

도파로의 편광 의존성에 경계면이 미치는 효과와 편광 독립적인 InP형 배열 도파로 회절 격자 소자를 위한 2차원 광 도파로의 설계

김동철 · 최정훈 · 유건호

경희대학교 물리학과 및 기초과학연구소

김형문 · 주홍로 · 김홍만

한국전자통신연구원 회로소자기술연구소

(1998년 4월 10일 받음, 1998년 9월 14일 수정본 받음)

편광 독립적인 InP형 배열 도파로 회절 격자 소자의 설계를 위하여 경계면이 편광 의존성에 미치는 효과를 살펴보고, 편광 독립적인 InP형 2차원 도파로를 설계하였다. 도파로의 경계면이 편광 의존성에 미치는 효과를 살펴보기 위하여 1차원 도파로에 대하여 넘김 행렬법(Transfer Matrix Method)을 사용하여 파동 방정식을 풀었다. 계산 결과 경계면이 많을수록 복굴절성은 커짐을 보였다. 편광 독립적인 2차원 도파로 설계에는 유효굴절률법(Effective Index Method)을 사용하였다. 고려한 구조는 리지형태(ridge type), 올림층형태(raised strip type), 매립형태(buried type)의 도파로인데, 리지형태와 올림층형태의 구조에는 기존의 유효굴절률법을 적용하였고, 매립형태의 도파로는 개선된 유효굴절률법을 적용하였다. 계산 결과로부터 편광 독립적인 2차원 도파로의 폭과 높이를 결정하였고, 주어진 복굴절성의 한계에 대하여 허용될 수 있는 도파로의 폭과 높이의 허용오차도 논의하였다.

I. 서 론

파장 다중 분할 방식(WDM: Wavelength Division Multiplexing)은 기존에 설치되어 있는 광섬유에 여러 채널의 신호를 동시에 전송하는 방식으로 광섬유의 정보 전달 능력을 효율적으로 사용할 수 있는 방법이다. WDM 방식에 있어서 여러 파장의 신호들이 하나의 광섬유로 전달되기 때문에 이러한 신호들을 분리해내는 기술이 필수적으로 요구된다. 이러한 이유로 여러 파장을 공간적으로 분리해 낼 수 있는 배열 도파로 회절 격자(AWG: Arrayed Waveguide Grating) 소자는 중요한 역할을 하고 이에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다.^[1] 단위 AWG 소자로 흔히 사용되는 실리카 소자는 다른 광 기능소자와의 집적에 한계가 있으므로, 광 검출기, 광 스위치 등과 집적이 가능한 InP형 AWG 소자의 연구가 중요시되고 있다. 일반적으로 광섬유는 편광을 보전하지 않기 때문에 편광 의존성을 가지지 않는 편광 독립적인 광 소자가 바람직하다. 편광 독립적인 AWG 소자는 그 소자에 사용되고 있는 도파로 구조가 편광에 의존하지 않는 구조를 가질 경우에 얻어질 수 있다. 본 논문에서는 InP형 AWG 소자에 사용될 수 있는 편광 독립적인 2차원 도파로 구조를 설계하였다. 이를 위하여 먼저 1차원 도파로의 분석을 통하여 경계면이 편광 의존성에 미치는 효과를 계산하여 보았다. 또한 2차원 도파로의 경우에 그림 1과 같은 (a)리지형태, (b)올림층형태, (c)매립형태의 세 가지 도파로 구조에 유효굴절률법을 적용하여 편광 독립적이 되는 도파로의 폭과 높이를 결정하였다.

2차원 도파로의 계산에는 여러 가지의 방법들이 제시되었

다. 그 대표적인 예로서는 유한 원소법(Finite Element Method)을 들 수 있다. 이 방법은 정확한 결과를 얻을 수 있는 반면, 기본적으로는 고려하고 있는 도파로를 유한한 영역으로 나누어 주어진 방정식을 푸는 방법이기 때문에 계산 시간이 상당히 오래 걸린다는 단점이 있다. 유효굴절률법의 경우에 있어서는 근사법이기 때문에 오차를 가지는 단점이 있으나, 계산시간이 적게 걸리고 결과를 해석하기에 용이한 장점을 가진다. 또한 입력변수로 쓰이는 InGaAsP의 굴절률을 정확히 안다는 것은 매우 어려운 일이다. 따라서 입력 변수의 오차를 고려한다면 계산 방법은 매우 정확하나 시간이 상당히 많이 걸리는 계산 방법은 여러 가지 구조에 대하여 많은 계산을 할 경우에는 효율적이지 못하다. 따라서 유효 굴절률법을 사용한 계산 결과에 대한 신뢰성이 보장된다면 유효굴절률법은 유용한 방법이 될 수 있다.

II. 이 론

1차원 도파로 구조는 굴절률이 큰 코어층이 굴절률이 작은 클래딩층 사이에 위치하고 있는 구조로 그림 2와 같은 구조이다. 이 경우 빛이 도파되는 경우에 각 층의 굴절률은 $n_3 < n_2 < n_1$ 의 관계를 만족한다. 이 때의 TE 모우드 경우 전기장 $\vec{E} = \hat{x}E_x$ 에 대한 파동 방정식은 아래와 같이 주어진다.^[2]

$$\frac{d^2 E_x(y)}{dy^2} + k_0^2 [n(y)^2 - n_{eff,TE}^2] E_x(y) = 0 \quad (1)$$

여기서 k_0 는 진공에서의 파수벡터(wave vector)이고, $n_{eff,TE} =$

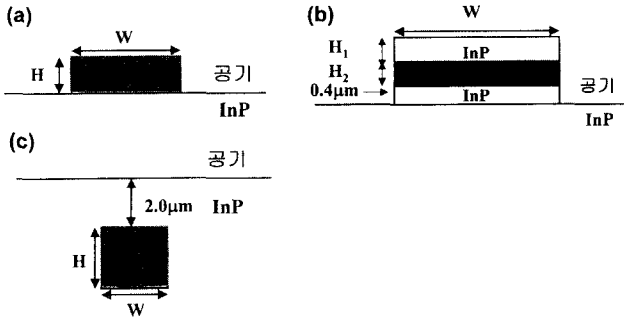


그림 1. 이 논문에서 고려하고 있는 2차원 도파로의 유형. (a)리지형, (b)올림층형, (c)메쉬형 도파로의 단면도.

