

금속선 광 도파로를 이용한 장거리 표면-플라즈몬 파장가변 필터

김기철 · 송석호[†]

한양대학교 물리학과 마이크로광학 연구실
⑨ 133-790 서울특별시 성동구 행당동 17번지

원형식 · 이관수

(주)삼성전기 중앙연구소
⑨ 443-803 경기도 수원시 영통구 매탄 3동 314번지

(2006년 5월 8일 받음, 2006년 7월 21일 수정본 받음)

금으로 된 금속선 광 도파로를 따라 속박되는 장거리 표면 플라즈몬을 이용하여 파장 가변 필터를 설계하고 제작하였다. 실리콘 기판 위에 제작된 금속선 도파로는 두 층의 열-광학 폴리머 사이에 샌드위치 구조로 끼어 있도록 설계되었다. 도파로의 바로 윗면에는 유전체로 된 Bragg 회절격자가 적합한 주기로 제작되어, 중심 파장이 광통신 파장대 (1520~1570 nm)에 있으면서 높은 소광률(~25 dB)을 갖는 파의 반사가 가능했고, 전체손실은 25 dB/cm 이하로 나타났다. 또한, 제작된 파장 가변 필터가 폴리머의 열-광학적 특성에 의해 파장가변 필터 소자로서의 응용이 가능함을 확인했으며, 금속선 광 도파로에 직접 연결된 전극 구조에 동시에 가해준 전류에 의해 파장이 가변 될 수 있음을 실험적으로 확인하였다.

주제어 : Surface plasmon, Metal stripe waveguide, Tunable wavelength filter

I 서 론

현재 광통신 분야의 큰 흐름 중 하나는 소자의 크기를 줄여 집적도를 높이는 데 있다. 광소자의 집적도를 높이기 위해서는 광 도파로와 도파 모드의 크기를 줄이는 것, 그리고 도파 모드를 제어하기 위한 어떤 구조 -주로 전극과 도선 그리고 광 민감성 매질로 이루어진- 와 도파 모드간의 상호작용을 극대화하는 것이 요구된다. 전자는 광소자의 횡적 집적도를, 후자는 종적 집적도를 높여주는데, 그 이유는 상호작용의 세기가 커지면 도파 모드를 제어하기 위해 요구되는 도파로의 길이는 줄어들기 때문이다. 본 논문에서, 이러한 요구사항을 만족하면서도 기존과는 다른 새로운 방법으로서, 표면 플라즈몬-풀라리톤(surface plasmon-polariton: SPP) 도파로를 기반으로 한 능동형 광소자를 구현하였다.

SPP는 금속과 유전체의 경계면에서 형성되는 전하 밀도 파동의 에너지 양자(quasi-particle)이다. SPP의 물리적 실체는 금속 내부에 있는 자유전자의 집단적 쌍극자 진동이기 때문에 필연적으로 전자기파와 결합한 상태로 존재한다.^[1-3] 이러한 결합은 SPP가 가지는 운동량이 광자보다 큰 경우에만 나타나기 때문에^[4] 전자기파를 속박하기 위해서는 기존의 유전체 도파로에서의 전반사와는 다른 메커니즘이 필요하다. 특히, 금속의 두께가 빛의 투과 깊이(skin depth) 보다 작아져 수십 nm 정도로 얇을 때, 양쪽 경계면을 따라 전파하는

두 SPP는 서로 결합하여 하나의 도파 모드를 형성한다.^[2,5] 이 도파 모드는 금속 단면의 중심을 기준으로 횡파 성분 자기장이 대칭인 경우(symmetric modes)와 반대칭인 경우(antisymmetric modes)가 서로 크게 다른 전파특성을 나타내는데, 대칭인 경우에 도파 모드의 공간적 크기는 두 SPP가 결합하지 않았을 때보다 증가하며, 금속 내부에 존재하는 전자기 에너지 밀도가 작아져 저항손실로 인한 도파 모드의 내부 손실이 줄어든다.^[2] 그렇기 때문에 이 모드는 멀리 전파하고, 도파 모드가 가지는 대부분의 에너지가 금속을 둘러싸고 있는 유전체 영역에 존재한다. 한편, 반대칭인 경우는 그 반대의 상황으로서 횡적 속박은 강해지고, 전파 손실은 커지게 된다.^[2,6,7] 이러한 전파특성의 차이 때문에, 대칭 SPP를 장거리 표면 플라즈몬-풀라리톤(long range SPP: LR-SPP), 반대칭 SPP를 단거리 표면 플라즈몬-풀라리톤(short range SPP: SR-SPP)이라 부른다.

본 논문의 SPP 능동형 광소자는 LR-SPP를 이용한다. 이미 지적한 바와 같이 LR-SPP는 클래딩을 형성하는 유전체 영역에 대부분(99% 이상)의 도파 모드 에너지와 전자기장 분포를 가지고 있기 때문에, 클래딩 민감성에 기초한 능동형 광소자로서 많은 장점을 가지게 된다.^[6-9] 소자의 길이는 기존의 유전체 도파로 소자에 비해 짧아지며, 같은 굴절률 차에 대해 민감도는 높아지게 된다. 이는 클래딩 영역에 회절격자를 구성할 경우, 파장 선택성도 동시에 예민해짐을 의미한다. 또 하나의 장점은 도파로의 코어에 해당하는 금속 박막이 광 도파로 역할 뿐만 아니라 전극으로도 동시에 사용

[†] E-mail: shsong@hanyang.ac.kr

될 수 있다는 것이다. 금속선을 주기적으로 요철(step-in-width)을 주거나 격자 슬릿 형태(metal-gap)로 만들어 LR-SPP 파장가변 필터를 구현하는 방식은 이미 보고된 바가 있다.^[10] 그러나, 본 논문에서는 LR-SPP을 속박하는 금속선은 그대로 놓아두고, 금속선 표면에 유전체 격자를 만들어 파장가변 필터를 구현하는 새로운 방식을 제안하였다. 따라서, 본 논문에서 제안된 유전체 격자를 사용한 LR-SPP 파장가변 필터는, 금속선에 전류를 통과시키는 경우에 기존의 주기적 구조를 갖는 금속선 광 도파로 방식에 비해 전기적인 저항을 감소시켜 전력소모를 줄일 수 있으며, 또한 LR-SPP 도파모드의 광손실도 줄일 수 있는 장점이 있다. LR-SPP는 전기쌍극자의 진동이기 때문에 전자기장은 횡파 성분(TM 편광)만을 가지므로, 편광 민감성 소자에의 응용 가능성을 가지고 있다.^[11,12] 특히, 대부분의 전기-광학 매질(electro-optic medium)은 편광에 의존하여 나타나기 때문에 전기-광학 매질을 클래딩으로 하는 금속 도파로 소자에 LR-SPP를 적용하면 많은 장점을 가질 것으로 예상된다.

본 논문에서는 LR-SPP를 이용하는 능동 광소자의 한 예로서, 금속선 위에 유전체 Bragg 회절격자가 형성되어 있는 LR-SPP 파장 가변필터(tunable wavelength filter: TWF)를 실험적으로 구현하였다. 제작된 TWF는 앞서 설명한 LR-SPP 능동 광소자의 장점인 파장 선택성과 클래딩의 민감성이 우수하며, 금속 도파로를 전극으로도 이용하여 굴절률의 손쉬운 변화를 줄 수 있기 때문에, 소자의 효율 및 제작 용이성 뿐만 아니라 광소자의 집적화 면에서도 큰 장점이 있다.

