

# Ge-Si-Te 기억소자의 온도 및 주파수영향

논문  
24~5~4

## The Effect of Temperature and Frequency on Ge-Si-Te Memory Devices

朴 昌 燁\* · 鄭 鴻 倍\*\*  
(Chang Yub Park) (Hong Bay Chung)

### Abstract

In this paper, with a view to study the impurity effect, Ge-Si-Te memory devices are investigated experimentally about the dependence of temperature and frequency.

Conductivity depends upon temperature and frequency and it is some-what influenced by heat treatment. With increasing frequency, conductivity has a tendency to be independent of temperature.

We found that switching time and threshold voltage are reduced by it.

### 1. 서 론

현재까지 알려진 산화물유리질로는 SiO<sub>2</sub>, P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, B<sub>2</sub>O<sub>3</sub>등으로 이들 유리질의 전도는 이온적이거나 또는 Fe<sup>3+</sup> + e<sup>-</sup> ⇌ Fe<sup>2+</sup> 같이 이온사이클을 이동하는 전자에 의한 전자전도이다. 그러나 S, Se, Te 등 칼코겐을 갖는 전자적반도체인 칼코게나이드 유리질과 같은 비산화물계 유리질도 있다. 이 계통을 가장 광범위하게 연구를 시작한 사람은 Kolomiets<sup>1)</sup>로 As, Se, Te, S, Tl, Sb 등으로 구성된 유리질을 연구했다. 이러한 유리질의 대부분은 높은 비저항 (>10<sup>8</sup>ohm-cm)과 낮은 이동도 (<1cm<sup>2</sup>/V-sec)를 가지며 이동도는 온도에 무관하고, 전도도는 자유전자농도의 변화에 의한다. Pearson<sup>2)</sup>은 칼코게나이드 유리질에 할로젠원소를 포함시켜 As, Te, I로 구성된 유리질에 전극을 점접촉시켰을 때 재료는 절연체와 같이 나타난다고 지적하였고, Eaton<sup>3)</sup>에 의하면 절연상태→전도상태로 되는 변형은 원래 유리질의 열과피에 의해 서서히 형성되는 낮은 저항의 결정상이 나타나기 때문이라고 설명하였다. 또한 Ovshinsky<sup>4)</sup>는 기억효과를 관찰하고 절연상태에서 전도상태로 스위치되어 외부전계 없이도 전도상태가 유지되는 것은 유리→결정으로 전이하기 때문이며 절연상태로 환원시키기에 필요한 펄스는 재용융현상을 유도할 것이라 본다. logσ

vs. 1/T의 곡선은 넓은 온도범위에서 선형적으로 나타나며 유리질전이온도 T<sub>g</sub>부근에서는 굴곡이나 불연속점이 없다. 이것은 냉각되기전 액체상태와 냉각되어 고체화된 유리질이 구조상 유사하다는 것을 나타낸다. 불순물이 결정반도체의 전도에 커다란 영향을 미친다는 것은 이미 알고 있지만 이론적으로 생각해 볼 때 칼코게나이드 유리질같은 비정질반도체의 전도에 대해서는 약간 영향을 미칠 뿐이라고 Gubanov<sup>5)</sup>가 제시했다. Kolomiets<sup>1)</sup>는 As<sub>2</sub>Te<sub>2</sub>Se 유리가 실온에서 1×10<sup>-6</sup>(ohm<sup>-1</sup> cm<sup>-1</sup>)의 전도도를 가져 불순물에 영향을 받지 않는다고 생각했지만 최근 LaCourse et al.<sup>6)</sup>은 유리질 Se에서 적의선흡수를 연구하여 불순물에 구조상 민감하다는 것을 알았다. 그러나 결정반도체에 절대적 영향을 미치는 방사선은 칼코게나이드 유리질의 전기적 성질에 별로 민감하지 않다.<sup>7)</sup>

이러한 사실에 비추어, 본논문에서는 칼코게나이드 유리질중에서 Ge-Si-Te 기억소자를 택하여 불순물의 영향 및 온도영향, 주파수영향을 알아보기 위해 고순도Te(99.9999%)와 저순도Te(99.99%)를 사용한 두 가지 기억소자를 제조하고 직류 및 교류 전도도의 온도영향, 교류 전도도의 주파수영향, 열처리효과, 기억후 저항변화 및 문턱전압의 온도영향등을 조사하여 고순도재료와 저순도재료와의 차이점을 조사하고 재료의 불순물에 따른 소자의 특성을 비교코져 한다.

