

Ge-Se-Bi Chalcogenide Glass의 비정질 및 결정화에 따른 전기전도도의 변화 The study on the Crystallization and Electrical properties of Ge-Se-Bi system Chalcogenide Glasses

이명원*, 강원호*, 박창만*, 이기암*
(Myung-Won Lee, Won-Ho Kang, Chang-Man Park, Ki-Am Lee)

요 약

Amorphous Semiconductor로서 Chalcogenide계의 Ge-Se-Bi계 비정질화와 결정화 실험을 통하여 전기전도도를 평가코자 하였다.

시료의 조성범위는 $Ge_{15-25} Se_{65-85} Bi_{2.5-15}$ 의 범위에서 5N의 Ge, Se, Bi metal 분말을 사용하였다.

시료는 석영관에 진공 장입후 용융시켜 비정질화 하였다. 이때 열처리 조건은 1000°C에서 10시간 동안 가열하였으며 급냉 조건은 3834°C/sec로 처리 하였다.

비정질 sample의 결정화는 결정핵을 형성 시킨 후 온도 변화 및 시간의 변화를 주면서 결정을 성장 시켰으며, 이때 Bi_2Se_3 와 $GeSe_2$ 결정상을 관찰 할 수 있었다.

박막화는 위의 실험에 사용된 Bulk sample을 사용하여 박막을 제작 하였으며 유리화 영역은 Ge 15 at%, Se 70 at% 이상, Bi가 10 at% 이하일때 비정질화가 용이하였다.

Bulk의 경우 Ge를 20 at%로 고정시 Bi의 at% 함량이 증가함에 따라 전기전도도가 증가했으며 Bi가 7.5 at%이상일때 급격한 전도도의 증가를 가져왔다. 박막의 경우엔 Bulk sample보다 Bi의 함량이 증가시 더욱 큰 전도도의 증가를 가져왔다.

$Ge_{20} Se_{77.5} Bi_{2.5}$ 조성의 결정화 경우 330°C에서 4 hr 유지시킨 경우가 가장 양호하였다.

Abstract

The purpose of this study was to evaluate conductivity of electricity of Ge-Se-Bi system Chalcogenide glass as a amorphous semiconductor by observing its dissolution and crystallization.

In this experiment, Ge, Se, Bi metal powders in the rage of $Ge_{12-25}, Se_{65-85}, Bi_{2.5-15}$ was used as the sample ore.

The mixed metal powder were put into a vaccous quartz tube and then melted. The condition of heat treatment was to dispose it to 1000°C heat for 10 hours and then rapidly quenched it at 3834°C/sec.

The crystallization of the fused sample ripened as the change of temperature and time, after the crystal core was formell. At that time it was possible to observe the state that Bi_2Se_3 and $GeSe_2$ were crystallized.

In the experiment of making membrane, the memberance was produced by using the previously experimented bulk sample.

And decrystallization was well progressed when Ge was over 15 at%, Se was over 70 at%, and Bi was under 10 at%. As for bulk, when Ge was fixed to 20 at%, the conducting of electricity was increased as Bi gained at%.

In the case of membrane, the conductivity was much more increased than that of bulk sample as the increase of at% of Bi.

In the experiment on Ge₂₀, Se_{77.5}, and Bi_{2.5} the crystallization was most vigorous then they were kept at 330°C for 4 hours.

: 단국대학교 재료공학과

* : 단국대학교 물리학과

接受日字: 1992年 12月 4日

1. 서론

20세기에 들어서며 1950년대의 트랜지스터의 개발, 그후의 IC와 LSI등 결정 반도체의 연구는 또 다른 방향으로 들어서게 되는데, 그것이 Amorphous Semiconductor였다. 이것은 1960년대 후반부터 1970년 전반에 걸쳐 전자재료분야의 하나의 선봉이 되었는데, 그 시발점은 미국의 ECD (Energy Conversion Device Inc.)의 Ovshinsky가 Te - As - Si -Ge로 된 Chalcogenide계의 Amorphous Semiconductor로 전기적 스위치 소자와 기억소자로의 응용 가능성을 주장하는 논문을 1968년에 발표하였다.⁽⁴⁶⁾ 그러나 CGS (Chalcogenide Glass Semiconductor)는 진성 p형 반도체이고 도핑에 의한 p-n전이가 어렵기 때문에 기억소자 또는 스위칭소자 이외의 전자소자로 이용가능성 여부에 대한 연구는 그리 활발하지 못했다. 하지만 CGS는 결정체에 비해 유리성분의 변화에 따른 반도체의 연속적 특성변화로서 제작이 용이하며 국내 전자산업 발전에 기여할 수 있는 점을 고려하여 꾸준히 연구되어왔다. 또한 근래에와서 비정질 Chalcogenide 박막층 Bi₂Se₃, Ge₂₀Se_{80-x}Bi_x (x=11 at%이상) 등의 박막에서 n형전도가 일어나는 것으로 보고되고 있다.^(19, 42, 43, 44)

그리고 Takahashi 등은 비정질 Bi₂Se₃ 박막에 대한 XPS(X-ray photoemission spectroscopy)와 UPS(Ultraviolet photoemission spectroscopy) 측정으로부터 양으로 대전된 Bi 원자의 존재를 확인하였다.^(27, 28) 그는 이것을 Bi 원자에 비하여 Se의 전자 친화력(electron affinity)이 강하여, Bi 원자에서 Se 원자로 전자의 이동이 일어났기 때문이라고 지적하였다. 이 결과로써 Bi-Se 결합의 극성(polarity)에 의한 Bi⁺ 원자의 존재를 이해할 수 있고, Bi⁺ 증가에 의하여 n형 전도가 일어난다고 지적하였다.

