

論文97-34D-8-9

굽음손실이 적은 Bulged형 Abrupt Bend 구조의 제안

(Proposal of Bulged-Type Abrupt Bend Structure with Low Bending Loss)

韓 相 弼 * , 金 昌 敏 *

(Sang-Pil Han and Chang-Min Kim)

요 약

새로운 형태의 굽음손실이 적은 bulged형 abrupt bend 구조를 제안하며, 최적의 설계치를 얻기 위하여 FD-BPM을 이용하였다. 일반적인 bend 구조에 대한 성능 평가와 이를 바탕으로 개선된 bend 구조를 예측하는 방법을 기술하였다. BPM에 의한 모의전산 수행시 bulged형 bend의 비교 대상으로 coupled형 및 chamfered형 bend를 택하였다. 비교한 결과 bulged형 bend의 성능이 굽음손실과 설계공차의 관점에서 가장 우수한 것으로 평가되었다.

Abstract

Bulged-type bends with low bending loss are newly proposed, and the FD-BPM is made use of for designing optimum structure. How to evaluate bending loss of conventional bends and how to improve the bending structure based on the phase compensation concept are described in general. Besides simulation results for the bulged-type bends, results for the coupled-type bends and the chamfered-type bends are also illustrated for comparison's sake. It is concluded that the bulged-type bends show the most superior performance in terms of not only the bending loss but also the design tolerance.

I. 서 론

광 집적회로에서 bend 구조는 수동 및 능동소자에서 필연적으로 나타나는 형태이다. Bend 구조는 일반적으로 S자형 구조가 바람직한 것으로 알려져 있지만, 본고에서는 abrupt bend를 대상으로 하고 있다. Bend 구조 설계시 가장 바람직한 것은 적은 굽음손실을 허용하는 동시에 bend의 굽은 길이를 최대한 줄이는 것이다. 이

러한 문제를 해결하기 위해서는 굽어지는 부분의 각도 즉, 굽음각도를 2° 이상으로 높일 필요가 있다. 그러나 일반적인 abrupt bend 구조의 굽음각도가 2° 이상인 경우는 도파로가 굽음으로 생기는 굽음손실이 많아 소자로 사용하기가 어렵다. 이러한 이유에서 굽음각도가 2° 이상으로 크면서 소자로 사용할 수 있을 정도로 굽음손실이 적은 여러 가지 형태의 bend구조가 제안되어 왔다.

첫 번째로 제안된 것이 coupled형 bend^[1,3] 이다. 굽음손실을 줄이기 위하여 coherent coupling 효과를 이용한 것으로써 원래의 굽음각도에 반(1/2)인 각도로 두개의 굽음 도파로를 결합시킨 방법이다. 이 구조는 방사모드가 아닌 도파모드를 형성하는 정확한 결합길이를 결정해야 한다는 단점이 있다. 두 번째는 chamfered형 bend^[2,3] 이다. bend의 바깥쪽의 phase

* 正會員, 서울市立大學校 電子工學科
(Department of Electronics Engineering, Seoul City University)

※ 본 연구는 1996년도 서울시립대학교 학술연구조성비 지원에 의하여 수행되었음.

接受日字:1997年1月27日, 수정완료일:1997年7月7日

front의 속도를 증가시키기 위한 방법으로 bend의 바깥쪽 꺾인 부분을 비스듬히 깎아서 깎아 낸 부분에 clad의 굴절률보다 더 작은 굴절률로 대체시킨 것이다. 이 것의 단점은 꺾인 부분의 도파로 폭이 깎인 만큼 도파되는 광의 집속도가 줄어드는 것이다. 세 번째는 microprism형 bend^[4,5]이다. 꺾인 부분에 도파로의 굴절률보다 더 높은 굴절률을 가진 삼각형 모양의 microprism을 삽입하여 굽음손실을 줄이고자 제안한 구조이다. 이외에도 굽음손실을 줄이기 위한 또 다른 형태의 abrupt bend 구조가 제안되고 있다^[6].

광 집적회로는 실제로 3차원 구조를 이루고 있지만, 보통의 경우에 유효굴절률법을 이용하여 해석대상을 3차원에서 2차원 구조로 대체시켜 해석할 수 있다. Abrupt bend와 같은 불연속한 2차원 광도파로 구조를 해석하는 방법으로서는 빔전송이론(BPM: beam propagation method)^[2-5,7], Taylor 근사기법(Taylor's approximate technique)^[8], 적분 방정식법(integral equation method)^[9], 반복법(successive method)^[10], 유한요소 및 경계요소 병행법(combination of finite-element and boundary-element methods)^[11] 등이 이용되어 왔다. 이 중에서 BPM이 약도와 구조의 bend를 해석하는 기법으로 가장 널리 사용되었다. BPM은 임의의 경계와 비균일 매질이 불연속하게 변하는 도파로에 적용하기 쉬울뿐 아니라 진행되는 광파의 전계분포를 관찰할 수 있는 이점이 있기 때문이다.

