

비대칭 이중-금속 장거리 표면-플라즈몬 도파로를 이용한 파장필터

심유태 · 주양현 · 송석호[†]

한양대학교 물리학과

☎ 133-790 서울특별시 성동구 행당동 17번지

(2008년 11월 10일 받음, 2008년 12월 10일 수정본 받음, 2008년 12월 15일 게재 확정)

비대칭 이중-금속 장거리 표면-플라즈몬 구조는 두 금속 사이에 위치한 코어 유전체 층의 굴절률을 임의로 선택하여도 장거리 표면-플라즈몬 모드가 존재한다는 장점이 있다. 도파로의 코어 층에 격자를 형성함으로써 플라즈몬 밴드-갭에 기초한 통신대역 파장에서의 장거리 표면-플라즈몬 파장필터를 구현하였다. Method of Line과 전달행렬방법 등을 통해 장거리 표면-플라즈몬 모드의 유효굴절률, 모드 특성, 투과도 등의 분석을 통해 설계하였으며, 도파로의 코어 층에 홀로그래프 리소 방식을 이용하여 523.3 nm 주기의 브래그 격자를 형성하여 파장필터를 제작하여 통신대역인 1541 nm 파장에서 대략 2 nm의 반치폭과 50 dB 이상의 파장 소광률을 확인하였다. 본 연구에서 제안한 파장필터는 표면-플라즈몬 집적회로를 구성하는 소자로서 중요한 역할을 할 것이다.

주제어: Surface plasmons, Surface plasmon-polariton waveguide, Wavelength filter

I. 서 론

표면 플라즈몬-폴라리톤(surface plasmon-polariton, SPP)이란 전하밀도 파동과 전자기파가 결합되어 금속과 유전체의 경계면을 따라 진행하는 표면파의 일종이다.^[1] 금속의 두께가 빛의 투과 깊이(skin depth)보다 작아져 수십 nm 정도로 얇을 때, 금속의 양쪽 경계면을 따라 전파하는 두 SPP는 서로 결합하여 하나의 중첩모드를 형성하는데, 중첩모드는 다시 금속 단면의 중심을 기준으로 자기장의 횡파 성분이 대칭인 경우(symmetric modes)와 비대칭인 경우(antisymmetric modes)로 구분된다.^[2] 이 중 대칭 모드는 대부분의 모드 에너지를 금속 박막의 내부가 아닌 주변의 유전체에 싣고 전파시키므로 금속의 흡수 때문에 생기는 손실이 적어 전파손실을 수 dB/cm까지도 줄일 수 있는데, 이러한 대칭 모드를 장거리 표면-플라즈몬(long-range SPP, LR-SPP)이라 한다.^[3,4] 금속의 두께가 얇고 유한한 폭을 갖는 금속선(metal strip)에 형성되는 LR-SPP는 단일모드 광섬유와 유사한 모드크기를 가질 수 있다. 따라서, 기존의 유전체로 된 집적형 광전회로와 LR-SPP가 접합되어 사용되면, 금속선을 통해 광신호 및 전기신호를 동시에 전송할 수 있는 새로운 길을 열어주는 등 신개념의 광전소자 연구에 중요한 역할을 할 것이다.^[4-7]

또한 LR-SPP 모드를 형성하는 금속선 주변에 격자가 있는 경우에는 플라즈몬 밴드-갭(band-gap)이 형성될 수 있다.^[8] 그런데, 단일-금속선으로 된 LR-SPP 도파로 구조에서는 금속 박막을 둘러싸고 있는 상하 유전체의 굴절률 차이가 $\sim 10^3$ 이하로 거의 동일할 때에만 LR-SPP 모드가 존재하므로,^[9] 플라즈몬 밴드-갭을 형성하기 위한 격자의 구조는 반드시 금속 단면을 기준으로 대칭성을 유지해야만 한다. 즉, 단일-금속선

LR-SPP 도파로에서는 금속선의 수직 방향으로 금속의 두께를 변화시켜 금속 브래그 격자를 만들거나^[10] 금속선의 폭을 주기적으로 변경하여 격자를 만들어야 한다는 구조적 제한이 있다.^[11] 이러한 제한조건을 극복하기 위해 이중-금속(two-layer metal) LR-SPP 도파로 모형이 제안되었다.^[9] 이중-금속 LR-SPP 구조에서는 두 금속 박막 사이에 유전체 코어 층을 두어도 LR-SPP 모드가 형성될 수 있으며, 코어 층의 굴절률은 클래딩 층의 굴절률과 $\sim 10^2$ 이상의 차이가 나도 단일 광섬유와 유사한 크기의 LR-SPP 도파모드가 존재함이 실험적으로 검증되었다.^[12,13] 특히, 이중-금속 LR-SPP 도파로 구조에서, 아래 층의 금속박막은 무한 평면인 반면, 위 층에는 유한한 폭을 갖는 금속선을 위치 시켜도 단일 광섬유와 유사한 크기의 모드를 여기시킬 수 있다는 결과는 매우 흥미롭다.^[9] 이러한 비대칭 이중-금속 LR-SPP 구조에서는 아래층의 금속 층이 상대적으로 무한한 평면을 이루기 때문에 위층 금속선의 위치 자유도를 증가시켜 금속 층 간의 수직 정렬을 용이하게 할 수 있고, 실제 응용 측면에서도 다양한 구조와 기능을 갖는 LR-SPP 도파로 소자를 구현하기에 매우 적합한 구조이다.