또한 Chalcogenide계 비정질 박막의 광학적 band gap에 해당하는 일정한 파장의 빛을 비추면, 광흡수계수가 커지는 광 흑화현상(pho-

to darkening)과 모체구조가 약간 변하는 광 구조변화(photostructural change)가 일어난다. 이들 광 유기효과(photo induced effect)는 유리점이하의 온도에서 열처리하면 완전히 없어지는 가역현상임이 확인되었다.⁽⁴⁵⁾

Street와 Mott는 비정질 반도체의 gap속에서 국재화 상태를 만드는 결합 결합은 dangling bond라고 생각하였다.^(32, 41) 이 모델에 의하면 Chalcogenide계에서는 사전자대가 고립전자쌍으로 형성되어 있기 때문에 만약 공유결합이 끊어진 중성상태의 dangling bond D⁰가 전자를 잃어 양으로 대전된 dangling bond D⁺가 되면 바로 이웃에 있는 고립전자쌍과 상호작용해서 dangling bond의 궤도와 고립전자쌍의 궤도로 결합궤도가 만들어지고 에너지가 내려간다.

본 논문에서는 Chalcogenide계의 Ge-Se-Bi계 Bulk Glass와 Amorphous Thin Film의 형성 및 결정화 실험을 통하여 결정질과 비정질의 직류 전기전도도를 측정 평가하고자 하였다.

2. 실험방법

2-1 Bulk Glass

2-1-1 시료 처리 및 용융

본 실험에 사용된 비정질 Ge-Bi-Se의 시료는 각각 순도 99, 99.99%인 Cerac社의 Ge (granule), Se (granule), Bi (granule)이다.

조성은 Ge₁₅₋₂₅Se₆₅₋₈₀Bi_{2.5-15}의 범위에서 Table 1과 같이 하였다. 우선 각각의 시료들을 직경 10mm의 석영관에 총 10 g 장입한 후 약 3x10⁻³ torr에서 진공봉입한다. 이 샘플을 제작한 수직 관상로에 넣고 1000°C에서 10시간동안 용융을 시켰다. 또한 시료들의 각 부분에서의 Uniformity를 증대시키기 위하여 30분 간격으로 상, 하, 좌, 우로 흔들어 주었다. 이렇게 Melting이 끝난 후 3°C의 얼음물에 0.01m/sec의 속도로 급냉시켜 비정질화 시켰다.

2-1-2 비정질의 확인

급냉시켜 얻은 Sample의 비정질 형성 여부를 확인하기 위하여 XRD (Rigaku社, X-Ray

표 1. 실험에 사용된 Ge-Bi-Se 유리의 조성
Table 1. Composition of Ge-Se-Bi Glasses
(atomic %)

	Ge	Se	Bi
1	15	75	10
2	17.5	72.5	10
3	20	70	10
4	22.5	68.5	10
5	25	65	10
6	15	77.5	7.5
7	17.5	75	7.5
8	20	72.5	7.5
9	22.5	70	7.5
10	25	67.5	7.5
11	12.5	80	7.5
12	20	77.5	2.5
13	20	75	5
14	20	67.5	12.5
15	20	65	15
16	15	80	5
17	17.5	77.5	5
18	22.5	72.5	5
19	25	70	5

Diffraction, Cu K α target을 사용, 30KV, 25 mA의 출력으로 2 θ 의 범위를 5 $^{\circ}$ ~70 $^{\circ}$, Scanni-
ng speed는 40 $^{\circ}$ /min 관찰을 하였다.

2-1-3 Bulk의 결정화

비정질 Sample들중 No. 12을 가지고 결정핵 성장에 따른 온도의 변화와 시간의 변화에 따른 각각의 결정화 실험을 하였다. 우선 DTA의 측정을 통하여 결정화 온도 Schedule을 잡으려 했다. 이 때 DTA는 Rigaku社의 PTC-10A로 Range 50 \pm μ v, Rate는 5 $^{\circ}$ /min의 조건으로 측정하였다.

DTA 측정에 의해 확인된 T $_g$ 값보다 약 50 $^{\circ}$ C 위에서 결정핵을 성장시킨 뒤 70 $^{\circ}$ C~160 $^{\circ}$ C까지 온도를 올려 결정성장의 변화를 관찰하였다. 이 때 210 $^{\circ}$ C에서 결정핵을 성장시킨 뒤 280 $^{\circ}$ C, 330 $^{\circ}$ C, 350 $^{\circ}$ C에서 결정상을 성장시켰으며 330 $^{\circ}$ C에서 결정상을 성장시키는 온도를 2h, 3h, 4h 변화를 주는 두 가지 방법을 통하여 결정상을 관찰하였다. Fig. 1, Fig. 2은 결정화 온도 Schedule을 나타내고 있으며 Fig. 3은 이때 사용된 전기로의 개략도이다.