β/k_0 는 TE 모드에서의 유효굴절률(effective index)이다. TE 모드의 전자기장의 다른 성분은

$$H_y(y) = \frac{\beta}{\omega\mu_0} E_x(y) \quad (2)$$

$$H_z(y) = \frac{1}{i\omega\mu_0} \frac{dE_x(y)}{dy} \quad (3)$$

이다. 여기서의 경계면 조건은 다음과 같이 주어진다.

$$y \rightarrow \pm\infty \text{ 일 때 } E_x \rightarrow 0 \quad (4)$$

$$E_x \text{ 및 } dE_x/dy \text{ 는 경계면에서 연속.} \quad (5)$$

TM 모드의 경우는 \vec{E} 를 \vec{H} 로 바꾸고, $\epsilon_0 n^2$ 을 $-\mu_0$ 로 바꾸면 얻을 수 있다.

$$\frac{d^2 H_x(y)}{dy^2} + k_0^2 [n(y)^2 - n_{eff, TM}^2] H_x(y) = 0 \quad (6)$$

$$E_y(y) = -\frac{\beta}{\omega\epsilon_0 n^2} H_x(y) \quad (7)$$

$$E_z(y) = -\frac{1}{i\omega\epsilon_0 n^2} \frac{dH_x(y)}{dy} \quad (8)$$

이 때의 경계조건은 다음과 같다.

$$y \rightarrow \pm\infty \text{ 일 때 } H_x \rightarrow 0 \quad (9)$$

$$H_x \text{ 및 } \frac{1}{n^2} \frac{dH_x}{dy} \text{ 는 경계면에서 연속} \quad (10)$$

위의 TE, TM 모드의 방정식을 주어진 굴절률 분포 $n(y)$ 에 대하여 풀면 1차원 도파로의 유효굴절률과 장의 분포를 구할 수 있다.

위에서 얻은 파동 방정식을 넘김 행렬법을 사용하여 풀었다.^[3] 넘김 행렬법은 원래 반도체의 밴드구조를 계산하기 위하여 Schrödinger 방정식을 풀 목적으로 고안된 방법이다. 그

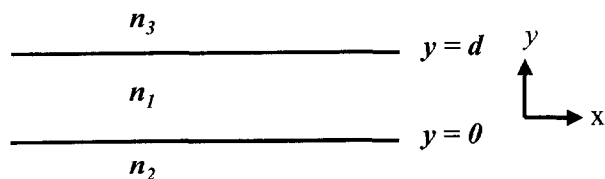


그림 2. 전형적인 1차원 도파로의 구조.

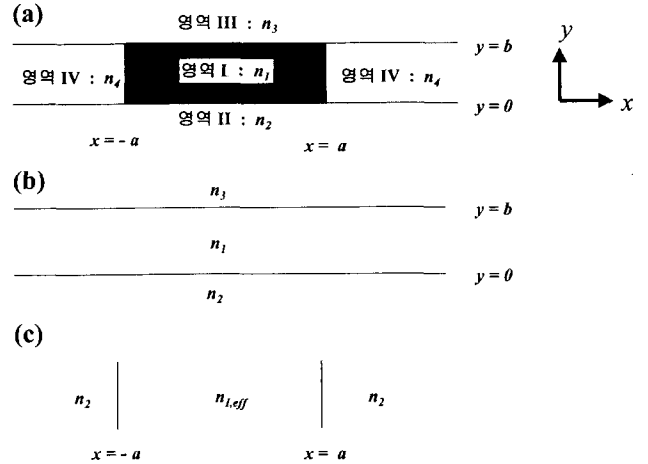


그림 3. 유효굴절률법의 풀이 순서를 나타낸 그림. (a)는 2차원 도파로의 단면과 각 층의 굴절률을 나타내는 그림인데, 유효굴절률법에서는 짧은 경계면 방향(y)으로 (b)와 같은 1차원 도파로를 풀어 유효굴절률 $n_{i,eff}$ 를 얻은 후, 다시 긴 경계면 방향(x)으로 $n_{i,eff}$ 를 코어층의 굴절률로 하여 (c)와 같은 1차원 도파로를 풀게 된다.

런데 Schrödinger 방정식과 Maxwell의 방정식은 방정식의 형태가 같으므로 위의 방법을 적용하면 수치적으로 1차원 파동 방정식의 해를 구할 수 있다. 이에 대한 설명은 참고문헌 [3]에 자세하게 되어 있다.

그림 3의 (a)는 전형적인 2차원 도파로의 구조이다. 여기서 $a > b$ 이고, $n_1 > n_2 \geq n_3, n_4$ 인 경우가 일반적이다. 2차원 도파로의 경우는 엄밀하게는 TE, TM 모드를 구분할 수 없다. 그러나 도파로의 한쪽 방향의 경계면이 길 경우 이 경계면을 기준으로 하여 1차원 도파로에서와 같이 TE, TM 모드를 정의하고 이를 유사 TE 모드와 TM 모드라고 부른다.

2차원 도파로의 분석에는 유효굴절률법을 사용하였다.^[4] 유효굴절률법은 계산이 간단하고 계산 결과를 물리적으로 해석하기에 용이하다는 장점을 가지는 반면 근사적인 방법이므로 계산결과가 오차를 가질 수 있다는 점을 염두에 두어야 한다.

유효굴절률법에 의한 2차원 도파로의 분석방법을 그림 3에 나타내었다. 그림에서처럼 x방향의 경계면이 y방향의 경계면보다 길 경우, y방향으로 굴절률의 변화가 있는 1차원 도파로의 유효굴절률($n_{i,eff}$) 구한 다음 $n_{i,eff}$ 를 도파층의 굴절률로 사용하여 x방향의 1차원 도파로를 다시 풀게 된다. 2차원 도파로의 경우 유사 TE 모드는 y방향 1차원 도파로의 TE 모드와 x방향 1차원 도파로의 TM 모드를 풀게 되고, 유사 TM 모드는 TM과 TE의 순서가 바뀌게 된다.

유효굴절률법은 기본적으로 변수 분리를 가정한 근사법이다. 따라서 이 방법을 사용할 경우 계산 결과에 오차 있다는 것을 염두에 두어야 한다. 이 방법은 변수 분리를 가정하고 있으므로 한 쪽 방향의 도파로의 길이가 긴 경우에 정확한 계산 결과를 줄 것이다. 그러나 도파로의 구조 자체가 대칭성이 있는 정사각형 단면의 구조에서는 큰 오차가 있을 것이라는 것을 예상할 수 있다. 이러한 오차를 개선하기 위하여 몇 가지의 변형된 형태의 유효굴절률법이 개발되었다.^[5,7] 그러나 이론의 전개가 상당히 복잡하거나 계산 시간이 오래 걸리거

나 혹은 계산 결과의 정확성이 비교적 떨어지는 단점이 있다. 본 연구에서는 참고문헌 [8]을 참고로 하여, 정사각형의 단면 구조를 갖는 도파로의 유효굴절률을 계산하였다. 이 방법은 클래딩층이 모두 같은 물질인 경우를 가정한 결과이므로, 그림 3에서 $n_2 = n_3 = n_4$ 인 경우가 된다. 이 방법은 기본적으로는 기존의 유효굴절률법의 계산 방법과 일치한다. 다만 그림 3의 (c)단계 구조를 풀 때, 클래딩층의 굴절률에 n_2 대신 다음과 같이 주어지는 n_{mdf} 를 이용하여 계산한다.

$$n_{mdf} = \sqrt{n_2^2 - \gamma(n_2^2 - n_{f,eff}^2)} \quad (11)$$

$$\gamma = \frac{W}{1+W} \quad (12)$$

$$W = bk_0 \sqrt{n_{f,eff}^2 - n_2^2} \quad (13)$$

이 방법은 기존의 유효굴절률법과 계산 방법과 크게 다르지 않지만 오차를 크게 줄여주는 장점이 있다.