본 논문에서는 비대칭 이중-금속 LR-SPP 도파로를 이용하여, 코어 층에 형성된 1차원 브래그 격자에 의한 플라즈몬 밴드-갭 효과를 확인하고 파장가변 필터로서의 응용 가능성을 제안하고자 한다. II장에서는 비대칭 이중-금속 LR-SPP 도파로의 분산관계를 해석하여, 격자에 형성된 LR-SPP 모드의 유효굴절률이 유전체 도파로 격자의 경우로 근사할 수 있음을 확인하였고, III장에서는 이러한 근사방법을 이용하여 전달행렬방법(Transfer Matrix Method, TMM)에 기초한 파장필터 설계 및 필터특성을 분석하였으며, IV장에서 실험 결과와 비교하였다.

[†]E-mail: shsong@hanyang.ac.kr

II. LR-SPP 모드의 유전체 모형 근사

그림 1은 본 논문에서 제안하고자 하는 비대칭 이중-금속 LR-SPP 도파로를 응용한 LR-SPP 파장필터의 개략도이다. 그림 1(a)는 3차원 모형도이고, 1(b)는 x-z 단면도, 1(c)는 y-z 단면도이다. 두께가 20 nm이고 무한 평면인 금속 박막(metal slab)위에 역시 두께가 20 nm이고 폭이 5 μm인 금속선(metal strip)이 있으며, 두 금속 층 사이에 있는 두께 t인 코어 부분에 굴절률이 다른 유전체 물질 n₁, n₂가(단, n₁ < n₂) Λ의 주기를 가지고 총 길이가 L_g(= N·Λ, N: 격자 개수)인 격자를 형성하고 있다. 이 후의 계산 및 실험에서는 그림 1(b)에 표기된 위와 아래 층의 클래딩 층 두께는 무한하다고 가정하였으며, 그림 1(c)의 코어 층은 두께 t를 갖고, 굴절률이 n₂인 물질로 된 격자를 굴절률이 n₁인 물질이 덮고 있는 구조로서, 수직(z-축) 방향으로의 n₁ : n₂ 층간의 두께 비율은 6 : 1이라 가정하였다. 통신파장 대역인 1540 nm 파장에서 클래딩 층의 굴절률은 n₃ = 1.47, 금속(gold)의 유전률은 ε_m = -114.39 + i·11.17을 사용하였다.^[15]

우선적으로, 그림 1의 필터구조에서 중간의 격자가 없는 전/후반 부분, 즉, 코어가 n₁인 물질로만 이루어진 입/출력 부분에 여기되는 LR-SPP 모드를 분석해 보자. 수십 nm 이하인 매우 얇은 금속 박막으로 된 금속선을 따라 전파되는 LR-SPP 모드는 맥스웰 방정식을 만족시키는 경계조건과 Method of Line(MoL) 등의 수치적 계산을 통해 구할 수 있다.^[5] LR-SPP 모드의 전파 특성을 확인해 보면, 일반적으로 대부분의 모드 에너지가 코어 및 클래딩의 유전체 층에 있으며, 모드 유효굴절률의 실수항(n_{eff})이 n₃보다 약간 커서 ~10⁻³ 정도의 차이밖에 보이지 않는다.^[14] 각 금속 층의 두께 및 폭, n₃이 그림 1에서와 같이 일정한 값으로 정해져 있다면, n_{eff}은 t와 n₁에 의해 결정되며 n_{eff} 분포도를 MoL을 통해 구해보면 그림 2와 같다. n₁는 클래딩 층의 굴절률인 n₃ = 1.47보다 낮은 1.42~1.46 범위, t는 0~700 nm 영역을 고려하였는데, LR-SPP 모드 굴절률은 n₃보다 낮은 1.4672에서 약간 큰 1.4748까지 가진다. n_{eff}이 n₃보다 작아지는 코어 두께를 cut-off 두께라 정의하는데, 그림 2에서는 우측 하단의 빗금친 영역이 LR-

SPP 모드가 생성되지 않는 모드 cut-off 영역이 된다. 따라서, t가 증가할수록, n₁이 감소할수록 cut-off 영역에 가까워지며, t와 n₁이 반대로 변화할수록 n_{eff}는 증가한다.

