The Journal of the Korean Institute of Electrical and Electronic Material Engineers. Vol. 9, No. 6, pp.584-592,1996.

인가주파수에 따른 결합형 광변조기 특성변화

논 문
9-6-7

Characterization of Coupling Optical Modulator to the Applied Frequency

강 기 성*
(Ki-Sung Kang)

Abstract

Coupling optical modulator which on the $LiNbO_3$ substrate is fabricated by using proton exchange method and self-aligned method. Proton exchange of proton diffusion method was applied to pattern a waveguide on $LiNbO_3$ substrate. The annealing at 400 ℃ was carried out to control waveguide width and depth. The depths of the two annealed optical waveguides, which were measured by using α-step, were 1.435 KÅ and 1.380 KÅ. Using α-step facility, we examined that the width of waveguides is increased from 5 μm to 6.45 μm and 6.3 μm due to the annealing effects. The process of proton exchange was done at 150 ℃ for 120 min, 200 ℃ for 60 min and annealing process was done at 400 ℃ for 90 min, 400 ℃ for 60 min. The high speed coupling optical modulator has very good figures of merits; the measured high frequency power were achieved.

Key Words(중요용어) : Uniaxail ferroelectric crystal(강유전체), Proton exchange(양자교환), End fire coupling(직접결합), Crosstalk(누화)

1. 서 론

레이저가 개발된 이래로 신호의 전송및 처리에 전기나 전파 대신 레이저광을 이용하고자하는 연구가 시작되면서 집적광학에 사용되는 재료로 1970년대초에 접어들면서 여러종류의 결정체가 집적광학의 재료로 검토되었으며, 그 중 SiO_2, KH_2PO_4, $LiNbO_3$, $LiTaO_3$, GaAs 등이 집적광학 재료로 많이 이용되고 있다.[1] 그후 수 μm단위를 갖는 광 소자들이 현재까지 연구되어 지고 있다. 대표적으로 광 스위치, 모드변환기, RF스펙트럼분석기, 광 검파기들이 연구되었다.[2,3] 이들 기능소자들은 하나의 칩상에 집적화하고자 하는 집적광학 소자로 개발되어지고 있다.[1] 광 통신에 있어서 광원(laser diode), 광 섬유(전송매체), 광 검출기(photo detector)를 필수적인 요소로 꼽고 있다. 이러한 필수적인 요소와 시스템을 구축하기 위해서는 광을 제어하는 기능소자로 광 결합기, 광 분파기, 광 변조기, 렌즈, 프리즘 등이 요구되고 있다.[3] 이러한 수동 및 능동 소자들을 정밀하게 배열하여 단일칩상에 광 소자들을 박막형태로 집적화하여 효율적인 광 통신을 운영하는데 필수요소가 되어지고 있다. 광 스위치는 광 도파로의 형태에 따라서 단일 광 도파로 (optical single waveguide), 가지형도파로 (branching waveguide), 마하젠더간섭계형(Mach Zehnder interferometer), 방향성결합기(directional coupler), X 스위치 (intersecting waveguide)등 의 기본적인 몇가지 유형으로 분류된다.[6] 본 연구에서는 여러개의 입, 출력을 갖는 광 스위치를 만들기 위해서 필수적이라 할 수 있는 1X2 형태의 결합형 광 변조기를 제작하였다.[7,8] 결합형 광 변조기는 두개의 인접한 광 도파로 간에 광 파워를 주고받으면서 나아가는 결합현상을 이용한다. 결합형 광 변조기는 스위칭 하기위한 인가전압이 적고 Crosstalk이 다른 광 스위치에 비하여 작게 될 수 있다는 유리한 점을 갖고있다.본 연구에서는 양자교환 공정을 이용하여 광 도파로를 제작하였으며 최종적으로 결합형 광 변조기를 제작하여 양자교환 및 열처리에 따른 광 도파로의

* : 상지전문대 전자과
접수일자 : 1996년 2월 15일
심사완료 : 1996년 5월 29일

깊이를 측정하였다. 또한 고주파에서의 출력특성을 확인 하기위하여 인가주파수에 따른 결합형 광 변조기의 성능효과 및 특성을 분석하였다.

2. 실험 방법

2.1. 결합형 광 변조기의 제작과정

양자교환을 하기위하여 사용한 Al을 전극으로 이용하는 자기정렬전극방법을 선택하였다. $LiNbO_3$ 기판을 자른후 충분히 세척한 다음 양자교환 및 자기정렬전극으로 이용하기 위한 패턴을 설정하기 위하여 기판에 박막형태로 Al을 2500 Å정도 증착한후 패턴을 형성하였다. 도파로가 형성될 부분에 굴절율을 증가시키기 위한 방법으로 150 ℃에서 약 60~120분 양자교환처리 하였다. 양자교환된 도파로의 양자원을 좌,우 방향과 깊이방향으로 확산시키기 위하여 400 ℃에서 30~250분 양자확산 한 다음 자연냉각시킨후 광원이 입사될 도파로 단면의 직접결합(end fire coupling)을 위하여 0.3 μm의 Al_2O_3 Polishing pad 를 이용하여 폴리싱 처리하였다. 결합형 광 변조기의 제작과정을 그림 1과 같이 나타 내었다.