결정화 시킨 Sample의 미세구조를 관찰하기 위하여 JOEL-5200의 주사 전자 현미경(SEM)으

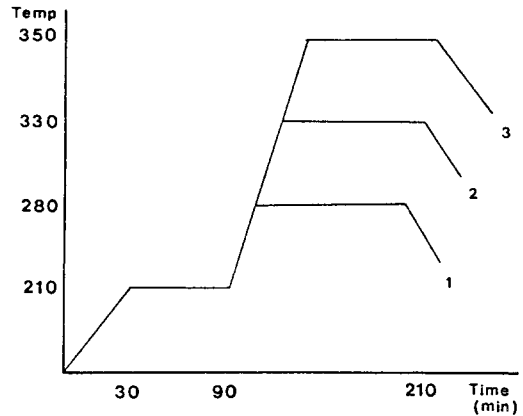


그림 1 NO12의 결정화 온도변화에 따른 온도 조작

Fig. 1 Heat Treatment Schedule of No. 12 for the Temp. Variation (2 hours)

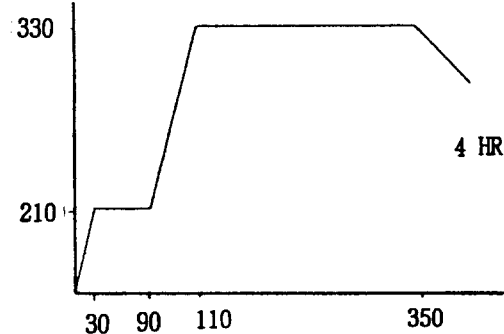
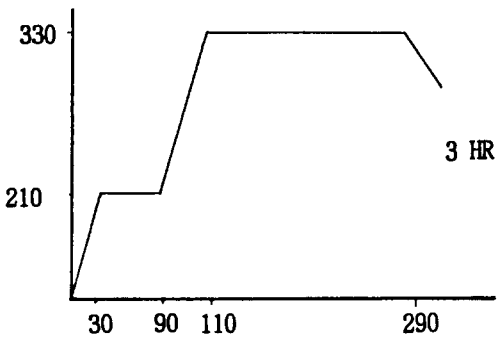
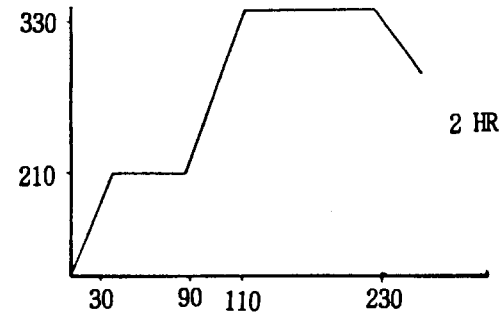


그림 2 330 $^{\circ}$ C에서 NO 12의 열처리 조작

Fig. 2 Heat Treatment Schedule of No. 12 at 330 $^{\circ}$ C

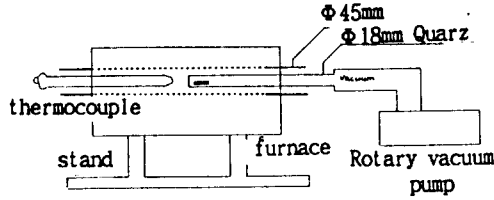


그림 3 열처리용 전기로의 모식도
Fig. 3 Furnace for the Heat Treatment
thermocouple stand furnace
vacuum Φ45mm Φ18mm Quartz tube
Rotary vacuum pump

로 가전전압 25KV, 배율 5000으로 결정화시킨 Sample을 관찰하였다.

또 결정상의 결정화 정도를 비교하기 위하여 Rigaku社의 X-Ray Diffractometer를 사용하여 Cu K α target를 사용, 30KV, 25mA의 출력으로 2 θ 의 범위를 10 $^{\circ}$ ~70 $^{\circ}$, Scanning speed 4 $^{\circ}$ /min, chart speed는 40mm/min의 조건으로 결정화 정도를 비교하였다.

2-1-4. 직류 전기전도도 측정용 Sample제작

측정할 Bulk sample을 약 1x1x0.5cm의 크기로 잘라 Sample의 양면에 전극용 Al을 Evapor 장치를 사용하여 진공증착시킨 뒤 Sample 옆면에 증착된 Al을 떨어내기 위하여 # 1200 Sand paper에 대고 갈았으며 운모판에 Silver paste를 사용하여 전극을 달았다.

2-1-5. 질류 전기전도도 측정

직류 전기전도도 측정은 시료를 10 $^{-5}$ torr

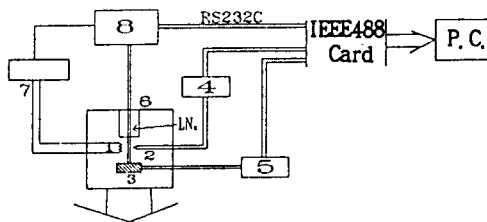


그림 4 D.C 전기전도도 측정용 장치의 개략도

Fig. 4 Block diagram for the measurement of the dark d.c. conductivity

- (1). Pt Sensor
- (2). Copper-Constantan Couple
- (3). Sample
- (4). Digital Multimeter<Keithley 197>
- (5). Digital Electrometer<Keithley 617>
- (6). Heater
- (7). Temperature Controller<PID controller> <한영 P-100>
- (8). Power Amp. <한영 TPR>

의 진공 Chamber 속에 넣고, Digital electrometer (Keithley model 617)을 사용하여 Current Vs Temp을 측정하였다. 측정온도 범의는 253 $^{\circ}$ K~383 $^{\circ}$ K의 범위였으며 120sec간격으로 측정하였다. 온도 측정에는 C-C열전대와 Digital multimeter (Keithley 197), Temperature controller (pid controller)을 사용하였으며 그 측정회로는 Fig. 4과 같다.

