

## 비정질 Sb-Bi-Te 박막의 전기적 특성에 관한 연구

### A Study on the Electrical Properties of Amorphous Sb-Bi-Te Thin Films

이재형, D. Mangalaraj, 이준신\*  
(Jaehyeong Lee, D. Mangalaraj, and Junsin Yi)\*

#### Abstract

Amorphous  $Sb_{2-x}Bi_xTe_3$  ( $x = 0.0, 0.5$  and  $1.0$ ) thin films were prepared by vacuum evaporation. The resistivity of the films decreases from  $1.4 \times 10^{-2}$  to  $8.84 \times 10^{-5} \Omega \cdot cm$  and the type of conductivity changes from p to n with the increase of the x value of the films. D.C. conduction studies on these films are performed at various electric fields in the temperature range of 303-403 K. At low electric fields, two types of conduction mechanisms, i.e. the variable range hopping and the phonon assisted hopping are found to be responsible for the conduction, depending upon the temperature. The activation energy decreases from 0.082 to 0.076 eV in the temperature range of 303-363 K and from 0.47-0.456 eV in the second range of 363-403 K, indicating the shift of the Fermi level towards the conduction band edge and hence the change of the conduction from p to n type with the increase of the Bi concentration. Poole-Frenkel emission dominates at high fields. The shape of the potential well of the localized centre is deduced and the mean free path of the charge carriers is also calculated.

**Key Words** : Amorphous semiconductor, Sb-Bi-Te system, D.C. conduction, Hall studies

#### 1. 서론

현대 과학 기술의 발달로 인해 더욱 많은 기능을 갖는 새로운 물질들이 요구되고 있는데, 그 중 가장 큰 관심을 끌고 있는 물질 가운데 하나가 비정질 반도체(amorphous semiconductor)이다. 많은 비정질 반도체가 이미 수동 및 능동 소자로 사용되고 있으며[1,2], 태양전지, 평판 디스플레이, 광메모리 등의 분야에 응용되어 수많은 제품이 상품화되고 있는 실정이다[3]. 이러한 비정질 반도체 중 칼코게나이드(chalcogenide)계 물질을 이용한

스위칭 소자 및 기억소자에 관한 연구는 1960년대 말 이후부터 계속적으로 연구되고 있다[3-7]. 칼코게나이드계 물질의 가장 큰 이점은 물질의 여러 물성들이 조성에 따라 변화하므로 특별히 요구되는 특성을 갖는 물질을 제조할 수 있다는 것이다.

한편, 비정질 물질에서의 전기 전도 측정은 물질 구조에 관한 정보를 제공할 수 있기 때문에 큰 관심을 끌고 있다. 일반적으로 이들 물질에서의 전기 전도는 전도대 내의 전자 또는 가전자대의 정공과 같은 자유 캐리어의 이동이나 금지대(forbidden gap) 내의 국재화된(localized) 캐리어의 호핑(hopping) 이동에 기인한다. 금속-반도체-금속(metal-semiconductor-metal) 구조에서 비정질 반도체의 d.c. 전기 전도는 hopping conduction, thermionic 또는 Schottky Richardson emission, Poole-Frenkel emission, space charge limited con-

성균관대학교 전기전자 및 컴퓨터공학부  
(경기도 수원시 장안구 천천동 300,  
Fax: 031-290-7159,  
E-mail: yi@yurim.skku.ac.kr)  
2001년 10월 26일 접수, 2001년 11월 26일 1차 심사 완료,  
2001년 12월 21일 2차 심사 완료

duction, tunneling 등과 같은 많은 전도 기구가 관여되는데, 이들 전도 기구 중 하나 또는 그 이상의 조합이 비정질 반도체에서의 전기 전도 기구가 된다. 이러한 비정질 반도체의 d.c. 전도 특성에 대한 많은 연구들이 보고되고 있지만[8-12], Sb-Bi-Te 박막에 대한 전도 특성에 관한 연구는 보고되고 있지 않다.

