

PRAM용 Cu-도핑된 $\text{Ge}_8\text{Sb}_2\text{Te}_{11}$ 박막의 특성

김영미¹, 공 헌¹, 김병철², 이현용³ 

¹ 전남대학교 신화학소재공학과

² 경남과학기술대학교 전자공학과

³ 전남대학교 화학공학부

Characteristics of Cu-Doped $\text{Ge}_8\text{Sb}_2\text{Te}_{11}$ Thin Films for PRAM

Yeong-Mi Kim¹, Heon Kong¹, Byung-Cheul Kim², and Hyun-Yong Lee³

¹ Department of Advanced Chemicals and Engineering, Chonnam National University, Gwangju 61186, Korea

² Department of Electronic Engineering, Gyeongnam National University of Science and Technology, Jinju 52725, Korea

³ School of Chemical Engineering, Chonnam National University, Gwangju 61186, Korea

(Received July 8, 2019; Revised July 26, 2019; Accepted July 27, 2019)

Abstract: In this work, we evaluated the structural, electrical and optical properties of $\text{Ge}_8\text{Sb}_2\text{Te}_{11}$ and Cu-doped $\text{Ge}_8\text{Sb}_2\text{Te}_{11}$ thin films prepared by rf-magnetron reactive sputtering. The 200-nm-thick deposited films were annealed in a range of 100~400°C using a furnace in an N_2 atmosphere. The amorphous-to-crystalline phase changes of the thin films were investigated by X-ray diffraction (XRD), UV-Vis-IR spectrophotometry, a 4-point probe, and a source meter. A one-step phase transformation from amorphous to face-centered-cubic (fcc) and an increase of the crystallization temperature (T_c) was observed in the Cu-doped film, which indicates an enhanced thermal stability in the amorphous state. The difference in the optical energy band gap (E_{op}) between the amorphous and crystalline phases was relatively large, approximately 0.38~0.41 eV, which is beneficial for reducing the noise in the memory devices. The sheet resistance (R_s) of the amorphous phase in the Cu-doped film was about 1.5 orders larger than that in undoped film. A large R_s in the amorphous phase will reduce the programming current in the memory device. An increase of threshold voltage (V_{th}) was seen in the Cu-doped film, which implied a high thermal efficiency. This suggests that the Cu-doped $\text{Ge}_8\text{Sb}_2\text{Te}_{11}$ thin film is a good candidate for PRAM.

Keywords: PRAM, Chalcogenide, Sputtering, Thermal stability

1. 서론

1968년 Ovshinsky에 의해 빠르고, 가역적인 비정질 칼코게나이드 박막의 상변화가 보고되었다 [1]. 상변화 현상은 비정질 칼코게나이드 박막을 토대로 하여 외부 인가

에너지에 의해 비정질(amorphous)과 결정질(crystalline) 사이에 가역적인 고속 상변화를 보여주는데, 이러한 상변화 현상은 결정질-비정질 간에 반사도 및 굴절률 등의 광학 특성과 비저항 등의 전기적 특성의 차이를 야기한다 [2]. 이를 이용해 정보를 기록, 소거 및 재생하여 저장 장치로 응용한 제품이 현재 상용화 되었으며, 상용화된 제품 중 대표적인 예는 DVD-RAM과 PRAM (phase-change RAM)이 있다. DVD-RAM은 레이저 광원을 인가하여 결정질-비정질 간의 광학적 특성의 차이를 이용하는 반면, PRAM은 전기 펄스를 가한 뒤

✉ Hyun-Yong Lee; hyleee@chonnam.ac.kr

Copyright ©2019 KIEEME. All rights reserved.
 This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

발생하는 줄 열을 이용해 상변화를 유발시켜 결정질-비정질 간의 저항 차이를 이용하여 정보를 저장한다 [3]. 특히 PRAM은 차세대 메모리로서 주목을 받고 있는데, 이는 공정상의 제약이 적고, DRAM 공정과 호환성이 커서 낮은 공정단가에서 제품 생산이 가능하며, 동작 속도가 빠르고 재기록 횟수가 높다고 알려져 있다. PRAM에 사용되는 상변화 재료로서 (GeTe)-(Sb₂Te₃)계에 대한 연구를 수행하였으며, 그중 Ge₂Sb₂Te₅와 Ge₈Sb₂Te₁₁가 우수한 PRAM 재료로 평가되었다 [4]. Ge₂Sb₂Te₅는 비정질(amorphous)-결정질1(fcc)-결정질2(hcp)의 2단계 변화를 일으키는 반면, Ge₈Sb₂Te₁₁의 상변화는 비정질(amorphous)-결정질(fcc)의 1단계의 변화를 거치게 된다. 상변화 단계로 인해 결정화 속도에 영향을 미치게 되고 Ge₂Sb₂Te₅보다 Ge₈Sb₂Te₁₁이 결정화 속도가 더 빠르다. 이들 재료의 비정질화 시간은 물질 고유특성으로 충분히 빠른 속도(수십 ns)를 가지는 반면, 결정화 시간은 상대적으로 느리기 때문에 결정질에서 비정질로 상변화 하는 데 필요한 쓰기 전류가 높다는 단점이 있다 [5]. 또한, 너무 낮은 녹는점을 갖는 상변화 소재를 사용할 경우 비정질 상의 열적 안정성, 그리고 단위 셀 간의 열 간섭 문제 등을 야기할 수 있어 열적 안정성을 확보하는 것이 관건이다. 이러한 문제점을 해결하기 위해서 칼코게나이드 화합물에 다양한 도펀트를 첨가하여 열 안정성을 향상시키며, 쓰기 전류를 감소하는 연구가 진행되고 있다. 칼코게나이드 화합물에 C, Si, N 도핑을 하게 되면 결정화 온도가 상승하고 면 저항이 증가하여 비정질에서의 열 안정성이 향상된다. 또한 Cu를 도핑하게 되면 결정화 온도가 증가하고, 용융 온도가 낮아지는 데 기여한다 [6].

