

## 이중 금속선 곡선형 도파로에서의 전파특성에 관한 연구

이상준 · 김상인<sup>†</sup>

아주대학교 전자공학부

Ⓣ 443-749 경기도 수원시 영통구 원천동

송석호

한양대학교 물리학과 마이크로광학연구실

Ⓣ 133-791 서울시 성동구 행당동 17

(2007년 2월 6일 받음, 2007년 5월 31일 수정본 받음)

본 논문에서는 이중 금속선으로 이루어진 다양한 곡선형 도파로를 고려하고 이 구조들에서 전파하는 모드의 특성을 수치해석적으로 분석하였다. 이중 금속선들 간의 간격과 내부 유전체의 굴절률 변화에 따라 곡선형 도파로의 최적 반경과 최소손실의 경향을 조사하였으며, 그 결과 이중 금속선 구조가 단일 금속선 구조보다 전파특성이 좋은 최적 구조가 존재함을 확인하였다.

주제어 : Surface plasmons, Thin films, Waveguide, Integrated optics devices

### I 서 론

광학 주파수에서 금(Gold), 은(Silver), 구리(Copper) 등의 금속들은 플라즈마 상태의 전자가스와 매우 유사하며, 음의 유전율을 갖는다. 특히, 이러한 금속과 유전체의 경계를 따라 TM(Transverse Magnetic) 형태의 모드가 전파되는데 일반적으로 이러한 전자기파를 ‘표면 플라즈몬 폴라리톤(Surface Plasmon-Polaritons) 모드’라고 부른다. SPP는 Ritchie, Stern, Ferrell과 여러 연구자들에 의해 이론적으로 증명되었으며<sup>[1,2]</sup>, Otto와 Kretschmann에 의해 고안된 ATR(attenuated total reflection) 실험에서도 광학적으로 관찰되었다.<sup>[3]</sup> 그 이후로 다양한 구조에서의 SPP모드의 특성이 조사되었다.<sup>[4-6]</sup> SPP에 의한 모드는 전자기 에너지가 금속과 유전체의 경계를 중심으로 잘 모이기 때문에 모드의 집중도(localization)가 매우 뛰어나지만 대신 금속 자체에 의한 손실이 크다는 단점이 있다.

최근에는 표면 플라즈몬의 손실을 개선하는 구조로서 장거리 표면 플라즈몬 폴라리톤(LR-SPP)을 이용하여 유전체로 둘러 쌓인 형태의 금속선 도파로 구조가 제안되고 연구되고 있다.<sup>[7-12]</sup> 본 논문에서는 단일 금속선 도파로의 손실을 개선하기 위해 고안된 이중 금속선으로 이루어진 직선형 도파로에 기초하여 다양한 이중 금속선 곡선형 도파로를 고려하였다. 곡선형 도파로는 광 집적회로에 매우 중요한 소자로서, 회로의 집적도를 높이기 위해서는 곡률반경을 작게 하면서도 손실을 가능한 작게 하는 것이 요구된다. 금속선 도파로는 유전체 도파로와는 달리 진행 손실로 인하여 곡선 도파로의 최적 곡률반경이 존재하며, 직선 도파로의 진행 손실 개선이 곡선 도파로의 방사 손실의 증가를 초래하는 특성을 보

인다. 본 논문에서 고려하는 이중 금속선 도파로 구조는 적절한 구조 설계를 통하여 진행 손실과 곡선 도파로의 방사 손실을 동시에 개선하는 것이 가능함을 보인다.

본 연구에서는 도파로의 전파특성을 분석하기 위하여 FDM(Finite Difference Method)에 기반한 전산모사를 사용하였다.<sup>[13-14]</sup> 특히, 계산 영역의 경계에서는 stretched field 방식에 기초한 perfectly matched layer absorbing boundary condition이 적용되었다.<sup>[15-16]</sup> 또한, 도파로에 전파되는 특정한 모드를 선택적으로 계산하기 위하여 역행렬기법(inverse matrix method)을 적용하여 eigenvalue 문제를 계산하였다.<sup>[17]</sup>

### II 이중 금속선 도파로 구조

그림 1에서 (a)는 두께  $t$ 가 변수인 단일 금속선 곡선형 도파로, (b)는 두 금속선 간의 간격  $D$ 가 변수인 이중 금속선 곡선

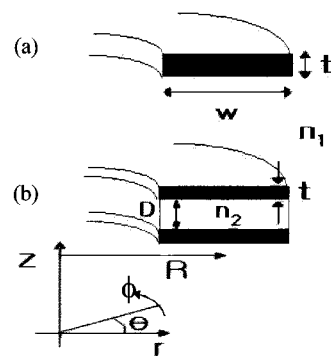


그림 1. 두 가지 형태의 곡선형 도파로 구조.