본 논문에서는 새로운 형태의 굽음손실이 적은 abrupt bend 구조를 제안하며, 최적의 설계치를 찾아내기 위해서 FD-BPM(finite difference BPM)^[12]을 이용하였다. BPM에 의한 계산을 하기 전에 일반적인 bend 구조에 대한 평가와 이를 바탕으로 개선된 bend 구조를 예측하는 방법을 기술하였다. 모의전산 수행시 비교 대상으로 coupled형 및 chamfered형 bend를 택하였다. 비교한 결과 제안하는 구조인 bulged형 bend가 성능이 가장 우수한 것으로 평가되었다.

II. 빔전송이론

BPM은 직선 도파로의 모드특성은 물론, 광의 진행 방향으로 굴절률이 변화하는 도파구조에서의 도파특성을 해석하는 방법으로 비교적 정확한 기법으로 알려져

있다. 또한, 내부 유전체 경계를 가로지르는 전계의 법선성분의 불연속성도 잘 묘사할 수 있는 장점을 지니고 있다. 특히, FD-BPM은 FFT-BPM(fast fourier transform BPM)^[7]에 비하여 정확도와 계산속도면에서 많은 이점을 가지고 있으며 비균일 mesh를 적용할 수 있는 장점도 있다.

FFT-BPM의 경우 $\theta=4^\circ$ 및 $\theta=10^\circ$ 에 대한 bend의 정규화 전송전력이 각각 90% 및 81%로 계산되었으나, FD-BPM의 경우는 같은 각도에 대해서 각각 91% 및 84%로 산출되어 FD-BPM이 FFT-BPM보다 다소 안정적이면서 효율적인 것으로 평가되었다^[5]. 그리고 10° 이내의 경사각도를 가진 bend는 기존의 BPM으로 해석이 가능하나, 그 이상의 각도에서는 새로운 알고리즘의 방법인 wide-angle BPM을 이용해야만 더 정확한 해를 구할 수가 있다^[13].

일반적으로 도파로에 대한 스칼라 Helmholtz 파동 방정식은 다음과 같이 표현되고

$$\left\{ \nabla_t^2 + \frac{\partial^2}{\partial z^2} + k_0^2 n^2(x, y, z) \right\} E(x, y, z) = 0 \quad (1)$$

여기서

$$\nabla_t^2 = \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2}, \quad k_0 = \frac{\omega}{c} \quad (2)$$

k_0 와 n 은 각각 파수와 굴절률분포를 가리키며, E 는 전계분포를 의미한다.

중축근사와 2차원에 대한 유한차분형태의 식은

$$j2k_0 n_s \frac{\partial E(x_i, z)}{\partial z} = \frac{E(x_{i-1}, z) - 2E(x_i, z) + E(x_{i+1}, z)}{\Delta x^2} + k_0^2 \{n^2(x_i, z) - n_s^2\} E(x_i, z) \quad (3)$$

이 되며, 최종적으로 다음의 식과 같은 FD-BPM 행렬식이 도출된다.

$$\begin{pmatrix} b & -a & & & \\ -a & b & -a & & \\ & -a & b & -a & \\ & & & \ddots & \\ & & & -a & b & -a \\ & & & & -a & b & -a \\ & & & & & -a & b \end{pmatrix} \begin{pmatrix} E(x_1, z + \Delta z) \\ E(x_2, z + \Delta z) \\ E(x_3, z + \Delta z) \\ \vdots \\ E(x_{N-2}, z + \Delta z) \\ E(x_{N-1}, z + \Delta z) \\ E(x_N, z + \Delta z) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} c & a & & & \\ a & c & a & & \\ & a & c & a & \\ & & & \ddots & \\ & & & & a & c & a \\ & & & & & a & c & a \\ & & & & & & a & c \end{pmatrix} \begin{pmatrix} E(x_1, z) \\ E(x_2, z) \\ E(x_3, z) \\ \vdots \\ E(x_{N-2}, z) \\ E(x_{N-1}, z) \\ E(x_N, z) \end{pmatrix} \quad (4)$$

여기서

$$a = \frac{\Delta z}{2\Delta x^2} \quad (5a)$$

$$b = \frac{\Delta z}{\Delta x^2} - \frac{\Delta z}{2} k_0^2 (n^2(x_i, z + \Delta z) - n_s^2) + 2jk_0 n_s \quad (5b)$$

$$c = -\frac{\Delta z}{\Delta x^2} + \frac{\Delta z}{2} k_0^2 (n^2(x_i, z) - n_s^2) + 2jk_0 n_s \quad (5c)$$

Δx , Δz 는 각각 횡축, 종축상의 유한차분치를 의미하고, n_s 는 기준 굴절률이 되는 substrate의 굴절률이다.

이후, 해석하고자하는 대상은 TE 모드의 slab 도파로로 가정하였으며, (4)식의 스칼라 FD-BPM을 적용하였다.

