

Division-of-Amplitude-Photopolarimeter를 이용한 초고속 타원계의 설계

김상열[†] · 김상준

이주대학교 물리학과

☎ 442-749 수원시 팔달구 원천동 산5번지

(2001년 2월 22일 받음, 2001년 5월 11일 수정본 받음)

편광자나 검광자가 장착된 모터를 회전시키는 기계적인 변조방식이나 압전소자에 조화진동하는 교류전압을 가하는 위상변조 방식에 기초를 둔 일반적인 편광변조 및 편광상태 측정 방식에 의존하지 않고 움직이지 않는 광분할기와 편광자를 통과한 빛의 세기를 측정하는 DOAP 방식으로 편광상태를 측정하기 때문에 광검출소자 및 전자회로의 반응시간에 의해 그 시간분해능이 결정되는 새로운 방식의 초고속 타원계를 설계하였다. 이 초고속 타원계는 수 ns의 시간분해능을 가지고 있음을 확인하였으며 상변화기구 같은 동적기구를 연구하는 도구로의 응용 가능성을 검토하였다.

분류코드 : SM.020.

I. 서 론

빛은 횡파 고유의 특성인 편광특성을 가진다. 빛의 편광상태는 두 직교하는 기저편광의 일차결합으로 나타낼 수 있으며 주어진 평면에서 반사하는 빛의 경우 입사면에 수직하게 진동하는 s파와 입사면에 나란하게 진동하는 p파를 각각 기저편광상태로 설정하여 일반적인 빛의 편광상태를 나타낼 수 있다. 빛이 시료 표면에서 반사하면 그 편광상태가 달라지는데, 반사광의 위상변화가 박막의 두께에 예민하게 비례한다는 사실이 Drude에 의해 발견된 후 초기에는 박막의 두께 정밀측정 등의 용도로 사용되다가 위상과 진폭을 동시에 측정하는 이 위상측정법의 장점이 부각되며 점차 다양한 분야의 연구에 사용되고 있다. 타원법(ellipsometry)으로 불리는 이 방법은 빛을 흡수하는 물질의 복소굴절율을 동시에 결정할 수 있는 장점으로 인하여 최근 Ge₂Sb₂Te₅(GST)와 같은 상변화형 광기록 매체의 굴절율 및 소광계수를 측정하는 데에도 유용하게 사용되고 있다. 더구나 타원계(ellipsometer)를 사용하는 방법은 GST 등의 상변화 과정을 측정하는 일반적인 광학적인 방법인 반사를 측정방법에 비해 연속적으로 일어나는 두 단계의 상변화 과정(그림 1)을 구분해내며 각 단계의 상변화과정을 규정짓는 기본상수인 Avrami 상수들을 결정할 수 있게 하는 장점을 보여주었다.^[1-3]

한편 보편적으로 사용되는 타원계는 회전검광자(회전편광자) 방식이나 회전보정기 방식 또는 위상변조방식이 주를 이루고 있다. 회전검광자 방식이나 위상변조방식의 타원계는 모터를 이용하여 검광자(편광자)나 보정기를 회전시키거나 압전소자에 변조전압을 가하여 위상을 변조시키는 방법에 의존하므로 하나의 타원상수쌍(Δ, Ψ)을 얻는데 수십 μ s에서 수십 ms의 측정시간을 필요로 한다. 따라서 GST와 같은 시료의 상변화 과정을 이 정도의 시간 분해능으로 측정하기 위해서는 상변화

가 비교적 천천히 일어나는 온도인 135°C 전후에서 실험을 행하여야 하였다(그림 1). 그러나 상변화형 광기록매체인 GST에 실제로 테이터를 기록 및 소거하는 온도영역에서는 그 상변화 과정이 수십 ns 이내에서 일어나는 것으로 알려져 있으며[4] 따라서 비정질상 또는 결정상으로 변하는 상변화과정을 실시간으로 관찰하기 위해서는 수 ns의 시간 분해능을 가지는 초고속 타원계가 필요하다. 빠른 데이터 획득 속도를 가지는 타원계로서 최근 ZLE(Zeeman Le-Poole ellipsometer) 방식의 고속 타원계가 보고되었으나^[5,7] 이 ZLE 방식의 타원계도 시간분해능이 μ s 정도에 그치며 상변화 과정을 실시간으로 측정하고 분석하기 위해 필요로 하는 ns의 시간분해능을 가진 초고속 타원계로의 발전가능성은 희박하다. 본 연구에서는 기계적 변조방식이나 전기적 변조방식 또는 간섭방식에 바탕을 둔 기존의 편광상태 측정 개념을 탈피하여 새로운 원리에 바탕을 둔 진폭분할 편광측정기(Division-of-amplitude photopolarimeter, DOAP)^[6]를 이용한 초고속 타원계를 설계하고, 그 실현가능성을 확인하였다.