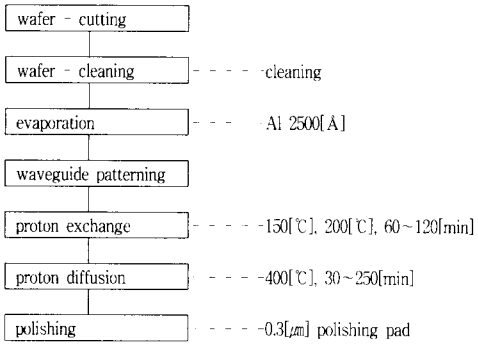


그림 1. 결합형 광 변조기의 제작과정

Fig. 1. Fabrication process of coupling optical modulator

2..2. 결합형 광 변조기 제작을 위한 양자교환 및 양자확산 공정

내경이 10 mm인 파이렉스 튜브를 토오치로 가공하여 앰플을 제작한후 $LiNbO_3$시편과 벤젠산(C_6H_5COOH)을 넣어서 아래 사진 1.과 같이 가공한다. 앰플을 150 ℃ 전기로속에 넣어서 수십분 정도 기다리면 아랫쪽의 벤젠산이 녹아서 액체 상태가 된다. 이때 앰플을 뒤집어서 40~60분 정도 넣어두면 기판표면에서 양자교환[9]이 일어난다. 그 다음 앰플을 식힌후 $LiNbO_3$ 시편을 꺼내어 입,출력단의 단면을 사포(#1500)로 갈아낸후 약 0.3 μm 입자 굵기를 갖는 Al_2O_3 polishing pad에 갈아서 처리한다. 표면에 밀집 되어있는 양자 (H^+)들을 깊이 방향으로 확산하기 위하여 열처리 한후, 형성된 광 도파로의 굴절율 분포를 결정하게 된다.

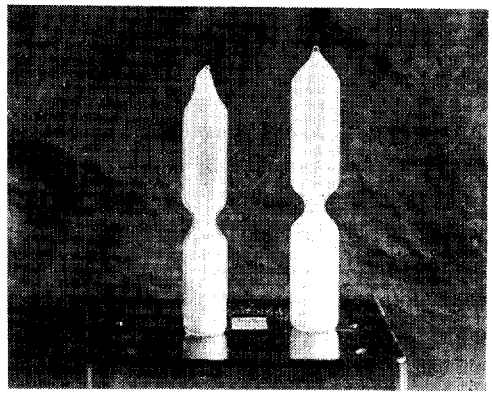


사진 1. 제작된 앰플

Photo. 1. Fabricated of Ampoule.

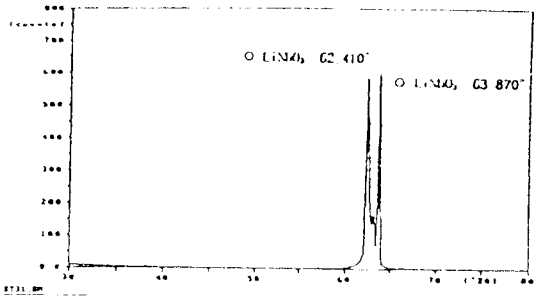
양자교환 및 양자확산을 하기 위하여 이용된 Al 패턴을 직접전극으로 이용하므로 전극을 형성하기 위한 aline 과정이 요구되지 않는다.[10,11] 기존의 전극형성의 단점은 도파로의 가장자리와 전극의 가장자리 부분이 정확히 aline 되지 않으므로 진계효율이 아주 적게 나타났다. 본 실험에서는 이러한 aline 과정이 요구되지 않으므로 전극으로 이용되는 Al이 광 도파로와 최대한 밀착되므로 전계의 효율을 높이는데 매우 적절한 방식이다.[12,13] 자기정렬방식으로 제작된 시편은 크기가 작기때문에 취급하기가 매우 어려우며 충격에 깨어지기 쉬우므로 에폭시 기판에 부가적인 전극패드를 재작하여 패드위에 시편을 고정하였으며, 시편과 에폭시 패드와의 본딩을 하기 위하여 ZEBEX (MODEL ZB-202 L)을 이용하였다.