II. 장거리 표면 플라즈몬(LR-SPP)

금속의 두께가 유한해지면, SPP는 금속의 위-아래 면에 존재하는 각각의 SPP가 서로 결합하게 된다. 금속 박막의 두께가 전자기파의 투과깊이 보다 작은 값을 가지면 각 경계에서 존재하는 SPP는 결합하여 슈퍼모드를 형성한다. Fano 모드라고 불리는 이 슈퍼모드는 금속과 유전체의 광학상수뿐만 아니라 금속의 두께에 의존하는 분산관계를 가지게 된다.^[2] 금속박막에서 결합된 슈퍼모드는 금속 내의 전기장 분포에 따라서 대칭 모드와 반대칭 모드로 구분된다. 금속박막에서 SPP가 여기 되었을 때 전하와 전장의 관계를 그림 1과 같이 도식적으로 표현할 수 있으며, 슈퍼모드의 종류에 따른 전기장의 특성을 직관적으로 파악할 수 있다. SPP의 진행방향을 양의 x-방향으로 가정하였을 때, 그림 1(a)와 같이 금속면과 수직한 전기장이 금속 내부에서 0인 값을 가지지 않는 슈퍼모드를 대칭 모드라고 하며, 그림 1(b)와 같이 금속 면과 수직한 전기장이 금속내부에서 0인 값을 가지는 슈퍼모드를 반대칭 모드라고 한다. 이때 대칭 모드는 금속 내부에서 전기장의 부호가 바뀌지 않으며, 반대칭 모드는 금속내부에서 전기장의 부호가 바뀌게 된다. 이런 슈퍼모드는 S_b (symmetric bound), a_b (anti-symmetric bound)로 표현하며 아래첨자 b는 면 수직방향으로 방사 손실(radiative loss)이 없는 속박(non-

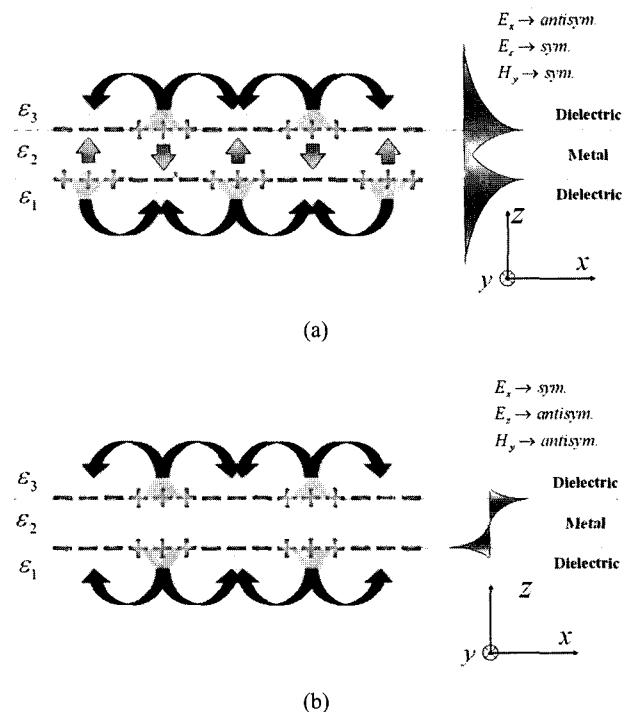


그림 1. (a) LR-SPP와 (b) SR-SPP 금속 도파로에 유도된 표면 전하와 전기장 분포.

adiative, 혹은 bound) 모드임을 표시한다.^[2] 분산관계를 계산함으로써 이들 두 SPP의 전파 특성이 어떻게 달라지는지 분석할 수 있다. 다층 박막 구조에서 전이행렬(transfer matrix)이 특이해를 가질 조건을 찾으면 수식 (1)과 같은 SPP의 분산관계(dispersion relation) 방정식을 얻을 수 있다.^[2,13,14]

$$(\varepsilon_1 \varepsilon_3 s_2^2 + \varepsilon_2^2 s_1 s_3) \tanh[s_2 h] + \varepsilon_2 s_2 (\varepsilon_3 s_1 + \varepsilon_1 s_3) = 0 \quad (1)$$

여기에서, SPP의 전파상수를 β 라 했을 때, $s_j = (\beta^2 - \varepsilon_j k_0^2)^{1/2}$, ε 과 h 는 각각 매질의 유전상수와 금속 박막의 두께를 나타낸다. 아래첨자 1, 2 그리고 3은 각각 해당하는 변수가 금속 아래에 있는 유전체, 금속 그리고 금속 위의 유전체에 해당됨을 표시한다. 전자기파의 주파수가 진공 중 파장 1550 nm에 해당할 때 금속의 두께에 따른 전파상수의 실수부분과 허수부분을 수식 (1)로 주어지는 분산방정식을 통해 계산하면 그림 2의 결과를 얻는다. β_r 과 β_i 는 전파상수의 실수부분과 허수부분을 각각 나타낸다. 그림 2(a)에서 금속의 두께가 얇아짐에 따라 s_b 의 유효굴절률(β_b/k_0)이 주변 유전체의 굴절률(1.5)에 접근함을 볼 수 있으며, 이와는 반대로 의 유효굴절률은 주변 물질의 굴절률보다 매우 커짐을 볼 수 있다. 금속의 두께가 1 nm인 경우 a_b 의 유효굴절률은 9 이상으로 커지며, s_b 의 유효굴절률은 1.50001으로 주변 유전체의 굴절률과 거의 차이가 없다. 이는 금속의 두께가 얇을 때 s_b

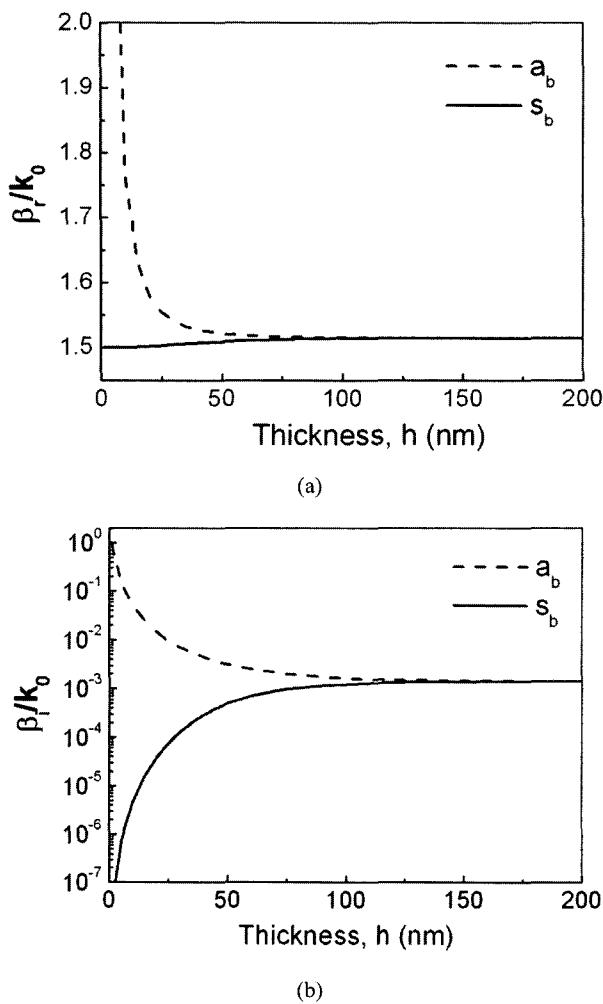


그림 2. 1550 nm 파장에서 금 박막의 두께에 따른 (a)유효굴절률과 (b)전파손실계수. 금의 유전상수는 이며, 유전체의 유전상수는 이다.

는 약하게 속박된 모드이며, a_b 는 강하게 속박된 모드임을 나타낸다. 모드가 강하게 속박되면 모드 분포가 금속주변에 많이 존재하여 금속의 흡수에 의한 진행손실이 증가함을 예측할 수 있다. 이는 그림 2(b)에서 명확히 확인할 수 있는데, 금속의 두께가 얇아짐에 따라 s_b 의 진행손실이 작아지고, a_b 의 전파손실이 증가함을 볼 수 있다. 참고로 전파손실계수 β_r/k_0 는 ‘전파 거리가 파장의 몇 배인가?’에 해당하는 값의 역수로 간주할 수 있다. 즉, 이 값이 0.001이라면, ‘이 모드의 전파 거리는 파장의 1000배’라는 의미가 된다. 금속박막이 얇은 경우 s_b 모드의 전파손실이 a_b 모드의 전파손실보다 10⁷ 배 이상 작아짐을 볼 수 있다. 즉, s_b 모드는 금속의 두께가 20 nm 이하일 경우 수 cm 이상 빛을 전송할 수 있다. 금속의 두께가 작아짐에 따라 유효굴절률이 증가하는 a_b 모드의 특성은 유전체 도파로의 속박모드^[15]와는 상이한 것으로, 모드 크기가 회절한계(diffraction limit)보다도 훨씬 작아질 수 있음을 의미하며, SPP가 나노미터 크기를 가지는 광소자 제