### 2. 실험

고순도Te (99.9999%)와 저순도Te(99.99%)를 사

\*正會員: 延世大教授(工博)當學會編修理事

\*\*正會員: 延世大電氣工學科助教

接受日字: 75年 7月30日

용하여 조성비를 10Ge : 10Si : 80Te (at.%)의 비율로 0.1mg까지 정확히 평량하여 내경 9mm의 석영관에 넣어  $3 \times 10^{-5}$  Torr로 배기시켜 진공 봉입한 다음, 이 ampoule을 전기로에 넣고 200°C에서 반응시킨후 서서히 1000°C까지 올려 50시간 가열시켰다. 가열시키는 도중 ampoule안의 용융된 시료를 잘 혼합해 주기 위해 전기로를 흔들어 주었다. 이 ampoule을 전기로에서 끌어내어 물로 냉각시켰을 경우에는 부서져서기가 쉬워 공기중에서 자연냉각시켰다. 고순도 Te로 제조한 시료를 #1, 저순도 Te로 제조한 시료를 #2라 하였다. 제조된 시료를 X선회절시험으로 분석한 결과 #1, #2 모두 거의 독특한 peak없이 비정질상태가 되었음을 알았다. 또한 시료의 표면을 관찰하기 위해 시료의 두께를 1mm로 만들어 1,000mesh인 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>로 lapping 및 polishing하여 경면(mirror surface)을 만든 다음, 불활성가스인 Ar을 불어 넣으면서 100°C, 150°C로 3시간동안 열처리시켜 HNO<sub>3</sub> : HF : H<sub>2</sub>O = 2 : 1 : 1의 비율로 만든 solution에 약 10초동안 etching시켜 금속현미경으로 관찰한 결과 #1, #2의 표면이 거의 비슷함을 알 수 있었다. 직류 및 교류의 전도도 측정시는 2-point방법을 사용하여 텅스텐(W)전극을 용수철모양으로 부착시켜 전압강하법으로 공기중에서 열선을 가열시켜 300°K와 500°K의 온도범위에서 측정하였다. 이때 사용한 열전대는 Alumel-Chrommel을 사용하였다. 또한 교류 전도도의 측정시, 주파수를 100Hz, 1KHz, 10KHz, 100KHz로 변화시키면서 측정하였으며 주파수에 따른 교류전도도의 측정시는 50Hz-200KHz 사이에서 측정하였다. Lakatos et al.<sup>8)</sup>은 Au를 전극으로 사용한 전도도가 Al를 사용한 것보다 10배의 높은 전도도를 나타낸다고 보고하여 본 실험에서도 Au전극을 사용했다. 문턱전압의 측정방법은 시료를 lapping 및 polishing한 후 두께를 500μm로 만들어 회로를 구성하여 전극을 텅스텐(W)과 구리(Cu)로 부착시켜 측정하였다. 이때 스위칭시 내부 줄열(joule heating)로 인해 기억소자가 파괴되지 않도록 40KΩ과 400Ω을 직렬로 연결하여 60Hz의 교류전압을 인가했다. 또한 기억된 후의 저항측정은 일단 문턱전압을 가하여 기억시킨 후 전도도와 같은 방법으로 측정하였다.

### 3. 실험결과 및 고찰

#### 3.1 직류전도도의 온도영향

비정질재료에서 에너지갭 근처에 위치한 페르미준위를 생각하면 전도도는 다음식에 의해 온도에 따라 변화된다는 것을 알 수 있다.

$$\sigma(T) = \sigma_0 \exp(-E/KT) \quad (1)$$

E는 최근접이동도단으로 부터 페르미준위까지의 거리이고  $\sigma_0$ 는

$$\sigma_0 = N(E) \mu e KT \exp(\beta/2K) \quad (2)$$

여기서  $\beta$ 는 선형적으로 증가되는 온도에 따라 변하는 E의 비율이다.

