

Phase Transformation Effect on Mechanical Properties of $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$ Thin Film

Sung-Duk Hong, Seong-Min Jeong, Sung-Soon Kim, and Hong-Lim Lee[†]

Department of Ceramic Engineering, Yonsei University, Seoul 120-749 Korea
(Received February 17, 2005; Accepted April 29, 2005)

$\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$ 박막의 상변화에 의한 기계적 물성 변화

홍성덕 · 정성민 · 김성순 · 이홍림[†]

연세대학교 세라믹공학과
(2005년 2월 17일 접수; 2005년 4월 29일 승인)

ABSTRACT

Phase transformation effects on mechanical properties of $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$, which is a promising candidate material for Phase Change Random Access Memory (PRAM), were studied. $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$ thin films, which was thermally annealed with different conditions, were analyzed using XRD, AFM, 4-point probe method and reflectance measurement. As the temperature and the dwelling time increased, crystallinity and grain size increased, which enhanced elastic modulus and hardness. Furthermore, N_2 doping, which was used for better electrical properties, was proved to decrease elastic modulus and hardness of $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$.

Key words : PRAM, $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$, Phase transformation, Elastic modulus, Hardness, Annealing

1. 서 론

차세대 메모리 소자로 연구되고 있는 상변환메모리 (PRAM)의 유력한 물질로 Ge-Sb-Te 3성분계가 주목받고 있다. Ge-Sb-Te 3성분계중에서도 이미 광학저장매체에 사용되고 있는 $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$ 는 빠른 결정화 속도와 우수한 열적 안정성으로 PRAM으로의 응용이 최근 광범위하게 연구되고 있다. $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$ 의 상변화는 수십 나노 초 동안에 일어나므로 상변환 메모리 소자로 사용시 빠른 읽기, 쓰기, 지우기가 가능하다.¹⁾

실제의 PRAM의 동작조건에서는 연속적인 상변화 과정이 일어나며, 비정질과 결정질간의 상변화시 발생하는 밀도차에 의해 상변화물질의 부피팽창 및 수축이 일어난다. 따라서 상변화는 소자 내에 응력구배를 발생시키게 되므로, 소자의 내구성(durability)을 평가하기 위해서는 필수적으로 소자내의 응력상태를 파악해야 한다.²⁾ 그러나 $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$ 의 전기적·광학적 성질은 현재까지 많이 연구된 반면, 응력평가에 기본이 되는 기계적 물성에 대한 연구는 아직 미미한 실정이다.

따라서 본 연구에서는 나노인덴테이션(nanoindentation) 시험을 통하여 $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$ 박막의 기계적 성질을 평가하

는 연구를 수행하였다. 나노인덴테이션은 박막이나 미세 소자의 기계적 물성을 측정하기 위해 날카로운 압입자(indenter)를 미세하중으로 수십 나노미터(nm)의 깊이로 침투시켜 기계적 물성을 측정하는 방법이다. 이 방법은 시편의 준비가 용이할 뿐 아니라, 미세하중 조절과 미세변형 감지가 가능하므로 기존의 방법에 비해 향상된 정확성과 신뢰도가 높은 결과를 얻을 수 있다는 장점이 있으므로,³⁾ 본 연구에 사용되었다. 또한 $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$ 박막의 상변화에 따른 기계적 물성의 변화를 연구하기 위하여 XRD, AFM, 반사도, 면저항 측정을 통해서 열처리 후 따른 $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$ 의 결정화도 및 결정성장률 확인하고 이러한 결정화도 및 결정성장이 기계적 물성에 미치는 영향에 대하여 고찰하였다. 마지막으로 전기적 성질을 향상시키기 위하여 첨가되는 질소를 도핑한 시편에 대하여 동일한 방법을 시행하여 질소 첨가에 의한 기계적 물성의 변화를 분석하였다.

2. 실험 방법

2.1. 시편준비

DC magnetron sputter에 $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$ (Ge : Sb : Te = 22.2 : 22.2 : 55.6 at%, NIKKO Materials Co., Ltd.) 화학양론적(stoichiometric) 타겟을 이용하여 실리콘 기판위에 400 nm 두께의 $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$ 박막을 증착하였다. 스퍼터의 초기 압력은 5×10^{-8} torr였으며 증착시의 공정 압력은 5 mtorr였

[†]Corresponding author : Hong-Lim Lee

E-mail : htm@yonsei.ac.kr

Tel : +82-2-2123-2849 Fax : +82-2-365-5882

다. Ar 플라즈마를 이용하였고 증착시 Ar 가스의 유량은 유량조절기를 이용하여 10 sccm으로 하였다. 모든 증착은 상온에서 이루어졌고 10분간 pre-sputtering을 통해서 타겟 표면에 존재하는 산화막이나 오염물을 제거하였다. 증착시 파워는 100 W로 하였고 기판을 회전시켜 균일한 증착을 유도하였다. 또한 Ge₂Sb₂Te₅ 막에 전기적 특성 개선효과를 위하여 사용되는 질소의 첨가로 인한 기계적 성질의 변화를 알아보기 위하여 유량조절기를 이용하여 질소 가스를 5 sccm 흘리면서 증착하였다.