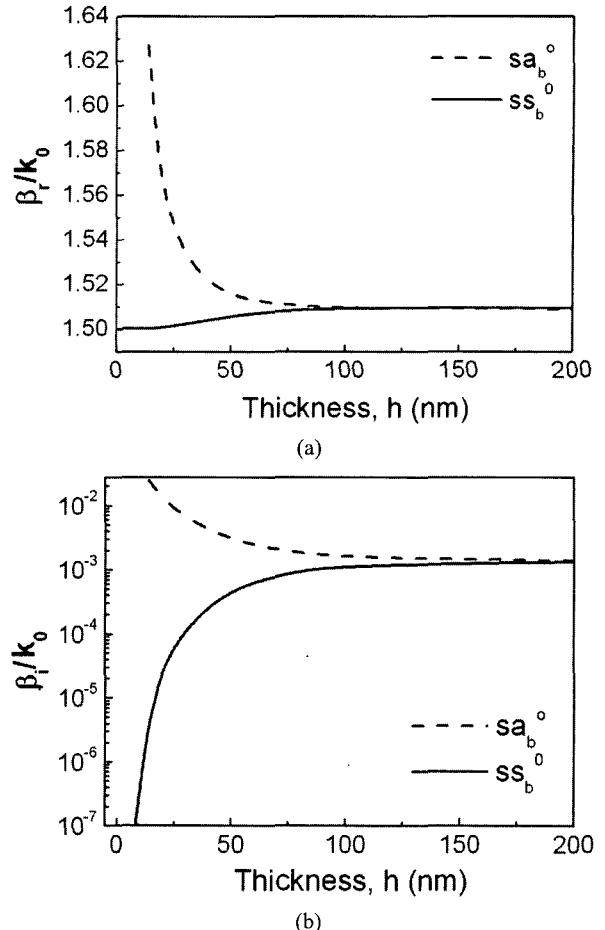


그림 3. 1550 nm 파장에서 계산한 폭이 인 Au 선의 두께에 따른 와의 (a)분산곡선과 (b)전파손실계수.

작에 응용될 수 있음을 암시한다.^[16]

이제, 본 논문을 통해 제작/측정/평가된 금속선 광 도파로에 대해 이론적으로 분석해 보기로 한다. 그림 3은 금속 도파로의 두께에 따른 ss_b^0 와 sa_b^0 의 유효굴절률(a)과 전파손실계수(b)의 분산 특성을 나타낸 그림이다. 여기서, 모드의 표시를 위해 사용한 xy_z^m 와 같은 방식은 편리성을 위해 널리 사용되고 있는데, x 는 금속선의 폭 방향으로 모드가 대칭(s)인지 반대칭(a)인지를 나타내며, y 는 금속선의 두께 방향으로 대칭(s)인지 반대칭(a)인지를 나타낸다. 그리고 m 은 모드의 차수를 표시하며, z 는 모드가 방사손실을 가지는가 (l ; leaky) 가지지 않는가(b ; bound)를 나타낸다.^[16] 금속선의 폭이 유한한 경우 식 (1)과 같이 주어지는 해석적 분산 방정식은 존재하지 않는 것으로 알려져 있기 때문에, FDM(Finite-Difference-Method)를 적용하여 수치해석적으로 계산하였다. 계산에 사용된 금의 유전상수는 1550 nm의 파장에서 $\epsilon_{au} = -118 + i11.58$ 로 감쇠전반사법으로 측정한 값을 사용하였으며, 주변 물질의 유전상수는 2.25, 금속선의 폭은 5 μm이다. 그림 3을 보면 금속의 두께가 얇아짐에 따라 ss_b^0 모드의

유효굴절률과 전파손실계수가 모두 감소하며, sa_b^0 는 유효굴절률과 전파손실계수가 모두 증가하는 경향을 보인다. 이들은 그림 2에서 보여진 폭이 무한한 금속박막에서 s_b 와 a_b 의 경향과 일치한다. 금속의 두께가 20 nm 이하에서 ss_b^0 모드의 진행손실 ($-10 \times \log_{10}[\exp(-2i\beta_z z)]$)은 8 dB/cm 이하이며, 금속의 두께를 줄이면 0.1 dB/cm 이하가 됨을 알 수 있다. 그림에서 금속선의 두께가 100 nm 이상일 때 ss_b^0 와 sa_b^0 의 유효굴절률이 거의 같음을 볼 수 있는데, 이는 금속선의 두께가 증가함에 따라 금속선 위아래 면에서 여기된 SPP 간에 결합이 약해지기 때문이다. 본 연구에서 분석한 금속 선의 폭은 5 μm 로 금속의 두께가 두꺼워져도 금속선의 모서리에서 발생하는 SPP에 의한 영향이 적어 ss_b^0 모드가 무한박막의 s_b 모드와 거의 같은 값을 가지는 것으로 예상된다.

III. 금속선 광 도파로의 제작공정 및 특성

3.1. 열-광학 폴리머(Thermo-optic polymer: TOP)

TOP는 금속선의 주변 유전체로 사용된 물질로서, 본 논문에서 제작된 필터에서 파장 가변 특성을 가져오는 핵심적인 역할을 한다. 최근에 많이 개발되고 있는 TOP는 광통신 파장대에서 광학적 손실이 매우 적고, 주변 환경에 대한 안정성이 좋으며, 복굴절률(birefringence)이 작고, 시간에 따른 변형성 감소도 많이 향상되어 최근 전자기-광학 폴리머와 더불어 광 도파로 및 광학 금속박막에 관련된 연구에서 많이 사용되고 있다.^[17] 특히, TOP 굴절률의 조정을 연속적으로 손쉽게 할 수 있어 Mach-Zehnder 간섭계 구조나 Y-branch 형 구조, 방향성 결합기 구조의 고효율 광학 스위치와 VOA(variable optical attenuator), WDM(wavelength division multiplexing)과 관련된 소자들의 제작에 널리 쓰이고 있다.^[18-20]

본 실험에 주로 사용된 TOP는 ZPU12-470(Fluorinated acrylate photopolymer, ChemOptics Inc.)로서 질소 환경의 자외선 파장 영역대에서 광활성 경화가 이루어지며, 박막으로 기판에 안착되는 공정이 간단하여 두께의 조절 역시 매우 용이하다. 이 TOP는 실온에서의 기본 굴절률이 1.47로서 굴절률 오차는 ~10.4 정도이며, 열-광학 계수는 를 가지므로 온도가 10 K 만큼 증가함에 따라 굴절률은 0.0017 만큼 선형적으로 감소하게 된다. 본 폴리머의 온도에 대한 내성이 30 0°C 까지도 유지되므로, 0.02 정도 범위의 굴절률의 변화에 필요한 약 120 K의 열 공급 상태에서도 안정적으로 작동할 것으로 예상된다. 그림 4는 금속선 주변의 TOP의 굴절률과 유효굴절률(상대전파상수)과의 관계를 FDM으로 계산하여 나타낸 그래프로서, 폴리머의 굴절률이 1.47에서 1.45로 0.002 간격으로 변화한다고 가정하여 계산한 LR-SPP 모드의 유효굴절률이 도시되어 있다. 예상되는 굴절률 가변 영역에서의 유효굴절률이 주변 물질의 유전상수의 변화량 만큼 충분히 선형적으로 변화함을 확인할 수 있다. 폴리머의 열-광학적 특성으로 굴절률이 1.47에서 1.45로 변하게 될 때 기대

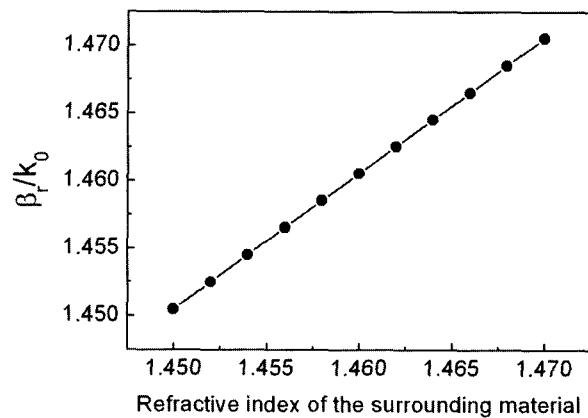


그림 4. 폴리머 굴절률이 1.45~1.47로 0.002 간격으로 변화할 때 계산된 LR-SPP의 유효굴절률 변화.

할 수 있는 파장 가변 영역은 약 22 nm로 예상된다.

