

다층박막에서의 입사광과 반사광의 광로정변화

김문환[†]

신라대학교 공과대학 자동차기계공학과

Ⓣ 617-736 부산광역시 사상구 패법동 산 1-1번지

최영규

신라대학교 공과대학 광전자공학과

Ⓣ 617-736 부산광역시 사상구 패법동 산 1-1번지

(2002년 8월 8일 받음, 2002년 12월 3일 수정본 받음)

광학 반사경에서 일어나는 입사광과 반사광의 광로정변화와 분위기변화와의 관계를 조사했다. 분위기 변화요소로는 기압, 온도, 습도 그리고 CO₂ 함유량 등을 예로 들었다. 이들의 변화에 따른 광로정 변화치의 측정기법을 개발하여 실험 결과로부터 광로정 변화치를 정량화할 수 있음을 보였으며, 습도변화가 광로정의 변화에 가장 큰 영향을 미친다는 것을 확인하였다.

주제어 : optical phase angle/multilayer thin film

I. 서 론

현대산업의 기술력을 뒷받침하고 미래를 위한 기반기술이 되어 가고 있는 광 응용 기술을 높이기 위해서는 광 응용 계측 시스템의 정밀도 향상이 불가결하다고 할 수 있다. 이에는 광 원, 간섭계, 광검출기 등 모든 구성요소의 개선만이 아니라 기존의 광시스템의 오차 범위를 정확히 추출하여 보상할 필요가 있다. 본 연구에서는 이러한 목적으로 광 응용 계측시스템에 사용되는 필수요소인 유전체 박막 광반사경에서의 입사광과 반사광의 광로정의 변화에 초점을 두었다. 즉, 광학적 실험에서 추산되어 온 환경분위기조건의 변화에 따라 발생하는 입사광과 반사광의 광로정의 변화를 실험적으로 고찰한다.^[1-3] 이에 본 연구에서는 레이저광원과 차동광간섭계, 광검출기, 컴퓨터시스템, 샘플의 유전체 다층박막 그리고 비교용으로 Au반사경으로 구성된 측정시스템을 구축하였다. 시스템에서 입사광과 반사광의 광로정의 변화는 광비트신호의 위상변화로 측정된다. 분위기 파라미터로는 기압, 온도, 습도, 그리고 CO₂ 농도를 변화시켜 각 파라미터 값의 변화가 주는 광로정의 변화를 측정하였다. 그 외에 실험적으로 관측하기 어려운 다층박막의 각박막의 두께오차로 인하여 발생하는 입사광과 반사광의 위상차의 크기에 관하여 컴퓨터 시뮬레이션에 의하여 그 값을 구해 보았다.^[4-6]

이 닦는 다층박막의 표면이 반사면이 아니라 박막층 내부에 가상의 반사면이 존재하는 것처럼 보이게 한다. 이 가상의 반사면은 반사경의 광학적 특징만이 아니라 거울을 에워싸고 있는 환경의 변화에 따라 움직인다고 생각할 수 있다. 즉, 환경 변화에 따라 발생한 입사광과 반사광의 광로정 변화는, 광비트신호의 위상의 변화로 관측된다. 환경의 변화로는 공기 굴절률 계산식에 나오는 기압, 온도, 습도, CO₂ 농도 등의 변화를 생각 할 수 있다.^[4,5]

그림 1은, 어떤 환경의 변화로 다층박막에서 가상의 반사면이 (a)에서 (b)로 움직이는 것을 나타낸다. 이 움직임은 신호광과 참조광으로 만들어지는 광비트신호를 통하여 확인을 할 수가 있다. 유전체 박막표면에서 입사광과 반사광사이의 위상의 불연속적인 관계에 대한 원인과 그 값을 실험적으로 확인하기 위하여 측정시스템을 구축하였다. 측정시스템의 개념도를 다음 그림 2에 보인다. 그림(a)는 측정용 광간섭계 개념도

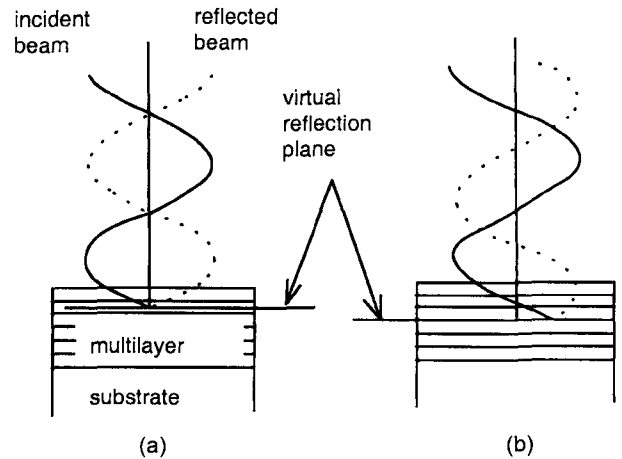


그림 1. 광 위상변화.