III. 굽음손실 및 위상보정

일반적으로 굽음손실은 단일 모드 광도파로에 입사된 고유 모드의 광파와 그 도파로를 따라 z축으로 z만큼 진행된 광파간의 중첩도인 중첩적분을 이용하여 정의된다^[14].

$$\text{Bending loss (dB)} = -10 \log_{10} \left| \frac{\int E(x, z) E_{\text{ev}}(x, z) dx}{\int |E_{\text{ev}}(x, 0)|^2 dx} \right|^2 \quad (6)$$

여기서, $E(x, z)$ 는 도파로를 z만큼 진행한 후의 광파의 전개분포를, $E_{\text{ev}}(x, z)$ 는 z에서의 고유모드 광파의 전개분포를, $E_{\text{ev}}(x, 0)$ 는 입사된 고유모드 광파의 전개분포를 가리킨다. 그림 1(a)는 일반적인 bend 구조에 대한 그림으로 θ 는 굽음각도를 의미하며, λ 는 입사광의 파장, n_1 은 clad의 굴절률, n_2 는 도파로의 굴절률, w 는 도파로폭, G 는 입사된 광파의 중심의 위치에서 굽음손실을 계산하고자 하는 광파의 중심 위치만큼 x축을 따라 떨어진 거리를 가리킨다.

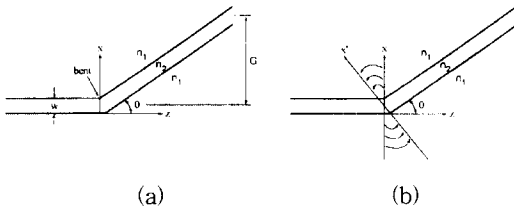


그림 1. (a) 일반적인 bend 구조, (b) 굽은 각도에 따른 축의 변화
Fig. 1. (a) Typical bend structure, (b) Change of axis at bend

그림 1(b)는 z축을 따라 진행하던 입사광의 전개분포가 θ 만큼 굽은 부분을 처음 만나는 순간을 묘사하고 있다. x축을 고르게 유지하면서 진행하던 광 전개분포의 phase front는 z가 0인 지점에서 bend를 만나면서 x축에서 x' 축으로 순간적으로 바뀌지 못하고 얼마간 동요를 일으키다가 정상상태를 유지하게 된다. θ 가 크면 클수록 이러한 동요는 커지게 되고, 이런 현상은 굽음손실의 주요인이 된다. Phase front를 x축에서 x' 축으로 빠른 속도로 변화를 가능하게 해준다면 동요는 적어질 것이고 굽음손실 역시 줄어들게 될 것이다. 따라서 도파로의 폭 및 clad의 굴절률을 변화시켜 줄 필요가 있는 것이다. 즉, 굽은 부분의 안쪽은 광 전개분포의 phase front 속도를 전체적으로 감소시키는 의미에서 굴절률을 높이고, 반대로 도파로 바깥쪽은 phase front 속도를 증가하도록 하는 효과를 주기 위하여 굴절률을 낮추어 준다.

그림 2는 그림 1(a)에 있는 slab 도파로의 일반적인 bend 구조에 대해서, 정규화 주파수 $V (= k_0 w \sqrt{n_2^2 - n_1^2})$ 와 관측위치를 의미하는 G 를 파라미터로 하여 굽음각도 θ 의 변화에 따라 계산된 굽음손실이 다. 이때 $\lambda = 1.3\mu\text{m}$, $w = 4\mu\text{m}$, $n_1 = 1.5$ 로 놓았으며, V 가 2.0 및 3.0일 때 모두 단일 모드만을 형성한다. 참고로 slab 도파로의 경우에 1차 모드의 차단주파수는 $V = \pi$ 일때이다.

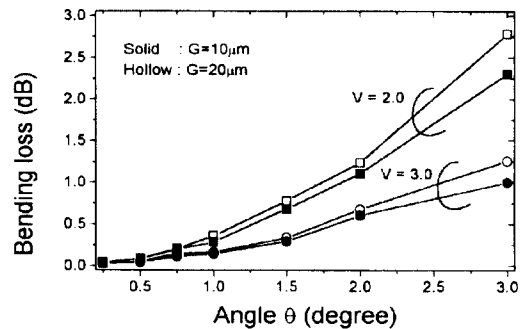


그림 2. 굽음각도 θ 에 따른 굽음손실
($\lambda = 1.3\mu\text{m}$, $w = 4\mu\text{m}$, $n_1 = 1.5$)
Fig. 2. Bending loss as a function of bending angle θ .

그림 2를 통하여 알 수 있듯이 일반적인 bend구조에 있어서 굽음손실은 굽음각도와 정규화 주파수에 영향을 많이 받는다. 특히 굽음각도가 3°인 경우의 손실은 $V = 2.0$ 일 때 2.3dB($G = 10\mu\text{m}$), 2.8dB($G = 20\mu\text{m}$),

$V=3.0$ 일 때 $1.0\text{dB}(G=10\mu\text{m})$, $1.3\text{dB}(G=20\mu\text{m})$ 로 매우 커서 일반적으로 소자로 사용하기에 바람직하지 못한 경우에 해당된다. 또한, θ 가 1° 이내에서는 G 의 변화에 거의 영향을 받지 않다가 1° 에서 3° 로 증가할수록 점점 차이가 심하여짐을 알 수 있다. 이것은 진행하는 광이 굽은 영역을 지난후에 $G=20\mu\text{m}$ 에서도 안정을 이루지 못하였기 때문이며, θ 가 3° 인 경우에 광이 안정을 찾은 후의 굽음손실은 적어도 2.8dB 이상 이 될 것이다. 따라서, 일반적인 구조는 바뀔 필요가 있는 것이며 θ 가 커도 광이 쉽게 안정을 갖을 수 있는 구조를 찾아야 할 것이다.

