

양자확산 공정을 이용한 Y-cut LiNbO₃
마하젠더 간섭계형 변조기 제작

Fabrication of Y-cut LiNbO₃ Mach-Zehnder Interferometric
Modulator using Proton Diffusion Process

이상윤*, 이형재, 오민철, 신상영
한국과학기술원 전기 및 전자공학과

김부균
승실대학교 전자공학과

Abstract

A guided-wave electrooptic Mach-Zehnder interferometric modulator was fabricated on Y-cut acoustic grade LiNbO₃ process. In order to reduce the electrode capacitance, serial capacitance electrode(SCE) structure was adopted. Extinction ratio more than 30dB was obtained with V_π of 4.69 volt at λ = 0.6328μm. Frequency response was measured by using the swept frequency technique, and the bandwidth of the modulator was about 1GHz.

I. 서론

유전체 광도파로를 이용한 집적광학 기판재료중 LiNbO₃는 우수한 전기광학 효과(electrooptic effect), 압전효과(piezoelectric effect), 적은 도파손실 등을 가지고 있어 LiNbO₃를 이용한 제작공정(fabrication process)에 많은 연구가 이루어지고 있다. LiNbO₃의 전기광학 효과를 이용한 소자는 방향성 결합기, 간섭계형 변조기, 위상변조기 등이 있다. 이를 제작하는 공정은 크게 티타늄 내부확산(Ti indiffusion) 방식과 양자교환(proton exchange) 방식으로 대표될 수 있다. 티타늄 내부확산 방식은 70년대 중순 AT&T Bell Lab.에서 개발되어 현재 주로 이용되는 제작방식이다[1]. 도파로를 형성시킬 부분에 Ti를 증착하고 이를 1000°C 정도의 고온에서 내부확산 시킨 다음 전극을 형성시킬 부분에 금속을 증착한다. 티타늄 내부확산 방식은

도파로에서의 depolarization과 photorefractive effect, 그리고 고온공정에서 수반되는 Li₂O 외부확산 등이 문제점으로 드러나있다[2]. 양자교환 방식은 80년초 역시 AT&T Bell Lab.에서 개발되었다[3]. 양자교환 방식은 LiNbO₃ 기판을 양자원(proton source)안에 담그어 기판안의 Li⁺이온과 양자(H⁺)를 교환하므로써 이루어지는 공정이다. 양자교환 방식의 문제점은 굴절율의 불안정, 치환된 양자의 drift 현상, 양자교환시의 표면손상, 전기광학 효과의 감소 등이 발표된 바 있다[4]. 이러한 단점들을 보완해주기 위하여 양자교환 후 annealing을 해주는 APE(annealed proton exchange) 방법이 고안되었다[5]. APE 방법은 200°C 에서 양자교환이 이루어진 후 350°C 에서 장시간 annealing을 해준다. 이 방식으로 제작된 소자는 적은 도파손실 및 전기광학 효과의 보존, 굴절율의 안정화 등의 특징을 보여주고 있다. 그러나 APE 방식은 LiNbO₃ 기판중 스트레인에 가장 약한 Y-cut 기판은 사용할 수 없는 단점을 가지고 있다. Y-cut LiNbO₃ 기판은 길이방향으로 결절이 매우 단단한 성질을 가지고 있어 광도파로를 형성하는 화학공정이 급격히 일어나면 이로 인해 발생하는 스트레인에 기판이 견디지 못하고 표면이 깨지는 표면손상(surface damage)을 입는다. 그림 1에 표면손상을 입은 Y-cut LiNbO₃ 기판을 보인다. 이러한 표면손상은 Y-cut LiNbO₃ 기판을 주로 사용하는 음향광학 소자 응용에 많은 제약을 가하고있다.