II. 유전체 다층박막에서의 광로정변화와 측정시스템

2.1. 광로정 변화

다층박막에 있어서 반사광의 위상은 박막내의 각층간의 경계면에서의 복합굴절률의 합에 의하여 결정된다. 이는 입사광

[†]E-mail: mhkim@silla.ac.kr

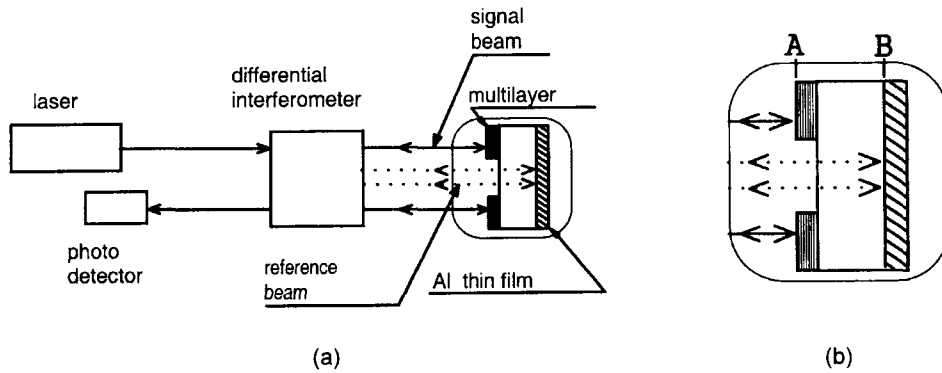


그림 2. 측정시스템.

이며, (b)는 측정용 샘플을 확대한 그림으로 A, B간의 거리가 신호광과 참조광의 광로차가 된다.

시스템은 레이저광원, 공간섭계, 광검출기, 신호광과 참조광에 대하여 두 종류의 서로 다른 반사면을 갖는 샘플반사경으로 구성되어 있다.

광원은 고정밀도 위상값을 측정할 수 있는 헤테로다인 간섭법을 사용하기 위하여 He-Ne레이저를 사용하였으며, 간섭계는 신호광과 참조광의 광경로의 차이에 의한 오차를 최소화하기 위하여 차동공간섭계를 사용하였다. 광원에서의 광은 차동공간섭계에서 신호광과 참조광으로 나뉘어진 후 각각 측정용 유전체 다층박막과 참조용 Al 반사막에 2회씩 입사, 반사된다. 반사된 광들은 다시 공간섭계 내에서 광간섭을 일으켜 광검출기에서 광비트신호로 검출된다. 광비트신호의 크기는 광위상값으로 환산된다. 분위기조건의 변화에 따라 측정용 유전체 다층박막에서 다층박막과 Al박막사이의 광로차가 변화하여 입사광과 반사광의 위상차의 변화가 생기면 광비트신호가 바뀌며 전기신호로 위상차를 검출할 수 있게 된다.

다음에 차동공간섭계에서의 광비트신호의 위상 변화에 대한 관계식을 나타낸다.

$$\Delta M = 4 \cdot (\Delta n_t \cdot t - x) / \lambda \quad (1)$$

여기서, ΔM 는 광비트신호의 변화, Δn_t 는 기판의 굴절률변화 그리고 t 는 기판의 두께이다. x 는 그림 1에서 보이는 가상 반사면의 변위를 나타낸다. λ 는 입사광의 파장이다. (1)식으로부터 광비트 위상변화 ΔM 과 기판의 두께와 기판의 굴절률 변화인 $\Delta n_t \cdot t$ 를 구하면, 가상 반사면의 변위 x 를 계산할 수 있다.

2.2. 다층박막의 샘플

측정용 샘플인 유전체 다층박막은 입사광인 광파장 633 nm에 97%이상의 반사율을 갖도록 설계 제작된 것이다. TiO₂, SiO₂, CeO₂ 그리고 MgF₂가 각각 1/4 광파장의 두께로 순서대로 증착되었으며 총 24층이다.