Ge₂Sb₂Te₅의 결정화에 따른 기계적 거동을 살펴보기 위하여 막을 증착한 후 열처리하였다. 순간적인 램프 열처리를 사용한 급속 가열 방법(RTP: Rapid Thermal Processing)은 저압에서 급속 가열된다. 승온 과정 중에 결정화를 억제하기 위하여 20°C/s로 가열하였다. 열처리 온도는 200, 250°C로 하였고 각 온도가 유지된 상태에서 5, 10분간 열처리 하였다. 이때 막의 산화를 방지하기 위하여 N₂ 분위기를 유지하였다. Table 1에 본 연구에서 수행한 열처리조건과 그에 따른 시편의 명칭을 정리하여 나타내었다.

2.2. 분석방법

증착된 Ge₂Sb₂Te₅ 박막의 결정상을 확인하기 위하여 X-ray 회절분석기(D/MAX RINT 2000 diffractometer, Rigaku, Japan)를 이용하여 2θ = 20~60°인 범위에서 3°/min의 스캔 속도로 측정하였다.

Ge₂Sb₂Te₅ 박막의 표면 거칠기는 각 실험조건에 대하여 AFM(Atomic Force Microscopy, XE-100, PSIA, Korea)을 이용하여 주사영역(Scanning range) 1 × 1 μm에 대하여 측정하였다. 또한 각 실험조건에 대하여 Ge₂Sb₂Te₅ 박막의 면저항(R_s)은 4-point probe(CMT-SR200N, Jandel Eng, Ltd., U.K)를 이용하여 측정하였다.

열처리 조건에 따른 반사도의 변화를 측정하기 위하여, 준비된 시편들에 대하여 Fig. 1에서 도시한 바와 같은 반사도 측정장비를 제작하여 사용하였다. 조사빔은 532 nm의 파장을 갖는 Nd:YVO₄ 레이저(Suwtech LDC-1500, Shanghai Uniwave Technology Co. Ltd., China)를 사용하였고 레이저 조절기(DPGL-2100, Shanghai Uniwave Technology Co.

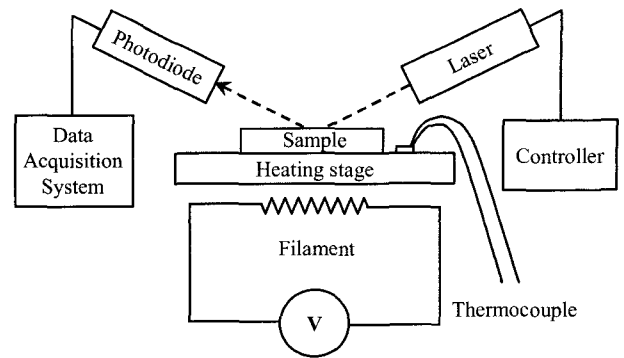


Fig. 1. A schematic of reflectance measurement system.

Ltd., China)를 통해 출력을 조절하였다. Laser의 입사각과 반사각은 30°로 고정하였다. 시편의 표면으로부터 반사되어 나오는 광은 Photo-detector(DET110, Thorlab, USA)에 포집된다. Photo-detector에 포집된 광량은 Digital Multi-meter(Keithley 2000, Keithley, USA)를 이용하여 컴퓨터에 기록하였다.

Ge₂Sb₂Te₅ 박막의 탄성계수 및 경도는 연속강성측정(CSM: Continous Stiffness Measurement) 방법을 사용한 나노인덴테이션(Nano-indenter XP, MTS, USA)을 사용하여 얻었다. 압입시의 압입깊이는 400 nm로 하였으며, 시편 당 10회씩 압입 시험하여 평균값을 얻었다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 열처리 조건에 따른 기계적 물성 변화 평가

3.1.1. 결정 구조 및 표면 형상 분석

Ebina 등은 Ge₂Sb₂Te₅에 대하여 5°C/s로 600°C까지 열처리한 결과, 직경 20 nm 정도의 미세한 결정들이 생성되는 것을 관찰하고, 열처리에 의한 결정화에 있어서 Ge₂Sb₂Te₅는 승온 속도가 빠를수록 결정화와 입자성장이 억제되어 미세한 결정으로 이루어진 다결정질 구조를 형성한다고 보고하였다.⁶⁾ 따라서 본 연구에서는 승온과정 중에서의 결정화와 입자성장을 억제하기 위하여, 열처리시 승온속

