

論文99-36D-5-9

高 굴절율화된 z-cut LiNbO₃ 광도파로 제작 및 Ti 두께에 따른 삽입손실특성

(Preparations of z-cut LiNbO₃ Optical Waveguide for High Refractive Index Change and Properties of Insertion Loss as a Function of Ti Thickness)

金 成 求 *

(Seong-Ku Kim)

요 약

본 연구에서는 Ti 확산 lithium niobate 광도파로의 高굴절율 제작하기 위한 확산모델을 제시하고, 기존 확산방법과 비교하였다. 그리고 광파장 $\lambda=1.55\mu\text{m}$ 에서 단일모드 광섬유와 광도파로를 피그테일링하여 두께에 따른 전체삽입손실을 논의하였다. 본 연구에서는 제안한 확산방법은 기존 확산방법보다도 광도파로의 고굴절율을 도모하는 것으로 분석되었으며, 제안된 확산방법으로 Ti 두께 1000 Å~1400 Å범위에서 제작한 마르젠다 간섭기형 광도파로를 제작한 결과, TE 및 TM 전체삽입손실은 z-cut 인 경우 0.5dB/cm 수준이었고 x-cut인 경우 $1\pm 0.5\text{dB/cm}$ 를 나타내었다. 이러한 결과로부터 이 확산모델은 저전력형 광변조기나 스위치 등의 제작에 활용할 수 있을 것이다.

Abstract

In this paper, we proposed a diffusion model of Ti diffused lithium niobate optical waveguide for fabricating waveguides with high refractive index and compared with conventional one. The achievement of low optical insertion loss between waveguide interface and single mode fibers was discussed as a function of Ti thickness for $\lambda=1.55\mu\text{m}$. The proposed diffusion method exhibited higher refractive index waveguide than conventional one for $\lambda=0.6328\mu\text{m}$. We have achieved the total fiber-waveguide-fiber insertion loss as low as 0.5dB/cm in z-cut and $1\pm 0.5\text{dB/cm}$ in x-cut for both TM and TE mode of Mach-Zehnder interferometric waveguide in the range of Ti thickness 1000-1400 Å for $\lambda=1.55\mu\text{m}$. From these results, this diffusion model for making a low loss waveguide can be used for low-power-modulators and switches.

I. 서 론

현재 interactive video, high definition TV, 및 high-data-rate transmission 등과 같은 서비스 수요증가는 더욱 대용량화 및 초고속화를 요구하고 있

나, 현대 network에서 대부분의 정보는 광역성 광섬유에 광펄스로 전환되기 때문에 전자적인 스위칭(electronic switching)은 신호처리전에 포톤(photon)에서 전자(electron)로 그리고 재차 전송(retransmission)을 위해서 전자에서 포톤으로 귀찮은 변환과정을 거쳐야 한다^[1]. 따라서 전자적인 스위치는 속도와 용량면에서 궁극적인 한계에 도달하여, 광전자변환(optoelectronic conversion) 없이 광신호를 직접적으로 다룰 수 있는 광소자에 대한 연구의 계기가 되었

* 正會員, 電子部品研究院

(KETI, Korea Electronics Technology Institute)

接受日: 1997年12月15日, 수정완료일: 1999年4月19日

고, 최근 장거리전송실험에서는 테라비트영역으로 이어져 21세기 정보화시대를 열어가는 기술혁신을 이루고 있다. 전자통신 한계를 벗어나 광통신영역에서만 가능한 테라비트 세계 진입으로 음성, 데이터, 유무선방송, 무선가입자등이 통합되는 광대역 종합통신망의 구축을 위한 backbone으로서 초고속 광네트워크의 조속한 실현이 요구되고 있다^[2].

이에 따라 광소자로 전자소자를 대치하려는 움직임과 더불어 20세기 말에 들어서 실제 시스템에 활용하기 위한 본격적인 연구로 그 성과가 확산되고 있다. 1990년 초부터 가장 완숙한 기술로 방향성결합기커플러(directional coupler switch) 변조기(modulator) 등이 LiNbO₃ 광도파로 기술로 제작되었다. 제작법 중에서 Ti 확산법은 양자교환방식과 더불어 저손실, high bit rate 과 low drive power modulator, deflector 및 switch 용 광도파로 제작에 채용되는 가장 핵심기술 중에 하나로 자리잡았^[3,7,10], 특히 Ti 확산 광도파로를 제작하는 다양한 방법이 제시되어 왔다^[4,5,6,14,15,16]. 그 중에서, dry air 또는 O₂ flowing atmosphere 상태에서 Ti 확산하는 방법, wet O₂ 또는 wet Ar 분위기에서 확산하는 방법 및 Ar flowing 분위기에서 확산하는 방법 등이 대표적이다. 이러한 방법을 종합해 분석 해 볼 때 LiNbO₃ 내부로 Ti 확산 과정은 다음 단계로 발생한다. (1) 확산 초기 약 500 °C 부터 LiNbO₃ 기판에서 유출되는 산소 또는 확산로 분위기에 포함된 산소와 반응하여 TiO₂ 층(layer) 이 생성되고 (2) 500 °C 이상의 고온에서 (Ti_xNb_{1-x})O₂ phase는 Ti 확산의 real source로서 작용하기 시작한다. 그리고 (3) >500 °C 고온으로 확산이 진행됨에 따라서 (Ti_xNb_{1-x})O₂ compound 는 완전소모되고, Li 및 Li₂O 외부확산(out-diffusion)이 수반된다. 따라서 (Ti_xNb_{1-x})O₂ compound 구조적 특성이 매우 중요하다. 그리고 광변조기, 광스위치 및 광필터와 같은 집적광학소자가 단일모드시스템에 실질적인 응용을 위해서는 low waveguide propagation loss는 물론 효율적인 fiber-waveguide coupling 이 필수적이다. 또한 다음과 같은 고품질 도파로 제작조건이 있다^[7]. (1) 광전송손실(optical propagation loss)는 1 dB/cm 보다도 낮아야 하며 (2) 광도파로는 오로지 기본모드(fundamental mode)만을 지원해야하고 (3) 결합손실(coupling loss)를 감소시키기 위해서 광섬유 core 와 광도파로 도파광 dimension 이 밀접

해야한다. 그리고 (4) 광도파로 내부에 굴절율변화(refractive index change)를 크게하여 광감금(optical confinement) 효율이 매우 커야하고 (5) 광도파로 제작이 재현성을 갖어야한다.

본 연구에서는 확산온도를 1050 °C, 확산시간을 8시간으로 선택하고 확산 중 Li₂O 외부확산이 억제되는 wet oxygen을 사용하여 광도파로를 제작하였다. 선폭은 7 또는 8 μm로 패턴화하였고, 길이는 5~6 cm로 절단하고 폴리싱하였다. 도파로의 고굴절율화를 유도하기 위해서 wet oxygen 과 함께 새로운 확산법을 적용하였고, 제작한 도파로 양측에 편광보존파이버 및 단일모드 파이버를 피그테일링시켰을때 TM/TE 삽입손실의 Ti 두께의존성을 연구하였다.