본 연구에서는 스퍼터링 시스템을 통해 PRAM에 응용되는 후보 물질인 Ge₈Sb₂Te₁₁에 copper (Cu)를 첨가하여 박막을 제작했고, 온도 별 열처리를 통하여 상구조를 분석한 뒤, 전기적·광학적 특성을 평가하였다.

2. 실험 방법

Ge₈Sb₂Te₁₁ 및 Cu 타겟(4N)을 이용하여 rf 마그네트론 스퍼터링 시스템을 통하여 200 nm 두께의 박막을 p-type Si(100) 및 유리기판(soda lime glass) 위에 증착하여 시편을 제작하였다. 중성세제, 아세톤, 트리클로로에틸렌, 이소프로필알코올, 초순수 순서로 초음파 세척기를 이용하여 기판을 세척하여 표면 오염을 제거하였다. 스퍼터링은 Ar 30 sccm을 유지하면서 $\sim 3.0 \times 10^{-3}$

Torr의 압력 하에 상온에서 진행하였다. Ge₈Sb₂Te₁₁ 파워는 50 W로 유지하면서 진행하고, Cu의 파워를 0, 11, 15, 20 W로 변화시켜 서로 다른 조성의 박막을 제작, 조성을 분석하였다. 그 후 전기로를 이용하여 각 조성별로 100°C에서 400°C까지 승온 속도를 5°C/min로 하여 N₂ 분위기 조건에서 각 온도별로 30분간 유지하였다. 100~400°C 사이에 50°C 간격으로 열처리 후 박막을 X선 회절분석(X-ray diffraction, X'pert PRO, Phillips)을 통하여 각 상의 구조적 분석을 진행하였다. 자외선-가시광원-적외선 분광광도계(UV-Vis-IR spectrophotometry, Shimadzu, U-3501, 범위 300~3,000 nm)를 사용하여 비정질 및 결정질 상의 파장에 따른 투과도 (T)를 측정 한 후 광학적 에너지 갭(optical energy bandgap, E_{op})을 측정하였다. 각 조성의 전기적 특성을 분석하기 위해 4-탐침법(4-point probe, CNT-series)을 이용하여 면 저항을 측정하였다. 문턱 전압 및 상변화 재료의 비정질-결정질 사이의 저항 차이를 측정하기 위해 p-type Si(100)을 사용하여 2 cm × 2 cm 크기의 시편을 제작하였다. 자기 가열 방식을 사용하기 위해 발열체와 하부 전극 역할을 하는 텅스텐(W)을 200 nm의 두께로 증착한 뒤, 마스크로 시편의 0.5 cm를 가리고 Ge₈Sb₂Te₁₁와 Cu(11, 15, 20 W)-Ge₈Sb₂Te₁₁ 박막을 200 nm 증착하였다. 마지막으로 상부 전극 역할을 하는 은(Ag)을 200 nm의 두께로 증착한 뒤 마스크를 제거하였다. DC 전압을 인가하여 소자의 상변화 및 문턱전압을 측정하기 위해 소스 측정 장치(source measure unit, Keithley 2400 sourcemeter)를 사용하였다.

3. 결과 및 고찰

에너지분산형 분광분석법(energy dispersive X-ray spectroscopy, HORIBA, EX-220)을 이용하여 제작된 박막의 Cu 도핑 정도를 분석하였다. 11, 15, 20 W의 스퍼터 파워에 대하여 Cu의 조성은 각각 4.63, 5.59, 12.55 at%로 평가되었다.

