는지 알려주는 조건을 이용하여 구한다. 이 조건은 플라즈모닉 소자(1) 전체의 복소반사계수를 나타내는 다음의 식 1 에 의해서 구할 수 있다.

$$R = r + \frac{t^2 \gamma \exp(ik_a L_2)}{1 - r' \gamma \exp(ik_a L_2)} \quad (\text{식 1})$$

- [0060]
- [0061] 여기에서  $R$  은 본 발명에 따른 플라즈모닉 소자(1) 전체의 반대칭 SPP 모드의 반사계수이며  $r$ ,  $r'$ ,  $t$  는 각각 제1 필터(300)와 컨버터(400)를 묶은 블록의 반대칭 SPP 모드에 대한 좌측 반사계수, 우측 반사계수와 투과계수이다. 즉, 도 6 을 참조하면, 제1 필터(300)와 컨버터(400)를 묶은 블록을 K 라고 할 때, 대칭 SPP 모드가 좌측에서 입사할 때, 좌측으로 도로 반사되는 것을 나타내는 좌측 반사계수가  $r$ , 우측에서 반사되어 도로 입사하는 대칭 SPP 모드를 우측으로 다시 반사시키는 것을 나타내는 우측 반사계수가  $r'$ , 대칭 SPP 모드가 투과하는 것을 나타내는 투과계수가  $t$  이다.

[0062] 아울러,  $\gamma$  는 제2 필터(500)에 의해 반사된 반대칭 SPP 모드가 겪는 위상변화를 나타내고  $k_a$  는 반대칭 SPP 모드의 전파상수이며,  $L_2$  는 제2 간격(N)의 크기를 나타낸다. 반사 및 투과계수인  $r$ ,  $r'$ ,  $t$  는 제1 간격(M)의 크기에 의존한다.

[0063] 상기 식 1 의 적용은 컨버터(400), 및 제1 필터(300)의 설계와는 무관하다. 식 1 은 에너지 손실을 무시할 수 있으며, 제2 필터(500)에서 대칭 SPP 모드의 반사를 무시할 수 있는 경우 만족된다. 에너지 손실은 바람직하지 아니하므로 제1 유전체와 제2 유전체는 광을 거의 흡수하지 아니하는 물질을 사용하고, 도파로 너비 또한 반드시 필요한 만큼만 좁혀 최대한 손실을 줄이는 바, 식 1 의 적용이 가능하게 된다.

[0064] 이어서, 제2 간격(N)의 크기  $L_2$  의 변화에 의해  $R$  이 0을 만족시킬 조건은 아래의 식 2 와 같이 주어진다.

$$\frac{|t|^2}{1-|r'|^2} = \left| r + \frac{t^2}{r'} \frac{|r'|^2}{1-|r'|^2} \right| \quad (\text{식 } 2)$$

[0066] 식 2 는 중앙 도파로(200)에서 반대칭 SPP 의 이동간 손실이 충분히 작고, 반대칭 SPP 모드가 제2 필터(500)에서 반사되는 과정에서 에너지 손실이 크지 아니한 경우 식 1 에서 도출될 수 있다.

[0067] 반대칭 SPP 의 이동간 손실이 적다는 것은 수식적으로는  $k_a$  의 허수부가 실수부보다 훨씬 작다는 것을 의미한다. 아울러, 반대칭 SPP 모드가 제2 필터(500)에서 반사되는 과정에서 에너지 손실이 작은 것은 반사율  $\gamma$  의 크기가 1 에 가깝다는 것이므로, 반사율  $\gamma$  의 절대값은 1 로 간주할 수 있다.

[0068] 또한, 제2 간격(N)의 크기  $L_2$  가 입사된 광의 수 파장 정도의 크기를 갖는다는 전제 하에,  $\exp(ik_a L_2)$  의 절대값은 1 에 가깝게 된다. 일 실시예에서는 광통신 대역인 1550 nm 의 광이 사용되었고, 이는 제2 간격

(N)의 크기  $L_2$  가 상기 입사된 광의 수 파장 정도의 크기를 가지므로,  $|\Phi_2| = |\exp(ik_a L_2)| \approx 1$  로 간주할 수 있다.

[0069] 상기와 같은 전제하에, 식 2 를 얻는 과정을 설명하면 아래와 같다.