따라서 본 논문에서는 비정질 Sb-Bi-Te 박막을 진공 증착법에 의해 제조하고, Bi 농도에 따른 박막의 전기적 특성 및 d.c. 전기전도 특성을 조사하였다.

## 2. 실험 방법

비정질  $Sb_{2-x}Bi_xTe_3$  박막 증착에 사용될 증발원을 제조하기 위해서 각 조성(x)의 원자량 비에 해당하는 고순도(99.999%)의 antimony 및 bismuth, tellurium powder를 정확히 평량한 다음 내경이 10 mm인 석영관 속에 넣고 약  $2.6 \times 10^{-3}$  Pa로 진공 봉입하였다. 이 석영관을 전기로에 넣고 48시간 동안 일정한 온도로 유지하였다. 이때 온도는 상태를 참고하여 각 조성마다 적당한 온도를 유지하였고, 각 원소들의 균일한 혼합을 위하여 회전이 가능한 전기로를 사용하였다. 이렇게 melting이 끝난 후 3°C의 얼음물 속에서 급냉시켜 비정질화 시켰다.

$Sb_{2-x}Bi_xTe_3$  박막(x = 0.0, 0.5, 1.0)을 증착시킬 기판으로 Corning 7059 유리를 세제액으로 세척한 후 질소 gun으로 건조하여 사용하였다. 시편 제조에 사용된 장비로는 기존의 저항성 가열 증착기(thermal evaporator)로서 시편제작을 위해 면저 chamber 안을 mechanical pump와 diffusion pump를 이용하여  $10^{-6}$  Torr 이하로 배기한 후 증착 원료를 Mo boat로부터 증발시켜 실온에서  $Sb_{2-x}Bi_xTe_3$  박막을 증착하였다. 증착 중 증발속도는 boat에 흐르는 전류량을 조절하여 일정하게 유지시켰으며, 실험의 재현성을 위해 기판 옆에 위치한 두께측정센서를 사용하여 증발속도를 측정하였다.

제조한  $Sb_{2-x}Bi_xTe_3$  박막의 두께는 surface profiler( $\alpha$ -step, Tencor 500)을 이용하여 측정하였으며, 결정구조를 조사하기 위해 X-선 회절검사(Philips, PW 1390)를 하였다. X-선 회절검사 결과 시편 조성에 관계없이 어떠한 회절 peak도 관찰되지 않았으며, 따라서 모든 박막이 비정질 형태로 성장했음을 알 수 있었다.  $Sb_{2-x}Bi_xTe_3$  박막의 전

기적 특성은 van der Pauw법 및 Hall 효과 측정 시스템을 이용하여 측정하였다. 또한 박막의 전기 전도 특성을 조사하기 위해 aluminium-semiconductor-aluminium(MSM) 구조를 이용하였다. 온도에 따른 전압-전류 특성은 electrometer를 이용하여 진공 중에서 측정하였다.

