

論文2002-39SD-6-1

광도파로형 초저주파(ELF) 전계계측 센서의 개발

(Developments of Extremely Low Frequency Electric Field Sensor using Guided-wave Optical Modulator)

崔 泳 圭 * , 金 文 煥 * *

(Young-Kyu Choi and Mon-Hwan Kim)

요 약

비대칭 도파로 마흐젠더(Mach-Zehnder)형 Ti:LiNbO₃ 광변조기를 이용하여 아주 낮은 저주파대(ELF:Extremely Low Frequency)의 전계계측을 시도하였다. Ti:LiNbO₃ 광변조기를 이용하는 전계센서의 감도는 광변조기의 전극구조에 따라 크게 달라지는 것을 알 수 있었다. 이의 확인을 위한 실험적 연구로서 플레이트(plate)형 프로브안테나를 부착한 광변조기를 제작하여 저주파 전계강도를 측정하였다. 전계강도의 측정은 주파수범위 60 Hz 에서 100 kHz 까지, 전계강도 0.1 V/cm 에서 60 V/cm 까지의 범위를 측정하였다. 10 mm×10 mm 프로브안테나의 경우, 60 Hz, 0.1 V/cm 의 피측정전계에서 10⁻² mV 의 감도를 얻을 수 있었다. 저주파 전계강도를 측정하기 위해서는 넓은 유효면적을 갖는 플레이트형 프로브안테나가 일반적인 다이폴 안테나보다 유용하다는 것을 확인하였다. 피측정 전자계의 주파수 범위에 따라 안테나의 유효면적을 적당히 조절한다면 더 좋은 센서의 감도를 얻을 수도 있다.

Abstract

The use of an asymmetric Mach-Zehnder interferometric amplitude modulator to measure a relatively low frequency electric field strength is described. The sensitivity of an electric field sensor using a Ti:LiNbO₃ optical modulator is strongly affected by the shape of a electrode(probe antenna). To measure the low frequency electric field, a probe antenna of wide effective area is more useful than the usual dipole antenna. As a proof of this, the optical modulator was fabricated with a plate-type probe antenna and the usefulness of this antenna tested for measuring low frequency electric field strength. Measurements were performed in the range 0.1 V/cm to 60 V/cm at 60 Hz through 100 kHz. Using a probe antenna of 10 mm×10 mm, the output voltage of 10⁻² mV was measured with respect to the electric field strength of 0.1 V/cm at 60 Hz. By increasing the effective area of the probe antenna, better sensitivity is obtainable over the measured range.

I. 서 론

유전체로 구성되는 광변조기의 절연성, 무유도성 등

* 正會員, 新羅大學校 光電子工學科

(Departemnt of Photonics, Silla University)

** 正會員, 新羅大學校 自動車機械工學科

(Departmmt of Automotive Engineering, Silla Univ.)

接受日字:2001年5月2日, 수정완료일:2002年4月8日

은 피측정 전자계를 교란시키지 않으므로 전자계 계측에 매우 유리하여 이를 이용한 여러 가지 형태의 전자계 계측 시스템이 연구 개발되고 있다. 지금까지 광변조기를 이용한 전자계 측정 시스템은 주로 벌크형 광변조기를 사용하여 고압, 대전력 전계의 계측에 이용되어 왔다. 그러나, EMC, EMI, 전자파의 생체에 대한 영향 등, 우리의 생활 주변에서 매우 다양한 형태의 전자계에 대한 정확한 측정이 필요하게 됨에 따라, 시스템을 유연하고 다양하게 구성할 수 있는 여러 가지 형태

의 광집적회로형 전자계 계측 센서가 개발되었다.^[1-3] 그 중에서도 도파로형 광변조기는 저전력에서 고전력, 저주파에서 고주파까지 아주 넓은 범위에 걸쳐서 매우 다양한 형태로 측정의 용도에 맞는 시스템을 구축할 수 있으므로 전계 검출용 센서로서 특히 주목을 받아 지속적으로 연구 개발되고 있다.