Table 1. Specimen Notation

Notation	Description
AS-DEP	As deposited sample
R200T05	Rapid thermal annealed sample after deposition at 200°C for 5 min
R200T10	Rapid thermal annealed sample after deposition at 200°C for 10 min
R250T05	Rapid thermal annealed sample after deposition at 250°C for 5 min
R250T10	Rapid thermal annealed sample after deposition at 250°C for 10 min
AS-DEP-N2	As deposited sample under N ₂ atmosphere (N ₂ doped sample)
R200T10-N2	Rapid thermal annealed N ₂ doped sample after deposition at 200°C for 10 min
R250T10-N2	Rapid thermal annealed N ₂ doped sample after deposition at 250°C for 10 min

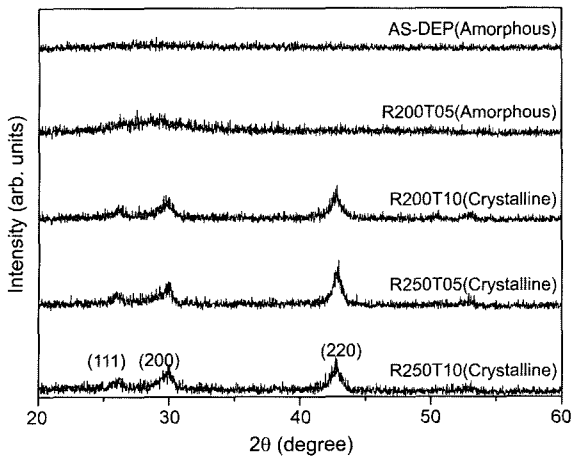


Fig. 2. X-ray diffraction patterns of various samples.

도를 20°C/s의 매우 빠른 속도로 제어하였다.

$\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$ 는 열처리조건에 따라서 서로 다른 상변화 거동을 일으키는 재료이므로, 본 연구에서는 Table 1에서 이미 나타낸 바와 같이 서로 다른 온도와 유지시간에서 열처리하고, XRD를 이용하여 결정상을 분석하고 이를 Fig. 2에 나타내었다. 열처리후의 $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$ 박막에 대한 XRD 분석결과에 의하면, R200T05를 제외한 모든 열처리된 시편이 결정화된 것으로 나타났다. 결정화된 $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$ 박막의 결정구조는 XRD 결과로부터 격자상수 $a = 0.6035 \text{ nm}$ 를 갖는 FCC 구조인 것으로 나타났으며, 이러한 결과는 이전에 보고된 연구결과와 일치하였다.^{4,5)}

결정화된 시편에 대해서는 다음과 같은 Scherrer 식을 이용하면 반치폭(FWHM: Full Width at Half Maximum)을 이용하여 결정립의 크기를 계산할 수 있다.

$$D_{hkl} = \frac{0.9\lambda}{\beta \cos \theta} \quad (1)$$

여기서 λ 는 X-ray의 파장(Cu $K\alpha$ 의 경우 1.54 Å), β 는 반치폭, θ 는 회절각이다. 열처리 온도와 시간이 증가할수록 반치폭은 작아지며, 결정립의 크기는 증가함을 관찰할 수 있다. R200T10, R250T05, R250T10 시편에 대하여 결정립의 크기는 각각 7.9, 8.0과 10 nm로 계산되었다.

같은 시편들에 대하여 열처리 조건에 따른 박막의 표면 형상 변화를 알아보기 위하여 AFM로 표면거칠기를 측정하고 각각의 시편에 대한 R_a , R_{p-v} , R_{ms} 값을 Table 2에 나타내었다. 비정질에서 결정질로의 상변화가 일어나면 밀도가 약 6.8% 증가하게 된다.⁷⁾ 열처리가 진행됨에 따라 막표면에 국부적으로 결정이 생성, 성장하여 비정질과 결정질의 밀도차에 의한 국부적인 부피변화가 일어나므로 결정의 생성과 성장이 많이 일어날수록 표면 거칠기는 증가하게 된다. AFM 측정 결과로부터 비정질보다는 결정질에서, 같은 온도에서는 유지시간이 길수록 미세

Table 2. Roughness Data for Various Samples

Sample name	Scan range (μm)	R_{ms} (nm)	R_a (nm)	R_{p-v} (nm)
AS-DEP	1 × 1	0.504	2.4	6.12
R200T05	1 × 1	0.544	1.98	4.92
R200T10	1 × 1	0.868	3.53	6.75
R250T05	1 × 1	0.826	2.78	6.33
R250T10	1 × 1	0.831	3.85	7.73

거칠기가 증가함을 확인하였다.