이식은 실온에서 Anderson의 Criterion을 사용하여 얻은 Mott<sup>9)</sup>의 식으로 부터 알수 있는데 비정질 반도체의 비국재상태에서 확산이동도  $\mu$ 는

$$\mu = \frac{1}{6} \frac{e}{KT} \frac{\hbar}{m} \sim 6 \text{cm}^2/\text{V}\cdot\text{cm} \quad (3)$$

이고 이식을 이용하여 이동도단에서 상태밀도에 대한 값 N(E)는

$$N(E) = 6m \sigma_0 / \hbar e^2 \exp(\beta/2K) \sim 4 \times 10^{21} / \text{cc}\cdot\text{eV} \quad (4)$$

이다. 대체적으로  $\sigma_0$ 에 대해 얻은 값은 대략  $10^3 (\text{ohm}^{-1} \text{cm}^{-1})$  정도이다. 이 값은 결정반도체와 같은 크기이다.

실험결과, 그림 1에서 전도도가 온도에 따라 증가한다는 것을 알 수 있으며,  $\sigma(T)$ 는 Tg까지 급격히 변하

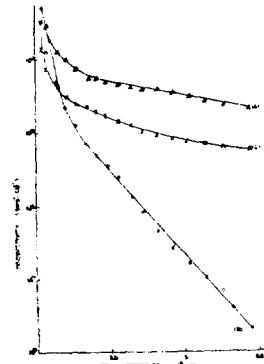


그림 1-(a) #1

지 않으나 Tg와 용융점사이의 온도범위에서는 활성화에 에너지가 급격히 증가하는 것을 볼 수 있다. 이 상태는 불순물반도체의 진성 영역을 나타낸다.

여기서, 물리적인 에너지차의 형태로 외견상 활성화에너지를 해석하는 것은 E가 온도에 따라 변화할 때 부정확하다.<sup>7)</sup> 예를 들어 활성화에너지가 온도증가에 따라 2차함수적으로 감소한다면 그때,  $E = E_0 - A(KT)$  일 것이고 (1)식에서

$$\begin{aligned} \sigma(T) &= \sigma_0 \exp(-E/KT) \\ &= \sigma_0 \exp\{-[E_0 - A(KT)]/KT\} \\ &= \sigma_0 \exp[-E_0/KT + AKT] \end{aligned}$$

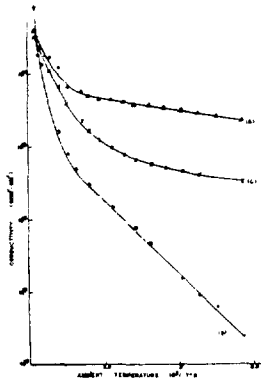


그림 1-(b) #2

- (A) 150°C/3h
- (B) untreated
- (C) 100°C/3h

그림 1 직류전도도의 온도영향비교

Fig1. Comparison of temperature effect of dc conductivity.

$$= \sigma_0 \exp(-E_0/KT) \exp(AKT)$$

일 것이다. 그때 외전상 활성화에너지  $\Delta$ 는

$$\Delta = -d \ln \sigma / d(1/KT)$$

$$= E_0 + A(KT)^2$$

그래서 외전상 활성화에너지는  $2A(KT)^2$ 만큼 실제 치와는 다르다. 더욱 중요한 것은 온도증가에 따라 외전상 활성화에너지가 증가한다는 것이다. 그러나 실제 활성화에너지는 온도증가에 따라 감소한다. 이러한 고찰은 페르미준위와 가전자대 이동도단사이의 거리가 감소한다는 것을 가리킨다. 곡선에서 볼때 갑작스런 변화는 부분적인 결정화와 이에 수반되는 상분리에 의해 재료의 결정화가 이루어진다. 실험결과로 활성화에너지를 구할려면 식(1)에서 양변에 log를 취해  $E(eV) = K \frac{d(\log \rho)}{d(10^3/T)}$ 에서 구할수 있다. 실온에서 측정된 전도도의 값과 활성화에너지의 값은 표 1과 같다.

