

JV-14-4

양자확산 LiNbO₃ 광도파로를 이용한
Mach-Zehnder 간섭계 구조의 광변조기 제작

김 종 성^o, 손 영 성, 이 형 재, 신 상 영
한국과학기술원 전기 및 전자공학과

Fabrication of Mach-Zehnder Interferometric Modulator
Using Proton-Diffused Channel Waveguide

Jong-Sung Kim, Yung-Sung Son, Hyung-Jae Lee, and Sang-Yung Shin
Department of Electrical Engineering, KAIST

ABSTRACT

A guided-wave electro-optic Mach-Zehnder interferometric modulator was fabricated on X-cut LiNbO₃. The channel waveguides were formed by proton diffusion with self-aligned SiO₂-cladding. A Mach-Zehnder interferometric modulator with arm lengths of 7mm has been fabricated and tested at 0.6328 μ m. Its modulation depth with V _{π} of only 3.5V was 85% and the 3dB bandwidth was 1.6KHz. For high speed operation, the electrode dimension should be reduced to have smaller R, L, and C.

장래의 광대역 광통신 시스템은 고속에서 안정적으로 동작할 수 있는 광변조기를 필요로 한다. 광도파로를 사용한 광신호의 변조는 빠른 속도와 광파장의 보존등의 장점이 있다[1]. 실제 가장 많이 이용되는 광변조기의 형태는 Mach-Zehnder 간섭계 구조와 방향성 결합기(directional coupler)이다.

Mach-Zehnder 간섭계 구조는 3dB 결합기를 사용하여 나누어진 빔의 전기신호에 의한 상대적인 위상차에 따라서 스위칭이 되는 특성을 이용하는 구조인데 동작원리를 간략하게 설명하면 다음과 같다. Mach-Zehnder 간섭계 구조는 2 개의 Y-branch 광도파로를 이용하여 입력 Y-branch 광도파로는 광분할기로서 이용하고 출력 Y-branch 광도파로는 광결합기로서 이용하며 2 개의 Y-branch 사이를 위상변조를 시킬 수 있는 arm을 나란하게 연결한 구조이다. 2개의 arm 부분은 그들 사이에 결합이 일어나지 않도록 충분한 거리를 두고 분리되어야 한다. 출력 power와 입력 power의 비는 두 arm 사이의 위상 변조에 의한 모드 위상차에 의하여 변한다. 전극은 두 arm을 따라가며 놓이게 되는데 전극에 전압이 인가되면 LiNbO₃의 굴절율이 변하게 된다. 그 결과 두 arm을 전파하는 모드들의 위상이 변하게 된다. 각 arm 사이의 모드들이 출력 Y-branch 광도파로에서 만나 위상이 같다면 단일모드 출력 광도파로에는 단일모드만이 도파된다. 그러나 모드사이의 위상차가 180°라면 출력은 고차모드를 형성하여 출력 단일모드 채널 광도파로에는 도파모드가 되지 못하고 기판으로 복사(radiation)된다. 따라서 출력 power는 전압에

본 논문은 한국과학재단 1989년도 목적기초연구 과제
일부로 수행되었음

따른 LiNbO_3 의 굴절률 변화에 의한 각 arm에서의 위상 변조에 의하여 정현파적으로 변한다. 광출력을 인가한 전기신호의 변화에 따른 함수를 다음의 식으로 나타낼 수 있다.

$$I = I_0 \cos^2 \left(\frac{\pi V}{2V_\pi} + \frac{\phi}{2} \right)$$

여기에서 광출력을 최대값과 최소값으로 변화시키기 위하여 필요한 전압 V_π 는 $\frac{\pi}{kl}$ 이다.

그리고 l 은 전계가 가해지는 arm의 길이를 나타내고 k 는 전기광학 계수(electro-optic coefficient), 광파장, 유효 굴절률(effective index) 그리고 전극 구조에 의하여 결정되는 값이다. ϕ 는 간섭계 arm 길이의 차이에서 생기는 위상 shift 이다[2,3].

본 논문에서 제작한 Mach-Zehnder 간섭계의 실제 구조를 그림 1에 나타내었다. 광도파로의 제작방법은 150°C 에서 양자교환후 back illumination을 이용하여 자기정렬에 의하여 도파로의 윗면에 SiO_2 클래딩을 증착시킨 다음 400°C 에서 열적으로 양자확산시키는 방법을 이용하였다[4]. 150°C 의 낮은 온도에서 뱀겐산의 수소이온과 LiNbO_3 의 리튬이 교환되어 이상굴절률은 기판보다 증가하고 정상굴절률(ordinary index)은 기판보다 감소한다. 전기신호를 도파로에 가해주기 위한 전극은 도파로 제작과정에서 도파로 부분을 정의해주기 위해 사용했던 금속을 이용하여 push-pull 형태로 제작하였다. 전극으로 필요한 arm 부분의 금속만 남기고 나머지는 에칭에 의하여 제거한다 그리고 접지 전극을 서로 연결하고 hot electrode에 전압을 인가하기 위하여 $1 \times 1 \text{ mm}^2$ 의 전극 pad를 만들어 arm 사이의 금속에 연결한다. 이렇게 함으로써 도파로의 폭과 전극의 사이 간격이 같으므로