IV. 모의전산

본 논문에서는 굽음각도가 3° 인 경우에 대해서만을 대상으로 bend구조를 개선시켜 굽음손실이 적으면서 최적의 조건을 만족시키는 설계치를 찾음을 목적으로 하였다. 제안하고자 하는 bulged형 bend를 먼저 언급한후 기존에 제안되어 있는 coupled형 bend 및 chamfered형 bend의 특성을 알아보았다. 본 논문에서 제안하는 bulged형 bend 구조는 꺾인 부분 안쪽의 굴절률을 높이는 효과로 도파로 안쪽 폭을 넓혔으며, 바깥쪽은 trench 구조^[15]를 채택하여 clad의 굴절률을 낮추었다. 이러한 trench 구조는 일찍이 Pennings에 의하여 제안되었으며^[16], GaAs나 InP 기판상에서 구현이 가능하다.

그림 3에는 대표적인 bulged형 bend의 구조가 그려져 있다. 그림에서의 d 는 $\theta/2$ 의 각도에 대한 z 축에 수직인 방향으로의 변위를 나타낸다. W_t 는 trench의 폭으로써 대체로 도파로의 폭보다 2~3배 이상의 길이를 유지하여주면 되기 때문에^[15], 본 모의전산에서는 $W_t=3w$ 으로 놓았다. L_t 는 trench의 길이로써 다음의 식으로 주어지며,

$$L_t = \frac{2d}{\sin(\theta/2)} \quad (7)$$

Δn_t 는 clad 굴절률과 trench 굴절률의 차이이다.

$$\Delta n_t = n_1 - n_2 \quad (8)$$

1. Bulged형 bend 구조

Bend의 꺾인 부분 안쪽에 도파로 굴절률과 동일한 굴절률을 변위 d 만큼 덧붙이고 바깥쪽은 안쪽에 덧붙

인 영역에 맞추어 trench를 만든다. 이 것은 bend 안 쪽으로는 진행하는 전계의 phase front의 속도를 느리게 하고 바깥쪽은 빠르게 하는 효과를 얻을 수 있다. 따라서 도파로 안팎의 전계의 phase front를 고르게 하여 θ 만큼 기울어진 진행방향과 수직하게 하는 역할을 한다. 그림 4, 5, 6은 bulged형 bend구조에 대한 모의전산 결과이다.

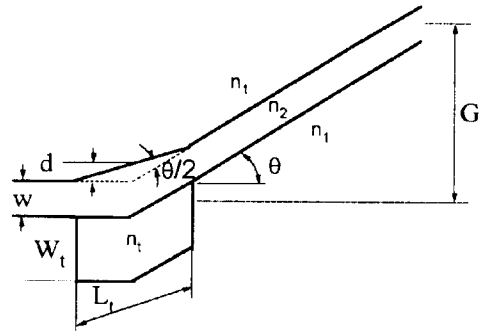


그림 3. Bulged형 bend 구조

Fig. 3. Bulged-type bend structure.

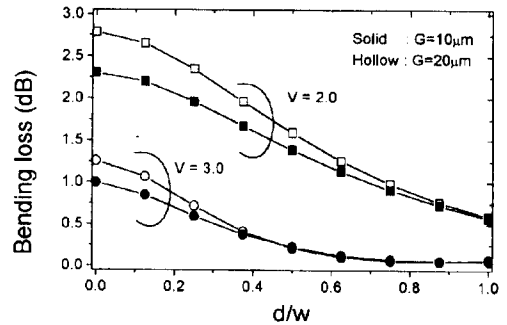


그림 4. Bulged형 bend 구조의 안정도

($\theta=3^\circ$, $\lambda=1.3\mu\text{m}$, $w=4\mu\text{m}$, $n_1=1.5$)

Fig. 4. Stability characteristics of bulged-type bends.

그림 4는 bulged형 bend 구조가 G 의 증가에도 불구하고 쉽게 안정되고 있음을 보여주고 있다. 그림 5는 trench가 없는 경우의 굽음손실에 대한 결과를 보여주고 있다. $V=2.0$ 인 경우에 굽음손실의 최소점은 $d/w=1.9$ 일 때 0.19dB 이며, $V=3.0$ 인 경우에는 $d/w=0.875$ 일 때 0.05dB 인 것으로 계산되었다. 단일모드를 유지하면서 집속력이 강한 $V=3.0$ 인 경우가 집속력이 약한 $V=2.0$ 인 경우보다 d 를 덜 주어도 쉽게 굽음손실을 줄일 수 있음을 알 수 있다.