## 3. 실험 결과 및 고찰

### 3.1 $Sb_{2-x}Bi_xTe_3$ 박막의 전기적 특성

표 1은 Hall 및 van der Pauw법에 의해 측정된  $Sb_{2-x}Bi_xTe_3$  박막의 전기적 특성을 나타낸 것이다. 표에서 높은 Bi 농도(x = 1.0)에서 박막의 전기 전도 특성이 p-type에서 n-type으로 변화됨을 알 수 있다. 이러한 전도 특성의 변화는 Sb-Bi-Te계 내에 존재하는 화학 결합에 근거하여 설명할 수 있다.  $Sb_2Te_3$  박막 내에는 단지 Sb-Te와 Te-Te 결합만이 존재할 것으로 생각되는데, 여기에 Bi가 첨가되면 Bi-Te의 결합 에너지가 Sb-Bi 및 Te-Te 결합 에너지 보다 크기 때문에 Te는 Bi와 우선적으로 결합하며, 그 결과 Te-Te 결합의 수는 감소하게 된다. 따라서 표 1에서 관찰되는  $Sb_{2-x}Bi_xTe_3$  박막의 조성에 따른 전기적 특성 및 캐리어 전도 특성 변화는 Bi-Te 결합 생성과 그에 따른 Te-Te 결합 수의 감소와 관련된다. 즉, Sb-Bi-Te계에서 낮은 Bi 농도인 경우 Bi-Te 결합은 공유 결합 특성을 나타내지만 높은 Bi 농도인 경우 Bi 원자들은 부분적으로 이온화되며, 결합 길이도 약간 증가한다[13]. 이러한 부분적으로 이온화된 Bi 원자들로 인해 Fermi level은 고정되지 않고 전도대 끝(edge)으로 이동한다. 따라서 Bi 농도가 증가할수록 비저항은 급격히 감소하고, 높은 Bi 농도에서 캐리어 전도 특성이 표 1에서와 같이 p-type에서 n-type으로 변화된다. Bhatia 등[14]의 보고에 따르면 Ge-Bi-Se계의 경우 높은 Bi 농도에서 전기 전도도의 활성화 에너지(activation energy,  $E_a$ )가 크게 감소하는데, 이러한 활성화 에너지의 감소는 전도대 끝으로의 Fermi level 이동에 기인하는 것으로 설명하였다. 또한 Takahashi 등[15,16]은 비정질  $Bi_2Se_3$  박막에 대한 XPS와 UPS(ultraviolet photoemission spectroscopy) 측정으로부터 양으로 대전된 Bi 원자의 존재를 확인하였다. 그들은 이것을 Bi 원자에 비하여 Se의 전자 친화력(electron affinity)이 강하여 Bi 원자에서 Se 원자로 전자의 이동이 일어났기 때문이라고 지적하였다. 이 결과

표 1.  $Sb_{2-x}Bi_xTe_3$  박막의 전기적 특성.

Table 1. Electrical parameters of  $Sb_{2-x}Bi_xTe_3$  thin films.

$Sb_{2-x}Bi_xTe_3$	Thickness (nm)	Hall Coff. ( $cm^3/Coul.$ )	Type of Carriers	Density $\times 10^{21}$ ( $cm^{-3}$ )	Resistivity (ohm-cm)	Mobility ( $cm^2/Vs$ )
$x = 0.0$	970	0.0053	p	1.18	$1.40 \times 10^{-2}$	0.378
$x = 0.5$	1025	0.0037	p	1.69	$6.11 \times 10^{-3}$	0.605
$x = 1.0$	1006	-0.0020	n	3.13	$8.84 \times 10^{-5}$	22.59

로써 Bi-Se 결합의 극성(polarity)에 의한  $Bi^+$  원자의 존재를 이해할 수 있고,  $Bi^+$  증가에 의한 n형 전도가 일어난다고 지적하였다.

### 3.2 $Sb_{2-x}Bi_xTe_3$ 박막의 d.c. 전도 특성

그림 1은  $Sb_{2-x}Bi_xTe_3$  ( $x = 0.5$ ) 박막의 전압-전류 특성을 나타낸 것이다. 이와 유사한 결과가  $x = 0$  및 1의 조성에서도 관찰되었다. 그림으로부터 기울기가 다른 두 영역이 존재함을 알 수 있다. 박막 조성에 관계없이 전류는 첫 번째 영역( $<10^5$  V/cm)에서는 직선적으로 변화하고, 두 번째 영역에서는  $I \propto V^n$  형태의 전압 의존성을 나타낸다. 이때  $n$ 은 1.4와 1.6 사이의 값을 갖는다. 본 논문에서는 이 두 영역을 저 전계 영역( $<10^5$  V/cm)과 고 전계 영

역( $> 1 \times 10^5$  V/cm)으로 분류하여 각 영역에서의 전기 전도 기구(conduction mechanism)에 대해 조사하였다.

