

I/Q 변조 풀이 방식의 헤테로다인 간섭계를 이용한 미소 전기장 및 복굴절 측정*

윤신영 · 조규만

서강대학교 물리학과

이 용 산

대진대학교 물리학과

(1996년 12월 30일 받음)

편광유지 광섬유를 이용하여 주파수가 안정화된, 두 개의 서로 수직으로 편광된 종모우드를 갖는 He-Ne 레이저 빛을 $LiTaO_3$ 위상변조기로 구성된 센서부(sensor head)로 전달해 줌으로써 원격에서 전기장을 측정할 수 있는 hybrid, heterodyne 간섭식 센서를 구성하였다. In/quadrature-phase 위상변조풀이 방식을 이용하여 전기광학 효과에 의해 서로 수직으로 편광된 두 모우드 사이에 유도된 위상차이를 측정함으로써 항상 높은 감지율을 유지할 수 있는 전기장 센서를 구성하고, 이를 이용하여 광학 물질에 유도된 복굴절도 측정을 할 수 있었다.

I. 서 론

광섬유를 이용하여 원격에서 전기장을 측정하는 방법에서는 주로 전기광학 효과^[1,2]를 많이 이용하고 있다. 전기광학 효과는 전기장에 의하여 반전대칭성을 갖지 않는 결정체에 유도된 복굴절성이며 이를 측정하기 위하여 다양한 방법들이 제시되었다. 특히 광섬유를 이용한 원격센서의 경우 heterodyne 방법^[3,4]이 신호처리 면에서 여러가지 장점을 갖는 것으로 알려져 있다.

Heterodyne 간섭계에서는 주파수가 다르고 서로 수직으로 편광되어 동일한 경로를 전파해 가는 두 빛살을 이용한다. 이 두 빛살의 각각의 편광방향을 전기광학 효과에 의한 복굴절 주축과 같은 방향으로 정렬시키면 전기광학 cell을 투과한 빛들의 편광성분들은 전기장에 비례하여 위상이 지연되게 된다. 따라서, 편광빛살가르개를 사용하여 두 편광성분을 합쳐 주고 광다이오드로 측정하면, 검출된 광전기 신호는 두 편광 성분 사이의 맥놀이 신호로 주어지게 되며, 복굴절에 의하여 유도된 위상변화는 맥놀이 신호에 실리게 된다. 일반적으로 맥놀이 주파수가 라디오파(RF)대역에 속하기 때문에 RF 통신에서 사용되는 전형적인 변조풀이 방식들을 이용하여 전기광학 효과에 의해 유도된 위상 변화를 측정할 수 있다.

이와 같은 heterodyne 검출방식에서 주로 사용되어온 변조풀이 방식들 중 위상잠금고리(phase locked loop)를 사용하는 방법이 제안된바 있으나 검출대역폭(detection bandwidth)이 loop filter에 의하여 제한되고, 전기장이 큰 폭으로 변할 경우 위상잠금을 위한 오차신호(error signal)가 비선형적으로 주어지기 때문에 측정범위(dynamic range)에 한계가 있다. 본 논

문에서는 RF 통신에서 많이 사용되고 있는 I/Q-변조풀이(in-phase/quadrature demodulation)방식을 도입하여 넓은 측정범위를 갖고 검출 대역폭이 넓은 새로운 간섭식 측정법에 대하여 논의하였다.

또한, 이제까지는 서로 수직으로 편광되고, 다른 진동수를 가지며, 동일한 경로를 전파해 가는 신호빛(probe light)을 구성하기 위하여 광음향변조기를 포함하는 복잡한 광학계통이 요구되었으나 우리는 내부거울 공진기(internal mirror)로 구성된 He-Ne 레이저가 두 개의 종모우드로 발진할 경우 이들이 서로 수직으로 편광된다는 He-Ne 레이저의 발진특성^[5,6]을 이용하여 신호빛을 구성하였다. 또한, 넓은 대역폭을 갖는 I/Q-변조풀이기를 사용할 경우 두 개의 종모우드 사이의 주파수 차이 즉, 맥놀이 주파수(우리가 사용한 He-Ne 레이저의 경우 684 MHz)에 해당하는 넓은 검출 대역폭을 가질 수 있다는 장점이 있다.