그림 1은 Cu(0, 11, 15, 20 W)-doped Ge₈Sb₂Te₁₁ 칼코게나이드 박막의 XRD 분석 결과이다. 열처리 온도에 따른 각 조성별 XRD 패턴을 나타낸다. 그림 1(a)를 살펴보면 200°C 이상에서 Ge₈Sb₂Te₁₁ 박막은 fcc 구조의 피크가 발견됐고, 이는 앞선 연구 결과와 일치한다 [7]. 즉, Ge₂Sb₂Te₅ 박막은 2단계 결정화 과정(비정질→fcc→hcp)을 보이는 반면 Ge₈Sb₂Te₁₁ 박막은 hcp 결정화 없는 비정질→fcc로의 1단계 결정화 과정

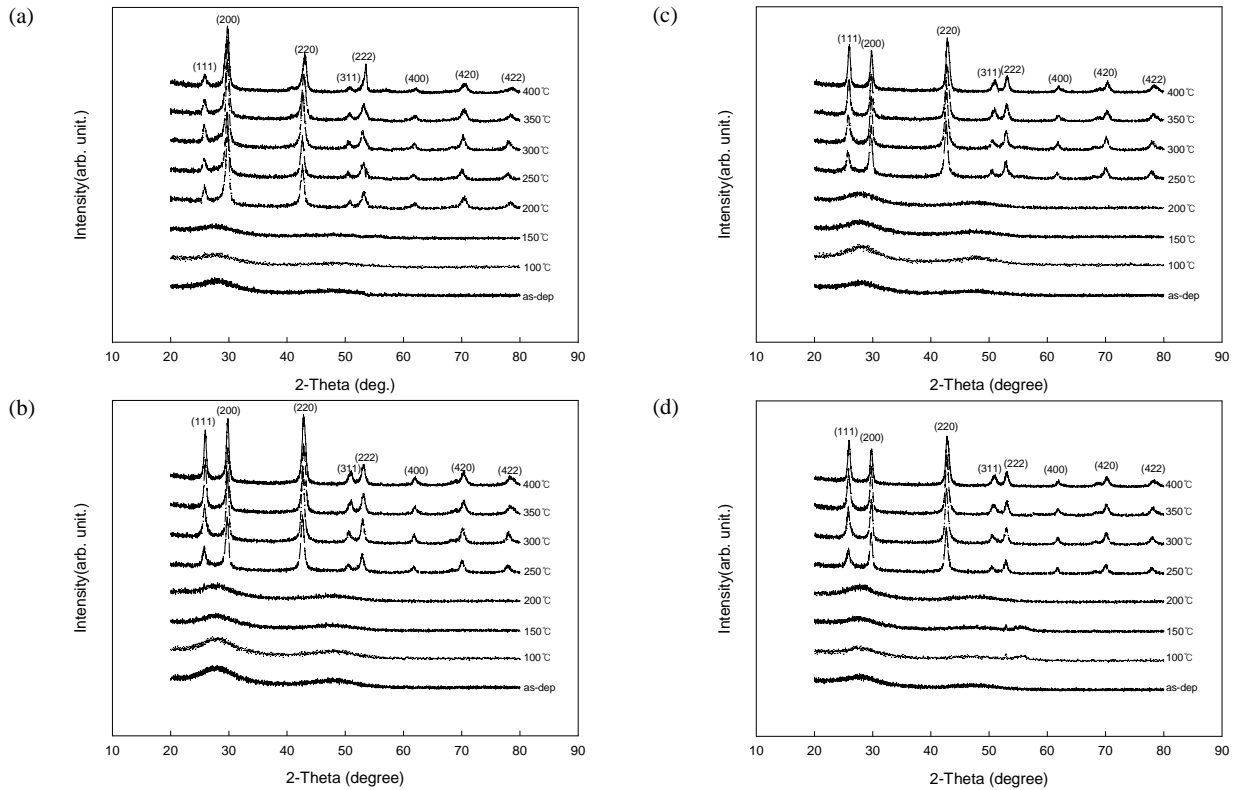


Fig. 1. XRD curves of (a) $\text{Ge}_8\text{Sb}_2\text{Te}_{11}$, (b) $\text{Cu}(11 \text{ W})\text{-Ge}_8\text{Sb}_2\text{Te}_{11}$, (c) $\text{Cu}(15 \text{ W})\text{-Ge}_8\text{Sb}_2\text{Te}_{11}$, and (d) $\text{Cu}(20 \text{ W})\text{-Ge}_8\text{Sb}_2\text{Te}_{11}$.

을 보인다. 일반적으로 상변화 메모리 소자의 구동 시에는 비정질상과 fcc 구조 사이의 변화로 동작하는 것으로 알려져 있다. 그림 1(b)~(d)를 살펴보면 250°C 이상에서 (111), (200), (220)과 같이 전형적인 fcc 구조의 피크가 확인되었다. 즉, Cu를 도핑한 $\text{Ge}_8\text{Sb}_2\text{Te}_{11}$ 박막은 열처리 온도가 증가함에 따라 비정질→fcc의 1 단계 결정화 과정을 보인다. 그림 1(a)와 비교해 보면 Cu 도핑 후 fcc 피크 시작 온도가 약 50°C 증가한 것을 확인할 수 있는데 이는 결정화 온도(T_c)가 증가한 현상이며, 상변화 소자로 구동할 때 T_c 가 증가하게 되면 비정질 영역에서 열안정성이 증가한다고 알려져 있다 [8].