한편으로 유전체 다층박막의 실험결과의 비교대상으로 측정 샘플과 같은 구조의 Au박막반사경도 실험샘플로 준비하였다. Au박막은 유전체 박막반사경에 비하여 박막의 조밀도가 보다 높다고 할 수 있다. 즉, 유전체 박막보다 환경변화를 덜 받는다고 간주할 수 있기 때문이다.

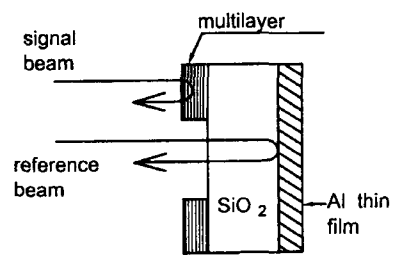


그림 3. 기압, 습도, CO₂ 농도에 대한 위상차 측정용 샘플.

위의 유전체 박막과 Au박막반사경의 샘플을 사용하여 각각 대기환경의 변화에 대하여 입사광과 반사광의 위상변화를 관찰 측정하였다. 반사경샘플은 측정대상에 따라 다른 파라미터의 간섭을 배제하고자 각각 다른 구조의 반사경을 준비하였다. 다음에 측정대상별로 준비된 샘플 반사경을 보인다.

(1) 기압, 습도, CO₂용 샘플

그림 3에 기압, 습도, CO₂ 농도에 대한 위상차 측정을 위한 샘플을 보인다. 기판은 직경 25 mm, 두께 6 mm의 원판형이다. 유전체 박막은 측정면으로 기판의 전면에 증착되었으며, Al 박막은 참조면으로 기판의 후면에 증착하였다. 이 참조면은 기판의 후면에 증착되어 있으므로 참조광은 그림 3에서 보이는 바와 같이 주위의 환경과 완전히 격리된 부분에서 반사된다. 즉, 주위환경의 변화로부터 오는 광학적 변화를 막을 수 있다. 전면에 증착하게 되면, 환경의 변화로부터 오는 Al 박막의 광학적 특성의 변화와 오차, 그리고 Al 박막의 두께 오차 등에 기인하는 값들을 특정지어 보상하기 어려운 점이 있다. 기판으로는 고풍력 레이저용 SiO₂가 사용되었다. 이는 다른 재료의 기판에 비하여 열팽창률이 매우 낮으며, 광흡수율도 낮기 때문이다.

(2) 온도용 샘플

그림 4에 온도변화에 대한 위상차를 측정하기 위한 샘플을 보인다. 그림 3의 샘플과 같은 치수이다.

온도용 샘플의 경우에는 (1)식의 기판에서의 $\Delta n_t \cdot t$ 의 항에 따른 값과 참조반사면의 열팽창에 따른 오차를 없애기 위하여 참조반사면으로 기판의 표면을 사용하였다. 기판재료로는 고반사율을 갖는 TiO₂를 사용하였다. 반사면의 뒤쪽은 뒷면에서의 반사광의 영향을 없애기 위하여 표면에 광산란처리를 하였다. 실험에는 기압, 습도, CO₂농도의 변화에 대한 측정오차를

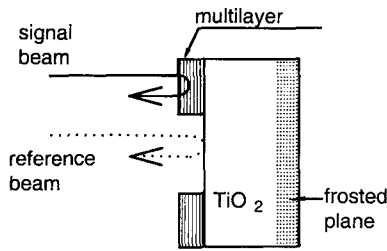


그림 4. 온도변화에 대한 위상차 측정용 샘플.

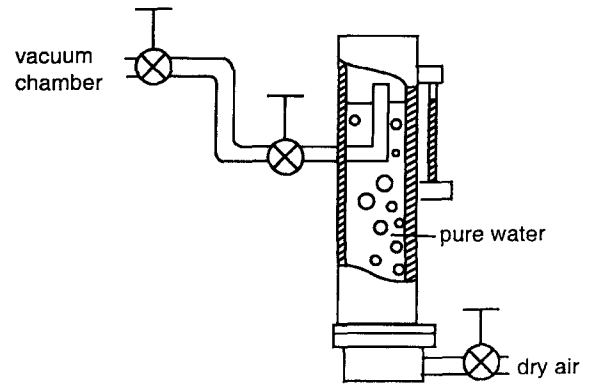


그림 6. 습도발생기.

분리하기 위하여 진공분위기 상태에서 실험을 하였다.

