논문 2011-48SD-12-3

전계측정용 전기광학 Ti:$LiNbO_3$ Mach-Zehnder 집적광학 간섭기에 관한 연구

(A Study on Electrooptic Ti:$LiNbO_3$ Mach-Zehnder integrated-optic interferometers for Electric-Field Measurement)

정 홍 식*

(Hong Sik Jung)

요 약

전계 측정시스템에서 센서 감지부로 1.3㎛ 파장에서 동작하는 대칭/비대칭 구조의 Mach-Zehnder 간섭기를 구현하였다. BPM 전산모사를 통해서 소자를 설계하였고, $LiNbO_3$에 Ti 확산방법으로 구현된 채널 광도파로에 집중전극구조를 배열하여 집적광학 칩을 제작하였다. 대칭 구조로 위상차가 없도록 제작된 소자는 전기신호 200㎐, 1㎑ 구형 파형에서 반 파장전압 V_π=6.6V, 변조 깊이 100%, 75%로 각각 측정되었다. 한편 π/2 위상차를 갖도록 설계된 비대칭 구조에서는 DC 0V에서 측정된 출력 광세기가 최고치에 약 1//2에 해당됨을 확인하였으며, 1㎑ 전기신호를 인가해서 π/2 위상차 때문에 나타나는 전기적 현상들을 확인하였다.

Abstract

Integrated-optic symmetric/asymmetric Mach-Zehnder interferometers at 1.3㎛ wavelength were studied as sensing part for electric-field measurement system. The devices were simulated based on the BPM software and fabricated utilizing Ti-diffused $LiNbO_3$ channel optical waveguides and lumped-type electrodes. A half-wave voltage of V_π=6.6V and modulation depth of 100% and 75% for a symmetric structure were measured for 200㎐ and 1㎑ electrical signal bandwidth, respectively. By the way, almost half-maximum power transmission was observed for asymmetric interferometers with π/2 intrinsic phase difference. Expected experimental measurements were observed for 1㎑ electrical signal bandwidth.

Keywords : 전계 광센서, Mach-Zehnder 간섭기, 전기광학효과, Ti:$LiNbO_3$ 광도파로, 광집적소자
electric-field optical sensor, Mach-Zehnder interferometer, electrooptic effect, Ti:LiNbO3 optical waveguide, integrated-optic device

Ⅰ. 서 론

기존의 전계 센서들은 그 구동에 필요한 전원 공급으로 인해 새로운 전자파를 발생시키게 된다. 또한 신호의 송·수신 역할이 전기적 연결로 되어 있어서 이로 인해 측정하고자 하는 전계 분포가 왜곡되어 정확한 측정이 어렵게 된다. 즉 센서 내부에 내장되어 있는 안테나에 의해 수신된 신호를 분석해서 전계를 감지하나, 안테나의 금속 성분 등이 필드 자체의 분포를 왜곡시키는 문제점 등이 있다. 이러한 문제들을 극복하기 위해서 금속이 아닌 전기광학효과(electro-optic effect)를 갖는 물질들을 이용하여 전계를 감지할 수 있는 집적광학 형태로 센서들이 연구되어져 왔다. 광파와 더불어 전기광학효과를 이용한 전계 감지는 전기적, 기계적인 다른 방법들에 비하여 넓은 대역폭 (broad bandwidth), 적은 침습성(invasiveness) 그리고 고 분해능(spatial

* 정회원, 홍익대학교 전자전기공학과
(Dept. of Electronic & Electrical Eng., Hongik University)
※ 이 논문은 2010년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단 지원을 받아 수행된 기초연구 사업임. (No. 2010-0021491)
접수일자: 2011년8월4일, 수정완료일: 2011년12월2일

resolution) 등의 장점들이 있어 활용하려는 많은 노력이 있어왔다. 전기광학효과와 더불어 광파를 이용하는 계측 기술은 소형, 고효율 반도체레이저, 저손실 단일모드 광섬유, 고속의 수광 소자, 광변조 소자 그리고 광도파로 소자 등이 실용화됨에 따라 과거에는 이론적으로만 생각하였던 측정방법, 시스템 구성이 점점 현실화되어가고 있는 추세이다.[1~3]

