

평면 광도파로 렌즈의 제작 및 특성 개선

정 석 문

해군사관학교 전자공학과

김재창 · 윤태훈

부산대학교 전자공학과

김 길 중

동서공과대학교 전자공학과

(1995년 10월 30일 받음)

평면 광도파로 렌즈는 집적광학회로에 널리 사용된다. 본 논문에서는 새로운 형태의 평면 광도파로 렌즈를 제안하고, 제작하여 기존의 볼록-평면렌즈와 그 특성을 비교하였다. 제안한 볼록-오목형 렌즈는 원형의 경계를 가지며, 선형경계를 가지는 볼록-평면 렌즈에서 발생하는 구면 수차를 제거할 수 있다. Y-cut LiNbO₃ 기판 위에 Ti-내부확산 양자교환방식을 이용하여 제안한 볼록-오목 렌즈와 기존의 볼록-평면 렌즈를 함께 제작하여 그 특성을 측정하고 비교하였다. 측정결과 제안한 볼록-오목 렌즈가 볼록-평면 렌즈에 비해 초점에서의 spot의 크기를 약 59% 정도 줄일 수 있었다.

I. 서 론

1970년대에 들어와 집적광학의 기본적인 구성요소로서 평면 광도파로 렌즈(optical planar waveguide lens)가 이용됨에 따라, 이 분야에 대한 연구가 활발히 진행되어 여러 가지 형태의 광도파로 렌즈들이 개발되었고, 실제로 이러한 광도파로 렌즈가 광통신 또는 광정보 처리 시스템에 응용되고 있다.^[1-4]

최근 들어 TIPE(Ti-indiffused proton-exchange) 기술을 이용한 도파로 제작 기술이 연구 개발되어 이러한 TIPE 기술에 의한 평면 광도파로 렌즈의 제작이 가능해졌다.^[5-9] Ti 내부확산(Ti-indiffusion: TI) 공정과 양자교환(proton-exchange: PE) 공정으로 이루어진 TIPE 기술에 의한 굴절율의 변화량은 정상굴절율(ordinary refractive index)이 약 0.04 감소하지만 이상굴절율(extraordinary refractive index)이 약 0.11 증가하며, Ti 내부확산법에 의한 이상굴절율의 변화가 매우 작은 데 비하여 굴절율의 변화가 크고, 굴절율 분포가 거의 계단형이다.^[5-7] 이러한 TIPE 방법을 이용하면 평면 광도파로 렌즈는 제작이 간단하며, 초점거리가 매우 짧고, NA(Numerical Aperture)가 크며, 초점에서의 spot size가 작기 때문에 렌즈특성이 좋다.^[2,3]

현재까지 발표되어 있는 모드-굴절율을 이용한 평면

광도파로 렌즈들은 볼록-평면(plano-convex)형의 렌즈이며, 이러한 형태의 평면 광도파로 렌즈의 문제점들은 평면 도파로의 도파-모드가 3개 존재하여 각 도파-모드 간의 초점에는 수차가 존재하고,^[8] 렌즈의 단반경에서 선형적으로 경계를 지운 볼록-평면 렌즈로 제작하였기 때문에 입력빔의 위치에 따라 초점에서 구면수차가 발생하는 것이다.^[9] 초점에서의 구면수차는 초점에서의 빔의 크기를 크게 하기 때문에 단일-모드를 가지는 채널 도파로와 결합시 빔의 크기가 큰 단점이 있다.

본 논문에서는 모드-굴절율을 이용한 기존의 볼록-평면 렌즈 형태인 평면 광도파로 렌즈에서 구면수차가 나타남을 보이고, 이러한 구면수차를 없앨 수 있는 볼록-오목 렌즈를 제안한다. 그리고 볼록-평면 및 볼록-오목 형태의 렌즈를 각각 제작하고 그 특성을 측정하고, 비교한다. 구면수차가 없도록 설계한 볼록-오목 렌즈가 초점에서 빔의 크기가 작으며, 또한 단일-모드 채널 도파로와 결합할 경우에도 더 적합한 결과로 나타남을 보인다.

II. 평면 광도파로 렌즈 설계

1. 평면 광도파로 렌즈

렌즈는 빛을 집중, 확대 또는 평행하게 하거나 푸리에 변환과 같은 기능을 가지는 중요한 광학 소자이다. 이

러한 기능이 평면 광도파로 상에서 전파하는 파에 의해 수행될 때 평면 광도파로 렌즈라고 하며, 특히 신호처리나 광통신 및 광연산을 위한 광집적 소자를 구성하는데 매우 중요한 소자이다. 본 연구에서 제작한 평면 광도파로 렌즈는 모드-굴절율을 이용한 평면 광도파로 렌즈이며 이는 볼록 렌즈를 2차원적으로 직접 변환한 형태이다. 이러한 형태의 렌즈들에서 나타나는 대표적인 문제점들은 렌즈의 경계에서 도파되는 빔의 산란과 모드 변환이 발생하고, 렌즈 내부 영역의 모드-굴절율과 렌즈 외부 영역의 모드-굴절율의 차이가 미세하기 때문에 작은 F-수를 가지는 렌즈를 제작하기 힘들며, 렌즈의 중심인 광축(optical axis)을 지나지 않는 off-axis 빔에 대한 구면수차가 크다는 것이다.