이러한 heterodyne 측정방법은 전기장뿐만 아니라 광학매질에 유도된 복굴절성의 정밀측정에 활용될 수 있기 때문에 그 용도가 다양하다.

II. Heterodyne 간섭계를 이용한 전기장 측정

전기광학 효과에 대한 이론은 이미 잘 알려져있기 때문에 본 논문에서는 전기광학 효과에 의하여 유도된 선형 복굴절도를 측정하는 방법에 대하여 논의하겠다.

선형 복굴절도를 측정할 수 있는 간섭계에 대한 구성도가 그림 1에 나와있다. 앞에서 언급된바와 마찬가지로 유도된 선형복굴절도를 측정하기 위해서 광원으로는 주파수가 안정화되고 서로 수직으로 편광된 두 개의 종모우드로 발진하는 He-Ne 레이저를 이용하였다. Brewster 창과 같이 편광상태를 선택해주는 부품을 포함하지 않는 내부거울 공진기(internal

*본 연구는 교육부의 기초과학연구소과제(BSRI 96-2415)의 지원을 받아 이루어졌음에 감사의 뜻을 표합니다.

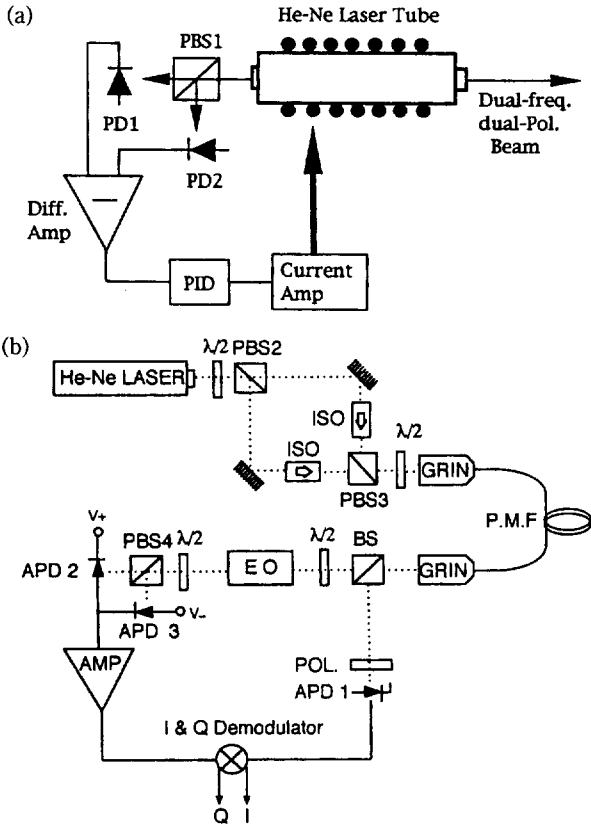


그림 1. (a) 헤테로다인 간섭계 구성을 위한 레이저 안정화 장치
(b) 미소 전기장 및 선형 복굴절 측정을 위한 간섭계 구성도

mirror resonator)로 구성된 He-Ne레이저의 경우 여러 가지 요인에 의한 아주 작은 값을 갖는 광축상의 비등방성(axial anisotropy)과 발진하는 모우드들 사이의 결합효과에 의하여 레이저가 두 개의 종모우드로 발진할 경우 이들이 서로 수직으로 선형편광 된다.^[5,8] 즉, 유효하게 선형 복굴절성을 갖는 공진기가 된다. 이와 같은 He-Ne레이저 튜브(Spectra physics, Model 117A, 공진기 길이 : 22.5 cm)의 발진특성을 이용하여 그림 1(a)에서와 같은 주파수가 안정화된 두 종모우드 He-Ne 레이저를 구성하였다. 레이저의 뒷거울에서 새어나오는 레이저 빛의 고유 편광성분들을 편광빔살가르개(PBS1)를 이용하여 분리시켰으며 각각의 편광모우드의 세기를 광다이오드 PD1과 PD2로 측정하였다. PD1과 PD2에서 출력된 광전신호들을 차등증폭기로 빼어주어 각각의 모우드들의 세기 변화에 대한 차이를 구하였으며, 이를 공진기 길이조절 즉, 주파수 안정화에 대한 되먹임조절고리(feedback control loop)에서 필요한 오차신호(error signal)로 사용하였다. 레이저의 공진기에 감겨진 전열선을 이용하여 레이저의 공진기 길이를 조절하여 줌으로써 서로 수직으로 편광되고 두 개의 종모우드로 발진하는 안정화된 레이저를 구성할 수 있었다. 우리가 제작한 레이저가 상용으로 판매되고 있는 Spectra Physics사의 He-Ne 레이저 정도의 주파수 안정도(약 2 ppb) 정도를 가짐을 두 레이저 사이의 맥놀이 실험을 통하여 확인 할 수 있었다.