그림 3은 t = 700 nm인 경우에 MoL로 계산된 LR-SPP 모드의 단면모양이다. 그림 3(a)는 입/출력 부분에서 n₁ = 1.45인 코어 층이 있을 때의 LR-SPP 모드 모양이다. 이 경우 유효굴절률의 실수항을 n_{eff,1}이라 하며 1.4705의 값을 갖고, 수평-수직 방향으로의 모드 크기가 각각 8 μm, 6 μm 정도여서 단일모드 광섬유와 0.74 dB 이내에서 모드정합이 잘 이루어질 수 있다는 것을 알 수 있다. 한편, 그림 3(b)는 코어 층에 z-축 방향으로 n₂ = 1.60인 층이 100 nm 두께로 있고, 그 위에 n₁ = 1.45인 층이 600 nm 두께로 덮고 있는 구조에서 여기되는 LR-SPP 모드모양이다. 이 경우 유효굴절률의 실수항을 n_{eff,2}라 하며 1.4744의 값을 갖고, 모드 모양은 앞선 경우보다 수직 방향으로 좀 더 비대칭적 형태를 갖는다.

또한 모드 유효굴절률의 허수항을 이용하여 그림 1(a)의 파장필터 구조가 갖는 전파 손실을 예측할 수 있으며 그 결과는 다음과 같다. 우선 격자가 없는 입/출력 부분의 전파손실은 약 1.82 dB/mm이며, 격자가 있는 중간영역은 n₁ = 1.45와 n₂ = 1.60을 갖는 두 유전체가 y-축 방향으로 50 : 50 비율로

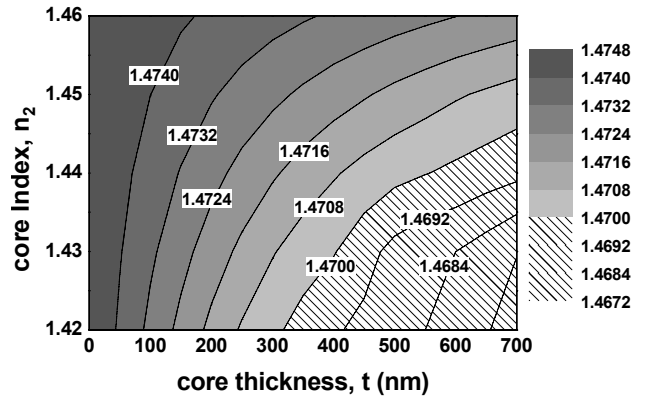


그림 2. 코어 층의 두께 t와 굴절률 n₁에 따른 LR-SPP 모드 유효 굴절률의 실수항(n_{eff}).

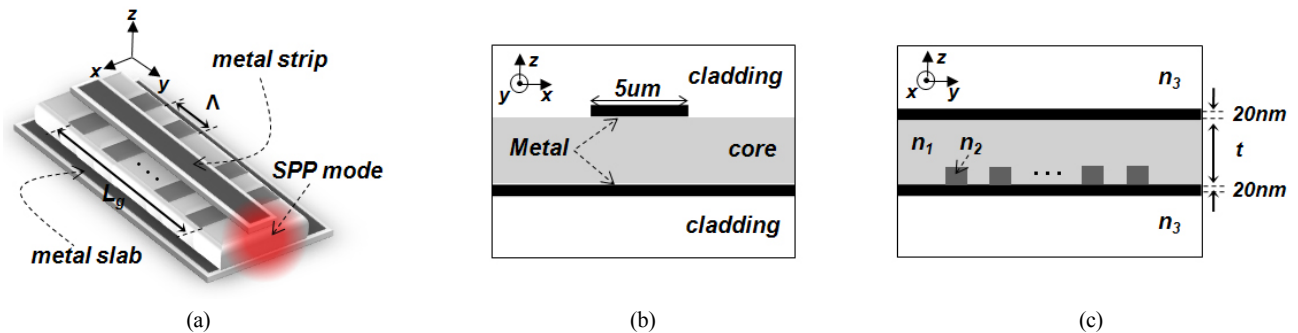


그림 1. LR-SPP 파장필터의 개략도. (a) 주기가 Λ이고 총길이가 L_g인 브래그 격자가 두 금속 구조 사이에 있는 3차원 구조도. (b) x-z 단면도. (c) y-z 단면도. n₃는 클래딩 층의 굴절률이고, 코어 층은 두께 t이고, 굴절률이 n₂인 물질로 된 격자를 굴절률이 n₁인 물질이 덮고 있는 구조이다.