III. 결과 및 토론

3.1. 1차원 도파로의 분석을 통한 편광 의존성의 기원

여기서는 공기(그림 2에서 $n_3=1$), InGaAsP 사원화합물(n_1), InP($n_2=3.16934$)의 세 층으로 이루어진 1차원 도파로를 생각하였다. 사원화합물의 밴드 갭에 해당하는 파장(λ_0)는 1.0~1.1 μm 로 잡았다. InP와 격자정합이 되는 InGaAsP의 λ_0 에 따른 상온 굴절률의 계산은 참고문헌 [9]를 따랐다. 또한 도파로층으로 단일 InGaAsP층 대신 여러 층의 InGaAsP를 쓰는 경우도 계산하여, 단일층의 경우와 비교하였다. 모든 계산은 넘김행렬법을 이용하였다. TE 모우드의 유효굴절률 $n_{eff,TE}$ 를 풀기 위한 식(1), (4), (5)와 TM 경우의 식(6), (9), (10)을 비교하면, 두 경우의 유효굴절률의 차이는 경계면 조건의 차이 ($\frac{dE_x}{dy}$ 연속과 $\frac{1}{n^2} \frac{dH_x}{dy}$ 는 연속)으로부터 나오는 것임을 알 수 있다.

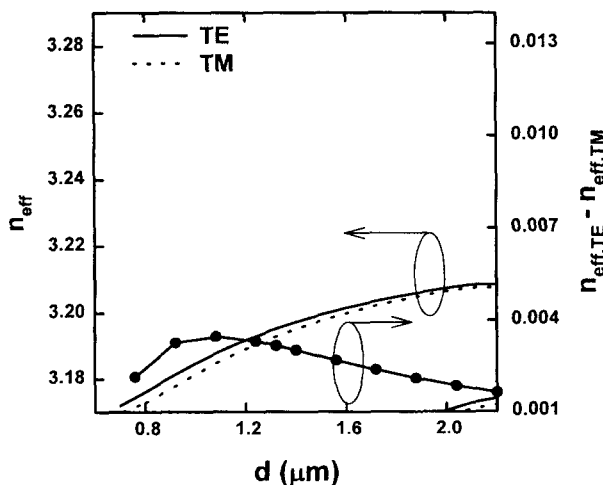


그림 4. InP 기판과 공기 사이에 1.0Q InGaAsP층이 있는 1차원 도파로 구조의 $n_{eff,TE}$ (실선)과 $n_{eff,TM}$ (점선)과 $n_{eff,TE} - n_{eff,TM}$ (점이 찍힌 실선)을 도파로의 두께 d 의 함수로 그린 그림.

그림 4는 도파층의 λ_0 가 1.0 μm ($n_1=3.22187$) InGaAsP (1.0Q) 단일층의 경우에 대해, $n_{eff,TE}$, $n_{eff,TM}$ 과 $n_{eff,TE} - n_{eff,TM}$ 을 도파층의 두께 d 의 함수로 그린 것이다. $n_{eff,TE}$ 가 $n_{eff,TM}$ 보다 큰 것을 알 수 있는데, 이는 1차원 도파로의 일반적인 성질이다. d 가 $\sim 2 \mu\text{m}$ 보다 커지면 도파되는 모우드는 두 개가 생기는 것을 알 수 있는데, 여기서는 단일 모우드(single mode) 영역에만 관심을 갖기로 한다. 편광 의존성, $n_{eff,TE} - n_{eff,TM}$ 은 $d \approx 0.9 \mu\text{m}$ 에서 최대가 되고, 이 부근에서 커지거나 작아지면 줄어드는 모양을 볼 수 있다. d 가 커질수록 편광 의존성이 줄어드는 것은, 편광 의존성이 경계면 조건으로부터 생긴다는 것으로 설명할 수 있다. 즉 d 가 커질수록 파동은 도파층에 많이 속박되어 경계면 부근의 장의 세기가 줄어들게 되므로 그만큼 경계면의 영향을 덜 받게 되는 것이다. d 가 어느 정도 이하로 줄어들게 되면, $n_{eff,TE}$ 와 $n_{eff,TM}$ 모두 InP의 굴절률에 접근하게 되므로 $n_{eff,TE} - n_{eff,TM}$ 도 줄어든다.

그림 5는 도파층의 λ_0 가 1.1 μm ($n_1=3.28191$) InGaAsP (1.1Q) 단일층의 경우에 $n_{eff,TE}$, $n_{eff,TM}$ 과 $n_{eff,TE} - n_{eff,TM}$ 을 도파층의 두께 d 의 함수로 그린 것이다. 같은 d 에서 1.0Q인 경우와 비교해 보면, $n_{eff,TE}$, $n_{eff,TM}$ 와 $n_{eff,TE} - n_{eff,TM}$ 이 모두 커진 것을 알 수 있다. 유효굴절률은 도파로 각 층의 굴절률의 일종의 가중된 평균치라고 볼 수 있으므로, 도파층의 굴절률이 커지면서 유효굴절률은 커지게 된다. 또한 $n_{eff,TE} - n_{eff,TM}$ 이 경계면에서의 굴절률 변화로부터 생기는 것이라는 것을 기억하면, 1.1Q 도파로의 편광의존성은 1.0Q 도파로의 편광 의존성보다 커지게 된다.