[0070] 식 1 에서,  $\exp(ik_a L_2)$  를  $\Phi_2$  로 하면, 아래와 같은 식 3 이 도출된다.

$$R(\Phi_2) = r + \frac{t^2 \gamma \exp(ik_a L_2)}{1 - r' \gamma \exp(ik_a L_2)} = r + \frac{t^2 \gamma \Phi_2}{1 - r' \gamma \Phi_2} \quad (\text{식 } 3)$$

[0072]  $R$  을 복소평면에서 복소평면으로의 함수로 생각하면, 단위원  $\Phi_2$  는 (식3)의 변환에 의해서 복소평면

상의 원으로 보내진다.

[0073] 이를 보다 상세히 설명하면, 어떠한 복소평면에 관한 식이 아래의 식 4의 형태를 갖고, 변수의 절대값이 아래의 식 5를 만족할 경우, (식4)의 변환에 의해, 상기 복소평면에 관한 식의 함수값은 복소평면 상에서 원의 형태로 나타난다. 이때, 상기 원의 반지름과 중심점의 위치는 아래의 식 6, 및 식 7과 같다. 즉, 함수값은 복소평면 상에서 원의 형태로 나타나며, 상기 식의 각 계수를 통해 상기 원의 반지름과 중심점의 위치를 도출할 수 있다.

$$f(z) = \frac{az}{1+bz}$$

[0074] (식 4)

$$|z| = 1$$

[0075] (식 5)

$$\frac{|a|}{1-|b|^2}$$

[0076] 반지름 : (식 6)

$$-\frac{a|b|^2}{b(1-|b|^2)}$$

[0077] 중심점 : (식 7)

[0078] 한편, 상기 식 4의 형태가  $z_0 + f(z)$  일 경우, 상기 원은 단지 중심점의 위치만  $z_0$  만큼 이동하게 된다.

[0079] 위에서 설명한 바와 같이, 상기 식 1에서,  $\exp(ik_a L_2)$  를  $\Phi_2$  로 하여, 식 3이 도출되었으며, 이는 상기 식 4와 그 형태가 같다.

[0080] 또한,  $|\Phi_2| = |\exp(ik_a L_2)| \approx 1$  이므로, 상기 식 4 및 식 5의 형태와 조건을 만족하게 된다.

[0081] 이에 따라서,  $R(\Phi_2)$  는 복소평면 상의 원의 궤적을 갖게 된다.

[0082] 한편, 상기 식 4, 6, 7과 상기 식 3의 각 항을 대응시키면  $R(\Phi_2)$  가 나타내는 원의 반지름과 중심점의 위치를 구할 수 있다.

[0083] 먼저, 상기 식 4 와 상기 식 3 의 대응관계를 비교해보면 아래와 같다.

$$f(z) = \frac{az}{1+bz} \quad \text{식 (4)} \quad R(\Phi_2) = r + \frac{t^2 \gamma \Phi_2}{1-r' \gamma \Phi_2} \quad \text{식 (3)}$$

[0084]

[0085] 이에 따라서, 식 3 의 궤적을 복소평면 상에 나타낸 원의 반지름과 중심점의 위치는 아래와 같다.

$$\frac{|t|^2}{1-|r'|^2}$$

[0086] 반지름 : (식 8)

$$r + \frac{t^2}{r'} \frac{|r'|^2}{1-|r'|^2}$$

[0087] 중심점 : (식 9)

[0088] 이에 따라서,  $R(\Phi_2)$  값은  $\Phi_2$  를 변화시킴에 따라서 상기 반지름  $\frac{|t|^2}{1-|r'|^2}$  을 갖고 중심점의 위치가

$$r + \frac{t^2}{r'} \frac{|r'|^2}{1-|r'|^2}$$

인 원의 궤적 상에서 이동한다.

[0089] 여기서,  $\Phi_2$  는 제2 간격(N)의 크기  $L_2$  에 의존하므로, 결국 제2 간격(N)의 크기  $L_2$  를 변화시킴에 따라서  $R(\Phi_2)$  의 값이 상기 원의 궤적 상에서 변화하게 된다.

[0090] 여기서,  $R(\Phi_2)$  의 값이 0 이기 위해서는 상기 원의 궤적이 원점을 지나야 한다. 즉, 원점에서 중심점 사이의 거리가 반지름과 같아서 상기 원의 궤적이 원점을 통과해야 한다. 이에 따라서, 반지름의 크기를 나타내는 식 8 과, 원점과 중심점 사이의 거리를 나타내는 식 9 가 같아야 하는 바, 이에 따라서 상기 식 8 과 식 9 를 등호로 엮으면 상기 식 2 가 도출된다.

