

반사간섭형 광변조기를 이용한 전계 계측센서의 개발 최영규

Development of an Electric Field Sensor using Reflective Interference Type Optical Modulator

Young-Kyu Choi

요약

전자계측 센서를 구성하기에 편리한 반사간섭형 광변조기를 제안하고, 그 동작원리와 기본특성을 이론적으로 해석하였다. 센서의 고감도화를 위하여 반사간섭형 광변조기의 변조도 개선방법을 제시하였으며, LiNbO_3 기판으로 반사간섭형 광변조기를 제작하여 센서를 구성하고, 저주파 전자계 측정실험을 실시하여 센서의 정성적 특성을 평가하였다. 실험에서 5 % 정도의 낮은 변조도에서도 5 V/cm의 계측결과를 얻어 전계계측센서로서 활용 가능성을 확인하였다.

Abstract

A reflective interference type optical modulator to compose the electric field sensor is proposed, and the performance and characteristics are theoretically analyzed. For the high sensitivity of the sensor, a method to improve the modulation index of the modulator is presented. The electric field sensor using Ti:LiNbO_3 waveguide was fabricated and qualitatively investigated the characteristics by measuring the low frequency electric field. Even though the sensor showed very low modulation index of 5 %, the electric field strength of 5 V/cm was measured. The experimental results revealed the utilities of this type electric field sensor.

1. 서론

광파를 이용한 계측법은 전기적, 기계적인 다른 방법에 비하여 시간영역, 공간영역, 주파수영역에서 초고속, 초고밀도, 초고분해능 계측이 가능하므로, 이러한 광파의 특징은 극한적 계측에 널리 이용되고 있다^{1), 2)}.

최근, 광파 이용 계측기술은 소형, 고효율의 레이저, 저손실 단일모드 광섬유, 고속의 수광, 변조소자, 도파로소자 등의 새로운 광학부품, 전자광학부품의 실용화와 더불어, 과거에는 이론적으로만 생각하였던 측정방

법, 시스템의 구성이 점점 현실화 되어가고 있는 추세이다³⁾.

지금까지 피측정 대상에 따라, 다양한 종류와 방법으로 광 IC를 이용하는 전자계 계측용 센서가 개발되고 있으나^{4)~7)}, 광범위에 분포한 미약한 저주파⁸⁾ 또는 초고주파 전계의 정밀한 계측에는^{9), 10)} 도파로형 광변조기를 센서의 검지부로 이용하는 것이 가장 효과적인 방법¹¹⁾으로 알려져 있다. 전계 계측용 광센서로는 분기간섭형 광변조기를 이용하여 고감도화, 고속화를 위한 연구가 주류를 이루고 있으나, 이러한 형태의 광센서는 변조기의 양단에 광섬유를 부착하게 되므로 입출력 광

신라대학교 광학공학과 (Dept. of Optical Eng., Silla Univ.)

<접수일자 : 1998년 10월 7일>

손실이 커서 고감도화에 한계가 있을 뿐 아니라 공간적인 기동성에도 많은 제약이 있다^{112, 131}.

본 연구에서는 광 IC를 이용하여 전계계측센서를 구성함에 있어, 센싱 프로브까지의 광의 입출력을 단 한 개의 광섬유로 담당하게 하여, 광섬유 접속에 의한 센서 프로브의 광 입출력 손실을 줄이므로써, 센서의 감도를 크게 향상시킬 수 있는 반사간섭형 광변조기를 이용하는 전자계 계측센서의 개발을 시도하였다.

반사간섭형 광변조기를 설계하여 그 동작원리와 특성을 이론적으로 해석하고 센서의 검지부로 활용하기 위한 고감도화의 방법을 제시하였다. 또한, 실물을 제작하여 그 정특성을 평가하고, 이를 이용하여 센서를 제작, 저주파 전계계측을 실시하므로써, 전계계측센서로 실용화할 수 있는 가능성을 확인하였다.

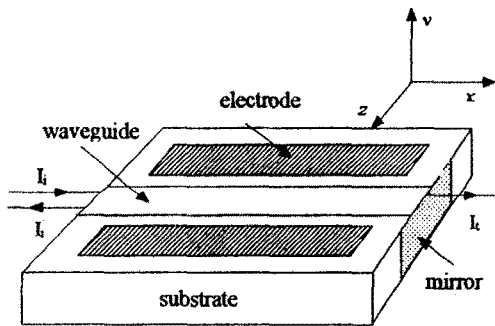


그림 1. 반사간섭형광변조기의 모식도
Fig. 1. Schematic configuration of the reflective interference type optical modulator.