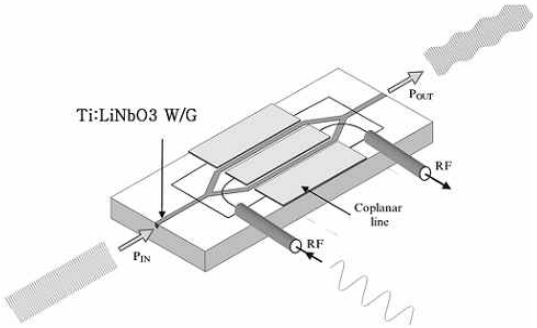
다양한 집적광학 소자들을 이용한 전계 계측용 센서들이 제안되고 있으나, 정밀한 계측에는 광도파로형 전기광학 광변조기를 센서의 감지부로 이용하는 것이 매우 효과적인 방법으로 평가되고 있다. 광도파로를 이용한 전계 센서는 광변조기가 측정하고자하는 전계를 교란시키지 않을 정도로 소형 제작이 가능하기 때문에 저주파 전계뿐만 아니라 고주파 전계 측정에도 유리한 조건들을 갖추고 있다. 따라서 본 논문에서는 전기광학효과와 Ti:$LiNbO_3$ (Ti diffused lithium- niobate) 채널광도파로 기반의 대칭/비대칭 Mach-Zehnder 간섭기를 전계 측정 센서 감지부로 활용하기 위한 타당성을 검증하기 위해 설계와 제작을 통해서 검토하였다.[4~6] 제 Ⅱ장에서는 대칭/비대칭 Mach-Zehnder 간섭기에 대해서 이론적으로 고찰하였으며, Ⅲ장, Ⅳ장에서는 제작공정과 전기광학 성능 측정을 수행하였으며, 결론으로 마무리하였다.

Ⅱ. 전계 감지부의 이론적 해석

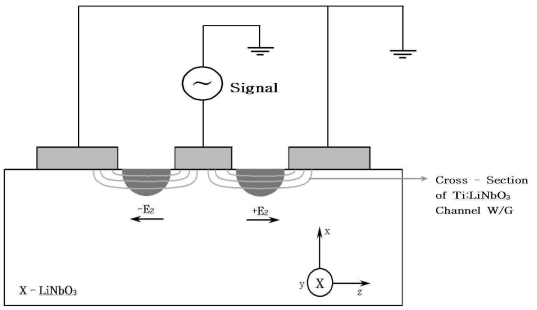
그림 1(a)는 전계 감지부를 나타낸 Ti:$LiNbO_3$ 채널광도파로 기반의 Mach-Zehnder 간섭기 구조이며, 입·출력단에 3dB 파워분배기 및 파워결합기 그리고 두 개의 채널광도파로 구성된다. 입력단에서 입사되는 광파가 똑같은 파워로 아래·위 채널 광도파로 분리되어 진행되는 동안에 두 광파 사이에 위상차 Φ_t가 발생할 경우, 입·출력 광 파워의 전달함수는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\frac{P_{out}}{P_{in}} = \frac{1}{2}(1+\cos\Phi_t) \tag{1}$$

식 (1)에서 위상차 Φ_t는 입사된 광파가 아래·위 두 광도파로에서 진행한 경로 차에 의해서 야기되는 고유 위상차 Φ_0와 전기광학효과에 의한 굴절률 차 $\Delta\Phi(E)$로 구분되어 $\Phi_t=\Phi_0+\Delta\Phi(E)=\Phi_0+KV$로 나타낼 수 있으며, K, V는 비례상수와 전계에 의해서 발생된 전압이다. 따라서



(a)



(b)

그림 1. (a) Ti:x-$LiNbO_3$ Mach-Zehnder 간섭기 구조
(b) 전극이 배열된 소자의 단면 및 전계분포
Fig. 1. (a) Configuration of Ti:x-$LiNbO_3$ Mach-Zehnder interferometer (b) Crosssection of device with electrode, and electric-field distribution.

경로 차에 의한 고유 위상차 Φ_0를 $\pi/2$로 조절할 경우, 식 (1)은 다음과 같이 나타낼 수 있게 된다.

$$\frac{P_{out}}{P_{in}} = \frac{1}{2}\left\{1+\cos\left(\Delta\Phi(E)+\frac{\pi}{2}\right)\right\} = \frac{1}{2}\{1-\sin(\Delta\Phi(E))\} = \frac{1}{2}\{1-\sin(KV)\} \tag{2}$$

그림 1(b)는 Mach-Zehnder 간섭형 구조에서 아래·위 두 채널 광도파로와 배열된 전극 간에 생성된 전계분포를 나타낸 단면이다. 전극에 인가된 외부 전압에 의해서 z-축 방향으로 편향된 전계 $\pm Ez$는 아래·위 광도파로 간에 이상파(extraordinary-wave) 유효 굴절률 차를 $2\Delta n_e$ 만큼 발생시켜서, 두 광도파로를 진행하는 TE 편광모드 간에 다음과 같은 위상 차 $\Delta\Phi(E)$가 궁극적으로 나타나게 된다.[7]

$$\Delta\Phi(E) = \frac{2\pi}{\lambda}\delta n_e^3 r_{33} E_x L_e \tag{3}$$

여기서 n_e는 $LiNbO_3$의 복굴절 중에서 이상 굴절률에 해당되며, λ는 입사광파의 파장, r_{33}는 $LiNbO_3$의 전기광

학계수(electrooptic coefficient), 그리고 L_e는 전극의 길이이다. δ는 중복상수(overlap integral)로서, 광도파로에서 광파와 전계간의 교차정도를 나타내는 지표이며 $0 \leq \delta \leq 1$ 값을 갖는다. 한편 그림 1(b)와 같은 push-pull 전극 배열에서는 아래·위 광도파로를 통과하는 전계 방향이 서로 반대가 되기 때문에 두 광파가 결합되는 출력단에서는 궁극적으로 두 배의 위상차가 나타나게 되며, 이러한 배경 때문에 식 (3)에 상수 2가 나타나게 된다. 간격이 g인 전극에 전압 V를 인가했을 경우 식(3)은 다음과 같이 나타낼 수 있으며, π 위상변화를 발생시키는데 필요한 반 파장(half-wave) 전압 V_π는 다음과 같이 정의될 수 있다.