실험에서는 기판 위에 TOP를 스펀 코팅하였으며, 폴리머를 지탱할 기판으로는 소자 제작 후 시료의 처리가 용이한 실리콘 기판을 사용하였다. 코팅된 TOP는 질소 환경에서 UV 광원으로 노광하여 경화하였는데 광학적인 특성을 보다 좋게 하기 위하여 질소 환경의 170°C 가열판에서 30분 이상 열처리를 하여 마무리했다. 3.4 정도의 높은 굴절률 값을 갖는 실리콘 기판에 의한 LR-SPP 모드의 전파손실을 막기 위하여 TOP를 이상의 두께로서 충분히 두껍게 하였다. 만일 금속 도파로와 실리콘 기판과 맞닿은 아래쪽 유전체의 두께가 이하로 얇아지게 되면 출력단으로 나오는 모드의 크기인 MFD(Mode field diameter)와 진행손실이 불안정적으로 나오게 된다.^[17] 위쪽 클래딩으로 쓰인 TOP는 금속 도파로 아래 쪽 TOP와 동일한 물질을 동일한 조건으로 도포하였다.

3.2. 금속 도파로 제작

앞서 소개된 TOP가 금속 도파로의 클래딩 역할을 한다면, 도파로의 코어 역할을 하는 유한한 두께의 금속 박막을 정확하고 깨끗하게 제작하는 것은 공정상 매우 중요하다. LR-SPP의 특성상 만약 금속 도파로 주변에 이물질이 남거나 경계면이 지저분하게 되면 광 도파로의 진행손실이 증가하게 되고, 필터의 기본적인 성능에 큰 영향을 미치게 된다. 본 논문의 금속 도파로는 마스크와 UV 노광을 이용한 PR lift-off 방법으로 제작되었고, 금속 물질로는 금(Au)을 사용되었으며, 1550 nm에서 금의 유전상수는 $\epsilon_{au} = -118 + i11.58$ 이다. 금은 열 증착기(thermal Evaporator)를 이용하여 TOP 위에 0.02 nm/s의 증착율로 20 nm 두께를 증착하였다.

그림 5는 5 μm 의 넓이와 20 nm의 두께를 갖는 금속 도파로의 (a)AFM(Atomic Force Microscope) 이미지와 흰색 점선으로 표시된 부분에서 (b)두께 분포이다. 그림 7(b)의 두께 분포를 보면 금속선 부분의 두께는 평균적으로 ~ 20 nm로 설계치와 일치하고 있으며, 사각형으로 표시된 부분의 표면 거

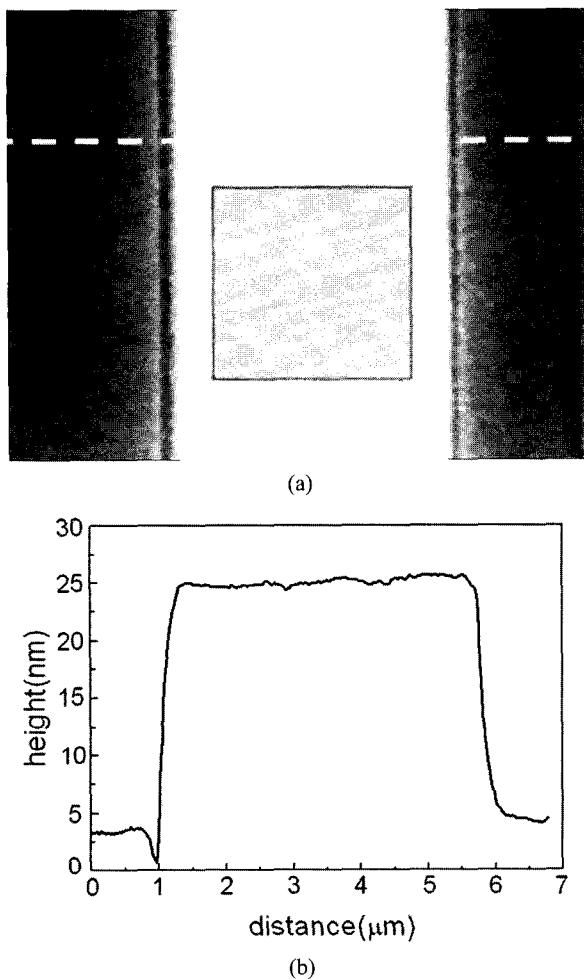


그림 5. 넓이를 가지는 제작된 금속 도파로의 (a)AFM 사진과 (b) 높이 분포.

칠기는 약 9.7 \AA 으로 산란 효과가 금속 도파로의 전파손실에 약간의 영향을 끼칠 것으로 예상된다.

3.3. 단일 금속 도파로에서 광 전송 특성

제작된 LR-SPP의 광학적 특성을 광통신 파장 영역(~ 1500 nm)에서 측정하였다. 광원으로는 1550 nm의 중심파장을 가지고 선폭이 60 nm인 ASE(Amplification of spontaneous emission) 광원과 선폭이 1 pm이고 1520~1640 nm 영역에서 파장 가변이 가능한 파장가변 레이저 다이오드(tunable laser diode; 81640A, Agilent)를 사용하였다. 제작된 LR-SPP 금속 도파로와 단일모드 광섬유 간의 광신호 입출력은 단면결합(butt-coupling)방법을 사용하였다. LR-SPP 모드가 TM-편광이므로 ASE 출력단에 편광자(polarizer)와 편광조절기(polarization controller)를 사용하였으며, 파장가변 LD에서는 편광조절기만 부착하여 사용하였다. 광섬유와 금속 도파로의 정렬을 위해 5-축 조절이 가능한 정밀 XYZ-stage와 600배의 배율을 가지는 광학 현미경이 사용되었고, 금속 도파로의 모드분포는 적외선 CCD 카메라를 이용해 출력단에서 관찰하

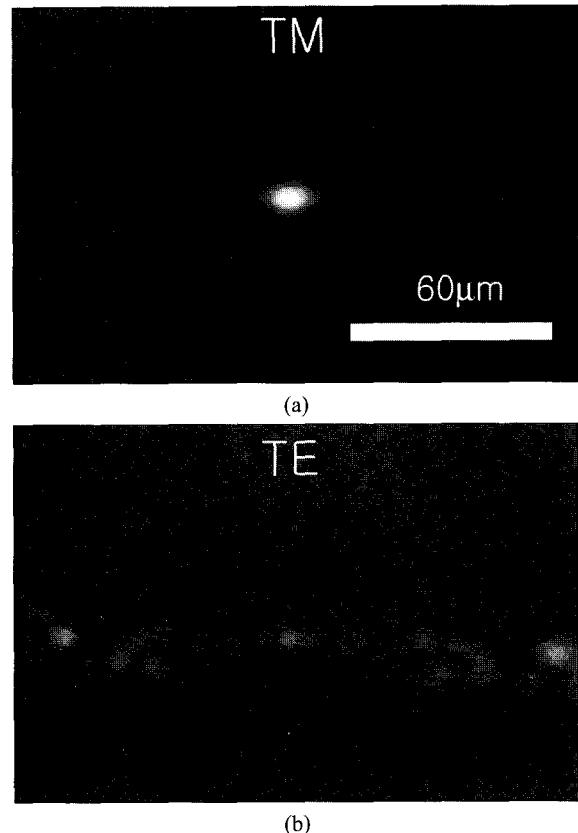


그림 6. (a) TM-편광으로 여기된 LR-SPP 모드, (b) TE-편광으로 여기된 LR-SPP 모드.

였으며, 금속 도파로를 투과한 광의 스펙트럼 및 광의 세기는 OSA(optical spectrum analyzer; MS9710B, Anritsu)와 GaAs PD(photodiode; 81624A, Agilant)를 이용하여 측정하였다.