2. 반사간섭형 광변조기와 센서구성의 개념

그림 1은 반사간섭형 광변조기의 개략적인 모식도이다. 도파로의 좌측 단으로 광을 입사하고, 우측 단에는 미러를 제작하여 광을 반사시킨다. 단, 미러의 반사율이 1 보다 작은 경우를 고려하여, 투과되는 광도 존재하는 것으로 가정한다. 반사된 광은 입사단의 광섬유를 통하여 도파로 밖으로 나온 후, 빔 스피리터(splitter) 또는 서큘레이터(circulator)를 이용하여 검출부까지 유도한다. 이 경우 도파로와 광섬유의 접속부에서 굴절률의 차에 의해 광의 반사가 일어나고, 결과적으로는 광의 다중반사가 발생하여, 광도파로는 패브리-페로 공진기(Fabry-Perot resonator)를 구성하게 된다.

따라서, 광이 도파로를 진행할 때 위상변조를 시켜,

실효광로거리(optical path)를 변화시키면 반사광강도나 투과광강도가 변하게 된다. 전자계의 신호검출에 반사광을 이용하면, 광의 입출력이 한 개의 광섬유로 가능하게 되므로 센서를 구성하는데 아주 편리한 구조가 된다.

본 연구에서는 변조기를 구성하는 기반으로 Y-cut LiNbO₃ 를 이용하였다. x 방향으로 도파로를 제작하여, 도파로 양쪽에 코-프레너(co-planar) 전극을 배치하고 z 방향의 전계를 인가한다. 도파로를 전파하는 광을 TE-like mode로 하면, LiNbO₃ 중에서 가장 큰 전기광학계수 r₃₃ 을 이용할 수 있게 되므로 고효율의 광변조가 가능하게 된다.

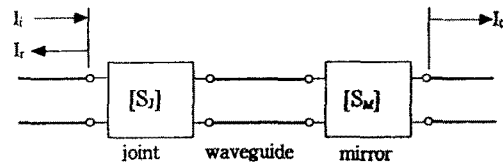


그림 2. 반사간섭형 광변조기의 전송선로모델
Fig. 2. Transmission line model of the reflective interference type optical modulator.

3. 변조기 동작원리의 이론 해석

반사간섭형 광변조기의 동작원리는 그림 2 처럼 전송선로로 모델링하면 해석이 간편하다. 도파로는 평면파의 전송선로, 입사측 단면 및 미러측은 4단자 회로망으로 표현된다. 그림 2처럼 도파로 양단 회로망의 S-파라메터를 각각

$$[S_J] = \begin{bmatrix} r_1 & t_1 \\ t_1 & r'_1 \end{bmatrix}, \quad [S_M] = \begin{bmatrix} r'_2 & t_2 \\ t_2 & r_2 \end{bmatrix} \quad (1)$$

으로 표현하자. 여기서, r₁, r'₁ 와 t₁ 은 각각 광섬유 접속부에서의 반사계수와 투과계수를, r₂, r'₂ 와 t₂ 는 각각 미러부에서의 반사계수와 투과계수를 나타낸다. 이 모델에서 입력광 강도 I_i 에 대한 반사광 강도 I_r 및 투과광 강도 I_t 는

$$\frac{I_r}{I_i} = \frac{(r_1 - r'_2)(r_1 r'_1 - t_1^2)e^{-2\alpha} + 4r_1 r'_2 (r_1 r'_1 - t_1^2)e^{-\alpha} \sin^2 \phi}{(1 - r_1 r'_2 e^{-2\alpha})^2 + 4r_1 r'_1 e^{-2\alpha} \sin^2 \phi} \quad (2)$$

$$\frac{I_t}{I_i} = \frac{|t_1 t_2|^2 e^{-2\alpha}}{(1 - r_1' r_2' e^{-2\alpha})^2 + 4r_1' r_2' e^{-2\alpha} \sin^2 \phi} \quad (3)$$

으로 구해진다.