- (a) 단일 금속선 곡선형 도파로
- (b) 이중 금속선 곡선형 도파로

<sup>†</sup> E-mail: sangin@ajou.ac.kr

형 도파로를 나타낸다( $t = 20 \text{ nm}$ ).  $R$ 은 도파로 중앙의 곡률 반경이다. 폭  $W$ 는  $5 \text{ }\mu\text{m}$ 로 고정된 값이다.  $n_2$ 는 두 금속선들 사이에 위치하는 내부 유전체의 굴절률이며,  $n_1$ 은 외부 유전체의 굴절률로서 1.47로 고정된 값이다. 각 구조의 전산모사에 사용된 광학 파장  $1.5 \text{ }\mu\text{m}$ 에서 금속은 금(Gold)로서  $-131.95 + i12.65$ 의 유전율을 갖는다. 그리고 존재하는 모드는  $\theta$  방향으로 전파한다.

### III. 직선형 도파로에서의 전파특성

곡선형 도파로의 전파특성을 조사하기 위하여 먼저 직선형 도파로의 전파특성을 분석하였다. 이는 직선형 도파로는 곡선형 도파로에서 곡률 반경이 무한대인 경우를 의미하기 때문이다.

그림 2는 내부 굴절률  $n_2$ 와 간격  $D$ 에 따른 유효굴절률 (effective refractive index)의 전체적인 경향이다. 단, 본 논문에서 이중 금속선 구조는  $t = 20 \text{ nm}$ 로 고정되어 있다.  $D$ 가 0에 가까워지면  $t = 40 \text{ nm}$ 인 단일 금속선 도파로의 값에 수렴하게 된다.  $D$ 가 증가할 때에는  $n_2$ 에 따라 두 가지 경향을 보인다.  $n_2 > n_1$ 일 때는  $D$ 가 증가하면 유효굴절률이 증가하지만, 반대로  $n_2 < n_1$ 일 때는 유효굴절률은 감소한다. 굴절률 차이가 심할수록 그러한 경향은 더욱 두드러진다. 특히,  $n_2 = 1.45, 1.46$ 의 경우에  $D$ 가 증가함에 따라 유효굴절률은 외부 굴절률  $n_1 = 1.47$ 에 매우 근접한 값을 갖게 된다는 사실로부터 각각  $1 \text{ }\mu\text{m}$ 와  $2 \text{ }\mu\text{m}$  부근에서 모드가 차단(Cutoff)됨을 알 수 있다.

그림 3은 내부 굴절률과 간격에 따른 단위 길이당 전파손실( $\text{dB}/\mu\text{m}$ ) 경향으로서 대체로 그림 2의 유효굴절률 그래프와 유사하다. 즉,  $n_2 < n_1$ 일 때에  $D$ 가 증가할수록 유효굴절률과 전파손실 모두 감소한다. 이것은 유효굴절률이 작아질 때에 모드 사이즈(mode size)가 커질 것이고, 결과적으로 금속의 영향을 적게 받아 상대적으로 금속 자체에 의한 손실도

작아지기 때문이다. 특히  $n_2 = 1.46, D > 1.50 \text{ }\mu\text{m}$ 인 구조에서는  $D$ 가 모드가 차단되는 간격에 가까기 때문에 모드 사이즈는 상당히 커지지만 전파손실은 오히려  $t = 20 \text{ nm}$ 인 단일 금속선 구조보다 손실이 작아지는 큰 장점이 있다.<sup>[18]</sup> 이러한 특징은 직선형 도파로에서 이중 금속선 구조가 단일 금속선 구조보다 특성이 좋은 최적 구조가 존재함을 의미한다.

그림 2, 3을 통해 이중 금속선 도파로처럼 단일 금속선 도파로도 유효굴절률과 전파손실은 경향이 같음을 알 수 있다. 금속선의 두께  $t$ 가 두꺼울수록 유효굴절률과 전파손실이 커진다. 이는 금속의 양이 많을수록 모드의 집중도가 높아지고 그만큼 모드의 중앙에 있는 금속에 의한 손실을 많이 겪기 때문이다.

### IV. 단일 금속선 곡선형 도파로에서의 전파특성

먼저, 단일 금속선 곡선형 도파로의 전파 특성을 알아보기로 한다. 그림 4는 단일 금속선 직선형 도파로를 따라 전파하는 모드의 지배적인(dominant) 전장 성분  $E_z$ 의 정규화된(normalized) 분포이다. 전체적으로 모드는 금속선을 중심으로  $z$ 방향으로 가우시안(Gaussian) 분포를 보이고 있다. 금속과 유전체로 이루어진 무한 단일 경계면에서는 횡면 전장 성분이  $E_z$ 만 존재하는 순수한 TM모드일 것이다. 하지만 이 구조는 유한한 폭을 가지며 금속선의 폭에 비하여 두께가 매우 얇기 때문에  $E_x$ 은 금속선의 4개의 모서리에서  $E_z$ 에 비해 상대적으로 무시할 만큼 작은 값을 갖는 준-TM(quasi-TM) 모드라고 할 수 있다. 곡률반경  $R = 100,000 \text{ }\mu\text{m}$ 일 때는 모드 분포가 좌우로도 대칭이므로 거의 직선형 도파로의 경우로 간주할 수 있다. 하지만  $R = 20,000 \text{ }\mu\text{m}$ 일 때는 모드의 중심이 도파로 바깥으로 치우치게 된다.