첫번째 문제점은 도파로의 두께를 조절한 taped 경계를 만들거나, 확산 공정에 의해 거의 해결할 수 있다. 두번째 문제점은 Ti:LiNbO₃ 광도파로에 양자교환을 하면 약 0.12 정도의 비교적 큰 굴절율의 변화가 일어나므로 어느 정도 해결 가능하다. 그리고 실제적인 렌즈의 응용에 있어서 매우 중요한 구면수차가 없는 모드-굴절율 렌즈를 제작하여야 할 필요가 있다.

2. 평면 광도파로 렌즈의 궤적방정식

굴절율이 다른 두 매질을 통과하는 광이 동위상으로 한 위치에 모이도록 할 수 있고, 이를 평면 광도파로 상에서 실현한 것이 평면 광도파로 렌즈이다. 평면 광도파로 상에서 도파하는 파에 대한 렌즈 외부 영역의 유효 굴절율과 렌즈 내부 영역의 유효 굴절율을 각각 n_e 와 n_e' 이라고 하였을 때, x-y 평면 상에서 그림 1과 같은 구조를 생각할 수 있다. y-축 상에서 동위상인 평행광 S₁과 S₂에 대하여 S₁이 점 B 및 점 P를 통과하여 점 C로 진행하고, S₂가 점 O를 지나 점 C로 진행하여 점 C에서 S₁, S₂가 동위상이 되면, 점 C는 초점이 된다. 이러한 볼록렌즈 경계의 궤적 P(x, y)는 그림 1에서 Fermat

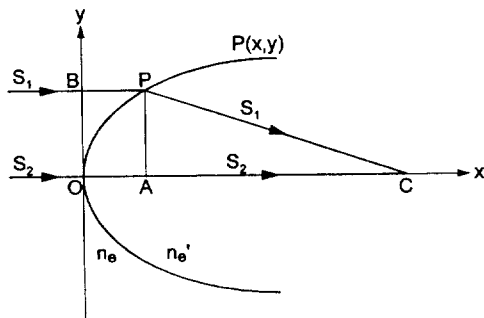


그림 1. 평면 광도파로 렌즈 궤적.

원리에 의해

$$\overline{\text{Transit time(BPC)}} = \overline{\text{Transit time(OAC)}} \quad (1)$$

$$\overline{BP} \cdot n_e + \overline{PC} \cdot n_e' = \overline{OAC} \cdot n_e' \quad (2)$$

이다. 여기서 \overline{BP} 와 \overline{OB} 를 각각 x, y라 두고, \overline{OAC} 에 초점거리 f를 식 (2)에 대입하면,

$$n_e x + n_e' \sqrt{(f-x)^2 + y^2} = n_e' f \quad (3)$$

가 되고, 이를 x, y에 관하여 정리하면

$$\frac{(x-a)^2}{a^2} + \frac{y^2}{b^2} = 1 \quad (4)$$

이다. 여기서 장반경 및 단반경은 각각

$$a = \frac{f}{1 + n_e/n_e'} \quad (5)$$

$$b = \left\{ \frac{1 - n_e/n_e'}{1 + n_e/n_e'} \right\}^{1/2} f \quad (6)$$

이다.

식 (4)는 렌즈 내부 영역에서 도파되는 파의 유효 굴절율 n_e' 과 외부 영역에서 도파되는 파의 유효 굴절율 n_e 및 초점거리 f로 표현된 타원 방정식이다. 여기서 평면 도파로를 제작하여 프리즘 결합으로 측정된 유효 굴절율 n_e 와 n_e' 을 대입하면 장반경 a 및 단반경 b는 각각 초점거리 f의 종속변수가 된다.

3. 볼록-평면 렌즈

타원형의 렌즈는 장축이 초점길이보다 크게 되어 관측이 어려울 뿐만 아니라 광집적회로에 사용하기가 부

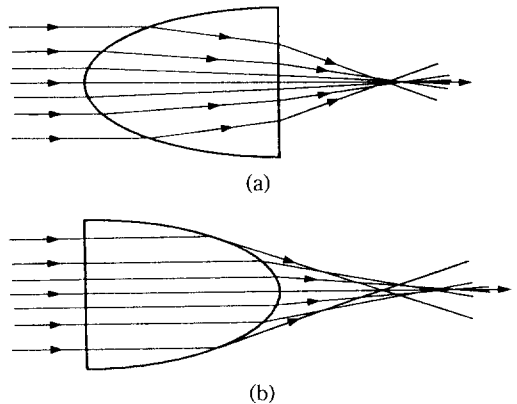


그림 2. 구면수차, (a) 평면-볼록 렌즈, (b) 볼록-평면 렌즈.

적합하다. 따라서 렌즈의 초점을 렌즈 밖에서 맺히도록 하기 위하여 그림 2의 실선과 같이 평면 광도파로 렌즈가 될 영역을 타원체의 단반경에서 선형적으로 절단하여 볼록-평면(plano-convex)형으로 설계한다. 이로 인한 효과는 렌즈부분 영역에서 발생할 수 있는 고차 모드들을 렌즈 외부 영역에서 줄여줄 수 있다.^[9] 렌즈의 단반경이 렌즈 영역의 경계선이 될 경우, 렌즈의 내부에서 선형적 경계면으로 진행하는 빔의 입사 각도가 입사하는 위치에 따라 각각 다르기 때문에 렌즈의 선형 경계에서 Snell의 법칙에 의해 각각의 빔들은 다른 각도로 진행하게 된다. 따라서 볼록-평면 렌즈의 초점은 입사되는 빔의 구경에 따라 설계할 때의 값과는 다른 값으로 나타난다. 제작하고자 하는 볼록-평면 광도파로 렌즈의 초점거리 F 는 입사하는 빔의 위치에 따라 변하게 되며, 광축으로부터 $0.9b$ 의 위치에서 입사하는 빔에 의한 초점거리 F 와 설계할 때의 초점거리 f 와의 관계는 계산에 의하여

$$F = 0.953f \quad (7)$$

로 주어진다.