한편 Y-cut LiNbO₃ 기판을 사용할 수 있는 제작공정이 발표되었다[6]. 양자확산법이라

불리는 이 공정은 APE 공정 보다도 낮은 온도인 150°C 에서 양자교환 후 SiO_2 cap을 씌워 400°C 산소 분위기에서 교환된 양자를 깊이방향으로 확산 시킨다. SiO_2 cap을 씌우는 이유는 양자교환을 매우 저온에서 하므로 교환된 양자의 양이 적어 이를 보존하기 위함이다. 이렇게 제작된 Y-cut LiNbO_3 광도파로는 초기 양자교환율이 낮아 기판의 표면손상이 없어 전기광학 효과 및 음향광학 효과의 감소를 줄일 수 있다. 양자확산 공정을 이용해 Y-cut LiNbO_3 기판을 사용한 광소자 제작은 여러가지 응용에 파급효과를 주는 매우 의미있는 일이다. 우선 이 제작공정으로 Y-cut LiNbO_3 기판을 사용한 광소자가 좋은 특성을 보이면 결정성질이 화학공정에 더욱 잘 견딘다고 알려진 X-cut 또는 Z-cut LiNbO_3 기판을 사용한 광소자 제작에 좋은 결과를 기대할 수 있으며, 또한 음향광학 소자 제작에 직접 응용될 수 있기 때문이다.

그러므로 본 논문에서는 Y-cut LiNbO_3 기판을 사용하여 양자확산 공정으로 마하젠더 간섭계형 변조기(Mach-Zehnder interferometric modulator)를 제작하고 이의 특성을 측정하였다.

II. 마하젠더 간섭계형 변조기 제작

마하젠더 간섭계형 변조기는 두 코히어런트 광신호의 위상변조를 통해 광신호간의 위상차이를 이용한 AM 변조기이다. 간섭계는 두 코히어런트 광신호를 만들기 위한 3dB power 분할기, 각각의 광신호가 위상차이를 갖도록 해주는 위상변조기, 위상차이를 갖는 광신호를 합해주는 3dB power coupler로 구성된다. 위상변조기는 LiNbO_3 X-cut 또는 Y-cut의 경우 r_{33} 전기광학 계수를 이용하기 위해서는 광도파로를 사이에 두고 전극이 양편에 위치한 형태가 된다. 전극의 형태는 진행파형 전극구조와 집중정수형 전극구조가 있는데 본 논문에서는 집중정수형 전극구조로 전극을 제작하였다.

본 논문에서 제작한 전극은 전극의 입력용량(input capacitance)을 줄이기 위해서 전극을 직렬연결 시킨 SCE(serial capacitance electrode) 전극구조로 기존의 전극구조 보다

입력용량이 1/4로 줄어든다. 하지만 전극의 직렬연결로 인해 구동전압은 2배가 된다. 그림 2에 현재까지 발표된 집중정수형 전극구조와 전극의 입력용량 증가회로를 보였다. 그림 2(a)는 전극의 끝단에 전기신호를 공급하는 전극구조로 ETE(end-tapped electrode)로 불리운다. 그림 2(b)는 1984년 R. A. Becker에 의해 고안된 구조로 V_{π} 가 4 volt일때 2.75 GHz의 대역폭을 얻었다. 이 구조는 CTE(center-tapped electrode)로 불리는 구조로 변조기 입력단에서 본 입력 sheet 저항 및 inductance를 1/4배로 줄여주는 구조이다[7]. 그림 2(c)는 본 논문에서 채택한 전극구조로 Tektronix사의 T. M. Reeder에 의해 고안되었다[8].

그림 3은 변조기 제작과정을 나타낸다. 기판은 Y-cut 음향등급(acoustic grade) LiNbO_3 를 사용하였으며 양자교환은 150°C 순수한 안식향산(benzoic acid)에서 2시간 행해졌고, 양자확산은 400°C 산소분위기에서 50분간 행해졌다. SiO_2 cap은 초기 교환된 양자의 양이 적어 이를 보존하기 위함이다. 제작된 변조기의 dimension은 다음과 같다. 우선, 변조기의 광도파로는 기본모드만을 도파시키기 위해 $4\mu\text{m}$ 로 제작 했으며 입출력 Y-branch의 분기각도는 도파손실을 막기 위해 1° 로 하였다. 전극은 변조기의 중심부분이 $26\mu\text{m}$, 양끝쪽이 $20\mu\text{m}$ 이며 직렬연결된 각 전극의 길이가 각각 $3000\mu\text{m}$ 로 총 전극의 길이는 $6000\mu\text{m}$ 이다. 전극의 도전율을 향상시키기 위해 Cr 전극위에 Au를 증착시켰다. 완성된 변조기는 도전성 접착제인 Silver epoxy로 bonding되었다.