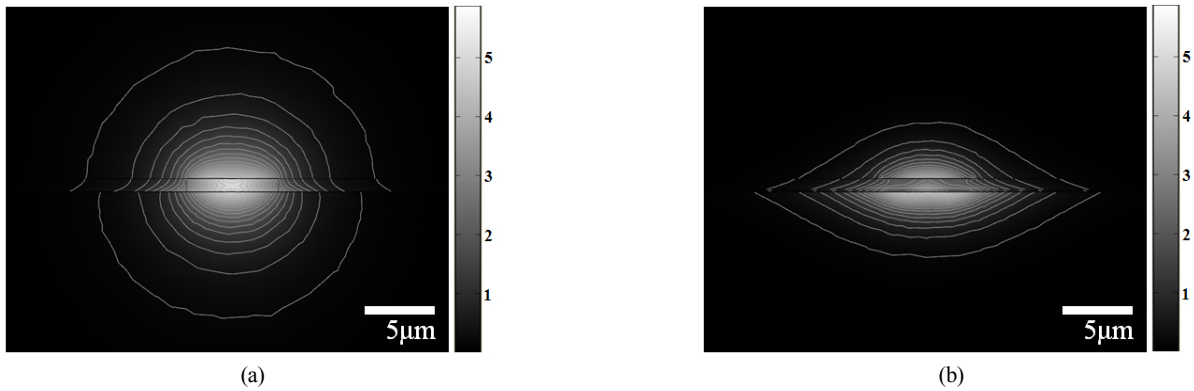


그림 3. (a) 코어 층의 굴절률 $n_1 = 1.45$, 두께 $t = 700$ nm인 경우의 LR-SPP 모드형태, (b) 코어 층에 굴절률 $n_1 = 1.45$ 과 $n_2 = 1.60$ 을 갖는 두 유전체가 각각 600 nm와 100 nm의 두께로 격자구조를 형성하고 있는 경우의 LR-SPP 모드형태. 세로축의 선분은 파워 흐름(power flow)의 상대적인 비를 나타낸다.

형성되어 있으며, 격자가 있는 코어 층은 z-축 방향으로 $(n_1 + n_2)/2 = 1.525$ 인 층이 100 nm 두께로 있고, 그 위에 n_1 층이 600 nm 두께로 있다고 가정할 수 있다. 이러한 경우, 전파손실은 약 2.78 dB/mm가 된다. 또한 격자가 없는 입/출력 부분과 격자가 있는 영역의 경계에서 모드 비정합(mode mismatching)에 의해 손실이 있음을 예측할 수 있으며, 겹침 적분(overlap integral) 방법을 통해 약 1.60 dB 정도의 손실이 발생함을 알 수 있다. 따라서, 입/출력 부분의 길이를 각각 1 mm, $L_g = 2$ mm라 하고, 앞서 계산된 단일모드 광섬유와의 모드정합에 의한 손실을 고려하면, 파장필터의 총 손실은 약 13.88 dB가 된다. 이는 금속의 저항 손실(ohmic loss) 등에 의한 것으로 유전체 파장필터보다 손실이 크지만, 전압 및 전류를 인가할 수 있다는 장점을 이용하여 광과 전기신호를 동시에 전송할 수 있는 광전소자의 응용을 고려할 때 의미가 있다고 볼 수 있다.

III. 파장필터 설계 및 제작

격자의 반사율, 투과율 등을 계산할 수 있는 전달행렬방법(Transfer Matrix Method, TMM)을 이용하여 파장필터를 설계한다.^[16]

우선 격자의 주기를 정하기 위해 아래의 식을 이용한다.^[17]

$$\lambda_B = 2\Lambda \cdot n_{avg}$$

(λ_B : 브래그 파장, Λ : 격자의 주기, n_{avg} : 격자를 이루는 유전체들의 굴절률 평균값)

n_{eff} 는 유전체의 굴절률로 생각할 수 있기 때문에^[14] 앞서 구한 $n_{eff_1} = 1.4705$, $n_{eff_2} = 1.4744$, 그리고 $\lambda_B = 1540$ nm를 이용하면 약 $\Lambda = 523$ nm가 필요함을 알 수 있다. 다음으로 브래그 격자의 폭 비율(duty cycle)과 L_g 를 최적화해야 한다. 그림 4는 격자의 폭 비율, 즉 $n_1 = 1.45$ 와 $n_2 = 1.60$ 가 겹쳐있는 층이 차지하는 비율을 30%(점선), 40%(끊어진-선), 50%(실선)로 바뀌가면서 L_g 에 따라 λ_B 에서의 반사율을 계산한