여기서, α 는 도파로의 입사단에서 미러까지 광이 전파하는 사이에 일어나는 감쇠이며, ϕ 는 그 사이에 진행되는 위상변화이다. 위상변조가 걸리면 ϕ 가 변하고, 이것에 의해 I_r 및 I_t 의 강도변조가 일어난다. 전극에 전압 V 가 인가되었을 때, ϕ 의 변화량 $\Delta\phi$ 는

$$\Delta\phi = \frac{\pi n_e^3 r_{33} L \Gamma V}{\lambda d} \quad (4)$$

로 된다. 여기서, L , d 는 각각 전극의 길이와 간격이며, n_e 는 LiNbO₃ 의 이상광 굴절률이다. λ 는 광의 파장, Γ 는 인가전계저감계수로, 전기광학효과에 의하여 굴절을 변화에 기여하는 전계의 비율이다. 광강도는 인가전압에 대하여 주기적으로 변하며, 극대치에서 극소치까지 변하는데 필요한 전압을 반파장전압 V_π 라 한다. 이것은 입사측 단면까지 반사되어 온 광의 위상을 π 만큼 변화시키는데 필요한 전압으로, 식 (5)와 같다^[14].

$$V_\pi = \frac{\lambda d}{2n_e^3 r_{33} L \Gamma} \quad (5)$$

윗 식에 구체적인 값이 주어지면, 반사간섭형광변조기의 동작특성을 구할 수 있다. 표 1은 계산에 이용한 파라미터들이다. ϕ 는 전압을 인가하지 않았을 경우에 π 의 정수배를 취하는 것으로 한다.

표 1. 계산에 이용한 파라미터

Table 1. Modulator parameters.

파라미터	치수
전극간격 : d	10 μm
전극길이 : L	5 mm
도파로의 감쇠 : α	1dB
광의 파장 : λ	6328 Å
인가전계감쇠계수 : Γ	0.5

입사측 단면의 S-파라미터는 공기와 LiNbO₃ 의 굴절률 만에 의해 결정되는 것으로 하여,

$$\begin{aligned} -r_1 &= r_1' = 0.375 \\ t_1 &= \sqrt{1 - r_1'^2} \end{aligned} \quad (6)$$

로 표현된다.

미러부의 S-파라미터는 미러의 전력반사계수를 R_2 라 하면,

$$\begin{aligned} r_2 &= r_2' = -\sqrt{R_2} \\ t_2 &= j\sqrt{1 - R_2} \end{aligned} \quad (7)$$

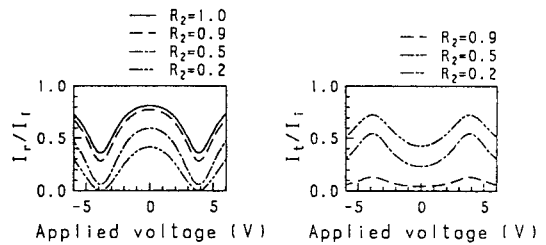


그림 3. 반사간섭형 광변조기의 (a) 반사, (b) 투과광 강도의 특성

Fig. 3. Reflected and transmitted light power characteristics of the modulator.

로 나타낼 수 있다. R_2 를 파라미터로 취한 광변조기의 특성을 그림 3에 보였다. 이 계산예에서 $V_\pi = 3.86 V$ 이다.

광강도의 최대치와 최소치의 차를 반사간섭형 광변조기의 변조도라 정의하면, 반사광 강도의 경우는 R_2 가 어느 일정치 이상의 값이 되면 변조도는 거의 일정하다. 투과광 강도의 경우는 R_2 가 그다지 크지 않을 경우에 변조도가 어느 일정한 값을 유지하고 있으나, R_2 가 1에 가까운 값이 되면, 투과하는 광량이 적어지기 때문에 변조도가 작아진다. 반사광과 투과광을 비교하면 도파로의 감쇠 때문에 반사광의 경우가 변조도가 커지게 되므로, 반사광을 이용하는 것이 유리한 것으로 판단된다. 이 경우에 미러의 반사율은 어느 정도 이상으로 크면되고, 꼭 1이 되도록 할 필요는 없다.

4. 반사간섭형 광변조기의 고효율화

앞 절에서 검토한 구조에서는 입사 단면의 반사가

적으므로 이것에 의해 변조도가 크게 제한되었다. 입사 단면을 하프미러로 제작하여 반사율을 크게하면, 변조 효율을 향상시킬 수 있다. 여기서 뜻하는 고효율화는 반파장전압을 줄이는 것이 아니라, 변조도 (광출력의 최대치와 최소치의 차)를 크게한다는 것을 의미한다. 입사단면을 하프미러로 할 경우, 입사단 하프미러의 S-파라미터는 전력반사계수를 R_1 이라 하면

$$\begin{aligned} r_1 &= r_1' = -\sqrt{R_1} \\ t_1 &= \sqrt{1-R_1} \end{aligned} \quad (8)$$

