

두 종모드 레이저 빛 사이의 맥놀이 신호를 이용한 간섭계에 의한 유효 광학 두께 측정*

윤신영 · 조규만

서강대학교 물리학과

이 용 산

대진대학교 물리학과

(1996년 12월 30일 받음)

서로 수직으로 편광되고 두개의 종모우드로 발진하는 주파수가 안정화된 He-Ne 레이저를 이용하여 넓은 측정 범위를 갖는 헤테로다인 간섭계를 구성하였다. 두 모우드 사이의 맥놀이 주파수인 684 MHz에 대한 라디오 주파수 간섭을 이용하여 약 $\pm 1.74 \mu\text{m}$ 의 분해능으로 광학매질의 광학두께를 측정할 수 있는 장치를 구성하였다. 이와 같은 측정장치를 이용하여 Nd:YAG 레이저의 수동형 Q-스위칭에 포화흡수체로 사용되고 있는 유기염료 박막의 두께와 국부적인 광학두께의 변화에 대한 map을 구할 수 있었다.

I. 서 론

표면의 삼차원 구조,^[1,2] 광학두께에 대한 정밀한 측정^[2,4] 및 위치에 따른 광학두께의 변화에 대한 map^[4]을 구하는 것은 정밀광학부품, 박막, 또는 반도체소자 등의 공정에서 반드시 필요한 기초진단 과정이다. 근래에 표면의 입체 형상이나 절대적으로 광학두께를 측정하는 방법에 대한 여러 가지 방법들이 제안되어 왔으며 아직도 이에 대한 연구가 활발하게 진행되고 있다. 특히 간섭계를 이용하여 광학두께를 측정하는 비접촉식 방법은 대상물의 표면을 손상시키지 않고 광학두께를 측정할 수 있으며, 또한 살아있는 세포 등 단단하지 않고 무른 매질에 대한 측정도 가능하기 때문에 이에 대한 연구가 활발하게 진행되어 왔다.^[1,3]

간섭계를 이용한 광학두께의 측정에는 주로 Haidinger, Newton, Fizeau 간섭계 등이 사용되어 왔는데 장치가 복잡하기 때문에 공정중에 필요한 실시간 진단이 용이하지 않고 공간적인 분해능이 낮기 때문에 대상물의 광학두께에 대한 국부적인 균질도를 측정하기는 어렵다.^[2] 우리는 이러한 간섭계를 이용한 측정방법들의 단점을 보완하기 위하여 두모우드 He-Ne 레이저빛에서의 맥놀이 효과를 이용한 간섭계를 구성하였으며,^[4,5] 이를 이용하여 Nd:YAG 레이저의 수동형 Q-스위칭에 포화흡수체로 사용되고 있는 유기염료박막의 광학두께와 광학두께의 균질도에 대한 map을 구할 수 있었다.

우리가 구성한 간섭계는 두 개의 종모우드 사이의 맥놀이 신호를 이용한 것으로 주파수가 맥놀이 주파수인 684 MHz로 주어지는 합성빛(synthesized light)에 대한 간섭이라고 볼 수 있다. 이와 같은 간섭식 측정방법은 Seta^[6]등이 넓은 범위를

갖는 변위측정에 처음으로 적용하였으며, 진공중에서의 합성 빛의 파장이 약 43.8 cm임을 고려할 때 이제까지 변위 측정이 나 표면구조의 측정 등에 사용되어온 전형적인 homodyne 또는 heterodyne 간섭계를 이용한 방법들에^[7] 비하여 분해능은 현저하게 떨어지나 측정범위가 넓기 때문에 광학두께가 빛의 파장보다 큰 광학적으로 두꺼운 광학매질의 두께측정에 적합하다. 측정에 대한 검지율이 결맞는 빛의 양자잡음한계에 의해서 주어진다고 가정하면 1mW의 He-Ne 레이저를 사용할 경우 이 간섭계를 이용하여 측정할 수 있는 이론적인 최소 광학두께는 $10\text{nm}\sqrt{\text{Hz}}$ ^[6]로 주어지기 때문에 광학적으로 두꺼운 매질의 광학두께를 손쉽게 정밀하게 측정할 수 있다.