그림 5는  $\theta = 90^\circ$  회전시에 곡률반경  $R$ 에 따른 손실을 나타낸다. 그림에서 보듯이 최소 손실과 그에 해당하는 최적반경이 존재하며 그것들은 금속의 두께에 따라 달라진다는 것

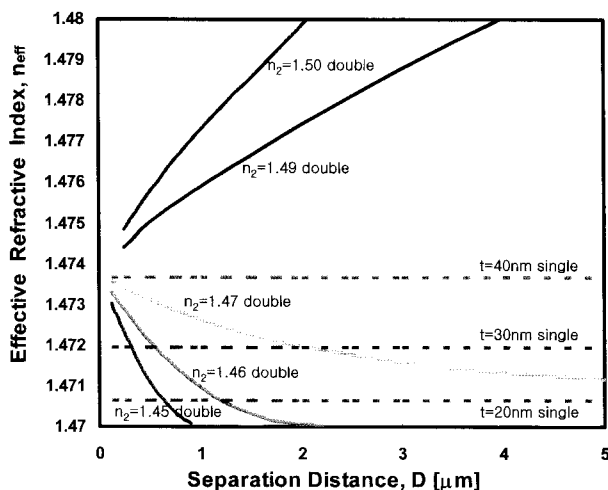


그림 2. 간격  $D$ 와 내부 굴절률  $n_2$ 에 따른 유효굴절률.

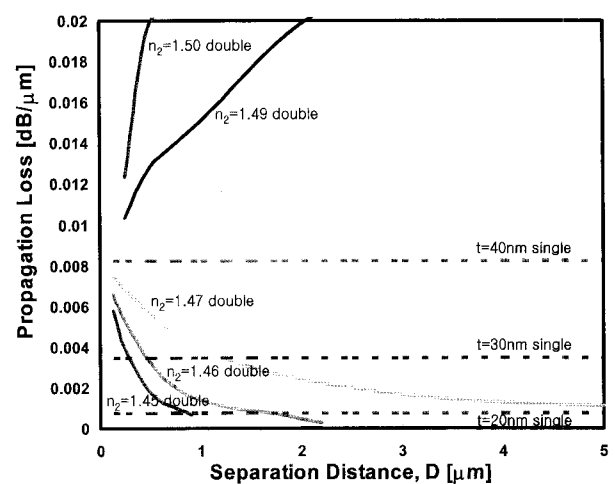


그림 3. 간격  $D$ 와 내부 굴절률  $n_2$ 에 따른 전파손실( $\text{dB}/\mu\text{m}$ ).

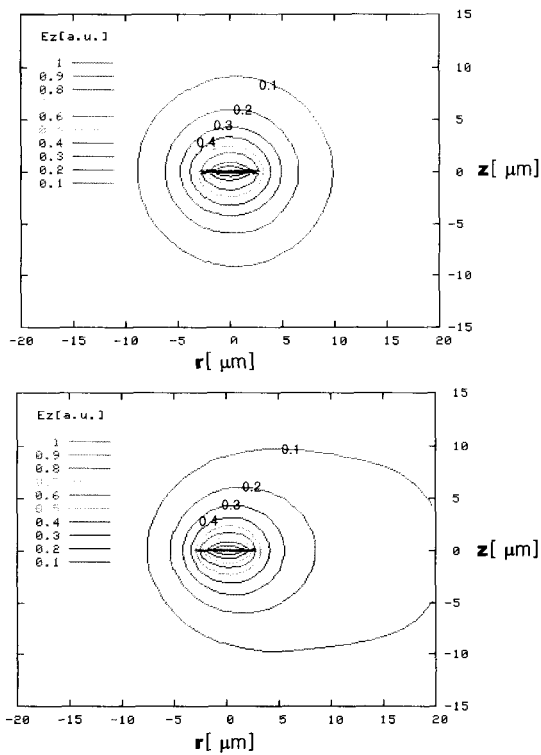


그림 4. 단일 금속선 곡선형 도파로의 R에 따른 전장  $E_z$ 의 분포. ( $t = 20 \text{ nm}$ )