로 표현된다. 따라서, 식 (2), (3)에 의해 반사광 강도와 투과광 강도는

$$\frac{I_r}{I_i} = \frac{(\sqrt{R_1}-\sqrt{R_2}e^{-2\alpha})^{2m} + 4\sqrt{R_1R_2}e^{-2\alpha}\sin^2\phi}{(1-\sqrt{R_1R_2}e^{-2\alpha})^2 + 4\sqrt{R_1R_2}e^{-2\alpha}\sin^2\phi} \quad (9)$$

$$\frac{I_t}{I_i} = \frac{(1-R_1)(1-R_2)e^{-2\alpha}}{(1-\sqrt{R_1R_2}e^{-2\alpha})^2 + 4\sqrt{R_1R_2}e^{-2\alpha}\sin^2\phi} \quad (10)$$

으로 된다. 식 (9), (10)의 파라미터를 앞 절에서 사용한 값으로 설정하고 특성계산을 하였다. 그림 4는 $R_1=R_2$ 로써, 반사광 강도와 투과광 강도의 계산결과이다. 그림 3과 비교하면, 변조도가 크게 향상되어, 입사측 단면을 하프미러로 설계한 경우의 효과가 뚜렷히 나타나 있다. 반사광과 투과광 모두가 $R_1=R_2=0.5$ 일 경우에 변조도가 증가하지만, 반사광의 변조도가 더 크다는 것을 알 수 있다. 앞 절과 마찬가지로, 투과광의 경우는 도파로의 감쇠때문에 변조도가 작아지는 것으로 판단된다. R_1 을 0.5로 하여 R_2 를 변화시켰을 때, 반사광 강도의 계산결과를 나타내면 그림 5와 같이 된다. R_2 가 큰 쪽의 변조도가 크지만, 1에 가까운 범위에서는 그 차이는 무시할 수 있을 정도로 작다.

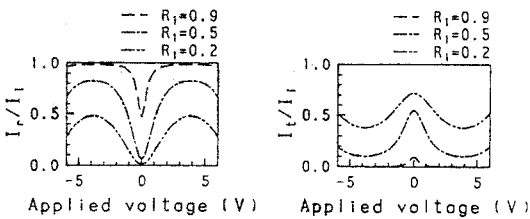


그림 4. R_1 을 파라미터로 한 (a) 반사, (b) 투과광강도 특성
Fig 4. Reflected and transmitted light power characteristics on R_1 .

— $R_2=1.0$
- - $R_2=0.9$
- · - $R_2=0.5$
--- $R_2=0.2$

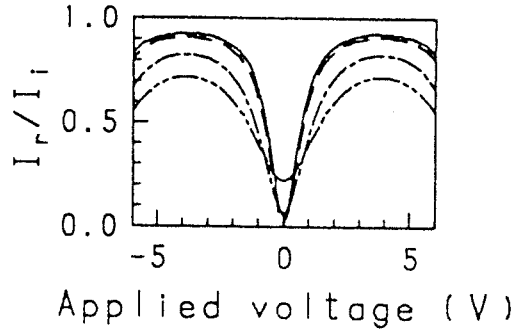


그림 5. R_2 를 파라미터로 한 반사광강도의 특성
Fig. 5. Reflected light power characteristics on R_2 .

따라서, 입력측 단면을 하프미러로 구성하면 변조기의 고효율화가 가능하다. 특히, 기울기가 큰 곳을 동작점으로 선택할 경우, 상당한 고감도를 기대할 수 있다.

한편, 미러의 반사율을 변화시켰을 때의 변조도를 검토하여 보자. 식(9), (10)에 의해 반사광의 변조도 M_r , 투과광의 변조도 M_t 는

$$M_r = \frac{4(1-R_2)(1-R_2e^{-4\alpha})\sqrt{R_1R_2}e^{-2\alpha}}{(1-R_1R_2e^{-4\alpha})^2} \quad (11)$$

$$M_t = \frac{4(1-R_1)(1-R_2)\sqrt{R_1R_2}e^{-4\alpha}}{(1-R_1R_2e^{-4\alpha})^2} \quad (12)$$

로 표현된다. 그림 6과 7은 도파로 손실 이외의 파라미터는 표 1과 같게 설정하고, M_r, M_t 를 계산한 결과이다. 그림 6 (a)는 도파로의 손실이 일정하고, R_2 를 파라미터로 하여 R_1 을 변화시켰을 경우, (b)는 $R_1=0.5$ 에서 도파로손실의 변화에 대 반사광의 변조도이다. 그림 7은 그림 6에 대응하는 투과광의 변조도이다. 그림에서 보면, 반사광과 투과광은 양상이 달라져 있는 것을 알 수 있다. 반사광에서는 R_2 가 큰 쪽이 변조도가 크나, 투과광에서는 역으로 작은 쪽이 크다. 그러나, 어느 쪽도 도파로에서의 손실이 작은 쪽이 변조도가 크다는 것을 알 수 있다.