우리는 맥놀이 신호에 대한 위상변조풀이(phase demodulation)과정에서 라디오주파수대역(RF)의 통신에서 널리 사용되고 있는 I/Q-위상변조풀이기(in phase and quadrature demodulator)를 사용하였다. 본문에서 자세하게 설명이 되겠지만 I/Q-위상변조풀이기를 이용하는 경우 맥놀이 신호에 실려있는 위상에 대한 tangent 값을 얻을 수 있기 때문에 신호와 기준진동자 사이의 상대적인 위상값에 상관없이 모든 변위의 범위에서 최대의 정확도를 유지할 수 있으며 신호빛의 세기변화에 상관없이 위상을 측정할 수 있다는 장점이 있다.

II. 두 종모우드 사이의 맥놀이 신호를 이용한 광학두께 측정방법

우리가 사용한 광학두께 측정장치에 대한 개략도가 그림 1에 나와있다. 광원으로는 우리 실험실에서 제작한 서로 수직으로 편광된 두 개의 종모우드를 갖는 주파수가 안정화된 He-Ne 레이저를 사용하였다. Brewster 창과 같이 편광상태를 선택해주는 부품을 포함하지 않는 내부거울 공진기(internal

* 본 연구는 1996년 국방 과학 연구소(ADD) 연구 과제에 의해 재정적 지원으로 이루어진 것으로 이에 감사드립니다.

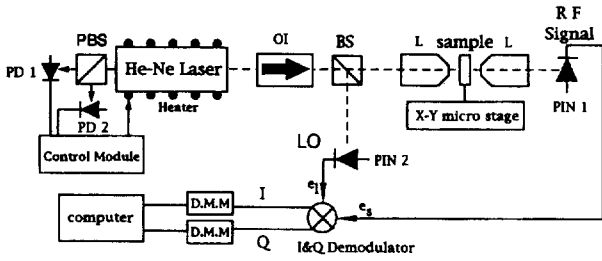


그림 1. 헤테로다인 간섭계를 이용한 유효 광학 두께 측정 실험 장치도

mirror resonator)로 구성된 He-Ne 레이저의 경우 여러 가지 요인에 의한 아주 작은 값을 갖는 광축상의 비등방성(axial anisotropy)과 발진하는 모우드들 사이의 경합효과에 의하여 레이저가 두 개의 종모우드로 발진할 경우 이들이 서로 수직으로 선형편광 된다.^[6-10] 즉, 유효하게 선형 복굴절성을 갖는 공진기가 된다. 이와 같은 He-Ne 레이저의 발진특성을 이용하여 그림 1에서와 같은 주파수가 안정화된 두 종모우드 He-Ne 레이저를 구성하였다. 레이저의 뒷거울에서 새어나오는 레이저빛의 고유 편광성분들을 편광빔살가르개(PBS)를 이용하여 분리시켰으며 각각의 편광모우드의 세기를 광다이오드 PD1과 PD2로 측정하였다. PD1과 PD2에서 출력된 광전신호들을 차등증폭기로 빼어주어 각각의 모우드들의 세기변화에 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 공진기 길이를 조절하여 줄으로써 서로 수직으로 편광되고 두 개의 종모우드로 발진하는 안정화된 레이저를 구성할 수 있었다. 우리가 제작한 레이저가 상용으로 판매되고 있는 Spectra Physics사의 He-Ne레이저(Spectra-Physics, Model 117A) 정도의 주파수 안정도(약 2 ppb) 정도를 가짐을 두 레이저 사이의 맥놀이 실험을 통하여 확인할 수 있었다.

레이저로부터 출력된 빛살은 입력 편광판이 각각의 편광모우드에 대하여 45°로 정렬되어 있는 optical isolator(OI)를 거치게됨에 따라 한방향으로 편광된 두 모우드 빛살을 얻을 수 있다. 이 때 레이저 빛의 세기는 3dB 감소하게 되나 OI를 사용함으로써 초점이 맞춰진 박막면으로 부터 반사된 빛등 광부품으로부터 반사되어 레이저 공진기로 되먹임되는 빛을 차단할 수 있다는 장점이 있다. OI를 투과한 빛살은 빔살가르개(BS)에 의하여 두 개의 경로로 나뉘어 지며 이중 하나의 빛살(BS로 부터 반사된 빛살)을 기준빛살로 사용하고 또다른 빛살(BS로 부터 투과한 빛살)을 신호빛살로 사용한다

따라서 광학 두께 측정에 사용하는 신호빛 \vec{E}_s 와 기준빛 \vec{E}_I 의 전기장 성분은 각각 아래와 같이 주어진다.