2-2 Thin Film

2-2-1 시료준비 및 Thin Film제작

비정질 Thin Film을 제조하기 위하여 Table 2의 조성을 채택하여 조합한 후 석영관내에서 가열하고 급냉시켜 이를 진공증착의 시료로 사용하였다.

(가). 진공증착 (Evaporation)

XRD (Rigaku社)를 통해 비정질임이 확인된 Bulk시료로 Evaporating을 준비 하였다. 준비

표 2 전기전도도 측정용 박막
Table 2 Requirements of D.C. electric conductivity

No.	Thickness(d)	l x t	Composition(Ge:Se:Bi)	Remark
F03	2500 Å	7.11 x 0.96	20 : 70 : 10	EV
F12	2600 Å	6.40 x 0.54	20 : 77.5 : 2.5	EV

※ (EV;Evaporate)

l: width of electrode,

t: distance of electrodes

된 시료들은 Agate Pestle로 약 100mesh 정도의 분말로 만들어 각 조성의 시료들을 0.3g으로 Weighing 하였다. 이렇게 얻어진 시료와 기관을 Evaporator내에 장치하고, 텅스텐 보우트를 사용하여 1x10 $^{-5}$ Torr의 진공상태에서 진공증착 하였다. 이렇게 얻어진 시료들의 비정질 상태는 XRD를 이용하여 확인하였다.

2-2-2 직류 전기전도도 측정

(가). 직류 전기전도도 측정

전극의 크기와 박막의 두께는 SEM으로 각각 측정하였으며 이들의 data는 Table 2.와 같다. 이때의 EV는 열증착, 즉 Evaporator에서 제작된 박막을 표시한 것이다. 본 전도도 측정은 "Keithley 197 Multimeter"와 "Keithley 617 Electrometer"로 하였으며 측정장치의 개략도는 Fig. 4와 같다. 또한 직류전기전도도를 측정에 앞서 Bulk시료의 T $_g$ 점을 알기 위하여 DTA로 측정을 하였다.

이렇게하여 준비가 끝난 시료들은 Fig. 5와 같은 과정을 통하여 측정하였으며, I-V 특성

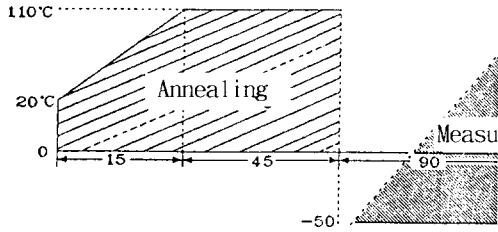


그림 5 D.C 전기전도도 측정 개략도

Fig. 5 Diagram for the measurement of dark d. c. conductivity and annealing

● glass
▲ crystalline

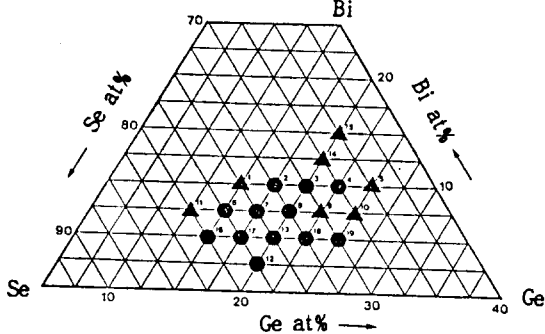


그림 6 제조된 Ge-Se-Bi 유리의 상태
Fig. 6 Prepared Ge-Se-Bi Glasses

을 조사하여 ohmic임을 조사하였으며 Bias Voltage는 10 Volt로 일정하게 유지시켰다.

3. 결과 및 고찰

3-1. Bulk Glass에서의 유리화 영역 고찰

Fig. 6은 Ge-Se-Bi chalcogenide glass를 용융시킨 뒤 급냉시켰을 때 얻은 비정질 sample들을 보여 주고 있다. Fig. 6과 Table 1에서도 알 수 있듯이 Se의 at% 70 at% 이상일 때 Bi의 at%가 10 at%이하의 조성을 갖을 경우엔 비정질화가 용이한 것으로 보이며 이것은 Z. U Borisova 및 M. H. Brodsky의 발표와 거의 일치함을 알 수 있다. (1, 3, 6)

3-2. 결정화

Fig. 7은 결정화 Schedule을 잡기 위해 측정 한 No. 12 Sample의 DTA곡선을 나타낸다.

여기에서 알 수 있듯이 124°C 부근의 작은 peak는 기계의 error로 볼 수 있고 접선방법을 써서 160°C 부근을 Tg점으로 해석할 수가 있겠으며, 270°C 부근에서 첫번째 발열 peak가