II. 스톱스 변수

1852년 스톱스(Stokes)에 의해 제안된 스톱스 변수(Stokes parameter)는 빛의 편광상태를 기술하는 강력한 방법이다. 스톱스 변수는 z축 방향으로 진행하는 빛의 두 직교하는 전기장 성분을 각각 E_x와 E_y라고 할 때, 이들의 시간에 따른 평균값으로 나타낸다. 즉 전기장이 다음과 같이 시간의 변수로 주어질 때,

$$\begin{aligned} E_x(t) &= E_{0x} e^{i\delta_x} e^{i\omega t} \\ E_y(t) &= E_{0y} e^{i\delta_y} e^{i\omega t} \end{aligned} \quad (1)$$

편광상태는 아래식과 같이 시간에 따라 변하는 타원의 방정식으로 나타낼 수 있다.

[†]E-mail: sykim@ajou.ac.kr

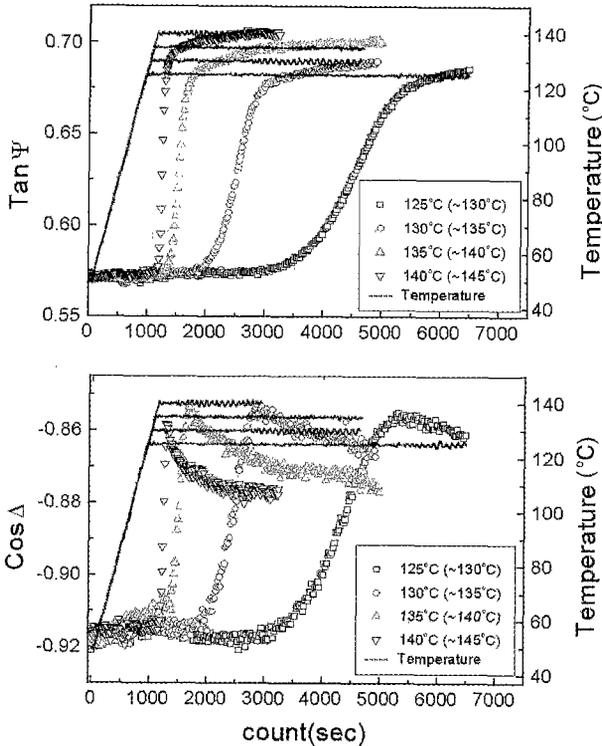


그림 1. 상변화형 광기록매체인 Ge₂Sb₂Te₃의 온도에 따른 결정구조의 변화를 반영하는 타원상수(tan Ψ, cos Δ)의 변화. 진폭정보인 tan Ψ에서는 일반적인 반사율과 비슷한 변화만을 관찰할 수 있으나 위상정보인 cos Δ에서는 두 단계의 상변화에 의한 변화를 뚜렷이 구분하여 관찰할 수 있다. 상변화 온도의 증가에 따라 상변화가 급격하게 일어난다.^[1,2]

$$\frac{E_x^2(t) + E_y^2(t)}{E_{0x}^2 + E_{0y}^2} - \frac{2E_x(t)E_y(t)}{E_{0x}E_{0y}} \cos \delta = \sin^2 \delta \quad (2)$$

여기에서 $\delta_e = \delta_y - \delta_x$ 는 위상차를 나타낸다. 위 타원의 방정식은 대개 한 주기의 시간동안 평균을 취한 형태로 표현된다.

$$\frac{\langle E_x^2(t) \rangle + \langle E_y^2(t) \rangle}{E_{0x}^2 + E_{0y}^2} - \frac{2\langle E_x(t)E_y(t) \rangle}{E_{0x}E_{0y}} \cos \delta = \sin^2 \delta \quad (3)$$

직교하는 두 전기장성분으로부터 편광을 나타내는 4개의 스톡스변수는 각각 다음과 같은 식으로 정의된다.

$$\begin{aligned} S_0 &= E_{0x}^2 + E_{0y}^2 \\ S_1 &= E_{0x}^2 - E_{0y}^2 \\ S_2 &= 2E_{0x}E_{0y} \cos \delta \\ S_3 &= 2E_{0x}E_{0y} \sin \delta \end{aligned} \quad (4)$$

이 4개의 스톡스변수는 완전 편광상태 뿐만이 아니라 무편광이나, 부분편광 등의 일반적인 편광상태도 분명하게 기술할 수 있게 한다. 따라서 스톡스변수를 결정함으로써 임의의 편광상태를 완전하게 기술할 수 있으며 스톡스변수를 측정하는 한가지 전형적인 방법으로 90°의 지연각을 갖는 위상지연자와 선편광자를 이용한다.