$$\vec{E}_s = \frac{1}{\sqrt{2}}(\vec{E}_{10}e^{i(\omega_1 t + \phi_s)} + \vec{E}_{20}e^{i(\omega_2 t + \phi_s)}), \quad (1)$$

$$\vec{E}_I = \frac{1}{\sqrt{2}}(\vec{E}_{10}e^{i(\omega_1 t + \phi_s)} + \vec{E}_{20}e^{i(\omega_2 t + \phi_s)}), \quad (2)$$

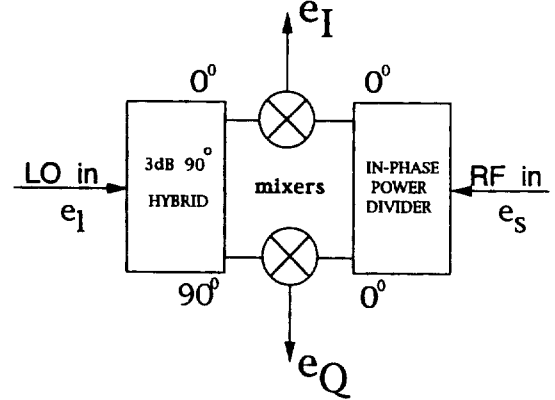


그림 2. I/Q-변조 풀이기에 대한 개략도

여기서 \vec{E}_{j0} , ω_j 는 각각 j 모우드 진폭과 각진동수를 나타내며 신호빛과 기준빛의 위상값은

$$\phi_{jk} = 2\frac{\pi}{\lambda}n(\lambda_j)d_k \quad (3)$$

이다. 여기서 아래 첨자 $j=1, 2$ 이고 $k=l, s$ 를 나타내며 d_k 는 k 에서의 경로를 나타낸다. $n(\lambda_j)$ 는 파장에 따른 물질의 굴절률을 나타낸다. 두 개의 광다이오드 (Opto-electronics, PD10) PIN1과 PIN2로 검출된 신호빛과 표준빛에 대한 광전기 신호는 high pass filter를 거치고 나면

$$e_s = RE_{10}E_{20} \cos(\Delta\omega t - \phi_s) \quad (1)$$

$$e_I = RE_{10}E_{20} \cos(\Delta\omega t - \phi_I) \quad (2)$$

가 된다. 여기서 R 은 광검출기의 responsivity, $\Delta\omega = \omega_2 - \omega_1$ 이고 각각의 위상값은

$$\phi_k = 2\pi d_k \frac{n(v_2)v_2 - n(v_1)v_1}{c} \cong 2\pi d_k \frac{n\Delta v}{c} \quad (6)$$

이다. 따라서 각각의 광다이오드에서 검출된 신호빛과 표준 빛에 대한 맥놀이 신호의 위상은 맥놀이 주파수 Δv 에 대한 경로 차이에 의해서 주어짐을 알 수 있다. 따라서 신호빛과 표준 빛 사이의 절대적인 위상차이는 RF 통신에서 사용되는 신호처리 기법을 적용하여 측정할 수 있으며, 우리는 RF 통신에서 널리 사용되고 있는 소자인 I/Q-변조풀이기를 사용하여 절대적인 위상차이값을 측정하였다.

실험에서 사용한 I/Q-변조풀이기의 구조가 그림 2에 나와 있다. 변조풀이기의 RF단에 입력된 RF 신호 e_s 는 3dB coupler에 의해 두갈래로 나뉘어져 각각 두개의 mixer의 RF단으로 입력된다. 이때 갈라진 신호들 사이의 위상 차이는 0°이다. 마찬가지로 기준진동자(LO)단에 입력된 e_I 도 두갈래로 나뉘어져 각 mixer의 LO 단에 입력되는데 이때 두 갈래로 나뉘어진 LO신호들 사이에는 90°의 위상 차이를 준다. 따라서 LO의 위상값이 0°와 90°로 주어진 mixer들의 IF(intermediate frequency) 출력신호를 각각 e_I 와 e_Q 라고 하면 저대역 필터(low pass filter)를 거치고 나면

$$e_I = \frac{1}{8} R^2 E_{10}^2 E_{20}^2 \cos \Delta\phi \quad (7)$$

$$e_Q = \frac{1}{8} R^2 E_{10}^2 E_{20}^2 \sin \Delta\phi \quad (8)$$

가 된다. 여기서 $\Delta\phi = 2\pi m \Delta v (d_r - d_s) / c$ 로 신호빛과 기준빛이 진행한 경로차이에 의해 유도된 맥놀이 주파수에 대한 위상차 이값이다. e_I 와 e_Q 는 두 개의 digital multimeter(FLUKE, 8840A)로 측정하여 컴퓨터에 입력시켰으며 입력된 e_I 와 e_Q 를 나누어줌으로써 아래와 같이 위상차에 대한 tangent 함수값을 얻을 수 있었다.