#### 3.2.1 저 전계에서의 전기 전도

비정질  $Sb_{2-x}Bi_xTe_3$  박막의 전기 전도도의 온도 의존성은 다음과 같이 주어진다.

$$\sigma = \sigma_0 \exp(-E_a/k_B T) \quad (1)$$

여기서  $\sigma_0$ 는 pre-exponential factor,  $k_B$ 는 Boltzmann 상수,  $T$ 는 절대온도,  $E_a$ 는 전기 전도에 대한 활성화 에너지이다. 식 (1)의 대수 형식은

$$\ln \sigma = \ln \sigma_0 - E_a/k_B T \quad (2)$$

이므로  $\ln \sigma$  vs.  $10^3/T$  plot의 선형부분에 대한 기울기로부터 활성화 에너지를 구할 수 있다. 그림 2는  $\ln \sigma$  vs.  $10^3/T$  plot으로 온도에 따라 서로 다른 두 기울기가 존재함을 볼 수 있다. 이 기울기로부터 구한 활성화 에너지를 표 2에 나타내었다. 표 2에서 두 온도 영역에서의 활성화 에너지는 Bi 농도가 증가함에 따라 감소함을 알 수 있다. 한편, 표 2에서 첫 번째 온도 영역(303~363 K)에 해당하는 활성화 에너지는 작은 값을 갖는데, 이것은 이 온도 영역에서 전하( $Sb_2Te_3$ 과  $Sb_{1.5}Bi_{0.5}Te_3$ 의 경우 정공,  $SbBiTe_3$ 의 경우 전자) 전도가 호핑(hopping) 또는 광범위 호핑(variable range hopping)에 의한 것임을 나타낸다. 정확한 호핑 기구를 확인하기 위해 303~363 K 범위의 온도 영역에 대한  $\ln(\sigma(T)T^{1/2})$  vs.  $T^{-1/4}$  plot를 그림 3에 나타내었다. 그림에서  $\ln(\sigma(T)T^{1/2})$ 와  $T^{-1/4}$ 의 선형 관계로부터 이 온도 영역에서의 전기 전도는 광범위 호핑에 의한 것임을 알 수 있다. 또한 표 2

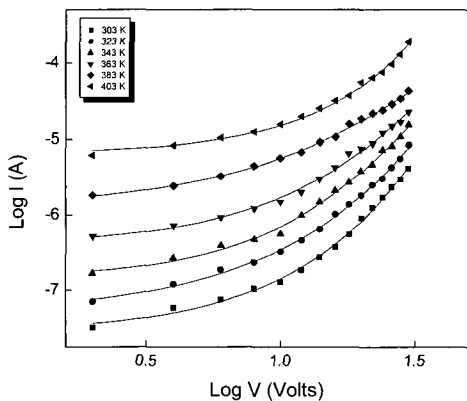


그림 1.  $Sb_{1.5}Bi_{0.5}Te_3$  박막의 전류-전압 특성.  
Fig. 1. Current-voltage characteristics of  $Sb_{1.5}Bi_{0.5}Te_3$  thin film.

로부터 두 번째 온도 영역에서의 활성화 에너지는 첫 번째 영역에 비해서는 크나 비교적 작은 값을 갖는다. 더욱이 두 번째 온도 영역의 경우  $\ln(\sigma(T)T^{1/2})$ 와  $T^{-1/4}$  사이에는 선형 관계를 나타내지 않는다. 따라서 두 번째 온도 영역에서 계산된 낮은 활성화 에너지는 phonon assisted hopping conduction process에 기인한 것으로 생각된다. 즉, 두 번째 온도 영역에서 전하 캐리어는 가장 인접한 국재 상태(localized state)를 통해 호핑하기 위한 충분한 포논 에너지를 갖고 있다. 본 논문에서 303~363 K 온도 영역에서 관찰되는  $\ln(\sigma(T)T^{1/2})$ 와  $T^{-1/4}$  사이에 선형 관계로부터 Fermi level 근처의 트랩 밀도  $N(E_F)$ , 국재 상태 사이의 간격  $R$ , 호핑 에너지  $\Delta$ , 국재 상태와 관련된 파동함수의 공간 확장(spatial extension)  $a^{-1}$ 과 같은 여러 파라미터들을 계산할 수 있는데[17], 그림 3의 절편( $\sigma_0$ ) 및 기울기( $A$ )를 사용하여 계산한 이들 파라미터 값들을 표 3에 나타내었다. 표에서 볼 수 있듯이 트랩 밀도는 Bi 농도가 증가함에 따라 감소하는데, 이는 본 논문에서 제조한 Sb-Bi-Te 박막의 토폴로지컬 무질서(topological disorder)가 Bi 농도 증가에 따라 감소함을 의미한다. 그 결과 국재 상태 사이의 간격은 증가하고, 따라서 호핑에 요구되는 에너지는 감소한다. 또한  $\Delta > k_B T$  및  $aR \gg 1$ 과 같은 Mott의 광범위 호핑에 대한 필요 조건이[10] 만족됨을 알 수 있다.