한편, 최근에 들어서 전자계가 생체에 미치는 영향에 대한 연구결과가 발표되기 시작하면서 저주파 EMC에 대한 관심이 더욱 높아지고 있으나, 아직까지는 저주파, 저전력 전계계측 ELF(Extremely Low Frequency, $f < 3$ kHz)시스템에 대한 연구는 매우 드문 것이 현실이다. 도파로형 광변조기를 이용하는 전계센서는 광변조기가 피측정 전계를 교란시키지 않을 정도로 소형 제작이 가능하기 때문에 기본적으로 고주파 전계계측에 적합한 조건을 갖추고 있다. 이러한 고주파 전계계측 시스템에 있어서 측정의 감도를 향상시키기 위해서는 전계 검출 안테나의 역할을 하는 광변조기의 전극(프로브안테나의 유효면적)을 크게 제작할 필요가 있으나, 이는 피측정 고주파 전자계의 교란 원인이 되므로 결과적으로 광변조기 프로브안테나(전극)의 유효면적의 크기가 고주파 전계센서의 감도를 제한하는 가장 주된 요인으로 작용한다. 그러나, 저주파 전계계측에서는 전극의 크기가 피측정 전자계의 파장에 비해서 매우 작으므로 Ti:LiNbO₃ 광변조기를 이용하는 전계센서의 전극구조를 다양한 모양으로 구성하면 고주파 전계계측보다도 유리한 조건(고감도)으로 저주파 전계를 정밀하게 측정할 수 있는 계측 시스템을 실현할 수가 있다.

본 논문에서는 비대칭 광도파로를 이용하는 마흐젠더(Mach-Zehnder)간섭형 광강도변조기를 이용하여 저주파 전계를 측정하기 위한 센서 개발을 시도하였다. 센서의 감도는 프로브안테나의 형상에 따라 크게 영향

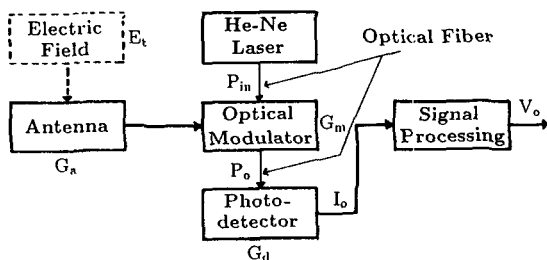


그림 1. 전계계측시스템의 개념도

Fig. 1. Block diagram of an electric field sensing system.

을 받는다. 저주파 전계계측의 경우에는 일반적인 다이폴 안테나보다도 넓은 유효면적을 가진 플레이트형(plate-type) 프로브안테나가 효과적이다. 이를 확인하기 위하여 광변조기를 제작한 후, 전극에 플레이트형 프로브안테나를 부착하고 60 Hz에서 100 kHz에 걸친 비교적 낮은 저주파수 영역의 저전력 전계 측정실험을 실시하였다.

II. 전계계측시스템의 이론해석

도파로형 광변조기를 이용하여 전계를 측정할 경우, 변조기의 전극은 전계강도를 검출하기 위한 프로브안테나의 역할을 하게 된다. 이러한 계측 시스템의 이해를 돕기 위하여 그림 1에 그 예를 보였다. 광검파기의 출력전류 $I_o(\omega)$ 와 피측정 전계 강도 $E_i(\omega)$ 로 정의되는 이러한 시스템의 특성식은

$$I_o(\omega) = G_a G_m P_{in} E_i(\omega) \quad (1)$$

로 나타낼 수 있다. 여기서, G_a 와 G_m 은 각각 광검파기와 광변조기의 전달함수, P_{in} 은 입력광의 평균전력이며, ω 는 피측정 전계의 각주파수이다. 식 (1)에서 광화이버의 손실은 무시할 수 있을 정도로 작다고 가정하였다. 비대칭 마흐젠더 간섭형 광변조기의 광바이어스를 $\pi/2$ 로 하면^[4] 광변조기의 출력은

$$P_{out} = P_{in} \left\{ 1 - \sin \left(\pi \frac{V_i}{V_\pi} \right) \right\} \quad (2)$$

$$\approx \frac{1}{2} P_{in} + \frac{1}{2} P_{in} \pi \frac{V_i}{V_\pi} \quad (\text{for small } V_i)$$