[0091] 이어서, 제1 간격(M)의 크기를 변화시켜가며 상기 식 2 의 좌변과 우변의 값을 각각 그래프로 나타내고, 좌변과 우변의 값이 같아질 때의 제1 간격(M)을 찾는다. 즉, 제1 간격(M)의 크기를 바꾸어가며 상기 식 2 를 만족시키는 제1 간격(M)의 크기를 찾는다. 상기 설명한 바와 같이, 식 2 의 변수  $r$ ,  $r'$ ,  $t$  는 필터 1 과 컨버터 (400)를 묶은 블록의 반대칭 SPP 모드에 대한 좌우 반사계수와 투과계수를 나타내는 바, 제1 간격(M)이 변화함

에 따라서 변화한다. 이에 따른 좌변과 우변의 값을 그래프로 나타내면 도 7 와 같으며, 좌변의 값과 우변의 값이 일치하는 지점이 각각 원으로 표시되었다. 즉, 좌변의 값을 나타낸 그래프와 우변의 값을 나타낸 그래프가 서로 만나는 지점이 표시되었다.

[0092] 이어서, 상기 과정에 따라서 도출된 제1 간격(M)의 값에 따라서 상기 변수  $r$ ,  $r'$ ,  $t$  를 결정하고, 이어

서 제2 간격(N)의 크기  $L_2$  가 변화함에 따른  $R(\Phi_2)$  의 값을 구한다.

[0093] 도 8 을 참조하면, 식 2 의 조건을 만족시키는 제1 간격(M)의 크기의 경우에만 제2 간격(N)의 크기를 조절하여

복소반사계수  $R(\Phi_2)$  의 크기가 0 이 되도록 할 수 있음을 알 수 있다. 즉, 제1 간격(M)의 크기가 상기 식

$R(\Phi_2)$  2 를 만족하는 120 nm 일 때, 제2 간격(N)의 크기의 변화에 따라서  $R(\Phi_2)$  는 0 을 지나고 있다. 반면에, 제1 간격(M)의 크기가 상기 식 2 를 만족하지 않는 180 nm 또는 300 nm 인 경우에는, 제2 간격(N)을 아무리 변

화시켜도  $R(\Phi_2)$  의 값은 0 을 지나지 않고 있다.

[0094] 결론적으로, 상기 식 2 를 만족하는 제1 간격(M)의 크기를 찾은 후, 제1 간격(M)을 식 1 에 대입하여 플라즈모닉 소자(1) 전체 구조의 반대칭 SPP 모드와 복소반사계수가 0 이 되는 제2 간격(N)의 크기를 찾음으로써, 플라즈모닉 소자(1) 전체의 구조에서 반대칭 SPP 모드와 반사가 제거되도록 한다.

[0095] 실시예에 따라서, 제1 간격(M)의 크기를 120 nm 로 하고, 제2 간격(N)의 크기를 320 nm 으로 하여, 최종 변환효율이 47 % 이고, 대칭 SPP 모드 투과 이외의 성분은 모두 함하여 0.5 % 미만이 되는 구조를 갖는 플라즈몬 소자가 설계될 수 있다. 이와 같이 설계된 플라즈몬 소자에 대해 반대칭 SPP 모드를 넣는 경우의 자기장 세기 분포는 도 9 에 도시된 바와 같으며, 반사 등으로 발생하는 맥놀이 등이 매우 약해짐을 확인할 수 있다.

[0096] 본 발명에서 제안하는 구조를 갖는 플라즈모닉 소자(1)에서는 입력되는 모드에 대해 단 하나의 출력 모드만이 방출될 수 있다. 이는 부수적으로 발생된 노이즈를 제거하기 위해 필요한 각종 필터나 광 아이솔레이터(optical isolator)의 필요성을 줄여줄 수 있으므로 광학 시스템 설계가 더 간단해 질 수 있음을 의미한다. 또한, 본 발명에 따른 구조는 극히 단순한 형태를 가지는 부분들의 조합 만으로 구성되기 때문에 형상 최적화 기법에 비해 훨씬 단순한 형태를 가지는 이점이 있다. 마지막으로 모드 변환장치가 전체적으로 공진구조이기 때문에 전체 길이가 매우 짧을 수 있어 소형화에도 유리하다.