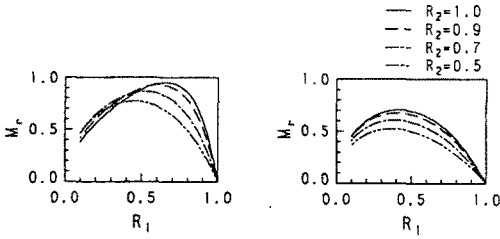


그림 6. R_2 를 파라미터로한 반사광 변조도 특성
 (a) 도파로손실 3dB (b) 도파로손실 1dB
 Fig. 6. The modulation index characteristics of the reflected light power on R_2 .
 (a) waveguide loss 3dB (b) waveguide loss 1dB

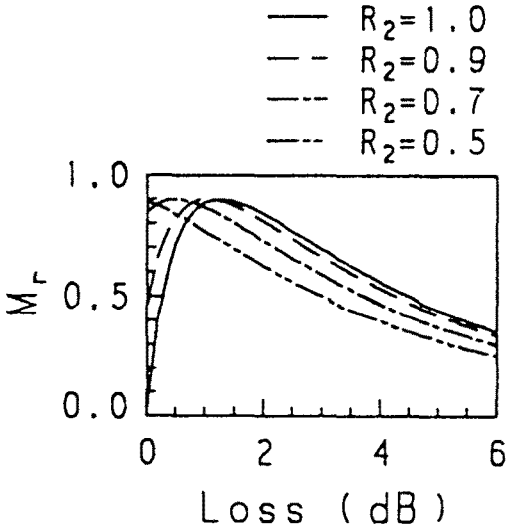


그림 7. M_r 의 손실 의존성
 Fig. 7 The loss characteristics of M_r .

이러한 결과에서 반사광이 투과광보다도 변조도가 커지게 되므로, 반사광 변조도를 최대로 하는 미려의 반사율을 구하기로 하자. 즉, 도파로의 손실 및 R_2 의 값을 정하여, 변조도를 최대로 하는 R_1 의 값을 구한다. 이것은,

$$\frac{\partial M_r}{\partial R_1} = \frac{2(1-R-2e^{-4\alpha})(1-3R_1+3R_1R_2e^{-4\alpha}-R_1^2R_2e^{-4\alpha}-R_1^2R_2e^{-4\alpha})\sqrt{R_2}e^{-2\alpha}}{\sqrt{R_1(1-R_1R_2e^{-4\alpha})^3}} = 0 \quad (13)$$

을 푸는 문제로 귀착된다. 그림 8과 9는 계산의 결과이다. 그림 8은 손실을 파라미터로 하여, R_2 를 변화시켰을 때의 R_1 의 최적치와 그 때의 변조도를 나타낸 것이다. 그림 9는 R_2 를 파라미터로 하여, 손실을 변화시켰을 때의 R_1 의 최적치와 그 때의 변조도를 나타낸 것이다. 도파로의 손실에 관계없이, $R_2=1$ 일 때 최대의 변조도가 얻어졌으나, $R_2=0.9$ 정도로 하여도 그 차이는 무시할 수 있을 정도로 작다. 따라서, R_2 가 어느 정도 크면, R_1 을 최적화시킴으로써 변조도를 대폭 증가시켜 고감도 센서의 구성이 가능함을 알 수 있다.

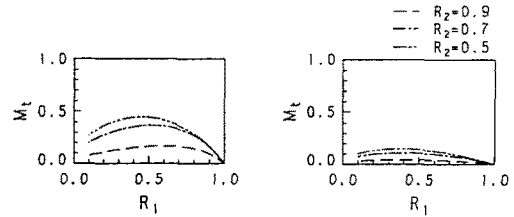


그림 8. R_2 에 대한 반사광변조도의 최적화
 Fig. 8. Optimazation of reflected light modulation index on R_2 .