(3) 측정시스템의 안정도측정용 샘플

측정용 다층박막경을 사용하기 전에 우선, 측정시스템의 안정도를 확인하였다. 안정도 측정용 샘플로는 평면경을 사용하였다. 평면경을 사용함으로써 신호광과 참조광을 같은 면에서 반사시켜, 시스템의 안정도를 확인 할 수 있다. 평면경에는 높은 반사율을 얻을 수 있는 Au 증착 반사경을 사용하였다. 반사경은 다른 파라미터 값의 변화에 따른 오차를 막기 위하여 진공용기안에 장착하여 진공분위기 속에서 온도의 변화에 따른 시스템의 안정도를 확인하였다. 측정된 오차 값은 광위상 변화실험에서 보상하였다.

2.3. 측정시스템

측정시스템의 개략도를 그림 5에 보인다.

시스템은 2파장광원과 광검출기, 차동광간섭계, 측정대상인 유전체 다층박막 샘플, 진공용기, 컴퓨터시스템, 진공펌프, 습기발생기로 이루어져 있다. 샘플의 다층박막은 진공용기 내에 장착되어 있다. 진공용기는 실험대상 파라미터가 아닌 대기 중의 다른 파라미터의 변화에 영향을 받는 것을 막기 위하여 설치하였다. 기압의 변화는 건조된 공기를 사용하여 2×10^{-3} mmHg에서 800 mmHg까지 변화를 시켰다.

습도의 변화는 거품식 습도발생기를 사용하여 구현하였다. 습도 발생기의 구조를 그림 6에 보인다.

온도변화는 $\pm 0.05^\circ\text{C}$ 의 고정밀도를 갖는 센서를 사용하여 구현하였다. 실험에는 실내온도부근인 20°C 전후하여 온도변화를 두었다. CO₂ 농도는 각각 0, 250, 750, 1300 ppm인 4종류의

표준공기를 사용하여 실험을 하였다.

2.4. 두께 오차에 대한 시뮬레이션

다층박막의 두께오차에 관한 광위상 변화의 값은 시뮬레이션에 의하여 구하였다. 흔히 광학용 다층박막은 사용되는 광원의 광파장에 맞추어 원하는 반사율을 얻기 위하여 서로 다른 굴절률을 가진 여러 가지 유전체를 다층 증착하여 제작한다. 각 박막의 광학적 두께는 사용되는 광파장의 1/4값이 되도록 제작하는 것이 일반적이다. 그러나 제작 시 각 박막층의 두께를 엄밀히 제어하기 어려우며 완성품의 두께를 정확히 측정하는 것도 매우 어렵다고 할 수 있다. 제작된 광학경의 성능은 기계품의 표준품과 광학적 특성을 비교하는 것이 일반적이다. 그러므로 실험에 앞서 측정하고자하는 광학경의 박막두께의 오차에 따른 광위상 변화의 크기를 알아둘 필요가 있다. 이러한 목적으로 샘플 다층박막의 수치모델을 다음과 같이 확립하였고 시뮬레이션에 의하여 그 값을 구하였다.

다층박막은 특성행렬로 표현된다. 입사광의 전기장, 자기장벡터의 탄젠트성분이 각 박막 층에서 연속이라고 가정하면 다층박막의 양단에서의 전기자기장 방정식은 다음과 같이 표현된다.

$$\begin{pmatrix} E_0 \\ H_0 \end{pmatrix} = M \cdot \begin{pmatrix} E_{l+1} \\ H_{l+1} \end{pmatrix} \tag{2}$$

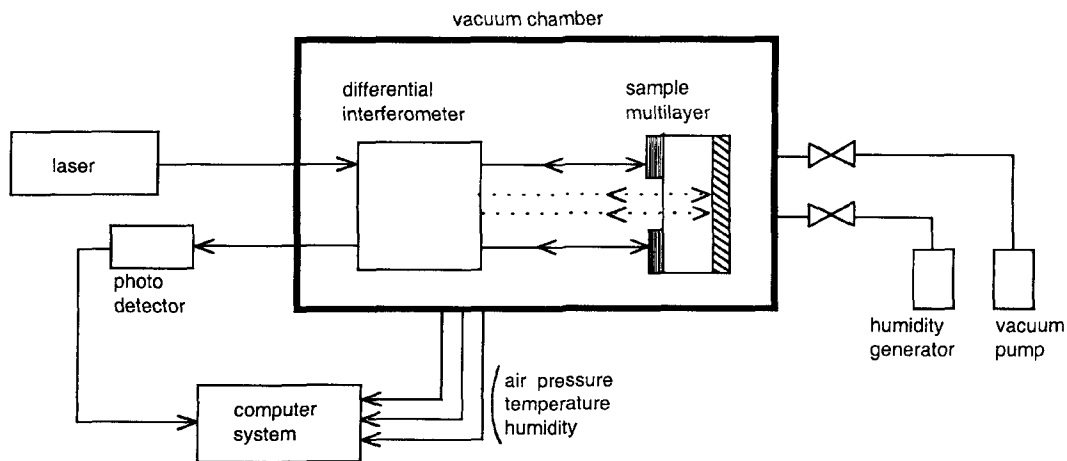


그림 5. 측정시스템의 개략도.