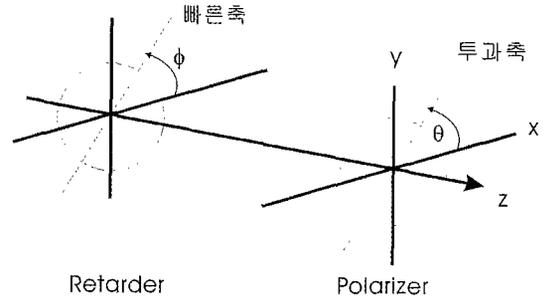


그림 2. 90도의 위상지연각도를 가지는 위상지연자와 선편광자를 사용하여 스톡스변수를 측정하는 전형적인 방법.

그림 2와 같은 배치에서 위상지연자의 빠른축이 x축과 ϕ 의 각도를 이루고 있으며 빠른축과 느린축의 위상지연각도를 90도라고 하자. 선형편광자의 투과축이 x축과 이루는 각도인 방위각이 θ 이며 위상지연자에 입사하는 빛의 전기장이 식 (1)과 같을 때 선편광자를 통과한 빛의 세기는 다음과 같다.

$$\begin{aligned} I(\theta, \phi) &= \frac{1}{2}[(E_x E_x^* + E_y E_y^*) + (E_x E_x^* - E_y E_y^*) \cos 2\theta \\ &\quad + (E_x E_y^* + E_y E_x^*) \cos \phi \sin 2\theta + i(E_x E_y^* - E_y E_x^*) \sin \phi \sin 2\theta] \end{aligned} \quad (5)$$

이 빛의 세기를 4개의 스톡스변수를 사용하여 나타낼 수 있으며 그 표현은 다음과 같다.

$$I(\theta, \phi) = \frac{1}{2}[S_0 + S_1 \cos 2\theta + S_2 \cos \phi \cos 2\theta + S_3 \sin \phi \sin 2\theta] \quad (6)$$

따라서 위상지연자의 방위각과 선편광자의 방위각을 바꾸어가며 측정된 빛의 세기로써 스톡스변수를 결정할 수 있으며 몇 가지 간단한 방위각의 조합으로 스톡스변수를 결정하는 방법을 식 (7)으로 제시하였다.

$$\begin{aligned} S_0 &= I(0^\circ, 0^\circ) + I(90^\circ, 0^\circ) \\ S_1 &= I(0^\circ, 0^\circ) - I(90^\circ, 0^\circ) \\ S_2 &= 2[I(45^\circ, 0^\circ) - I(0^\circ, 0^\circ) - I(90^\circ, 0^\circ)] \\ S_3 &= 2[I(45^\circ, 90^\circ) - I(0^\circ, 0^\circ) - I(90^\circ, 0^\circ)] \end{aligned} \quad (7)$$

III 진폭분할 편광측정기(Division-of-amplitude photopolarimeter, DOAP)

위상지연자와 선편광자를 사용하는 방법 외에도 스톡스변수를 결정할 수 있는 방법으로 진폭분할 편광측정기(Division-of-amplitude photopolarimeter, DOAP)를 이용하는 방법이 있다. DOAP를 구성하는 핵심 편광소자는 입사한 빛을 반사광과 투과광으로 나누는 광분할기(Beamsplitter, BS)와 분리된 각각의 빛을 서로 직교하는 두 개의 선편광으로 다시 나누어주는 두 개의 올라스톤 프리즘(Wollaston prism, WP)이다. 그림 3에서와 같이 광분할기를 지나며 분리된 빛은 각각 올라스톤 프리즘을 통과하며 4개의 서로 다른 편광상태의 빛으로 나누어지며, 이들의 세기를 측정하는 4개의 광 검출기로 DOAP의 기본 구조가 완성된다.