3. 결과 및 고찰

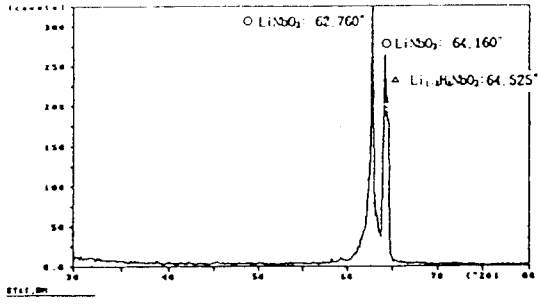
3.1. 광 도파로의 X-선 회절분석

$LiNbO_3$기판을 이용한 결합형 광 변조기를 제작하기 위하여 양자교환후 양자확산된 광 도파로 부분에 대한 X-선 회절분석 실험을 하여 그 결과를 그림 2에 나타냈다. X-선 회절기는 PW 3710 Based 을 이용 하였으며, Cu 타겟을 사용하여 회절각도의 범위는 30° 에서 80°에 걸쳐서 측정 하였

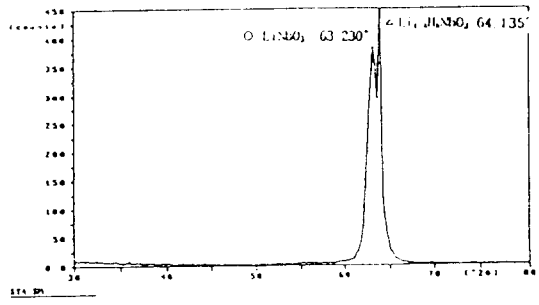
다. 그림 2(a)에서는 $LiNbO_3$ 기판에 대한 X-선 회절분석 결과로 $LiNbO_3$ 결정분포가 62.410°와 63.870° 근처에서 피크를 형성하므로서 $LiNbO_3$ 기판이 균일한 결정구조를 갖고 있음을 확인할 수 있다. 그림 2(b)에서는 $LiNbO_3$ 기판에 광 도파로를 형성한 후 오일베스에서 150 ℃ 로 120 분 양자교환된 기판을 X-선 회절분석한 결과로서 $LiNbO_3$ 결정분포가 62.760° 와 64.160° 정도에서 피크가 형성되어 양자교환전의 62.410° 와 63.870° 보다 0.35° 및 0.29° 편위된 결과를 볼 수 있으며, 또한, 양자교환을 하므로 $Li_{1-x}H_xNbO_3$ 의 결정구조를 갖는 피크가 64.525° 에서 나타나므로 Li^+ 이온을 H^+ 이온으로 치환된 것을 확인할 수 있다. 그림 2(c)의 경우 150 ℃ 120분 양자교환후 O_2 분위기에서 400 ℃로 60분간 열처리하여 양자확산된 $LiNbO_3$의 X-선 회절결과로서 양자교환시의 62.760° 와 64.160° 와 64.525° 부근으로 다시 되돌아 감을 확인할 수 있다. 여기서 Li^+ 와 H^+가 치환되는 양에 따라 피크의 강도가 바뀌는 것을 예상할 수 있다. 그림 2(d)는 200 ℃ 60분 양자교환된 기판으로 $LiNbO_3$ 결정분포가 61.650° 와 62.750° 정도에서 피크가 형성되어 양자교환전의 62.410° 와 63.870° 보다 - 0.76° 와 - 1.12° 편위된 결과를 볼 수 있다. 또한, 양자교환을 하므로 치환된 피크는 64.450° 에서 나타났다. 이러한 이유는 $LiNbO_3$ 기판을 양자교환에 적당한 시간과 온도에서 반응하여 양자교환이 이루어 졌음을 확인하여 주는 결과로서 양자교환 온도 및 시간에 따라 기판의 결정구조가 변하므로 굴절율에 의한 특성변화가 있는 것을 확인할 수 있다. 또한 양자교환 온도가 높을수록 낮은 각도에서 격자상수가 증가함에 따라 양자교환이 빨리 이루어짐을 알 수 있다. 그림 2(e)의 경우 200 ℃ 60분 양자교환후 400℃로 60분간 열처리한 결과로서, 62.370° 와 63.395° 부근으로 다시 되돌아 감을 알 수 있고 치환된 피크의 강도변화를 확인할 수 있다. 이러한 X-선 회절결과의 변화는 양자교환 후 적절한 온도에서 열처리함으로서 양자교환 된 부분이 다시 안정된 결정구조로 형성되어 짐을 보여 주는 것으로, 그림 2(f) 에서는 양자교환 전,후 및 양자확산 전, 후의 시편을 비교하여 결정분포를 나타냈다. 양자교환 150 ℃ 120분, 200 ℃ 60분 처리된 시편에 대한 결과를 비교하여 볼 수 있다. 그림 (b), (d)에서 양자교환 온도와 시간에 의해 치환된 양자의 편위각은 0.075° 의 편위된 각을 확인할 수 있다. 또한 (c), (e)의 경우 양자교환후 적절한 온도에서 열처리 하므로서 열처리를 하지않은 (b), (d)의 경우에 비해 결정성이 좋아지는 것을 볼 수 있다. 이와같은 결과는 H^+ 이온이 치환되어도 $LiNbO_3$의 결정피크 이외의 다른 피크가 생성되는 것이 아니며, $LiNbO_3$ 일정면의 피크가 성장하거나 또는 $LiNbO_3$의 결정피크들의 각도가 이동(shift) 되는 것으로 확인되어진다. 따라서, 광 도파로의 굴절율 조절은 양자교환 온도 와 시간 및 열처리에 의해 매우 큰 영향이 있음을 확인할 수 있다. 따라서 (b), (c)와 (d), (e)의 경우 같은조건에서 양자교환후 와 양자교환후 양자확산을 한 경우 결정구조가 더욱 안정된 구조를 갖는다는 것을 X-ray 회절 분석을 통하여 알 수 있다.