전극효율의 극대화를 가져올 수 있다[5]. 실험에서는 Y축 방향으로 전파되는 X-cut LiNbO_3 기판을 사용하였으며 레이저빔의 편파방향이 광축을 향하고 전계의 방향이 광축을 향하므로 전기광학 계수 r_{33} 에 의한 이상굴절률(extraordinary index)의 변화를 가져온다. 제작한 Mach-Zehnder 간섭계의 arm 길이는 7mm, Y-branch의 분기 각도는 1° , arm-to-arm 간격은 $30\mu\text{m}$, 모든 부분의 도파로의 폭은 $4\mu\text{m}$ 이다. 제작한 Mach-Zehnder 간섭계를 $0.6328\mu\text{m}$ 파장의 He-Ne 레이저로 입력 결합시켜서 출력에서 나타나는 모드를 focusing 렌즈로 모아서 실리콘 광검출기에 가하였다. 삼각파의 전기신호를 가함에 따라 나타나는 출력변화를 여러가지 입력신호에 따라서 변화하는 모양의 oscilloscope 사진을 그림 2에 나타내었다. 정현파의 광출력이 입력신호의 한주기내에 나타나는 파형을 얻기 위하여 입력신호의 offset과 amplitude를 변화시켜 보았다. 그림 2(a)에 1.6V의 offset과 3.5V의 전압으로 간섭계에서 arm부분의 위상변조의 범위가 0° 에서 180° 까지인 정현파의 출력곡선을 나타내었다. 곡선의 모양이 완전한 정현파가 나타남으로써 Mach-Zehnder 간섭계 구조의 광변조기로서 정확하게 동작함을 확인하였다. 삼각파의 크기를 점차 증가시켜서 전기신호에 따른 위상변화가 180° 이상이 되는 출력 특성을 그림 2(b,c,d,e)에 나타내었다. 전기신호 각각의 크기에 따라 전기신호의 한 주기에 따라서 광출력이 여러가지 주기가 나타나는 것을 나타내었다. 본 논문에서 제작한 광변조기의 주파수 특성을 판측하기 위하여 구형파의 전기신호에 의한 광출력을 그림 3에 나타내었다. 시정수 RC 값이 $100\mu\text{sec}$ 정도이고 이 결과로부터 3dB 대역폭은 1.6KHz이다. 간섭계의 arm

길이 차이에 의한 두 arm의 위상차이는 다음과 같다[6].

$$\phi_o = 2\pi n_{eff} \Delta L / \lambda$$

n_{eff} 는 아암의 유효 굴절율이고 $\lambda = 0.6328\mu\text{m}$ 이다. 그림 2(a)로부터 위상 바이어스 ϕ_o 의 값은 40° 이다. 위의 식으로부터 구한 ΔL 의 값은 31.9nm 이다. 변조도(modulation depth)는 아래의 식으로 정의된다.

$$[1 - (I_{min}/I_{max})] \times 100\%$$

여기서 I_{max} , I_{min} 는 광출력의 최대 및 최소값이다. 그림 2(a)의 광출력 특성곡선으로부터 I_{min} 과 I_{max} 값을 구할 수 있다. 이 값을 위의 공식에 대입하면 변조도는 85%이다. 전압에 의하여 arm에서의 위상변화의 양을 나타내는 V_π 의 값은 $24.5\text{V}\cdot\text{mm}$ 이다.

결론으로 본 논문에서 양자확산 방식을 이용하여 Mach-Zehnder 간섭계 구조의 광변조기를 제작하였다. 결과는 V_π 전압이 3.5V 였고 85%의 변조도를 얻었다. 3dB 대역폭은 1.6KHz 로 나타났는데 이것은 전극의 면적이 크고 bonding은 저항이 큰 도전성 접착제를 사용했기 때문이다. 앞으로 대역폭을 넓히기 위해서는 전극의 크기를 작게하고 고주파에 적합한 형태로 제작해야 한다. 본 논문에서 광변조기의 제작방법이 가지는 특징은 전극을 자기정렬에 의하여 형성할 수 있으므로 전극 align에 의한 특성의 편차를 줄일 수 있으므로 재현성있는 결과를 얻을 수 있는 쉬운 제작방법이 될 수 있다.