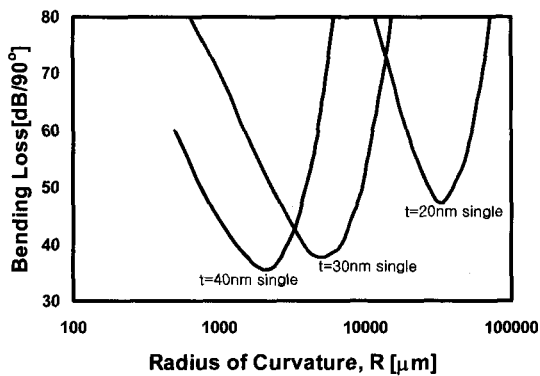


그림 5. 단일 금속선 곡선형 도파로의 최적반경과 손실.

을 알 수 있다. 최적 반경( $R_{opt}$ )의 존재는 금속 손실(metallic loss)과 방사 손실(radiation loss)의 조합에 기인한다. 즉, 금속선의 두께에 상관없이 R이  $R_{opt}$ 보다 클 때에는 금속 자체에 의한 금속 손실이 지배적이며, 그 값은 단위 거리당 거의 일정하므로 R이 작을수록 일정 각도 회전시의 전체 손실은 작아지기 마련이다. 하지만 R이  $R_{opt}$ 보다 작을 때에는 반대로 곡선 구조 자체에 의한 방사 손실이 지배적이며, R이 작아지면서 단위 거리당 그 값은 R의 감소율에 비해 더 빠르게 증가하므로 일정 각도 회전시의 전체 손실은 오히려 증가하게 되는 것이다. 결과적으로 금속 손실과 방사 손실의 합으로 정의되는 손실(bending loss)은 최소값을 갖는다. 최소

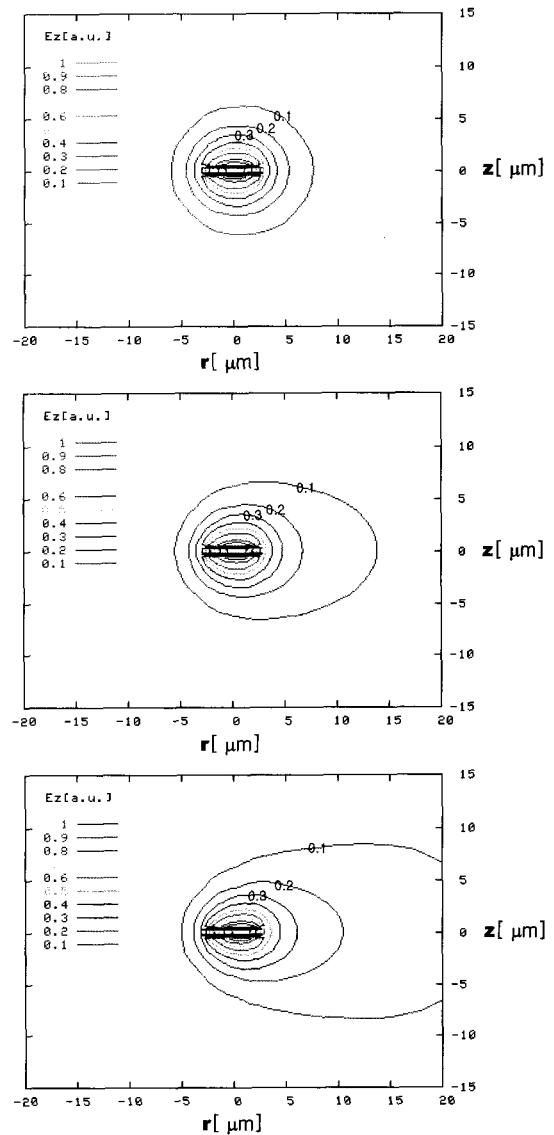


그림 6. 이중 금속선 곡선형 도파로의 R에 따른 전장  $E_z$ 의 분포. ( $D = 0.5 \mu\text{m}$ ,  $n_2 = 1.46$ )

손실 값과 그 때의 최적반경은 두꺼운 금속일수록 작아진다. 이것은 금속이 두꺼울수록 도파로의 금속 손실은 크지만 대신 모드 집중도(mode confinement)가 커져서 방사 손실을 줄이는 효과가 매우 크기 때문이다.

### V. 이중 금속선 곡선형 도파로에서의 전파특성

앞의 III 절에서 직선형 도파로에서  $n_2 = 1.46$ 이면 이중 금속선이 단일 금속선보다 손실이 작은 조건이 있음을 보았다. 따라서 여기에서는  $n_1 = 1.47$ ,  $n_2 = 1.46$ 로 고정하고 간격 D를 변화시킨 곡선형 도파로에서의 전파 특성을 분석해 보았다. 그림 6으로부터 이중 금속선 구조도 단일 금속선 구조와 마찬가지로 곡률반경 R이 작아질수록 모드 분포는 도파로 바깥으로 치우치게 됨을 볼 수 있다.