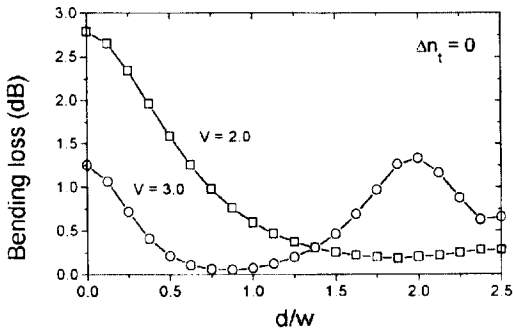


그림 5. Trench가 없는 bulged형 bend 구조
 ($\theta=3^\circ$, $\lambda=1.3\mu\text{m}$, $w=4\mu\text{m}$, $n_1=1.5$, $G=20\mu\text{m}$)
 Fig. 5. Bulged-type bends without trench

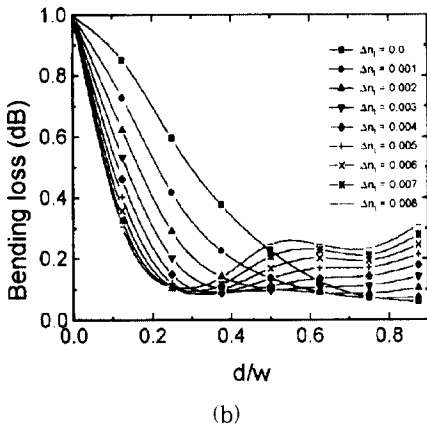
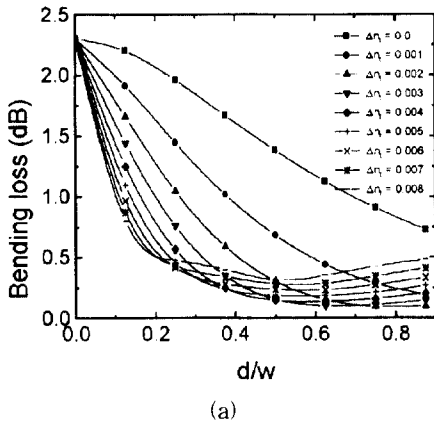


그림 6. Bulged형 bend 구조의 굽음손실
 ($\theta=3^\circ$, $\lambda=1.3\mu\text{m}$, $w=4\mu\text{m}$, $n_1=1.5$, $G=10\mu\text{m}$)
 Fig. 6. Bending losses of bulged-type bends
 (a) $V=2.0$ (b) $V=3.0$

그림 6은 Δn_t 를 파라미터로 하여 $V=2.0$ 및 3.0 에 대해서 각각 d/w 를 변화시켜주어 굽음손실이 적은 경

우를 찾아본 것이다. 어떠한 Δn_t 에 대해서도 적절한 d/w 값을 택한다면 굽음손실이 적은 경우를 얻을 수 있다. 그러나 Δn_t 이 너무 큰 경우는 오히려 옳지 못한 결과를 초래하기 때문에 최적의 조건을 만족하는 경우를 선택하면 된다. 그림 6에서 보듯이 bulged형 bend 구조의 굽음손실은 Δn_t 나 d/w 의 변화에 민감하지 않고 완만함을 알 수 있다.

2. Coupled형 bend 구조

방사손실을 줄이기 위해서 coherent coupling 효과를 이용한 것으로서 굽어지는 부분을 더 작은 각도로 두 개의 bend 도파로로 결합시킨 방법이다. 이 구조는 도파모드와 방사모드 사이의 정확한 결합길이를 결정하기가 어렵다는 단점이 있으며, 굽음각도가 $2\sim 3^\circ$ 로 작은 경우에만 이용이 가능하다. 굽음각도가 3° 보다 큰 경우에 적용하려면 1° 정도의 작은 각도의 bend를 계속해서 세 개 이상 결합시켜야 하며, 이것은 오히려 소자의 길이를 늘리는 결과를 초래한다. 그림 7은 coupled형 bend구조를 나타낸 그림이며, 그림 8은 coupled형 bend구조에 대한 모의전산 결과이다.

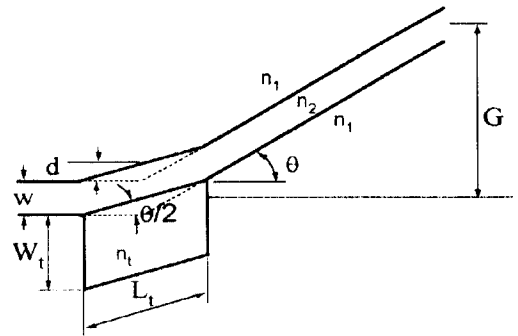
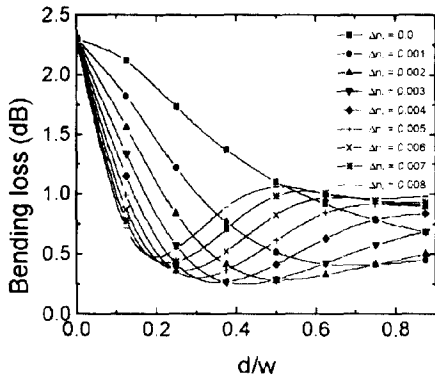


그림 7. Coupled형 bend 구조
 Fig. 7. Coupled-type bend structure.