로 쓸 수 있다. 여기서 $V_i = G_a E_{in}$, G_a 는 프로브안테나의 전달함수(광변조기의 전극), E_i 는 피측정 전계강도, V_π 는 광변조기의 반파장 전압이다. 식 (2)에서 광변조기는 소신호 모델일 경우에는 선형시스템으로 해석이 가능하여 변조기의 전달함수는

$$G_m = \frac{\pi V_i}{2 V_\pi} \quad (3)$$

로 된다. 프로브안테나의 특성은 이러한 계측 시스템의 감도와 대역을 결정하는 데 매우 중요하다. 본 논문에서는 특성의 추정이 용이한 플레이트형 프로브 안테나에 대하여 고찰하기로 한다. 플레이트형 프로브안테나

의 전달함수는 Ito 등^[7]의 논문에 의하면

$$G_a = \frac{j\omega CR}{1+j\omega CR} \frac{\epsilon_o S}{C} \quad (4)$$

$$\approx \frac{\epsilon_o S}{C} \quad (\omega \gg 1/CR)$$

로 표현된다. 여기서, C 와 R 은 각각 광변조기 프로브 안테나의 컨덕턴스와 병렬저항이고, ϵ_o 는 진공유전율, S 는 플레이트형 프로브안테나의 단면적이다.

만일, APD를 광검파기로 사용하면 광전류^[6]는

$$I_{ph} = M\eta \frac{e}{h\nu} P_{in} \quad (5)$$

으로 된다. 여기서 $M=APD$ 의 증배계수, η =양자계수, e =전하량, h =플랑크상수, ν =광원의 파장이다. 식 (5)에서 이 시스템의 광검파기의 전달함수는

$$G_d = M\eta \frac{e}{h\nu} \quad (6)$$

으로 나타낼 수 있다. 각 전달함수를 식 (1)에 대입하면, 이러한 시스템의 출력전류는

$$I_o(\omega) = M\eta \frac{eP_{in}}{h\nu} \frac{\pi}{2V_\pi} \frac{\epsilon_o S}{C} E_i(\omega) \quad (7)$$

로 표현된다. 식 (7)에서 큰 입력 광강도, 낮은 반파장 전압, 넓은 면적의 프로브안테나일수록 높은 센서의 감도를 얻을 수 있다는 것을 알 수 있다. 그러나, 피측정 전자계의 주파수 범위에 따라 이용할 수 있는 광강도와 프로브 안테나의 면적에는 한계가 존재한다. 너무 큰 광강도는 LiNbO₃ 기판에 광손상을 일으키는 원인이 되므로 센서의 감도에 따른 광강도의 최적화가 필요하다. 광강도를 조절하여 센서의 감도를 향상시키기 위한 방법으로 25 mW 출력의 Nd:YAG 를 광원으로 사용한 예의 보고^[7]가 있다.

III. 센서감도의 추정

우선, 광원의 잡음이 무시할 수 있을 정도로 작은 이상적인 시스템이라고 가정하면, 이 시스템의 주 잡음원은 광검파기의 백색잡음과 열잡음이다. 잡음의 총전력은 시간평균의 자승값으로

$$\begin{aligned} \bar{i}_n^2 &= \bar{i}_s^2 + \bar{i}_t^2 \\ &= 2e\bar{I} M^2 FB + \frac{4kTB}{R} \end{aligned} \quad (8)$$

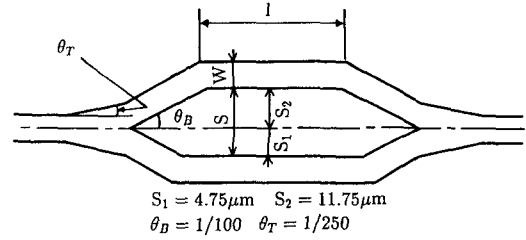


그림 2. 비대칭 광도파로의 구조와 파라미터
Fig. 2. Design structure and parameters of asymmetric waveguide.