$$\Delta\Phi(E) = \frac{2\pi}{\lambda}\delta n_e^3 r_{33}\frac{V}{g}L_e = \pi\frac{V}{V_\pi} \tag{4}$$

$$V_\pi = \frac{\lambda g}{2\delta n_e^3 \gamma_{33} L_e} \tag{5}$$

식 (2)를 식 (4)에 대입하고, 전극에 인가된 전압 V가 작을 경우 즉 위상변화가 작을 경우 출력 광 파워는 전압에 대해서 아래와 같이 선형(linear) 응답을 얻을 수 있다.

$$P_{out} = \frac{P_{in}}{2}\left\{1-\sin(\pi\frac{V}{V_\pi})\right\} \simeq \frac{1}{2}P_{in} - \frac{1}{2}P_{in}\pi\frac{V}{V_\pi} \quad (\text{for } small\ V) \tag{6}$$

전계는 전압에 비례하기 때문에 식 (6)의 표현에서 전압 V를 전계 E로 치환해서 아래와 같이 나타낼 수 있으며, 제안된 소자는 전계센서로 활용될 수 있음을 알 수 있다.

$$P_{out} = \frac{P_{in}}{2}\left\{1-\pi\frac{E_x}{E_\pi}\right\} \tag{7}$$

제안된 전계센서가 측정할 수 있는 최소 전계를 측정 시스템에서 발생되는 잡음(noise)를 고려해서 검토하고자 한다. 광원의 잡음이 무시될 정도로 작은 측정시스템인 경우 산탄잡음(shot noise)과 열잡음(thermal noise)이 광검파기에 존재하며, 이중에서도 일반적으로 산탄잡음이 열잡음보다 우세하게 나타난다. 광 검파기에서 신호전류와 산탄잡음에 의한 전류 성분은 아래와 같이 나타낼 수 있다.

$$< i_s >^2 = (mI_p)^2 \tag{8}$$

$$< i_n >^2 = 2e(I_p + I_d)M^2FB \tag{9}$$

여기서 m은 변조지수(modulation index), I_p, I_d는 광검파기에서의 신호전류와 암전류(dark current), M은 APD 광 검파기의 증배계수(multiplication factor), F는 과잉 잡음계수(excess noise figure), e는 전자의 전하량 그리고 B는 변조대역이다.[8] 한편 신호전류 I_p는 아래와 같이 표현되며, 식 (7)로부터 변조지수 m은 $\pi \cdot E_x / E_\pi$로 정의된다.

$$I_p = M\frac{\eta e}{h\nu}P_r \tag{10}$$

P_r은 광검파기의 입사 광 파워, η는 양자효율(quantum efficiency), h는 Planck 상수 그리고 ν는 광파의 주파수이다. 따라서 신호 대 잡음비 (SNR: Signal to Noise Ratio)는 아래와 같이 유도된다. 여기서 $I_p \gg I_d$ 때문에 암 전류는 SNR 표현에서 제외하였다.

$$SNR = \frac{< i_s >^2}{< i_n >^2} = \frac{m^2\eta P_r}{2h\nu MFB} \tag{11}$$

식 (5)의 $E_\pi = V_\pi / g$와 더불어 SNR=1인 조건으로부터 APD와 PIN 다이오드에서 감지할 수 있는 최소 전계 E_{xmin}는 각각 아래와 같이 유도되었다.[9]

$$E_{xmin} = \frac{\lambda\sqrt{\frac{h\nu MFB}{2\pi^2\eta P_r}}}{\delta n_e^3 \gamma_{33} L_e} \quad \text{for APD} \tag{12}$$

$$E_{xmin} = \frac{\lambda\sqrt{\frac{h\nu B}{2\pi^2\eta P_r}}}{\delta n_e^3 \gamma_{33} L_e} \quad \text{for PIN} \tag{13}$$

Ⅲ. 설계 및 전산모사

식 (1)의 $\Phi_t = \Phi_o + \Delta\Phi(E)$에서 고유 위상차 Φ_o는 그림 2에서와 같이 입사된 광파가 3dB 파워분배기 이후 경로차(path difference) ΔL에 의해서 얻어질 수 있으며, 아래와 같은 식으로 나타낼 수 있다.

$$\Phi_o = \kappa n_{eff} \triangle L \tag{14}$$

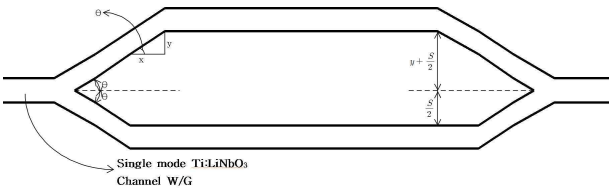


그림 2. 비대칭 Mach-Zehnder 간섭기 구조
Fig. 2. Configuration of asymmetric Mach-Zehnder interferometer.