그림 6은 넓이를 가지는 금속 도파로에서 ASE 광원으로부터 입사되는 빛이 (a)TM-편광과 (b)TE-편광일 때의 모드분포이다. 그림 6(a)에서 TM-편광된 광은 금속 도파로에 잘 속박되어 진행함을 볼 수 있으나, 그림 6(b)의 TE-편광된 광은 금속 도파로에 거의 속박되지 못하고 주변 유전체로 퍼져 있음을 확인할 수 있다. 이와 같이 LR-SPP가 TE-편광된 광에 대해서 속박 모드가 관측되지 않고 주변 TOP 유전체 박막으로 분산되는 이유는, 금속 도파로의 금속선 양단 모서리 부분에서 존재할 수 있는 TE성분의 LR-SPP 모드에 대한 기여도가 매우 작기 때문이다.^[7]

그림 7은 금속 도파로의 폭에 따른 광 투과특성(transmittance)을 도파로 길이에 대해 측정한 결과이다. 제작한 금속 도파로의 두께는 20 nm, 도파로 선폭은 각각 2 μm , 4 μm , 5 μm , 7 μm 이며, 제작된 시료를 5 mm ~ 30 mm 길이로 절단하여 금속 도파로 길이에 따른 투과세기를 측정하였다. 광원은 ASE를 사용하였으며, 투과세기는 1520 nm ~ 1580 nm 파장대역을 갖는 ASE 광의 전체 투과세기가 OSA로 측정된 것이다. 그림 7에서 직선들은 측정된 각각의 결과를 선형의

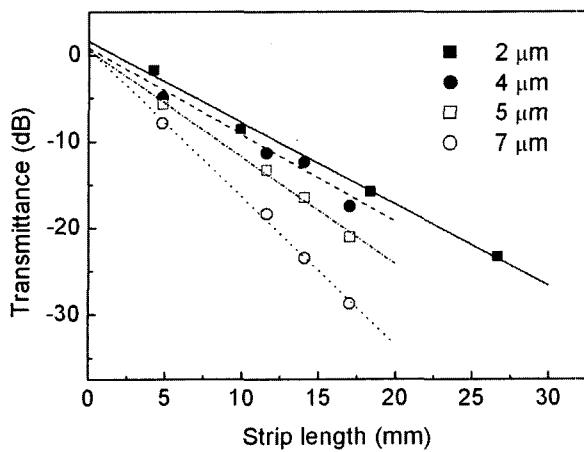
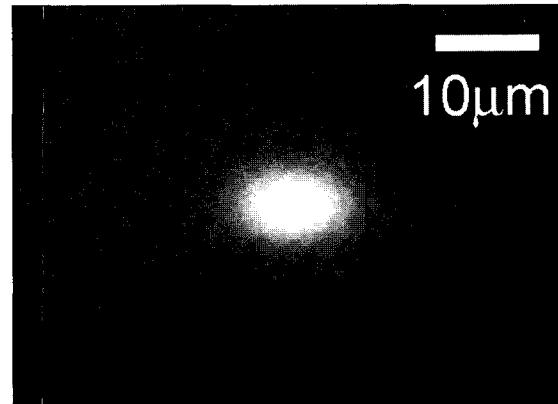


그림 7. 금속 도파로의 선폭과 길이에 따른 투과도 측정치. (금속 도파로 두께: 20 nm, TOP 굴절률: 1.47)

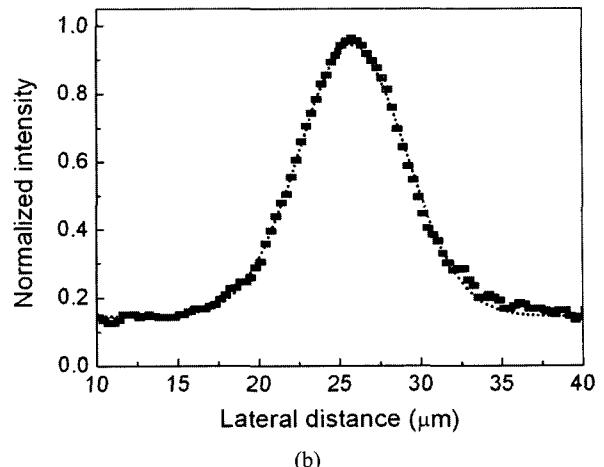
표 1. 금속 도파로의 넓이에 따른 진행손실 및 광섬유와의 결합손실. 금속선의 두께는 20 nm이고, 주변 유전체의 굴절률은 1.47이다.

| Width() | Propagation loss() | Coupling loss () |
|----------|---------------------|-------------------|
| 2 | 9.43 | 1.63 |
| 4 | 10.04 | 0.85 |
| 5 | 12.36 | 0.57 |
| 7 | 17.07 | 0.69 |

함수로 fitting한 그래프로 기울기는 진행손실(propagation loss)을, y-절편은 광섬유와의 결합손실(coupling loss)을 의미한다. 금속 도파로의 길이가 짧아질수록 투과세기가 증가하며, 선폭이 좁아짐에 따라 투과세기의 기울기가 작아진다. 투과세기의 기울기가 작아진다는 것은 금속 도파로의 진행손실이 작다는 것을 의미한다. 표 1은 그림 7의 fitting 결과로부터 구한 금속 도파로의 폭에 따른 진행손실과 광섬유와의 결합손실을 나타낸 것으로, 금속 도파로의 넓이가 좁아짐에 따라 진행손실이 감소함을 볼 수 있다. 한 예로, 금속 도파로의 선폭이 5μm일 때 진행손실은 12.36 dB/cm, 결합손실은 0.57 dB 정도로 측정되었다. 측정된 진행손실 값은 실험 조건과 동일한 구조에서 FDM로 계산된 진행손실인 4.78 dB/cm에 비해 매우 큰 값이 측정되었는데, 이는 실험과정에 있어서 많은 개선점이 있음을 암시한다. 광섬유와 금속 도파로 간의 결합손실이 도파로 선폭이 5μm일 때 가장 작은 이유는 단일모드 광섬유의 모드크기와 가장 근접하기 때문이다. 그림 8은 폭이 5μm인 금속 도파로에 속박된 LR-SPP의 모드 분포로서, 가로 방향의 모드 분포가 세로 방향의 모드 분포보다 다소 넓게 분포함을 볼 수 있다. 가우시안 함수로 fitting하여 얻은 모드 크기는 가로와 세로 방향으로 각각 9.7 μm, 6.7 μm이며, 가로 방향의 모드 크기는 광섬유의 모드 크기 ~10.5 μm와 유사함을 볼 수 있다.



(a)



(b)

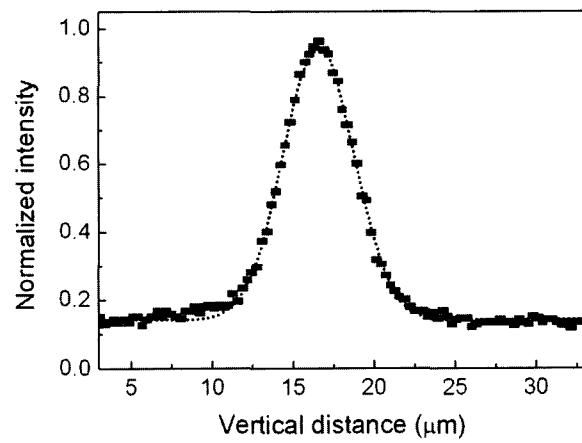


그림 8. (a) LR-SPP 모드 사진, (b) 수평 방향의 모드 크기, (c) 수직 방향의 모드 크기. (금속 도파로 두께: 20 nm, 폭:

3.4. 회절격자가 있는 금속 도파로의 특성

앞 절에서 분석한 단일 금속 도파로의 특성을 기반으로 Bragg 회절격자가 금속 도파로 표면에 형성된 구조의 특성을 알아보았다. FDM으로 계산된 금속 도파로 전파상수와 Bragg 격자의 주기를 계산하고, 감광제(photoresist: PR)로

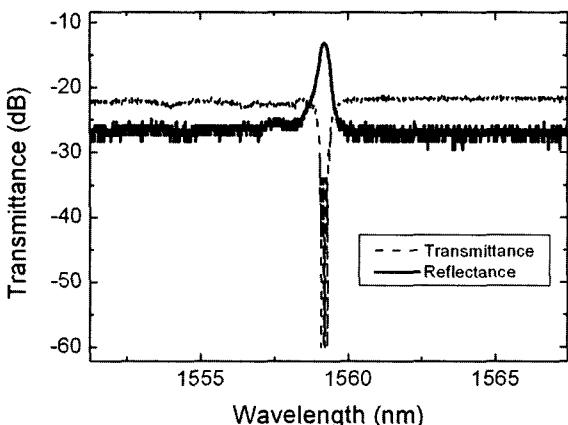


그림 9. LR-SPP 소자의 투과 및 반사 스펙트럼 측정 결과. (금속 도파로의 두께: 20 nm, 폭: , 회절격자 주기: 530nm, 회 절격자 두께: 100nm)

Bragg 격자를 제작하여 PR의 조건에 따른 필터의 특성을 조사하여 PR 격자의 사용 가능성을 우선적으로 조사하였다. PR 격자의 사용 가능성을 조사과정은 다음과 같다.