III. 제작된 변조기의 특성측정

제작된 마하젠더 간섭계형 변조기는 파장이 $0.6328\mu\text{m}$ 인 He-Ne 레이저 광을 잘 연마된 변조기의 단면에 입력 결합시켜 측정하였다. 그림 4는 입력전기 신호로 100Hz 삼각파를 가했을 때 검출된 광신호를 보인다. 그림 4(a)는 V_{π} 가 4.69 volt 일때 변조기의 소멸비가 30dB 이상임을 보이고 있다. 이렇게 광신호의 소멸비가 큰 것은 간섭계의 입출력 Y-branch가 완전히 대칭이고 변조기의 입출력 광도파로를 완전한 단일 모드 도파로로 제작했기 때문이다.

그림 4(b)는 10.78 volt의 삼각파로 한주기 전기신호안에 2주기의 광신호를 포함시킨 것이다.

변조기의 주파수 대역폭은 swept frequency technique으로 측정하였다[9]. 보통, 변조기의 고속동작을 측정하기 위해서는 고속의 광검출기와 광대역의 증폭기가 필요하지만 이 방법으로 측정하면 고속이 아닌 광검출기를 사용해도 충분히 변조기의 고속동작을 측정할 수 있다. 그림 5는 변조기의 주파수 대역폭을 측정하기 위한 측정장치이다. 변조기에 인가되는 전기신호는 rf 신호원을 낮은 주파수의 사각파로 AM 변조시켜 인가한다. 이때 저속인 광검출기로 광세기를 검출할 경우 저주파 변조신호와 동일한 주파수를 갖는 광신호가 검출되며 이 저주파 검출신호의 진폭은 변조기의 주파수 특성을 나타내는 $M(\omega)$ 의 제곱에 비례한다. $M(\omega)$ 가 0.707로 감소하는 주파수를 3dB 주파수라 하면 저주파 검출 광신호의 진폭이 반으로 감소하는 주파수가 변조기의 대역폭이 된다. 본 실험에서는 rf 신호원으로 HP8350B sweep oscillator를 사용하여 1KHz 사각파로 AM 변조된 rf 신호를 얻었으며 변조기에 dc를 공급해 주기 위하여 변조기 앞단에 bias-T를 사용하였다. rf 신호는 -6dBm의 power로 30MHz에서 1.3GHz까지 100초 동안 sweep 시켰으며, 검출된 저주파 광신호는 진폭검출 회로를 통해 X-Y plotter의 Y축에 인가되고 sweep 신호는 X축에 인가했다. 그림 6은 측정된 마하젠더 간섭계형 변조기의 주파수 응답이다. 주파수 대역폭은 약 1GHz를 얻었다. 주파수 응답곡선이 울퉁불퉁한 이유는 변조기의 packaging이 완벽하지 못해서 생긴 것이며 600MHz에서 peaking이 있는 것은 변조기의 bonding wire의 inductance가 커 변조기의 감쇄비(damping ratio)가 작아서 생긴 것이다. 이를 개선하기 위해서는 변조기 packaging 시에 원하지 않는 기생용량 및 기생 inductance가 작도록 해야한다.

HP8510B network analyser를 이용해 변조기의 근사 입력용량 및 입력저항을 측정하였다. 측정은 비교적 저주파인 45MHz에서 S_{11} 을 측정해 입력 저항 및 리액턴스를 얻었다. 이 주파수에서는 변조기 전극의 capacitance가 우세하게 나타나므로 이

값을 근사적인 입력저항 및 입력용량을 구하는 양으로 사용할 수 있다. 45MHz에서 변조기의 입력 임피던스는 $7-j350\Omega$ 으로 계산된 입력용량은 약 10pF이 된다. 이렇게 입력용량이 큰 이유는 전극 자체의 용량에 기생용량이 더해졌기 때문이다.