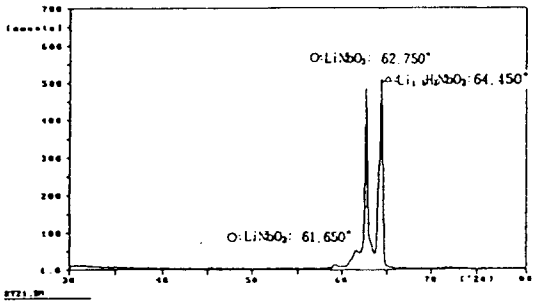
(a) before proton exchange.



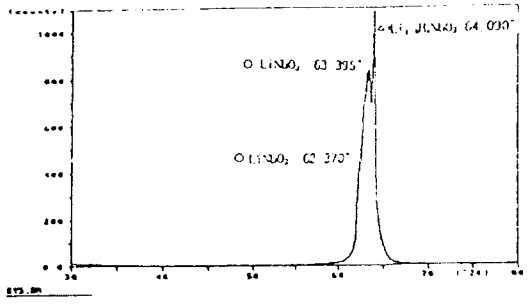
(b) after proton exchange (150[℃],120[min]).



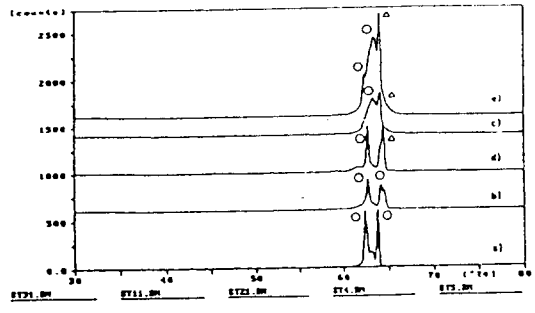
(c) after proton exchange:150[℃],120[min]
proton diffusion:400[℃],60[min].



(d) after proton exchange:200[℃],60[min].



(e) after proton exchange:200[℃],60[min]
proton diffusion:400[℃],60[min].



(f) before/after of proton exchange and diffusion.

그림 2. $LiNbO_3$ 광 도파로의 X-선 회절분석

Fig. 2. Analysis of X-ray diffraction $LiNbO_3$ optical waveguide.

3.2. 광 도파로의 α-스텝 측정

양자교환에 의한 양자확산법을 이용하여 $LiNbO_3$ 기판에 그림 3과 같이 광 도파로를 제작하였다. 광도파로 폭이 5 μm로 제작 되어진 도파로의 폭 과 깊이를 측정하기 위하여 α-스텝을 사용 하였다. 제작된 시편을 열처리함으로 광 도파로의 폭과 도파로 깊이 조절및 굴절율이 조정된다. 양자교환 200 ℃, 60분, 열처리 400 ℃, 60분 동안 열처리한 결과 그림 4(a)에서는 광도파로 결합영역 범위에서의 W1 과 W2 의 폭이 5 μm 설계조건에서 W1 = 6.45 μm, W2 = 6.3 μm 로 다소 차이를 갖는 광 도파로폭과, 그림 4(c)에서는 도파로의 깊이는 W1이 1.435 KÅ 로 측정되었으며, 그림 4(d)에서는 W2가 1.380 KÅ으로 약 0.055 KÅ의 깊이 차이를 보였다. 따라서, 도파로 사이의 갭은 5 μm에서 상대적으로 3.625 μm의 값으로 적어지는 추이를 나타내고 있다. 그리고, 그림 4(b)는 입력단의 도파로 1을 나타낸 것으로 도파로 W1의 깊이가 860 Å 으로 나타난 α-스텝 그림이다. 입력측에 대한 도파로 깊이 측정값으로 결합영역에서 깊이 측정과 다른점은 공정과정의 적정온도 조건에 따른 차이로 추정된다.

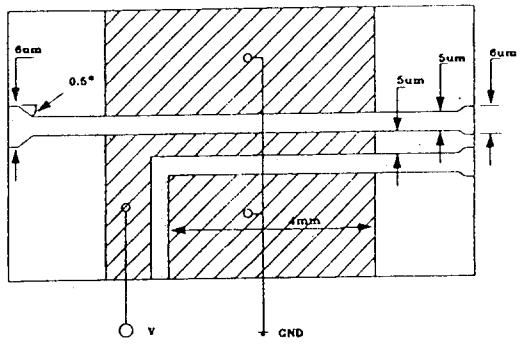
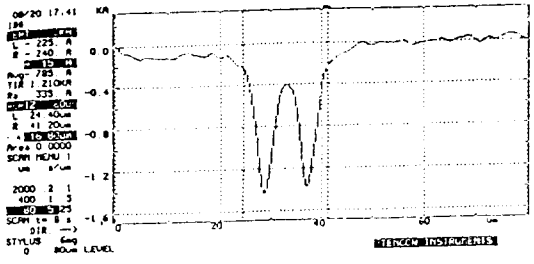
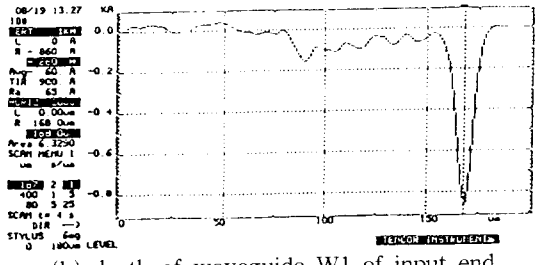