4. 볼록-오목 렌즈의 제한

렌즈의 특성이 초점에서의 빔의 크기와 구면수차에 의해 결정되는 점에서 볼 때, 이상에서 설명한 볼록-평면 렌즈는 선형 경계로 인하여 구면수차가 존재하여 렌즈의 특성을 떨어뜨리게 된다. 또한 렌즈의 구면수차가 커지게 되면 초점에서의 빔의 크기도 같이 커지게 된다. 따라서 초점에서의 빔의 크기를 줄이기 위해서는 렌즈의 구면수차를 없앨 수 있는 새로운 형태의 렌즈가 요구된다.

먼저 볼록-평면 렌즈가 가지는 구면수차를 최소화하여 사용할 수 있는 방법들을 살펴보면, 가장 간단한 방법으로는 렌즈의 중심부만 사용하는 것이다. 이 방법으로 횡방향 구면수차 및 종방향 구면수차를 상당한 정도로 줄일 수 있다. 그리고 렌즈 자체를 중심부 위주로 작게 만드는 것도 이와 유사한 방법이다. 또한 렌즈에 의한 구면수차의 정도는 렌즈를 시스템에 결합하는 방법에 따라 달라진다. 즉 평행광으로부터 초점을 형성하는 경우, 평면-볼록(plano-convex) 렌즈로 사용할 경우와 동일한 렌즈를 단지 입출력의 위치를 바꾸어 볼록-평면 렌즈로 사용할 경우와는 구면수차의 정도가 다르며 이를 그림 2에 나타내었다. 그림 2의 (a)는 평면-볼록 렌즈의 경우이고 (b)는 볼록-평면 렌즈의 경우이다. 따라서 평행광이 있는 방향으로 렌즈의 곡선 부분이 있을 때 구면수차의 정도를 줄일 수 있다.

이상에서 열거한 방법들은 렌즈의 사용법에 관계되는

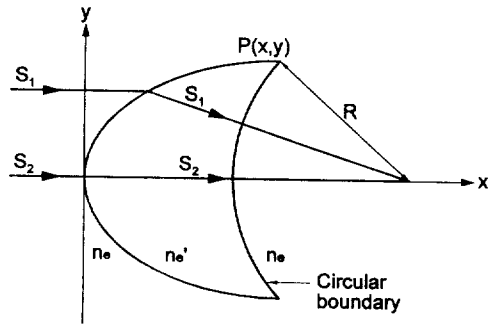


그림 3. 볼록-오목 렌즈의 설계.

것이다. 그러나 렌즈를 설계할 때 이론적으로 구면수차를 없앨 수 있는 방법을 그림 3에 제안하였다. 그림 3은 그림 1과 유사하지만 타원체의 단반경에서 선형적으로 경계를 지우지 않고, 원으로 처리한 것이 특징이다. 그림 3에서 렌즈의 제적 방정식 $P(x, y)$ 를 통과한 각각의 빔 S_1 및 S_2 가 초점 C 를 향하여 진행하다가 초점 C 로부터 동일한 반경 R 을 가지는 원의 방정식에 의한 경계를 만나게 된다. 즉, 볼록-평면 렌즈의 선형경계의 한 끝점에서 초점까지의 거리를 반경 R 로 하는 원의 방정식은

$$(x-f)^2 + y^2 = R^2 \quad (8)$$

이고, 반경 R 은

$$R = \sqrt{(f-a)^2 + b^2} \quad (9)$$

이다. 이때에는 원의 법선 방향이 빔의 진행 방향과 동일하므로 빔이 경계에서 굴절하지 않고 그대로 초점을 향하여 진행한다. 따라서 초점의 위치는 변하지 않고, 구면수차도 발생하지 않는다.

III. 평면 광도파로 렌즈의 제작

평면 광도파로 렌즈를 제작하기 위하여는 동일한 기판 상에서 굴절율 변화의 차이가 큰 다른 두 가지 공정법이 필요하다. LiNbO_3 에 굴절율의 변화를 일으키는 방법들은 여러가지 방법들이 알려져 있으며, 이러한 방법들 중 Ti 내부확산법(TI)과 양자교환법(PE)은 이상굴절율에 대하여 각각 0.01 및 0.12 정도의 굴절율 변화를 일으킨다.^[5-7] 그러나 기판이 X-cut 및 Z-cut일 때는 이러한 큰 굴절율의 변화가 일어나지만, Y-cut LiNbO_3 에 양자교환만을 행하는 경우에는 기판의 표면에 광손상(optical damage)이 발생한다.^[3,6] 이러한 손상을 없애기 위한 방

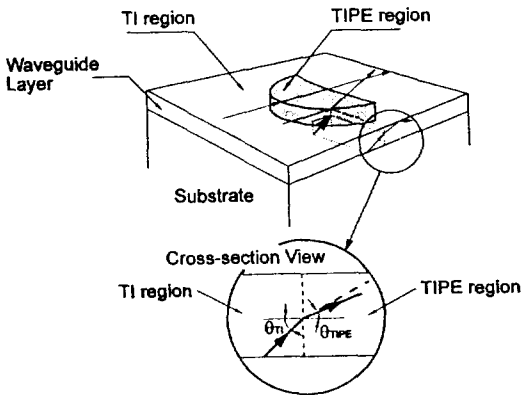


그림 4. 평면 도파로 렌즈의 3-차원 그림.