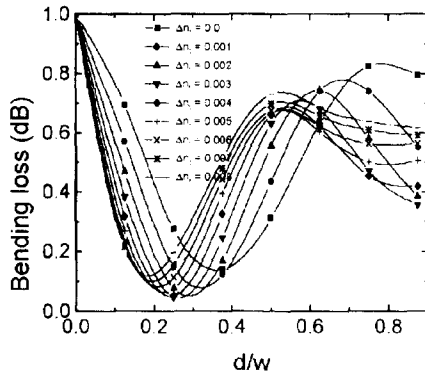
그림 6에서와 마찬가지로 그림 8에서도 Δn_t 를 파라미터로 하여 $V=2.0$ 및 3.0 에 대해서 각각 d/w 를 변화시켜주어 굽음손실이 적은 경우를 찾아보았다. 이 구조에서도 Δn_t 및 d/w 를 적절히 변화시키면 굽음손실이 적은 최적의 조건을 찾을 수 있지만 bulged형 bend 구조에 비하여 요동이 심하게 나타남을 알 수 있다.

3. Chamfered형 bend 구조

Bend 바깥쪽에 분포한 전계의 phase front의 속도를 증가시키기 위한 방법으로 bend의 바깥쪽을 비스



(a) $V=2.0$



(b) $V=3.0$

그림 8. Coupled형 bend 구조의 굽음손실
($\theta=3^\circ$, $\lambda=1.3\mu\text{m}$, $w=4\mu\text{m}$, $n_1=1.5$, $G=10\mu\text{m}$)
Fig. 8. Bending losses of coupled-type bends

듬히 깎아서 깎아 낸 부분에 clad보다 더 작은 굴절률로 대체시킨 것이다. 이 구조를 택하여도 phase front는 전체적으로 완전히 맞지 않기 때문에 굽음손실은 제한된 범위 내에서만 줄일 수 있으며, 이 것의 또다른 단점은 꺾인 부분의 도파로 바깥쪽 폭이 깎인 만큼 도파되는 광의 집속도가 줄어드는 것이다. 그림 9는 chamfered형 bend 구조를 나타낸 것이며, 그림 10은 chamfered형 bend 구조에 대한 모의전산 결과이다

그림 10에서도 Δn_1 를 파라미터로 하여 $V=2.0$ 및 3.0에 대해서 각각 d/w 를 변화시켜주어 굽음손실이 적은 경우를 찾아보았으며, 역시 Δn_1 및 d/w 를 적절히 변화시키면 굽음손실이 적은 최적의 조건을 찾을 수 있었다. 이 구조는 설계공차 측면에서 coupled형 bend 구조보다는 좋지만 전체적으로 볼 때 bulged형 bend 구조에 비해서는 뒤떨어짐을 알 수 있다.

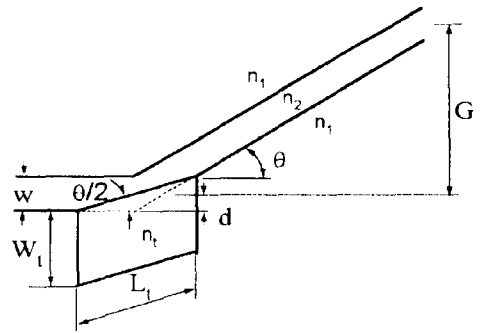
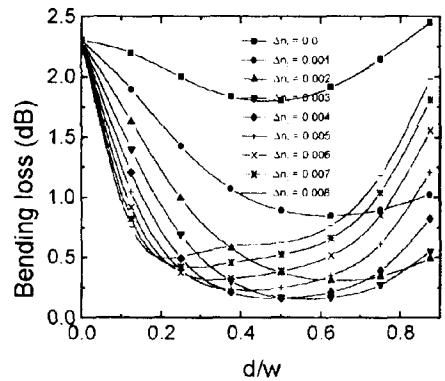
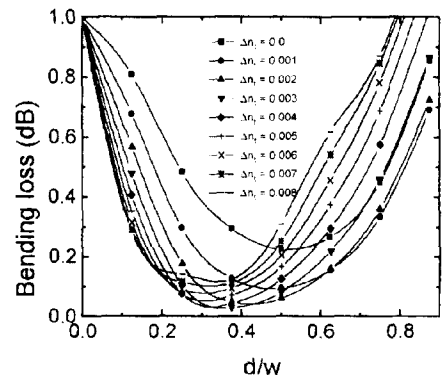


그림 9. Chamfered형 bend 구조
Fig. 9. Chamfered-type bend structure.



(a) $V=2.0$



(b) $V=3.0$

그림 10. Chamfered형 bend 구조의 굽음손실
($\theta=3^\circ$, $\lambda=1.3\mu\text{m}$, $w=4\mu\text{m}$, $n_1=1.5$, $G=10\mu\text{m}$)
Fig. 10. Bending losses of chamfered-type bends.