그림 6은 도파층을 “[1.0Q($n_1=3.22187$) 0.1 μm +1.2Q($n_1=3.33738$) 0.1 μm]×정수”의 형태로 만든 도파로의 경우인데, 도파로의 총 두께는 (0.2×정수) μm 가 된다. 1.0Q가 공기쪽으로 간 경우(다층구조 A)와 1.2Q가 공기쪽으로 간 경우(다층구조 B)의 두 경우가 생긴다. 이 다층구조 도파로는 그림 5의 1.1Q의 단일층 구조 도파로와 비교할 수 있을 것이다. 위에서 살펴보았듯이, 도파로의 두께가 일정할 때 “복굴절성”

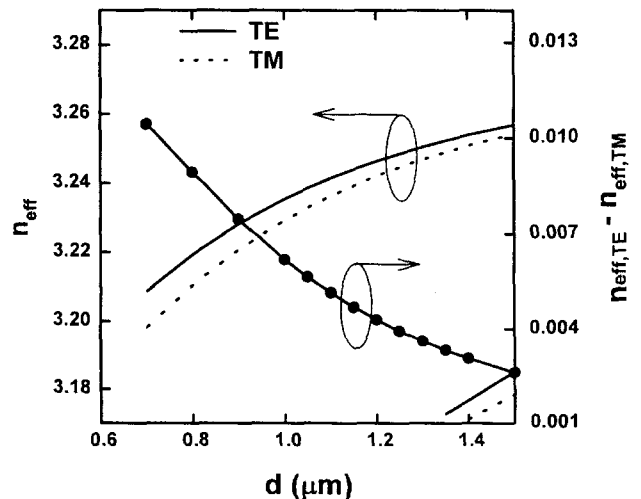


그림 5. InP 기판과 공기 사이에 1.1Q InGaAsP층이 있는 1차원 도파로 구조의 $n_{eff,TE}$ (실선)과 $n_{eff,TM}$ (점선)과 $n_{eff,TE} - n_{eff,TM}$ (점이 찍힌 실선)을 도파로의 두께 d 의 함수로 그린 그림.

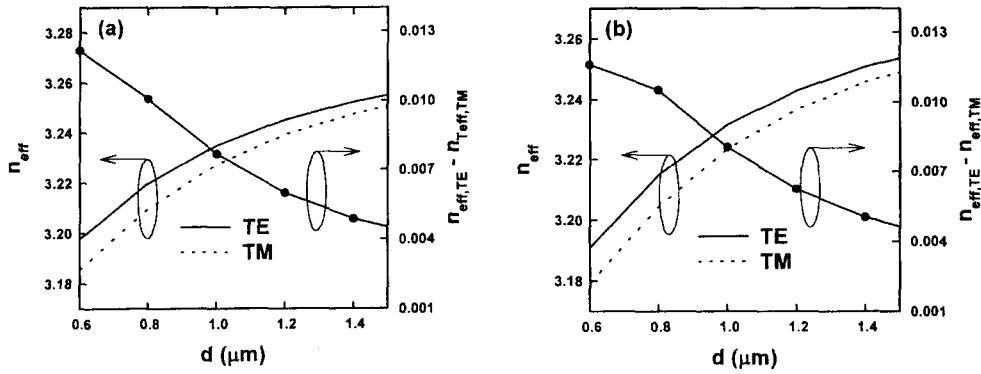


그림 6. InP 기판과 공기 사이에 도파층으로 (a) [1.0Q (0.1 μm)+1.2Q (0.1 μm)] (다층구조 A), (b) [1.2Q (0.1 μm)+1.0Q (0.1 μm)] (다층 구조 B)의 단위층을 여러번 쌓아 전체 두께가 d 가 되도록 다층 층을 이룬 구조에 대한 유효굴절률과 복굴절률.

$n_{eff,TE} - n_{eff,TM}$ 는 $n_{eff,TE}$ 와 $n_{eff,TM}$ 가 커질수록 커지는 경향이 있으므로, “규격화된 복굴절성” $(n_{eff,TE} - n_{eff,TM}) / (n_{eff,TE} + n_{eff,TM})$ 을 도입하여 이들 도파로를 비교하는 것이 타당할 것이다. 그림 7은 그림 5의 단일층 구조도파로와 그림 6의 다층구조 도파로의 규격화된 복굴절성을 그린 그림인데, 두 종류의 다층구조 도파로가 단일층 구조 도파로에 비해 규격화된 복굴절성이 큼을 알 수 있다. 즉 다층구조는 편광 의존성을 크게 하는 경향이 있는데, 이는 편광 의존성이 근본적으로 경계면으로부터 온다는 사실과 부합한다.

그림 7의 도파로에서 $d=1.2 \mu\text{m}$ 인 점에서 층의 수를 변화시켜 보았다. 즉 그림 7의 두께 $d=1.2 \mu\text{m}$ 일 때, 도파층은 $6 \times [1.0Q \ 0.1 \ \mu\text{m} + 1.2Q \ 0.1 \ \mu\text{m}]$ 인 12층 구조인데, 지금의 경우는 층수를 변화시키고, 각 층의 두께는 전체 도파층의 두께가 1.2 μm가 되도록 조정하였다. 규격화된 복굴절성과 층수의 관계를 그림 8에 표현하였다. 다층구조 A와 다층구조 B가 서로 다른 양상을 보이지만, 거의 모든 영역에서 1.1Q의 단일층의 경우의 규격화된 복굴절성 0.000663 보다는 큰 것을 알 수 있

다(다층 구조 A에서의 이중층구조의 규격화된 복굴절성이 0.000640으로 단일 층보다 작으나 그 차이는 매우 적다.). 다층구조 A와 B는 층의 수가 아주 많아질 때, 서로 같은 극한으로 가는 경향을 보인다.

3.2. 편광 독립적인 2차원 도파로의 설계

본 논문에서 고려하고 있는 2차원 도파로의 구조는 그림 1에 그려져 있다. (a)와 (b)의 경우는 보통의 유효굴절률법을 적용하였고, (c)의 경우는 개선된 유효굴절률법¹⁸⁾을 적용하여 편광 의존성이 없는 도파로의 구조를 결정하였다.

그림 9는 그림 1(a)의 리지형태의 도파로에서 코어물질 InGaAsP가 (a) 0.97Q, (b) 1.0Q, (c) 1.1Q인 경우로 도파로의 폭 (W)과 높이(H)를 변화시켜 가면서 $n_{eff,TE} - n_{eff,TM}$ 의 윤곽선을 그린 것이다. 이 결과는 아래에서와 같이 정성적으로 이해될 수 있다. 일반적으로 편광 독립적인 경우는 높이와 폭이 같은 도파로에서 양 방향으로 경계면에서의 굴절률의 차이가 같은 경우에 얻어질 수 있다. 그리고 폭과 높이 방향의 굴절률의 차이가 다르거나 여러 층이 접하여 있을 때는, 양 방향의 길

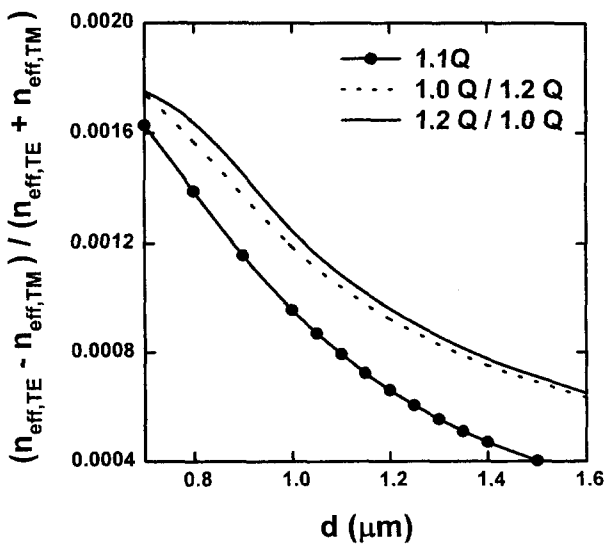


그림 7. 그림 5의 단일층 구조(점이 찍힌 실선)와 그림 6의 다층 구조 A(점선)와 다층구조 B(실선)의 규격화된 복굴절성을 도파로의 두께 d 의 함수로 그린 그림.