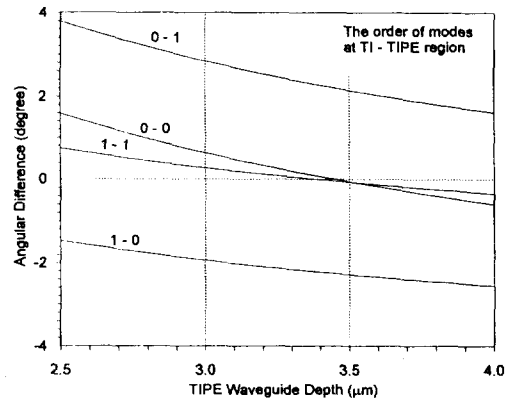


그림 5. 도파-모드 정합을 위한 시뮬레이션.

법들 중 양자교환을 행하기 전에 Ti를 내부확산시키는 방법(TIPE)은 Ti 내부확산 광도파로보다 비교적 레이저에 의한 손상이 작으며,^[7] 특히, Ti 내부확산법과 병행하여 연속적인 공정과정이므로 집적광분광기나 평면 광도파로 렌즈 등과 같은 다양한 소자를 만드는 데 적합한 방법이다.^[3] 따라서 먼저 이들 두 방법을 이용하여 평면 광도파로를 제작하고 그 굴절율을 측정한다.

평면 광도파로를 제작하여 도파되는 파의 유효 이상 굴절율을 측정하기 전에 전파 방향을 결정하여야 하며, 도파모드 정합을 고려하여야 한다. 먼저 Y-cut LiNbO₃ 기판을 이용하여 평면 광도파로 렌즈를 제작하기 위해서는 TIPE의 경우 이상굴절율만 증가하므로 전파 방향인 렌즈의 장축을 x-축으로 선택하고, 렌즈의 단축은 z-축으로 선택하여 기판을 절단한다. 절단하고 난 기판은 무기물과 유기물 세척과정을 통해 깨끗하게 세척한다. 특히 이 과정은 렌즈 제작과정 전체에 영향을 미치므로 가장 주의깊게 실시해야 한다.

1. 도파모드 정합

Ti 내부확산법과 양자교환법을 이용하여 평면 광도파로 렌즈를 제작하려면 각각의 도파 모드간의 정합을 고려하여야 한다. 평면 광도파로에 있어서 도파되는 파의 모드 형성 조건에 의하여 도파되는 파의 진행각은 도파로의 두께에 따라 다르다. 따라서 그림 4의 원에 확대하여 나타낸 것과 같이 도파로 단면상에서 볼 때, 렌즈 외부 영역인 TI영역에서 도파되는 파는 렌즈 영역인 TIPE영역으로 입사할 때 그 경계에서 Snell의 법칙에 따라 진행각이 점선으로 표시한 것과 같이 달라지게 된다. 그러나 달라진 진행각이 TIPE영역에서 도파-모드 형성 조건을 만족하는 실선으로 표시한 도파되는 파의 진행각과 일치하도록 TIPE영역의 두께를 조절하면 도파

모드간의 정합을 이룰 수 있다.

시뮬레이션 조건을 구하기 위하여 먼저 TI 평면 광도파로를 제작하고 도파되는 파의 굴절율을 측정한다. TI 영역은 단일 모드가 존재하도록 도파로를 제작하고, 프리즘 결합을 이용하여 굴절율을 측정한 결과 2.2111 (TE₀)이었으며, 이의 두께는 약 3 μm 정도이다. 다음으로 이 모드의 진행각을 계산하고, TIPE영역으로 입사한 후의 진행각을 계산한다. 또한 TIPE영역의 두께를 달리하면서 이 영역에서의 진행각을 계산하여 두 진행각을 비교하여 그림 5에 나타내었다. 그림 5에서 보듯이 같은 차수의 모드간에는 진행각의 정합이 발생하지만 다른 차수의 모드들 간에는 정합이 일어나지 않는다. 그리고 정합이 일어나기 위한 TIPE영역의 두께는 약 3.5 μm임을 알 수 있다.

이러한 TIPE 평면 광도파로의 두께를 얻기 위한 양자교환시간은 220°C에서 3시간 양자교환을 행함으로써 얻을 수 있다.

2. TIPE 평면 광도파로의 굴절율 변화

TIPE 평면 광도파로의 제작은 먼저 Ti 내부확산에 의해 평면 광도파로를 제작한 후, 제작되어진 Ti:LiNbO₃ 광도파로 상에 양자교환을 시킨다. 양자교환을 할 양자원 (proton source)으로는 용해점이 비교적 높기 때문에 확산이 빨리 되고, 또한 안정성이 높으며 유독성이 작은 벤젠산(C₆H₆COOH)을 양자원으로 사용하였다. 양자교환은 LiNbO₃의 Li⁺ 이온과 벤젠산의 H⁺ 이온이 서로 교환되어 H_xLi_{1-x}NbO₃가 표면부근에 형성되어 높은 굴절율층이 얻어지는 것으로 알려져 있다.^[10]

양자교환되어진 광도파로는 양자교환이 이루어진 이후에 교환된 수소이온이 기판의 결정 구조 사이에서

안정된 형태를 갖추지 못하여 안정도가 떨어져서 도파모드가 불안정한 단점이 있으나, 제작하기가 쉽고 또 굴절을 변화가 크고 도파로 깊이 방향의 굴절을 분포가 계단형이므로^[7,10] 평면 광도파로에 입사빔을 결합하기가 쉽다.