표 1 직류 전도도와 활성화에너지

Table 1 D.C. conductivity and activation energy

시 료	전 도 도 (ohm <sup>-1</sup> cm <sup>-1</sup> )	활성화에너지 (eV)	
#1	untreated	4.08 × 10 <sup>-8</sup>	0.524
	100°C/3h	5.99 × 10 <sup>-6</sup>	
	150°C/3h	2.20 × 10 <sup>-5</sup>	
#2	untreated	3.92 × 10 <sup>-8</sup>	0.557
	100°C/3h	3.18 × 10 <sup>-6</sup>	
	150°C/3h	2.19 × 10 <sup>-5</sup>	

### 3.2 교류전도도의 온도영향

Lakatos et al.<sup>8)</sup>은 비정질 As<sub>2</sub>S<sub>3</sub>와 As<sub>2</sub>Se<sub>3</sub>의 교류 전도도의 온도영향을 조사하여 200KHz이하에서 주파수의존성분은 다음식(5)에 따라 온도에 의존한다는 것을 알았다.

$$\sigma(\omega) = \frac{1}{3} \pi e^2 a^2 [g(E_f)]^2 \omega [\ln(\omega_0/\omega)]^4 KT \quad (5)$$

이식에서 볼때 주파수성분이 페르미준위부근에서 호핑에 기인한다는 것이 확실하다. 또한 Mott<sup>9)</sup>는 국제 상태에서 포논에 의한 호핑에 따라 생기는 교류전도도에 관한 관계식으로 식(6)과 같이 유도해냈다.

$$\ln \sigma \propto -(a^3/\rho_0 KT)^{1/4} \quad (6)$$

$\rho_0$ : 페르미준위에서 국제상태밀도

$a^{-1}$ : 국제상태에서 지수함수적으로 쇠퇴되는 길이

이식은 페르미준위에서 밀도  $\rho_0$ 가 포함되어 있으며  $\rho_0$ 의 값을 구하기 위해 사용되었다. 실험결과 그림 2와 같으며 열처리방법에 의해 열처리한 시료와 열처리를 안한 시료를 100Hz에서 측정한 결과 그림 3과 같다. 그림 2와 그림 3에서 Owen et al.<sup>10)</sup>이 유도해낸 실험식과 잘 일치함을 알 수 있다.

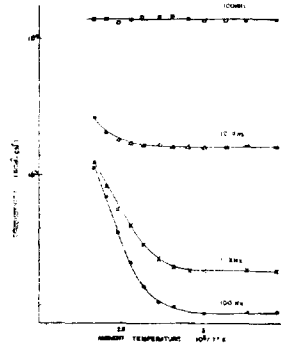


그림 2-(a) #1



그림 2-(b) #2

그림 2 교류전도도의 온도영향

Fig2. Temperature effect of ac conductivity

$$\sigma(\omega) = \sigma_0 + \sigma_1 \quad (7)$$

$\sigma_0$ : 직류전도도

$\sigma_1$  : 부가주파수 의존전도도

$\sigma_1 = A\omega^n$

A : 상수

n : 실온에서  $0.8 \leq n \leq 1$

(8)

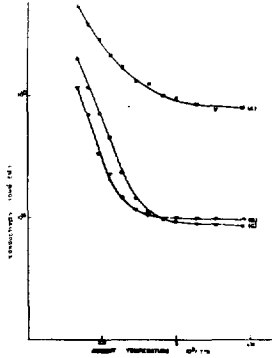


그림 3-(a) #1

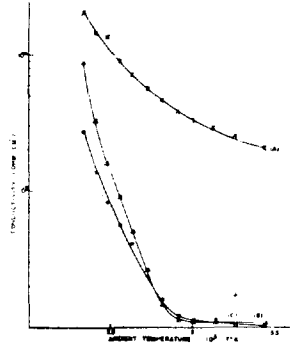


그림 3-(b) #2

- (A) 150°C/3h → ×
- (B) untreated → △
- (C) 100°C/3h → ○

그림3. 열처리방법에 따른 교류전도도의 온도영향 (100Hz이하)

Fig. 3 Temperature effect of ac conductivity by heating (at 100Hz)

$\sigma_1$ 은  $10^2 - 10^5$ Hz 주파수범위에서 온도 의존성이 관찰되지만 고주파범위에서  $\omega^2$ 의 형태는 온도와 무관하다<sup>10)</sup>고 보고된 바와 같이 #1, #2 모두 주파수가 증가함에 따라 거의 온도의 의존성을 찾을 수 없다. 그러나 그림 2에서 100KHz의 경우 거의 온도에 무관함을 나타내지만 만일 소자에 100KHz의 주파수를 가하는 경우 전도도는 매우 좋으므로 낮은 전압에서도 스위칭이 가능하게 되며 결국 문턱전압의 감소를 가져오게 할 수 있다. 각 주파수에서 실온일때의 전도도는 표2와 같다.