그림 3. 결합형 광 변조기의 구조

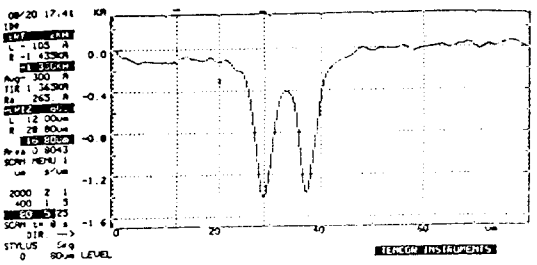
Fig. 3. The structure of coupling optical modulator



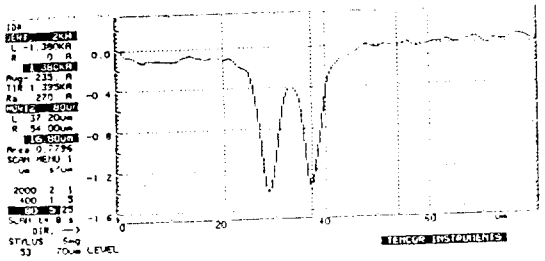
(a) waveguide width of coulping region



(b) depth of waveguide W1 of input end.



(c) depth of waveguide W1 of coupling region end.2

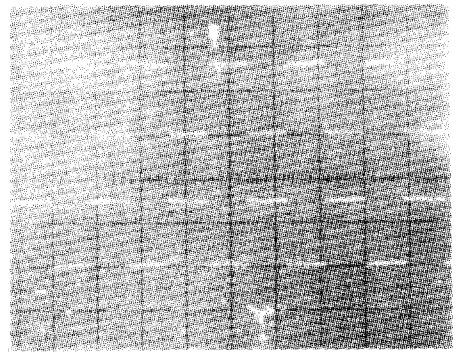


(d) depth of waveguide W2 of coupling region end.

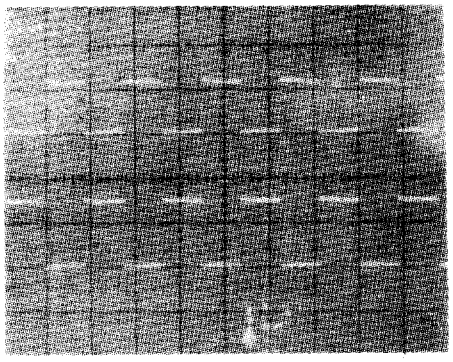
그림 4. α-스텝을 이용한 도파로의 폭과 깊이
Fig. 4. Width and depth of waveguide measured α-step.