본 TWF의 파장 선택 특성의 가장 기본적인 역할을 하는 것이 Bragg 격자이다. Bragg 격자는 금속 도파로에서 진행되는 SPP의 일정 파장만을 반사시키는데 이용되는데, 반사파의 중심 파장은 Bragg 격자의 주기에 $\text{LiNbO}_3 \lambda_{cen} = 2\Lambda n_{eff}$ 의 관계를 가진다. 여기서, λ_{cen} 는 반사파의 중심 파장, n_{eff} 는 LR-SPP 유효굴절률, Λ 는 Bragg 격자 주기이다. TOP의 굴절률이 1.47인 경우 LR-SPP 모드의 유효굴절률은 1.4707(그림 4)으로, 반사파의 중심 파장이 1560 nm인 경우의 격자 주기는 530 nm이다.

파장필터용 금속 도파로의 회절격자 제작과정은 다음과 같다. 금속 도파로는 앞의 3-2절에 설명한 바와 같이 실리콘 기판 위에 $15\mu\text{m}$ 이상의 두께로 TOP을 도포한 후, 두께가 20 nm, 선폭이 $5\mu\text{m}$ 이 되도록 Au 금속 도파로를 형성하였다. 형성된 금속 도파로 위에 적당히 회석된 양성 감광제 (positive PR)를 스플 코팅하여, PR로 된 Bragg 격자의 두께를 최종적으로 조정할 수 있도록 하였다. 본 실험에서는 AZ6612K(Hoechst) PR을 AZ1500 회석제에 회석시켜 농도를 조절하여 두께를 조절하였다. PR:회석제 비율은 30%, 10%, 7%로 하였으며, 회석된 PR의 두께는 회석 농도에 대하여 각각 ~ 300 nm, ~ 150 nm, ~ 100 nm 정도였다. 그러나, He-Cd laser(442 nm)를 이용한 홀로그램 간섭 방법으로 격자를 생성한 후에는 전체적인 PR의 두께가 보다 얇아지므로 최종 제작된 격자의 두께는 위의 두께보다도 더욱 작은 두께를 가질 것으로 예상된다. 회절격자의 두께와 굴절률은 반사되는 모드의 파장 폭($\Delta\lambda$)과 소광율(extinction ratio)을 결정하는 중요한 변수가 된다. Bragg 격자가 만들어진 후 단일 금속 도파로를 제작할 때와 동일한 방법으로 위쪽 클래딩을 TOP로 코팅하였고, 시험용으로 제작된 Bragg 격자는 금속 도파로가 제작된 기판의 전체 면에 형성되었다.

그림 9는 PR로 제작된 Bragg 회절격자에 의해 반사된 파

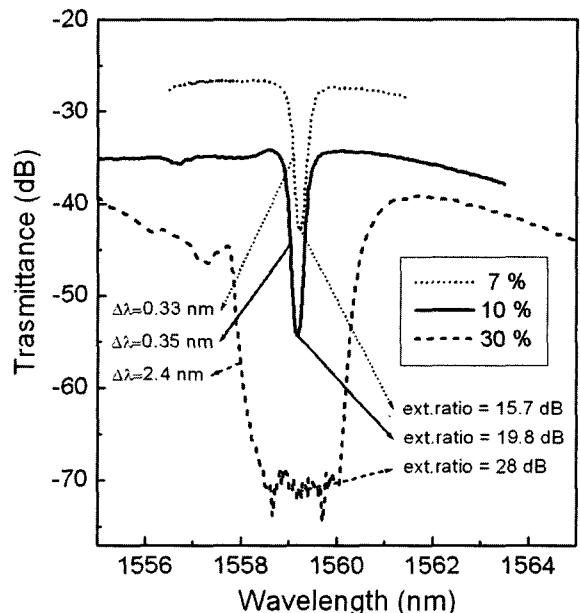


그림 10. PR 농도에 따른 LR-SPP 필터의 투과 스펙트럼.

를 Circulator를 이용해 측정한 반사도(reflectance) 스펙트럼(실선)과 투과도(transmittance) 스펙트럼(점선)을 측정한 결과이다. 광원은 2 mW의 파장가변 LD를 사용하였으며, Bragg 격자의 반사도는 약 10 dB의 소광율을 가지고 있으며, 투과도는 약 10 dB 이상의 소광율을 보인다.(본 실험에 사용된 검출기의 성능문제로 절대값이 -43 dB 이하에서는 측정 감도가 부족하여, 투과도 측정치가 부정확하게 나타나 있다.) 따라서, 이러한 결과는 PR로 된 격자에 의해 LR-SPP 모드의 파장 선택이 충분히 가능함을 보여준다.

그림 10은 Bragg 격자의 두께에 따른 LR-SPP 파장 필터의 상대적인 스펙트럼 투과 특성을 ASE 광원으로 측정한 결과이다. 회절격자의 길이는 농도가 10%, 7%인 경우에는 7.1 mm, 30%인 경우에는 4.2 mm 였으며, 격자의 두께에 따라서 필터의 투과특성이 많이 다름을 볼 수 있다. 회석된 PR을 사용해 Bragg 격자를 얇게 만들수록 반사되는 모드의 스펙트럼 선폭($\Delta\lambda$)은 2.4 nm ~ 0.33 nm 까지 더 좋아지나, 소광률은 28 dB ~ 15.7 dB로 떨어진다. 회석비가 30%인 경우에는 필터의 길이가 짧음에도 불구하고 소광률이 25 dB 이상 되었지만, 이 경우 격자의 두께에 의한 MSW의 금속선 위아래의 굴절률 차이에 의한 진행손실이 ~35 dB/cm 이상으로 격자가 없을 때 보다 ~20 dB/cm 정도 증가했다. PR의 농도가 10%인 경우에는 금속도파로의 진행손실이 ~25 dB/cm 정도로 측정되었으며, 회석비가 7%인 경우에도 비슷한 진행 손실을 보였다. 금속도파로 구조에 PR 같이 굴절률이 높은 물질($\sqrt{\epsilon} \approx 1.60$)로 격자를 형성할 때에는 금속선 위아래로의 굴절률 차이에 의한 진행손실의 증가도 고려되어야 함을 알 수 있었다. 위 결과로부터 본 실험에서는 두 조건이 잘 결합되는 10% 농도의 PR 용액을 기준으로 LR-SPP 파장가변용 Bragg 격자를 금속 도파로 위에 형성하였다.

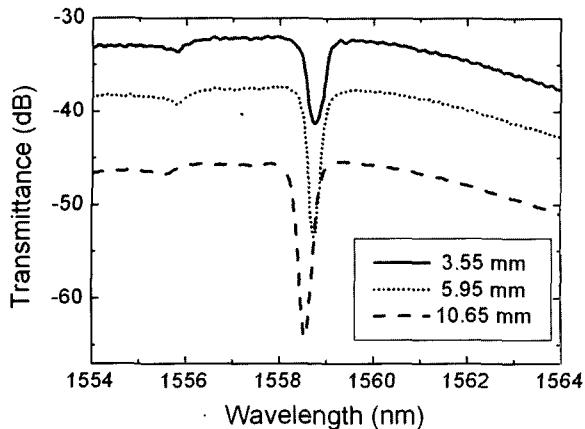


그림 11. 격자의 길이에 따른 LR-SPP 금속 도파로의 투과 스펙트럼.

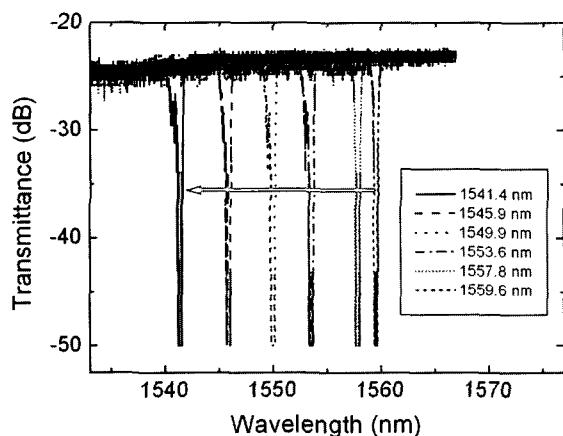


그림 12. 외부에서 가한 열에 대한 LR-SPP 필터의 파장 가변 특성.