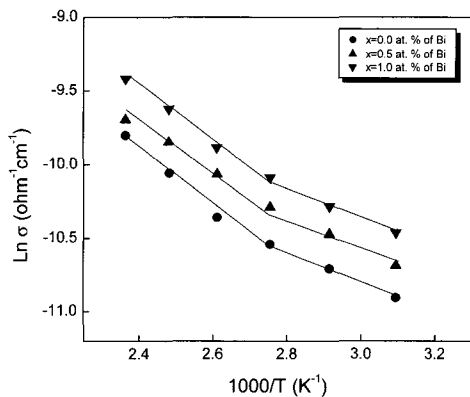


그림 2.  $Sb_{2-x}Bi_xTe_3$  박막의  $\ln \sigma$  vs.  $10^3/T$  plot.  
Fig. 2. Variation of  $\ln \sigma$  with  $10^3/T$  of  $Sb_{2-x}Bi_xTe_3$  thin films.

표 2.  $Sb_{2-x}Bi_xTe_3$  박막의 d.c. 활성화 에너지.  
Table 2. D.C. activation energy of  $Sb_{2-x}Bi_xTe_3$  thin films.

$Sb_{2-x}Bi_xTe_3$	$E_a$	$E_a$
	First region 303~363 K (eV)	Second region 363~403 K (eV)
$x = 0.0$	0.082	0.470
$x = 0.5$	0.079	0.466
$x = 1.0$	0.076	0.456

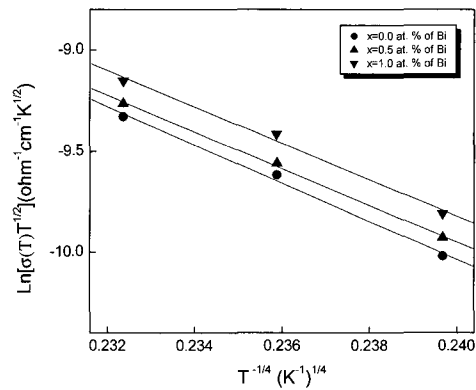


그림 3.  $Sb_{2-x}Bi_xTe_3$  박막의  $\ln \sigma((T)T^{1/2})$  vs.  $T^{-1/4}$  plot.  
Fig. 3. Plot between  $\ln \sigma((T)T^{1/2})$  and  $T^{-1/4}$  of  $Sb_{2-x}Bi_xTe_3$  thin films.

### 3.2.2 고 전계에서의 전기 전도

그림 4는  $Sb_{2-x}Bi_xTe_3$  ( $x = 0.5$ ) 박막의 온도에 따른  $\ln I$  vs.  $F^{1/2}$  plot이다. 그림에서  $\ln I$ 와  $F^{1/2}$ 는 선형적인 관계를 나타내는데, 이는 전도 기구가 Schottky Richardson 또는 Poole-Frenkel type임을 의미한다[17]. 그림 1의 전류-전압 곡선에서 기울기가 2 이하였기 때문에 여기서는 공간 전하 제한 전류(space charge limited current)의 가능성은 배제하였다. Schottky Richardson과 Poole-Frenkel 기구에 의한 전기 전도는 다음과 같은 형태로 표현된다.

$$I \propto \exp\left(\frac{e\beta F^{1/2}}{k_B T}\right) \quad (3)$$

표 3. 비정질  $Sb_{2-x}Bi_xTe_3$  박막의 Mott 파라미터.