3.3. 결합형 광 변조기의 주파수특성 측정

결합형 광 변조기의 고주파 출력신호의 주파수 특성을 확인하기 위하여 광 검출기가 넓은 대역폭을 갖는 것을 선택해야 한다. 본 실험에서는 레이저원으로 20 mw 레이저를 사용했으며, 2 GHz대의 광 검출기를 사용하였다. 측정시편은 양자교환 150 ℃, 120 분, 열처리 400 ℃, 90 분과 양자교환 200 ℃, 60 분, 열처리 400 ℃, 60 분 처리된 시편을 선택하여 최대의 고주파 출력 주파수 특성을 확인하였다. 본 실험에서 제작된 광 변조기의 출력특성 측정에는 오실로스코프 (Tektronix 400 MHz를 사용하였고,주파수 신호원으로 (8640 B Signal Generator Hewlett Packard 10 GHz를 사용 하였다. 측정결과 양자교환 150 ℃, 120 분, 열처리 400 ℃, 90 분 일때 인가주파수 100 KHz, 500 KHz, 1 MHz, 100 MHz, 400 MHz,에서 오실로스코프 출력조건을 time/div 500 μs, 입력전압 5 V/div에서 측정한 결과 사진 2와 같이 고주파 에서 스위칭 현상을 확인하였다. 사진 3 은 양자교환 200 ℃, 60분, 열처리 400 ℃, 60 분일때 인가주파수 100 KHz, 500 KHz, 1 MHz, 100 MHz, 400 MHz, 구형파에 대한 입력도파로 (W1)의 광 출력 신호를 나타냈다. 사진 4는 양자교환 200 ℃, 60 분, 열처리 400 ℃, 60 분 일때 의 조건으로 광 출력특성이 가장우수하게 나타난 것으로 time base 500 μs, 200 μs, 100 μs에서의 신호의 소멸에 의한 신호의 전송을 제한하는 신호로 광 도파로내에 남아있는 누화신호를 확대하여 나타냈다. 광 출력신호는 변화없이 검출되었으나, 신호원이 500 KHz 이상에서 광 출력 신호가 약간 왜곡되어 나타난 것은 인가전기신호의 왜곡과 광 검출기의 조건에 따른 오실로스코프의 전자장치에 의한 잡음과 광 도파로 제작시의 오차로 발생되는 것으로 분석되어 진다. 이러한 결과를 그림 5 및 6와 같이 주파수가 증가하므로 전기적 신호의 왜곡과 도파손실이 커지므로 출력전압도 점차적으로 떨어지는 것으로 확인할 수 있다. 고주파에서 광 출력신호의 왜곡을 보완하기 위해서는, 인가전압 신호원을 정량적으로 조절하고 전극의 와이어 본딩 에서 발생되는 접촉저항을 줄여야 한다. 또한 RF신호와 도파광과의 전파속도차이 조절 및 전극의 정전용량과 임피던스 합성을 위하여 전극제작시 전극의 두께와 넓이 조절이 중요하다. 그리고, 시편에 전계를 인가하기위한 금속선이 길 경우 선 저항에 따라 손실이 증가하게 된다. 따라서 RF신호가 전극의 손실에 기인하게 된다. 또한 도파광과 전파속도의 차를 줄이기 위하여 $LiNbO_3$기판아래 RF신호의 굴절율이 낮은 기판을 놓아야 한다. 그러므로 전극의 R, L, C 분포정수에 의해 고주파에서 전압감쇄요인으로 나타남을 확인할 수 있다. 그리고 광 도파로 제작상에서 발생되는 열처리에 의한 도파로폭 조절 및 광 도파로의 결합길이와 천이길이 조절이 매우 중요한 것으로 지적되고 있다.

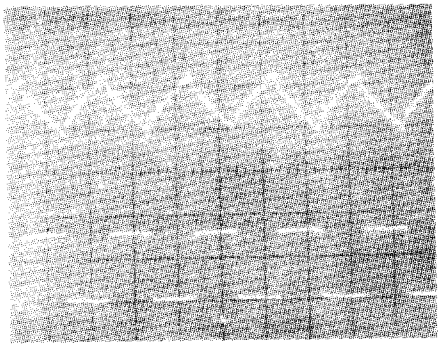


(a) 100[KHz]

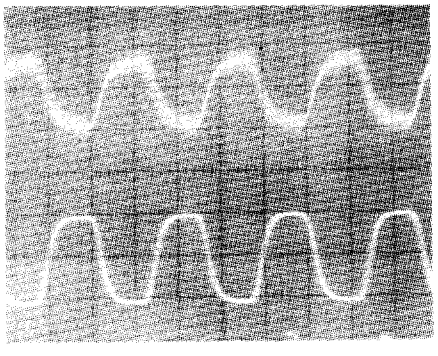


(b) 500 [KHz]

(c) 1[MHz]



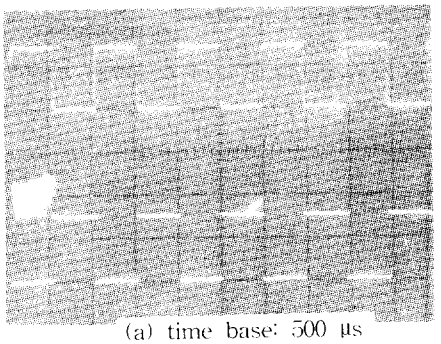
(d) 100 [MHz]



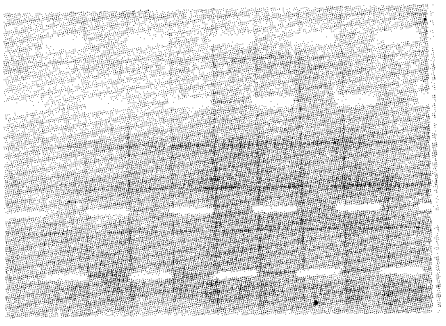
(e) 400 [MHz]

사진 2. 인가 주파수에 따른 입력도파로(W1)출력 특성 (양자교환:150℃, 120분, 열처리: 400℃, 90분

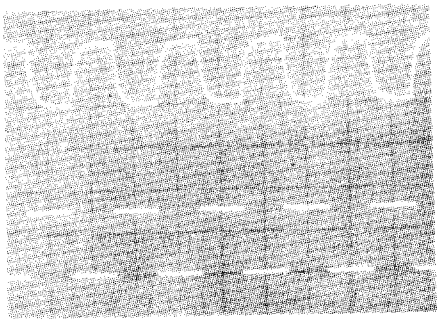
Photo. 2. Output characteristics of input waveguide (W1) to the applied frequency (PE:150℃,120min,AT:400℃,90min).