II. 실험 및 측정

광도파로용 Ti 증착에는 Electron beam 증착과 Ti-에칭공정을 사용하였다. 3-inch 웨이퍼(Crystal Tech社 optical grade)에 패턴화된 광도파로 스트립 폭 및 두께편차는 표면두께측정기(surface thickness profiler, Dektak社)를 사용하여 분석한 결과 Ti 폭은 ±0.2 %, Ti 두께는 2.2 % 편차를 보였다. Ti layer 는 순도 99.99 % Ti 펠렛을 진공도 10⁻⁷ torr에서 약 1 Å/s 증착물로 형성하였다.

확산은 잘 알려진 수증기-산소-분위기(water vapor oxygen atmosphere)를 사용하였다. 이 방법은 확산 중 웨이퍼 품질(wafer quality)에 매우 크게 영향을 미치기 때문에 유입가스(carrier gas) 및 수증기량은 정밀하게 최적화되어야 한다. 여기서는 버블러 온도를 95 °C에 정확히 제어하고 유입되는 산소량은 입수구 구경(4~5 mm)에서 출사되는 초당 bubble 개수로 조절하였다. 또한 확산시간 및 온도는 8시간과 1050 °C로 제한하였다. 확산로 가속시간(ramp time)은 1050 °C까지 2시간, cooling time은 자연냉각을 채용하였으며, 냉각 중에 산소의 흐름이나량은 변동하지 않고 처음상태를 유지하였다.

확산 중 웨이퍼 표면에서 발생하는 Li 이온의 외확산을 억제하는 수증기-분위기 확산과 더불어 제작되는 광도파로의 고굴절율을 유도하기 위해서, 본 연구에서는 새로운 확산방법으로 제시한 일명 wafer-foldinging 방법^[9]을 활용하고, 그 유용성에 관해서 논의하였으며, 기존 수증기-산소-분위기 확산법과 차

이를 굴절율 변화특성으로 비교하였다.

일반적으로 수증기-산소-분위기 확산 장점은 광도파로 품질을 결정짓는 확산 후 결정특성 개선이다^[6,7,8]. 즉, 공기-분위기-확산(dry atmosphere diffusion)과 수증기-산소-분위기 확산을 Double crystal X-ray diffraction analysis 로 LiNbO_3 (006)에 관한 회절 피크 FWHM을 비교해 보았을때, 기판 FWHM은 $31''$ 에 비해서, 공기-분위기에서 확산된 축퇴결정(degraded crystal)은 약 1.5배 정도 커졌으나, 수증기-확산 상태에서는 그 양에 관계없이 약 10 % 정도 감소하여 결정특성(crystalline property) 개선에 기여한다는 것이다.

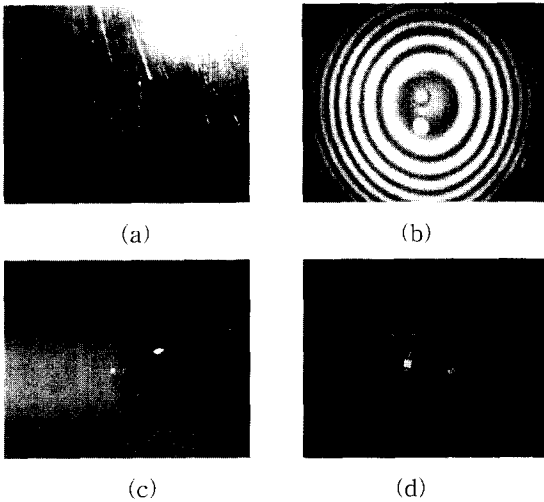


그림 1. 패키징과정. (a) 폴리싱지그 및 폴리싱단면 (b) PMF (c) 피그테일링 (d) 내부칩사진
Fig. 1. Packaging process. (a) polishing zig and polishing section (b) PMF (c) pigtailing (d) photograph.

그림 1(a)는 도파로 폴리싱(waveguide polishing), 피그테일링(pigtailing) 및 패키징(packaging)과정을 나타내었다. 그림 1(a)는 도파로 폴리싱 지그내부에 장착되어 연마되고 있는 도파로단면을 나타내었으며, 지그는 다수개 도파로를 동시에 연마되도록 고안되었고, 각도를 조정하여 연마할 수 있도록 하였다. 그림 1(b)는 도파로 광입력 단자에 접속되는 PMF(polarization maintaining fiber)를 지르코니아 페룰에 끼우고 에폭시로 고정한 후에 연마패드에서 폴리싱한 광섬유 단면사진이다. 이 표면을 페룰단면 관찰기로 연마 정도를 확인하였다. 그림 1(c)는 에폭시를 사용하여

광도파로-광섬유 접속상태이고, 그림 1(d)는 출력부를 SMF(single mode fiber)로 마무리하고, 최종단계로 이것을 패키지에 장착하고 삽입손실 및 제반특성을 조사하였다.

전체-광섬유-도파로-광섬유-삽입손실(total fiber-waveguide-fiber-insertion-loss)는 반사(reflection (fresnel)), 결합(coupling) 및 전송손실(propagation loss)을 포함한다. 측정시 여기서는 그림 1, 2처럼 완벽한 정렬(geometric alignment)과 끝면연마(endface polishing)을 가정하였기 때문에 광섬유의 광분포 대칭성과 광도파로의 깊이방향 비대칭성으로 인한 mode mismatch는 coupling loss의 가장 중요한 인자가 될 것이다. 그리고 광섬유와 도파로 모드 사이에 불일치(mismatch)를 최소화하기 위한 확산조건을 선택하고, Fresnel loss를 줄이기 위해서 index matching fluid를 사용하였다.

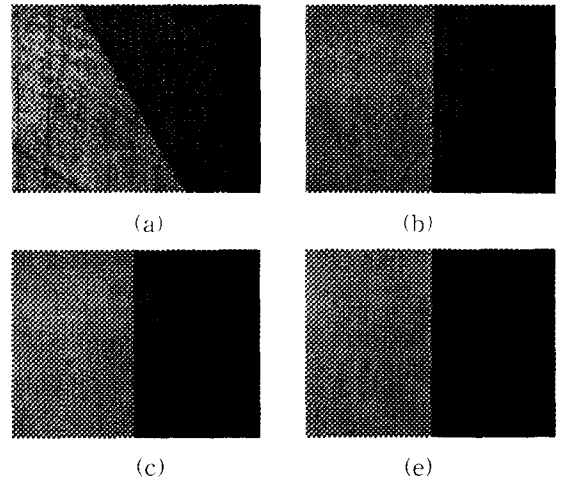


그림 2. 도파로 단면 폴리싱($\times 1000$) (a) #1200 paper (b) #2400 paper (c) $1\mu\text{m}$ diamond paste (d) $1/4\mu\text{m}$ diamond paste
Fig. 2. Polishing of waveguide endfaces($\times 1000$) (a) #1200 paper (b) #2400 paper (c) $1\mu\text{m}$ diamond paste (d) $1/4\mu\text{m}$ diamond paste.