이러한 양자교환은 유리관의 한쪽 끝을 밀봉하여 모래시계 모양의 ampoule을 만들고, 유리관의 아래 부분에 벤젠산 가루를 넣는다. 준비된 Ti 내부 확산 광도파로를 유리관의 윗 부분에 넣어서 벤젠산 가루와 아래 위로 분리시킨다. 그 다음 다른 한쪽 끝을 밀봉하여 220°C의 도가니에 넣는다. 순수 벤젠산 가루는 융해점이 122°C이므로 수 분이 지나면 액체 상태로 변한다. 벤젠산 가루가 완전히 액체 상태로 되면 유리관을 뒤집어서 평면 광도파로가 벤젠산에 잠기도록 하여 양자교환을 시작한다. 양자교환 시간은 이때부터 다시 ampoule을 뒤집어 기판을 벤젠산 용액으로부터 분리시킬 때까지이다. 기판 표면에 묻어있는 벤젠산은 메타놀로 세척을 하면 완전히 제거된다.

제작된 TIPE 평면 광도파로를 프리즘 결합으로 측정 한 결과 기본 모드에 대한 유효 이상굴절율이 2.3210이 었다.

3. 평면 광도파로 렌즈의 제작

설계된 평면 광도파로 렌즈를 제작하기 위한 공정과정을 그림 6에 나타내었다.

먼저 평면 광도파로의 두께를 정확히 조절하여 단일-모드가 형성될 수 있도록 전자빔 증착기를 이용하여 Ti의 두께를 150 Å로 증착한다. Ti가 증착된 기판을 1010°C에서 6시간 확산시켰다.

양자교환에 의해 렌즈 영역만 굴절율을 증가시키기 위해 식각액을 이용한 wet 에칭을 이용하였다. 양자교환을 막아주기 위한 금속박막의 증착은 금속 박막의 두께가 정확히 조절되지 않아도 가능하고, 알루미늄, 타이타늄, 크롬 등 대개의 금속으로 가능하다. 따라서 진공증착기를 통하여 약 500 Å 정도의 크롬을 증착하였다. 이때 증착기는 약 $6 \pm 0.5 (\times 10^{-6})$ Torr의 진공도를 유지하였다. P.R. 도포를 한 후, 크롬(Cr)이 도포된 판에 레이저 빔을 이용하여 제작한 마스크를 이용하여 자외선 광에 노출한 후 현상하면 렌즈 패턴이 형성된다. 크롬 마스크의 제작시 레이저 빔의 세기와 폭과의 관계를 최적의 상태로 하여야 시간도 절약되고 깨끗한 패턴을 얻을 수 있다.

양자교환이 일어나 렌즈가 되어야 할 부분의 크롬을 제거하기 위하여 에칭(etching)을 행한다. 크롬 식각액에

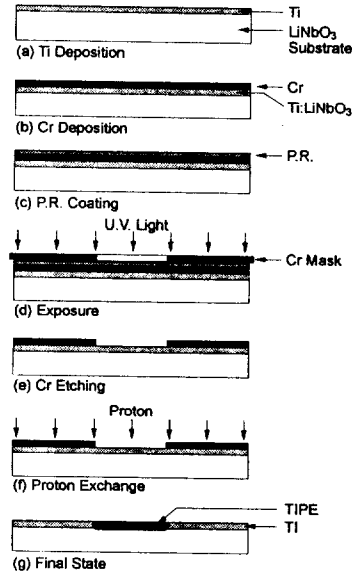


그림 6. 평면 광도파로 렌즈의 제작과정.

렌즈 패턴으로 현상된 기판을 약 1분 정도 담구면 P.R.이 없는 렌즈 영역만 에칭이 일어난다. 끝으로 양자교환을 220°C에서 3시간 동안 실시하면 렌즈 영역의 굴절율만 증가하게 된다. 양자교환이 끝난 기판은 메타놀을 이용하여 깨끗이 세척한다.

4. 제작한 평면 광도파로 렌즈 사양

측정한 기본 모드의 유효 이상굴절율 $n_e = 2.2111$ 과 $n_e' = 2.3210$ 의 값을 식 (17)에 대입하면,

$$\frac{(x - 0.512f)^2}{(0.512f)^2} + \frac{y^2}{(0.156f)^2} = 1 \quad (21)$$

의 식을 얻을 수 있다.

식 (21)은 x, y 및 초점거리 f 로 표현된 타원 방정식이며, 초점거리 f 는 8.0 mm이므로 이를 대입하면, x 축의 장반경 a 는 4.096 mm, y 축의 단반경 b 는 1.248 mm이다. 최대구경 D 는 y 축의 단반경의 두 배이므로

$$D = 2b = 0.312f = 2.496 \text{ [mm]} \quad (22)$$

이다.

IV. 특성 측정 및 고찰

제작한 평면 광도파로 렌즈의 특성을 직접결합법에 의해 근시야상을 관측하기 위해 입출력 축을 90°로 연

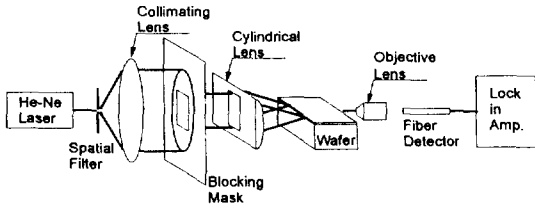


그림 7. 시스템 배열.