안정화된 두 편광모우드 레이저빛은 편광유지 광섬유를 이

용하여 센서부로 전달된다. 이 때 광섬유의 절단면에서 반사된 레이저빛이 다시 공진기로 되먹임되는 것을 막아주기 위하여 그림과 같이 두 개의 편광빔살가르개, 두 개의 λ/2-plate, 두 개의 optical isolator로 구성된 광학계를 이용하였다. 단, 광섬유 단면을 7°~8°정도로 각지게 절단시킬 경우 반사된 빛이 레이저 공진기로 되먹임되지 않기 때문에 그림과 같은 광학계통이 불필요하게 되어 광학계통을 훨씬 간단하게 구성할 수 있다. 편광유지광섬유에서 출력된 레이저빛을 0.25 pitch GRIN렌즈를 이용하여 시준시켰으며 시준된 빛은 다시 빔살가르개(BS)에 의하여 두 갈래로 나뉘어 진다. 이 때 레이저 빛의 두 편광성분이 선형편광상태를 유지할 수 있도록 λ/2-plate를 사용하여 편광축이 편광유지 광섬유의 주축들과 일치 되도록 세심한 주의를 기울였다. 빔살가르개에서 반사된 레이저빛을 기준빔살(reference beam)로 사용하였으며 투과된 레이저빛을 탐사빔살(probe beam)로 사용하였다. 기준빔살의 두편광성분은 이들에 대하여 45°로 정렬된 편광자(polarizer, POL.)에 의하여 합쳐지고 이를 광다이오드 APD1으로 검출함으로써 두 모우드사이의 맥놀이 주파수를 갖는 RF기준진동자(LO)신호를 얻을 수 있었다. 즉, 저대역 필터(low pass filter)를 거치고 난 후 LO 신호는^[1]

$$e_{lo} = RE_x E_y \cos(\Delta\omega t + \Delta\phi_{fiber}) \quad (1)$$

로 주어진다. 여기서 R은 APD1의 responsivity를 나타내며 E_x, E_y 는 각 편광성분들의 크기를 나타내고 $\Delta\phi_{fiber}$ 는 편광유지 광섬유의 복굴절성을 포함하여 여러 가지 요인에 의하여 레이저 빛의 각 편광성분에 유도된 위상의 차이를 나타낸다.

빔살가르개에서 투과된 탐사빔살은 전기광학 변조기를 지남에 따라 외부에서 인가된 전압 또는 $LiTaO_3$ 결정에 인가된 전기장에 비례하여 위상이 변조된다. $LiTaO_3$ 결정은 $LiNbO_3$ 와 같이 3 m군에 속하는 결정으로서 z-축 방향으로 전기장이 인가될 경우 각각의 편광성분에 유도된 위상차이는^[9]

$$\Delta\phi_{eo} = \frac{2\pi}{\lambda} (n_e - n_o)L - \frac{\pi}{\lambda} (n_e^3 r_{33} - n_o^3 r_{13})LE \quad (2)$$

로 주어진다. 여기서 n_e, n_o 는 결정의 주축성분에 대한 굴절율을 나타내고, L은 $LiNbO_3$ 결정의 가로 길이이며, γ_3 는 전기광학텐서 성분을 나타내며, E는 인가된 전기장을 나타낸다. 전기광학변조기를 지난 위상 변조된 레이저 빛은 각각의 편광 방향에 대하여 45°의 각을 갖는 편광 빔살가르개(PBS4)에 의하여 합쳐지고 이를 각각 광다이오드 APD2와 APD3로 검출하여 차등증폭기와 저대역필터(low pass filter)를 거치게 되면 광전신호는

$$e_s = RE_x E_y \cos(\Delta\omega t + \Delta\phi_{fiber} + \Delta\phi_{eo}) \quad (3)$$

로 주어지게 된다.