여기서 $\kappa=2\pi/\lambda$ 그리고 n_{eff}는 광도파로의 유효굴절률이다. $\Phi_0=\pi/2$ 일 경우에 $\Delta L=\lambda/(4\cdot neff)$ 이며, λ=1.3㎛ 파장의 이상 광파(TE 모드 해당됨)일 경우에 $\Delta L\simeq$1490Å로 계산된다. 그림 2에서 입·출력단이 대칭일 경우에 경로차 ΔL은 아래와 같이 유도된다.[4]

$$\Delta L = 2y\left(\frac{1}{\cos\theta}-1\right)/\tan\theta \tag{15}$$

여기서 Θ는 분기각도(branching angle)의 절반에 해당된다.

식 (1)과 더불어 실험적인 측정을 통해서 경로 차에 따른 고유 위상 차, Φ_0와 반파장 전압, V_π 전압을 결정하는 방법을 서술하고자 한다. 먼저 Φ_0는 두 가지 방법에 의해서 측정이 가능하다. V=0일 때 출력 광 파워 $P_{out}(0)$와 V=V_{max} 전압을 인가해서 출력 광 파워 $P_{out}(max)$가 최대가 되도록 측정해서 그 결과들을 식 (1)에 대입할 경우, 아래와 같은 식으로부터 Φ_0를 측정할 수 있다.

$$\Phi_o = \cos^{-1}(2P_{out}(0)/P_{out}(\max)-1) \tag{16}$$

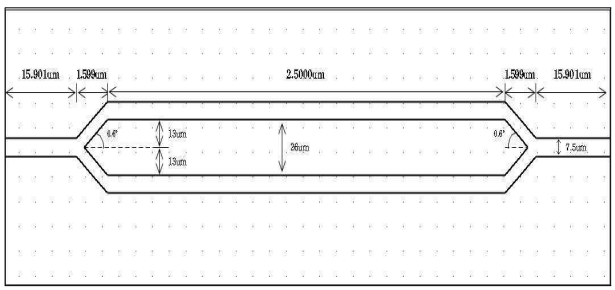
식 (1)로부터 위식을 유도하는 과정에서 $\Phi_0+KV_{max}=0$ 조건을 적용하였다. 또 다른 방법으로 Φ_0 측정은 다음과 같다. $\Phi_0+KV_{max}=0$ 조건에서 식 (1)의 출력 광 파워 P_{out}는 최대가 되며, $\Phi_0+KV_{min}=\pi$ 조건에서 출력 광 파워가 최소가 되기 때문에 측정된 V_{max}와 V_{min} 전압으로부터 아래와 같이 비례상수 K와 반 파장전압 V_π를 측정할 수 있다.

$$K=\frac{\pi}{V_\pi}=\frac{\pi}{(|V_{\max}|+|V_{\min}|)} \tag{17}$$

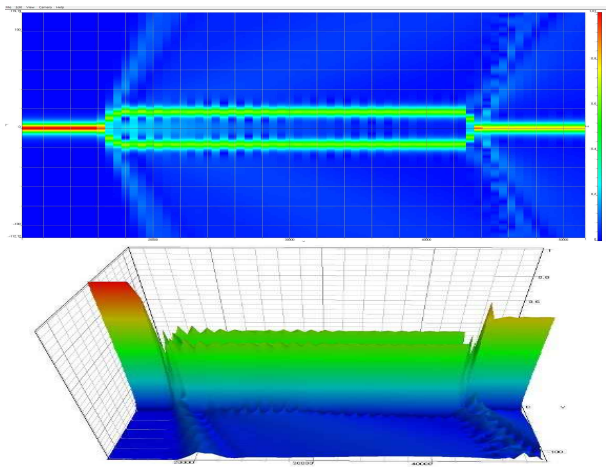
$\Phi_0=\pi/2$ 조건하에서 $V=V_c sinwt$ 변조전압을 인가했을 경우에 식 (2)의 P_{out}은 아래 (18)과 같이 나타낼 수 있으며, 출력 광 신호는 인가된 변조파의 세기(intensity)에 의해서 선형적으로 변하며, 기수(odd) 고조파 성분만 나타남을 알 수 있다. 선형 다이내믹(dynamic) 영역의 상한 값은 세 번째 고조파 성분에 의해서 제한된다.[4]

$$P_{out}\simeq\frac{1}{2}\left[1-KV_c\sin\omega t+\frac{(KV_c\sin\omega t)^3}{3!}-\frac{(KV_c\sin\omega t)^5}{5!}+\cdot\cdot\cdot\right] \tag{18}$$