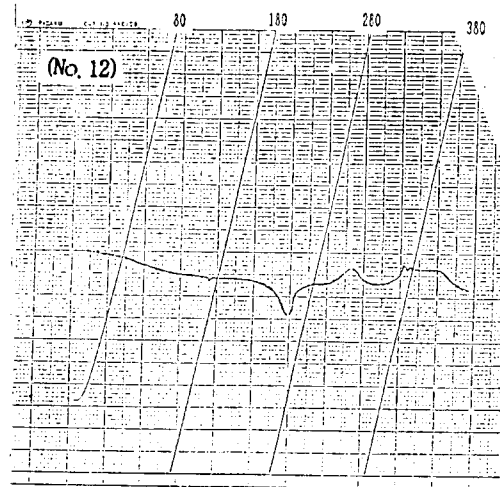


그림 7 NO. 12의 DTA 관찰

Fig. 7 DTA Curve for NO. 12 Sample

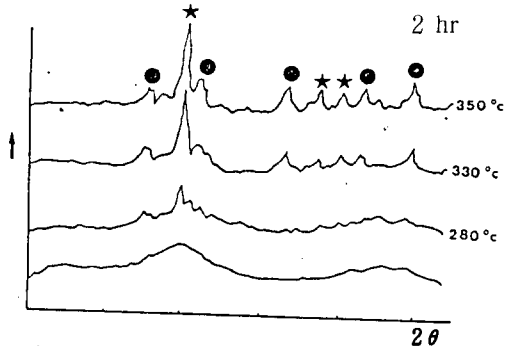


그림 8 NO. 12의 온도변화에 따른 XRD 관찰

Fig. 8 X-Ray Diffraction Pattern for Temp. Variation (NO. 12)

발생된 것으로 미루어 보아 Mcmillan의 Tg점에서 약 50°C 이상에서 핵 형성이 되며 그보다 약 100-150°C 정도 위에서 결정핵이 성장한다는 발표와 일치함을 알 수 있다.

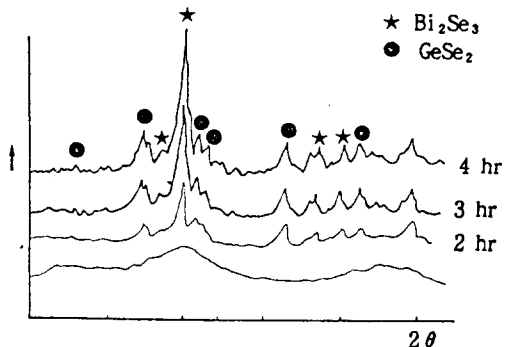
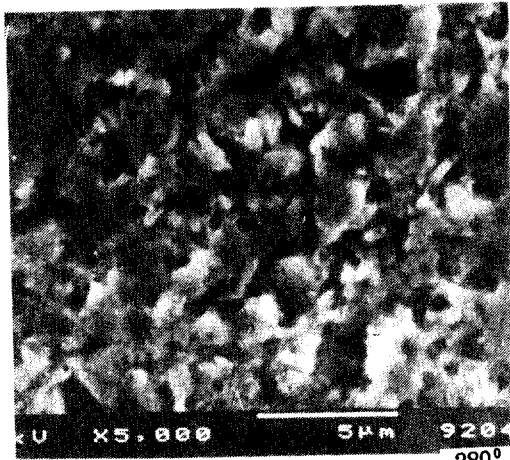
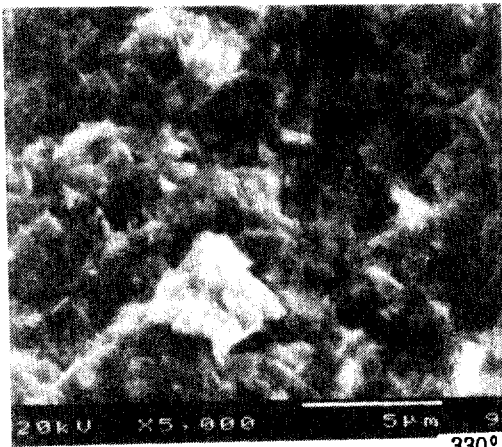


그림 9 NO. 12의 330°C에서 열처리시간 변화에 따른 XRD 관찰

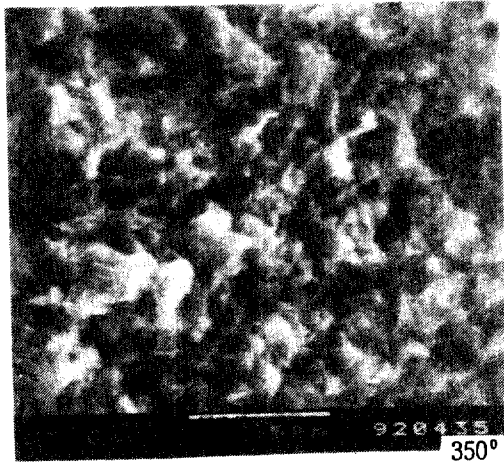
Fig. 9 X-ray Diffraction Pattern for Time Variation at 330°C (NO. 12)



280°



330°



350°

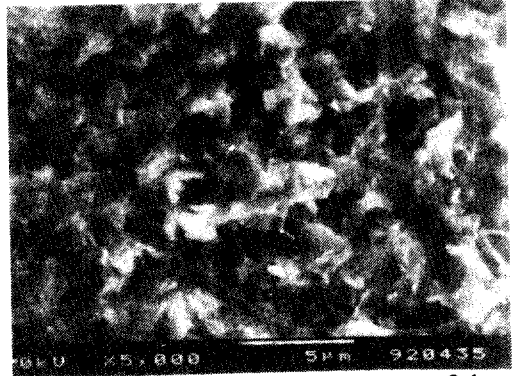
Photo 1 NO. 12의 열처리 시간변화에 따른 SEM 관찰

Photo. 1 SEM of the Crystallization for the Temp. Variation (No. 12, 2 hours)