XRD와 AFM 결과로부터 R200T10, R250T05와 R250T10 시편은 결정화가 일어난 반면 AS-DEP과 R200T05 시편은 비정질 상태를 확인하였고, 온도가 높고 유지시간이 길수록 결정립의 크기가 증가함을 알 수 있었다.

3.1.2. 면저항 및 반사도 분석

$\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$ 박막의 열처리에 따른 전기적 특성을 파악하기 위하여 면저항을 측정하였다. 4-point probe를 이용하여 같은 간격으로 떨어져 있는 4개의 probe 중에서 바깥쪽의 두 개의 probe를 통해 고정되어 있는 값의 전류를 흘려주고, 안쪽의 probe로 전압을 측정하여 면저항을 계산할 수 있다. 샘플링 영역이 probe의 간격보다 훨씬 큰 경우 아래와 같은 식으로 면저항(Sheet resistance, R_s)을 나타낼 수 있다.⁸⁾

$$R_s = \frac{\rho}{t} = \left(\frac{\pi}{\ln 2} \right) \frac{V}{I} = 4.532 \frac{V}{I} \quad (2)$$

한편, $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$ 의 결정화 정도에 따라 반사도는 선형적으로 증가하고 저항은 기하급수적으로 감소한다고 보고되고 있으며,^{7,9)} 따라서 본 연구에서는 자체 제작한 반사도측정장비를 사용하여 AS-DEP, R200T05, R200T10, R250T05, R250T10 시편들에 대하여 측정한 반사도를 앞서 4-point probe를 이용하여 얻은 저항과 함께 Fig. 3에 도시하였다. Fig. 3에서 보이는 바와 같이, 결정질 박막(R200T10, R250T05, R250T10)의 경우 반사도는 크고 저항은 작으며 비정질 박막(AS-DEP, R200T05)의 경우 반사도는 작고 저항은 큰 것으로 나타났다. 또한 결정질(R250T05, R250T10) 간의 면저항과 반사도 차이로부터 열처리 시간의 증가에 따라 결정화도가 증가함을 확인하였다. 이러한 일련의 결과로부터 본 연구의 결과가 앞서 보고된 연구결과와 잘 일치하고 있음을 알 수 있었다.

3.1.3. 기계적물성평가

나노인덴테이션 시험으로부터 AS-DEP, R200T05, R200T10, R250T05, R250T10 시편들의 하중-변위곡선(load-displacement curve)을 얻은 후 Fig. 4에 나타내었다. 열처리온도가 높고 유지시간이 길수록 같은 압입깊이로 압입자를 침투시키는데 더 많은 하중이 필요함을 확인하였다. 또한 최대 하중에서의 unloading 곡선이 거의 수직으로 떨어지는

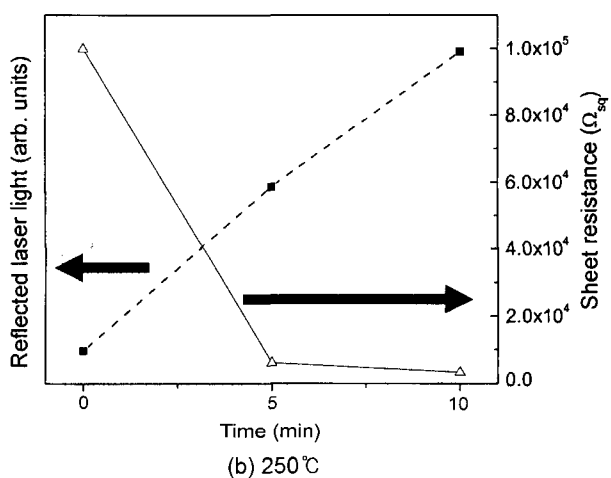
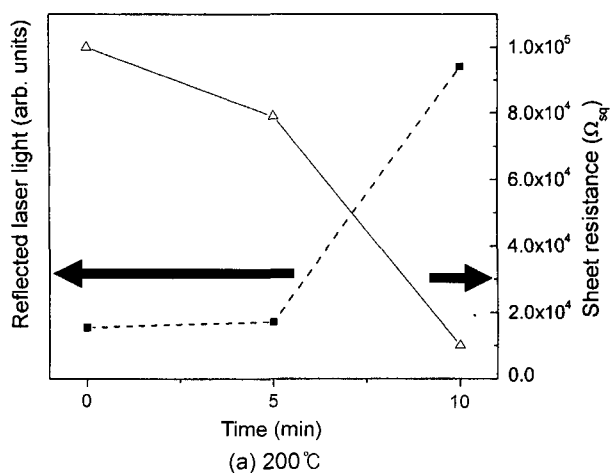


Fig. 3. Reflectance and sheet resistance as a function of time of different heat treatment.