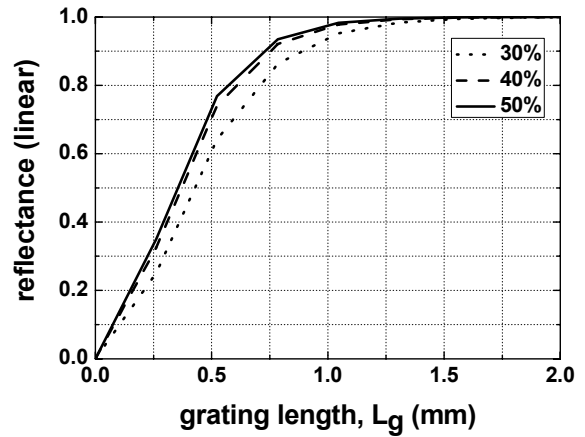


그림 4. 격자의 폭 비율과 길이 L_g 에 따른 브래그 파장 λ_B 에서의 반사율 관계.

결과이다. 또한 격자의 폭 비율이 60%, 70%인 경우는 각각 40%, 30%와 비슷한 결과를 얻어 도시하지 않았다. 계산 결과를 확인해 보면 격자의 폭 비율이 50%일 때 L_g 가 증가함에 따라 λ_B 에서의 반사율이 최대치로 가장 빨리 근접한다. 따라서, 본 실험에서는 최대의 반사율을 얻기 위해 50%의 격자 폭 비율과 $L_g = 2$ mm가 되도록 설계 및 제작하였다.

그림 1에서 제안된 파장필터는 다음과 같은 과정으로 제작하였다. 실리콘 기판 위에 $n_3 = 1.47$ 인 유전체(ZPU 12-470, ChemOptics Inc.)를 스프인코팅에 의해 15 μ m 정도로 충분히 두껍게 형성하여 LR-SPP 모드가 실리콘 기판에 의해 영향을 받지 않도록 하였으며,^[6] 그 위에 20 nm 두께로 금(Au) 박막을 열증착(thermal evaporation)하였다. 금 박막 위에 $n_2 = 1.60$ 인 감광제(photoresist: AZ6612k, Hoechst)를 100 nm 도포한 후 홀로그래프 리소 방식(Holographic lithography)을 통해 브래그 격자를 형성하고, 그 위에 $n_1 = 1.45$ 인 유전체(ZPU 12-450, ChemOptics Inc.)로 700 nm 두께가 되도록 도포하였다. 금속선은 lift-off 방식과 금속 열증착에 의해 5 μ m의 폭과 20 nm의 두께로 형성하고, 그 위에 다시 $n_3 = 1.47$ 의 유전체 박막을 15 μ m 정도로 충분히 두껍게 형성하였다. 실험에서

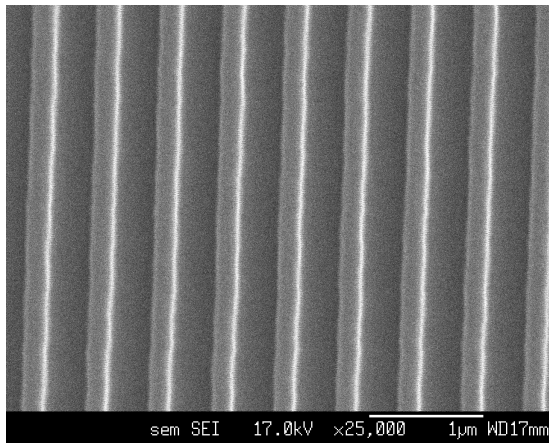


그림 5. 레이저 간섭을 이용하여 감광제로 제작한 브래그 격자의 전자현미경(SEM) 사진.

사용된 유전체는 열-광학 폴리머(Thermal-Optic Polymer, TOP)로서, 스핀코팅 된 TOP는 질소 환경에서 8분 동안 자외선으로 경화시켰다. TOP 박막의 안정화를 위해 150°C 가 열판 위에 질소환경을 만들어 주어 30분 동안 열 경화하였다. 마지막으로 파장필터 구조를 완성한 후에는 각 유전층의 TOP 물질들 간에 열 안정성을 고르게 하기 위해, 190°C로 1시간 동안 추가로 열 경화시켜 주었다. 격자로 사용된 감광제인 AZ6612k는 AZ1500 희석제와 3:7의 비율로 섞어서, n_2 격자의 높이를 100 nm 정도가 되도록 하였으며, 홀로그래프 리소는 He-Cd laser(442 nm)를 사용하였다. 그림 5는 제작된 격자의 전자현미경(SEM) 사진이다. 측정된 격자주기는 설계치인 523 nm와 거의 동일하였으며, 격자의 폭 비율은 대략 40% 정도로 그림 4에서 본 50%인 경우와 유사한 특성을 얻을 수 있을 것으로 예상된다. 따라서 약 40%의 폭 비율을 갖는 격자를 이용하여 LR-SPP 파장필터를 제작하였다.