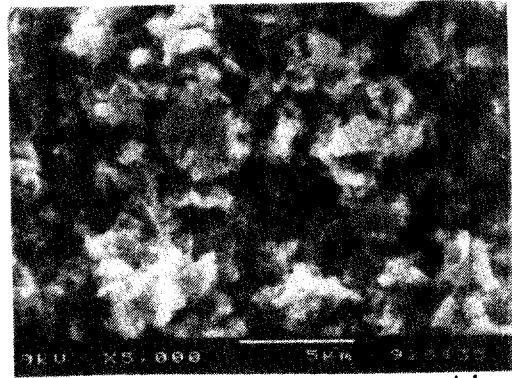
따라서 결정핵 형성을 210°C에서 시켰으며



2 hr



3 hr



4 hr

Photo 2 NO. 12의 330°C에서 열처리 시간변화에 따른 SEM 관찰

Photo. 2 SEM of the Crystallization for the Time Variation at 330°C (No. 12)

70°C 높은 280°C, 330°C, 350°C에서 2h씩 각각 결정을 성장시켰다. 이 때의 결정상을 SEM을 통해 관찰해 보았다. (Photo. 1)

이때의 SEM 관찰로는 온도에 따른 결정의 정도가 확연한 구별이 되지 않았으나, (Photo. 2) 다시 XRD 관찰을 한 결과 온도에 따른 결정의 성장도는 증가하였다. 350°C의 결정의 peak는 330°C에 비해서 큰 차이를 나타내지 않았지만

280°C에 비하여 330°C에서 급격한 결정성장이 일어났음을 보여주고 있다. (Fig. 8) 따라서 330°C에서 결정성장 시간의 변화를 주면서 다시 결정상을 관찰해 본 결과 결정성장 시간을 4시간 유지시켰을 때의 결정상들은 조대하여졌으며, 결정상들이 둥글고 크게 뭉쳐진 듯 나타났으며, XRD 측정을 해 본 결과 시간을 길게 줄수록 결정의 현격한 증가가 있음을 알 수 있었다. (Fig. 9) 그리고 이때의 결정상을 JCPDS Card로 조사한 결과 Bi₂Se₃와 GeSe₂결정이 혼재함을 알 수 있었다.

3-3 전기전도도

20°C에서 비정질 sample들의 전도도의 Graph를 그린 결과를 Fig. 10에 나타내었다.

Ge을 20 at%으로 고정시켰을 때 Bi 함량이 7.5 at%까지 별다른 변화를 보이지 않다가 7.5 at%이상 이 되면서부터 급격한 전도도의 증가를 나타내고 있음을 알 수 있다.

이것은 Z. U. Borisova의 Bi 함량이 7.5 wt%이 상일때 증가를 보인다는 발표와 일치하고 있다. (6)

Fig. 11는 No. 12 Sample에 대하여 결정화에 따른 직류 전기전도의 변화를 나타낸 그림이다.

여기서 12-0은 비정질 12을 나타내고 12-2, 12-3, 12-4는 각각 No. 12 sample을 330°C에서 2hr, 3hr, 4hr 결정화 시켰을때를 나타낸다. 비정질에 비하여 결정화가 급격히 증가 하다가 No. 12-4에 이르러 완만한 증가를 보인다.

이것은 12-4가 거의 완전 결정상에 가까울 수록 전도도의 증가율이 감소됨을 의미한다. Fig. 12은 No. 6, 12, 14 비정질 sample의 2.6K-3.8K의 범위에서 변하는 전도도를 나타낸 것이다.

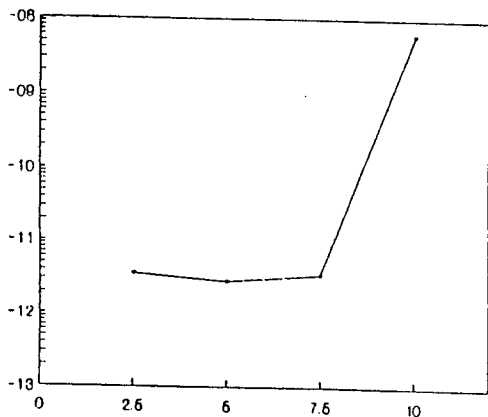


그림 10 Bi at%에 따른 전기전도도 변화
Fig. 10 D.C. Conductivity for the Bi Atomic % Variation

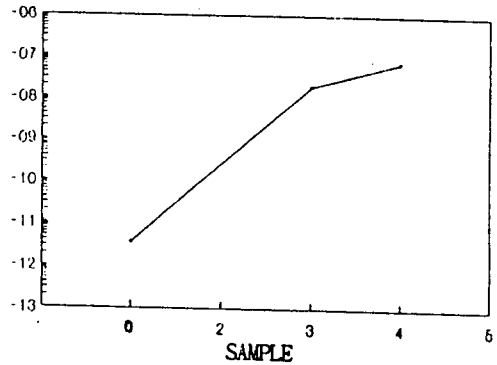
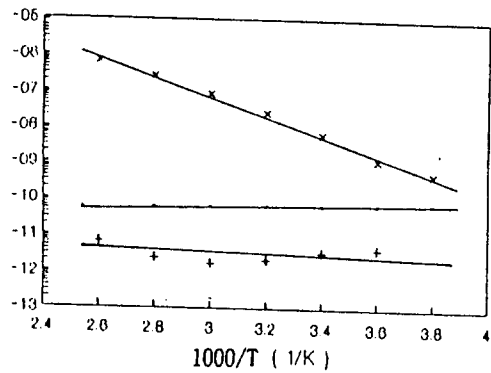


그림 11 330°C에서 NO. 12의 열처리시간에 따른 전기전도도 변화
Fig. 11 D. C. Conductivity of No. 12 at 20°C (Heat Treated at 330°C)



No. 0-0 + No. 12-0 x No. 14-0

그림 12 온도에 따른 전기전도도의 변화
Fig. 12 D. C. Conductivity according to Temp. (Bulk)

3-4. Thin Film

여기에서도 알 수 있듯이 Bi 함량이 증가 할 수록 전도도가 증가함을 알 수 있었다.