(a) time base: 500 μs



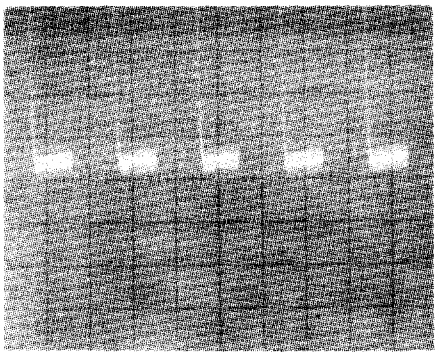
(b) time base: 200 μs



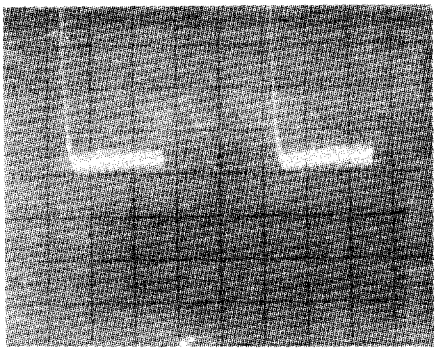
(c) time base: 100 μs

사진 3. 인가 주파수에 따른 입력도파로(W1) 출력특성 (양자교환:200℃, 60분,열처리: 400℃, 60분)

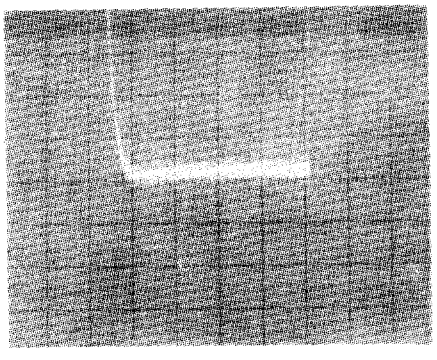
Photo. 3. Output characteristics of input waveguide (W1) to the applied frequency (PE:200℃, 60min, AT:40℃, 60min).



(a) time base : 500 μs



(b) time base : 200 μs



(c) time base: 100 μs

사진 4. Time base 500 μs, 200 μs ,100 μs 에서의 잔류신호 확대 사진

Photo. 4. Enlarged photographs of remained signal at 500 μs, 200 μs, 100 μs time base.

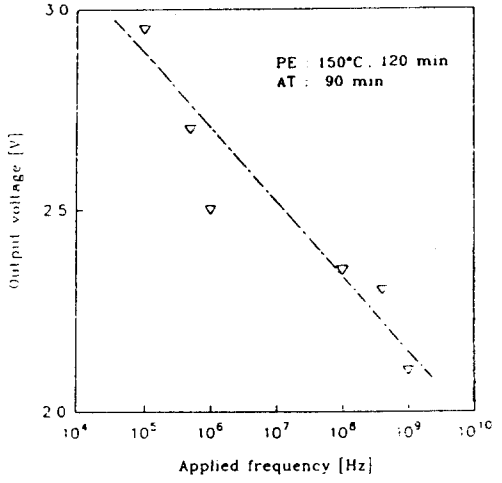


그림 5. 인가 주파수와 출력전압과의 관계 (양자교환 : 150 ℃, 120 분, 열처리 : 400 ℃, 90 분)

Fig. 5. Relation of output voltage v.s. applied frequency (PE : 150 ℃, 120 min, AT : 400 ℃, 90 min).

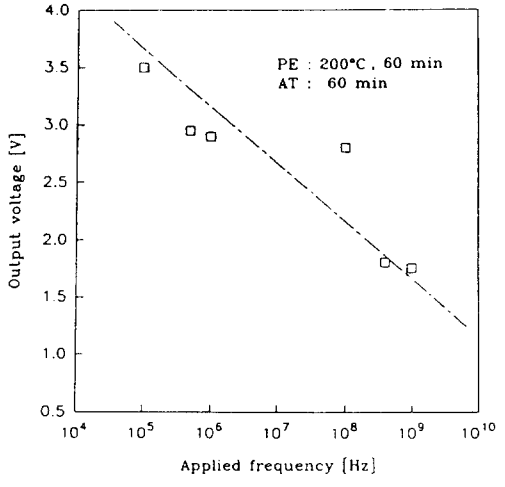


그림 6. 인가 주파수와 출력전압과의 관계 (양자교환 : 200 ℃, 60 분, 열처리 : 400 ℃, 60 분)

Fig. 6. Relation of output voltage v.s. applied frequency (PE : 200 ℃, 60 min, AT : 400 ℃, 90 min).

4. 결 론

$LiNbO_3$ 기판으로 양자교환공정을 이용한 양자확산방식을 적용하여 결합형 광 변조기를 제작하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 광 도파로의 X-선 회절분석결과 62.410 ° 와 63.870 ° 근처에서 결정분포가 형성되었으나, 양자교환조건 150 ℃, 120 분, 처리된 기판은 62.760 ° 와 64.160 °로 결정 분포 곡선이 형성되어 0.35 ° 및 0.29 ° 편위된 결과로 나타났다. 또한 양자교환을 하므로 $Li_{1-x}H_xNbO_3$ 결정구조를 갖는 다른 분포곡선이 64.5625 °에서 형성되므로 Li^+ 이온과 H^+ 이온이 치환되었음을 확인하였다.