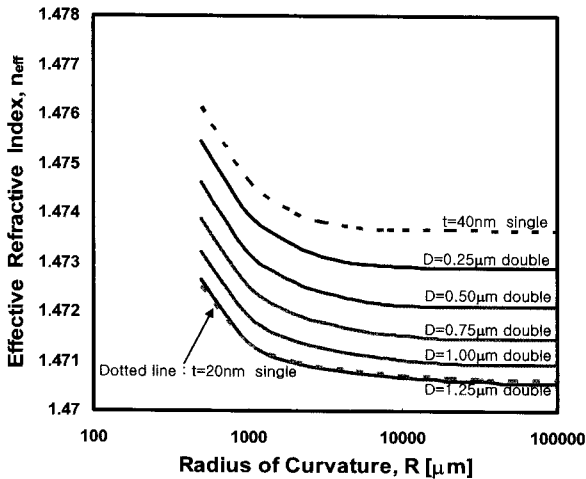


그림 7. 이중 금속선 곡선형 도파로의 R에 따른 유효굴절률. ( $n_2 = 1.46$ )

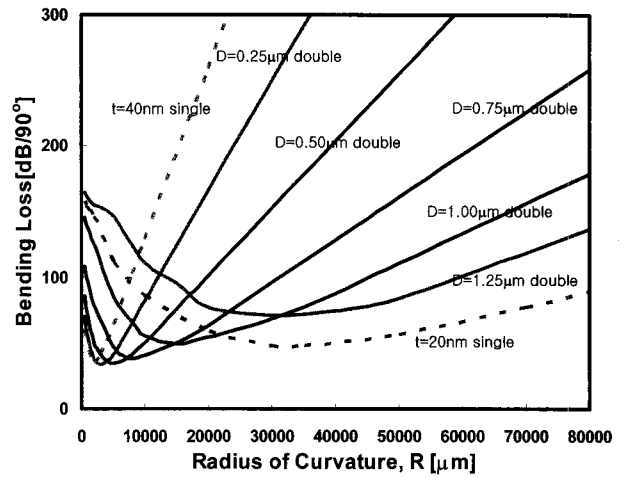


그림 8. 이중 금속선 곡선형 도파로의 최적반경과 손실. ( $n_2 = 1.46$ ).

일반적으로 곡선형 도파로 구조에서 모드의 필드식은  $e^{-j\beta_o \varnothing} = e^{-j n_{eff} \beta_o R \varnothing}$  형태로 표현할 수 있는데, 여기에서  $\beta_o$ 는 진공에서의 전파상수이며,  $Re\{n_{eff}\}$ 을 유효굴절률로 정의한다. 그림 7은 이중 금속선 곡선형 도파로의 곡률반경 R에 따른 유효굴절률 분포이다. 내부 굴절률이 외부 굴절률보다 작으므로 R에 상관없이 간격 D가 증가할수록 유효굴절률은 작아진다. 그리고 R이 매우 클 때에는 직선형 도파로에서의 값으로 수렴하게 된다. 하지만 R이 작아질수록 유효 굴절률이 발산하게 되는데 이는 유효굴절률의 정의에서 비롯된다. 일반적으로 모드는 도파로 바깥으로 치우치게 되므로 모드 중심의 곡률 반경이 도파로 구조 중심의 곡률반경 R보다 큰 값을 가지게 된다. 이때, 두 중심을 따라 회전각과 위상의 변화는 항상 같기 때문에 유효굴절률은 결과적으로 증가하게 되어 있다. 이러한 경향은 R이 작아질수록 심해지기 때문에 유효굴절률은 발산하게 되는 것이다.<sup>[10]</sup>

그림 8에서는  $\theta = 90^\circ$  회전시엔 이중 금속선 곡선형 도파로의 D에 따라 손실 경향을 보여준다. 전체적으로 간격 D가 줄어들면서 최적 반경과 최소 손실은  $t = 40$  nm인 단일 금속선 구조에 근접한다. 그리고 D가  $1 \mu\text{m}$  이상 되면 최적 반경과 최소 손실은 크게 증가하며, 특히 D가  $1.25 \mu\text{m}$  이상이면 R과 무관하게 항상  $t = 20$  nm인 단일 금속선 구조보다 손실이 크게 된다. 앞서 언급한 바에 의하면 직선형 도파로에서 이중 금속선 구조가 단일 금속선 구조보다 손실이 작아지면 D가  $1.50 \mu\text{m}$  이상이였다. 이것은 직선형 도파로에서의 최적인 간격 D가 곡선형 도파로에서는 오히려 큰 단점으로 작용함을 의미한다. 반대로 곡선형 도파로의 최적 반경과 최소손실을 작게 하는 구조일수록 직선형 도파로에 적용하면 손실이 지나치게 증가하게 된다. 다시 말해서, 직선형 도파로와 곡선형 도파로의 손실 경향은 상충(contradiction)된다. 이러한 경향은 단일 금속선 구조에서도 마찬가지이다.