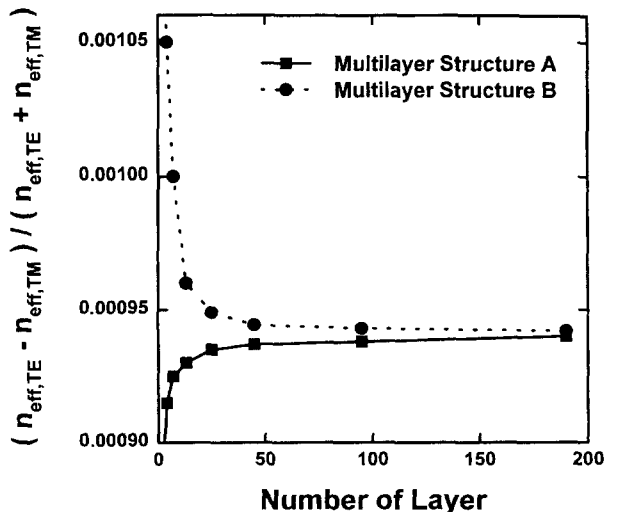


그림 8. 도파로의 전체두께 d 를 $1.2 \mu\text{m}$ 로 고정시키고, 층수를 변화시키면서 규격화된 복굴절성을 그린 그림.

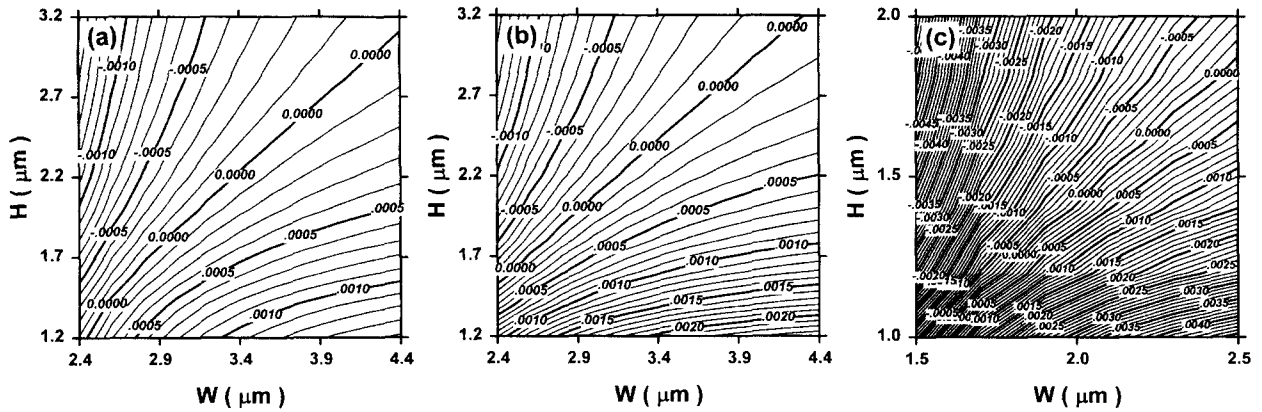


그림 9. 리지형태의 InGaAsP 도파로의 복굴절성 $n_{eff,TE} - n_{eff,TM}$ 을 높이(H)와 폭(W)의 함수로 그린 윤곽선의 그림 (a) $\lambda_g=0.97Q$, (b) $\lambda_g=1.0Q$, (c) $\lambda_g=1.1Q$ 경우.

이를 조절하여 경계면 효과를 감소시키거나 증가시켜서 편광 독립적인 도파로를 얻을 수 있다. 그림 1의 (a)에서 W방향 경계면에서의 굴절률 차이는 H방향의 경계면에서의 굴절률 차이 보다 크다. 따라서 W가 커지면 이 방향의 경계면의 효과를 덜 보게 되므로 이러한 영역에서 편광 독립적인 구조가 될 것이다. 그림 (9)의 (a), (b), (c)에서 볼 수 있듯이 세 가지 모두 W방향의 도파로의 폭이 H방향의 도파로의 높이보다 긴 경우에 유사 TE 모드와 유사 TM 모드의 균형이 이루어

지게 되어 도파로는 편광 독립적이 된다. 그림 (9)의 (a)에서 (c)로 가면서 코어물질의 λ_g 가 커짐에 따라 굴절률이 커진다. 따라서 편광 독립적이 되는 높이와 폭에서 도파로의 높이와 폭이 벗어나는 경우 $n_{eff,TE} - n_{eff,TM}$ 의 변화는 커지게 된다. 이러한 경향은 그림에서 윤곽선의 간격이 줄어드는 것으로 나타난다. 또한 코어의 λ_g 가 커지면서 편광 독립적이 되는 선이 왼쪽으로 이동하는 것을 볼 수 있다. 이것은 코어의 굴절률이 커짐에 따라 파동이 코어에 더 많이 속박되어 경계면을 덜 보