이와 같은 방법으로 얻어진 광전신호들 e_s 와 e_{lo} 는 각각 I/Q-변조풀이기의 RF신호단과 LO단에 입력되게 된다. I/Q-변조풀이기는 두 개의 mixer로 구성되는 데 입력된 e_{lo} 신호는 3dB-결합기에 의하여 두갈래로 나뉘어져 각각의 mixer의

LO단에 입력되며 또한, e_i 신호는 90° 결합기에 의해 90° 의 위상차이를 갖는 두 개의 신호로 나뉘어져 각각의 mixer의 RF 입력단에 입력된다. RF신호와 LO사이에 위상차이가 없는 경우와 90° 의 위상차이를 갖는 경우에 대한 각각의 mixer로부터의 차이주파수(Intermediate frequency : IF)출력단의 신호를 e_I 와 e_Q 라고 하면 저대역 필터를 거치고 난 후에는

$$e_I = \frac{1}{8} R^2 E_x^2 E_y^2 \cos \Delta\phi_{ev} \quad (4)$$

$$e_Q = \frac{1}{8} R^2 E_x^2 E_y^2 \sin \Delta\phi_{ev} \quad (5)$$

가 된다. e_I 와 e_Q 는 자체 제작한 8-bit A/D 변환기를 사용하여 컴퓨터에 입력시켰으며 입력된 e_I 와 e_Q 를 나누어줌으로써 아래와 같이 위상차에 대한 tangent 함수값을 얻을 수 있다. 즉,

$$\frac{e_Q}{e_I} = \tan \Delta\phi_{ev} \quad (6)$$

또한

$$\Delta\phi_{ev} = \tan^{-1} \frac{e_Q}{e_I} \quad (7)$$

가 되어 RF신호와 LO사이의 위상차를 측정할 수 있다.

우리가 구성한 복굴절도 측정을 위한 간섭계는 I/Q-변조풀이 방식을 사용하여 위상을 측정함으로써 다음과 같은 두드러진 장점들을 갖는다. 첫째로는 식 (6) 또는 식 (7)의 결과에서 볼 수 있듯이 측정된 위상신호가 레이저 빛의 세기변화에 무관하다는 것이다. 따라서 레이저의 세기잡음을 제거하여 줌으로써 양자잡음 한계에 가까운 검지율을 얻을 수 있다. 둘째로는 식 (6)으로 주어진 tangent 함수가 cosine이나 sine 함수에 비하여 기울기가 크거나 같기 때문에 위상값에 상관없이 항상 높은 검지율을 가질 수 있다는 것이다. 따라서 이를 이용하여 광신호처리가 매우 간단하고 신뢰도가 높은 센서를 구성할 수 있다. 셋째로는 RF mixing에 대한 LO를 광섬유를 전파해온 빛의 일부에 대한 맥놀이 신호로 사용하기 때문에 식 (1)과 (2)에 나와 있는 광섬유에 의하여 인가되는 위상차 $\Delta\phi_{fiber}$ 가 RF mixing과정에서 제거된다는 것이다. 광섬유에 가해진 변형, 온도 변화, 주위의 음향잡음 등의 환경에 의한 요인에 의하여 위상잡음이 유도되는데 우리가 제안한 방법에서는 이러한 잡음들에 의한 효과를 전혀 받지않는다.

따라서, 우리가 구성한 간섭계를 이용하여 항상 높은 검지율을 갖는 전기장 센서를 구성할 수 있다. 또한, 이와 같이 두 편광성분에 유도된 위상차이를 측정할 수 있도록 고안되었기 때문에 전기장 측정뿐만 아니라 광학매질에 유도된 복굴절도 측정에도 활용할 수 있기 때문에 그 용도가 다양하다.