- 제작된 시편을 양자교환후 400 ℃, 60 분 조건에서 열처리한 결과 양자교환시의 편위각 범위로 환원되므로 광 도파로내의 양자분포 관계가 안정되어가고 Li^+ 와 H^+ 가 치환되는 양에따라 도파로내의 밀도가 변화되어가는 것을 확인하였다.

- 양자교환조건 200 ℃, 60 분과 열처리조건 400 ℃, 60 분 으로 처리한 시편을 선택하여 광 도파로를 α-스텝으로 관찰한 결과, 실제로 제작된 도파로 1과 2의 폭이 5 μm로부터 각각 6.45 μm, 6.3 μm로 증가되었고,도파로 깊이는 각각 1.435 kÅ 및 1.380 kÅ으로 측정되어 0.055 kÅ의 차이가 발생됨을 확인하였다. 따라서 도파로 폭 및 깊이의 변화는 광 출력의 변화를 초래하여 출력모드의 변화요인으로 작용하였다.

- 양자교환 150 ℃, 120 분과 열처리 400 ℃, 90 분 과 200 ℃, 60 분과 열처리 400 ℃, 60 분 인 시편을 인가주파수에 따라 출력조건 time/div 500 μs, 입력전압 5 V /div 에서 측정한 결과 최대의 고주파에서 스위칭현상을 확인하였다.

결과적으로 최대의 차단주파수를 측정하므로서 본 실험에서 제작된 광 변조기는 우수한 측정장비를 사용할경우 GHz대의 고주파 측정이 가능할것으로 사료되므로 대역폭 확장에 따른 장거리 주파수분할 다중 통신망에 응용될 수 있을 것으로 기대된다.

참 고 문 헌

1. H.Yasaka,Y.Yoshikuni, Y.Nakanokoe,"Optical frequency stabilization and line width reduction of a multi electrode DFB laser with current feedback," Reprient with permission from election.lett.,vol. 23, No. 21.pp.1161-1162,1987.
2.. H.Yasaka,Y.Yoshikuni, M. Watanabe, "Measurement of Gain Saturation Coefficient of a DFB Laser Mode Control by Orthogonal Polarization Light," IEEE J.Quantum Electron.,vol.27,pp. 2248-2255, Oct.1991
3. J.E.A. Whiteaway,B.Garrett, G.H.B.Thompson, A.J.Collar,C.J.Armistead,and M.J. Frice,"The Static and Dynamic Charateristics of Single and Multiple Phase-Shifted DFB Laser Structures,"IEEE J.Quantum Electron.,vol.28, pp. 1277-1293, May.1992
4. L. Mccaugham, "Low-loss Polarization-independent electrooptical switches at λ=1.3 micron, "J.Lightwave Technol., Vol, LT-2, pp,51-52,1984
5. T.C Koch, J.E. Bowers,"Nature of wavelength clipping in directly modulation semiconductor laser," Electronics Lett.,Vol.20, No 25/26 pp. 1038-1039,1984.
6. J.A Fleck and M.D. Feit,"Beam propagation in uniaxial anisotropic media," J.Soc,Vol. 73,pp.920 926,1983.
7. R.C.Allferness, C.H.Joyner, L.Buhl, S.K. Korotky, "High-speed Traveling Wave directional coupler switch/modulator for λ =1.32 μm," IEEE J of Quantum electronics, Vol.19, pp.1339-1341, 1983.
8. 강기성, "양자교환에 의한 1X2 광 스위치 제작 및 특성 연구," 대한전자공학회 교육논문지 제 9권. 1호, PP.43-52, 1995.
9. 장용웅, 채기병, 강기성, 소대화,"X-스위칭 광 변조기의 설계 및 분석," 한국전기전자재료학회지 제 4권. 3호, PP.249-258, 1991.
10. 소대화, 강기성, 채기병, 장용웅,"BPM 알고리즘을 이용한 $LiNbO_3$ 광 스위치 전계 분포와 굴절율 변화의 연구." 한국전기전자 재료학회 춘계발표회 논문집 pp.38-42, 1991.
11. L Thylen,"Intergrated optics in $LiNbO_3$ Recent developments in devices for telecommunications," J.Lightwave Technol., vol.6, pp.847-861,1988.
12 . Ki Sung Kang, Dae Wha Soh, "A study on

the fabrication of $LiNbO_3$ high speed optical modulation using BPM computer simulation," Proceedings of the international conference computer technology and applications.shenyang, chnia. PP.489-497, 1994.

13. 강기성, 소대화,"방향성 결합형 광 변조기 제작 및 특성 연구," 한국전기전자재료학회지 제 8권, 4호, PP.443 450, 1995.

저자소개

강기성

1959년 11월 15일생. 1986년 2월 명지대학교 전자공학과 졸업. 1988년 2월 명지대학교 대학원 졸업(석사). 1994년 2월 동 대학원 졸업(공박). 현재 상지전문대학 전자과 조교수.