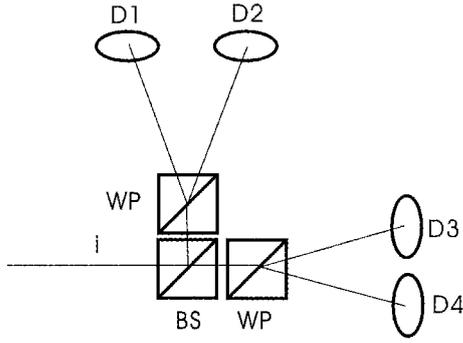


그림 3. DOAP의 기본 구성을 보여주는 개략도. 1개의 BS와 2개의 WP, 4개의 광 검출기로 이루어져 있다.

DOAP를 사용하여 다음과 같이 스톡스변수를 구할 수 있다. 광분할기로 입사하는 빛의 편광상태를 나타내는 스톡스벡터를 S_i 라 할 때, 광분할기에 의하여 갈라진 빛 중 반사된 빛의 스톡스벡터 S_r 과 투과한 빛의 스톡스벡터 S_t 는 광분할기의 반사 특성 Mueller행렬인 $R=(r_{ij})$ 과 투과특성 Mueller행렬인 $T=(t_{ij})$ 을 사용하여 다음 식과 같이 쓸 수 있다.

$$\begin{aligned} S_r &= R \cdot S_i \\ S_t &= T \cdot S_i \end{aligned} \quad (8)$$

한편 방위각이 θ 인 이상적인 선편광자의 편광작용을 나타내는 Mueller행렬에서 첫 번째 행으로 만들어진 벡터 $P(\theta)$ 는 다음과 같다.

$$P(\theta) = \frac{1}{2}(1, \cos 2\theta, \sin 2\theta, 0) \quad (9)$$

따라서 시료면에서 반사한 빛이 광분할기를 통과한 뒤 각각 θ_1, θ_2 의 방위각을 갖는 올라스톤 프리즘을 통과하게 되면 각각의 광 검출기에서 검출되는 빛의 세기는 아래식과 같다.

$$\begin{aligned} I_1 &= P(\theta_1) \cdot R \cdot S_i \\ I_2 &= P(\theta_1 + \pi/2) \cdot R \cdot S_i \\ I_3 &= P(\theta_2) \cdot T \cdot S_i \\ I_4 &= P(\theta_2 + \pi/2) \cdot T \cdot S_i \end{aligned} \quad (10)$$

이 식은 다시 식 (11)과 같이 광분할기와 2개의 올라스톤 프리즘의 편광작용을 나타내는 특성행렬 4×4 의 특성행렬 $M(m_{ij})$ 와 입사광의 편광상태를 나타내는 스톡스벡터 S_i 의 곱의 형태로 쓸 수 있다.

$$I = M \cdot S_i \quad (11)$$

여기서 특성행렬 $M(m_{ij})$ 의 성분은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} m_{1j} &= r_{1j} + r_{2j} \cos 2\theta_1 + r_{3j} \sin 2\theta_1 \\ m_{2j} &= r_{1j} - r_{2j} \cos 2\theta_1 - r_{3j} \sin 2\theta_1 \\ m_{3j} &= t_{1j} + t_{2j} \cos 2\theta_2 + t_{3j} \sin 2\theta_2 \\ m_{4j} &= t_{1j} - t_{2j} \cos 2\theta_2 - t_{3j} \sin 2\theta_2 \end{aligned} \quad (12)$$

단 $j=1, 2, 3, 4$ 이다. 마지막으로 식 (11)을 역변환하여 입사광의 스톡스벡터에 관한 표현을 구하게 된다.

$$S_i = (S_0 S_1 S_2 S_3)^T = M^{-1} \cdot I \quad (13)$$

M 행렬은 구성하는 편광소자인 광분할기와 올라스톤 프리즘의 Mueller행렬로부터 바로 계산할 수 있다. 즉 광분할기와 올라스톤 프리즘의 Mueller행렬을 각각 M_{BS}, M_{WP} 라 하면 $M = M_{WP} M_{BS}$ 가 된다. 그러나 한편으로는 M 을 실험을 통하여 직접 측정할 수도 있다. 즉 그림 2에서와 같이 위상지연자와 선편광자를 이용하여 광학계에서 이들의 방위각을 조정하며 만든 서로 다른 4개의 편광상태에 있는 빛을 각각 DOAP에 입사시켜 4개의 광 검출기에서 측정되는 빛의 세기들로부터 식 (11)에 따라 M 행렬을 구하면 된다.