$\text{Ge}_8\text{Sb}_2\text{Te}_{11}$ 박막에 도핑된 Cu는 비정질 상 안정제로 작용하고, T_c 를 높여 열 안정성에 기여하는 것으로 생각할 수 있다.

그림 2는 Cu(0, 11, 15, 20 W)-doped $\text{Ge}_8\text{Sb}_2\text{Te}_{11}$ 칼코게나이드 결정질, 비정질 박막의 $h\nu$ 에 대한 $(\alpha h\nu)^{1/2}$ 의 그래프로서, 외삽을 통해 얻어지는 광자 에너지 (photon energy)축의 절편 값으로 E_{op} 를 얻은 결과이다.

Cu(0, 11, 15, 20 W)-doped $\text{Ge}_8\text{Sb}_2\text{Te}_{11}$ 칼코게나이드 박막을 자외선-가시광원-적외선 분광광도계를 이

용하여 투과도(T_{op})값을 측정한 뒤 $\alpha(\lambda) = -\ln(T_{op})/d$ 의 식을 이용하여 광흡수계수 $\alpha(\lambda)$ 를 구하였다. 여기서 d는 박막의 두께이다. 강한 전자-포논 상호작용이 있는 칼코게나이드 박막은 $\alpha h\nu \propto (h\nu - E_{op})^n$ 의 특성을 보인다고 보고되어 왔다. 따라서 실험으로 얻은 광흡수 스펙트럼을 $\alpha h\nu^{1/2}$ 와 $h\nu$ 에 대하여 외삽해 얻어지는 에너지축의 절편이 광학적 밴드 갭(E_{op})이 된다. 흡수계수가 $1 \sim 10^{-3} \text{ cm}^{-1}$ 인 낮은 에너지 영역에서는 지수적으로 감소하는 꼬리가 나타나는데 이 꼬리는 우르바흐 꼬리(Urbach tail)라 부르며, 이때 기울기를 1/F의 매개변수로 표현한다. 이 기울기는 비정질 칼코게나이드 박막의 에너지-유기 원자구조 변화와 연관되어 있고, 기울기의 감소는 곧 비정질 박막의 원자배열의 무질서도(disorder)의 증가를 의미한다.

Beer 법칙을 이용해 구한 $\alpha(\lambda)$ 값을 이용하여 T_{auc} 방정식인 $\alpha h\nu \propto (h\nu - E_{op})^n$ 의 관계를 적용시켜 E_{op} 값을 도출하게 되며, $n=1/2$ 는 직접전이 반도체, $n=2$ 는 간접전이 반도체가 갖는 값이다. 비정질 칼코게나이드 경우에 강한 전자-포논 상호작용을 가지고 있고 확장 에너지 영역($h\nu > E_{op}$)에서 $\alpha h\nu \propto B(h\nu - E_{op})^2$ 으로 표현되