본 연구에서는 특수에폭시와 금속박막을 이용한 폴리싱방법을 개발하여 활용하였고, 그림 2에 이러한 결과를 나타내었다. 먼저 공정용 웨이퍼를 다이아몬드 cutter 로 자른다음 사포 1200, 2400번으로 단면 연마를 실시한다. 그리고 다이아몬드 paste 3, 1 및 $1/4\mu\text{m}$ 순서로 연마시트를 사용하여 폴리싱하였다.

본 연구에서는 제안된 확산법과 기존 확산법으로 평

광도파로를 제작하고 굴절변화 및 surface morphology와 연관성을 통하여 제안된 확산법의 유용성을 조사하였고, 이를 근거로 제안된 확산법으로 채널형 광도파로를 두께에 따라 제작하고 광과장 1550 nm에서 전체삽입손실을 측정하여, TM 및 TE 모드의 두께의존성을 측정하였다. 광도파로 단면폴리싱은 계면 반사에 의한 back-reflection 차이를 비교 검토를 위해서 9° 폴리싱과 0° 폴리싱시그를 제작하였고 여기서는 0° 폴리싱 결과만을 비교하였다. 광섬유와 광도파로 계면(interface)에서 fresnel loss를 감소시키기 위한 index matching fluid는 $n \approx 1.5$ 이다.

III. 결과 및 고찰

Ti 확산 LiNbO₃ 광도파로의 특성은 결정품질(crystal quality)과 제작조건(fabrication parameter)에 크게 의존한다고 볼수 있다^[6,10], 결정품질에 관해서는 웨이퍼내에 잔존하는 Fe 와 같은 불순물(impurity)과 결함(defects)의 정도인 Li/Nb ratio deviation(또는 refractive index)에 관한 특성이고 제작조건에 관해서는 Ti 두께, 폭 변화(width deviation) 및 분위기(atmosphere), 온도(temperature), 시간과 같은 확산조건(diffusion conditions)과 관계된다. 우수한 광특성과 재현성(reproducibility) 있는 광도파로를 제작하기 위해서는 지금까지 언급한 인자를 정밀하게 조정해야만 하는데, 여기서 사용한 광도파로 제작용 웨이퍼는 Crystal Tech社의 optical grade 결정을 사용하였다. 따라서 유입수증기 및 확산 조건을 단순화하는 방향으로 확산변수를 조정함으로써 손실 0.5 dB/cm 이하인 광도파로 제작 방법과 좀더 굴절율이 높은 광도파로 제작법을 Ti 두께 변화를 고려하여 연구하고자 하였다.

증착된 Ti 박막은 plat 한 표면이다. 그러나 확산종료 후 표면은 완전히 변화하는데, 이것은 기판과 확산 분위기 정도에 TiO₂ 박막이 완전반응하여 강산화작용이 있었음을 말해 준다. 확산온도를 950°C로 설정하고 열처리한 결과를 인용하면^[3,6,16], 확산 1시간이내 시편의 표면형상은 기판과 titanium oxide가 강하게 반응하여 기판표면에 무질서한 hole 등이 생성된다. 그리고 1시간을 넘기면서 표면은 완전히 nonuniform하게 된다. 더욱 더 확산시간이 증가하면서 기판표면에 부등변-형상-구멍(trapezoidal shaped hole)이 나

타나고, 열처리를 10시간 이상하면 이런 현상을 사라지며 다수의 섬-형상(island)이 관찰된다. 그리고 열처리를 20시간 이상하면 이런 현상마저 완전히 사라지고 평탄해진다는 것이다.

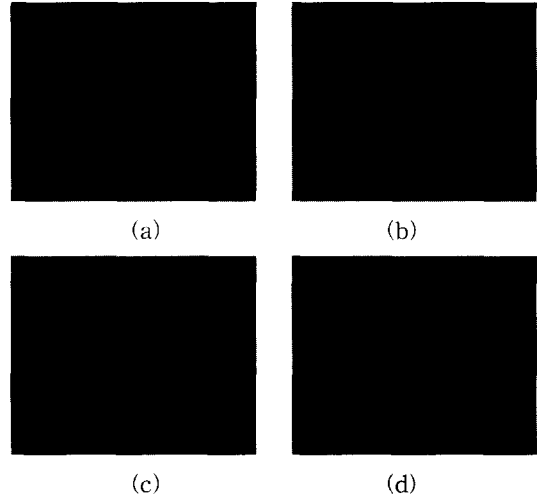


그림 3. 표면형상($\times 1000$), (a),(b) 1050°C, 8h and (c),(d) 1050°C, 15h diffused in wet O₂

Fig. 3. Surface morphology in (a),(b) 1050°C, 8h and (c),(d) 1050°C, 15h diffused in wet O₂.

본 연구에서 의하면 확산온도 1050 °C에서 2시간을 상승시간으로하고 확산을 수행했을 때 확산초기 표면에 부등변-형상-구멍 및 삼각형-기복등이 뒤섞이면서 그 정도가 심해지다가 확산 종료 후 그림 3(a)와 같이 수 많은 크기의 삼각형-기복 및 부등변형-island 가 혼재된 상태로 나타났다. 반면에 보고되는 부등변형-구멍등은 나타나지 않았고, 크고 작은 삼각기복이 주류를 이루고 있었다. 이러한 형상은 Ti 이 증착된 표면에서만 발생하고 순수 기판영역은 변함이 없이 plat 하였다. 그리고 확산시간을 10시간이상 길게하면 그림 3(c),(d)처럼 삼각기복등은 완전히 사라지고 원형 island 가 여기저기 흩어져 있거나, 외곽이 없이 완전히 매끄러운 표면을 나타내었다. 확산시간을 변수로하여 실험을 반복해 보았을 때 정도 차이는 있지만 이러한 현상은 계속되었다. 그러나 확산분위기를 조절하면 특정조건에서 그림 3(b)와 같은 좀더 개선된, 즉 덜 외곽된 도파로 표면형상을 얻을 수 있는데, 본 연구에서는 이 idea에 착안하였고, 이와같은 wet O₂ 분위기로 제작된 광특성이 어느정도 개선되는지도 비교하였다.

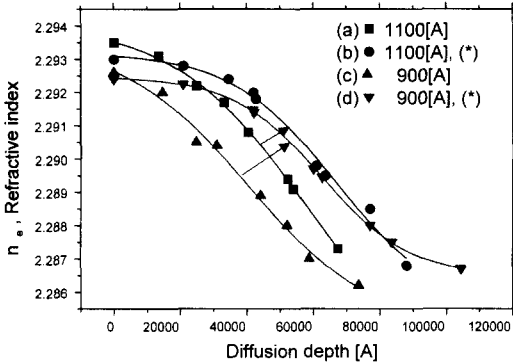


그림 4. z-cut Ti:LiNbO₃ 굴절율분포, n_e. (a),(c) 기존 수증기-분위기 확산, (b),(d) 제안한 확산방법 [7]

Fig. 4. Refractive index profile, n_e of z-cut Ti:LiNbO₃. (a),(c) conventional wet-oxygen atmosphere diffusion, (b),(d) proposed diffusion method.