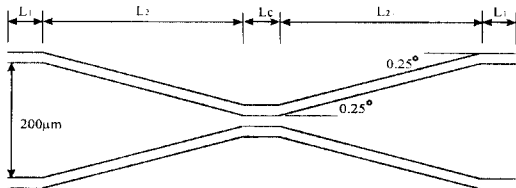
4. 비교 검토

1, 2 및 3 구조의 전산모의 결과를 종합적으로 비교 검토하여 보면, $V=3.0$ 인 경우에는 trench가 필요없이

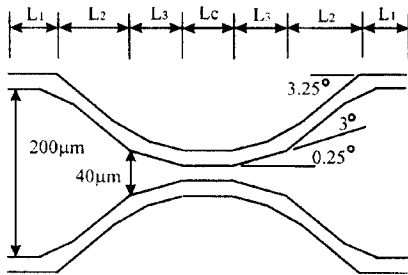
모두 d만을 조정하면 굽음손실이 적은 좋은 설계치를 얻을 수 있다. V=2.0인 경우에 대해서는 bulged형 및 coupled형 bend 구조는 d만을 조정하면 되고, 모든 구조에 대해서 trench 구조와 더불어 d를 가변시키면 역시 손실이 적고 바람직한 설계치를 얻을 수 있다. 다만 그림 6, 8, 10을 비교해 볼 때 d에 따른 변화 즉, d/w값에 덜 민감하면서 손실이 적은 1의 구조인 제안하는 bulged형 bend가 성능이 가장 우수하다고 할 수 있다.

V. 응용

그림 11은 모의전산 결과를 토대로 일반적인 구조와 bulged형 bend를 각각 적용하여 만든 V=3.0인 2×2 방향성 결합기의 예를 보인 그림이다. Bulged형 bend구조를 이루는 소자의 총 길이는 일반적인 구조를 이루는 소자의 총 길이에 약 1/2배로 계산되었다. 각각의 구조에 대한 총 손실을 표 1에 수록하였다.



(a)



(b)

그림 11.(a) 일반적인 bend 구조를 갖는 방향성 결합기, (b) Bulged형 bend 구조를 갖는 방향성 결합기

Fig. 11.(a) Directional coupler with ordinary bends, (b) Directional coupler with bulged-type bends

L₁은 소자의 입·출력부로 10mm씩으로 충분한 길이를 주었으며, L₂와 L₃는 굽은 영역이고 L_c는 방향성

결합기의 결합길이로 2mm를 주었다. 소자의 전파손실 L_p는 [17]의 자료를 참고하여 0.2dB/cm로 놓았다. 굽음손실 L_b을 보면, 일반적인 bend 구조는 손실이 매우 적은 0.25° 각도를 택하였으며, bulged형 bend 구조에서는 trench가 없는 θ=3°, d/w=0.875인 구조를 택하였다. 결과적으로 두 구조의 손실을 살펴보면, L_p는 일반적인 구조가 bulged형 구조보다 2배정도 많은 반면 L_b는 거의 비슷하여, 결국 총손실은 bulged형 구조의 소자가 더 적음을 알 수 있었다.

표 1. 각 구조에 대한 총손실

Table 1. Total losses of each structure.

	일반적인 구조의 2×2 coupler	bulged형 구조의 2×2 coupler
총 길이(L)	$2(L_1+L_2)+L_c = 2(10,000+22,460)+2,000 = 66,460\mu\text{m}$	$2(L_1+L_2+L_3)+L_c = 2(10,000+1,374+4,584)+2,000 = 33,916\mu\text{m}$
전파손실(L _p)	$L(\text{cm}) \times 0.2(\text{dB}/\text{cm}) = 1.32\text{dB}$	$L(\text{cm}) \times 0.2(\text{dB}/\text{cm}) = 0.68\text{dB}$
굽음손실(L _b)	$2 \times 0.04\text{dB}(\theta = 0.25^\circ) = 0.08\text{dB}$	$4 \times 0.05\text{dB}(\theta = 3^\circ, d/w = 0.875) = 0.20\text{dB}$
총 손실	$L_p + L_b = 1.40\text{dB}$	$L_p + L_b = 0.88\text{dB}$

VI. 결론

광 집적회로에서의 bend 구조는 필연적으로 접하게 되며 bend 구조의 개선은 반드시 이루어져야 할 과제이다. Abrupt bend 구조를 개선시킬 수 있는 방법 중에 하나는 도파로를 따라 진행되는 입사광의 전계의 phase front를 보정해 주는 방법이다. Bend의 굽은 부분 안쪽은 phase front의 속도를 점차적으로 감소시켜 주고, 반대로 바깥쪽은 phase front의 속도를 점차적으로 증가하도록 보정하여 주는 것이다. 이러한 기본원리를 바탕으로 큰 굽음각도에서도 굽음손실이 적은 새로운 형태인 굽은 부분의 안쪽이 적당하게 부풀은 bulged형 bend 구조를 제안하였다.