IV. 측정 결과 및 분석

측정에서는 1550 nm의 중심파장과 선평이 60 nm인 ASE (amplification of spontaneous emission) 광원과 선평이 1.0 pm 이고 1520~1640 nm 영역에서 파장변이 가능한 레이저 다이오드(tunable laser diode; 81640A, Agilent Co.)를 사용하였으며, 제작된 SPP 파장필터와 단일모드 광섬유 간의 광신호 입출력은 단면결합(end-fire coupling)방법을 사용하였고, 편광조절기(polarization controller)를 사용하여 입력광의 편광 상태를 조정함으로써 TM-편광에서만 LR-SPP 모드가 여기됨을 확인하였다. 광섬유와 파장필터의 정렬을 위해 5-축 조절(3translations, 2tilts)이 가능한 정밀 XYZ-stage와 600배의 배율을 가지는 광학 현미경이 사용되었고, 파장필터의 모드 분포는 대물렌즈와 CCD 카메라(CamIR¹⁵⁵⁰, appscintech)를 이용해 출력단에서 관찰하였으며, 파장필터를 투과한 광의 스펙트럼 및 광의 세기는 OSA(optical spectrum analyzer; MS9710B, Anritsu Co.)를 이용하여 측정하였다.

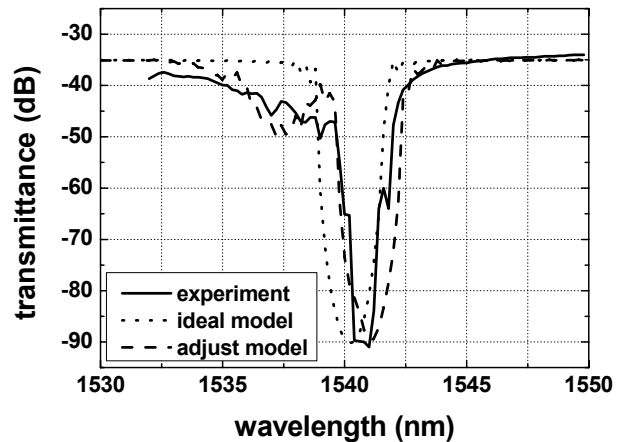


그림 6. LR-SPP 파장필터의 광 투과도. 실선은 측정결과이며, 점선은 이상적인 모형의 설계치, 끊어진-선은 예상되는 모형의 계산치이다(예상되는 모형의 계산치에 대한 설명은 본문 참조).

그림 6은 ASE 광원을 사용하여 측정한 제작된 SPP 파장필터의 투과곡선(실선), TMM으로 계산된 이상적인 모형의 설계치(점선), 그리고 격자의 주기를 약간 혼합하여 예측한 모형의 계산치(끊어진-선)이다. 설계치는 앞서 구한 $n_{\text{eff}_1} = 1.4705$, $n_{\text{eff}_2} = 1.4744$, 격자 주기($\Lambda = 523$ nm)와 폭 비율(40%), 그리고 총 길이($L_g = 2$ mm)를 고려하여 계산된 값이다. 측정된 투과곡선(실선)은 설계치(점선)와 거의 일치하는 1541 nm 중심파장을 나타내는데, 이를 통하여 실제 제작된 격자의 주기가 523 nm 에서 약 0.3 nm 정도 증가되어 형성되었다고 판단할 수 있다. 또한 대략 2 mm의 반치폭(full width at half-maximum, FWHM)과 50 dB 이상의 소광률(extinction ratio)을 갖는 특성을 확인할 수 있다. 그런데, 중심파장 보다 짧은 파장영역에서는 두 곡선간에 다소 차이를 보인다. 이러한 원인으로서는 실험으로 제작된 격자의 주기가 일정치 않아서 발생할 수 있다. 즉, 원래의 설계치(점선)는 $\Lambda = 523$ nm 격자만을 가정하였으나, 홀로그래프 리소 제작과정에서 약간 다른 주기를 갖는 격자가 L_g 내에 섞여서 형성되었다고 볼 수 있다. 한 예로, 주기가 522 nm, 523 nm, 524 nm인 격자가 L_g 내에 2:7:1의 길이 비율로 섞여 있는 경우에 대해 TMM 계산을 해보면, 그림 6의 끊어진-선과 같이 얻어지는데, 이는 중심파장 보다 짧은 파장영역에서의 실험결과를 잘 설명해주고 있다. 따라서, 홀로그래프 리소 과정에서 광원이 평행빔(collimated beam) 상태에서 $\Delta\theta = 0.4^\circ$ 정도로 약간 퍼져 있어서 격자영역의 가장자리에 1 nm 정도의 매우 작은 주기 차이를 갖는 격자가 섞여 생성되었고, 중심 격자 주기도 523.3 nm로 형성되었다고 결론을 내릴 수 있다. 한편 격자 폭 비율의 값이 일정하지 않을 경우에도 실험과 설계치가 일치하지 않을 수도 있으나 폭 비율이 대략 30~40% 이상 차이가 나는 격자가 섞여서 형성되어야 한다. 하지만 전자현미경을 통해 약 2 mm 내의 격자를 확인한 결과, 격자의 폭 비율의 차이가 크지 않고 40% 정도로 균일하여 주된 영향을 미치지 않