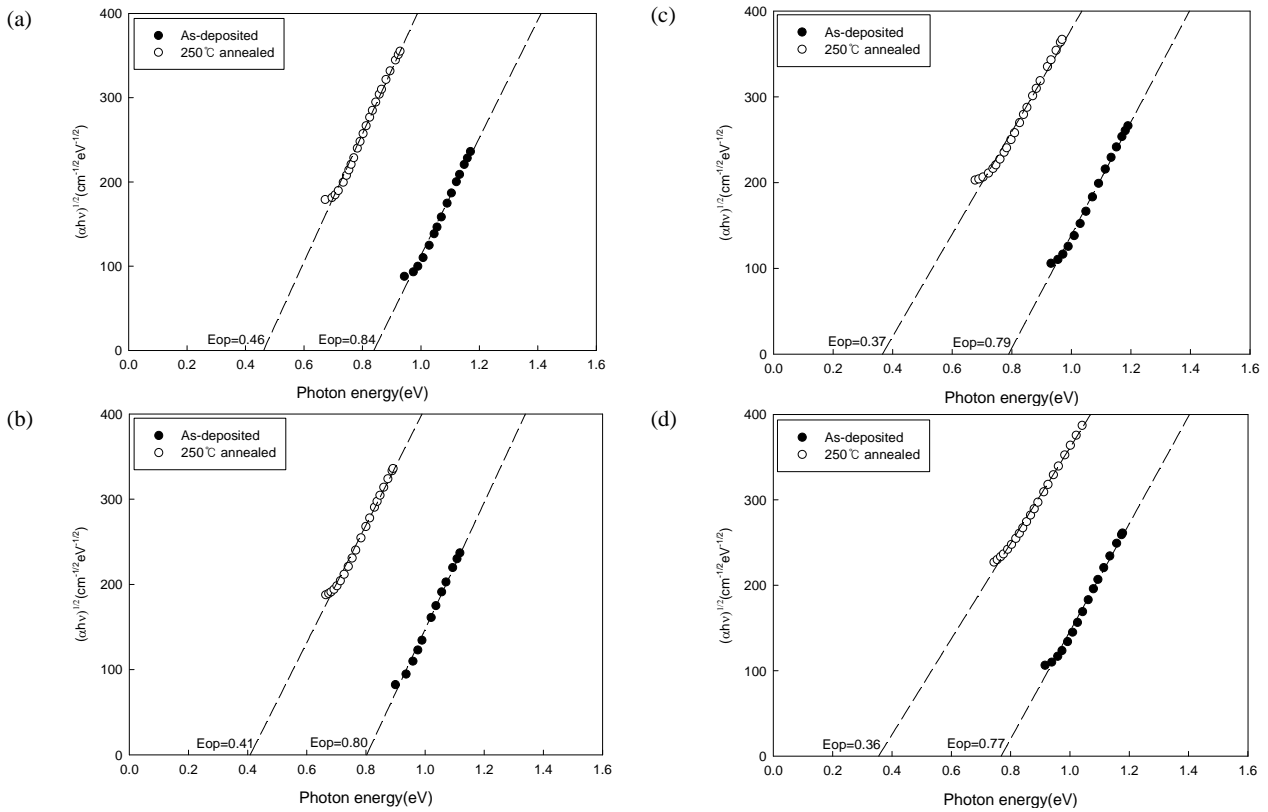


Fig. 2. Results of $h\nu$ vs $(ah\nu)^{1/2}$ for amorphous and crystalline phase (a) $\text{Ge}_8\text{Sb}_2\text{Te}_{11}$ and (b, c, d) Cu(11, 15, 20 W)-doped $\text{Ge}_8\text{Sb}_2\text{Te}_{11}$.

는 흡수특성을 가진다 [9,10]. E_{op} 의 경우 상변화 소자에서 $\Delta E_{op} = |E_{op}(amorphous) - E_{op}(crystalline)|$ 값이 클수록 소자의 노이즈를 줄일 수 있다는 장점이 있다.

$\text{Ge}_8\text{Sb}_2\text{Te}_{11}$ 의 경우 ΔE_{op} 가 0.38 eV값을 가졌으며, Cu(11 W)-doped $\text{Ge}_8\text{Sb}_2\text{Te}_{11}$ 의 경우 ΔE_{op} 값이 0.39 eV로 $\text{Ge}_8\text{Sb}_2\text{Te}_{11}$ 의 값과 근사했다. Cu를 도핑한 $\text{Ge}_8\text{Sb}_2\text{Te}_{11}$ 의 ΔE_{op} 값은 도핑 함량이 증가할수록 비슷하거나 증가하는 경향이 보였고 이는 Cu를 도핑한 $\text{Ge}_8\text{Sb}_2\text{Te}_{11}$ 이 소자로 구동 시 소자의 노이즈를 줄일 수 있는 장점을 가진다고 평가할 수 있다. 그러나 Cu를 도핑한 뒤 우르바흐 꼬리의 기울기는 앞선 연구 결과에 비해 큰 변화가 보이지 않았는데, 이는 비정질 박막의 무질서도가 증가하지 않은 것으로 해석된다 [11]. 그림 2로부터 얻어진 E_{op} , ΔE_{op} 값을 표 1에 정리하였다.

그림 3은 Cu(0, 11, 15, 20 W)-doped $\text{Ge}_8\text{Sb}_2\text{Te}_{11}$ 칼코게나이드 박막의 면 저항(R_s)값을 얻은 결과이다. 일반적으로 전기 전도도와 열전도도의 관계는 Wiedemann-Franz-Lorenz의 식인 $k = N_L K_F T$ 로 결정된다. k 는 열전도도, K_F 는 전기전도도이며 N_L 는 Lorenz 상수를 의

Table 1. Values of E_{op} and ΔE_{op} for $\text{Ge}_8\text{Sb}_2\text{Te}_{11}$ and Cu (11, 15, 20 W)-doped $\text{Ge}_8\text{Sb}_2\text{Te}_{11}$.