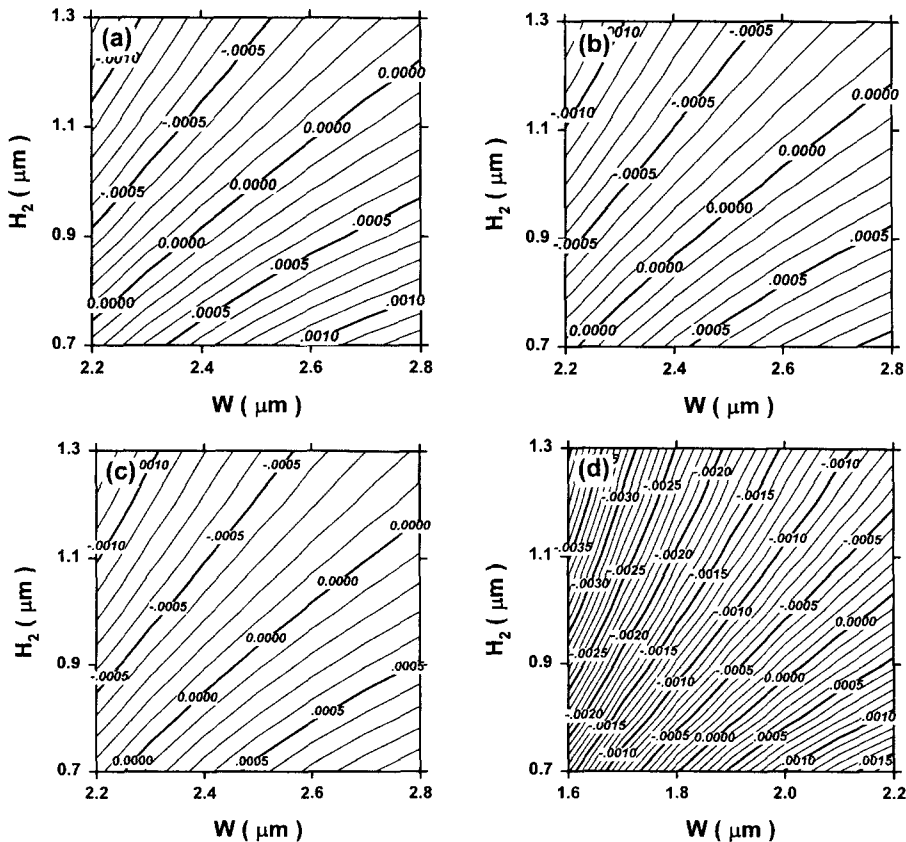


그림 10. 올림층형태의 InGaAsP 도파의 복굴절성 $n_{eff,TE} - n_{eff,TM}$ 을 높이(H)와 폭(W)의 함수로 그린 윤곽선의 그림 (a) $\lambda_g = 1.1Q$, $H_1 = 0.7 \mu m$, (b) $\lambda_g = 1.1Q$, $H_1 = 0.9 \mu m$, (c) $\lambda_g = 1.1Q$, $H_1 = 1.1 \mu m$, (d) $\lambda_g = 1.2Q$, $H_1 = 0.7 \mu m$ 인 경우.

기 때문에 상대적으로 코어의 굴절률이 작은 경우보다 코어의 폭이 작을 때 편광 독립적인 구조가 된다. (a)의 경우는 $H \leq 2.44 \mu\text{m}$ 에서 H 방향으로 단일 모우드만 존재한다. 두 번째 모우드가 생기기 시작하는 부근($H \approx 2.44 \mu\text{m}$, $W \approx 3.60 \mu\text{m}$, $H/W \approx 0.667$)에서 $n_{\text{eff,TE}} - n_{\text{eff,TM}} \approx \pm 0.0004$ 의 오차를 허용할 경우, $\Delta W = \pm 2.25 \mu\text{m}$, $\Delta H = \pm 1.93 \mu\text{m}$ 의 허용오차를 가진다. (b)의 경우 $H \leq 1.94 \mu\text{m}$ 인 영역에서 H 방향으로 단일 모우드만 존재한다. 두 번째 모우드가 생기기 시작하는 부근($H \approx 1.94 \mu\text{m}$, $W \approx 2.89 \mu\text{m}$, $H/W \approx 0.668$)에서 $n_{\text{eff,TE}} - n_{\text{eff,TM}} \approx \pm 0.0004$ 의 오차를 허용할 경우, $\Delta W = \pm 0.42 \mu\text{m}$, $\Delta H = \pm 0.32 \mu\text{m}$ 의 허용오차를 가진다. (c)의 경우는 $H \leq 1.29 \mu\text{m}$ 에서 H 방향으로 단일 모우드만 존재한다. 이 영역부근에서는 윤곽선의 간격이 매우 좁아 도파로의 허용오차는 매우 줄어들게 된다. 표 1을 보면 코어의 λ_g 가 작아지는 경우, 편광 독립적이 되는 H, W의 크기가 커지고, H/W는 작아진다. 뿐만 아니라 큰 허용오차를 가지게 되므로 실제의 도파로의 제작시에 유리하다.

그림 10은 그림 1(b)의 올림층형태의 도파로의 경우이다. 이 경우는 그림 9의 경우와 유사하게 생각할 수 있다. 그러나 그림 9의 경우와 비교하여 볼 때, InGaAsP 코어 층을 InP층이 둘러 싸고 있으므로 H 방향의 경계면에서의 굴절률 차이에 의한 효과는 더욱 작아지고 상대적으로 그림 9의 경우보다 H_2/W 의 비가 작은 부근에서 유사 TE 모우드와 유사 TM 모우드 사이의 균형이 이루어지게 된다. 또한 H_2 가 일정할 경우, H_1 이 커지면 이 방향의 공기와의 경계면의 효과는 더욱 작아진다. 이 경우 편광 독립적이 되는 H_2/W 는 더욱 작아지게 된다. (d)의 경우는 (a)의 경우에서 InGaAsP 코어가 1.2Q인 경우이다. 이 때에는 (a)의 경우보다 코어의 굴절률이 커짐에 따라 편광 독립적이 되는 선은 왼쪽으로 이동하게 된다. 또한 윤곽선의 간격은 그림 9에서처럼 좁아지게 된다. (a)는 $H_2 \leq 0.914 \mu\text{m}$, (b)는 $H_2 \leq 0.899 \mu\text{m}$, (c)는 $H_2 \leq 0.888 \mu\text{m}$, (d)는 $H_2 \leq 0.831 \mu\text{m}$ 인 영역이면 H 방향으로 단일 모우드만 나타난다. 각각의 경우 두 번째 모우드가 생기기 바로 전의 H, W, H/W와 $n_{\text{eff,TE}} - n_{\text{eff,TM}} \approx \pm 0.0004$ 를 오차를 허용할 경우 ΔW , ΔH 를 표 1에 실어 놓았다. 코어의 λ_g 가 1.1Q인 경우 H_1 이 커지게 되면 H/W의 비가 작아지고 ΔW , ΔH 는 커지는 것을 알 수 있다. 또한 코어의 λ_g 가 1.2Q인 경우는 1.1Q인 경우에 비하여 H, W, ΔW , ΔH 이 감소하는 것을 볼 수 있다. 코어를 중심으로 위(두께 H_1), 아래(두께 $0.4 \mu\text{m}$)로 있는 InP로 된 클래

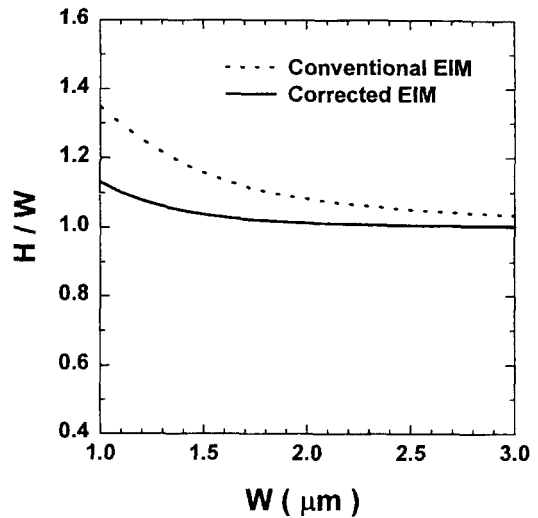


그림 11. 매립형태의 1.0Q InGaAsP 구조의 경우 편광 독립적이 되는 경우 도파로 높이와 폭의 비(H/W)를 기존의 유효굴절률법(점선)과 개선된 유효굴절률법(실선)을 사용하여 얻은 그림.