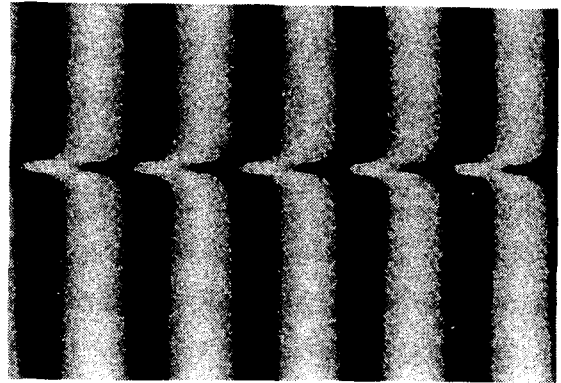


그림 3. 제작된 광도파로의 간섭현미경 사진(도파로폭 : 3.0 μ m, 깊이 : 1.6 μ m)
Fig. 3. Photograph of the fabricated waveguide (waveguide width : 3.0 μ m, deep : 1.6 μ m)

으로 표현된다. 여기서, e =전자의 전하량, \bar{I} =광전류의 시간평균, $M=APD$ 의 증배계수, B =광검파기의 대역, k =볼츠만상수, T =절대온도, $F=APD$ 의 과잉잡음계수이다.

식 (7)과 식 (8)에서 이 시스템의 S/N비는

$$\begin{aligned} \frac{S}{N} &= \frac{I_o(\omega)^2}{\bar{i}_n^2} \\ &= \frac{\left\{ M\eta \frac{eP_{in}}{h\nu} \frac{\pi}{2V_\pi} \frac{\epsilon_o S}{C} E_i(\omega) \right\}^2}{2e\bar{I} M^2 FB + 4kTB/R} \end{aligned} \quad (9)$$

이다. 여기서, $S/N=1$ 을 이 시스템의 최소 검파가능 전계강도라고 가정하면, 식(9)에서 검파가능 최소전계는

$$E_{i, \min} = \frac{h\nu}{M\eta e} \frac{2V_\pi}{\pi} \frac{C}{\epsilon_o S} \sqrt{\frac{(2e\bar{I} M^2) + 4kT/R}{P_{in}}} \quad (10)$$

이 된다. 단, 여기서는 계산상의 편의를 위하여 대역폭

은 $B=1$, 잡음계수는 $F=1$ 로 하였다. 식 (10)에 안테나 프로브면적 $S=80 \text{ mm}^2$, 반파장전압 $V_p=7 \text{ V}$ 로 하고 각 변수에 대표적인 값을 대입하면 검파 가능한 최소 전계강도는 약 10^{-2} V/m 가 된다. 이 값은 Ito 등에 의해서 보고된 참고문헌 7과도 거의 일치하는 값이 된다.

IV. 광센서의 제작과 특성

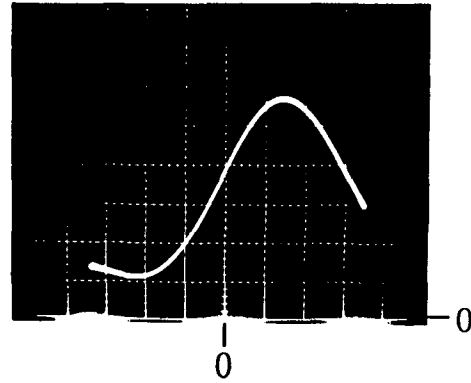
LiNbO_3 광다이오드에 장주기 및 단주기 직류드리프트 현상이 나타나는 것은 잘 알려진 사실이다. 또한, 광변조기가 전계계측 센서로 사용될 경우, 센서의 헤드부는 직류 바이어스전압을 인가하지 않고 구동하는 것이 바람직하며, 센서의 출력은 입력전압에 따라 선형적으로 변해야 한다. 이러한 직류바이어스에 대한 문제는 간섭계 도파로의 길이를 기하학적으로 차이가 나도록 설계하여 광로장을 변경함으로써 해결할 수 있다. 이 방법은 Bulmer^[4] 등에 의해 제안되어 광학적 바이어스 기술로 잘 알려져 있다.