그림 3, 4와 같이 설계된 대칭/비대칭 Mach-Zehnder 간섭기에 대해서 BPM(beam propagating method)를 이용하여 TE 모드의 전파 특성 검토하기 위해서 전산모사를 수행하였다.[10] 입출력 분기 각도는 1.2°, 채널 광도파로 폭을 7.5㎛ 그리고 비대칭 구조에서는 π/2 위상차를 갖도록 설계하였다. 그림 3(a)와 같은 대칭 구조에서는 아래·위 채널 광도파로로 50%씩 분기된 광파 간에 경로차가 없기 때문에 출력 분기에서 동 위상(in-phase)으로 결합되는 것을 그림 3(b)에서 확인할 수 있었으며, 분기와 결합되는 지점에서 광 파워의 일부가 기판모드 형태로 손실되는 것을 관찰할 수 있지만, 대체적으로 광도파

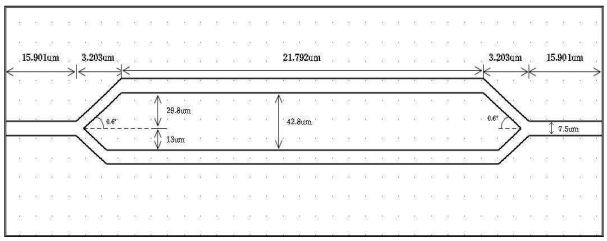


(a)

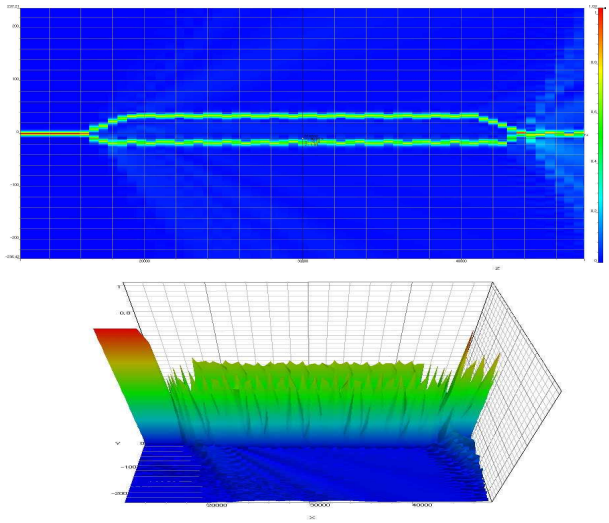


(b)

그림 3. (a) 대칭 Mach-Zehnder 간섭기 제원
(b) BPM 전산 모사 결과
Fig. 3. (a) Dimension of symmetric Mach-Zehnder interferometer (b) BPM simulation results.



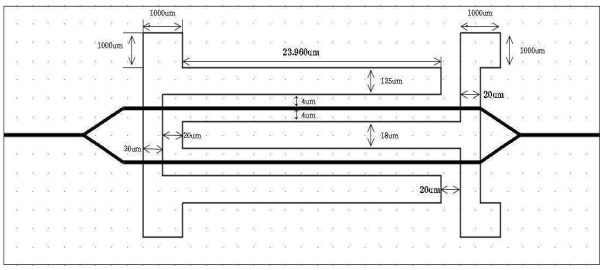
(a)



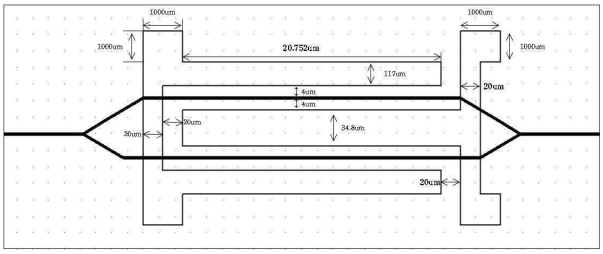
(b)

그림 4. (a) 비대칭 Mach-Zehnder 간섭기 제원
(b) BPM 전산 모사 결과

Fig. 4. (a) Dimension of symmetric Mach-Zehnder interferometer (b) BPM simulation results.



(a)



(b)

그림 5. (a) 대칭, (b) 비대칭 Mach-Zehnder 간섭기에 배열된 전극구조 및 제원

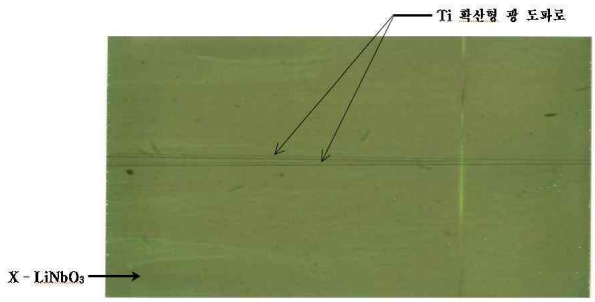
Fig. 5. Electrode configuration and dimension for (a) symmetric and (b) asymmetric Mach-Zehnder interferometer.

로를 따라 잘 진행되고 있음을 알 수 있다. 한편 그림 4(a)와 같은 비대칭 구조에서는 식 (15)에 해당되는 경로차 때문에 출력 분기에서 위상차로 인해서 광파의 파워가 50% 정도 상쇄되어 출력되는 것을 알 수 있다.