$$\frac{e_Q}{e_I} = \tan \Delta\phi, \quad (9)$$

또한

$$\Delta\phi = \tan^{-1} \left(\frac{e_Q}{e_I} \right) \quad (10)$$

가 되어 RF 신호와 LO 사이의 위상차이값을 측정할 수 있다. I/Q-변조풀이기를 사용하여 위상을 측정하는 방법은 다음과 같은 두가지 두드러진 장점이 있다. 첫째로는 식 (9) 또는 식 (10)의 결과에서 볼 수 있듯이 측정된 위상신호가 레이저 빛의 세기변화에 무관하다는 것이다. 따라서 레이저의 세기잡음을 제거하여 줌으로써 양자잡음 한계에 가까운 검지율을 얻을 수 있을 뿐만 아니라, 광학매질에서 빛의 흡수에 따른 세기변화에 상관없이 정확하게 광학두께를 측정할 수 있다. 즉, 특별한 보정이 없이도 매질의 종류에 상관없이 광학두께 또는 굴절률을 측정할 수 있다. 둘째로는 식 (9)가 위상의 tangent 함수로 주어지기 때문에 절대적인 위상값에 상관없이 항상 높은 검지율로 위상변화를 측정할 수 있다는 것이다. Tangent 함수는 모든 위상값에서 cosine 또는 sine 함수에 비하여 기울기가 크거나 같기 때문에 매질의 두께에 상관없이 항상 높은 검지율을 얻을 수 있다.

광다이오드는 항상 강한 세기의 빛으로 조사되고 있으므로 dark current, thermal noise 등 검출기의 전자적인 잡음은 레이저 빛의 양자 잡음에 비하여 무시할 수 있을 정도로 작다. 따라서 위식에서 주어진 위상 측정에 대한 검지율은 양자 잡음

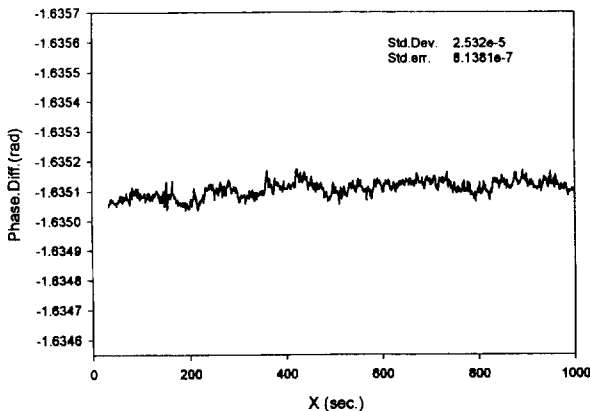


그림 3. 유효 광학 두께 측정에 대한 장시간 안정도 측정

에 의해서만 결정된다고 볼 수 있다. 1mW의 출력을 갖는 He-Ne 레이저를 광원으로 사용하는 경우 양자잡음한계에 의해 주어지는 측정 가능한 최소 위상값 $(\Delta\phi)_{\min}$ 은 약 $\pm 10^{-7} \text{rad}/\sqrt{\text{Hz}}$ 이며, 맥놀이 파장이 약 0.438 m임을 고려하면 우리가 사용한 간섭계로 측정할 수 있는 최소 광학두께의 변화에 대한 이론값 $(n\Delta d)_{\min}$ 은 약 $\pm 7 \text{nm}/\sqrt{\text{Hz}}$ 임을 알 수 있다. 우리가 제작한 간섭계의 경우 검지율은 주변의 환경변화에 의한 잡음에 영향을 받음을 알 수 있었다. 실험실 환경에서 측정된 장시간 안정도에 대한 결과가 그림 3에 나와있다. 이로부터 약 10분 동안의 광학두께 측정에 대한 표준 편차가 약 $\pm 25 \mu\text{rad}$ 임을 알 수 있었는데 이를 광학 두께로 환산하면 약 $\pm 1.74 \mu\text{m}$ 정도임을 알 수 있었다. 신호와 LO 사이의 전체적인 경로차(path imbalance)가 50 cm 이상이며 측정하는 동안 실험실에 3°C 정도의 온도요동이 있었음을 고려할 때 그림 3의 측정결과가 실험실의 온도변화에 의해 주로 영향을 받았음을 알 수 있다. 또한, 국부적인 광학두께의 변화를 측정하기 위하여 현미경 대물렌즈를 사용하였는데 이를 고정시킨 3축 translation stage가 진동에 영향을 많이 받아 잡음요인으로 작용함을 알 수 있었다. 이와 같은 잡음요인들은 간섭계를 최적으로 설계하여 경로차를 줄이고 온도조절이 가능한 소음상자안에 간섭계를 설치함으로써 최소로 줄여줄 수 있다.