Table 3. Mott's parameters of the amorphous  $Sb_{2-x}Bi_xTe_3$  thin films.

$Sb_{2-x}Bi_xTe_3$	Slope A ( $K^{1/4}$ )	$\sigma_0$ ( $\Omega^{-1}cm^{-1}K^{1/2}$ )	$a^{-1}$ (cm)	$N(E_F)$ ( $eV^{-1}cm^{-1}$ )	Range R (cm)	Hopping energy (eV)
$x = 0.0$	94.48	12.64	$3.94 \times 10^{-7}$	$3.81 \times 10^{16}$	$34.47 \times 10^{-7}$	0.153
$x = 0.5$	90.67	11.82	$4.57 \times 10^{-7}$	$2.87 \times 10^{16}$	$38.43 \times 10^{-7}$	0.146
$x = 1.0$	89.77	11.73	$4.70 \times 10^{-7}$	$2.75 \times 10^{16}$	$39.10 \times 10^{-7}$	0.145

정확한 전도 기구를 결정하기 위해 먼저 이론적인 field-lowering coefficient인  $\beta_{theory}$ 를 계산하였고, 실험적으로 구한  $\beta_{Exper.}$ 와 비교하였다. 이때  $\beta_{theory}$ 는 다음 식을 사용하여 계산하였다.

$$\beta = \left( \frac{e}{a\pi\epsilon\epsilon_0} \right)^{1/2} \quad (4)$$

여기서  $e$ 는 electronic charge,  $\epsilon_0$ 는 자유 공간에서의 dielectric constant,  $\epsilon$ 은 고주파에서의 유효

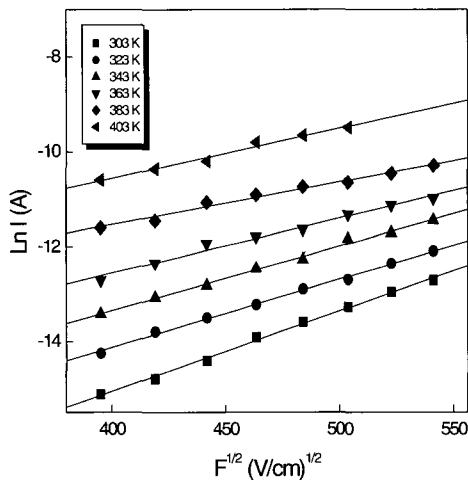


그림 4.  $Sb_{1.5}Bi_{0.5}Te_3$  박막의  $\ln I$  vs.  $F^{1/2}$  plot.  
Fig. 4. Variation of current with square root of the field of  $Sb_{1.5}Bi_{0.5}Te_3$  thin film.

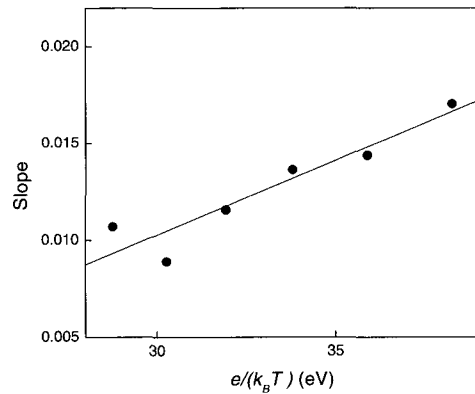


그림 5.  $\ln I$  vs.  $F^{1/2}$  plot 기울기의  $e/k_B T$  의존성.  
Fig. 5.  $e/k_B T$  dependence of slopes determined from the  $\ln I$  vs.  $F^{1/2}$  plot for  $Sb_{1.5}Bi_{0.5}Te_3$  thin film.