표2. 상온에서의 교류전도도

Table2 A.C conductivity at room temperature

주 파 수	#1(ohm <sup>-1</sup> cm <sup>-1</sup> )	#2(ohm <sup>-1</sup> cm <sup>-1</sup> )
100Hz	$9.83 \times 10^{-7}$	$1.07 \times 10^{-6}$
1KHz	$1.94 \times 10^{-6}$	$2.06 \times 10^{-6}$
10KHz	$1.61 \times 10^{-5}$	$1.65 \times 10^{-5}$
100KHz	$1.38 \times 10^{-4}$	$1.36 \times 10^{-4}$

3.3 교류 전도도의 주파수영향

Pollak과 Geballe(PG)<sup>11)</sup>가 불순물위치에 따른 호핑에 대한 연구를 한 후 Austin et al.<sup>12)</sup>은 PG방법을 이용하여 호핑 전도도가 에너지대 중간에 있는 페르미 준위의 밀도상태에 의해 지배된다는 가정하에 (5)식과 유사한 전도도에 대해 식을 유도해 냈다. Bishop et al.<sup>13)</sup>은 비정질  $Tl_2Se \cdot As_2Te_3$ 를 연구하여 교류전도도가 적어도 실온에서  $10^{10}$ Hz정도의 주파수에서는 직류 전도도의 값과 같다고 제시했다. 한편 Adler<sup>7)</sup>는 주파수의 의존성이  $\Delta E_c$ 와  $\Delta E_v$ 인범위에 위치해 있는 꼬리상태에서 호핑에 기인한다고 지적하면서  $Te_{48}As_{30}Si_{12}Ge_1$ 과  $Te_2AsSi$ 의 교류전도도가  $10^4 - 10^6$ Hz정도에서만 직류 전도도의 값과 같고 또한  $10^5 - 10^8$ Hz영역에서  $\omega^{0.9}$ 에 대략 비례하는 주파수에 따라 증가된다는 것을 알았다. 이러한 것은  $Tl_2Se \cdot As_2Te_3$ 가 300°K에서 약  $3 \times 10^{-3}$ (ohm<sup>-1</sup> cm<sup>-1</sup>)의 보통 높은 전도도를 가지며 그 온도에서 어떤 호핑성분을 지배한다고 생각하면 쉽게 풀릴 수 있다. 그림4에서 주파수에 따른 교류전도도의 변화는 70Hz와 120kHz사이에서 지수함수적인 증가를 보이나 120kHz 이상에서는 오히려 감소함을 보인다. Owen et al.<sup>10)</sup>은  $As_2S_3$ 에서  $10^9$ Hz보다 높은 주파수에

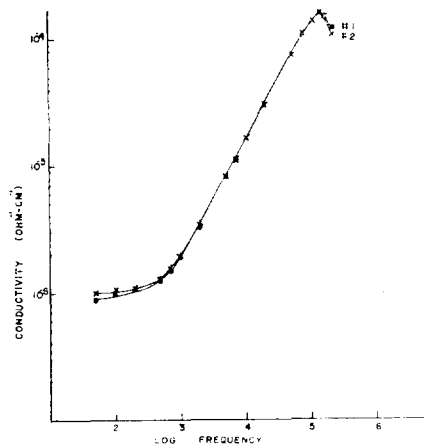


그림 4.-(a) #1과 #2의 비교

Fig.4-(a) Comparison of #1 and #2

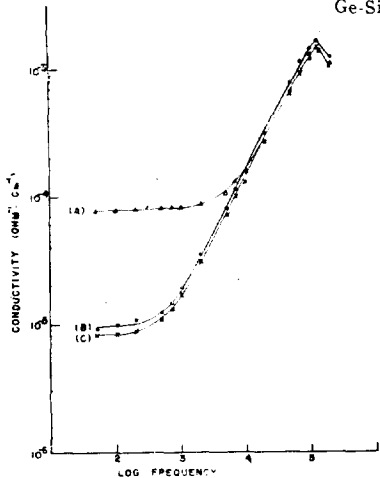


그림 4-(b) 열처리 방법에 의한 #1의 비교  
Fig. 4-(b) Comparison of #1 by heating

그림 4. 교류전도도의 주파수 영향  
Fig. 4 Frequency effect of ac conductivity.

는 전도도가  $\omega^2$ 의 형태로 될려는 경향이 있다고 지적했지만 Ge-Si-Te 기억소자의 경우, 120kHz에서 전도도가 감소하므로 그 이상의 고주파영역에서는 시험하지 못하였다.