광학적 바이어스를 $\pi/2$ 로 하기 위해서는 광파장의 1/4의 차이가 나도록 간섭계의 도파로를 설계하여야 한다. 설계구조와 도파로의 파라미터는 그림 2에 보였다. 설계 파라미터는 He-Ne레이저($0.633\mu\text{m}$)를 대상으로 하였다. 이러한 조건에서 광도파로는 기본파만 전달되며, Y-분기에서의 손실은 1 dB^[8,9] 이하로 줄일 수 있다.

Z-cut LiNbO_3 기판에 30 nm 의 Ti 을 증착하여 비대칭 광도파로를 제작하였다. 포토리소그래피와 화학적 습식 에칭법으로 광도파로의 패턴을 형성하였다. 도파로의 외확산을 줄이기 위하여 증류수를 통과시킨 산소 분위기 중에서 $1000 \text{ }^\circ\text{C}$, 5시간 동안 열확산시켰다. 그림 3은 제작된 도파로의 간섭현미경 사진이다. 도파로는 폭이 $3.0\mu\text{m}$, 확산깊이는 $1.6\mu\text{m}$ 정도로 실험에 사용하는 광원에 대하여 단일 모드로 여진할 수 있는 양호한 도파로가 제작되었음을 확인하였다. 한편, Z-cut 기판을 이용한 광도파로에서는 온도 변화에 의한 동작점의 드리프트가 발생되므로 이는 안정된 전계계측의 장애요인이 된다. 이의 해결을 위해서는 여러 가지 방법이 시도되고 있으나, 본 실험에서는 SiO_2 버퍼층을 형성하기 전에 LiNbO_3 기판을 일정 시간 플라즈마에 노출시켜서 표면에 얇은 결합층을 만들어 낮은 저항층을 형성하였다. 온도변화에 의해 생성된 잔류전하를 낮은 저

항층을 통하여 누설시키는 방법으로 본 실험에서는 온도 드리프트를 $0.1\text{V}/^\circ\text{C}$ 까지 줄일 수 있었다. 스퍼터링법에 의해 두께 150 nm 의 SiO_2 버퍼층을 형성한 후, 200 nm 두께의 Al 을 전극용 박막으로 증착하였다. 전극은 길이 17.22 mm, 극간 $16.5 \mu\text{m}$, 폭은 $15 \mu\text{m}$ 로 패턴을 형성하였다. 기판의 측면은 편파보존 광화이버를 부착하기 위하여 경면 연마하였다. 마지막으로 동판으로 된 외부 프로브안테나를 기판의 전극에 부착하여 센서를 완성하였다.

센서의 특성을 측정하기 위하여 변조신호를 직접 전극에 인가하였다. 변조기의 출력특성을 그림 4에 보였다. 도파로의 설계시에 예상한 것처럼 인가 바이어스 전압이 0(zero)인 점에서 최대 광강도의 1/2 지점에 센서의 동작점을 정할 수 있는 좋은 특성이 나타났다.



horizontal axis : applied voltage 5V/div
vertical axis : output voltage 5mV/div

그림 4. 완성된 센서의 변조특성
Fig. 4. Modulation performance of the sensor.

V. 저주파 전계계측 실험

피측정전계는 면적 $10 \text{ cm} \times 10 \text{ cm}$ 동판을 사용하여 2.5 cm 간격의 평행판 콘덴서를 만들어서 발생시켰다. 시험전계 신호는 60 Hz, 500 Hz, 100 kHz의 세 종류의 낮은 주파수를 선정하였다. 센서의 헤드부는 면적 $5 \text{ mm} \times 5 \text{ mm}$ 길이 2.5 cm의 테프론 봉으로 지지대를 만들어 고정하였다. 테프론은 비유전상수가 2.05이므로 이러한 테프론 지지대가 피측정 전자계의 교란은 유발하지 않을 것으로 판단된다. 따라서, 전체적으로 제작된 센서의 헤드부에 의한 피측정 전자계의 교란은 무시할 수 있을 정도로 작아서 실험의 결과에는 영향을 미치

지 않는 것으로 예상할 수 있다.