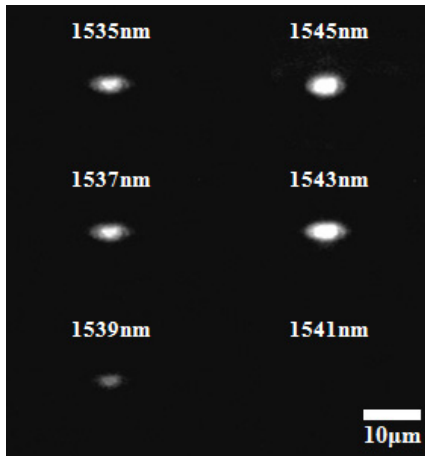


그림 7. 레이저 다이오드의 파장을 바꿔가며 파장필터의 출력단에서 얻은 LR-SPP 모드사진.

표 1. 광 파워측정기를 통해 측정된 모드의 파워 결과치.

파장(wavelength, nm)	파워(power, µW)
1535	20.1
1537	18.3
1539	8.2
1541	0.1
1543	26.2
1545	27.1

을 것으로 예측된다.

그림 7은 파장가변 레이저 다이오드를 통해 1535 nm ~ 1545 nm 영역에서 파장을 가변하며 파장필터의 출력단에서 대물렌즈와 CCD 카메라를 이용하여 얻은 LR-SPP 모드의 사진이다. 레이저 다이오드의 출력은 1 mW로 동일하게 측정하였다. 우선 코어에 형성된 브래그 격자의 영향을 받지 않는 영역인 1545 nm 파장에서 촬영한 모드 사진을 확인해보면 수평-수직 방향으로의 모드 크기가 약 8 µm, 6 µm 정도로 그림 3(a)에서 계산된 모드와 크기가 일치하고 있음을 확인하였다. 반면, 브래그 중심파장인 1541 nm에서의 사진을 보면 CCD 카메라의 검출능력의 한계(~50 dB)에 의해 모드를 측정하지 못한 결과이다.

또한 각 파장별 모드를 광 파워측정기(optical power-meter)를 통해 측정 결과는 위의 표 1과 같다. 결과를 확인해 보면 그림 6에서 측정된 결과와 같이 1541 nm의 중심파장을 갖는 파는 투과되지 않는 실험치를 확인하였다.

V. 결 론

비대칭 이중-금속 LR-SPP 도파로의 코어 유전체 층에 브래그 격자를 삽입하여 통신대역 파장에서의 LR-SPP 파장필터를 제안하였다.

LR-SPP가 형성되는 구조는 MoL을 이용하여 LR-SPP 모드

의 유효굴절률을 계산함으로써 유전체 모델로 근사할 수 있음을 확인하였고, TMM을 이용하여 파장필터를 설계하였다. 또한 설계지에 따라 스핀코팅과 열증착을 통해 비대칭 이중-금속 LR-SPP 도파로 구조를 제작하였으며, 도파로의 코어 유전체 층에 홀로그래프 리소 방식을 이용하여 523.3 nm 주기의 브래그 격자를 형성하였다. 그 결과 통신대역인 1541 nm 파장에서 약 2 nm의 반치폭(FWHM)과 50 dB 이상의 파장소광률(extinction ratio)을 갖는 파장필터를 실험적으로 구현하여 설계치와 일치함을 확인하였다. 본 연구에서 제안한 파장필터는 표면-플라즈몬 집적회로에서 사용되는 소자로서 중요한 역할을 할 것이다.

감사의 글

본 연구 결과는 지식경제부의 지원(과제번호: 2008-S-001-01)으로 수행되었습니다. 연구개발 기회를 주신 지식경제부 측에 감사를 드립니다.