여기서, E_0 는 다층박막을 통과하기전 경계면에서 입사전기장과 반사전기장의 합으로 이루어지는 총전기장의 크기이며 E_{t+1} 는 다층박막을 통과한 후 투과전기장의 크기이다. H_0 와 H_{t+1} 도 각각 다층박막을 통과하기 전과 후의 자기장의 크기이다. M 은 다층박막의 특성행렬이다. 이 값은 (3)식에 보이는 각층의 행렬식에서 얻어진다.

$$M = \prod_{j=1}^n M_j = \begin{vmatrix} \cos \delta_j & i\eta_j^{-1} \sin \delta_j \\ i\eta_j \sin \delta_j & \cos \delta_j \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} m_{11} & m_{12} \\ m_{21} & m_{22} \end{vmatrix} \quad (3)$$

여기서, M_j 는 j 번째 박막의 특성행렬이다. η_j 는 입사면에 수직성분인 $n_j \cos \phi_j$ 과 입사면에 평행한 성분을 갖는다. δ_j 는 $(2\pi/\lambda)n_j d_j \cos \phi_j$ 이다. n_j 는 굴절률이며 d_j 는 j 번째 박막의 두께이고, ϕ_j 는 j 번째 입사각이다. 다층박막 양단에서 본 굴절법칙은 다음과 같다.

$$n_0 \sin \phi_0 = n_j \sin \phi_j \quad (4)$$

방정식 (2)-(4)에 광학상수를 입력함으로써 광위상의 차를 구할 수 있다.

III. 실험 및 시뮬레이션 결과

측정시스템의 안정도 실험결과와 각 파라미터의 변화에 따른 광로정 변화에 대한 실험, 그리고 시뮬레이션결과를 다음에 보인다. 실험 및 시뮬레이션결과는 (1)식을 이용하여 차동광간섭계의 광비트신호의 위상변화를 가상반사면의 변위 값으로 나타냈다. 즉, 신호광의 광로정이 길어지면 음의 값, 반대로 짧아지면 양의 값을 나타낸다.

(1) 시스템 안정도

먼저, 샘플로 Au 증착 평면경을 사용하여 시스템 안정도 측정실험을 하였다. 측정된 결과를 그림 7에 보인다. 실험은 가급적 온도변화를 억제하며 25, 26°C부근에서, 진공도는 2×10^{-3} mmHg의 값을 유지하면서 측정하였다.

실험결과에서 보이는 주기적인 노이즈는 차동광간섭계의 코히런트 노이즈이다. 그 크기는 시스템허용치 내인 ± 5 nm 범위내의 값을 보인다. 그림에서, 온도변화에 대한 시스템의 안정도는 -0.2 nm/°C의 값을 보이고 있다.

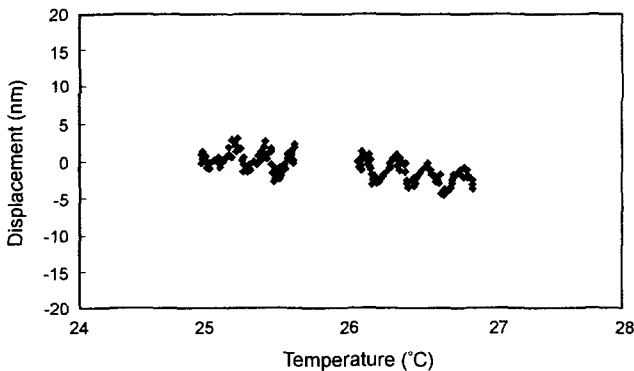


그림 7. 시스템안정도.