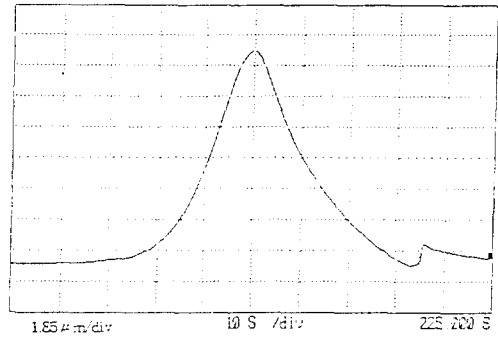
마하고 세척한다. 연마는 사포 1000번 및 1500번으로 깨끗하게 갈아내고, 0.3 μm 의 알루미늄 가루가 도포된 연마용 시트를 사용하여 광학적 수준까지 연마한다. 이때 기관의 양 단면을 90°로 유지하기 위해 지지대를 제작하여 기관을 고정하고 연마한다. 최종 단계에서의 연마는 순간마다 그 정도가 달라지므로 현미경으로 확인하면서 도파로 층의 연마상태가 양호할 때까지 한다.

1. 시스템 배열

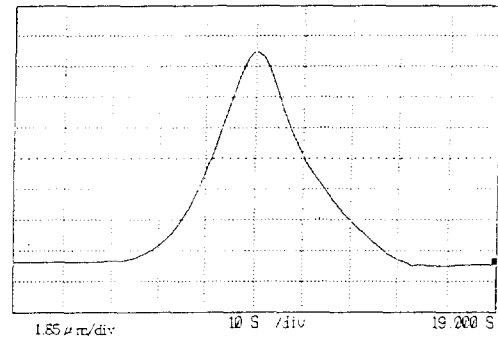
제작한 평면 광도파로 렌즈의 특성을 측정하기 위한 시스템 배열은 그림 7에 나타내었다. 측정에 사용한 레이저는 파장이 0.6328 μm 이고, 최대 전력 5 mW인 He-Ne 레이저이다. 레이저 빔을 공간여과기(spatial filter)와 렌즈를 사용하여 평행광을 만들고, 편광기를 통하여 TE 모드가 여기될 수 있도록 한다. 그 다음 단계 빔 차단기를 설치하여 원하는 크기의 구경을 가지도록 하였고 원통형 렌즈(cylindrical lens)를 이용하여 도파로에 직접 결합한다. 도파로는 xyz-방향으로 움직일 수 있는 스테이지 위에 놓아 입력 빔의 위치를 자유로이 조절할 수 있도록 한다. 그리고 출력은 현미경으로 초점에서의 빔을 관측하고, 이를 광섬유를 이용한 검출기와 lock-in 증폭기를 결합하여 초점에서의 빔의 패턴을 측정한다. 렌즈의 성능은 렌즈의 초점면(focal plane)까지 연마한 후 초점에서의 빔의 크기를 근시야상(near-field pattern)으로 측정한다.

2. 근시야상에 의한 특성 비교

평면 광도파로 렌즈의 초점에서의 빔 크기를 근시야상(near-field pattern)으로 측정하기 위해서는 그림 7과 같은 시스템을 배열하고 출력측을 렌즈의 초점면까지 연마해야 한다. 특히 제작한 렌즈의 초점면까지 정확히 연마한다는 것이 아주 중요한 일이다. 본 연구에서는 양자교환을 위한 마스크를 제작할 때, 광도파로의 가장 자리에 초점면을 나타내기 위한 표시를 하였다. 이러한 표시는 양자교환 후 굴절률의 차이 때문에 현미경으로 관측할 수 있다. 이 표시를 기준으로 1000배의 배율로



(a)



(b)

그림 8. 볼록-평면 렌즈의 관측한 초점에서의 빔의 패턴. (a) 견본 #1, (b) 견본 #2

연마면을 확인하며 연마하였다. 시스템 배열에 있어서는 출력단에 단일 모드 광섬유를 이용한 검출기를 Micro Control사의 마이크로 스테이지 위에 고정하고, 이 마이크로 스테이지를 컴퓨터 제어에 의해 횡방향으로 주사한다. 주사 속도는 초당 10 μm 씩 이동하도록 하였으며, 전체적으로 빔을 충분히 포함하도록 8~10 mm 정도를 주사하였다. 또한 검출되는 빔의 세기가 아주 미세하기 때문에 Stanford Research사의 lock-in 증폭기를 이용하여 측정하였다.

각 렌즈의 샘플들은 같은 제작 조건하에서 2개씩 제작하였다. 제작한 볼록-평면 렌즈 및 볼록-오목 렌즈의 초점에서 빔의 크기를 lock-in 증폭기로 관측한 것을 그림 8 및 9에 각각 나타내었다. 이때 입력빔의 구경은 최대 구경 D의 약 96%인 2.4 mm로 하였다. 그림 8의 (a)와 (b)는 제작한 볼록-평면 렌즈의 초점에서의 빔의 패턴으로 빔의 세기가 최대 피크값의 반이 되는 곳에서 폭이 약 3.59 μm 와 3.57 μm 임을 알 수 있다. 두 개의 샘플에서 초점에서 빔의 크기는 평균 3.58 μm 로 얻을 수 있다. 또한 그림 9의 (a)와 (b)는 볼록-오목 렌즈의 초점에서의 빔의 패턴이며, 빔의 세기가 최대 피크값의 반이 되는 곳에서