표 3 박막의 전기전도도 측정 data
Table 3 Requirements of D. C. electric conductivity

No.	Thickness (d)	l x t	Composition (Ge:Se:Bi)	Rema
F03	2500 Å	7. 11x0. 96	20:70:10	EV
F12	2600 Å	6. 40x0. 54	20:77. 5:2. 5	EV

※ (EV ; Evaporate)
l ; width of electrodes,
t ; distance of electrodes)

제조된 비정질 시료의 직류 전기전도도를 측정 한 결과 아래와 같은 결과를 얻었다.

따라서 위의 Data를 이용하여 직류 전기전도도를 계산하였다.

또한 박막의 온도에 대한 d. c. 전기전도도를 보면 고온에서 저온으로 갈수록 전도도의 값의 차이는 감소하는 경향을 보이고 있는 바, 이는 시료내의 전자의 온도의존성과 전자의 활성화 에너지에 기인하는 것으로 사료된다.

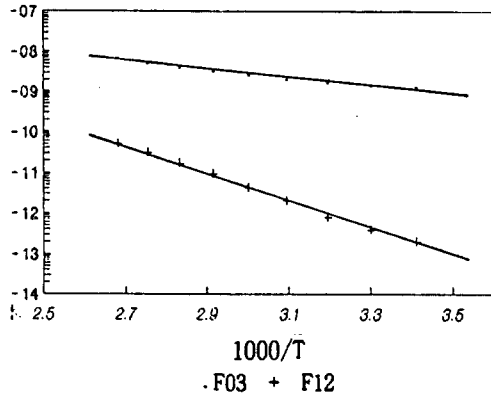


그림 13 온도변화에 따른 박막의 전기전도도 변화

Fig. 13 D. C. Conductivity of Thin Film According to Temp.

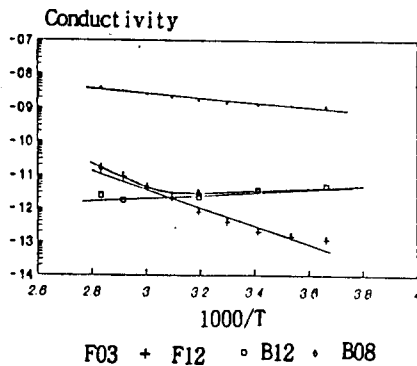


그림 14 Bulk와 박막의 전기전도도 비교

Fig. 14 D. C. Conductivity of Bulk and Thin Film Samples.

5. 결 론

Ge-Se-Bi Chalcogenide glass Bulk sample의 비정질화, 결정화 및 박막을 제조하여 이에 따르는 전기전도도를 측정 한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. Ge 15 at%, Se의 at%가 70이상일때 Bi가 10 at%이하일 경우 비정질화가 용이한 것으로 나타났다.

2. Ge₂₀Se_{77.5}Bi_{2.5} Glass의 경우 330℃에서 4 hr유지시킨 경우의 결정화가 가장 양호하였으며 Bi₂Se₃와 GeSe₂의 혼정이 나타남을 확인할 수 있었다.

3. Ge를 20 at%로 고정시 Bi의 at% 함량이 증가함에 따라 전도도가 증가하는 경향을 나타냈으며 특히 Bi가 7.5 at%이상일때 직류 전기전도도의 급격한 증가를 가져왔다.

4. Thin film의 경우엔 Bulk sample보다 Bi의 Bulk sample 보다 Bi의 at% 함량이 증가시 더욱 큰 전도도의 증가를 나타냈으며 Ge₂₀Se_{77.5}Bi_{2.5} Glass의 경우 30℃이하에서 Thin film의 전도도가 작아짐을 알 수 있었다.

참고 문헌

1. M. H. Brodsky, "Amorphous Semiconductors" p. 176-185.
2. 作花濟夫, "ガラス非晶質の科學" p. 251-256
3. 구와노 유키노리, "Amorphous" p. 108-135.
4. "1991 Data book of glass composition"
5. K. Arai, T. Kuwahata, H. Namikawa, and S. Saito, Electrical properties of silver doped As-Se glasses, Jpn. J. Appl. Phys, 11 m1080 (1972)
6. Z. U. Borisova, "Glassy Semiconductors", p. 10-20.
7. J. a. Duffy, "Bonding Energy Levels & Bands in Inorganic solids".
8. 성명권, "반도체 공학".
9. "Seymour P. keller," Handbook on Semiconductors vol. 3, p. 691-795.
10. S. R. Elliott, "Physics of Amorphous Materials", p. 29-49, p. 132-151.
11. W. Marshall, D. H. Wilkinson, p. 209-270.
12. Norman M. Tallan, "Electrical conductivity in Ceramics and glass" part B, P. 592-596.
13. Scholze, 이정훈 역, 유리공학, p. 249-263.
14. Balta, 이정훈 역, 유리상태, p. 144-152.
15. "전기 재료학" 一出: 문운당, p. 108-124.
16. Hench and Dove, "Physics of Electronic Ceramics", part A, p. 227-263.
17. ニベガラスフォーラム カロコゲナイドガラス データブック 84-111.
18. Elliott, S. r, Steel, A. t, "A model for the chemical modification of electrical properties of chalcogenide glasses by bismuth " J. Phys. C, 20 (1987) 4335.