그림 5처럼 전계강도를 검출하기 위한 외부 프로브 안테나는 플레이트형이다. 프로브 안테나의 모양에 따른 센서의 감도차를 확인하기 위하여, 면적 10mm×10mm(안테나 A)프로브, 면적 10mm×5mm(안테나 B) 프로브, 안테나를 부착하지 않은 세 가지의 경우로 나눠서 실험을 실시하였다. 검출된 광신호는 직류성분의 진폭을 측정하기 전에 증폭시켰다. 검파된 광신호가 너무 작을 때는 로크인(lock-in) 앰프를 사용하여 검파된 신호를 증폭하였다.

그림 6, 7, 8은 시험 직류 전계의 크기와 검파된 직류 출력전압과의 관계이다. 이 그림들은 측정주파수 범위에서 두 양들 사이에 선형적인 관계가 성립한다는 것을 나타내고 있다. 그림 6과 7처럼 센서의 감도는 프로브안테나의 크기에 따라 변하는 것을 알 수 있다. 0.1 V/cm, 60Hz 의 시험전계 강도에 대하여 프로브안테나 A의 출력은 10⁻² mV 였고, 프로브안테나 B의 출력은 4.5×10⁻³ mV 였다. 두 개의 서로 다른 안테나의 감도를 비교해 보면 안테나 A의 감도가 안테나 B의 감도

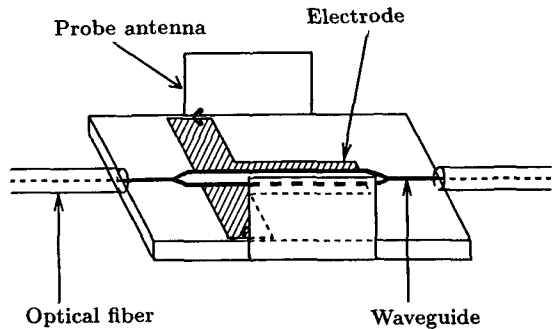
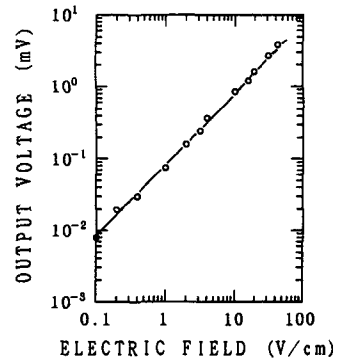
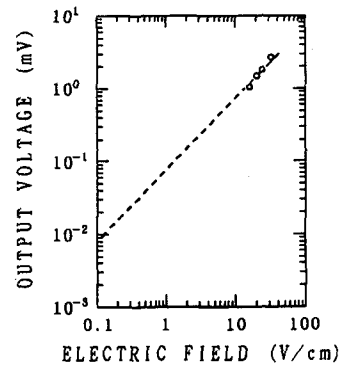


그림 5. 완성된 센서의 구조
Fig. 5. Configuration of the sensor part.



(b)500Hz

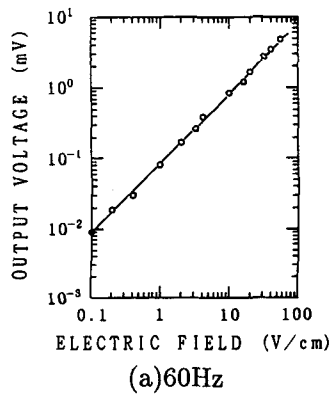


(c)100kHz

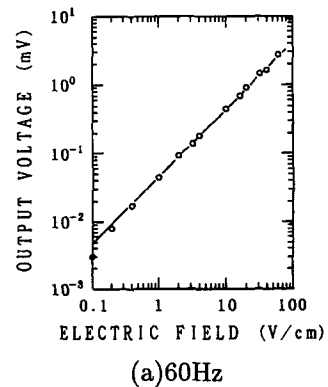
그림 6. 전계측정 실험 결과 (외부전극10 mm×10 mm)
(a) 60Hz (b) 500Hz (c)100kHz