그림 4는 평판도파로를 Ti 두께 900 Å 과 1100 Å 로 제작하고, 기존 수증기-분위기 방법 (a), (c)과 본 연구에서 사용한 방법(일명 wafer foldering 방법) (b), (d)로 확산한 시편의 깊이방향 굴절율변화특성이다. 여기서 사용한 루타일 프리즘 각도는 45° 이고, 이상광선-굴절율(extraordinary index), n_{pe}는 2.8654, n_{po}는 2.5842 이며, 측정 광파장은 0.6328 μm HeNe 레이저이다. 수증기-분위기 유입정도는 일관성을 유지하기 위해서 버블러 온도를 95 °C로 일정하게 하고, 유입 산소량은 <10 bubbles/sec로 조절하였다. 그림 4(a),(c)와 같이 Ti 두께가 900 Å에서 1100 Å로 증가하면 표면에서 굴절율은 크게 증가하지만, 깊이방향 굴절율-경사도는 변화 없이 동일한 형태를 유지할 뿐이다. 그러나 그림 4(b), (d)에서 보는 바와 같이 동일조건에서 제작한 시편의 경우에도 깊이방향으로 굴절율-경사도가 완만해 짐을 알 수 있는데, 본 연구에서는 이러한 현상에 주목하였다. 즉 특수한 확산 분위기를 제공함으로써 기존방법으로 제작되는 것보다 더욱 양호한 광도파로를 만들 수 있다고 판단하였기 때문이다. 상대적으로 깊고 평탄한 굴절율분포를 갖는 광도파로는 적은 표면산란(surface scattering)을 일으켜 광섬유와 광도파로간의 mode mismatch를 줄여 주는데 기여할 수 있다. 만약 굴절율변화의 깊이방향-기울기가 그림 4(b),(d)와 같이 완만하게 변화한다면, graded index형 도파로를 좀더 step index로 근사시킬 수도 있다고 생각하였다. 결과적으로 본 연구에

서 채용한 확산방법이 광도파로의 깊이방향의 고굴절율화에 어느 정도 기여하는 점이 굴절율변화 분석으로 분명해졌고, 이러한 경향은 두께가 얇을수록 크게 기여하며 두께가 두꺼울수록 그 정도가 작아졌다.

표면(depth=0 μm)에서 굴절율변화는 그림 4에서와 같이 제안한 방법이 다소 작아지기도 하였고 뒤에서 설명하겠지만, 커지기도 하여 뚜렷한 경향을 나타내지 않았다. 아마도 이것은 광도파로가 확산분위기에 민감하게 변화하기 때문에 확산 중 확산분위기의 부정확한 제어에 기인한 것으로 사료된다. 이와 같이 제작된 광도파로를 두께변화에 따라서 고찰해보면, 평균적으로 깊이방향 약 5μm까지 평탄성을 유지하고 있으며, 이러한 경향은 기존 방법에서는 찾아볼 수 없는 현상이다. 그리고 평탄성 정도는 두께가 얇을수록 더욱 평탄한 특성을 갖는 것으로 분석되었다. 앞으로 확산시간과 확산온도를 변화시켜보면 더욱 흥미로운 사실이 나타날 것으로 보인다.

그림 5는 Ti 두께에 따른 Δn 변화량을 나타내었다. 여기서 결과는 z-cut 이외에 x-cut 기판으로 측정된 결과와 함께 나타내었다. Ti 두께가 증가하면서 평판도파로의 굴절율 변화는 z-cut 인 경우 n_e는 0.00172+7.46726×10⁻⁶τ 를 나타내었으며, x-cut인 경우 n_e/n_o는 0.00705+8.98856×10⁻⁶τ /6.60759×10⁻⁴+7.63544×10⁻⁶τ 를 나타내었다. 그리고 x-cut이 z-cut 보다도 훨씬 크게 나타났다.

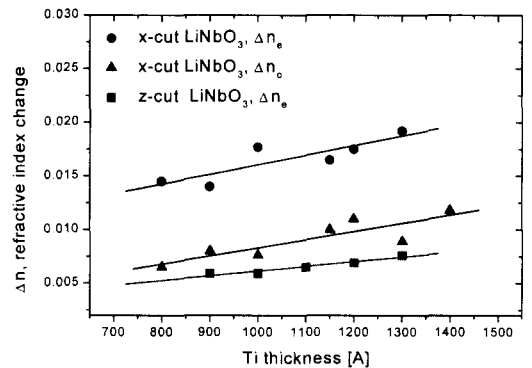


그림 5. Ti 두께에 따른 굴절율변화
Fig. 5. Refractive index changes as a function of Ti thickness, T=1050 °C, t=8hours.

LiNbO₃ 내부로 Ti 확산에 대한 보고가 과거에 많이 있어 왔지만, 확산정수(diffusion constant)는 일치하고 있지 않는 상태이다. 이러한 현상은 Li₂O의 외

확산(out diffusion), LiNb₃O₈ 형성, 도파로 표면의 기복(起伏, undulation) 발생등을 포함한 이러한 현상 들로부터 도파로 제작에는 수 많은 불안정성요인 (unstable factor)가 존재하기 때문이다. 따라서 본 연구에서는 모든 제작인자를 제어하려하기 보다는 고 굴절율광도파로(high refractive index change)를 만 드는 확산조건과 저삽입손실(low insertion loss) 광 도파로를 재현성(reproducibility)있게 제작하느냐에 초점을 맞추었다.

표 1에는 본 연구에서 제안한 방법과 기존 수증기-분위기 확산의 차이점을 더욱 명확히 밝히기 위해서 Ti 두께 1050 Å 과 1150 Å 을 대상으로 동일조건에서 확산을 수행하고 광특성을 분석하였다. 시편의 차이점으로 sample(A), (B)는 확산 중 유입 산소를 >>5 bubble/sec 로 하였고 sample(C), (D)는 <<5 b/s 로 하였을 때 시편이다. 표 2는 각각 제작한 평판 도파로에 광파장 0.6328μm HeNe 레이저를 입사시켜 광도파로 깊이방향 굴절율변화를 측정한 결과이다. 동일조건, 동시에 제작한 sample(A), (B)는 두 시편간 에 측정된 모드 수에 차이가 있었으며 Ti 확산깊이도 차이가 관찰되었다. 즉 확산시 유입되는 산소 및 수증기 량이 많으면, 확산표면이 거칠어지고(그림 6참조) 광도파로 유효굴절율 깊이도 작아졌으며, 경우에 따라서 모드생성 갯수도 차이를 나타내었다. 그러나 이러한 조건에서도 일명 wafer foldering 방법으로 제작 한 시편은 기존 wet oxygen 분위기로 제작한 것보다도 모드생성갯수 및 유효굴절율 깊이도 양호하게 나타 나, 비교적 개선된 방법임을 증명하였다. Sample(C), (D)는 버블링갯수를 <<5개로 하였을 경우로서 두 가 지 방법으로 시편모두 동일한 양상을 나타내어, 본 실험에서는 유입산소량을 최소화하는 조건이 최적에 근 사함을 짐작할 수 있었다.