IV. 실험 장치

DOAP는 기계적으로 회전시키거나 전기적으로 위상을 변조하는 등의 능동적 편광소자에 의존하지 않고 정적인 편광소자를 사용하여 빛의 편광상태를 측정하는 방법이기 때문에 DOAP를 이용하는 타원계의 데이터 획득속도는 빛의 세기를 측정하는 광 검출소자의 반응시간과 측정된 광세기를 A/D변환하는 신호처리 속도에 따라 결정된다. 본 실험에서 사용된 광 검출소자는 ThorLabs사의 DET210로써 반응시간이 1 ns이며 빛의 세기를 디지털신호로 변환시키기 위해서는 채널당 500MHz의 주파수대역을 가지는 4채널 디지털 오실로스코프(Yokogawa, DL7100)를 사용하여 역시 1 ns의 시간분해능을 가지도록 하였다.

먼저 본 광 검출장치의 작동을 확인하기 위하여 고휘력 Nd-YAG 레이저(B. M. Industries : ND 6000)의 2차 고조파를 OPO(optical parametric oscillator, DCP 6000)를 거쳐 펄스폭이 7ns가 되도록 한 다음 이 펄스를 검출하여 보았다. 그림 4에서 7 ns의 펄스폭을 갖는 레이저의 세기 변화를 잡아내며 광 검출소자와 디지털 오실로스코프의 조합으로 된 본 광 검출장치가 ns의 시간분해능으로 데이터를 얻을 수 있음을 확인할 수 있다.

DOAP 방법을 이용한 ns의 시간분해능을 갖는 초고속 타원

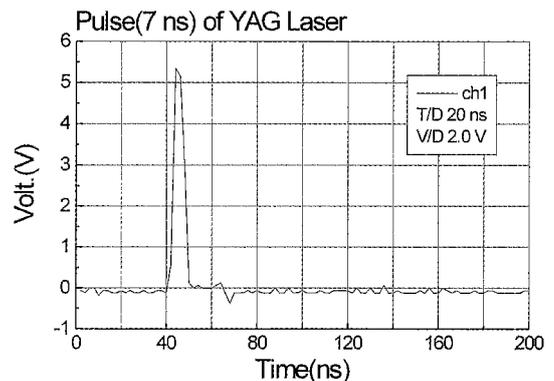


그림 4. 7 ns의 펄스폭을 가지고 있는 고휘력 Nd-YAG/OPO 레이저의 펄스폭을 측정된 결과.

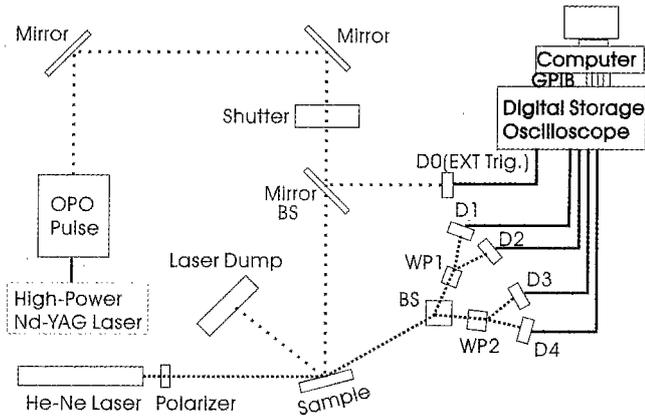


그림 5. DOAP 방법을 편광상태에 사용하여 구성한 ns의 시간분해능을 갖는 초고속 타원계의 기본구조.

계의 기본적인 구조는 그림 5에 나타난 바와 같다. 시간을 1/1000초부터 수 초까지 조절할 수 있는 셔터를 이용하여, 가변 파장 고휘력 Nd-YAG/OPO 레이저에서 10 Hz의 반복율로 방출되는 레이저 펄스열 중에서 단일 펄스만을 시료에 입사시킨다. 입사하는 빛의 일부는 광분할기를 이용하여 오실로스코프의 외부트리거신호 단자와 연결된 광 검출소자로 보냈다. 타원상태를 제어하기 위해서 DOAP로 입사하는 빛은 632.8 nm의 He-Ne 레이저에서 방출되는 직선편광을 $\lambda/2$ 위상판을 통과시켜 원편광으로 만든 다음 원하는 방위각으로 세팅된 선편광자를 거치도록 하였다. 시료는 c-Si 기층 위에 빛의 투과 깊이보다 두껍게 입혀진 결정화된 GST를 사용하였다. 외부트리거 단자에 신호가 입력될 때 디지털 오실로스코프의 4개 채널

로 입력되는 신호의 A/D변환이 시작되도록 즉 동기화된 A/D변환이 되도록 광 검출기를 설정하였다.