III. 실험 결과

그림 1과 같은 간섭계를 구성하였다. 간섭계의 성능을 시험하기 위하여 $\lambda/2$ -plate, $\lambda/4$ -plate 등 복굴절도를 알고있는 매질을 삽입하여 복굴절도를 측정하여 보았다. 그 결과 측정하는 위치에 따라 복굴절도의 차이가 있었으나 제작회사가 명시한

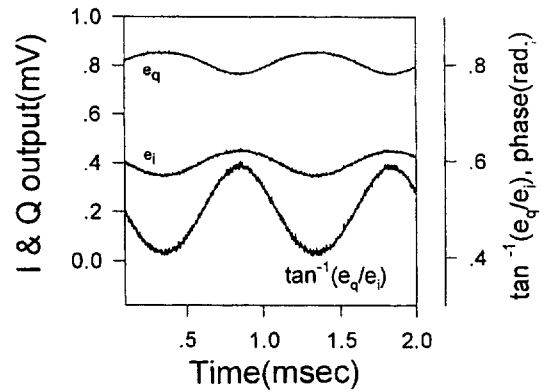


그림 2. 전기 광학 위상 변조기에 정현파(sine파)를 걸어주었을 때 측정된 e_I 및 e_Q 값 그리고 그에 따른 위상 신호 ($\tan^{-1}(\frac{e_Q}{e_I})$)

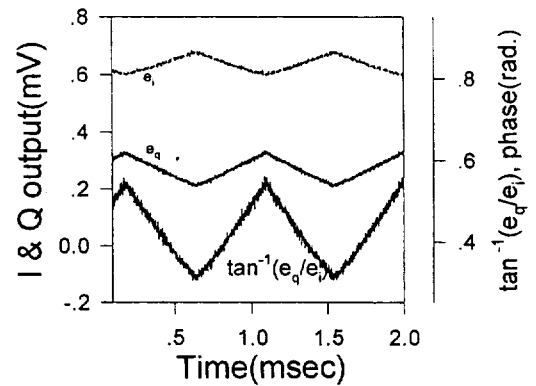


그림 3. 전기 광학 위상 변조기에 톱니파를 걸어주었을 때 측정된 e_I 및 e_Q 값 그리고 그에 따른 위상 신호 ($\tan^{-1}(\frac{e_Q}{e_I})$)

($\lambda/500$)오차범위를 벗어나지는 않았다. 복굴절도가 작은 매질에 대한 측정으로는 Nd:YAG 레이저의 Q-스위칭에 포화흡수체로 사용되는 유기염료 박막에 대한 복굴절도를 측정했으며 그 결과 $\Delta n = 8.39 \times 10^{-7}$ 임을 알 수 있었으며 박막에 stress를 가함에 따라 복굴절도가 변함을 알 수 있었다.^[10] 이로부터 우리가 제작한 간섭계가 복굴절도 측정에 적합함을 알 수 있었다.

전기장 측정에 대한 정량적인 결과를 얻기 위하여 상용으로 판매되고 있는 $LiTaO_3$ 전기광학 변조기(New Focus Co., Model 4002)를 사용하였다. 파형 발생기를 이용하여 전기광학 변조기에 1.1 KHz에 10V sine파 및 톱니파 형태의 전압을 인가하였으며 간섭계로 측정된 위상변조 신호에 대한 결과가 각각 그림 2와 3에 나와 있다. FFT스펙트럼 분석기를 이용하여 최대검지율을 측정하였으며, 그 결과 우리가 구성한 센서로 측정할 수 있는 최소 위상변화값은 약 $25 \mu \text{rad} \sqrt{\text{Hz}}$ 임을 알 수 있었다.