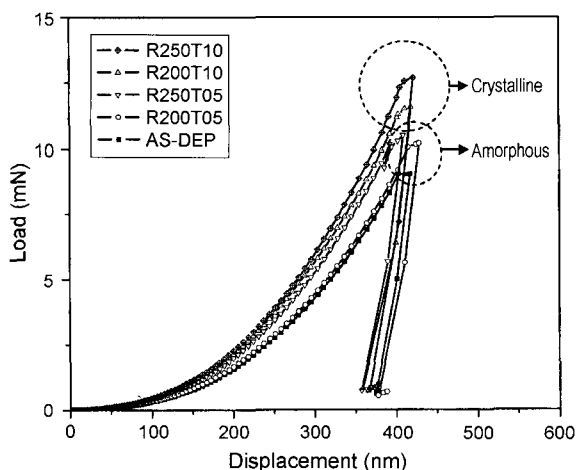


Fig. 4. Load-displacement curves of thin film samples with different heat treatments.

것으로 보아 소성변형이 주가 됨을 알 수 있었다.

Fig. 5에서 도시한 박막탄성계수는 나노인덴테이션 결

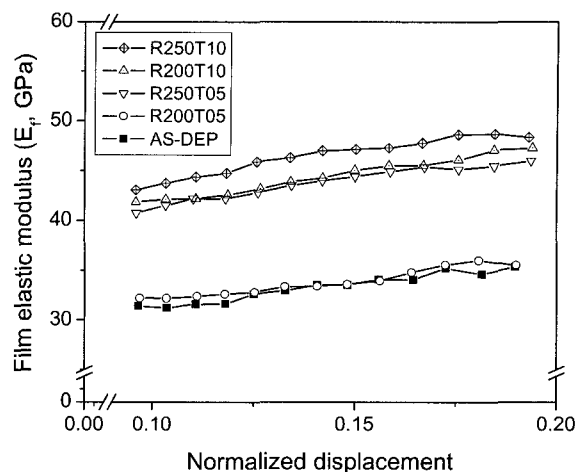


Fig. 5. Film elastic modulus as a function of normalized displacement varying with different thermal conditions.

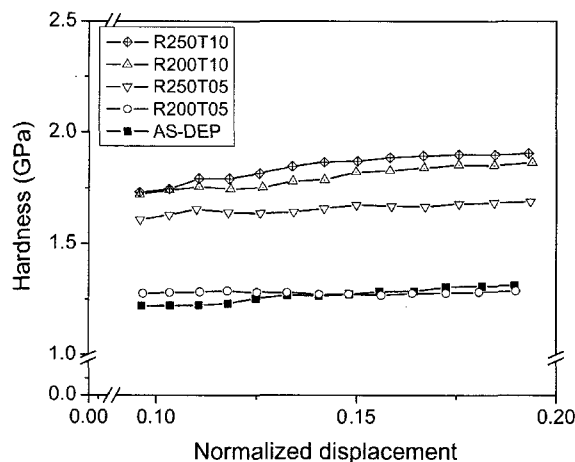


Fig. 6. Hardness as a function of normalized displacement curves.

과를 Saha와 Nix의 계산법을 사용하여 얻어낸 것이며,¹⁰⁾ 비정질에서 결정질구조로 상변화가 일어나면 탄성계수가 크게 증가함을 보여주고 있다. 이러한 경향은 Fig. 6에서 도시한 경도 측정결과에서도 나타나고 있다. 이러한 결정질간의 비교는 결정화도의 증가가 기계적 성질을 향상시키고 있음을 확인시켜 주고 있다.

3.2. 질소 첨가에 의한 기계적 물성 변화 평가

3.2.1. 결정상 분석

최근 상변화 물질의 특성을 개선하기 위하여 Ge₂Sb₂Te₅에 질소를 불순물로 첨가하는 연구가 진행되고 있다. 질소를 첨가하면 결정 성장이 억제되어 결정입계면적을 증가시켜서 저항이 증가하고, GeN 등의 질화물의 형성 역시 저항의 증가에 영향을 줄 수 있을 것으로 보고되었다.⁹⁾ 하지만 질소를 도핑하게 되면 Ge₂Sb₂Te₅의 사면체 틸(Tetrahe-