19. Tichy, L, Ticha, H. "Is the n-type conductivity in some Bi-doped chalcogenide glasses controlled by percolation?" Solide State, Comm, 53(1985) 399.
20. Bhatia, K, L, Gosain, D, P. "Evidence of two Bi sites from EPR of Mn^{2+} in Bi-doped amorphous germanium chalcogenides" Phys Rev, B, 35(1987) 4503.
21. Frumar, M, Tichy, L. "N-type conductivity in chalcogenide glasses and layers". J. Non-Cryst. Solids, p. 97-98(1987) 1139.
22. 龍口蓮一, 반도체7 入門, 1-28, 159-161
23. 이충희, 윤세원, 심기준, "Glass & Glass-Ceramic의 전자소자에 관한 연구"
24. A. Lipinski, B. Eiotkowska-Pawlak, W. Mycieliski, "Drift Mobility in Ge-Se-Ga Glasses" Journal of Non Crystallise Solids (1987) 433-436
25. K. G. Breitschwerdt and J. hafner "Micomave Electrical Conductivity and Structure of Chalcogenide Glass" Journal of Non Crystallise Solids(1980) 993-998
26. S. Bordas, N. Clavaguera, "Glass formation and Crystallization Kinetics of Some Ge-Sb-Se Glasses" Journal of Non Crystallise Solids(1990)
27. T. Takahashi, J. Non-Cryst, Solids 44, 239 (1981)
28. T. takahashi, T. Sagawa and H. Hamanaka, J. Non-Cryst, Solids 65, 261(1984).
29. S. Kumar, S. C. Kashyap and K. L. Chopra, J. Non-Cryst, Solids 85, 100(1986)
30. N. Tohge, T. Minami and K. Kanka, Appl. Phys, Lett, 48, 1739(1986).
31. S. Kumar, S. C. Kashyap and K. L. Chopra, J. Non-Cryst, Solids 97-98, 823(1987).
32. N. F. Mott and E. A. Davis, Electronic Processes in Non-Crystalline Materials (Clarendon Oxford, London, 1979) Ch. 6.
33. Ovshinsky S, R., H. Fritzsche(1973), IEEE, Trans, Electr, Devices, ED-20(2), 92.
34. Kolomiets B. T., V. M. Lyubin and D. V. Tarkhin(1959), Sov. Phys, Solid State, 1, 819.
35. Andreish A. M., B. T. Kolomiets and T. F. Nararova(1962), Sov. Phys, Solid State, 4, 1974.
36. Keneman S. A. (1971). Appl. Phys. Lett., 19, 205.
37. Berkes J. S., S. W. Ing., Jr. and W. J. Hille gas(1971), J. Appl. Phys., 42, 4908.
38. Igo T. and Y. Toyoshima(1973), J. Non-crystalline Solids, 11, 304.
39. Tanaka K. (1975), Appl. Phys. Lett, 26, 243.
40. Tanaka K. (1976), Structure and Exitations of Amorphous Solid, AID, Conf. Proc. 31, 148.
41. Street R. A. and N. F. Mott (1975), Phys. Rev Lett, 35, 1293.
42. N. Tohge, Y. Yamamoto, T. Minami and M. Tanaka, Appl. Phys. Lett, 34, 640(1979)
43. N. Tohge, Y. Yamamoto, T. Minami and M. Tanaka, J. Appl. Phys. Lett, 34, 640(1979)
44. P. Nagels, L. Tichy, A. Tiska and H. Ticha, J. Non-Cryst, Solids 59-60, 1015(1983)
45. D. K. Biogelson and R. A. Street, Phys. Rev. Lett, 44, 803(1980)
46. Ovshinsky, S. R. (1968), Phys. Rev. Lett, 21, 1450

著者紹介



이명원

1967년 7월 14일생. 1991년 단국대 재료공학과 졸업. 1991년 단국대 재료공학과 대학원 입학. 1993년 2월 단국대학교 재료공학과 졸업(석사) 1993년 현재 단국대학교 재료공학과 박사과정.



박창만

1967년 10월 4일생. 1991년 2월 강원도 원주 상지대학교 물리학과 졸업. 1991년 3월 단국대 물리학과 대학원 입학. 1992년 현재 단국대 물리학과 대학원 4학기 재학중, 졸업예정.



강원호

1945년 3월 18일생. 1971년 한양대 요업공업학과 졸업. 1973년 한양대 요업공학과 석사. 1985년 한양대 요업공학과(공박). 1993년 현재 단국대 재료공학과 조교수.



이기암

1951년 10월 5일생. 1979년 2월 고려대 물리학과 졸업. 1981년 2월 고려대 물리학과 이학석사. 1987년 8월 고려대 물리학과 이학박사. 1993년 현재 단국대학교 물리학과 부교수.