표 1. 실험 조건
Table 1. Conditions of experimental.

Ti 두께	시편명칭	확산방법	확산조건
1050 Å	sample(A)	conventional	diffusion temperature : 1050°C ramp time : 2 hours diffusion time : 8 hours 95°C wet oxygen bubbling 자연냉각
	sample(B)	proposed (wafer foldering)	
1150 Å	sample(C)	conventional	
	sample(D)	proposed (wafer foldering)	

표 2. 시편의 굴절율변화
Table 2. Refractive Index Change of samples.

	Number of modes m	refractive index β	depth Å	Effective refractive index, n _{eff} and depth, Å	
Sample (A)	0	2.2948	0	index = 2.2902 depth = 55529	- Wavelength 632.8nm - Polarization TE - z-cut x-propagation, LiNbO ₃ planar waveguide - Substrate extraordinary index, n _{ex} = 2.2028 - Rutile prism extraordinary index, n _{ex} = 2.8654 code number = 4428.9
	1	2.2928	31807		
	2	2.2905	32669		
	2	2.2887	72396		
Sample (B)	0	2.2951	0	index = 2.2887 depth = 72755	
	1	2.2913	51613		
	2	2.2891	67915		
	3	2.2875	92759		
Sample (C)	0	2.2954	0	index = 2.2882 depth = 71899	
	1	2.2933	30502		
	2	2.2907	49406		
	2	2.2885	67633		
Sample (D)	0	2.2956	0	index = 2.2884 depth = 71933	
	1	2.2947	32340		
	2	2.2925	50465		
	2	2.2888	67762		
	3	2.2870	91934		

수증기-분위기가 도파로 특성에 미치는 영향을 조사하기 위한 방법 중에 하나로 확산 후 도파로 표면에서 발생하는 morphology와 삽입손실과 관계를 조사 하였다. Ti 스트립이 확산로에서 확산온도 700°C 부터 950°C 까지 변화할 때, LiNbO₃ 기판과 주변 산소-분위기 또는 어느한쪽과 반응하여 Ti oxidation 이 형성된 후, (Ti_{0.65}Nb_{0.35})O₂ phase 가 형성되면서 광도 파로가 만들어지는 것으로보고 되고 있다^[3]. 이 phase는 z-cut 기판위에 epitaxially 성장되며, phase 품질(quality)은 확산온도와 Ti 박막두께에 의존한다는 것이다. 확산이 진행되면서 이 phase 가 마치 Ti 확산의 실질적인 공급원(source)이 되며 확산 온도 및 시간 또는 어느한쪽이 증가함에 따라서 그 량이 소비된다.

일반적으로 깊이방향(depth direction)에서 diffusion length 는 수증기량(water vapor content)에 그다지 영향을 받지 않지만 측면방향(lateral direction) 확산길이(diffusion length)는 수증기량에 크게 의존하는데^[7,10], dry diffusion 또는 그 수증기량이 소량 일때 그 확산길이는 수증기량이 증가할 때 보다 더 길게 측정된다. 그리고 수증기량이 증가함에 따라서 발생하는 도파로 표면에 나타나는 기복현상은 수 증기량이 증대함에 따라서 더욱 심해진다는 점을 발표 된 바 있다. 확산 후 나타나는 기복현상은 그림 6, 7 에서와 같이 삼각형-형태-거칠음(surface roughness shaped in triangle form)으로서 수증기량 증 대가 표면거칠기로 이어지며, 이러한 거칠기는 도파로

표면에서 광 scattering을 일으켜 결과적으로 도파하는 광파의 전송손실 증대를 초래한다.

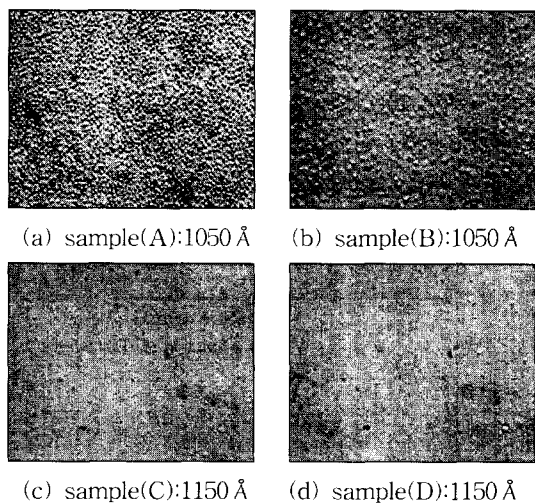


그림 6. 평판도파로 표면사진(×1000)

Fig. 6. Surface photomicrographs of Ti-diffused LiNbO₃ planar waveguides.

본 연구에 의하며 버블러 온도가 일정한 경우, 과량의 산소가 유입되면 도파로 표면은 그림 6의 (a), (b)와 같이 표면기복이 매우 심해지면서, 확산 후 측정되는 도파로 표면두께가 초기 Ti 증착두께의 2~3배에 이르는 것으로 측정되었다. 반면에 유입되는 산소의 양을 줄여가면서 확산후 도파로 표면은 유입되는 양이 적을수록 도파로 표면의 기복이 현저히 감소하였다. 그러나 산소를 사용하지 않고 공기중에서 확산을 수행한 경우 도파로 표면은 다시 기복이 생기는 것으로 나타났다. 버블러 온도를 변화시키는 경우는 버블러온도 90~100 °C로 제작한 시편의 표면형상이 깨끗하고 표면기복이 없어 온도설정을 고정하였으며 이 보다도 높거나 낮은 경우는 표면 기복이 증대하는 경향을 나타내었다. 문헌 [7,10]에서 표면기복이 적고 산소유입량이 적당히 최소(논문에서 구체적인 유입수치는 밝히지 않았으며 논 연구결과 1-2 b/s가 가장 양호한 특성을 나타냄)가 되는 지점에서 광도파로 삽입손실도 최소가 되었다. 결론적으로 전송손실과 수증기량의 관점에서 볼 때 수증기량이 증대하면 광도파로 삽입손실이 커진다. 반면에 표면형상과 수증기량 관점에서 볼 때 수증기량이 전혀 없을 때 보다도 수증기량이 유입되었을 때 표면형상이 좋으며, 수증기량이 어느시점보다도 더욱 증대하면 도파로 표면형상이 심한 기복이

발생한다. 따라서 유입되는 수증기량이 소량이면서 표면형상이 매우 깨끗한 제작조건을 찾는 것이 최적이라고 사료된다. 이런 관점에 볼 때 그림 6(c), (d)는 본 연구 목적에 부합하는 것으로 생각된다.