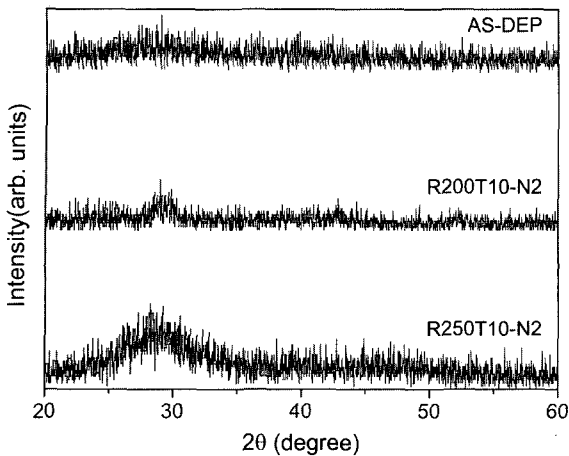


Fig. 7. N₂ doping effect on the annealing conditions analyzed by XRD.

dral interstitial site)으로 들어가게 되는데, 질소 원자의 크기($1.499 \times 10^{-3} \text{ nm}^3$)가 사면체 틈의 크기($1.133 \times 10^{-3} \text{ nm}^3$)보다 약간 더 크다. 따라서 사면체 틈으로 침입한 질소는 단위격자(Unit cell)를 변형시키고, 격자상수를 증가시켜 박막 내 strain field를 가져온다. 또한 몇몇 질소 원자들은 사면체 틈으로 들어가지 못하고 결정이나 결정입계에 질화물로 석출된다고 연구되었다.¹¹⁾

따라서 본 연구에서는 Ge₂Sb₂Te₅ 박막의 기계적 성질에 대한 연구의 일환으로 질소도핑의 효과에 대해서도 고찰하였다. 이를 위하여 질소를 도핑한 시편을 제작 후 200, 250°C에서 10분간 열처리하고, 열처리 후 결정 구조의 변화를 확인하기 위하여 XRD 분석을 시행하고, 그 결과를 Fig. 7에 나타내었다. Ge₂Sb₂Te₅에 질소를 도핑한 시편에 대한 XRD 분석결과에서는, 질소를 도핑하지 않은 시편에 비하여 주 피크 크기가 감소하고 반치폭이 넓어지며 피크가 형성되는 위치가 저각 쪽으로 이동하는 현상이 나타났다. 이것은 질소 도핑에 의해서 결정화와 결정성장이 억제되고 박막 내에 strain field를 형성하였기 때문으로 여겨진다. 그러나 열처리시간이 긴 시편에서는 상대적으로 주피크의 세기가 강한 것으로 나타났다. 따라서 질소도핑 조건에서는 보다 높은 온도 또는 긴 시간의 열처리가 결정화의 필요조건이라고 생각할 수 있다.

3.2.2. 기계적 물성 평가

먼저 질소 도핑이 기계적 물성에 어떠한 영향을 주는지 알아보기 위하여, Fig. 8에서 도핑을 하지 않고 증착한 시편(AS-DEP)과 질소도핑을 하고 증착한 시편(AS-DEP-N2)에 대한 박막탄성계수와 경도를 비교하였다. 그 결과, 질소를 도핑한 시편의 경우(AS-DEP-N2)의 탄성계수와 경도 값이 도핑하지 않은 시편(AS-DEP)의 값보다 각각 약 4.4%, 9.2% 크게 나타났다. 이것은 질소 도핑에 의한 strain field와 질화물의 형성이 질소를 도핑한 시편의 기계적 물

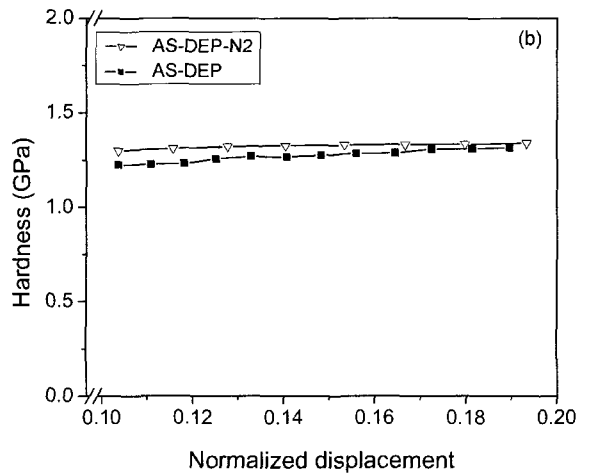
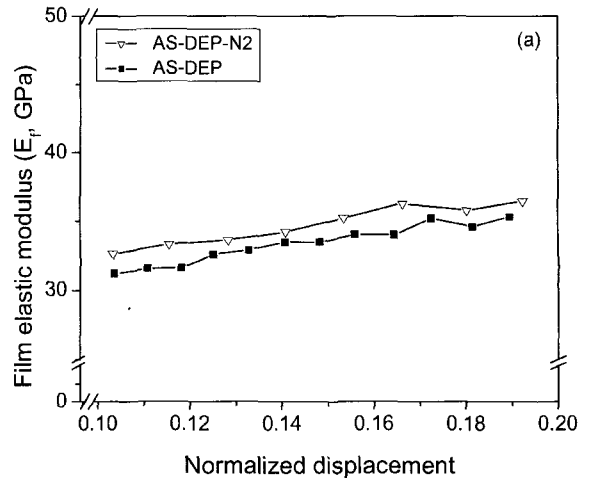


Fig. 8. The effect of N₂ doping for as-deposited samples : (a) film elastic modulus and (b) hardness.