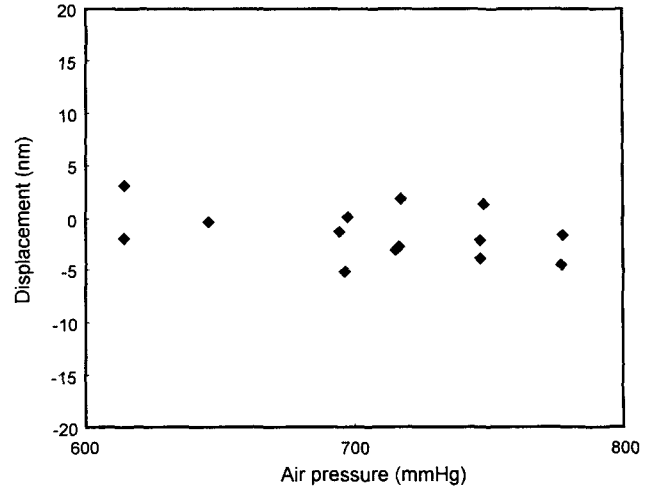


그림 8. 기압변화에 대한 실험결과.

(2) 기압변화

기압변화의 실험은 진공공기를 사용하여 진공에서 800 mmHg까지 기압을 천천히 변화시키며 광비트신호의 위상변화를 측정하였다. 그림 8에 대기압 부근에서의 실험결과 값을 보인다. 실제, 산업현장에서 사용되는 대기압 부근에서 얻어진 실험결과는 시스템의 안정도 범위 내에 있음을 확인할 수 있다. 기압변화 실험의 경우에도 보이는 주기적인 노이즈는 차동광간섭계의 코히런트 노이즈이며, 그 크기는 시스템허용치 내인 ± 5 nm 범위내의 값을 보인다.

(3) 온도 변화

온도변화의 경우에는, 시스템안정도의 측정시 사용한 Au증착 평면경 대신 상기 그림 4의 온도용 샘플을 진공용기 내에 장착하여 실험을 하였다. 분위기는 2×10^{-3} mmHg이하의 진공상태를 유지하였다. 그림 9에 20°C에서 약 22°C까지 연속적으로 온도를 변화시켜 측정된 결과를 보인다. 그 결과 가상반사면의 변위는 약 -1.8 nm/°C의 기울기를 보였다.

(4) CO₂변화

그림 10은 CO₂변화량에 대한 가상반사면의 변위 측정결과이다. CO₂함유량의 경우 연속적인 변화가 어려우므로 함유량이 250, 750, 1300 ppm인 CO₂ 표준공기를 사용하였다. 진공상

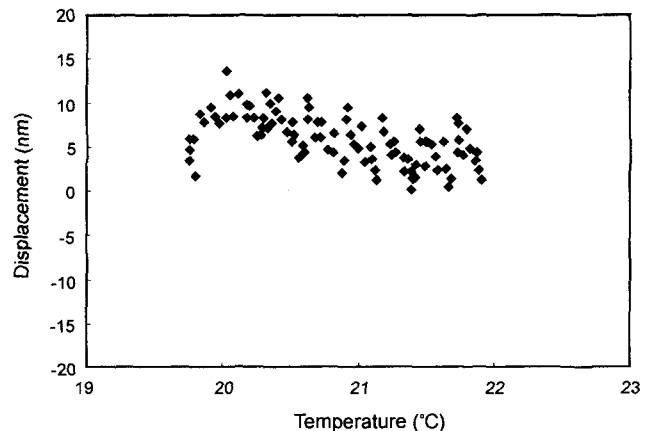


그림 9. 온도변화에 대한 실험결과.

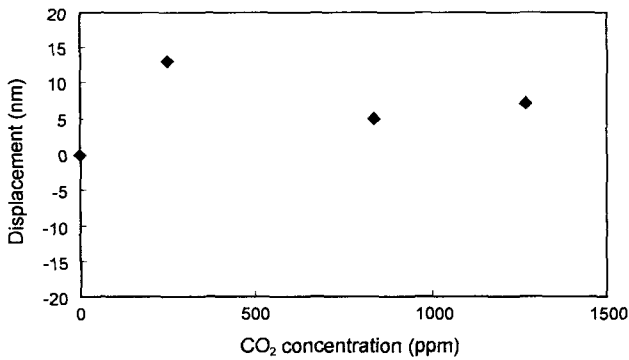


그림 10. CO₂변화량에 대한 실험결과.