IV 결론

Y-cut 음향등급(acoustic grade) LiNbO_3 기판을 양자확산 공정으로 마하젠더 간섭계형 변조기를 제작하였다. 변조기는 150°C 벤젠산에서 2시간의 양자교환과 400°C 산소 분위기에서 50분의 양자확산으로 제작되었다. 전극의 구조는 변조기의 고속동작을 위해 집중정수형 SCE(serial capacitance electrode)구조를 채택했으며 전극의 길이는 6mm로 제작하였다. 변조기는 $0.6328\mu\text{m}$ 파장을 갖는 He-Ne 레이저를 광신호원으로 사용하여 인가전압(V_{π}) 4.69 volt로 30dB를 초과하는 큰 소멸비를 얻었다. 변조기의 주파수 응답은 swept frequency technique을 이용하여 측정하였으며 1GHz 정도의 대역폭을 얻었다.

결론적으로, 양자확산 공정을 이용해 Y-cut 음향등급 LiNbO_3 기판으로 좋은 특성을 갖는 마하젠더 간섭계형 변조기를 제작하므로써 이 제작공정으로 표면손상이 없는 광변조기는 물론 Y-cut 기판을 주로 사용하는 음향광학 소자제작에 좋은 결과를 기대할 수 있음을 보였다.

Reference

- [1]. R. V. Schmidt, and Kaminow, "Metal-diffused optical waveguides in LiNbO_3 ," *Appl. Phys. Lett.*, Vol.25, pp.458-460, 1974.
- [2]. D. W. Vahey, C. M. Verber, and V. E. Wood, "Sources of scattering of guided light in Ti-indiffused LiNbO_3 optical waveguides," *Ferroelectrics*, Vol.27, pp.81-84, 1980.
- [3]. J. L. Jackel, and C. E. Rice, "Proton exchange for high-index waveguides in LiNbO_3 ," *Appl. Phys. Lett.*, Vol.41, pp.607-608, 1982.

[4]. R. A. Becker, "Comparison of guided-wave interferometric modulators fabricated on LiNbO₃ via Ti indiffusion and proton exchange," *Appl. Phys. Lett.*, Vol.43, pp.131-133, 1983.

[5]. P. G. Suchoski, T. K. Findakly, and F. J. Leonberger, "Stable low-loss proton-exchanged LiNbO₃ waveguide devices with no electro-optic degradation," *Opt. Lett.*, Vol.13, pp.1050-1052, 1988.

[6]. Yung-Sung Son, Hyung-Jae Lee, Sang-Yun Yi, and Sang-Yung Shin, "Proton-diffused channel waveguides on Y-cut LiNbO₃ using self-aligned SiO₂-cap diffusion method," *Integrated Optics and Optoelectronics II at SPIE's OE/FIBERS '90*, Sept. 1990, San Jose, California, USA.

[7]. R. A. Becker, "Multigigahertz lumped-element electrooptic modulators," *IEEE J. Quantum Electron.*, Vol.21, No.8, pp.1144-1146, 1984.

[8]. T. M. Reeder, "Electro-optic Phase Shifter Reduced Input Capacitance," *United States Patent*, patent No.4776657, Oct. 11, 1988.

[9]. Shingo Uehara, "Calibration of optical modulator frequency response with application to signal level control," *Appl. Opt.*, Vol.17, No.1, pp.68-71, 1978.