[0097] 이상에서는 바람직한 실시예에 대하여 도시하고 설명하였지만, 본 발명은 상술한 특정의 실시예에 한정되지 아니하며, 청구범위에서 청구하는 본 발명의 요지를 벗어남이 없이 당해 발명이 속하는 기술분야에서 통상의 지식을 가진 자에 의해 다양한 변형실시가 가능한 것은 물론이고, 이러한 변형실시들은 본 발명의 기술적 사상이나 전망으로부터 개별적으로 이해되어서는 안될 것이다.

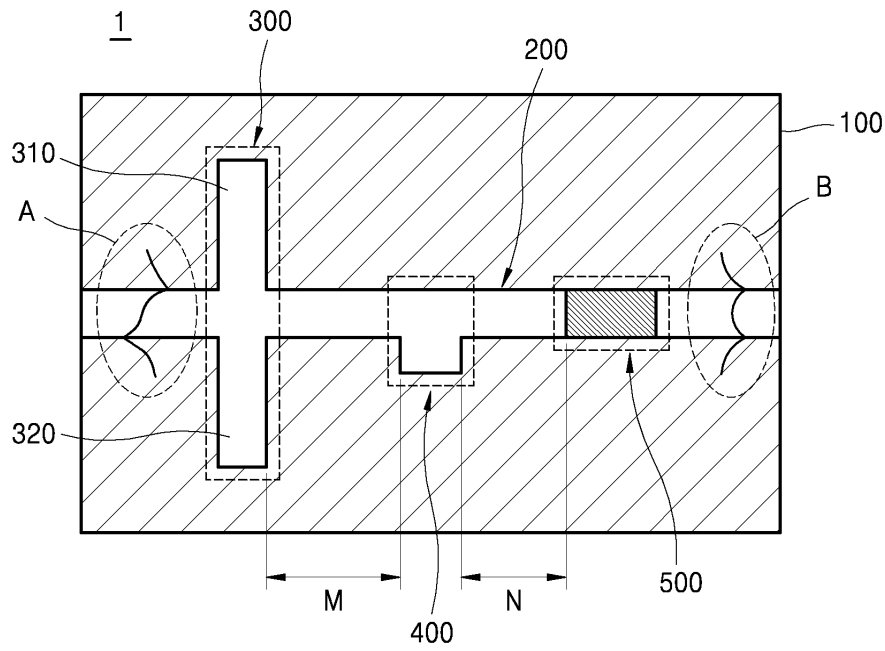
**부호의 설명**

- [0098] 1: 플라즈모닉 소자
- 100: 바디
- 200: 중앙 도파로
- 300: 제1 필터
- 310: 제1 수직 도파로
- 320: 제2 수직 도파로
- 400: 컨버터