그림 9는 간격 D를  $0.5 \mu\text{m}$ 로 고정하고 내부 굴절률  $n_2$ 를

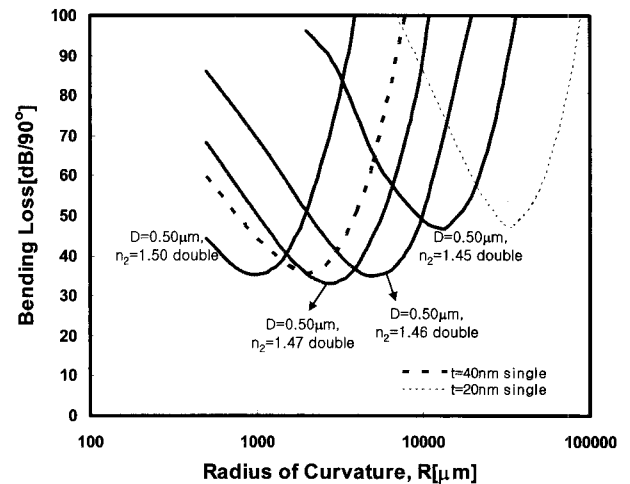


그림 9. 이중 금속선 곡선형 도파로의 최적반경과 손실. ( $D = 0.5 \mu\text{m}$ )

변화시켰을 때 손실 경향을 보여 주고 있다.  $n_2 = 1.45$ 의 경우에는 직선형 도파로에서의 손실이 작다는 장점이 있지만 곡선형 도파로에서의 최적 반경과 최소 손실이 매우 크다.  $n_2 = 1.50$  경우에는  $n_2 = 1.45$  경우와 정반대의 특성을 가지며, 최적 반경을  $t = 40$  nm인 단일 금속선 구조보다 작게 할 수 있는 큰 장점이 있다. 특히  $n_2 = 1.46, 1.47$ 의 경우에는  $t = 20, 40$  nm인 단일 금속선 구조보다도 최소 손실이 작음을 볼 수 있다. 따라서 이들 경우에 곡선형 도파로에 매우 유리하므로 단일 금속선 구조와 구체적으로 비교할 필요가 있다.

## VI. 이중 금속선과 단일 금속선 도파로의 손실비교

곡선형 도파로에서 이중 금속선 구조의 단일 금속선에 대한 손실 개선 여부와 그 정도를 정량적으로 계산하기 위해서

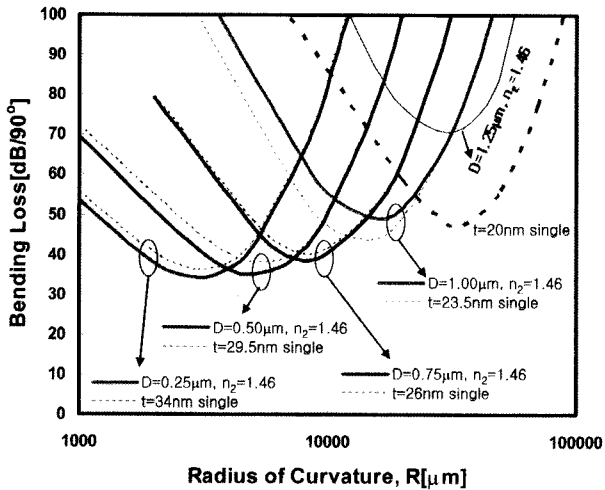


그림 10. 이중 금속선과 단일 금속선 곡선형 도파로의 최적반경과 손실 비교( $n_2 = 1.46$ ).

직선형 도파로에서 손실이 거의 일치하는 이중 금속선과 단일 금속선 구조를 선택하여 곡선형 도파로에서 분석하였다. 그림 10은 그림 8에서의 이중 금속선들과 각각에 대해서 직선형 구조에서 손실이 같은 단일 금속선들을 비교한 것이다. 단, 여기서 단일 금속선의 두께는 20 nm 이상의 값들이다.  $D = 1.00, 1.25 \mu\text{m}$ 인 경우를 제외한 나머지 이중 구조들은 단일 금속선 구조들에 비해서 최적 반경은 거의 비슷하지만 최소 손실이 2~3 dB 정도 낮음을 볼 수 있다. 이러한 결과는  $D = 0.75 \mu\text{m}$  이하에서는 이중 금속선 구조가 단일 금속선 구조보다 손실 면에서 좋은 전파특성을 가지고 있으므로 곡선형 구조가 많이 요구되는 집적회로에는 이중 금속선 구조가 더 유리하다는 것을 말해준다.