성을 향상시켰기 때문인 것으로 판단된다.

질소를 도핑한 시편을 열처리하고 박막탄성계수와 경도를 계산한 결과는 Figs. 9와 10에 나타내었다. 비교를 위하여 질소를 도핑하지 않은 시편을 열처리하여 얻은 기계적물성값을 함께 도시하였다. Figs. 9 및 10에 따르면, 200°C에서 10분간 열처리 한 경우에는 질소를 도핑하지 않은 경우(R200T10) 시편의 결정화가 일어나 탄성계수와 경도가 증가한 반면, 질소를 도핑한 경우(R200T10-N2)에는 탄성계수와 경도 모두 열처리 전과 큰 차이를 보이지 않았다. 그러나, 250°C에서 10분간 열처리한 경우에는 R250T10-N2 시편의 탄성계수와 경도가 AS-DEP-N2, R200T10-N2에 비해 각각 약 19%와 22% 증가하였다. 이것을 질소 도핑에 의하여 결정화 온도가 상승하기 때문에 R200T10-N2 시편에서는 충분한 결정화가 일어나지 않아 비정질의 기계적 물성 값을 나타내고 있으나, R250T10-N2에서는 결정화가 이루어져 결정질의 기계적 물성 값을 나타내는 것으로 이해된다. R250T10-N2를 동일한 열처리

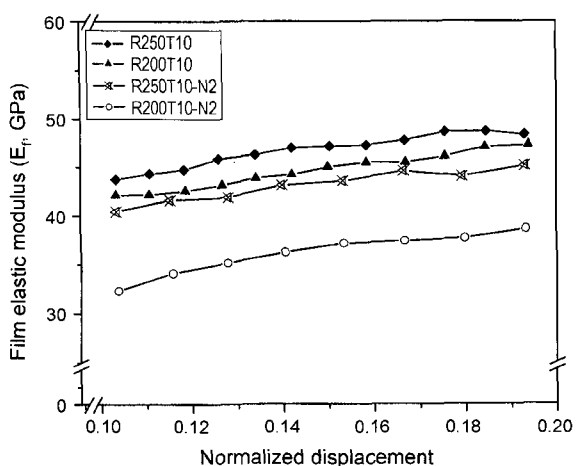


Fig. 9. The effect of N₂ doping on film elastic modulus for annealed samples.

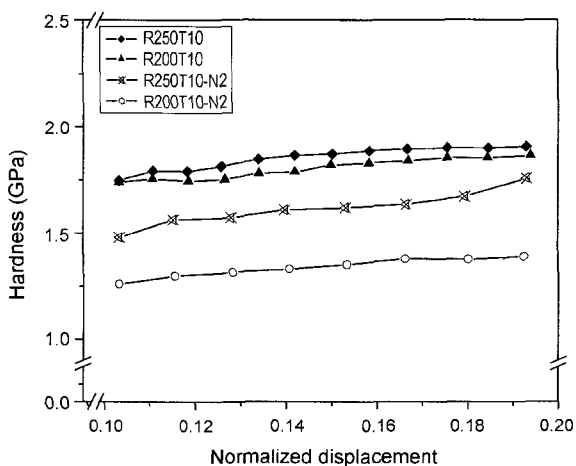


Fig. 10. The effect of N₂ doping on hardness for annealed samples.

를 거친 질소도핑하지 않은 시편(R250T10)과 비교해보면 R250T10-N2의 기계적물성이 다소 낮은 값을 나타내는데, 이것도 역시 질소 도핑에 의하여 결정화 온도가 상승하므로 동일한 열처리하에서의 결정화율이 떨어지기 때문이다. 또한 질소 도핑에 의해 결정 성장이 억제되므로 질소를 도핑하지 않은 시편에 비해 작은 결정립으로 구성될 수 밖에 없으며, 결정립의 크기가 20 nm 보다 작을 때, 결정립의 크기가 작을수록 기계적 물성 값은 떨어진다는 보고¹²⁾ 또한 이와 같은 결과를 뒷받침하고 있다.