참고문헌

- [1] H. Raether, "Surface Plasmon: on smooth and rough surfaces and on gratings," (Springer-Verlag, London, UK, 1998).
- [2] E. N. Economou, "Surface Plasmons in Thin Films," *Phys. Rev.*, vol. 182, no. 2, pp. 539-554, 1969.
- [3] F. A. Burton and S. A. Cassidy, "A complete description of the dispersion relation for thin metal film plasmon-polaritons," *J. Lightwave Tech.*, vol. 8, no. 12, pp. 1843-1849, 1990.
- [4] T. Sterkenburgh and H. Franke, "Observation of a long range surface mode with a polymer/silver/polymer multilayer," *J. Appl. Phys.*, vol. 81, pp. 1011-1013, 1997.
- [5] P. Berini, "Plasmon-polariton modes guided by a metal film of finite width," *Opt. Lett.*, vol. 24, no. 15, pp. 1011-1013, 1999.
- [6] 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.
- [7] T. Nikolajsen, K. Leosson, and S. I. Bozhevolnyi, "Surface plasmon-polariton based modulators and switches operating at telecom wavelengths," *Appl. Phys. Lett.*, vol. 85, no. 24, pp. 5833-5836, 2004.
- [8] J. Yoon, G. Lee, S. H. Song, C. H. Oh, and P. S. Kim, "Surface-plasmon photonic band gaps in dielectric gratings on a flat metal surface," *J. Appl. Phys.*, vol. 94, no. 1, pp. 123-129, 2003.
- [9] Y. H. Joo, M. J. Jung, J. Yoon, S. H. Song, H. S. Won, S. Park, and J. J. Ju, "Long-range surface plasmon polaritons on asymmetric double-electrode structures," *Appl. Phys. Lett.*, vol. 92, no. 16, pp. 161103-1~161103-3, 2008.

- [10] A. Boltasseva, S. I. Bozhevolnyi, T. Nikolajsen, and K. Leosson, "Compact Bragg Gratings for Long-Range Surface Plasmon Polaritons," *J. Lightwave Tech.*, vol. 24, no. 2, pp. 912-918, 2006.
- [11] S. Jette-Charbonneau, R. Charbonneau, N. Lahoud, G. A. Mattiussi, and P. Berini, "Bragg Gratings Based on Long-Range Surface Plasmon-Polariton Waveguides: Comparison of Theory and Experiment," *IEEE J. Quantum Electron.*, vol. 41, no. 12, pp. 1480-1491, 2005.
- [12] G. I. Stegeman and J. J. Bruke, "Long-range surface plasmons in electrode structures," *Appl. Phys. Lett.*, vol. 43, no. 3, pp. 221-223, 1983.
- [13] H. S. Won, K. C. Kim, S. H. Song, C. H. Oh, P. S. Kim, S. Park, and S. I. Kim, "Vertical coupling of long-range surface Plasmon polaritons," *Appl. Phys. Lett.*, vol. 88, no. 1, pp. 011110-1~011110-3, 2006.
- [14] S. Jette-Charbonneau and P. Berini, "Theoretical performance of Bragg gratings based on long-range surface plasmon-polariton waveguides," *J. Opt. Soc. Am. A*, vol. 23, no. 7, pp. 1757-1767, 2006.
- [15] P. B. Johnson and R. W. Christy, "Optical constants of the noble metals," *Phys. Rev. B*, vol. 6, no. 12, pp. 4370-4379, 1972.
- [16] P. Yeh, *Optical Waves in Layered Media* (Wiley and Sons, New York, 1988).
- [17] R. Kashyap, *Fiber Bragg Grating* (Academic Press, New York, 1999).

Long-Range Surface Plasmon-Polariton Wavelength Filter based on Asymmetric Double-Electrode Structure

Yutae Shim, Yang Hyun Joo, and Seok Ho Song[†]

Department of Physics, University of Hanyang, Seoul 133-790, Korea

[†]*E-mail: shsong@hanyang.ac.kr*

(Received November 10, 2008; Revised manuscript December 10, 2008; Accepted December 15, 2008)

We propose a wavelength filter based on long-range surface plasmon-polaritons (LR-SPP) supported by a asymmetric double-electrode LR-SPP structure. For the case of the asymmetric double-layered LR-SPP waveguide, LR-SPPs exist with a much broader range of index mismatches between core and clad materials. Thus, the asymmetric double-electrode LR-SPP waveguide is adequate to form a plasmonic band-gap device as we report in this paper by studying Bragg-reflection wavelength filter based on it. The structure for wavelength filter operating telecommunications wavelength is designed by using the method of line (MoL) and the transfer matrix method. The fabricated device shows a relatively high extinction ratio of 50 dB with a bandwidth of 2 nm, and the performance is very consistent with numerical simulations.

OCIS codes: (240.6680) Surface plasmons; (230.7370) Waveguides; (230.7408) Wavelength filtering devices.