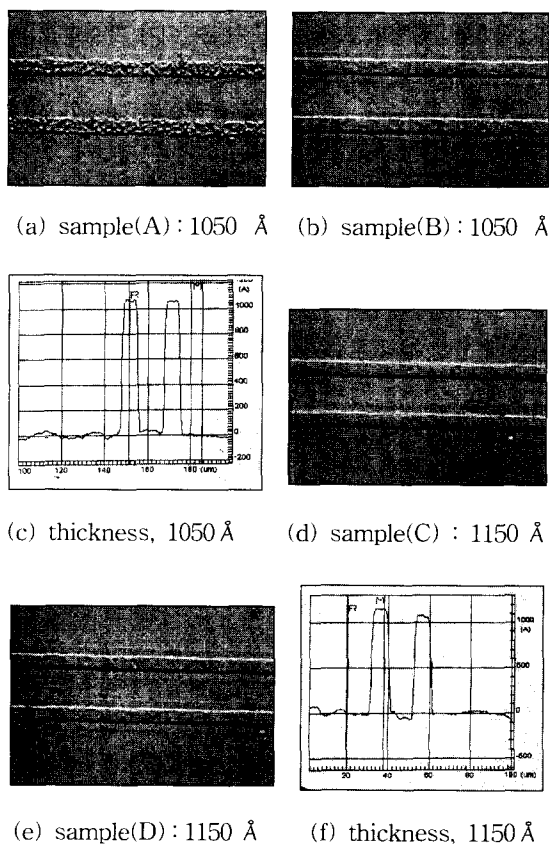


그림 7. 평판도파로 표면사진(×1000)

Fig 7. Surface photomicrographs of Ti-diffused LiNbO₃ planar waveguides.

그림 7은 Mach-Zehnder interferometric waveguide의 평행 arm 부분 표면형상이다. 제작조건은 그림 6의 평판도파로 제작조건과 동일하며, 그림 7(a), (b) 간에는 매우 큰 차이를 보였다. 그림 7(a)는 기존에 사용하는 수증기-분위기로 제작한 도파로이며 그림 7(b)는 본 연구에서 제시한 방법으로 제작한 시편이다. 동일조건, 동일두께이지만 제작방법에 따라서 표면형상에 미치는 영향이 매우 커짐을 알 수 있었고, 본 연구에서 제시한 방법이 어떤 악조건에서 만들어진다 하더라도 다른 방법으로 제작되는 것보다는 표면형상이 훨씬 개선되어 있음을 알 수 있었다. 그림 7(c), (d)는 잘 제어된 확산분위기로 제작한 시편의 표면형

상이다. 그림 7(c)는 기존방법이며 (d)는 본 연구에서 제안한 방법이다. 최적 확산조건에서는 모두 좋은 것으로 보이나 자세히 관찰해보면 기존 확산법으로 제작한 시편 측면확산깊이가 어느 정도 확장되었는지 정확하게 알 수 없는 반면에, 본 연구에서 제시한 방법으로 제작한 시편의 표면은 그 확산깊이가 뚜렷하고 확산 후 나타나는 도파로 두께 profile이 정사각형으로 분명하게 나타난다. 현 시점에서 이러한 차이가 광도파로를 지나는 광특성에 미치는 영향을 정확히 알 수 없지만, 측면확산 흔적이 분명하여 더욱 이상적인 광도파로 제작에 긍정적인 영향을 미치리라 추론되며, 뒤에서 전체삽입손실을 측정하여 근거자료를 보충하였다. 그리고 그림 6의 평판도파로를 사용하여 굴절율변화를 측정한 결과를 그림 8에 나타내었다.

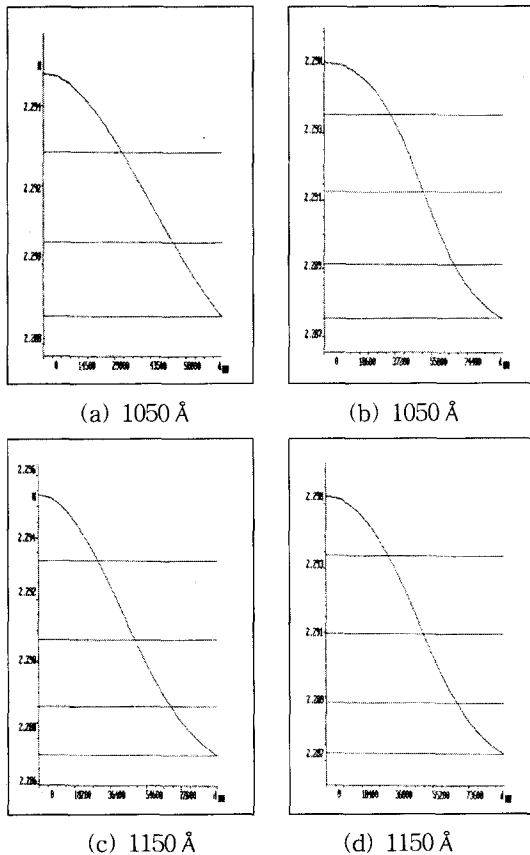


그림 8. 굴절율변화
Fig. 8. Refractive index change.

예상한 바와 같이 그림 8(a)보다는 그림 8(b)가, 그림 8(c)보다는 그림 8(d)가 깊이방향 굴절율변화 평탄도가 뛰어나며, Ti 두께가 작을수록 그 경향이 크게

나타났다. 이를 근거로 본 연구에서 제시한 광도파로 제작방법이 기존 제작방법보다도 우수하다고 결론을 내릴 수 있었다. 그림 9는 지금까지 제작된 광도파로의 유효굴절율을 확산깊이와 관계로 나타내었다. 이때 변수를 확산전 Ti 두께로 하였다. 유효굴절율은 Ti 두께가 두꺼워지면, 확산깊이가 깊어지고 유효굴절율은 작아졌다. 향후 이와같은 데이터는 광도파로 제작에 활용하여 더욱 고굴절율화된 광도파로에 응용할 수 있을 것으로 사료된다.

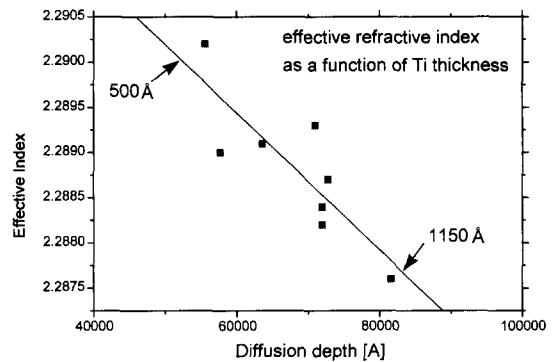


그림 9. Ti 두께함수로 나타낸 확산깊이와 유효굴절율 관계
Fig. 9. Relationships between effective refractive index and depth as a function of Ti thickness.