일반적인 bend 구조는 굽음각도 θ=3°, 정규화 주파수 V=2.0인 경우에 굽음손실이 2.3dB(G=10µm)이고, V=3.0인 경우에는 1.0dB(G=10µm)인데 비하여, 동일한 조건하에 bulged형 bend 구조의 굽음손실은 최적의 d/w와 Δn_r에서 0.1dB이하로 좋은 값을 얻었다. 그러므로, bulged형 bend 구조는 일반적인 bend보다 성능이 상당히 우수함은 물론이고, 이 구조의 굽은영역에서의 도파로폭 변화율인 d/w가 기준에 제안되어 있는 coupled형이나 chamfered형 bend보다 덜

민감하기 때문에 설계공차 측면에서 가장 우수하다고 할 수 있다.

참 고 문 헌

- [1] L. M. Johnson and F. J. Leonberger, "Low-loss LiNbO₃ waveguide bends with coherent coupling," *Opt. Lett.*, vol. 8, pp. 111-113, Feb. 1983.
- [2] T. Shiina, K. Shirashi, and S. Kawakami, "Waveguide-bend configuration with low-loss characteristics," *Opt., Lett.*, vol. 11, pp. 736-738, 1986.
- [3] S. N. Radcliffe and T.P. Young, "New low-loss bend structures for high-density integrated optical switch arrays," *IEEE J. Select. Area Commun.*, vol. 6, pp. 1169-1177, Aug. 1988.
- [4] K. Hirayama and M. Koshihara, "A new low-loss structure of abrupt bends in dielectric waveguides," *J. Lightwave Technol.*, vol. 10, pp. 563-568, May 1992.
- [5] H. Lin, J. Su, P. Wei, and W. Wang, "Design and application of very low-loss abrupt bends in optical waveguides," *IEEE J. Quantum Electron.*, vol. 30, pp. 2827-2835, Dec. 1994.
- [6] S. Safieddin and Y. L. Chow, "A novel design and analysis of low loss abrupt bends of dielectric slab waveguides," *J. Lightwave Technol.*, vol. 10, pp. 570-580, May 1992.
- [7] S. P. Han and C. M. Kim, "Evaluation of tapered directional coupler optical switch by the beam propagation method," *KITE J. Electron. Eng.*, vol. 5, pp. 18-24, Jun. 1994.
- [8] H. F. Taylor, "Losses at corner bends in dielectric waveguides," *Appl. Opt.*, vol. 16, pp. 711-716, Mar. 1977.
- [9] Tanaka and M. Kojima, "New boundary integral equations for computer-aided design of dielectric waveguide circuits," *J. Opt. Soc. Amer. A*, vol. 6, pp. 667-674, May 1989.
- [10] N. Morita, "A rigorous analytical solution to abrupt dielectric waveguide discontinuities," *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, vol. 39, pp. 1272-1278, Aug. 1991.
- [11] K. Hirayama and M. Koshihara, "Analysis of discontinuities in an open dielectric slab waveguide by combination of finite and boundary elements," *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, vol. 37, pp. 761-768, Apr. 1989.
- [12] Y. Chung and N. Dagli, "Analysis of Z-invariant and Z-invariant semiconductor rib waveguides by explicit finite difference beam propagation method with non-uniform mesh configuration," *IEEE J. Quantum Electron.*, vol. 27, pp. 2296-2305, 1991.
- [13] Y. Chung and N. Dagli, "A wide angle propagation technique using an explicit finite difference scheme," *IEEE Photonics Technol. Lett.*, vol. 6, pp. 540-542, Apr. 1994.
- [14] I. Mansour and C. G. Someda, "Numerical optimization procedure for low-loss sharp bends in MgO co-doped Ti:LiNbO₃ waveguide", *IEEE Photonics Technol. Lett.*, vol. 7, no. 1, pp. 81-83, Jan. 1995.
- [15] 한영진, 김창민, "원형으로 굽은 광도파로의 low bending loss를 위한 trench 구조 설계: 원통 좌표계 FD-BPM", *한국광학회지*, 제 6권, 제 4호, 1995년 12월
- [16] E. C. M. Pennings, R. J. Deri, and R. J. Hawkins, "Simple method for estimating usable bend radii of deeply etched optical rib waveguide", *IEEE Proc. Part J*, vol. 139, pp. 101-103, 1992.
- [17] C. M. Kim and R. V. Ramaswamy, "Modeling of graded-index channel waveguides using nonuniform finite difference method," *J. Lightwave Technol.* vol. 7, pp. 1581-1589, Oct. 1989.

저 자 소 개



韓 相 弼(正會員)

1964년 5월 9일생. 1992년 2월 서울
시립대학교 전자공학과 졸업. 1994년
2월 서울시립대학교 대학원 전자공
학과 석사 졸업. 1997년 2월 서울시
립대학교 대학원 전자공학과 박사 수
료. 주관심분야는 집적광학, 수동·능

동·기능 등의 도파로형 광소자, FDM, BPM, FEM,
SOR 등의 수치해석에 의한 광소자 설계 등임

金 昌 敏(正會員) 第 34卷 D編 第 1號 參照

현재 서울시립대학교 전자전기공학
부 부교수