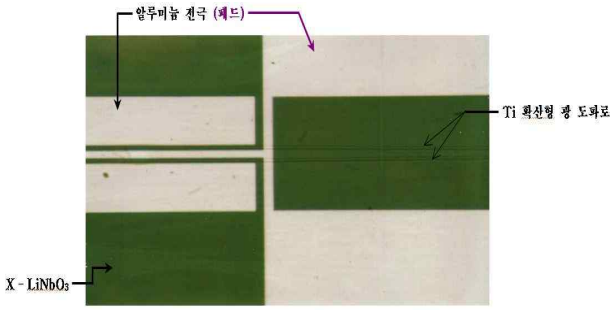
그림 3(a), 4(a) Ti:$LiNbO_3$ Mach-Zehnder 간섭기에 집중형(lumped-type) 전극구조를 그림 5와 같은 제원과 구조로 배열하였다. 아래·위 채널 광도파로에 push-pull 효과가 나타날 수 있도록 전극을 설계하였다.

Ⅳ. 제작공정 및 동작성능

50㎜×15㎜ 크기의 x-cut $LiNbO_3$ 시편 위에 e-beam 증착기를 이용하여 1050Å 두께의 Ti을 사진식각 공정(photolithography)과 습식 식각공정으로 7.5, 6.5㎛ 폭의 Ti 채널 패턴을 형성한 다음, 1050℃ 온도에서 8시간 동안 확산하여 1.3㎛ 파장 대역에서 동작하는 단일모드 Mach-Zehnder 간섭기의 채널 광도파로를 제작하였다. 고온 확산 과정에서 Li 원소의 외부확산(out-diffusion) 현상 때문에 나타나는 평면형 기생(parasite) 광도파로를 억제하기 위해서 습식 산소(wet-O_2) 분위기에서 확



(a)



(b)

그림 6. 제작된 표면 사진:
(a) Ti:LiNbO3 채널 광도파로 (b) 전극구조 사진

Fig. 6. Fabricated surface photograph:
(a) Ti:LiNbO3 channel optical waveguide,
(b) electrode structure.

산을 수행하였으며, 광도파로에 광파를 효율적으로 입사시키기 위해서 입사 단면을 optical-grade 수준으로 연마하였다. 그림 6(a)은 Ti 확산으로 제작된 Mach-Zehnder 간섭기 구조에서 분기(branch)되는 부분을 보여주고 있다. 제작된 광도파로 시편위에 알루미늄(Al) 전극을 배열할 경우 광파의 도파 조건에 부정적으로 영향을 미치게 된다. 특히 TM 편광모드는 전극에 흡수되어 매우 큰 손실이 일어나게 된다. 이러한 이유로 도파로 위에 SiO_2 박막 층을 형성하게 되는데, 본 실험에서는 SiO_2 박막 층을 e-Beam 증착 장비를 이용하여 3000Å두께로 증착하였다. 마지막으로 SiO_2 박막층 위에 전극을 형성하기 위해 알루미늄을 3500Å증착한 뒤 그림 5와 같은 전극 패턴을 형성하였다. 그림 6(b)는 Mach-Zehnder 간섭기의 분기 주위에 배열된 전극과 접촉 패드 일부분을 보여주고 있다.

1.3㎛ 파장의 가변파장 레이저다이오드 광원을 광섬유 편광모드 조절기와 분리기를 통해서 butt 결합방식으로 소자에 입사시키고, 출력단에서는 end-fire 결합방식으로 광검파기에 광 신호를 집속시킬 수 있도록 그림 7과 같은 측정시스템을 구성하였다.

그림 5(a) 구조에 해당되는 대칭형 Mach-Zehnder 간섭기의 성능평가 실험을 통해서 그림 8과 같은 결과를 얻었다. 주파수 200Hz, 13.2V 피크-피크 전압의 전기신호를 인가했을 때 $LiNbO_3$의 전기광학효과에 의해서 출력 광 신호의 세기(intensity)가 변조되었으며, V_π=6.6V, 변조 깊이(modulation depth)는 100%로 그림 8(a)과 같이 측정되었다. 이 경우에 중복상수 δ는 ~0.25 정도로 계산되었다. 1㎑, V_{p-p}=13.2V의 전기신호를 인가했을 경우 세기(intensity) 변조된 그림 8(b)의 광파 출력에 대해서 V_π, 변조 깊이 그리고 중복상수 각각이 6.6V, 75%, ~0.25로 측정되었다. 전기신호의 주파수가 증가함에 따라 변조