dielectric constant,  $a$ 는 Schottky emission인 경우 4, Poole-Frenkel emission인 경우 1이다. 그림 5는 그림 4의 기울기를  $e/k_B T$ 에 따라 나타낸 것으로  $\beta$ 의 실험 값은 그림 5의 기울기로부터 계산할 수 있고, 그 결과를 표 4에 나타내었다. 표에서  $\beta$ 의 실험 값은  $\beta_S$ 보다  $\beta_{PF}$ 의 계산 값에 보다 가깝다. 따라서 진공 증착된 비정질  $Sb_{2-x}Bi_xTe_3$  박막의 경우 고 전계에서의 주된 전도 기구는 Poole-Frenkel type임을 알 수 있다. 즉, 고 전계 인가 시 국재화된 중심 주위의 장벽 높이가 낮아져 그 결과 더 많은 전하 캐리어들이 중심으로부터 벗어나며, 전기 전도도가 향상된다.

한편, 인가 전계 방향으로의 거리에 따른 포텐

표 4.  $Sb_{2-x}Bi_xTe_3$  박막의 field lowering coefficient 비교.

Table 4. Comparison of field lowering coefficient of  $Sb_{2-x}Bi_xTe_3$ .

$Sb_{2-x}Bi_xTe_3$	High frequency dielectric constant ( $\epsilon'$ )	Experimental ( $\beta_{Exper.}$ ) ( $eVV^{-1/2}m^{1/2}$ )	Theoretical ( $\beta_S$ ) ( $eVV^{-1/2}m^{1/2}$ )	Theoretical ( $\beta_{PF}$ ) ( $eVV^{-1/2}m^{1/2}$ )
$x = 0.0$	29.89	$1.40 \times 10^{-4}$	$6.94 \times 10^{-5}$	$1.39 \times 10^{-4}$
$x = 0.5$	21.61	$1.57 \times 10^{-4}$	$8.16 \times 10^{-5}$	$1.63 \times 10^{-4}$
$x = 1.0$	6.04	$7.62 \times 10^{-4}$	$1.54 \times 10^{-4}$	$3.08 \times 10^{-4}$

결 에너지  $\phi(x)$ 는 다음과 같이 쓸 수 있다[9].

$$\phi(x) = -\frac{k_B T}{2e} \beta \sqrt{F} \quad (5)$$

유사하게 거리  $x$ 도 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$x = \frac{k_B T}{2e} \frac{\beta}{\sqrt{F}} \quad (6)$$

위의 식 (5)와 표 4의  $\beta_{Exper.}$  값을 이용하면 Sb-Bi-Te 박막 내 국재화된 중심의 포텐셜 장벽 (potential well)의 형태를 결정할 수 있다. 그림 6은 비정질  $Sb_{2-x}Bi_xTe_3$  ( $x = 0.5$ ) 박막 내 국재화된 중심의 potential well 형태를 나타낸 것이다. 또한 전하 캐리어의 평균자유행정(mean free path)이 포텐셜 장벽의 유효 길이(effective dimension)를 초

과하고, 이러한 조건이 Poole-Frenkel emission이 시작되는 임계 전계에서 만족된다면 전하 캐리어는 이들 중심으로부터 벗어날 수 있다. Poole-Frenkel 효과가 관찰되는 최소 전계가  $F_{cr}$ 이라면 평균자유행정은 다음 식으로부터 계산될 수 있다.

$$\lambda = \frac{k_B T}{2e} \frac{\beta}{\sqrt{F_{cr}}} \quad (7)$$

계산된 전하 캐리어의 평균자유행정은  $x$  값이 0 및 0.5, 1.0인 경우 각각  $1.5 \times 10^{-8}$ ,  $1.79 \times 10^{-8}$  및  $2.58 \times 10^{-8}$  cm로서 평균자유 행정이 Bi 농도 증가에 따라 길어짐을 알 수 있다. 이러한 평균자유행정의 증가는 국재화된 상태 밀도의 감소에 기인한 것으로 생각된다.