4. 결 론

본 연구에서는 상변화 물질인 Ge₂Sb₂Te₅에 대하여 열처리에 따른 상변화와 기계적 물성의 변화를 고찰하였다. XRD 분석결과에 따르면 Ge₂Sb₂Te₅는 열처리에 의해 비

정질에서 결정질 구조(FCC)로 전이하며, 결정화된 시편의 결정립 크기는 열처리 온도가 높고 유지시간이 길수록 큰 경향이 있음을 알 수 있었다. 또한 결정 생성에 의해 박막의 표면의 거칠기가 증가함을 AFM 측정을 통해 확인하였다. 또한 비정질과 결정질의 면저항과 반사도는 뚜렷하였으며, 결정질 간의 비교로부터 열처리 온도가 높고 유지 시간이 길수록 결정화도가 증가함을 확인하였다.

나노인덴테이션 시험으로 Ge₂Sb₂Te₅의 탄성계수와 경도를 측정된 결과, 비정질보다 결정질일 때 탄성계수와 경도가 높게 나타났으며, 결정질 간의 비교로부터 결정화도와 결정성장이 기계적 물성에 영향을 주었음을 확인하였다.

또한 Ge₂Sb₂Te₅의 전기적 물성 개선을 위한 목적으로 사용되는 질소 도핑이 기계적 성질에 미치는 영향을 고찰하고 질소 도핑은 증착시에는 기계적물성을 증진시키지만 결정화는 더디게 한다는 것을 알 수 있었다.

REFERENCES

1. J. Tominaga, T. Kikukawa, M. Takahashi, T. Kato, and T. Aoi, "Optical Phase Change Disc without Bulk Laser Initialization and a Quick Bulk Initialization Structure," *Jpn. J. Appl. Phys.*, **36** [6A] 3598-601 (1997).
2. T. P. Pedersen, J. Kalb, W. K. Njoroge, D. Wamwang, M. Wugtit, and F. Spaepen, "Mechanical Stresses Upon Crystallization in Phase Change Materials," *Appl. Phys. Lett.*, **79** [22] 3597-99 (2001).
3. B. Bhushan, "Nanomechanical Properties of Solid Surfaces and Thin Films"; pp. 434-64 in Handbook of Micro/Nano Tribology, Ed. by B. Bhushan, CRC Press, London, 1999.
4. N. Yamada and T. Matsunaga, "Structure of Laser-Crystallized Ge₂Sb₂Te₅ Sputtered Thin Films for Use in Optical Memory," *J. Appl. Phys.*, **88** [12] 7020-28 (2000).
5. I. Friedrich, V. Weidenhof, W. Njoroge, P. Franz, and M. Wuttig, "Structural Transformations of Ge₂Sb₂Te₅ Films Studied by Electrical Resistance Measurements," *J. Appl. Phys.*, **87** [9] 4130-34 (2000).
6. A. Ebina, M. Hirasaka, and K. Nakatani, "Oxygen Doping Effect on Ge-Sb-Te Phase Change Optical Disks," *J. Vac. Sci. Tech. A*, **17** [6] 3463-66 (1999).
7. M. Wuttig, R. Detemple, I. Friedrich, W. Njoroge, I. Tomas, V. Weidenhof, H. W. Woltgens, and S. Ziegler, "The Quest for Fast Phase Change Materials," *J. Magn. Mater.*, **249** [3] 492-98 (2002).
8. R. C. Jaeger, "Diffusion"; pp. 88 in Introduction to Micro-electronic Fabrication, Vol. 5, Modular Series on Solid State Devices, Ed. by G. W. Neudeck, Prentice Hall, 2001.
9. A. Takase, G. Fujinawa, A. Ebina, M. Hirasaka, and I. Sugiyama, "Crystal Structure of Oxygen/Nitrogen-Doped Ge-Sb-Te Phase-Change Media: Investigation Using Grazing Incidence X-Ray Diffraction," *Jpn. J. Appl. Phys.*, **41** [4A] 2189-90 (2002).

10. R. Saha and W. D. Nix, "Effect of the Substrate on the Determination of Thin Film Mechanical Properties by Nanoindentation," *Acta Mater.*, **50** [1] 23-38 (2002).
11. T. H. Jeong, M. R. Kim, H. S. Seo, J. W. Park, and C. Yeon, "Crystal Structure and Micostructure of Nitrogen-Doped $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$ Thin Film," *Jpn. J. Appl. Phys.*, **39** [5A] 2775-79 (2000).
12. H. S. Kim and M. B. Bush, "The Effects of Grain Size and Porosity on the Elastic Modulus of Nanocrystalline Materials," *Nanostruct. Mater.*, **11** [3] 361-67 (1999).