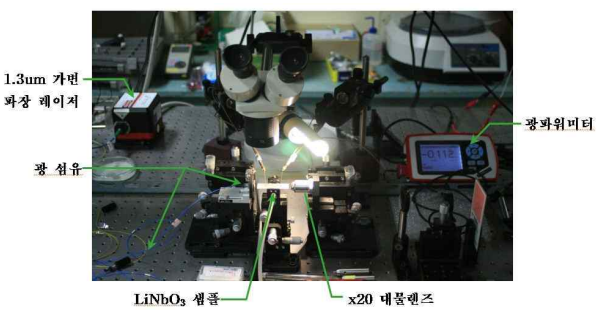
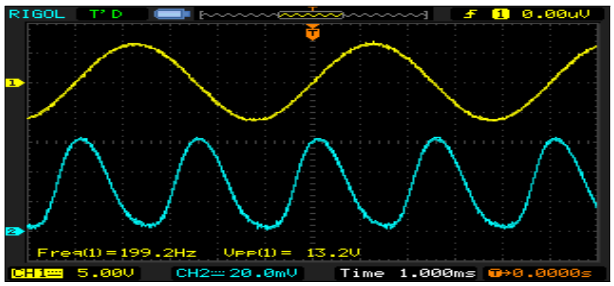
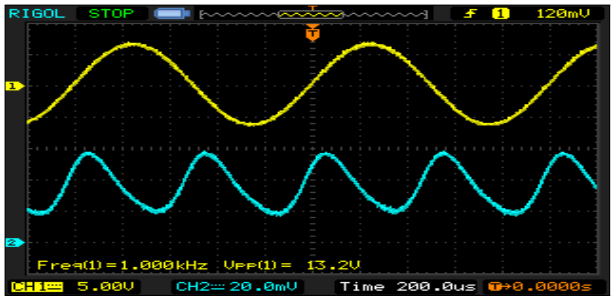


그림 7. Butt/end-fire 결합방식을 이용한 측정 장치
Fig. 7. Measurement setup utilizing Butt/end-fire coupling methods.



(a)

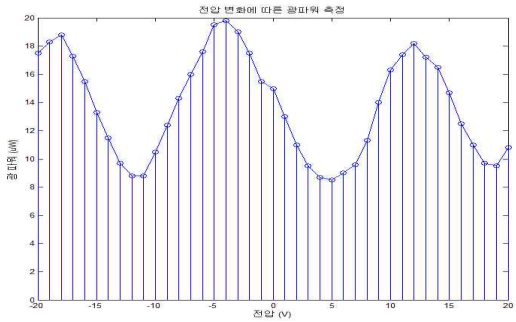


(b)

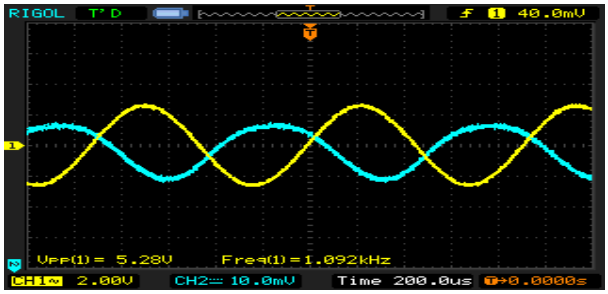
그림 8. (a) 200㎐, 13.2V_{p-p} 전기신호(위)에 대한 변조된 광 신호(아래), (b) 1㎑, 13.2V_{p-p} 전기신호(위)에 대한 변조된 광 신호(아래)
Fig. 8. (a) 200㎐, 13.2V_{p-p} electrical signal(above) vs modulated optical signal(below) (b) 1㎑, 3.2 V_{p-p} electrical signal(above) vs modulated optical signal(below).

깊이가 감소되는 이유에 대해서 정확한 원인이 규명되지는 않았지만, 집중전극 구조의 과도한 커패시턴스와 probe와 전극패드에 접촉 시 나타날 수 있는 임피던스 부정합(mismatching) 때문에 주파수 증가에 따라 변조 깊이가 줄어들지 않나 추정하고 있다.

그림 5(b) 구조에 해당되는 비대칭형 Mach-Zehnder 간섭기의 성능실험을 통해서 그림 9와 같은 결과를 얻었다. 식 (9)에 근거해서 π/2 고유 위상차를 갖도록 경로 차를 활용해서 전기신호가 인가되지 않은 상태일지라도 입사 광 파워의 50%가 출력되도록 설계하여, 전계 감지도(sensitivity)를 최대가 되도록 하였다. 따라서 먼저 DC 전압을 변화시키면서 출력 광 파워를 파워미터로 측정해서 그림 9(a)와 같은 결과를 얻었다. 아래·위 채널 광도파로를 지나온 광파들 간에 π/2 위상차를 갖도록 설계했기 때문에 DC 0V에서 측정된 출력 광세기가 최고치에 약 1//2에 해당됨을 알 수 있으며, 전산모사를 통한 경로 차 설계가 비교적 잘되었음을 간접적으로 알 수 있었다. 그림 9(b)와 같이 1㎑ 전기신호를 인가했을 경우 전기신호 0V 레벨에서 광신호의 파워는 최고치의 약 1/2에 해당되



(a)



(b)

그림 9. (a) DC 전압 인가에 따른 광 출력파워의 세기 (b) 1㎑ 전기신호 인가에 따른 광 신호 특성

Fig. 9. (a) DC voltage vs optical output intensity modulated optical signal(below) (b) 1㎑ electrical signal vs optical output characteristics.