3. 4. 문턱전압의 온도영향

Walsh et al.<sup>14)</sup>은 절연→전도상태로 급격히 전이하게끔 유도하는 문턱전압이 온도에 의존된다는 것을 알아내고,  $T_g$ 이하의 온도에서는 유리질이 절연체가 되고  $T_g$ 이상의 온도에서는 전도체가 된다고 제안했다. 또한 스위칭이 되는 순간의 온도가 실제로 전이온도인지는 확실히 규명되어 있지는 않으나 스위칭되는 순간

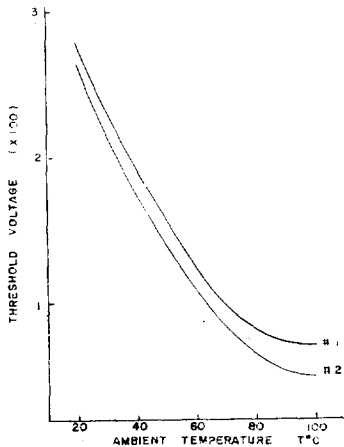


그림 5. 문턱전압의 온도영향  
Fig. 5. Temperature effect of threshold voltage

의 온도가 주위 온도증가에 따라 감소한다는 것을 알 수 있다. 측정시 60Hz의 교류전압을 가했을 때 300°K에서 10<sup>6</sup>V/m이하의 전계에서는 10<sup>-1</sup>A정도로 전류가 거의 흐르지 않았으나 10<sup>8</sup>V/m 이상되면 전류가 급격히 증가하는 스위칭이 생겼다.

스위칭이 된 후 5-10sec 후에 기억현상이 나타났으며 기억된 후에는 다시 교류전압을 가해도 기억된 상태를 유지하였다. 그러나 Ovshinsky<sup>12)</sup>가 지적한 대로 짧은 펄스를 순간적으로 인가한 경우는 다시 절연상태로 되었다. 문턱전압을 구할려면 우선 열평형식에서

$$K \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} = -\sigma(T, F) F^2 \quad (9)$$

여기서 K: 열전도율 W/deg-cm

T: 국부온도 °K

F: 전계강도

$\sigma(T, F)$ : 전기전도도

$$\sigma(T) = \sigma_0' \exp [\alpha(T - T_0)]$$

$$\sigma_0' = \sigma_0 \exp [-k(T_g - T_0)]$$

$$\sigma = E/kT_0^2$$

E: 활성화에너지

에서 계산되며, 계산치와 측정치와는 거의 차이가 없음을 알 수 있다.

즉 그림 5에서는 실온에서 100°C까지 온도를 증가시키면서 측정한 결과인데 점차로 문턱전압의 감소를 알 수 있다.

또한 시료가 기억소자이므로 기억된 후 저항의 변화를 측정해 본 결과, 실온에서 기억되기 전의 #1의 저항이 1.02×10<sup>7</sup>(ohm)인데 반해 기억된 후의 저항은 1.86×10<sup>5</sup>(ohm) 정도로 적게된다. 또한 #2는 1.179×10<sup>7</sup>(ohm)에서 1.947×10<sup>5</sup>(ohm)으로 감소한다. 이

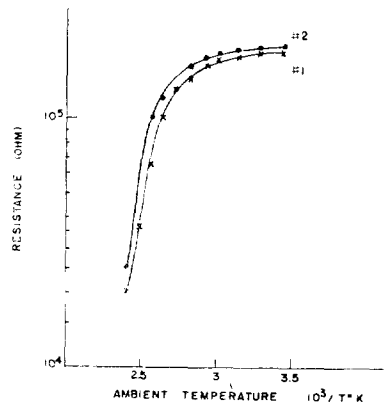


그림 6. 기억후 저항의 온도영향  
Fig. 6. Temperature effect of resistance after memory.

것은 기억된 후에 전극간에 도통상태가 되어 필라멘트를 형성하여 저항을 떨어뜨리기 때문이라고 본다.

### 4. 결 론

본 논문에서 Ge-Si-Te 기억소자로 불순물의 영향 온도영향 및 주파수영향을 알아본 결과 다음과 같다.

1) 불순물의 영향을 거의 없음을 알 수 있다.