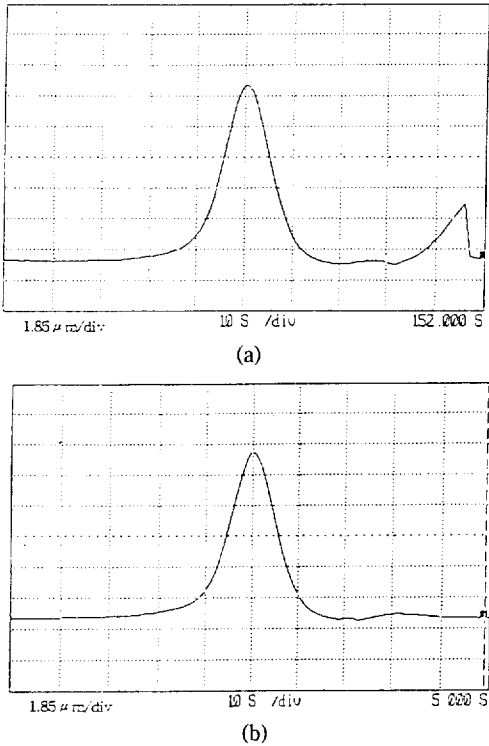


그림 9. 블록-평면 렌즈의 관측한 초점에서의 빔의 패턴. (a) 견본 #1, (b) 견본 #2

폭이 약 $2.12 \mu\text{m}$ 및 $2.10 \mu\text{m}$ 임을 알 수 있다. 블록-오목 렌즈의 경우에도 두개의 샘플에서 평균 $2.11 \mu\text{m}$ 의 값을 얻을 수 있다.

관측된 결과로부터 블록-평면 렌즈에서보다 블록-오목 렌즈로 설계하는 것이 초점에서의 빔의 크기가 약 59% 정도로 줄일 수가 있음을 알 수 있다.

기존의 블록-평면 렌즈는 입력빔의 구경에 따른 초점 위치의 변화와 이에 상응하는 구면수차의 존재 등을 이미 설계할 때부터 내포하고 있기 때문에 초점에서의 빔의 크기가 클 것으로 예측할 수 있다. 그러나 초점위치의 변화가 없고, 구면수차가 없도록 설계한 블록-오목 렌즈는 초점에서의 빔의 크기가 이론적으로 한 점에서 모이기 때문에 '0'이 되어야 할 것처럼 보이지만 실제로 초점에서의 빔의 크기는 '0'이 되지 않는다. 이것은 기하광학(geometric optics)에서 계산할 때는 사용한 빔을 광선(ray)으로 취급하고 따라서 빔의 파장을 '0'으로 간주하기 때문이다. 이러한 가정은 파동광학(wave optics)의 극한의 경우로서 회절현상(diffraction phenomenon)을 무시하였다. 그러나 빛의 이중성에 의해 파동적 성질로부터 회절이 일어나므로 초점에서의 빔의 크기는

유한한 값으로 존재한다.

제작 및 측정상의 오차가 발생할 수 있는 몇가지 원인을 살펴보면 첫째 원인으로서는 근시야상을 관측하기 위하여 연마를 행할 때 정확히 초점면에서 이루어지지 않은 데에서 비롯된다고 볼 수 있다. 일반적으로 렌즈의 초점깊이(focal depth)를 고려하면 수 마이크로 정도의 차이는 무시할 수 있으며, 이는 측정상의 문제로 받아들일 수 있다. 둘째 원인은 평면 광도파로 렌즈의 설계시 유효 굴절율을 이용하여 설계한 것을 들 수 있다. 즉 실제의 TI 도파로의 경우 굴절율 분포가 grade형 분포를 가지고 있다. 따라서 도파로의 두께를 전환점(turning point)까지로 이론적으로 규정하고, 이에 대한 TIPE 도파로의 두께를 계산한 데에서 발생할 수 있는 문제이다. 세번째로는 제작한 렌즈의 제작이 설계한 값과 정확히 일치하느냐 하는 문제를 들 수 있다. 양자교환에 의한 굴절율의 변화는 깊이 방향으로 거의 계단형을 이루고 있으나, 횡방향으로의 확산에 의해 렌즈의 제작이 미세하게 변화할 수 있으며, 이에 의한 영향으로 초점에서의 빔의 크기가 커질 수 있다.

3. 고찰

이상의 평면 광도파로 렌즈의 특성으로 볼 때 모드-굴절율 렌즈, 특히 LiNbO_3 를 기판으로 하여 TI 방법과 TIPE 방법을 이용한 평면 광도파로 렌즈가 비교적 제작 방법이 용이하고 다양한 기능의 광집적회로를 구성할 수 있는 장점을 가지고 있다. 그러나 off-axis 빔에 대한 구면수차가 존재하기 때문에 광집적회로에 응용할 때 여러가지 문제점이 나타난다. 채널 도파로와의 결합시 효율이 떨어지고, 광집적회로의 구조가 복잡한 경우, 신호처리를 요하는 소자들의 수가 많아지게 되면 입력쪽의 조그만 오차로 인하여 출력쪽에서는 효율이 크게 떨어질 것이다.

제안한 블록-오목 렌즈는 기존의 블록-평면 렌즈가 가지는 구면수차를 없앨 수 있는 구조로 설계하였다. 각각의 렌즈 형태에 대하여 두개의 샘플을 제작하여 초점에서의 빔의 크기를 관측한 결과, 기존의 블록-평면 렌즈가 약 $3.58 \mu\text{m}$ 이었던 것에 비해 제안한 블록-오목 렌즈는 약 $2.11 \mu\text{m}$ 로 빔의 크기가 약 59% 정도로 줄어들음을 확인할 수 있었다.