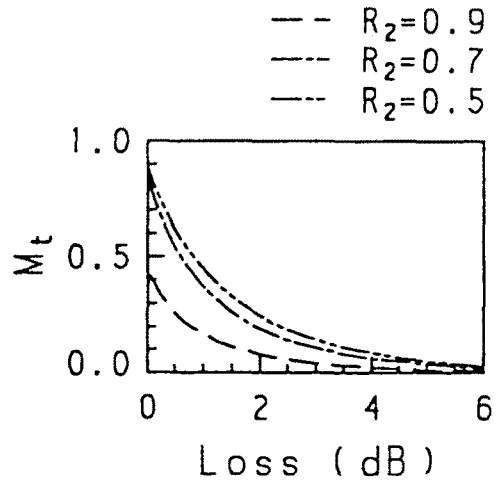


그림 9. 도파로손실에 대한 반사광변조도의 최적화
 Fig. 9. Optimization of the reflected light modulation index on the waveguide loss.

5. 광변조기의 제작과 그 특성

광변조기의 도파로는 Ti을 열확산하여 제작한 것을 이용하고, 입사측 단면을 하프미러로 하지 않는 구조로 제작하였다. 또, 앞 절에서 나타낸 것처럼 반사광이 변조도가 크므로 반사광을 이용하는 것으로 한다. 기판은 Y-cut LiNbO₃를 이용하여 Ti를 27 nm 증착하고, 스트립선의 폭이 3.5μm으로 되도록 패턴을 제작하여 산소분위기 중에서 1000℃, 5시간 확산하여 도파로를 제작하였다.

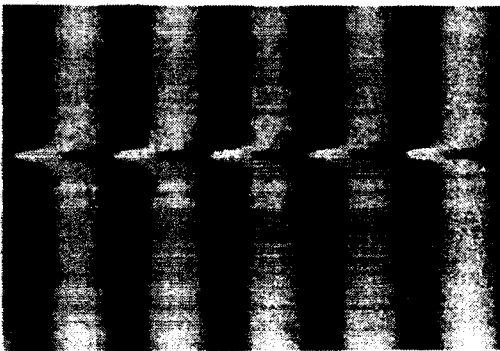


그림 10. 도파로의 간섭현미경 사진
Fig. 10. Photograph of the waveguide.

그림 10은 제작된 도파로의 간섭현미경 사진이다. 제작된 도파로는 폭이 3.0μm, 확산깊이는 1.6μm 정도로 광원에 대하여 단모드로 여진할 수 있음을 확인하였다. 변조기의 전극은 전자빔열증착장치로 Al을 약 100 nm 증착하여 간격 10μm, 길이 5mm로 제작하였다. 마지막으로 광출력측 단면에 200 nm의 Al을 증착하여 미러를 제작하였다.

변조기의 특성을 측정하기 위하여 그림 11과 같은 실험장치를 구성하였다. 먼저, 500 Hz의 저주파전압을 인가하여 인가전압과 반사광 강도의 관계를 측정하였다. 그림 12는 측정의 결과이다. (a)는 측정결과이며, (b)는 변조된 부분을 확대한 그림이다. 앞절의 이론적 계산결과와 비교하면, 변조도가 아주 작아졌음을 알 수 있다. 이러한 이유는 입사측 단면에서의 투과계수 t_1 이 실제보다 아주 작아졌기때문으로 판단된다. 렌즈로 집광하여, 도파로의 단면에 광을 입사시키는 관계로 입사빔의 스폿(spot)의 크기에 따라, t_1 값의 차이가 크게 나타난다. 실험에 있어서 광원과 도파로 사이에는 도파로와 커플링(coupling)할 수 있는 광강도에는 한계가 있

으므로 도파로의 도파모드에 결합하는 광강도는 변동폭이 크다. 이러한 이유로 t_1 이 작아지므로 변조도가 작아지는 것으로 생각된다. 반파장 전압은 3.7 V이며, 이것에서 인가전계저감계수를 계산하면 0.52로 되어 표. 1의 설계한 값과 거의 일치함을 알 수 있다.

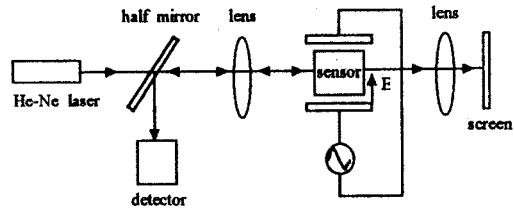


그림 11. 실험장치
Fig. 11. Experimenting set up.