딩 층의 경우는, 공기와 경계를 이루는 위쪽의 InP층의 경계면 효과가 훨씬 두드러지기 때문에 아래쪽에 위치하는 클래딩 층의 두께가 계산 결과에 미치는 영향은 적다. 이러한 경향은 코어의 굴절률이 커질수록 더욱 커진다.

그림 9의 리지형태와 그림 10의 올림층형태를 비교하여 보면, 올림층 형태는 리지형태에 비하여 비교적 구조가 복잡한 반면 큰 허용오차를 갖는다.

그림 1의 (c)와 같은 구조를 갖는 도파로의 경우에는 높이와 폭의 길이가 정확히 같은 경우 TE 모우드와 TM 모우드의 구별이 없어지게 되어 도파로는 편광 독립적이 된다. 유효굴절률법은 한 방향의 도파로의 길이가 긴 경우 작은 오차를 가진다. 계산에는 참고문헌[8]의 개선된 유효굴절률법을 적용하였다. 그림 11은 코어의 λ_g 가 1.0Q인 경우 기존의 유효굴절률법과 개선된 유효굴절률법을 사용하여 편광 독립적이 되는 높이와 폭의 비(H/W)를 그린 것이다. 도파로의 폭과 높이가 커지면 경계면의 효과를 덜 보게 되어 두 가지 방법 모두 높이와 폭의 비가 1인 경우로 수렴을 하게 된다. 이 경우에 단일 모우드만 존재하는 영역은 $W \leq 1.807 \mu\text{m}$, $H \leq 1.807 \mu\text{m}$ 인 영역이다. 이런 영역에서는 오차는 존재하기는 하나 개선된 유효굴절률 방법의 경우 오차의 크기는 미미하다. 그림 12는

표 1. 계산된 도파로 구조의 경우 H 방향으로 두 번째 모우드가 생기기 직전, 편광 독립적이 되는 H, W, H/W와 $n_{\text{eff,TE}} - n_{\text{eff,TM}} \approx \pm 0.0004$ 를 오차를 허용할 경우 허용오차 $\Delta W, \Delta H$

	H(μm)	W(μm)	H/W	$\Delta W(\mu\text{m})$	$\Delta H(\mu\text{m})$
$\lambda_g = 0.97Q$ 리지형태	2.44	3.60	0.667	± 2.25	± 1.93
$\lambda_g = 1.0Q$ 리지형태	1.94	2.89	0.668	± 0.42	± 0.32
$\lambda_g = 1.1Q$ 리지형태	1.29	1.85	0.70	± 0.07	± 0.08
$\lambda_g = 1.1Q : H_1 = 0.7 \mu\text{m}$ 올림층형태	0.914	2.40	0.38	± 0.19	± 0.11
$\lambda_g = 1.1Q : H_1 = 0.9 \mu\text{m}$ 올림층형태	0.899	2.43	0.37	± 0.20	± 0.16
$\lambda_g = 1.1Q : H_1 = 1.1 \mu\text{m}$ 올림층형태	0.888	2.44	0.36	± 0.20	± 0.18
$\lambda_g = 1.2Q : H_1 = 0.7 \mu\text{m}$ 올림층형태	0.831	1.95	0.43	± 0.09	± 0.07
$\lambda_g = 1.0Q$ 매립 형태	1.80	1.78	1.02	± 0.22	± 0.20
$\lambda_g = 1.1Q$ 매립 형태	1.24	1.25	1.01	± 0.03	± 0.03

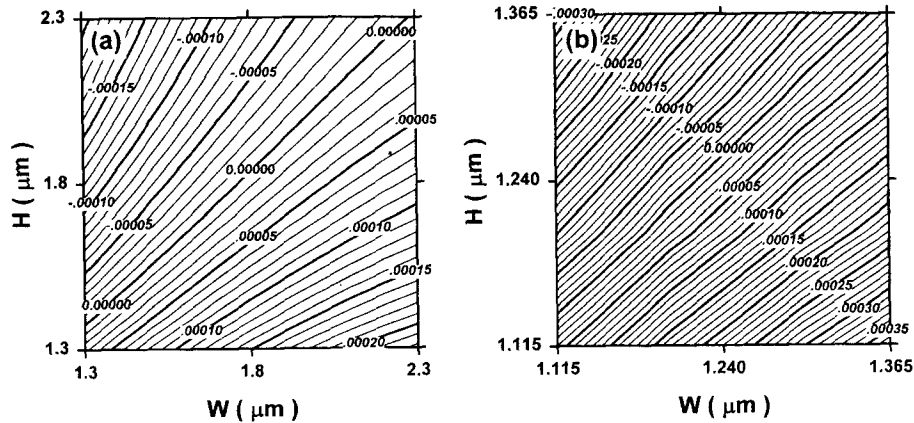


그림 12. 매립형태의 InGaAsP 도파로로 (a) $\lambda_g = 1.0Q$, (b) $\lambda_g = 1.1Q$ 인 경우 $n_{eff,TE} - n_{eff,TM}$ 을 높이(H)와 폭(W)의 함수로 그린 윤곽선의 그림.

(a)1.0Q (b)1.1Q의 매립형태에 대하여 개선된 유효굴절률법을 적용하여 얻어진 $n_{eff,TE} - n_{eff,TM}$ 를 도파로의 높이와 폭에 따라 나타낸 것이다. 두 번째 모우드가 생기기 바로 직전 $n_{eff,TE} - n_{eff,TM} \approx \pm 0.0004$ 를 허용할 경우 (a)는 $\Delta W \approx \pm 0.22 \mu m$, $\Delta H \approx \pm 0.20 \mu m$ (b)는 $\Delta W \approx \pm 0.03 \mu m$, $\Delta H \approx \pm 0.03 \mu m$ 의 허용오차를 가진다. 여기서 $n_{eff,TE} - n_{eff,TM} = 0$ 에 해당하는 W/H는 정확하게 1이어야 하나 유효굴절률법의 오차 때문에 1에서 약간 벗어나게 된다. 코어의 λ_g 가 1.1Q인 (b)와 이와 λ_g 가 같은 경우의 리지형태(그림 9(c))나 올림층형태(그림 10의 (a), (b), (c))와 비교하여 보면 매립형태의 경우는 두 경우보다 허용오차가 줄어든다.