V. 전산시능 및 실험결과에의 검토

먼저 비정질 GST가 결정질 GST로 바뀌는 과정에서 나타나는 굴절율의 변화가 본 초고속 타원계의 각 광 검출기에 미치는 영향을 측정되는 빛의 세기변화 계산을 통하여 파악하고자 하였다. 전산시능을 위하여 He-Ne 레이저 광원에서 방출되는 빛은 방위각이 $+45^\circ$ 인 선편광자를 지난 후 GST 시료 표면에서 반사하고 측정되는 빛의 세기변화는 비정질 GST에서 결정질 GST로 바뀌면서 나타나는 시료의 Mueller행렬의 변화를 식 (11)에 적용하여 구하는 근사적인 방법을 사용하였다. GST가 결정화될 때 그림 1에서 관측된 타원상수($\tan \Psi$, $\cos \Delta$)를 이용하면 Mueller행렬의 변화는 다음 식과 같이 주어진다.

$$M(\Psi, \Delta) = \begin{pmatrix} 1 & -\cos 2\Psi & 0 & 0 \\ -\cos 2\Psi & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \sin 2\Psi \cos \Delta & \sin 2\Psi \sin \Delta \\ 0 & 0 & -\sin 2\Psi \cos \Delta & \sin 2\Psi \sin \Delta \end{pmatrix} \quad (14)$$

광분할기는 ZnS기판 위에 78 nm 두께의 MgF_2 를 입힌 시료를 입사각이 78.33° 가 되도록 비스듬히 정렬하여 사용하였다.^[5] 올라스톤 프리즘의 광축이 입사면과 이루는 방위각은 각각 $0^\circ, 30^\circ, 45^\circ, 60^\circ, 90^\circ$ 로 설정하고 각각의 경우에 광 검출기에서 측정되는 빛의 세기변화를 계산하여 그림 6에 나타내었다. 결정화과정동안 광분할기에서 반사된 빛은 올라스톤 프리

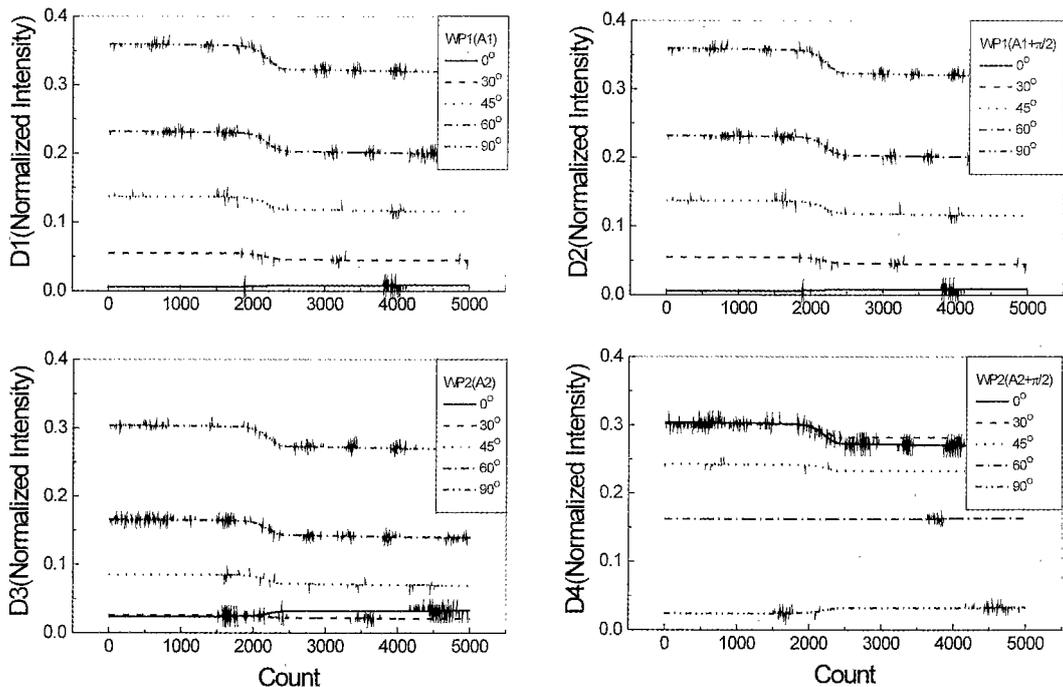


그림 6. 비정질 GST가 결정질 GST로 변함에 따라 각 광 검출기에서 측정되는 빛의 세기 변화를 전산시능 계산한 그래프. D1, D2에서는 올라스톤 프리즘의 방위각도 90도 일 때 가장 큰 변화를 보이지만 D3와 D4의 경우 30도 일 때 공통적으로 비교적 큰 변화를 보여준다