LR-SPP 파장필터의 특성은 격자 굴절률의 변조에 많이 의존하지만 격자의 길이에도 많은 의존성을 가진다. 그림 11은 10%로 회색된 PR 용액을 이용해 전면에 회절격자가 새겨진 몇 가지 길이의 필터들의 투과 특성을 나타낸 그래프이다. Bragg 격자의 길이가 3.55 mm, 6.95 mm, 10.65 mm 등으로 길어지면 전체적인 진행손실이 -45dB 이하로 점차 증가하며, 회절격자의 길이가 짧아지면 소광률이 줄어들게 되므로, 격자의 두께와 길이를 조절함으로써 제작시의 소광율과 전체 손실을 선택적으로 조절할 수 있음을 알 수 있다. 회절격자의 길이 조절은 홀로그램 간섭을 이용해 PR 격자를 넓게 형성한 후, 원하는 길이를 갖는 마스크 패턴을 이용해 한 번 더 노광을 하여 격자 길이를 선택하는 방식으로 제작하였다.

IV. LR-SPP 파장 가변 필터

4.1. 외부 열원 구조에 의한 파장 특성

앞에서와 같이 TOP 클래딩과 코어, 금속 도파로, 그리고 PR Bragg 격자의 제작이 모두 완료된 후에, 제작된 LR-SPP의 열-광학적 특성을 알아보기 위하여 TOP의 굴절률이 변함

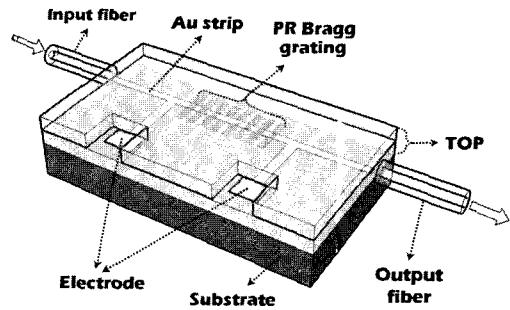


그림 13. 파장 가변 LR-SPP 필터의 구조도.

에 따라 중심 파장이 정상적으로 변조되는지를 실험해 보았다. 그림 12는 외부에서 열을 공급하여 투과 스펙트럼에서 소광된 중심파장의 이동을 시험해 본 그래프이다. 격자의 길이는 10.3 mm로 제작되었으며, 외부 열원으로 열선을 이용하여 실리콘 기판의 밑면에서 시료 전반에 열을 가하였다. 중심파장에서의 소광율은 25 dB 이상이었다. 우선적으로 LR-SPP 필터의 열-광학적 변조특성이 있는지를 알아보기 위한 시도이므로, 변환된 온도에 대한 정량적인 자료는 측정하지 않았으며, 광원으로는 2 mW의 파장가변 LD가 사용되었다. 시료에 열을 가함에 따라 중심 파장이 1559.6 nm에서 1541.4 nm 까지 점차적으로 단파장 방향으로 이동하는 것을 볼 수 있었으며, 외부에서 가해준 열에 의한 파장가변 범위는 약 18.2 nm이었다.

4.2. 전극을 이용한 열원 구조에 대한 파장 가변 특성

그림 13은 전극이 연결된 LR-SPP 파장필터의 개략도이다. TOP 사이에 금으로 된 직선 LR-SPP 금속 도파로 위에 PR 격자(Bragg grating)가 형성되어 있으며, 금속 도파로 양단에 입력(input fiber), 출력(output fiber) 단이 있다. 금속 도파로가 있는 부분에만 열을 가해주기 위해 두 개의 전극(electrode)이 LR-SPP 금속 도파로에 연결되어 있다. 이는 정량적으로 정확하게 측정된 전류를 가하여 국부적으로 금속 도파로에 열을 가해주기 위함이다. 전극과 금속 도파로는 동일한 조건 하에서 동시에 제작된 것으로, 전극을 통해서 LR-SPP 모드의 누수가 생길 가능성이 있다. 전극에 의해 LR-SPP 도파모드에 약간의 변형이 일어나고 진행손실도 접합부분에 의해서 약간은 증가하리라 예상되지만, 전극의 폭이 모드 크기에 비하여 작으면 큰 영향이 없는 것으로 보고되고 있다.^[21] 두 전극 사이의 금속 도파로의 길이는 8 mm, 단위길이당 금속선의 저항은 0.4~0.5 kΩ이었다. Bragg 격자의 길이는 UV 노광을 통하여 길이가 5 mm, 폭이 2 mm가 되도록 하였다. 전류는 μA 단위까지 전류측정이 가능한 직류 전원공급기를 이용하여 전극에 주입하였다.

그림 14는 전극구조를 갖는 LR-SPP 파장필터에 전류를 주입하면서 ASE 광원을 이용하여 측정한 파장 가변 특성이다. 필터에 가해지는 전류가 0 mA에서 3.06 mA, 3.72 mA 까지

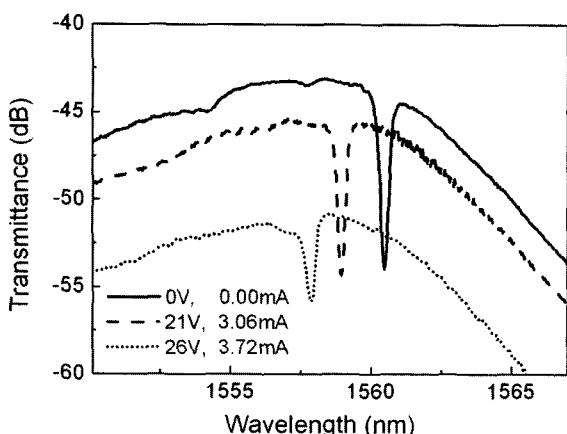


그림 14. 전류에 따른 LR-SPP 필터의 파장 가변 특성. (LR-SPP 필터 길이: 19mm, 회절격자 길이: 4mm) 그림 13. 파장 가변 LR-SPP 필터의 구조도.

증가함에 따라 필터의 중심 파장이 단파장 방향으로 이동함을 확인할 수 있었다. 따라서, LR-SPP 금속 도파로에 직접 전류를 가하는 방식으로, 광신호를 전류신호로 직접 변조할 수 있음을 증명하였다. 그러나, 이러한 LR-SPP 파장필터의 전극구조는 주입되는 전류가 증가함에 따라 필터 투과도가 감소되는 문제점도 내포하고 있다. 금속선에 전류가 주입됨에 따라 금속선에서 발생하는 열이 금속선 주변에 고르게 퍼지지 않게 되면서 금속선에서 멀어질수록 온도가 지수함수적으로 낮아지는데, 이 때 발생하는 굴절률의 공간적인 구배 (gradient) 분포가 광 투과도의 감소, 즉, LR-SPP 진행손실의 증가를 야기한 가장 큰 원인이라고 볼 수 있다. 또한 열이 가해진 금속선 부분의 LR-SPP 모드와 열이 가해지지 않은 금속선 부분의 LR-SPP 모드의 크기가 다르기 때문에 발생하는 모드 간의 결합손실 역시 이러한 현상에 기여를 하며, 금속선에서 발생한 열에 의하여 금속선의 저항이 증가하는 것도 진행손실의 증가 원인이 될 수 있다.^[22] 따라서, 넓은 영역의 가변 특성을 가지는 파장 필터의 제작에 금속 도파로 자체를 전극으로 이용하는 구조는 실용화 측면에서 보다 개선되어야 할 점들을 많이 내포하고 있음을 알 수 있다.