Fig. 6. Results of electric field measurement (External electrodes 10 mm×10 mm).
(a) 60Hz (b) 500Hz (c)100kHz

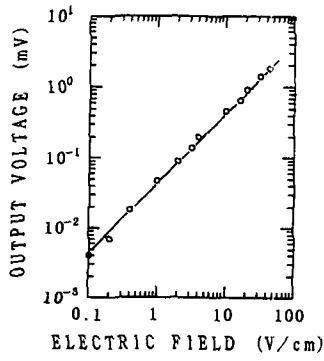
의 약 2 배 정도이다. 프로브안테나를 부착하지 않은 경우에는 본 실험계로는 측정할 수 없는 아주 미약한 광변조 만이 걸렸으며, 주파수에 따른 변화는 거의 없었다. 이 실험의 결과는 식 (7)의 결과와 정량적으로



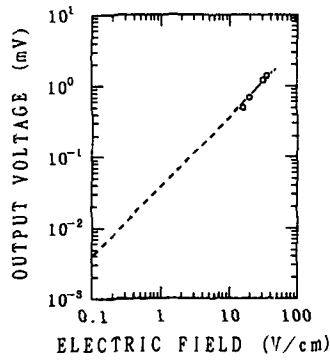
(a)60Hz



(a)60Hz



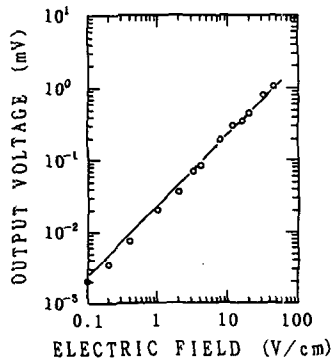
(b)500Hz



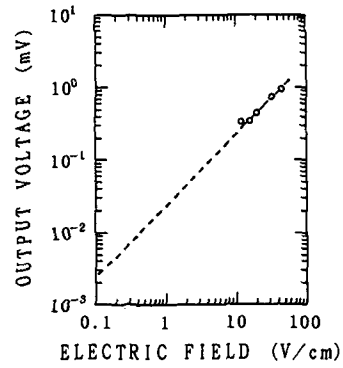
(c)100kHz

그림 7. 전계측정실험결과 (외부전극 10 mm × 5 mm)(a) 60Hz (b) 500Hz (c)100kHz
Fig. 7. Results of electric field measurement (External electrodes 10 mm × 5 mm). (a) 60Hz (b) 500Hz (c)100kHz

일치한다. 그림c 9C에는 출력신호의 파형을 보였다. 측정된 신호의 파형은 거의 왜곡이 없음을 알 수 있다.

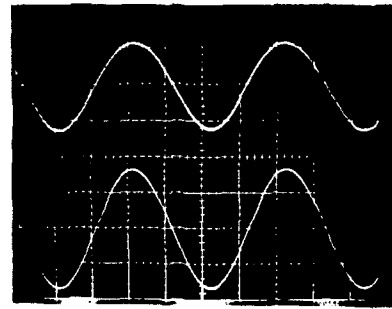


(a)60Hz



(b)500Hz

그림 8. 전계측정실험결과 (외부전극이 없는 경우) (a) 60Hz (b) 500Hz
Fig. 8. Results of electric field measurement (Without external electrodes). (a) 60Hz (b) 500Hz



horizontal axis : time 500μs/div
vertical axis
top : output voltage 2mV/div
bottom :
measured electric field 20 (V/cm)/div

그림 9. 측정된 전자계의 파형
Fig. 9. Observed electric field waveform.