Films		E_{op}	ΔE_{op}
$\text{Ge}_8\text{Sb}_2\text{Te}_{11}$	Amorphous	0.84 eV	0.38
	Crystalline	0.46 eV	
Cu(11 W)-doped $\text{Ge}_8\text{Sb}_2\text{Te}_{11}$	Amorphous	0.80 eV	0.39
	Crystalline	0.41 eV	
Cu(15 W)-doped $\text{Ge}_8\text{Sb}_2\text{Te}_{11}$	Amorphous	0.79 eV	0.42
	Crystalline	0.37 eV	
Cu(20 W)-doped $\text{Ge}_8\text{Sb}_2\text{Te}_{11}$	Amorphous	0.77 eV	0.41
	Crystalline	0.36 eV	

미한다 [12]. 외부에서 인가하는 열에너지가 같다면 전기전도도는 열전도도에 의해 결정되고, 불순물 산란 때문에 일어난 전기 전도도의 감소가 곧 열전도도의 감소로 나타나고 Joule heat로 구동하는 상변화 소자에서 광이나 전류에 의해 일어나는 열의 효율을 높일 수 있다. 이는 곧 열의 효율을 높여 소비전력을 낮출 수

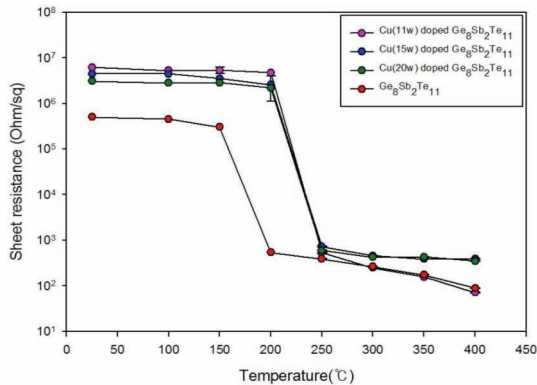


Fig. 3. The sheet resistance (R_s) of a $\text{Ge}_8\text{Sb}_2\text{Te}_{11}$ and Cu(11, 15, 20 W)-doped $\text{Ge}_8\text{Sb}_2\text{Te}_{11}$ thin films with different annealing temperature.

있다고 평가된다. [13].

열처리 전 박막들은 비정질 상으로 존재하며, R_s 값이 10^5 이상으로 높은 값을 갖는다. 하지만 열처리 후의 박막들은 결정상으로 상전이가 일어나므로 비정질 상의 R_s 에 비해 낮은 값을 갖는다. $\text{Ge}_8\text{Sb}_2\text{Te}_{11}$ 의 경우 200°C 부근에서 급격한 R_s 의 감소가 일어난 것을 확인할 수 있으며, 이는 그림 1의 XRD 결과와 상응한 것으로서 비정질 상에서 결정질 상으로의 상변화와 일치한 것을 보여준다. 마찬가지로 Cu(11, 15, 20 W)-doped $\text{Ge}_8\text{Sb}_2\text{Te}_{11}$ 의 R_s 경우 250°C 부근에서 급격한 차이가 일어나며, 그림 1의 XRD 결과와 일치한다. Cu(11, 15, 20 W)-doped $\text{Ge}_8\text{Sb}_2\text{Te}_{11}$ 은 $\text{Ge}_8\text{Sb}_2\text{Te}_{11}$ 보다 두 가지 상에서 높은 R_s 값을 보여주고 있고, 특히 비정질에서는 Cu를 도핑한 R_s 값이 1.5배 이상 증가했다. 비정질에서의 면 저항 증가는 높은 무질서도에 의한 갭 내 상태에 의해 기인한 현상이고 비정질의 저항을 높이면서 열전도도를 낮춘다. 이는 곧 메모리 소자로 구동할 때에 필요한 소비 전력을 낮출 수 있다고 판단한다.

결정질에서 Cu를 도핑한 $\text{Ge}_8\text{Sb}_2\text{Te}_{11}$ 은 정공, $\text{Ge}_8\text{Sb}_2\text{Te}_{11}$ 의 자유전자, Cu의 자유전자의 3가지 종류의 캐리어로 구성이 되어 있다. 면 저항은 캐리어의 밀도와 다른 두 상에서의 이동도와 관련이 있는데, Cu 도핑 양이 작다면 Cu 원자들이 $\text{Ge}_8\text{Sb}_2\text{Te}_{11}$ 의 격자 내 빈 공간을 차지하게 되고 따라서 면 저항은 증가하게 된다. 그러나 Cu 도핑 양이 많다면, Cu의 자유전자 밀도는 $\text{Ge}_8\text{Sb}_2\text{Te}_{11}$ 로부터 줄어든 자유전자 밀도보다 크게 되어 면 저항을 감소시키는 요인이 된다. 그러므로 결정질에서 면 저항을 살펴보면 Cu(20 W)- $\text{Ge}_8\text{Sb}_2\text{Te}_{11}$ 의 면 저항이 가장 높은 것을 알 수 있다 [14].

따라서 Cu가 첨가되면 무질서도가 높아진 갭 내 상

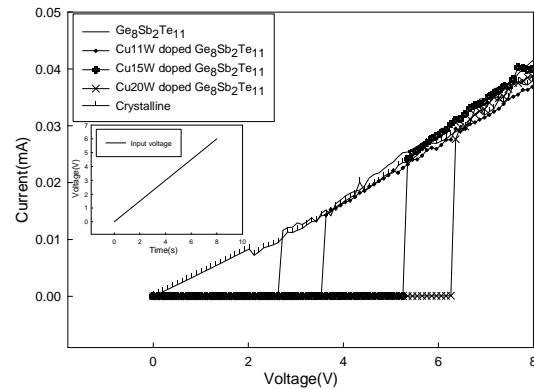


Fig. 4. I-V curves of the PRAM based on $\text{Ge}_8\text{Sb}_2\text{Te}_{11}$ and Cu(11, 15, 20 W)-doped $\text{Ge}_8\text{Sb}_2\text{Te}_{11}$.