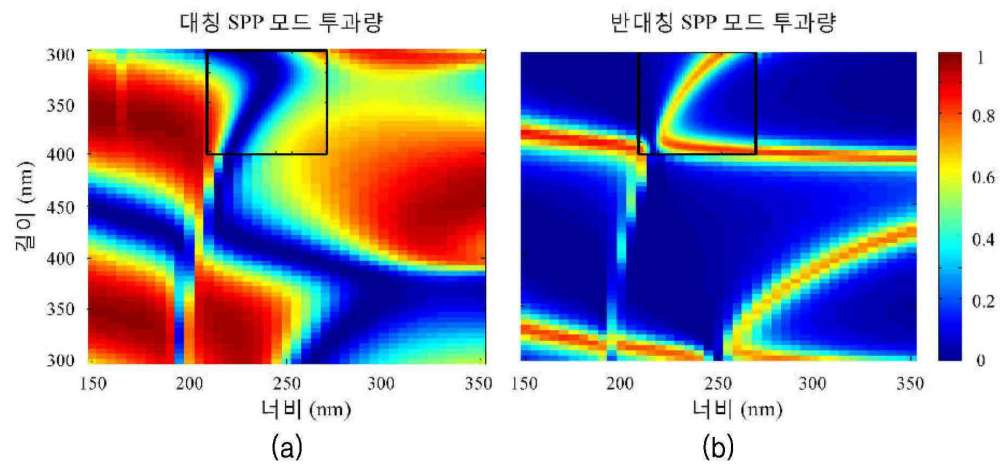
500: 제2 필터

도면

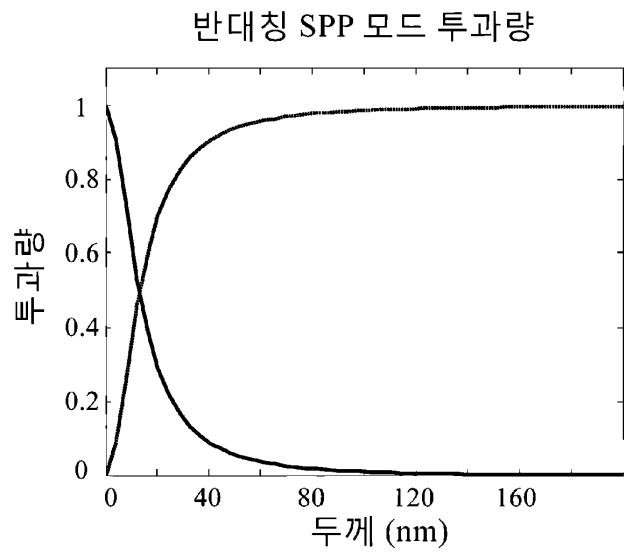
도면1



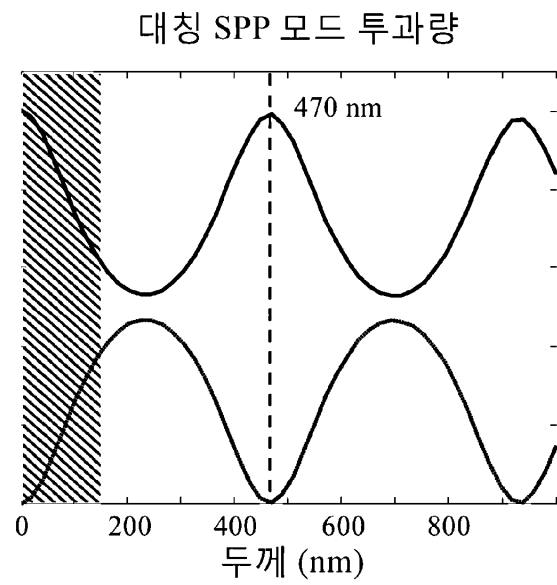
도면2



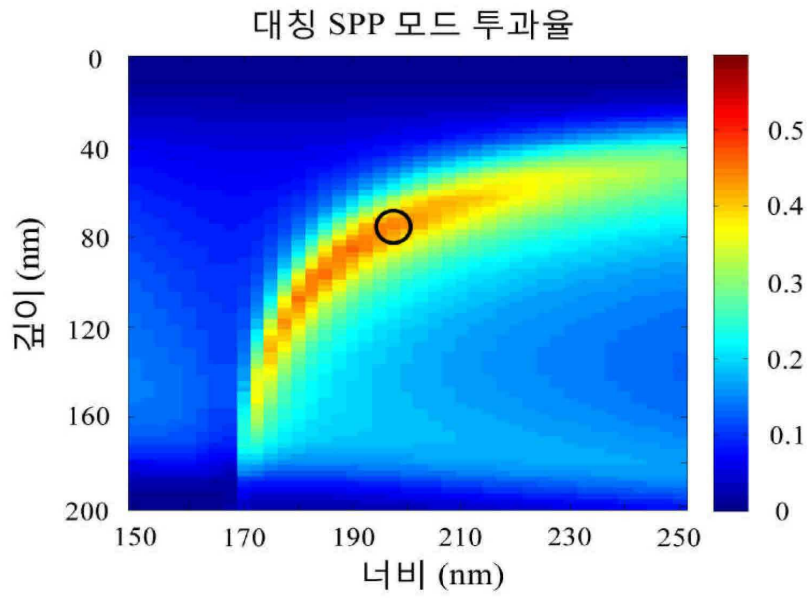