#### 4. 결론

진공 증착한  $Sb_{2-x}Bi_xTe_3$  박막의 전기적 특성을 조사한 결과 박막 내 Bi 농도가 증가함에 따라 비저항이 급격히 감소하였고, 특히 높은 Bi 농도( $x = 1.0$ )에서는 전도 특성이 p-type에서 n-type으로 변화되었다. 이것은 부분적으로 이온화된 Bi 원자들의 형성 및 그로 인한 Fermi level의 unpinning으로 설명된다. 비정질  $Sb_{2-x}Bi_xTe_3$  박막의 전기 전도는 저 전계의 경우 광범위 호핑 기구가 303-363 K의 온도 범위에서 주된 기구이나 363-403 K의 온도 범위에서는 phonon assisted hopping 기구가 더 우세한 것으로 조사되었다. 또한 Fermi level 주위에서의 국재 상태 밀도는 Bi 농도가 증가함에 따라 감소하였으며, 그 결과 호핑 범위의 증가 및 호핑 에너지의 감소함을 알 수 있었다. 고 전계에서는 Poole-Frenkel emission이 주된 전도 기구였

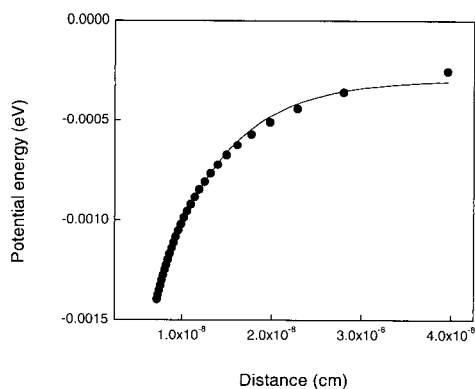


그림 6.  $Sb_{1.5}Bi_{0.5}Te_3$  박막 내 트랩의 포텐셜 장벽  
Fig. 6. Shape of the potential well of a trap in  $Sb_{1.5}Bi_{0.5}Te_3$  thin films

으며, 국제화된 중심의 포텐셜 장벽의 형태를 유도하였고, 전하 캐리어의 평균 자유 행정 또한 계산하였다.

naka, and J. Non-Cryst. Solids, Vol. 65, p. 261, 1984.

[11] S. R. Elliott, "Physics of Amorphous Materials",

### 참고 문헌

- [1] Hamakawa, "Non-Crystallizing Semiconductors Vol. I.", (Ed. M. Pollak) CRC Press, 1987.
- [2] A. Madan and M. P. Shaw, "The Physics and Applications of Amorphous Semiconductors", Academic Press, 1988.
- [3] M. W. Lee, W. H. Kang, C. M. Park, and K. A. Lee, "The study on the crystallization and electrical properties of Ge - Se - Bi system chalcogenide glasses", J. of KIEEME, Vol. 6, p. 175, 1993.
- [4] H. Y. Lee, H. B. Chung, and S. H. Park, "Photo -Induced scalar phenomena according to thickness dependence of chalcogenide  $AS_{40}Ge_{10}Se_{15}S_{35}$  Thin Film", J. of KIEEME, Vol. 10, p. 467, 1997.
- [5] J. H. Park, H. B. Chung, S. J. Jang, and C. H. Y, "The properties of photoinduced birefringence in chalcogenide thin films by the electric field effects", J. of KIEEME, Vol. 14, p. 58, 2001.
- [6] R. M. Mehra, K. Rajesh, and P. C. Mathur, "Electrical and optical properties of  $Ge_{20}Sb_xSe_{80-x}$  thin films", Thin Solid Films, Vol. 170, p. 15, 1989.
- [7] N. A. Hegab, M. Fadel, M. A. Afifi, and M. F. Shaver, "Temperature dependence of electrical and thermal properties of  $Te_{82.2}Ge_{13.22}Si_{4.58}$  glassy alloy", J. Phys. D: Appl. Phys. Vol. 33, p. 2223, 2000.
- [8] M. A. M. Seyam, "Optical and electrical properties of indium monosulfide (InS) thin films", Vacuum, Vol. 63, p. 441, 2001.
- [9] K. L. Bhatia, G. Parthasarathy, E. S. R. Gopal, and J. Non-Cryst. Solids, Vol. 69, p. 1894, 1985.
- [10] T. Takahashi, T. Sagawa and H. Hama-