태는 비정질의 저항을 증가시키고 열전도도를 낮출 수 있다. 이러한 열전도도의 감소는 광이나 전류에 의해 일어나는 열의 효율을 높일 수 있다고 평가할 수 있다.

그림 4는 Cu(0, 11, 15, 20 W)-doped $\text{Ge}_8\text{Sb}_2\text{Te}_{11}$ 칼코게나이드 박막의 전류-전압 특성(I-V curve)을 얻은 결과이다. 전압을 0 V→8 V로 선형 인가하여 비정질→결정질로의 변화를 확인한 뒤, 결정질이 유지되는 것을 확인하기 위해 8 V→0 V로 전압을 인가하였다. 상변화를 야기할 수 없는 낮은 전압에서는 비정질 박막이 매우 높은 저항을 가지고 있어 전류가 흐르지 못한다. 하지만 문턱 전압(threshold voltage, V_{th}) 이상의 전압을 인가하면 소자의 전기적 저항이 전압 상승으로 인한 국부적인 열에너지로 인해 내부에 전기적인 전도 경로가 형성이 되고, 전기적 전도 경로가 형성이 되면 결정핵이 생성 및 성장이 발생하며, 이에 따라 저항이 급격하게 감소하여 전류의 상승을 야기한다 [15]. 전압을 인가한 후 비정질 상태에서는 전류가 거의 흐르지 않아 저항의 기울기가 매우 높은 것을 확인할 수 있으나, V_{th} 이후 결정질로 상변화가 일어나면서 저항의 기울기가 비정질에 비해 낮아진 것을 확인할 수 있었고 이는 면 저항의 결과와 일치한다.

또한 Cu 도핑 함량이 증가할수록 V_{th} 가 증가함을 확인할 수 있었다. 이는 Cu 도핑 함량 증가에 따라 박막의 결정화 온도와 면 저항이 증가하는 XRD와 4-탐침법 측정 결과와 일치함을 알 수 있다. V_{th} 의 증가는 Cu 도핑 함량에 따라 E_{op} 와 같이 비정질 상에서의 이동도 차이(mobility gap)의 증가와 자유 전하 전송자 밀도(density of free carrier)가 감소, 그리고 비정질 상에서의 비저항의 증가에 기인한다 [16,17]. 그림 4로부터 얻어진 V_{th} 값을 표 2에 정리하였다.

Table 2. Values of threshold voltage for $\text{Ge}_8\text{Sb}_2\text{Te}_{11}$ and Cu (11, 15, 20 W)-doped $\text{Ge}_8\text{Sb}_2\text{Te}_{11}$.

	V_{th} (V)
$\text{Ge}_8\text{Sb}_2\text{Te}_{11}$	2.63
Cu(11 W)-doped $\text{Ge}_8\text{Sb}_2\text{Te}_{11}$	3.56
Cu(15 W)-doped $\text{Ge}_8\text{Sb}_2\text{Te}_{11}$	5.26
Cu(20 W)-doped $\text{Ge}_8\text{Sb}_2\text{Te}_{11}$	6.27

4. 결론

본 실험에서는 비정질 칼코게나이드 물질인 $\text{Ge}_8\text{Sb}_2\text{Te}_{11}$ 에 Cu를 도핑하여 Si, Glass 기판 위에 증착하여 열처리 온도에 따른 특성을 전기적·광학적·구조적 분석을 하였다.

우선 XRD 결과를 통해 열처리 온도(100~400°C) 범위 내에서 Cu가 도핑된 $\text{Ge}_8\text{Sb}_2\text{Te}_{11}$ 이 비정질→fcc로 1단계 결정화 과정을 거치고, T_c 가 증가한 것을 확인하였다. E_{op} , ΔE_{op} 결과에서는 Cu 도핑 함량이 높아질수록 ΔE_{op} 값이 증가하는 경향을 보였다.

면 저항(R_s)의 결과에서는 Cu(11 W)- $\text{Ge}_8\text{Sb}_2\text{Te}_{11}$ 이 비정질에서 가장 높은 R_s 값을 갖는 것을 확인하였다. 또한 상변화 메모리 소자를 시편으로 제작 후에 I-V curve를 측정된 결과 Cu 도핑 함량이 많아질수록 V_{th} 이 증가한 것을 확인할 수 있었다.