IV. 요약 및 논의

온도를 일정하게 유지시켜 안정화된 He-Ne레이저의 이중

편광, 이중 주파수 특성을 이용하여 전기장 측정을 위한 새로운 형태의 헤테로다인 간섭계를 제작하였다. 상용으로 판매되고 있는 $LiTaO_3$ 물질의 전기광학 위상 변조기에 유도된 선형 복굴절도는 I/Q-변조 풀이기를 이용하여 신호빛의 세기 변화에 관계없는 위상 변화항으로 정량화할 수 있었다. 이 간섭계는 헤테로다인 간섭계를 구성하는 방식으로 광음향 변조기의 사용이나 위상 검출 방식에서 주로 사용되어온 변조풀이 방식들 중 위상잠금고리(PLL) 장치등 오차신호를 줄 수 있는 복잡한 광학계통을 사용할 필요가 없으며 대신, 넓은 대역폭을 갖는 I/Q-변조풀이기를 사용하여 He-Ne레이저의 두 개의 종모드 사이의 주파수 차이 즉, 맥놀이 주파수에 해당하는 넓은 검출 대역폭을 가질 수 있는 장점이 있음을 알았다. 이를 통하여 전기광학 위상 변조기에 sine파 또는 톱니파 형태로 걸어준 전압에 따라 간섭계로 측정된 위상 변조 신호를 컴퓨터로 처리하여 위상값을 구한 결과에 대해 논하였다. 우리가 사용한 위상 변조풀이 방법에서 신호는 전기광학효과 등에 의하여 유도된 위상값에 대한 tangent함수로 주어진다. 모든 위상값에 대하여 tangent함수의 기울기는 sine이나 cosine 함수에 비하여 크거나 같기 때문에 항상 높은 검지율을 유지할 수 있으며 따라서 우리가 사용한 전기광학변조기의 반파장 인가전압값인 $V_{\pi} \sim 210$ V범위내에서 $25 \mu rad \sqrt{Hz}$, 또는 $1.7 mV \sqrt{Hz}$ 의 검지율을 항상 유지할 수 있다는 장점이 있다. 또한, 편광 유

지 광섬유의 단면을 약 7° 정도로 각지게 절단시킬 경우 레이저 빛을 광섬유에 집광시키는데 필요한 구조가 간단해져 다용도의 원격측정용 복굴절 센서를 구성할 수 있다.

참 고 문 헌

- [1] M. Robertson, and A. J. Rogers, IEE Proceedings, **132**, 195(1985)
- [2] Y. K. Choi, M. Sanagi, M. Nakagima, IEE Proceedings-J, **140**, 137(1993)
- [3] D. L. Mazzoni, K. Cho, and C. C. Davis, Opt.Lett., **16**, 614(1991)
- [4] D. L. Mazzoni, K. Cho, and C. C. Davis, IEEE JLT, **11**, 1158(1993)
- [5] Ester K. Hasle, Opt. Commun., **31**, 206(1979)
- [6] Toshihiko Yoshino, J.J. Appl. Phys., **11**, 263(1972)
- [7] E. A. de Oliveira and Jaime Frejlich, Appl. Opt., **28**, 1382(1989)
- [8] 김종희, "헤테로다인 간섭계를 이용한 거리측정과 그 응용," 서강대학교 석사논문(1994)
- [9] A. Yariv, "Optical Electronics" (4th Ed.)(1991)
- [10] 조규만, 이범구, 이신두, "레이저용 큐스위치에 사용되는 유기 염료의 광학적 특성 분석과 제작," 국방과학연구소 연구 결과 보고서(1996)

A new, hybrid, heterodyne, fiber-optic electric field sensor scheme and its applications

Shinyoung Yoon, Kyuman Cho

Department of Physics, Sogang University, Seoul 121-742, Korea

Yongsan Lee

Department of Physics, Daejin University,

Seondan-Ri, Pocheon Kun, Kyongki-Do 487-800, Korea

(Received : December 30, 1996)

A new hybrid, heterodyne, fiber-optic electric field sensor scheme is presented. In this scheme, a dual polarization, dual frequency, stabilized He-Ne laser is used for the light source of the interferometer, Probe beam is delivered to the sensor head using polarization maintaining fiber. In the sensor head, $LiTaO_3$ electro-optic crystal is used for sensing element. Phase retardation is induced on the dual frequency, dual polarization probe beam due to applied electric field across the crystal. Induced phase retardation is demodulated by in-phase and quadrature demodulation technique. In this way, we can obtain optimum sensitivity for electric field measurement regardless a quasi-static phase difference between two polarization components.