따라서 광연산을 위한 광집적회로에서 채널도파로와 결합해야 할 때, 단일 모드 채널 도파로의 폭이 약 $2\sim 3 \mu\text{m}$ 정도임을 고려한다면 블록-평면 렌즈 경우보다 블록-오목 렌즈의 경우가 더 적합함을 알 수 있다.

V. 결 론

본 논문에서는 Y-cut LiNbO₃를 이용하여 광연산을 수행하는 데 필요한 구성 소자들 중 평면 광도파로 렌즈를 제작하여 그 특성을 조사하였다. 특히, 기존의 볼록-평면 렌즈에서 나타나는 구면수차를 없애기 위하여 볼록-오목 렌즈를 제안하고 두가지 형태의 렌즈를 제작하여 특성을 측정된 결과 볼록-평면 렌즈의 초점에서 빔의 크기가 3.58 μm 로 나타났던 것에 비해 볼록-오목 렌즈로 개선함으로써 렌즈의 초점에서 빔의 크기를 2.11 μm 로 줄일 수 있었다.

평면 광도파로 렌즈를 제작하기 위하여 먼저, Ti 내부 확산 평면 광도파로 및 TIPE 평면 광도파로를 제작하여 프리즘 결합으로 굴절율을 측정하였다. Ti의 두께는 150 Å을 증착하여 1010°C에서 6시간 확산하였으며, 양자교환은 220°C에서 3시간 실시하고 400°C에서 30분간 어닐링을 하였다. 제작한 Ti 내부 확산 평면 도파로는 단일-모드 광도파로이었으며, TIPE 평면 광도파로는 5개의 모드가 존재하였다. 측정된 기본 모드의 이상파에 대한 유효 굴절율은 각각 2.2111과 2.3210이었으며, 이로부터 평면 광도파로 렌즈의 궤적을 구하였다. 다음으로 500 Å의 크롬을 증착시키고, 에칭기법을 이용하여 렌즈 형태로 창을 형성한 후, 양자교환을 실시하여 TIPE 평면 광도파로 렌즈를 제작하였다. 직접 결합법으로 측정을 하기 위해 기판의 양단면을 연마한 후, 파장이 0.6328 μm 인 He-Ne 레이저를 이용하여 그 특성을 관측하였다.

제작한 기판을 렌즈의 초점면까지 연마한 후, 초점에

서의 빔의 크기를 광섬유 검출기를 통하여 관측한 결과 볼록-평면 렌즈의 경우 3.58 μm 이고, 볼록-오목 렌즈의 경우 2.11 μm 임을 알 수 있었다. 제작 및 측정상에서 발생할 수 있는 오차들을 고려한다면 관측한 초점의 크기는 타당하게 받아들일 수 있다. 따라서 단일-모드 채널 도파로와의 결합에 있어서 볼록-오목형태의 렌즈가 더욱 더 적합함을 알 수 있다.

참 고 문 헌

- [1] D. Casasent, IEEE Tran. on Computers, **C-24**, (1975).
- [2] A. V. Lugt, Proc. IEEE, **62**, (1974).
- [3] T. Tamir, *Integrated Optics*, (Springer-Verlag, Berlin, 1979).
- [4] N. F. Hartman, et al., IEEE Trans. Components Hybrid, and Manufacturing Tech., **CHMT-4**, 327 (1981).
- [5] J. L. Jackel, C. E. Rice, and J. J. Veselka, Appl. Phys. Lett., **41**, 607(1982).
- [6] A. L. Dawar, et al., Appl. Optics, **25**, 1495(1986).
- [7] M. De Micheli, et al., Opt. Commun., **42**, 101 (1982).
- [8] D. Y. Zang, Opt. Commun., **47**, 248(1983).
- [9] D. Y. Zang and C. S. Tsai, Appl. Phys. Lett., **46**, 703(1985).
- [10] J. L. Jackel, et al., J. Appl. Phys., **55**, 269(1984)

Improvement of the Characteristics and Fabrication of a Planar Waveguide Lens

Suk Moon Chung

Dept. of Electronics Eng., Korea Naval Academy, Chinhae 645-797, Korea

Jae Chang Kim and Tae-Hoon Yoon

Dept. of Electronics Eng., Pusan Nat. Univ., Pusan 609-735, Korea

Gil Jung Kim

Dept. of Electronics Eng., Dongseo Univ., Pusan 616-010, Korea

(Received: October 30, 1995)

In this paper, we propose a new type of a planar waveguide lens, a meniscus lens instead of a plano-convex lens used widely for the optical integrated circuits such as optical numerical processors. A plano-convex lens has a spherical aberration caused by the linear boundary. In the proposed meniscus lens, this linear boundary is replaced by a circular-boundary, and the spherical aberration is removed. To test the performance of the proposed lens, a meniscus lens is designed using Fermat principle and fabricated on the Y-cut LiNbO_3 substrate. First a Ti:LiNbO_3 planar waveguide is fabricated on the LiNbO_3 substrate by Ti indiffusion. Then a meniscus lens is fabricated on the planar waveguide by TIPE(Ti indiffused proton-exchange) method. A plano-convex lens is also fabricated on the same substrate to compare the spot size at the focal point. The measured spot size of the meniscus lens is reduced to 59% that of the plano-convex lens. This result shows that the proposed meniscus lens is more effective for optical integrated circuits than the plano-convex lens.