III. 유기염료박막의 광학두께 및 광학두께 변화에 대한 map 측정⁽¹¹⁾

그림 1과 같은 간섭계를 이용하여 Nd:YAG 레이저의 Q-스 위칭에 포화흡수체로 사용되는 유기염료박막(Eastman Kodak 15064)에 관한 광학두께를 측정하였다. 이 결과, 박막의 평균 두께는 약 $157 \pm 1.74 \mu\text{m}$ 임을 알 수 있었으며 박막의 두께를 10 μm 의 정확도를 갖는 vernier caliper로 측정해본 결과 약 120 μm 임을 알 수 있었으며 이 결과를 고려하여 볼때 우리가 실험한 유기 염료 박막은 632.8 μm 의 파장에서 굴절률

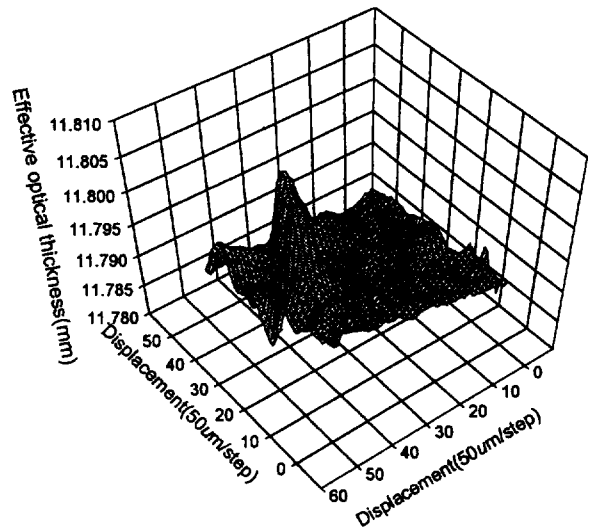


그림 4. 광학 두께 측정의 mapping의 일예

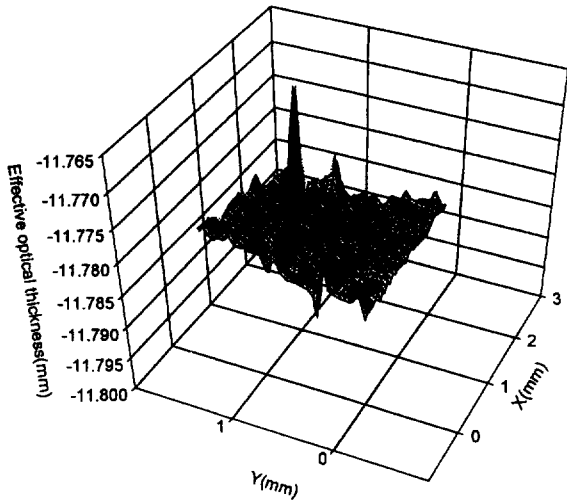


그림 5. 측정 물체에 scratch난 부위의 mapping 예

이 약 1.308로 주어짐을 알 수 있었다.