References

- [1]. L. Thylen, "Integrated optics in LiNbO₃ : Recent developments in device for telecommunications," *IEEE J. Lightwave Technol.*, Vol.6, pp.847-861, 1988.
- [2]. Richard A. Becker, "Broad-band guided-wave electro-optic modulators," *IEEE J. Quantum Electron.*, Vol. QE-20, No.7, pp.723-727, 1984.
- [3]. F. J. Leonberger, "High-speed operation of LiNbO₃ electro-optic interferometric waveguide modulators," *Opt. Lett.* Vol.5, No.7, pp.312-314, 1980.
- [4]. Yung-Sung Son, Jong-Sung Kim, and Sang-Yung Shin, "Fabrication of proton-diffused LiNbO₃ waveguides with self-aligned SiO₂-cladding," in *Tech. Dig. 7th Int. Conf. Integrated Optics and Optical Fiber Communication*, Kobe, Japan, July 18-21, 1989, paper 19D3-2.
- [5]. 김 종성, 손 영성, 이 형재, 신 상영, "양자확산된 LiNbO₃ 채널 광도파로를 이용한 차단형 광변조기의 제작," 89 대한 전기학회 추계 종합학술대회 논문집, pp.502-504, 1989.
- [6]. C. H. Bulmer, "Sensitive, highly linear lithium niobate interferometers for electromagnetic field sensing," *Appl. Phys. Lett.*, Vol.53, No.24, pp.2368-2370, 1988.

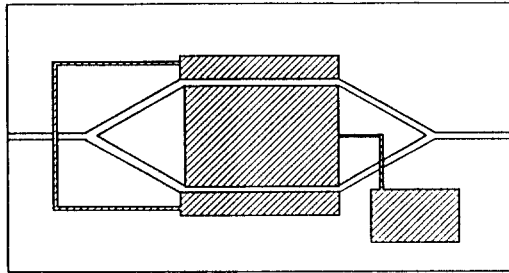
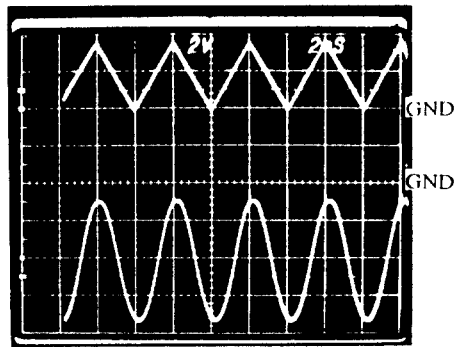
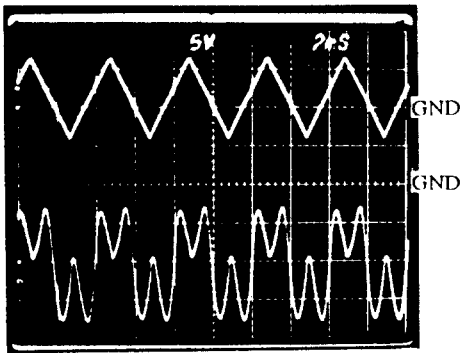


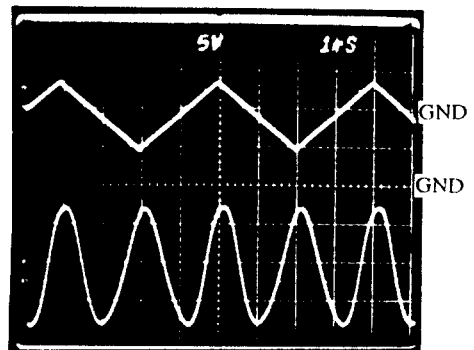
그림 1 제작한 Mach-Zehnder 간섭계의 구조



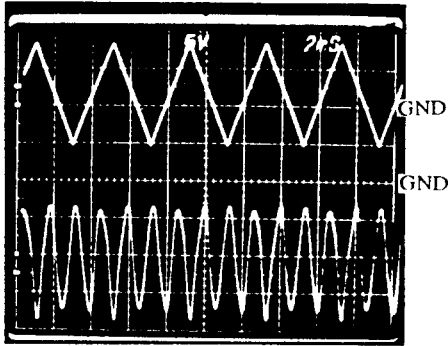
(a)



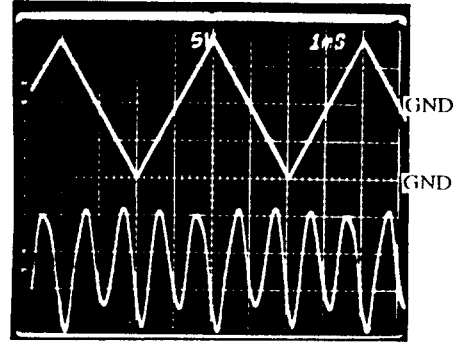
(b)



(c)



(d)



(c)

그림 2 Mach-Zehnder 간섭계 구조의 광변조기 출력특성

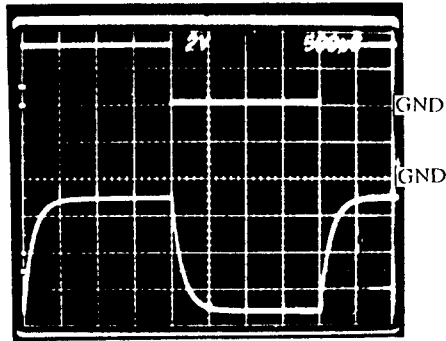


그림 3 Mach-Zehnder 간섭계 구조의 광변조기 주파수특성