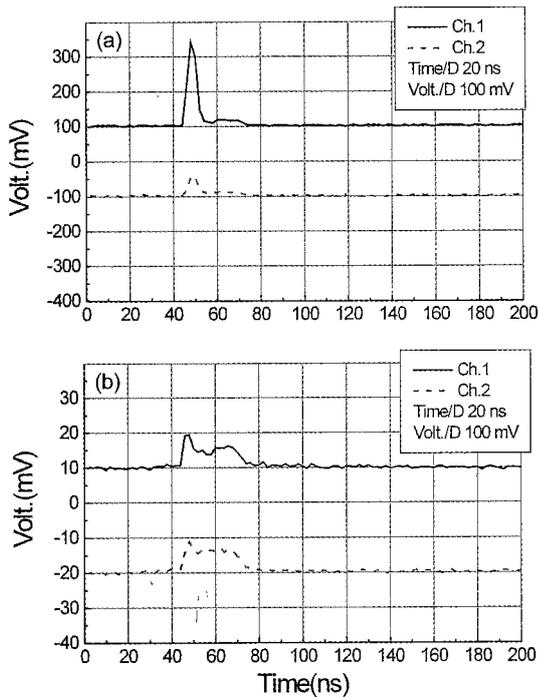


그림 7. 고출력 Nd-YAG/OPO 레이저 펄스를 c-Si 기층 위에 입혀진 결정화된 GST에 쏘이면서 광 검출소자 D1과 D2에서 각각 측정된 빛의 세기. (a)는 적색필터를 사용하지 않고 측정하고 (b)는 적색필터를 사용하여 측정된 결과이다.

즘의 방위각이 90°일 경우에 가장 큰 변화를 보였고, 광분할기에서 투과한 빛은 울라스턴 프리즘을 통과한 두 직교성분의 빛 중 하나는 90°, 다른 하나는 0°의 방위각에서 최대 변화를 보여준다. 평균적으로는 30°의 방위각에서 공통적으로 비교적 큰 변화를 보여주고 있다.

본 초고속 타원계의 작동을 확인하기 위하여 파장이 540 nm, 펄스폭이 7 ns인 고출력 Nd-YAG/OPO 레이저에서 방출되는 펄스를 c-Si기층 위에 2000 Å의 두께로 입혀진 결정화된 GST 시료에 쏘이면서 셔터를 통과한 단일 레이저 펄스에 의한 변화를 관찰하였다. 시료면에서의 레이저 에너지 밀도는 펄스당 대략 35 mW/cm²이며 파장이 540 nm인 레이저의 GST내부로의 광투과깊이는 수백 Å정도이므로 흡수된 레이저의 열에너지로의 변환은 대부분 GST박막층 내부에서 이루어지며 점차로 기층인 c-Si으로 열전달이 이루어지게 된다. 고출력 레이저 펄스의 열작용에 의해 시료는 박막인 GST 및 기층인 c-Si의 온도변화에 의해 각각의 굴절율이 변하게 되고 이로부터 반사광의 편광상태 변화가 따르게 된다.

적색필터를 사용하지 않고 측정된 경우에는(그림 7a) 레이저 펄스와 동시에 그림 4의 레이저 출력과 동일한 모양의 피크가 관찰되며, 이어서 상대적으로 작은 변화가 따르는 것을 볼 수 있으며 약 30 ns가 경과한 후에는 빛의 세기가 레이저 펄스를 쏘이기 전의 크기로 감소한다. 광 측정소자 앞면에 적색필터를 사용한(그림 7b) 경우에는 그림 7a에서 관찰된 레이저 펄스에 의한 피크부분은 크게 감소하는 반면 이어서 나타나는 상대적인 작은 변화는 그 크기가 그대로 유지되는 것을 볼 수