즉, X선 회절시험분석, 표면금속현미경으로 관찰한 결과 및 전도도의 측정결과로 거의 #1, #2가 비슷함을 알 수 있다. 즉, Ge-Si-Te 기억소자를 실용화하는 경우, 저순도 Te (99.99%)로 된 소자라도 무방하나  $V_{th}$ 의 차이가 약간 있다.

2) 온도에 는 대단히 민감한 반응을 보인다.

전도도 측정시, 온도증가에 따라 전도도가 증가하며 문턱전압치는 온도증가에 따라 감소함을 보인다. 또한 스위칭이 되는 순간의 온도는 주위온도 증가에 따라 감소함을 알 수 있었으며, 실용화하는 경우, 주위온도 증가에 따라 문턱전압치의 감소를 가져올 수 있다.

3) 열처리효과에 따라 전도도가 변화한다.

열처리한 시료는 열처리안한 시료보다 전도도가 높으며 약 450°K 이상의 온도에서는 전도도가 같게 되어 열처리효과는 나타나지 않는다. 그러나 450°K이하의 온도에서는 열처리효과로써 전도도를 높일 수 있다.

4) 고주파일수록 온도에 무관하게 되는 경향이 있다. 100Hz, 1KHz의 경우 350°K에서 전도도의 증가가 나타나는 반면 100KHz의 경우는 거의 온도에 무관하며 높은 전도도를 나타낸다. 이러한 전도도의 증가로 덩어리상태소자의 스위칭문턱전압의 감소를 가져올 수 있다. 또한 120KHz이상의 주파수에서는 전도도의 감소를 보이므로 120KHz이하의 주파수에서 기억소자로서의 실용화가 가능하다.

5) 100°C이상에서는 스위칭시간이 극히 짧게된다.

주위온도상승에 따라 스위칭시간이 약 10nsec정도로 짧아지며, 기억현상이 나타나는 시간도 매우 빨라진다.

이러한 결과를 놓고 볼때 Ge-Si-Te 기억소자는 저주파용 전자기억장치소자로써 유용하게 되리라 믿으며 시료제조시 저순도재료를 사용하므로써 경제적인 면에 많은 도움이 되리라 믿는다.

'Memory and Switching in Semiconducting Glasses' J.Non-Cryst. Solids, 2, 1 (1970)

3. D.L. Eaton, J. Am. Ceramic Soc., 47, 554 (1964)
4. S.R. Ovshinsky, 'Reversible Electrical Switching Phenomena in Disordered Structures.' Phys. Rev. Letters, 21, 1450 (1968)
5. A.I. Gubanov, 'Quantum Electron Theory of Amorphous Conductors.' Consultants Bureau, New York (1965)
6. W.C. LaCourse, V.A. Twaddell, J.D. Mackenzie, J. Non-Cryst. Solids, 5, 252 (1971)
7. D. Adler, 'Amorphous Semiconductors.' CR C, the Chemical Rubber Co, (1971)
8. A.L. Lakatos, M. Adkowitz, 'Electrical Properties of Amorphous Se, As<sub>2</sub>Se<sub>3</sub>, and As<sub>2</sub>S<sub>3</sub>' Phys. Rev., 3, 1791 (1971)
9. N.F. Mott, 'Conduction in Non-Crystalline Materials' Phil. Mag., 19, 835 (1969)
10. A.E. Owen, J.M. Robertson, J.Non-Cryst. Solids, 5, 351, (1971)
11. H.K. Pollak, T.H. Geballe, Phys. Rev., 122, 1742 (1961)
12. I.C. Austin, N.F. Mott, 'Conduction and Switching in Non Crystalline Materials.' Advan. Phys. Rev., 18, 42 (1969)
13. S.G. Bishop, P.C. Taylor, J. Non-Cryst. Solids, 5, 351, (1971)
14. D.J. Walsh, 'Conduction and Electrical Switching in Amorphous Chalcogenide Semiconductor Films.' J. Non-Cryst. Solids. Suppl., 2, 107 (1970)
15. S.V. Phillips, R.E. Booth, P.W. McMillan, 'Structure and Electrical Properties of Chalcogenide Glasses' Proc. Brit. Ceramic Sec., 18, 293 (1970)

### 참 고 문 헌

1. B.T. Kolomiet, Phys. State Sol.,7, 713 (1964)
2. A.D. Person, Modern Aspects of the Vitreous State, Vol.3, Butterworth, Wathington (1964)