그림 10, 11, 12는 본 연구에서 비교한 두 가지 방법으로 제작한 광도파로에 파장 1550nm를 입사시켰을 때 편광모드 크기를 측정된 결과와 광도파로를 피그테 일링하고 광파장 1550 nm를 입사시켰을 때 전체 광섬유-도파로-광섬유 삽입손실을 측정된 결과이다. 본 연구에서 제안한 확산법과 기존 수증기-산소-분위기 확산법으로 제작한 광도파로의 모드크기 차이는 매우 큰 차이는 나타나지는 않았으나, 삽입손실측정에서는 본 연구에서 제시한 방법으로 제작한 시편이 대부분 저삽입손실을 보였다. 즉 z-cut 인 경우는 최대 0.5 dB/cm, x-cut 인 경우는 최대 2.5 dB/cm 정도 차이를 나타내었고 자세한 데이터는 그림 12에 설명하였다.

그림 10의 모드크기 측면에서 관찰해보면, 도파가 발생하는 낮은 두께 600 Å 전후에서 모드가 약하게 도파되는 경우가 있었고 이런 경우는 논의대상에서 제외하였다. 여기서 곡선들은 exponentially fitting 한 것으로서 그 경향을 보여주기 위함이나 실제적으로 두께 900 Å에서 1300 Å 까지 모드 변화는 크게 나타

나지 않았다. 여기서는 완벽한 광섬유-도파로간 정열 상태를 가정하였으므로 광섬유와 도파로모드 사이에 광섬유-도파로 커플링손실(coupling loss) 인자는 반사손실(reflection loss)와 부정합(mismatch)이다. 전자는 도파로 단면에 굴절률정합오일(index matching fluid)이나 무반사코팅(antireflection coating)등으로 어느정도 감소시키지만 완전히 제거하지는 못한다. 따라서 후자의 광섬유와 도파로 사이의 mode 불일치에 의한 손실이 중요한 인자로 작용하게 된다. 그림 10은 반사손실저감을 낮추기 위해서 굴절률 1.5 정도로 굴절률정합을 하였던 후 측정된 값으로서 mode mismatch가 포함된 값이다.

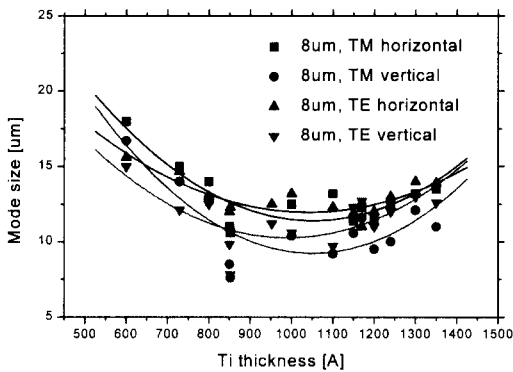


그림 10. z-cut 마크젠다 간섭기형 도파로의 모드크기
Fig. 10. Mode sizes of z-cut Mach-Zehnder interferometric waveguides.

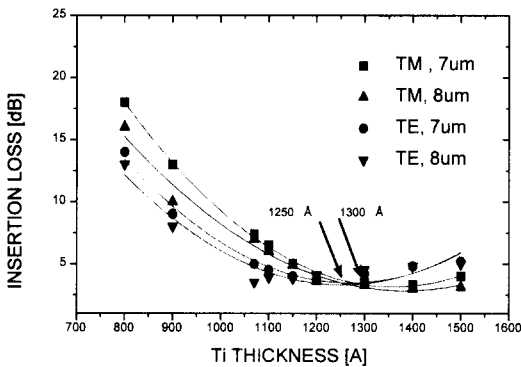


그림 11. z-cut Mach-Zehnder interferometer 도파로 전체삽입손실
Fig. 11. Total insertion loss of z-cut Mach-Zehnder interferometer waveguides.

그림 11에 PMF-SMF 삽입손실을 TM 및 TE 모드에 관하여 조사하여, 측정된 데이터를 바탕으로

fitting 곡선을 그려 놓았다. 도파로 선폭은 7 및 8 μm 이며, 두께 1250 \AA ~1300 \AA 을 전후하여 모드에 대한 삽입손실에 반전을 보이게 된다. Ti 두께 800 \AA 이하의 삽입손실이 -10dB 이상까지 보이는 등 소자로서 사용하기가 어려워 논의대상에서 제외하였다. 두께 950 \AA 에서 경우에 따라서 본 연구에서 제시한 방법으로 확산한 시편은 -3~-5 dB를 갖는 소자구현이 가능하지만, 여기서 측정된 데이터를 모두 나타내어 전체적인 경향을 읽고자 하였다. 두께 900~1000 \AA 전후에서 기존 wet oxygen 분위기로 제작한 시편은 대부분 -6~-8 dB를 나타내었다. 그리고 각각 삽입손실은 입출력 끝면에서 coupling loss와 propagation loss 및 잔류 fresnel loss(reflection)를 포함하고 있으며^[11,12,16], 가장 작은 삽입손실은 1200~1300 \AA 범위에서 달성되었다. 그리고 두께 1200~1300 \AA 범위 이하에서, TE 모드 삽입손실이 TM 모드 삽입손실보다도 작았고, 그 보다도 두꺼운 범위에서는 역전되는 현상이 발견되었다.

논의 결과, 두께 1100 \AA 까지는 깊이방향 확산보다는 측면방향확산이 유리하게 전개되어 TE 모드편광이 비교적 우수하게 도파되어 손실이 작고, 두께 1100 \AA 을 정점으로 두 모드를 양호하게 지원하면서 그 이상 두께에서는 깊이방향으로 편광되어 도파하는 TM 모드에 적합한 광도파로로 제작되기 때문으로 분석하였으며, 좀더 정량적인 데이터 수집이 요구되었다.

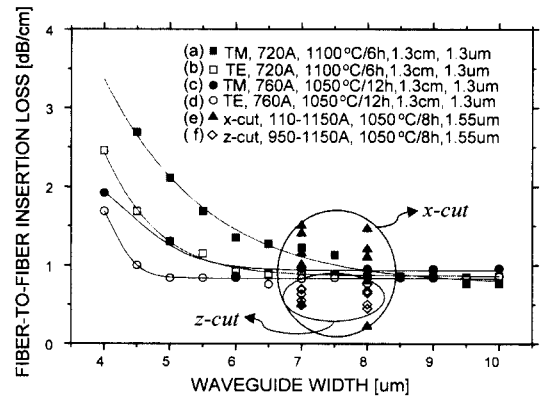


그림 12. Ti:LiNbO₃ 광도파로의 전체삽입손실 측정, 1100°C/6h(■□), 1050°C/12h(●○)^[8,14] 및 1050°C/8h(▲◇)

Fig. 12. Measured total insertion loss for Ti:LiNbO₃ waveguide fabricated by with several metal thickness diffused for 1100°C/6h(■□), 1100°C/12h(●○)^[8,14] and 8hours(▲◇) 1050°C.