표 1의 결과를 비교하여 보면 고려한 리지형태, 올림층형태, 매립형태의 세 가지의 경우 모두 코어의 λ_g 가 작은 경우가 코어의 λ_g 가 큰 경우보다 편광 독립적이 되는 H, W가 크고, ΔH , ΔW 역시 큰 값을 갖는다. 그러나 실제의 도파로의 제작에 있어서 λ_g 가 작아지는 경우 InP 기판위에 정확한 조성을 갖는 InGaAsP를 에피탁시하는 것이 어려워지므로 결국에 가서는 이러한 효과를 함께 고려하여야 할 것이다. 고려한 도파로의 구조에서 코어의 λ_g 가 같은 경우, 올림층형태의 경우가 나머지 두 경우에 비하여 큰 허용오차를 가지므로 도파로의 제작에 있어서 유리하다.

유효굴절률법은 개념적으로 간단하고 계산속도가 빠른 장점이 있어 소자 제작시 초기단계의 설계에 이용되어지고 있다.^[10] 반면 이 방법은 기본적으로 근사법이므로 오차를 가지고 있는 단점이 있기 때문에, 계산결과의 신뢰성을 검증할 필요가 있다. 이를 위하여 본 논문의 계산결과를 유사한 계산이나 이와 관련된 실험 결과를 제시하고 있는 참고문헌 [11], [12]와 비교하여 보았다. 참고문헌 [11]은 코어의 λ_g 가 0.97Q인 편광 독립적인 리지형태의 도파로 구조를 제시하고 있다 (편광 독립적이 되는 구조는 $\lambda_g = 0.97Q$ 일 경우, $H = 2.2 \mu m$, $W = 3.4 \mu m$). 도파로의 높이와 λ_g 가 참고문헌 [11]과 같은 경우 ($\lambda_g = 0.97Q$, $H = 2.2 \mu m$ 인 경우)에 본 논문 계산결과는 도파로의 폭은 $W = 3.36 \mu m$ 로 결정되어서, 차이는 $0.04 \mu m$ 정도에 불과하다. 올림층형태의 경우는 참고문헌 [12]와 비교하여 보았다. 이 경우 W의 차이는 $\sim 0.2 \mu m$ 정도로 리지의 경우보다 비교적 큰 차이를 보이는 하나 소자 제작시 최종 단계에서

는 도파로의 폭과 높이를 실험적으로 미세 조정을 하여야 한다는 점을 감안하면, 본 논문의 계산 결과는 소자의 초기 제작 단계에서 안내 지침으로 유용하게 사용될 것이다.

VI. 요약

본 논문에서는 편광 독립적인 InP형 배열 도파로 회절 격자 소자 설계를 위하여 1차원 도파로와 2차원 도파로를 분석하였다. 넘김 행렬법을 사용하여 1차원 도파로의 파동 방정식을 풀었다. 1차원 InGaAsP 도파로에 대하여 도파로 폭의 함수로 TE 모우드와 TM 모우드의 유효굴절률의 차와 복굴절성을 계산하였고, 1.1Q인 도파로를 1.0Q/1.2Q와 1.2Q/1.0Q의 다중층 도파로의 평균이라고 생각하여, 이러한 구조에 대하여 복굴절성을 계산하였다. 계산 결과 경계면이 많을수록 복굴절성은 커지는 계산 결과를 얻었는데, 이 결과는 편광 의존성은 기본적으로 경계면에 기인한다는 사실과 부합한다. 2차원 도파로의 편광 독립적인 구조의 결정에는 유효굴절률법을 사용하였다. 고려한 구조는 리지형태, 올림층형태, 매립형태의 도파로로 리지형태와 올림층형태의 구조에는 기존의 유효굴절률법을 적용하였고, 매립형태의 도파로는 개선된 유효굴절률법을 적용하였다. 계산 결과로부터 편광 독립적인 2차원 도파로의 폭과 높이를 결정하였고, 주어진 복굴절성의 한계에 대해 허용될 수 있는 도파로의 폭과 높이의 차이도 논하였다.

감사의 글

이 연구는 한국전자통신연구원과 1997년도 교육부 기초과학육성 연구비 BSRI-97-2443의 지원을 받았습니다.

참고문헌

- [1] C. A. M. Steenbergen, C. van Dam, A. Looijen, C. G. Herben, M. de. Kok, M. K. Smit, J. W. Peserson, I. Moerman, R. G. F. Baets, B. H. Verbeek, Proc. 22nd European Conference on Optical Communication (Oslo, 1996), 1.1-129. 132.
- [2] M. J. Adams, *An Introduction to Optical Waveguides*

- (Wiley, Chichester, 1981).
- [3] 김동철, 유건호, 한국광학회지 7, 272 (1996).
- [4] A. Kumar, D. F. Clark, and B. Culshaw, Opt. Lett. 13, 1129 (1988).
- [5] K. S. Ching, Appl. Opt. 25, 2169 (1986).
- [6] K. S. Ching, Opt. Lett. 16, 714 (1991).
- [7] Y. Cai, T. Mizumoto, and Y. Naito, Electron. Lett. 26, 523 (1990).
- [8] K. S. Ching, Electron. Lett. 28, 388 (1992).
- [9] B. Broberg and S. Lindgren, J. Appl. Phys. 55, 3376 (1984).
- [10] E. C. M. Pennings, R. J. Deri, and R. J. Hawkins, Electron. Lett. 27, 1532 (1991).
- [11] B. H. Verbeek, A. A. M. Starting, E. J. Jansen, R. van Roijen, J. J. M. Binsma, T. van Dongen, M. R. Amersfoort, C. van Dam, and M. K. Smit, Proceeding of Optical Fiber Conference (1994), PD13-1 - PD13-4.
- [12] H. Bissessur, P. Pagnod-Rossiaux, R. Mestric, and B. Martin, IEEE Photon. Technol. Lett. 8, 554 (1996).

**The interface effects on polarization dependence of waveguide
and the design of polarization independent 2 dimensional waveguide
on InP for arrayed waveguide grating**

Dong Churl Kim, Jung Hoon Choi and Keon-Ho Yoo

Dept. of Physics and Research Institute for Basic Sciences, Kyung Hee University, Seoul 130-701, Korea

Hyung Mun Kim, Heung Ro Choo and Hong Man Kim

Micro-electronics Lab., Electronics and Telecommunications Research Institute, Taejon 305-350, Korea

(Received April 10, 1998, Revised manuscript received September 14, 1998)

We have studied the effects of interface on polarization dependence of waveguide and designed the polarization independent 2-dimensional waveguides on InP for arrayed waveguide grating. To figure out the effects of interface on polarization dependence, we have solved the 1-dimensional wave equation using a transfer matrix method. It is shown that the birefringence becomes stronger as the number of interfaces increases. In order to design polarization independent 2-dimensional waveguides, we have used effective index method. The structures considered are ridge type, raised strip type, and buried type waveguide. In the cases of ridge and raised strip type, conventional effective index method was used. In the case of buried type corrected effective index method was used. We have determined the height and width of waveguides such that the waveguides become polarization independent.