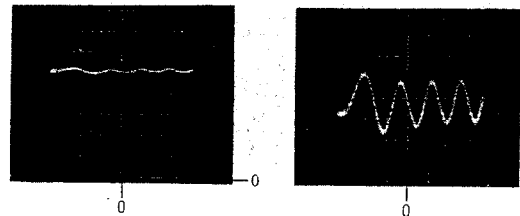


그림 12. 변조특성의 측정결과
Fig. 12 Measuring results of the modulation characteristics.

6. 전계계측실험 및 고찰

전계를 계측하는 센서를 구성하기 위하여 그림 13과 같은 코프레니 전극에 전계를 검출하기 위한 전극(안테나)을 부착하여 전극을 구성하고, 피측정 전계는 간격 25 mm의 평행판 전극으로 발생시켰다.

그림 14는 60Hz의 교류전계를 계측한 결과이다. 그림 (a)는 28 V/cm의 전계를 인가하였을 경우의 광출력 파형이고 그림 (b)는 인가전계에 대한 광출력의 특성이다. 이 그림에서는 전계가 반파장전압에 비하여 훨씬 크기 때문에 변조기의 비선형성에 의해 광출력이 왜곡되어 있음을 알 수 있다. 그림 (b)에서 반파장전압에 해당하는 전계는 32.5 V/cm로, 10 V/cm 이하의 전계일 때 파형의 왜곡없이 전계계측이 가능하다. 또한, 센서의 변조기의 반파장전압이 3.7 V이므로, 1 V/cm의 전계이면 전극간에 0.11 V의 전위차가 발생하게 된다. 센서의 감도를 향상시키기 위해서는 이 전위차를 크게

할 필요가 있고, 피측정 전계의 주파수와 강도에 따라 전극의 구조는 다양하게 구성할 수 있다.

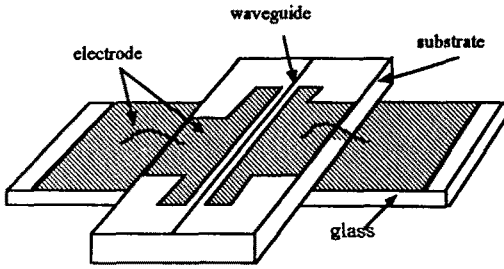


그림 13. 전계센서의 구조

Fig. 13. Schematic structure of the electric field sensor.

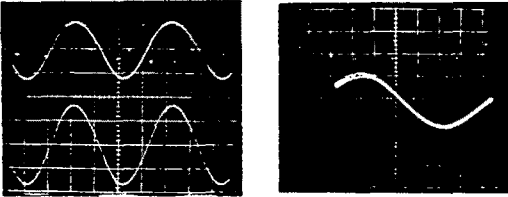


그림 14. 측정결과

Fig. 14. Measuring result.

반사간섭형 광변조기를 센서로 이용하는 경우 변조 특성이 선형인 곳을 동작점으로 선택하여야 하는데, 이것은 식(1)에 있어서 ϕ , 즉 도파로를 진행하는 사이에 전진하는 위상이 전압을 인가하지 않았을 경우에 $\phi = m\pi + \pi/2$ (m : 정수)로 되게하는 것이다. 그러나, 이것은 도파로의 길이를 광의 파장 수준으로 제어하는 것을 의미하는 것으로 실물 제작시 매우 높은 정밀도의 유지가 요구된다. 또한, 이러한 조건이 충족되었다 하더라도 주변온도의 변화에 따라서도 ϕ 가 변하므로 동작점의 위치를 적절히 제어하는 것은 매우 어려운 문제이다.

이 문제는 변조특성의 주기성을 이용하면 어느정도 해결이 가능하다. 즉, 피측정 전계가 반파장 전계보다 아주 큰 경우에 주파수를 알고 있다고 가정하면, 출력 광을 검파한 후 주파수를 측정한다. 이 주파수가 전계 주파수의 몇 배인지를 알게 되면, 전계가 반파장 전계의 몇 배인지를 알 수 있으므로, 이것을 이용하여 동작점의 위치에 의한 변조특성의 변화를 최소화시킬 수 있다.