V. 결 론

금속으로 된 광 도파로를 이용하여 LR-SPP 파장가변 필터를 설계 및 제작하였으며, 열-광학 폴리머를 이용한 LR-SPP 소자의 파장가변 필터특성을 분석하였다. 대칭적인 유전체 내부에 형성된 두 개의 기본 LR-SPP 모드(ss_b^0, as_b^0)에 대해, 금속 도파로의 두께에 따른 분산관계를 FDM 방법을 이용하여 분석하였다. 진행손실이 가장 적은 ss_b^0 모드가 LR-SPP 파장필터에 가장 적합하였으며, 주변 유전체 물질의 굴절률 변화에도 매우 민감한 분산특성을 가지고 있었다. 또한, 도파로 폭이 커질수록 LR-SPP 금속 도파로의 진행손실이 증가하였으며, 도파로 길이에 대해서는 도파로 폭에 관계없이 진행

손실이 선형적으로 증가하였다. 두께가 20 nm, 폭이 5 μ m 정도인 금속 도파로에 형성된 LR-SPP의 ss_b^0 모드는 단일모드 광섬유와 유사한 크기를 가지고 있어서 결합손실이 0.57 dB 이하로 매우 적었다. LR-SPP 파장가변 소자에서 핵심 역할을 하는 Bragg 격자로서 유전체인 PR을 금속 도파로 위에 형성하여도 매우 우수한 파장필터 기능을 수행할 수 있음을 알았는데, 이는 기존에 제안되었던 방식인 금속 도파로 측면을 주기적으로 요철을 주거나 불연속 적으로 격자구조를 만드는 것들에 비하여 진행손실이 적고 제작상에도 많은 장점이 있을 것으로 판단된다. 특히, LR-SPP 도파로 자체에 직접 전류신호를 가하는 경우에는 LR-SPP 금속 도파로에 변형을 많이 주지 않는 유전체 Bragg 격자를 이용하는 본 논문의 방법이 매우 유력하다. 그러나, LR-SPP 금속 도파로에 광신호와 동시에 직접 전기신호를 가하는 경우에 있어서는 진행손실의 증가로 인하여 소자로서의 응용 측면에서 아직은 한계를 가지고 있으며, 효율적인 열 분산과 전극구조의 최적화 등 앞으로 보다 많은 개선 연구가 필요하다.

감사의 글

본 연구는 정보통신부 정보통신연구진흥원의 IT 학술기초 연구 지원 사업(05-기초-066)으로 수행되었으며, 또한 한양대학교의 과학기술 장학금(제2005-HG0659호) 지원에 감사드립니다.

참고문헌

- [1] H. Raether, *Surface plasmons on smooth and rough surfaces and on gratings* (Springer-Verlag, Berlin, German, 1988), pp. 4-37.
- [2] J. J. Burke and G. I. Stegeman, "Surface-polariton-like waves guided by thin, lossy metal films," *Phys. Rev. B*, vol. 33., no. 8, pp. 5186-5201, 1986.
- [3] J. Yoon, S. H. Song, C. Oh, and P. S. Kim, "Back-propagating modes of surface polaritons on a cross-negative interface," *Opt. Express*, vol. 13, no. 2, pp. 417-427, 2005.
- [4] 윤재웅, 송석호, 오차환, 김필수, "금속과 원손잡이 메타-물질의 경계면에서 형성되는 표면 폴라리톤의 전파 특성," *한국광학회지*, vol. 15, no. 2, pp. 89-99, 2004.
- [5] D. Sarid, "Long-range surface-plasma waves on very thin metal films," *Phys. Rev. Lett.*, vol. 47, no. 26, pp. 1927-1930, 1981.
- [6] P. Berini, "Plasmon-polariton modes guided by a metal film of finite width," *Opt. Lett.*, vol. 24, no. 15, pp. 1011-1013, 1999.
- [7] P. Berini, "Plasmon-polariton waves guided by thin lossy metal films of finite width: Bound modes of

- symmetric structures," Phys. Rev. B, vol. 61, no. 15, pp. 10484-10503, 2000.
- [8] S. I. Bozhevolnyi, J. Erland, K. Leosson, P. M. W. Skovgaard, and J. M. Hvam, "Waveguiding in surface plasmon polariton band gap structures," Phys. Rev. Lett., vol. 86, no. 14, pp. 3008-3011, 2001.
- [9] B. Lamprecht, J. R. Krenn, G. Schider, H. Hitlacher, M. Salerno, N. Felidj, A. Leitner, F. R. Aussenegg, and J. C. Weeber, "Surface plasmon propagation in microscale metal stripe," Appl. Phys. Lett., vol. 79, no. 1, pp. 51-53, 2001.
- [10] S. Jette-Charbonneau, R. Charbonneau, N. Lahoud, G. Mattiussi, and P. Berini, "Demonstration of Bragg gratings based on long-ranging surface plasmon polariton waveguides," Opt. Express, vol. 13, no. 12, pp. 4674-4682, 2005.
- [11] I. R. Hooper and J. R. Sambles, "Surface plasmon polaritons on thin-slab metal gratings," Phys. Rev. B, vol. 67, 235404, 2003.
- [12] S. Park, G. Lee, S. H. Song, C. H. Oh, and P. S. Kim, "Resonant coupling of surface plasmons to radiation modes by use of dielectric gratings," Opt. Lett., vol. 28, no. 20, pp. 1870-1872, 2003.
- [13] J. Chilwell and I. Hodgkinson, "Thin-films field-transfer matrix theory of planar multilayer waveguides and reflection from prism-loaded waveguides," J. Opt. Soc. Am. A, vol. 1, no. 7, pp. 742-753, 1984.
- [14] C. Chen, P. Berini, D. Feng, S. Tanez, and V. P. Tzolov, "Efficient and accurate numerical analysis of multilayer planar optical waveguides in lossy aniso-
- tropic media," Opt. Express, vol. 7, no. 8, pp. 260-272, 2000.
- [15] K. Okamoto, Fundamentals of optical waveguides (Academic Press, New York, USA, 2000), pp. 26-27.
- [16] B. Wang and G. P. Wang, "Surface plasmon polariton propagation in nanoscale metal gap waveguides," Opt. Lett., vol. 29, no. 17, pp. 1992-1994, 2004.
- [17] T. Nikolajsen, K. Leosson, I. Salakhutdinov, and S. I. Bozhevolnyi, "Polymer-based surface-plasmon-polariton stripe waveguides at telecommunication wavelengths," Appl. Phys. Lett., vol. 82, no. 5, pp. 668-670, 2003.
- [18] H. S. Won, K. C. Kim, S. H. Song, C. Oh, and P. S. Kim, "Vertical coupling of long-range surface plasmon polaritons," Appl. Phys. Lett., vol. 88, 011110, 2006.
- [19] Q. Lai, W. Hunziker, and H. Melchior, "Low-power compact 2×2 thermo-optic silica-on-silicon waveguide switch with fast response," IEEE Photon. Technol. Lett., vol. 10, no. 5, pp. 681-683, 1998.
- [20] S. S. Lee, Y. S. Jin, and Y. S. Son, "Variable optical attenuator based on a cutoff modulator with tapered waveguides in polymers," J. Lightwave Technol., vol. 17, no. 12, pp. 2556-2561, 1999.
- [21] T. Nikolajsen and K. Leosson, "Surface plasmon polariton based modulators and switches operating at telecom wavelengths," Appl. Phys. Lett., vol. 85, no. 24, pp. 5833-5835, 2004.
- [22] T. Nikolajsen, K. Leosson, and S. I. Bozhevolnyi, "In-line extinction modulator based on long-range surface plasmon polaritons," Opt. Commun., vol. 244, pp. 455-459, 2004.

Tunable Wavelength Filters Based on Long-Range Surface-Plasmon-Polariton waveguides

Ki Cheol Kim, and Seok Ho Song[†]

Department of Physics, Hanyang University, Seoul 133-791, KOREA

[†]*E-mail: shsong@hanyang.ac.kr*

Hyong Sik Won, Gwansu Lee

Central Research Institute of Samsung Electro-Mechanics Company, Suwon 440-600, KOREA

(Received May 8, 2006, Revised manuscript July 21, 2006)

We design and fabricate a novel tunable wavelength filter, which utilizes long-range surface plasmon-polaritons excited along nm-thick-metal strips. A gold metal strip, with \sim cm length, 20 nm thickness, and $\sim 5\mu\text{m}$ width, is embedded in thick thermo-optic polymer films supported by a silicon wafer. A dielectric Bragg grating structure is placed on the metal strip, so that transmission signals at telecom wavelength are selected by thermal effect of the thermo-optic polymer. High extinction ratio of 25 dB and total insertion loss of \sim 25 dB/cm can be measured by single-mode coupling of optical fibers. We also verify that wavelength tuning of the long-range surface plasmon-polariton filters can be achieved by electric current directly applied to the metal-strip waveguides.

OCIS code : 230.3120, 230.7370, 240.6680.