도면3



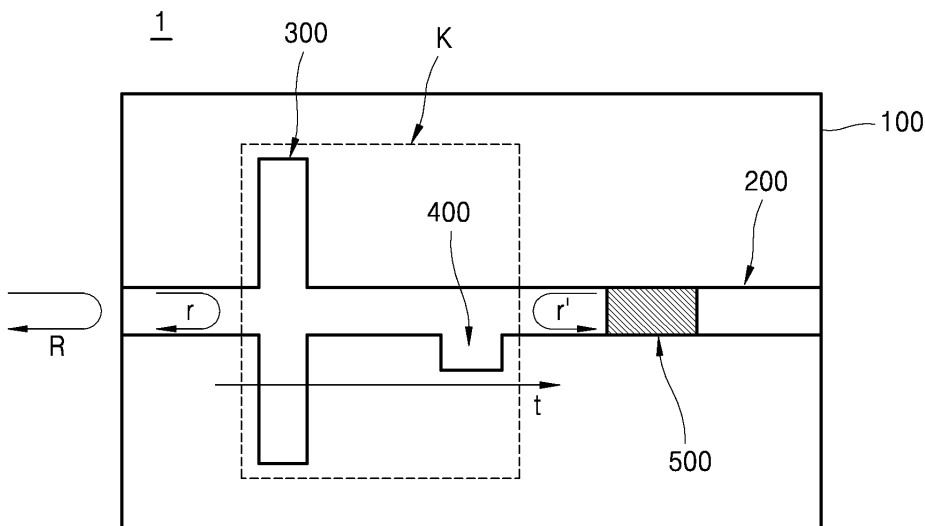
도면4



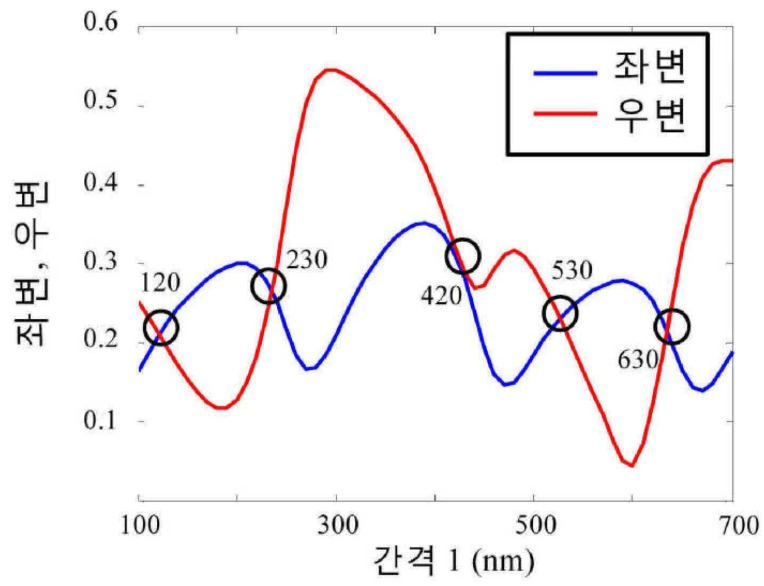
도면5



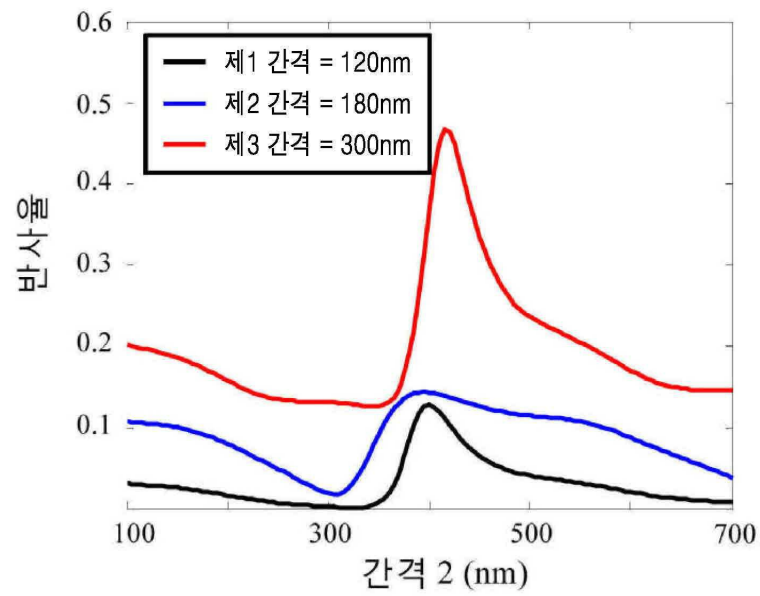
도면6



도면7



도면8



도면9