며, 0V 레벨 앞뒤에 인접된 전기신호의 피크 위치에서 광신호 파워가 최고점과 최저점을 나타내고 있는데, 이것은 비대칭 구조에서 π/2 위상차로 인해서 나타나는 현상이다.

V. 결 론

전계 측정시스템에서 전계를 감지할 수 있는 광센서 감지부를 집적광학 Mach-Zehnder 간섭기 구조로 구현하였다. 소자를 구성하고 있는 두 채널 광도파로 간에 경로 길이 차로 위상차를 조절하여 전계 감지를 극대화 시킬 수 있도록 대칭/비대칭 구조로 설계하였으며, BPM 전산모사를 통해서 동작성능을 확인하였다. 매우 높은 전기광학효과를 보유하고 있는 $LiNbO_3$에 Ti 확산 방법으로 구현된 간섭기의 채널 광도파로에 집중 전극 구조를 배열하여 집적광학 전계 감지부를 제작하였다. 대칭 구조로 위상차가 없도록 제작된 간섭기는 전기신호 200Hz, 1㎑ 구형 파형에서 반 파장전압 V_π=6.6V, 변조 깊이 100%, 75%로 측정되었다. 한편 π/2 위상차를 갖도록 설계된 비대칭 구조에서는 DC 0V에서 측정된 출력 광세기가 최고치에 약 1//2에 해당됨을 확인하였으며, 1㎑ 전기신호를 인가해서 π/2 위상차 때문에 나타나는 전기적 현상들을 확인하였다. 따라서 Mach-Zehnder 구조의 간섭기를 전계 측정 시스템에서 감지부로 충분히 활용될 수 있음을 본 연구로 통해서 확인할 수 있었다. 한편 전기신호의 주파수가 증가함에 따라 변조 깊이가 감소하는 현상이 관찰되었는데 이는 전기신호를 인가하는 probe와 전극패드 간에 파워손실, 집중 전극구조에서 나타날 수 있는 비교적 큰 커패시턴스 값 그리고 전극과 신호원 간의 임피던스 부정합 등에서 원인들을 찾을 수 있으며, 향후 제작된 칩을 광섬유 pigtailing과 SMA 커넥터를 통해 향상될 수 있다고 생각된다. 집중 전극 대신에 진행파형 전극으로 칩을 제작할 경우 수십 ㎓ 전기신호 측정이 가능할 것으로 예견된다.

Acknowledgement

이 논문은 2010년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단 지원을 받아 수행된 기초연구 사업임. (No. 2010-0021491)

참 고 문 헌

[1] Serigne, et al, “Isotropic Pattern of an Optical Electromagnetic Field Probe Based Upon Mach-Zehnder Interferometer,” IEEE Trans. on Electromagnetic Compatibility, Vol. 39, No. 1, pp. 61-63, Feb. 1997.

[2] Y. J. Rao, “Eletro-optic electric field sensor based on periodically poled $LiNbO_3$,” Electronics Lett., Vol. 35, No. 7, pp. 596-597, Apr. 1999.

[3] Lionel Duvillaret, et al, “Electro-optic sensors for electric field measurements. I. Theoretical comparision among different modulation techniques,” J. Opt. Soc. Am. B, Vol. 19, No. 11, pp. 2692-2703, Nov. 2002.

[4] C. H. Bulmer and W. K. Burns, “Linear Interferometric Modulators in Ti:$LiNbO_3$,” J. Lightwave Technol., Vol. LT-2, No. 4, pp. 512-521, Aug. 1984.

[5] Tsung-Hsin Lee, et al, “Electromagnetic Field Sensor Using Mach-Zehnder Waveguide Modulator,” Microwave and Optical Technol. Lett., Vol. 48, No. 9, pp. 1897-1899, Sep. 2006.

[6] Tsung-Hsin Lee, et al, “Integrated $LiNbO_3$

Electrooptical Electromagnetic Field Sensor," Microwave and Optical Technol. Lett. Vol. 49, No. 9, pp. 2312-2314, Sep. 2007.
[7] Hiroshi Nishihara, et al, "Optical Integrated Circuits": pp. 286-289, McGraw-Hill, 1985.
[8] Gerd Keiser, Optical Fiber Communication, 4th edition, pp. 222-245, McGraw-Hill.
[9] David H. Naghski, et al, "An integrated Photonic Mach-Zehnder Interferometer with No Electrodes for Sensing Electric Fields," J. Lightwave Technol., Vol. 12, No. 6, pp. 1092-1098, June 1994.
[10] OptiBPM 9.0 (Waveguide Optics Design Software, Optiwave.

저 자 소 개

정 홍 식(정회원)
1982년 서강대학교 전자공학과 학사 졸업.
1984년 서강대학교 전자공학과 석사 졸업.
1989년 Texas A&M University, 미국 Ph. D.
1989년 3월～1990년 2월 일본국, 신기술사업단, 연구원
1990년 3월～현재 홍익대학교, 과학기술대학, 교수
1998년 9월～1999년 8월 CEMDAS, Texas A&M University, 연구교수
<주관심분야 : $LiNbO_3$ 집적광학소자, 광통신소자, 광전자공학>