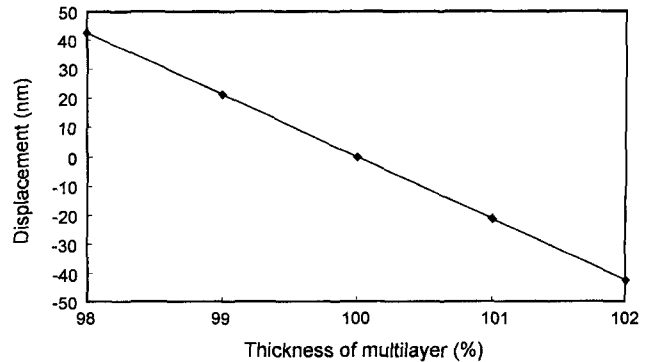


그림 12. 두께오차에 대한 시뮬레이션결과.

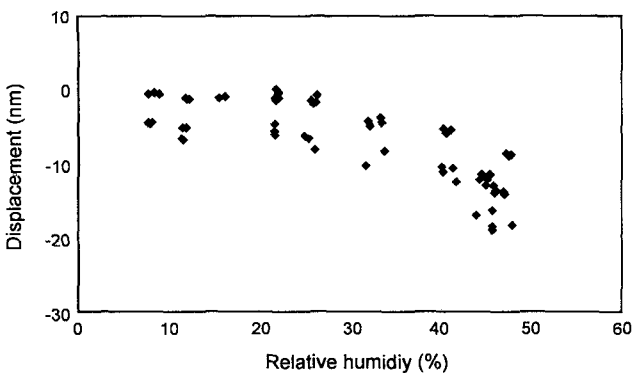


그림 11. 습도 변화에 대한 실험결과.

표 1. 유전체 다층박막과 Au박막의 실험결과

	Dielectric Multilayer	Au Thin Film
Temperature	-1.8 nm/°C	0.9 nm/°C
Air Pressure	-1.1 nm/760 mmHg	-
Humidity	-45 nm/100%RH	0.7 nm/100%RH
CO ₂ Concentration	0.2 nm/300 ppm	-

을 보인다.

이러한 실험결과 및 시뮬레이션 결과로부터 종합적 광로정은 다층박막의 조밀도와, 대기환경에 의해 영향을 받는다는 것을 확인 할 수 있었다. 특히 습도시험결과에서 유전체 다층박막이 Au박막에 비하여 변화의 폭이 큰 이유로는 유전체 다층박막의 경우, 제작시 형성되는 다층박막의 조밀도가 Au박막에 비하여 낮기 때문으로 유추된다.^[9-11] 이점이, 광로정 변화에 미치는 영향이 크다고 추측되며 앞으로의 연구과제라 할 수 있겠다. 그 외, 다른 환경 변화 실험결과에서 다층박막과 동일한 조건에서 측정된 Au박막의 실험결과는 거의 위상의 변화를 보이지 않는 것이 확인되었다. 이는 Au박막의 실험결과를 본 실험의 유효성을 검토하는 참조 값으로 사용할 수 있다는 것을 의미하며 본 실험 및 실험결과의 유효성을 뒷받침해준다는 것을 알 수 있다.

IV. 결 론

유전체 다층박막에서의 입사광과 반사광의 위상차의 변화는 환경분위기의 변화에 영향을 받는다는 것을 확인하였으며 그 값을 실험적으로 정량화하였다. 환경분위기로 공기 굴절률의 값을 결정짓는 가장 중요한 4가지 파라미터를 대상으로 하여 실험을 하였다. 4가지 파라미터의 변화는 다른 파라미터의 간섭을 배제하기 위하여 진공용기 속에서 각각 구현되었으며 측정대상 파라미터에 따라 측정기법 및 샘플의 구조를 고안했다. 실험에는 TiO₂, SiO₂, CeO₂ 그리고 MgF₂가 각각 순서대로 증착된 24층 유전체 다층박막이 사용되었다. 샘플 측정과 동시에 실험결과의 검증용으로 Al, Au박막을 사용하여 측정기법의 유효성을 확인하였다. 실험결과, 유전체 다층박막의 경우, 광위상 변화에 가장 영향을 끼치는 파라미터가 습도의 변화인 것이 확인되었다. 그 값은 약 -45 nm/100%RH 정도의 기울기를 보였다.

태에서 측정대상의 CO₂ 표준공기를 서서히 주입하여 기압을 상승시킨 후, 대기압 분위기의 일정기압을 유지하며 각각 측정하였다. 측정결과, 250 ppm를 제외하고는 대체로 CO₂ 함유량 변화에 대한 영향은 적어 보인다고 할 수 있다.