있다. 이는 적색필터를 사용함으로써 고출력 레이저 펄스의 산란광에 의한 영향을 제거할 수 있으며 적색필터를 사용하여 관찰하는 변화는 레이저 펄스에 의한 시료의 온도변화 및 굴절율의 변화에 기인한 것으로 판단된다. 온도 또는 굴절율에 의한 변화는 단조감소하는 형태를 보이지 않으며 그 증가 및 감소하는 형태가 레이저 펄스가 쏘여지는 동안 그리고 그 이후의 시료 각 부분에 열량이 전달되는 과정과 각 부분의 온도 변화 등 시료에서 일어나는 동적인 정보를 ns의 시간 분해능으로 제공하고 있다. 더구나 4개의 광 검출소자에서 측정되는 빛의 세기를 정규화하여 상대 비교하면 동적인 열전달 및 온도분포 정보에 더하여 시료의 굴절율 변화에 관한 정보를 얻게 될 것으로 기대되어 본 초고속 타원계는 기존의 광학장비에 비해 위상정보를 추가로 제공하는 장점을 가지고 있으면서도 상변화형 광기록 매체인 GST의 상변화기구 분석 뿐만이 아니라 굴절율 변화를 수반하는 많은 동적기구를 ns의 시간 분해능으로 측정하고 분석하는데 적합한 유용한 도구가 될 것으로 기대된다.

VI. 결 론

고정된 편광소자들의 조합으로 된 DOAP 방식으로 편광상태를 측정하는 초고속 타원계를 설계하였다. 비정질 GST의 결정질 GST로의 상변화에 의한 빛의 세기변화를 전산시능 계산한 결과를 참조하고 이 초고속 타원계의 ns의 시간분해능을 확인하여 상변화기구 같은 동적기구를 연구하는 도구로서의 활용성을 검토하였다.

감사의 글

본 연구는 한국과학재단(KOSF 98-0702-03-01-3)의 연구비 지원을 받아 이루어졌습니다.

참고문헌

- [1] Tae H. Jeong, Myong R. Kim, Hun Seo, Sang J. Kim, and Sang Y. Kim, "Crystallization behavior of sputter-deposited amorphous Ge₂Sb₂Te₅ thin films," *J. Appl. Phys.*, vol. 86, no. 2, p. 774, 1999.
- [2] 김상준, 서 훈, 박정우, 정태희, 김상열, "분광타원분석법을 이용한 Ge₂Sb₂Te₅의 복소굴절율 결정," *한국광학회지*, 제8권 제6호, p. 445, 1997.
- [3] Hun Seo, Teae-Hee Jeong, Jeong-Woo Park, Cheong Yeon, Sang-Jun Kim, and Sang-Youl Kim, "Investigation of crystallization behavior of sputter-deposited nitrogen-doped amorphous Ge₂Sb₂Te₅ thin films," *Jpn. J. Appl. Phys.*, vol. 39, part 1, no. 2B, p. 745, 2000.
- [4] R. Liang, J. K. Erwin, and M. Mansuripur, "Optical data storage-measurement of the relative optical phase between amorphous and crystalline regions of the phase-change media of optical recording," *Appl. Opt.*, vol. 39, p. 2167, 2000.
- [5] R. M. A. Azzam, "Division-of-amplitude photopolarimeter

- (DOAP) for the simultaneous measurement of all four stokes parameters of lights," *Optica Acta*, vol. 29, no. 5, p. 491, 1982.
- [6] E. Compain and B. Drevillon, "Complete high-frequency measurement of Mueller matrices based on a new coupled-phase modulator," *Rev. Sci. Instrum.*, vol. 68, no. 7, p. 2671, 1997.
- [7] K. Hemmes, M. A. Hamstra, K. R. Koops, M. M. Wind, T. Schram, J. de Laet, and H. Bender, "Evaluation of interferometric ellipsometer systems with a time resolution of one microsecond and faster," *Thin Solid Films*, vol. 40, pp. 313-314, 1998.

Design of ultra high speed ellipsometer using division-of-amplitude-photopolarimeter

Sang Youl Kim[†] and Sang Jun Kim

Dept. of Physics, Ajou University, Suwon 442-749, KOREA

(Received February 22, 2001 ; Revised manuscript received May 11, 2001)

The design of an ultra fast ellipsometer is suggested. It adopts the division-of-amplitude-photopolarimeter (DOAP) as the polarization state detector. It does not utilize any moving part such as the rotating polarizer(analyzer) or even any electronic modulation part like the piezo-electric phase modulator. Hence the time resolution of the present system is limited only by the response time of the photo-detector and electronic circuit as well as the analog-digital converter. The feasibility of the suggested ultra fast ellipsometer was tested and the response time with nano-second time resolution has been verified. Its future application to the investigation of kinetics including that of the phase-change optical recording media like $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$ is discussed.

Classification code : SM.020.