유기염료박막의 광학두께에 대한 균질도를 측정하기 위하여 박막을 컴퓨터에 interface된 PZT(piezoelectric transducer) 모터(New Focus, MRA 8302)로 위치조절이 가능한 x-y translation stage에 고정시켰다. PZT 모터의 최대 이동속도는 약 0.95 mm/min였으며 이를 구동하는 software상에서 backlash를 보정하였다. NA가 0.4인 현미경대물렌즈를 이용하여 신호빛을 집광시켰으며 이 때 공간적인 분해능을 높이기 위하여 초점이 박막의 중간부분에 위치하도록 정렬(alignment)에 주의를 기울였다. 박막으로부터 투과된 신호 빛은 또다른 현미경 대물렌즈를 이용하여 광다이오드에 집광시켰으며 박막의 위치를 변화시켜가며 국부적인 광학두께의 변화를 측정하였다. scanning한 면적은 약 $3 \times 3 \text{ mm}^2$ 이었으며 이를 50×50 으로 분할하여 측정하였다. 측정결과가 그림 4에 나와있다. 또한, 그림 5는 측정위치를 달리하여 Scanning한 결과이다. 물체가 손상(scratch)되었을 때의 박막의 광학두께의 모습을 보여준다. 그림 4, 5의 결과로부터 우리가 구성한 광학두께 측정장치를 이용하여 박막의 손상부위를 명확하게 진단할 수 있음을 알 수 있었다.

IV. 요약 및 결론

서로 수직으로 편광되고 주파수가 안정화된 두 종모우드의 He-Ne 레이저를 이용하여 비접촉식 방법으로 광학매질의 유효

광학두께를 측정하고 광학두께의 국부적인 변화를 mapping 시킬 수 있는 간섭계를 제작하였다. 라디오파 대역 통신에서 널리 사용되고 있는 I/Q-변조풀이기를 이용하여 신호빛의 세기변화에 상관없이 즉, 광학 매질의 종류와 두께에 상관없이 광학두께를 측정할 수 있었으며, 이 간섭계를 이용하여 Nd:YAG 레이저의 Q-스위칭에 사용되는 유기염료박막의 광학두께 및 굴절율을 구하였다. 또한, 박막의 위치를 변화시켜가면서 광학두께의 변화를 측정하여 이에 대한 map을 구함으로써 박막의 손상부위를 진단할 수 있었다. 이상적으로 이 간섭계를 이용하면 수 nm의 분해능으로 수십 cm 이상의 광학두께를 측정할 수 있으나 우리가 제작한 실험용 간섭계의 경우 path imbalance가 크기 때문에 주변의 온도변화에 영향을 많이 받고, 광학부품을 고정시킨 stage들이 진동에 영향을 많이 받아 장시간 측정에 대한 표준편차가 약 $\pm 1.74 \mu\text{m}$ 임을 알 수 있었다. 이와 같은 환경에 의한 요인은 간섭계를 최적으로 설계하고 온도조절이 가능한 소음상자에 넣어줌으로써 줄여줄 수 있다. 따라서 우리가 제안한 광학두께 측정방법이 정밀 광학부품, 박막, 또는 반도체 소자의 진단에 널리 활용될 수 있으리라고 본다.

참 고 문 헌

- [1] G. L. Bourdet and A. G. Orszag, *Appl. Opt.*, **18**, 225(1979)
- [2] C. J. Van der Laan and H. J. Frankena., *Appl. Opt.*, **27**, 3869(1988)
- [3] E. A. de Oliveira and J. Frejlich., *Appl. Opt.*, **28**, 1382(1989)
- [4] A. D. May and G. Stephan, *J. Opt. Soc. Am*, B6, 2355(1989)
- [5] C. W. See, M. Vaez Iravani, and H. K. Wickra masinghe, *Appl. Opt.*, **24**, 2373(1985)
- [6] Katuo Seta and Tadanao O'ishi, *Appl. Opt.*, **29**, 354(1990)
- [7] K. Cho, D. L. Mazzoni and C. C. Davis, *Opt. Lett.*, **18**, 232(1993)
- [8] D. L. Mazzoni, K. Cho and C. C. Davis, *Opt. Lett.*, **16**, 614(1991)
- [9] E. K. Hasle, *Opt. Commun.*, **31**, 206(1979)
- [10] Toshihiko Yoshino, *J. J. Appl. Phy.*, **11**, 263(1972)
- [11] 조규만, 이범구, 이신두, "레이저용 큐스위칭에 사용되는 유기 염료의 광학적 특성 분석과 제작", 국방과학 연구소 연구 결과 보고서(1996)

Measurement of the Effective Optical Thickness of Optical media Using intermode Beat Interferometer Scheme

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 wide dynamic range heterodyne interferometer scheme using intermode beat between a stabilized, dual frequency He-Ne laser beam has been applied for a measurement of optical thickness of an optical medium. Resolution of the optical thickness measurement is about $\pm 1.74 \mu m$. Using this technique, we are able to determine the optical thickness of an organic dye film. We also obtain a map of the optical thickness variations over a surface of the film