그림 11에서 비교되는 이중 금속선 구조들은 내부 굴절률이 서로 다르지만 직선형 도파로 구조에서 손실이 거의 일치하도록 간격  $D$ 가 설정되어 있다.  $R$ 이 작아지면서  $n_2 = 1.47$ 인 이중 금속선 구조의 손실이 상대적으로 훨씬 작아진다. 특히  $D = 2.20 \mu\text{m}, n_2 = 1.47$ 인 이중 금속선 구조는  $D = 0.75 \mu\text{m}, n_2 = 1.46$ 인 이중 금속선 구조와 비교했을 때에 최적 반경은 거의 비슷하지만 최소 손실은 대략 10 dB 정도 더 작게 하는 효과가 있다. 또한  $n_2 = 1.47$ 인 구조는  $D = 7.00 \mu\text{m}$  경우처럼 간격  $D$ 를 증가시킬수록 직선 도파로에서의 손실은 두께 20 nm 구조에 근접하지만 최소 손실은 크게 증가하지 않음을 알 수 있다. 결국 이중 금속선 곡선 도파로는 내부와 외부 굴절률이 같을 때에 손실면에서 가장 이상적이라고 할 수 있다.

### VII. 결 론

본 논문에서는 이중 금속선 구조와 단일 금속선 구조를 직선형 도파로에서의 전파 특성 분석을 기반으로 하여 곡선형 도파로에 적용하여 SPP에 의한 모드의 전파 특성을 분석하

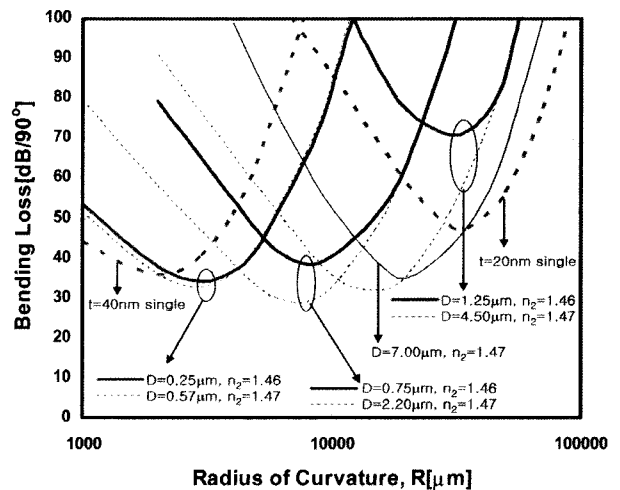


그림 11.  $n_2 = 1.46$ 인 이중 금속선과  $n_2 = 1.47$ 인 이중 금속선 곡선형 도파로 간의 최적반경과 손실 비교.

였다. 이를 통해 이중 금속선 구조는 단일 금속선 구조에 비해서 곡선형 도파로에서의 최소 손실을 줄일 수 있음을 확인하였다. 그리고 이중 금속선 구조 중에서도 내부와 외부의 굴절률이 비슷할수록 곡선형 도파로에 적합함을 알 수 있었다. 하지만 곡선형 도파로만 요구되는 집적회로라면 최적 반경을 매우 작게 할 수 있는 여지가 있는 내부 굴절률이 더 큰 이중 금속선 구조가 더 적합하다고 할 수 있다. 반대로 곡률반경이 무한대인 직선형 도파로만 요구되는 집적회로라면 내부 굴절률이 더 작은 구조를 선택해야 한다. 전체적으로 곡선형과 직선형 도파로의 손실 경향은 상충된다. 하지만 최적화된 이중 금속선 구조는 단일 금속선 구조에 비해서 곡선형 도파로에서의 손실을 크게 줄이면서도 직선형 도파로에서의 손실이 크게 증가하지 않는 장점을 갖는다고 할 수 있다.

이중 금속선의 금속 두께가 20 nm로 고정되어 있지만, 두께를 증가시켜도 그 영향이 이중 금속선과 단일 금속선에 똑같이 미치기 때문에 위에서 언급한 경향성은 유지된다. 다시 말해서, 두꺼워진 금속에 의한 모드 집중도가 높아져서 곡선형 도파로에서 최적 반경과 최소 손실값은 감소하지만 단일 금속선에 비해 이중 금속선의 손실이 작아지는 간격  $D$ 는 여전히 존재한다고 본다. 하지만 두께를 20 nm 이하로 줄이면 금속 벌크(bulk)의 특성에서 지나치게 벗어나게 되므로 이에 대한 결과를 분석하기 위해서는 수 개의 원자 크기 수준에서의 금속선의 특성에 대한 이해가 선결되어야 한다.