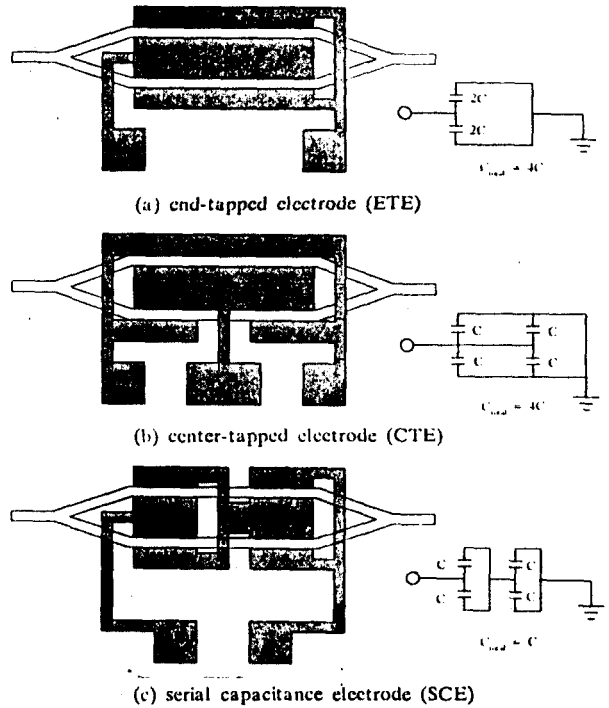


그림 2 집중정수형 전극구조

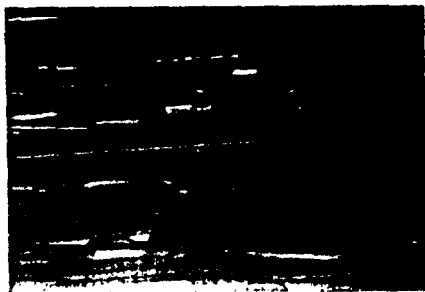


그림 1 표면손상을 입은 Y-cut LiNbO₃ 기판

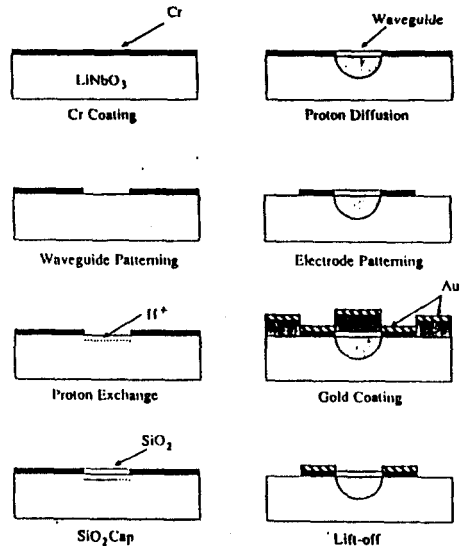
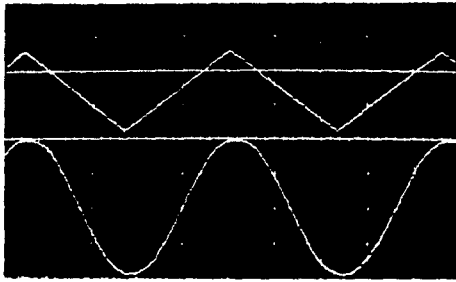
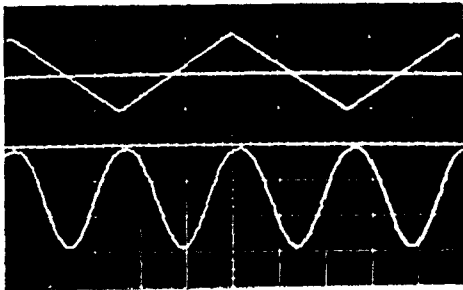


그림 3 변조기 제작과정



(a) 한주기 (30dB 이상의 소멸비)



(b) 2주기

그림 4 입력 삼각파에 대한 변조기의 광출력

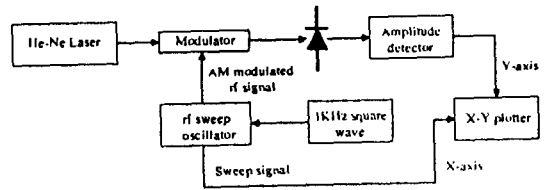


그림 5 swept frequency technique

(변조기의 주파수 응답 측정장치)

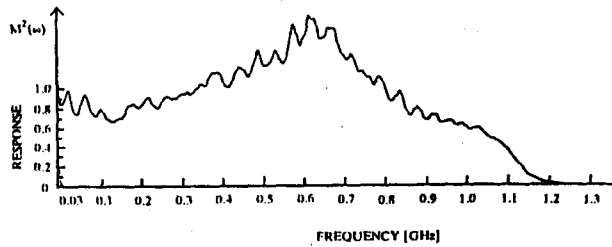


그림 6 변조기의 주파수 응답