그림 12는 z- 및 x-cut 광도파로에 대한 삽입손실을 비교하였다. Ti 두께가 720 Å 인 z-cut 도파로는 Ti 선폭이 7 μm에서 10 μm로 커질수록 TM 모드 삽입손실이 TE 모드 삽입손실보다도 작아지며 8 μm 이하에서는 역전되었다(그림 12(a)(b)참조). 그리고 금속 strip 5 μm 이하에서 삽입손실이 급격히 증가하는 것은 도파로가 cutoff에 도달하기 때문이라고 보고되었다^[11,14,15]. 여기서 굴절율정합오일은 $n \approx 1.5$ 를 사용하였고, 측정용 광파장은 1550nm였다. 그림 12(c),(d)는 1050 °C 에서 확산한 시편으로 저손실영역이 도파로폭 6 μm-10 μm 로서 1100 °C 보다도 약간 확장되었다^[14]. 본 연구에서 이러한 경향에 비추어 도파로가 어느 정도에 위치하는지 비교하기 위해서 데이터를 함께 나타내었다. 제작한 z-cut 도파로는 모두 0.5 dB/cm 손실을 중심으로 1 dB/cm 이하에 위치하였으나 x-cut 도파로는 0.3-1.5 dB/cm를 중심으로 변화하였다. 여기서는 완벽한 도파로 endface polishing 및 정열상태를 가정하였고, 100 % 내부확산(indiffusion)이 달성되었다고 가정하였다. 불충분한 확산은 매우 큰 surface scattering loss를 일으켜 특히 TM 모드에 대한 손실을 증가시키기 때문이다.

IV. 결 론

본 연구에서는 Ti 확산을 새롭게 제안하고 평판도파로 및 마크젠다 간섭기형 도파로를 두께를 달리하여 제작하였다. 평판도파로를 사용하여 굴절율분포를 측정하였으며, 표면사진형상 분석을 통하여, 본 연구에서 제시한 확산방법이 좀 더 우수한 광도파로특성을 나타냄을 보였다. 그리고 본 연구로 제작한 광도파로에 편광 보존광성류 및 단일모드광섬유를 피그테일링시켜 패키징하고, 광파장 $\lambda = 1.55 \mu\text{m}$ 를 입사시켜 Ti:LiNbO₃ 전체삽입손실을 측정한 결과, z-cut 광도파로가 모두 0.5 dB/cm를 중심으로 변화하였으며, 향후 LiNbO₃ 광변조기 및 광스위칭소자 제작에 응용가능할 것으로 사료된다.

참 고 문 헌

[1] Jane Zuckker and Rod Alferness, "Photonic switches set to prosper", Physics World, pp.57-60, 1991.
[2] 백운출, "초고속 광네트워크 연구센터의 소개",

광학과 기술, pp.1-8, 1998

- [3] M.N.Armennise, C.Canali and M.De Saio, "Characterization of (Ti_{0.65}Nb_{0.35})O₂ compound as a source for Ti diffusion during Ti:LiNbO₃ optical waveguides fabrication", J.Appl.Phys. Vol.54, No.1, pp.62-70, 1983.
[4] W. K. Burns, P.H.Klein, E. J. West, and L. E. Plew, "?", J.Appl.Phys. Vol.50, pp.6175-, 1979.
[5] J. L. Jackel, V.Ramaswamy, and S. P. Lyman, "Elimination of out-diffused surface guiding in titanium diffused LiNbO₃", Appl.Phys.Lett, Vol.38, pp.509-511, 1981.
[6] M. Fukuma and J.Noda, "Optical Properties of titanium diffused LiNbO₃ strip waveguides and their coupling-to-a-fiber characteristics", Applied Optics, Vol.19, No.4, pp.591-597, 1980.
[7] Kenji Kawano, Toshinori Noazwa, Mitsuaki Yanagibashi and Hiroshimichi Jumonji, "Broadband and low power LiNbO₃ external optical modulators", NTT REVIEW VIL.1, NO.4, PP.103-112, 1989.
[8] R. Keil and F. Araucher, "?", Opt. Commun. Vol.30, pp.23-, 1979.
[9] 김성구, 윤형도, 윤대원, 박계춘, 이진, "저손실 Ti:LiNbO₃ 광도파로 제작 및 BPM 해석", 전기전자재료학회지, Vol.11, No.5, pp.400-406, 1998.5
[10] T. Noguchi, K. Kawano, M. Yanagibashi and H.Jumonji, "Broadband and Low driving-power LiNbO₃ external optical modulators", NTT R&D Vol.38, No.6, pp.629-638, 1989.
[11] Rod C. Alferness, V. R. Ramaswamy, Steven K. Korotky, Manuel D,Divino and Lawrence L.Buhl, "Efficient single-mode fiber to titanium diffused lithium niobate waveguide coupling for $\lambda = 1.32 \mu\text{m}$ ", IEEE J.of Quantum Electronics, Vol.QE-18, No.10, pp.1807-1813, 1982.
[12] 김성구, 박계춘, 조재철, "Fiber-to-fiber total insertion loss가 <6dB인 Ti:LiNbO₃

- 광도파로 피그 테일링 및 손실분석”, 한국전기 전자재료학회, Vol.11, No.7, pp.557-564, 1998.7
- [13] Kwang T. Koai and Pao-Lo Liu, “Modeling of Ti:LiNbO₃ waveguide devices, part 1-directional couplers”, J. of Lightwave Technology, Vol.7, No.3, pp.533-539, 1989.
- [14] V. Ramaswamy, R. C. Alferness and M. Divino, “High efficiency single mode fiber to Ti:LiNbO₃ waveguide coupling”, Electronics Letters, Vol.18, No.1, pp.30-31, 1982.
- [15] R. C. Alferness, V. R. Ramaswamy, Steven. K. Korotky, Manuel D.Divino and Lawrence L.Buhl, “Efficient single-mode fiber to titanium diffused lithium niobate waveguide coupling $\lambda = 1.32\mu\text{m}$ ”, IEEE J. of Quantum Electronics, Vol.QE-18, No.10, pp.1807-1813, 1982.
- [16] Masahara, Fukuma, Juichi Noda, and Hiroshi Iwasaki, “Optical properties in titanium-diffused LiNbO₃ strip waveguides”, J.Appl.Phys. Vol.49, No.7, pp.3693-3698, 1978.

 저 자 소 개



金 成 求(正會員)

1966년 1월 10일생. 1996년 2월 전남대학교 전기공학과 박사학위취득 (대학원 특례보충력). 1994년 2월 -1999년 2월 전자부품종합기술연구소(KETI), 연구전문요원근무. 1999년 현재 전자부품연구원(KETI) 근무. 주관심분야는 Fiber Optics(LiNbO₃, 반도체, polymer, planar lightwave circuit, MEMS), Optical Communications