### 참고문헌

- [1] R. H. Ritchie, "Plasma Losses by Fast Electrons in Thin Films.," *Phys. Rev.*, vol. 106, no. 5, pp. 874-881, 1957.
- [2] E. A. Stern and R. A. Ferrell, "Surface plasma oscillations of a degenerate electron gas," *Phys. Rev.*, vol. 120, no.

- 1, pp. 130-136, 1960.
- [3] A. Otto, "Excitation of nonradiative surface plasma waves in silver by the method of frustrated total reflection," *Zeitschrift für Physik*, vol. 216, no. 4, pp. 398-410, 1968.
- [4] J. J. Burke, G. I. Stegeman, and T. Tamir, "Surface-polariton-like waves guided by thin, lossy metal films," *Phys. Rev. B*, vol. 33, no. 8, pp. 5186-5201, 1986.
- [5] W. Johnstone, G. Stewart, T. Hart, and B. Culshaw, "Surface plasmon polaritons in thin metal films and their role in fiber optic polarizing devices," *J. Lightwave Technol.*, vol. 8, no. 4, pp. 538, 1990.
- [6] F. Yang, J. R. Sambles, and G. W. Bradberry, "Long-range surface modes supported by thin films," *Phys. Rev. B*, vol. 44, no. 11, pp. 5855-5872, 1991.
- [7] R. Charbonneau, P. Berini, E. Berolo, and E. Lisicka-Shrzek, "Experimental observation of plasmon polariton waves supported by a thin metal film of finite width," *Opt. Lett.* vol. 25, no. 11, pp. 844-846, 2000.
- [8] P. Berini, "Plasmon-Polariton Waves Guided by Thin Lossy Metal Films of Finite Width: Bound Modes of Symmetric structures," *Phys. Rev. B.*, vol. 61, pp. 10484-10503, 2000.
- [9] R. Charbonneau, N. Lahoud, G. Mattiussi, and P. Berini, "Demonstration of integrated optics elements based on long-ranging surface plasmon polaritons," *Opt. Express*, vol. 13, no. 3, pp. 977-984, 2005.
- [10] P. Berini and J. Lu, "Curved long-range surface plasmon-polariton waveguides," *Opt. Express*, vol. 14, no. 6, pp. 2365-2371, 2006.
- [11] 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, pp. 011110, 2006.
- [12] 김경민, 원형식, 송석호, 김필수, "이온교환 광 도파로에서의 표면 플라즈몬 공명", *한국광학회 하계발표회, 학술발표대회 논문집*, vol. , no. 0, pp. 180-181, 2002.
- [13] G. L. Xu, W. P. Huang, M. S. Stern, and S. K. Chaudhuri, "Full-vectorial mode calculations by finite difference method," *IEE Proc.-Optoelectron*, vol. 141, no. 5, pp.281-286, 1994.
- [14] S. Kim and A. Gopinath, "Vector analysis of optical dielectric waveguide bends using finite-difference method," *J. Lightwave Technol.* vol. 14, pp. 2085-2092, 1996.
- [15] R. Mittra and U. Pekel, "A new look at the perfectly matched layer (PML) concept for the reflectionless absorption of electromagnetic waves," *IEEE Microwave Guided Wave Letters*, vol. 5, no. 3, pp. 84-86, 1995.
- [16] S. J. Al-Bader, H. A. Jamid, "Perfectly matched layer absorbing boundary conditions for the method of lines modeling scheme," *IEEE Microwave and Guided Wave Letters*, vol. 8, no. 11, pp. 357-359, 1998.
- [17] J. Wilkinson, *The algebraic eigenvalue problem*, Clarendon Press, 1965.
- [18] 송석호, 주양현, 원형식, "이중 금속-선 광 도파로의 분산관계", *한국광학회 하계발표회, 학술발표대회 논문집*, vol. , no. 0, pp. 41-42, 2006.

## A Study on the Propagation Characteristics in Double Metal Strip Waveguides

Sangjun Lee and Sangin Kim<sup>†</sup>

Department of Electrical and Computer Engineering, Ajou University, San 5, Wonchun-Dong Yeongtong-Gu, Suwon, 443-749, Korea

<sup>†</sup>E-mail: sangin@ajou.ac.kr

Seok Ho Song

Department of Physics, Hanyang University, Haengdang-Dong 17, Seongdong-Gu, Seoul, 133-791, Korea

(Received February 6, 2007, Revised manuscript May 31, 2007)

In this paper, we analyze the characteristics of various curved waveguides composed of double metal strips using finite difference method (FDM). Our investigation reveals that the bending loss of the double metal strip waveguide can be improved with less degradation of the straight waveguide's propagation loss compared to the single metal strip structure. Optimization of the double metal strip waveguide structure has been conducted considering bending and propagation losses.