따라서 $\text{Ge}_8\text{Sb}_2\text{Te}_{11}$ 에 Cu를 도핑하면 기존 $\text{Ge}_8\text{Sb}_2\text{Te}_{11}$ 보다 낮은 소비전력에서 구동이 가능할 것으로 사료되며, 비정질과 결정질 영역에서의 열 안정성을 향상시켜 상변화 메모리 소자로 이용하기에 적합하다고 판단한다.

ORCID

Hyun-Yong Lee

<https://orcid.org/0000-0003-4282-0616>

감사의 글

이 성과는 전남대학교 학술연구비 지원(과제번호: 2018-3509)에 의하여 연구되었음.

REFERENCES

- [1] S. R. Ovshinsky, *Phys. Rev. Lett.*, **21**, 1450 (1968). [DOI: <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.21.1450>]
- [2] C. J. Park, H. Kong, H. Y. Lee, and J. B. Yeo, *J. Korean Phys. Soc.*, **71**, 42 (2017). [DOI: <https://doi.org/10.3938/jkps.71.42>]
- [3] N. Yamada, E. Ohno, K. Nishiuchi, N. Akahira, and M. Takao, *J. Appl. Phys.*, **69**, 2849 (1991). [DOI: <https://doi.org/10.1063/1.348620>]
- [4] M. Zhu, M. Xia, F. Rao, X. Li, L. Wu, X. Ji, S. Lv, Z. Song, S. Feng, H. Sun, and S. Zhang, *Nat. Commun.*, **5**, 4086 (2014). [DOI: <https://doi.org/10.1038/ncomms5086>]
- [5] K. H. Song, S. C. Baek, and H. Y. Lee, *J. Korean Phys. Soc.*, **61**, 10 (2012). [DOI: <https://doi.org/10.3938/jkps.61.10>]
- [6] K. Ding, K. Ren, F. Rao, Z. Song, L. Wu, B. Liu, and S. Feng, *Mater. Lett.*, **125**, 143 (2014). [DOI: <https://doi.org/10.1016/j.matlet.2014.03.180>]
- [7] S. Kumar, D. Singh, and R. Thangaraj, *Thin Solid Films*, **531**, 577 (2013). [DOI: <https://doi.org/10.1016/j.tsf.2013.01.057>]
- [8] A. Pirovano, A. L. Lacaita, A. Benvenuti, F. Pellizzer, and R. Bez, *IEEE Trans. Electron Devices*, **51**, 452 (2004). [DOI: <https://doi.org/10.1109/TED.2003.823243>]
- [9] Y. Utsugi and Y. Mizushima, *J. Appl. Phys.*, **51**, 1773 (1980). [DOI: <https://doi.org/10.1063/1.327738>]
- [10] J. Kalb, F. Spaepen, and M. Wutting, *Appl. Phys. Lett.*, **84**, 5240 (2004). [DOI: <https://doi.org/10.1063/1.1764591>]
- [11] K. H. Song, S. W. Kim, J. H. Seo, and H. Y. Lee, *Thin Solid Films*, **517**, 3958 (2009). [DOI: <https://doi.org/10.1016/j.tsf.2009.01.128>]
- [12] M. E. Fine and N. Hsieh, *J. Am. Ceram. Soc.*, **57**, 502 (1974). [DOI: <https://doi.org/10.1111/j.1151-2916.1974.tb11407.x>]
- [13] K. H. Song, J. H. Seo, J. H. Kim, and H. Y. Lee, *J. Appl. Phys.*, **106**, 123529 (2009). [DOI: <https://doi.org/10.1063/1.3273400>]
- [14] J. L. Xia, B. Liu, Z. T. Song, S. L. Feng, and B. Chen, *Chin. Phys. Lett.*, **22**, 934 (2005). [DOI: <https://doi.org/10.1088/0256-307X/22/4/043>]
- [15] J. H. Yi, Y. H. Ha, J. H. Park, B. J. Kuh, H. Horii, Y. T. Kim, S. O. Park, Y. N. Hwang, S. H. Lee, S. J. Ahn, S. Y. Lee, J. S. Hong, K. H. Lee, N. I. Lee, H. K. Kang, U. I. Chung, and J. T. Moon, *Proc. IEEE International Electron Devices Meeting 2003 (IEEE, Washington, USA, 2003)* p. 901. [DOI: <https://doi.org/10.1109/IEDM.2003.1269424>]
- [16] A. Pirovano, A. L. Lacaita, D. Merlani, A. Benvenuti, F. Pellizzer, and R. Bez, *Digest. International Electron Devices Meeting (IEEE, San Francisco, USA, 2002)* p. 923. [DOI: <https://doi.org/10.1109/IEDM.2002.1175987>]
- [17] A. Pirovano, A. L. Lacaita, F. Pellizzer, S. A. Kostylev, A. Benvenuti, and R. Bez, *IEEE Trans. Electron Devices*, **51**, 714 (2002). [DOI: <https://doi.org/10.1109/TED.2004.825805>]