VI. 결 론

비대칭도파로 간섭형 광변조기를 이용한 저주파 전계계측용 센서의 개발을 시도하였다. Ti:LiNbO₃ 광변조기로 계측용 센서를 제작하고 60 Hz 에서 100 kHz 범위에 걸친 전계계측 실험을 실시하였다. 본 실험에서는 0.1 V/cm 에서 60 V/cm 까지의 전계강도를 측정할 수 있었다. 0.1 V/cm 의 감도는 예를 들어 고압전송선 밑에서 ELF(f<3 kHz)의 측정 등의 공학적 응용에 실용화 할 수 있는 대단히 유용한 값이다. 센서의 감도는

외부전극(프로브안테나)의 모양에 따라 민감하게 변하는 것이 확인되었다. 유효면적이 넓은 프로브안테나 일수록 좋은 감도를 나타냈다. 그러나, 너무 넓은 프로브안테나는 전계를 교란시킬 염려가 있으므로 측정하고자 하는 주파수 범위에 따라서 유효면적의 최적화가 필요하다. 앞으로도 이러한 전계센서의 감도와 응답속도를 향상시키기 위해서는 지속적인 연구가 필요하다. 고감도 센서를 실현하기 위해서는 광변조기 그 자체뿐만 아니라 광검파기나 광원의 잡음을 최소화할 위한 연구도 병행할 필요가 있다.

참 고 문 헌

[1] J. Chang, C. N. Vittioe, B. T. Neyer, and W. P. Ballard, "An electro-optical technique for intense microwave measurements," J. Appl. Phys., Vol. 57, No. 11 pp. 4843~4848, 1985.

[2] V. B. Baglikov, R. Y. Dolinin, E. M. Zolotov, V. M. Pelekhatyi, and R. F. Tavlykaey, "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.

[3] C. H. Bulmer, "Sensitive, highly linear lithium niobate interferometers for electromagnetic field

sensing," Appl. Phys. Lett., Vol 53, No. 24, pp. 2368~2370, 1988.

[4] C. H. Bulmer, and W. K. Bruns, "Linear interferometric modulators in Ti:LiNbO₃," IEEE J. Lightwave Technol., LT-2, No. 4 pp. 512~521, 1984.

[5] S. M. Sze, 'Physics of semiconductor devices', John Wiley & Sons, 2nd edn. 1981.

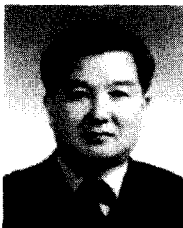
[6] K. tajima, N. Kuwabara, and F. Amemiya, "Highly sensitive electric field sensor using LiNbO₃ optical modulator," IEICE Trans., E-74, No. 7, pp. 1941~1943, 1991.

[7] H. Ito, T. Ichikawa, S. Kato, M. Matsuta, and N. Takahashi, "Measurement of ELF field strength using Ti:LiNbO₃ waveguide modulator," IEICE Technical Report(Japan) EMCJ90-97, 1992.

[8] 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.

[9] T. R. Ranganath, and S. Wang, "Ti-diffused LiNbO₃ branched-waveguide modulators : performance and design," IEEE J. Quantum Electron. QE-13, No. 4, pp. 290~295, 1977.

저 자 소 개



崔 泳 圭(正會員)

1988년 3월 코토대학(일본) 대학원 전자공학과(석사). 1992년 3월 코토대학(일본) 대학원 전자공학과(박사). 1992년 4월 후쿠이대학(일본) 공학부 전자공학과 전임강사. 1998

년 3월~현재 신라대학교 광전자공학과 교수. <주관심 분야: 초고속광통신시스템, 광계측, 광집적회로설계 및 해석, 마이크로웨이브포토닉스, 근접장광응용 등>



金 文 煥(正會員)

1981년 2월 부산대학교 전기공학과(공학사), 1984년 3월 경응의숙대학(일본) 대학원 전기공학과(석사), 1988년 3월 경응의숙대학(일본) 대학원 전기공학과(박사), 1988년

-1992년 요코가와전기(일본) 연구소에서 광응용계측에 관한 연구 수행, 1992년-1998년 한국전기연구소 제어응용연구실 근무, 1999년부터 신라대학교 자동차기계공학과 교수로 재직 중