7. 결론

전계계측 센서의 구성에 편리한 반사간섭형 광변조기를 제안하고 동작원리를 이론적으로 해석하였다. 도파로 양단에서 발생하는 광의 반사를 이용하게 되므로 광변조기 양단의 반사계수, 도파로의 손실을 파라미터로 특성계산을 실시한 결과, 반사면의 미러의 반사계수는 1에 가까운 어느 정도 큰 값을 가지면 되고, 입사단의 반사계수는 미러의 반사계수 값에 따라 최적치가 존재함을 확인하였다. LiNbO_3 기판으로 반사간섭형 광변조기를 설계하고 특성실험을 한 결과, 변조도가 5% 정도로 작기는 하지만 정성적인 변조특성을 확인할 수 있었다.

변조도가 작아진 것은 도파로를 여진하는 입사광의 절대량이 부족한 것으로 판단할 때 이것은 실험의 숙련으로 해결할 수 있는 문제로 생각된다. 저주파 전계 실험에서는 과변조가 걸리기는 하였으나 입력전계 5 V/cm의 전계계측이 가능하였다.

본 논문의 실험은 정량치를 얻기보다는 새로 제안된 반사형 광변조기의 전계센서로의 활용 가능성에 대한 예비실험으로 정성적 특성을 평가하는 정도로만 정밀도를 유지하였으나, 금후에는 정량적인 측정치를 도출하기 위한 정밀 실험을 실시할 예정이다

참고문헌

- [1] M. Ohkawa, M. Izutsu and T. Sueta, Integrated-optic pressure sensor and accelerometer on silicon substrate, 2nd OEC(OEC'88), 58, 1988.
- [2] M. Ohkawa, M. Izutsu and T. Sueta, Integrated optic accelerometer employing a cantilever on a silicon substrate, *Jpn J. Appl. Phys.* vol 28, pp. 287, 1989.
- [3] T. Tanaka번저 : "광파센싱의 기초와 응용", Ohm사, 1990.
- [4] J. Chang, C. N. Vittitoe and B. T. Neyer, , An electro-optical technique for intense microwave measurements, *J. Appl. Physics*, vol. 57, No. 11, pp. 4843-4848, 1985.
- [5] M. Kanda and F. X. Ries, A broad-band iso-

- tropic real-time electric-field sensor using resistivity loaded diodes, *IEEE Trans., EMC*, vol. 23, No. 3, pp. 122-132, 1981.
- [6] V. B. Baglikov, R. Yu. Dolinin, E. M. Zolotov, V. M. Pelekhatyi, and R. F. Tavlykaev, Investigation of an electric field sensor based on an integrated optical Mach-Zehnder modulator, *Sov. J. Quantum Electron.*, vol. 18, No. 10, pp. 1353-1355, 1988.
- [7] P. S. Cross, R. A. Baumgartner, and B. H. Kolner, Microwave integrated optical modulator', *Appl. Phys. Lett.*, vol. 44, No. 5, pp. 486-488, 1984.
- [8] H. Ito, T. Ichikawa, S. Kato and N. Takahashi, Measurement of ELF field strength using Ti:LiNbO₃ waveguide modulator, *Technical Reports, EMCJ-90-96, IEICE*, pp.25-32, 1991.
- [9] N. Kuwabara, K. Tajima and F. Amemiya, Development of wide-band and highly sensitive electric field sensor using LiNbO₃ optical modulator, *Technical Reports, EMCJ-91-6, IEICE*, pp. 37-42, 1991.
- [10] H. B. Berger, V. Kumara and K. Matloubi, A broadband E-field sensing system, *Proceeding of the 1988 IEEE Symposium on EMC*, Siattle, pp. 383-389, 1988.
- [11] C. H. Bulmer, Sensitive highly linear lithium niobate interferometers for electromagnetic field sensing, *Appl. Phys. Lett.*, vol. 53, No. 24, pp. 2364-2370, 1988.
- [12] Y. K. Choi, M. Sanagi and M. Nakajima, Measurement of low frequency electric field using Ti: LiNbO₃ optical modulator, *IEE Proceedings-J Optoelectronics*, vol. 12, No. 2, 1993.
- [13] H. Iwakura, H. Yoshikawa and Y. Ohno, Application of optical waveguide voltage sensors", *Technical Reports, OQE90-60, IEICE*, pp. 11-16, 1990.
- [14] H. Nshihara, M. Haruna and T. Suhara, Optical integrated circuits, Ohm-sha(Japan), pp. 108-114, 1987.

감사의 글

* 본 연구는 1998년도 신라대학교 학술연구조성비 지원에 의한 논문입니다.

著 者 紹 介

최영규 (崔 泳 圭)

『센서학회지 제6권 제5호』 논문 97-6-5-8, pp.406참조
현재 신라대학교 광학공학과 교수