(5) 습도변화

그림 11에 습도변화에 따른 실험결과를 보인다. 습도는 0%RH에서 50%RH 범위 내에서 변화시켰다. 습도변화 실험시, 반사경에 수분의 응결이 생기지 않도록 하기 위하여 습도의 최대 조정량을 50%RH로 제한하였다. 먼저 건조한 공기의 대기압 분위기에서 그림 6의 습도 발생기를 사용하여 습도에 변화를 주었다. 습도의 변화는 진공용기내에서 측정하였다. 측정결과, 습도 변화에 따른 가상 반사면의 변위는 약 -0.45 nm/%RH의 기울기를 보였다.

(6) 두께오차

마지막으로 유전체 24층 다층박막의 두께가 설계치의 100±2%의 오차를 보일 때 나타나는 가상 반사면의 변위 값을 시뮬레이션으로 구해 보았다. 그림 12에 그 결과를 보인다.

결과에서 확인 할 수 있듯이 두께오차가 가상반사면의 변위에 매우 중요한 요소로 작용한다는 것을 알 수 있다.

(7) 비교용 Au박막

위의 실험결과들의 비교대상으로 행한 Au박막의 실험결과는 모두 측정시스템의 안정도 범위인 ±5 nm내에 들었다. 표 1에 유전체 다층박막과 Au박막의 대기환경 조건에 대한 실험결과를 정리하였다. 특히, Au박막의 실험결과에서 Au박막의 경우 유전체 박막에 비하여 습도의 변화에 대하여 안정된 값

참고문헌

- [1] 박민철, 김승우, “두 파장 백색광 간섭계를 이용한 금속물질의 단차측정,” 한국광학회지, 제11권, 5호, pp. 317-322, 2000.
- [2] G. Macrelli, E. Poli, H. Demiryont, and R. Gotzelmann, “Optical measurements and modeling of an all solid state inorganic thin film electrochromic system,” *J. Monocrystalline Solids*, 218, pp. 296-301, 1997.
- [3] H. Matsumoto, “Study of optical change on metal surface,” Extended Abstracts, The 49th Autumn Meeting, The Japan Society of Applied Physics, No. 3, pp. 759, 1988.
- [4] S. Ogura, Ph.D. Thesis, Newcastle upon Tyne Polytechnics, England, 1975.
- [5] S. Ogura, H. A. Macleod, “Water sorption phenomena in optical thin films,” *Thin Solid Films*, 34, pp. 371-375, 1976.
- [6] H. A. Macleod, “Thin film optical filters,” Adam Higer, London, 1969.
- [7] J. Tominaga, T. Nakano, and N. Atoda, “Double optical phase transition of GeSbTe thin films sandwiched between two SiN layers,” *Jpn. J. Appl. Phys.* 37(4A), pp. 1852-1854, 1998.
- [8] Z. L. Wu, “Photothermal sensing techniques for thin-film characterization,” in *Materials Characterization and Optical Probes Techniques*, vol. CR69, SPIE Proc. pp. 326-356, 1997.
- [9] D. Bhattacharyya, N. K. Sahoo, S. Thakur, and N. C. Das, “Spectroscopic ellipsometry of multilayer dielectric coatings,” *J. Vac. Technol.* 60, pp. 419-424, 2001.
- [10] Y. Suzuki, S. Nagaoka, and Y. Uenishi, “Direct Monitoring of Thickness and Refractive Index of Optical Thin Film Deposited on Fiber End-face,” *Optical review*, vol. 6, no. 1, p. 77, 1999.
- [11] 류태욱, 김동진, 김석원, 한성홍, “이온 보조 증착한 Ta₂O₅ 광학 박막의 광학적 및 기계적 특성 분석,” 한국광학회, 제 11권, 3호, pp. 147-151, 2000.

The variation of optical pass length between incident and reflective beam in multilayer thin film

Moonhwan Kim[†]

Department of Automotive Engineering, Silla University, Busan 617-736, KOREA

[†]E-mail: mhkim@silla.ac.kr

Young-Kyu Choi

Department of Photonics, Silla University, Busan 617-736, KOREA

(Received August 8, 2002, Revised manuscript December 3, 2002)

The variation of the optical pass length between incident and reflective beam in a multilayer thin film reflection mirror is investigated. This variation is caused mainly by environmental parameters around the optical system, such as the air pressure, temperature, humidity and CO₂ concentration. In this paper, a new method for measuring optical pass length variation is proposed. This optical pass length is measured against the above parameters by experiment. From the experimental results, it is clarified that the optical pass length is mostly effected by humidity changes.

Classification codes : OM.020, SM.030.