

수소화 처리된 비정질 칼코게나이드 박막의 광학적 특성

Optical Properties of Hydrogenated Amorphous Chalcogenide Thin Films

남기연¹, 김준형¹, 조성준¹, 이현용^{1,a}

(Gi-Yeon Nam¹, Jun-Hyung Kim¹, Sung-June Cho¹, and Hyun-Yong Lee^{1,a})

Abstract

In this paper, we report the changes of morphology, transmittance and photoluminescence (PL) in hydrogenated amorphous $As_{40}Ge_{10}Se_{15}S_{35}$ thin films, thermally deposited at the vapor incidence angles (θ) of 0° , 45° and 80° . The hydrogenation was carried out under the condition of a H_2 pressure (P_H) of 20 atm and an annealing temperature range, T_{Anneal} of $150^\circ C \sim 210^\circ C$. A columnar structures with an inclination angle of approximately $65 \sim 70^\circ$ was formed in 80° -deposited films and then the columnar was broken after hydrogenation. Transmittance increases with an increase of deposition angle and by the hydrogenation. In particular, a broad PL band on the extended region is observed in obliquely deposited films and it increases during the hydrogenation.

Key Words : Hydrogenation, AsGeSeS, Columnar structure, Photoluminescence, Oblique deposition

1. 서론

비정질 박막 재료 분야는 1969년 Chittic등[1]에 의해 수소화된 비정질 실리콘(α -Si:H) 박막을 글로우 방전방법으로 제작에 성공한 이래 이론 및 실험적인 면에서 많이 발전하였다. 비정질 실리콘(α -Si)의 수소화를 통해 활성화 수소가 비정질 실리콘내의 땀글링본드(dangling bond)와 결합하므로 에너지밴드의 국재준위(localized states)를 감소시켜 불순물 도핑이 가능하게 되므로 α -Si이 전자소재로서 이용이 가능하게 되었다.

비정질 박막 재료 중 Si-계가 전자소재로 이용되는 데 반하여 광 부품 및 광소재로서의 응용이 가능한 물질로 비정질 칼코게나이드-계(chalcogenide system)가 있다. 4족 원소가 주를 이루는 테트라헤드랄-계(tetra hedral system)와 달리 구조적인 유연성과 독특한 전자배치로 인하여 여러 가지 형태의 광유기 현상이 나타난다고 알려져 있다

[2,3]. 하지만 내부 불규칙구조로 인한 도핑이 어렵기 때문에 반도체 형 광전소자로서의 응용에는 많은 제한을 받고 있다[5].

본 연구에서는 α -Si과 같이 비정질 칼코게나이드-계 박막을 수소화 처리하므로 내부 불규칙구조를 제어하여 도핑이 가능한 광전소자로서 응용이 가능한지 여부를 조사하였다. 이를 평가하기 위해 경사 증착(oblique deposition)된 비정질 칼코게나이드 박막을 제작하고 고압의 수소분위기 하에서 수소 처리하였다. 수소처리 전, 후 박막의 표면 morphology 변화, 투과도 변화 및 포토루미네선스(photoluminescence, PL) 특성을 비교, 고찰하였다.

2. 실험

순도 5N의 시료를 $As_{40}Ge_{10}Se_{15}S_{35}$ 의 원자량 비(wt, %)로 평량하고 석영관에 진공봉입한 후 전기로에서 순차적으로 가열하여 벌크시료를 제작하였다. 박막제작을 위하여 그림 1과 같은 기판 홀더를 제작하였다. 약 3×10^{-6} 의 진공도 하에서 증착각도가 0° , 45° , 80° 를 갖도록 corning glass-2948과

1. 전남대학교 응용화학공학부
(광주시 북구 용봉동 300)
a. Corresponding Author : hyleee@chonnam.ac.kr
접수일자 : 2005. 9. 13
1차 심사 : 2005. 12. 20
심사완료 : 2006. 3. 29

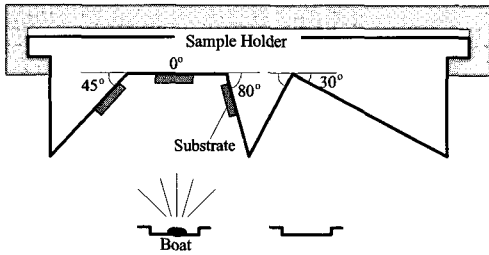


그림 1. 경사 증착 As-Ge-Se-S 박막 제작을 위한 기판홀더의 개략도.

Fig. 1. Schematic diagram of substrate holder to fabricate obliquely deposited amorphous As-Ge-Se-S thin films.

Si기판 위에 열증착 방식으로 제작하였다. 이때 증착속도는 구조적으로 균일한 비정질상의 증착직후 (as-deposited) 박막을 얻기 위하여 약 0.3 nm/s를 유지하였다.

제작된 시편의 일부는 수소기체압력 20 atm에서 약 4시간 동안 수소화처리를 수행하였다. 수소 처리 동안의 기판온도는 $As_{40}Ge_{10}Se_{15}S_{35}$ 의 유리질전이온도(glass transition temperature, $T_g \sim 230^\circ C$) [6] 보다 충분히 낮은 온도인 $150\text{--}210^\circ C$ 범위로 조절하므로 T_g 부근에서의 열처리로 인해 발생할 수 있는 표백화효과(bleaching effect)를 제거하였다.

수소처리에 의한 박막의 결정화 여부를 관찰하기 위해 XRD를 측정하였으나 어떠한 피크도 없는 전형적인 비정질 패턴[4]이 관찰되었다. 수소처리 전, 후 박막의 두께(d)와 모포지지는 SEM 단면 및 표면 사진을 통하여 평가하였으며, 광학적 흡수단부근의 투과도(T)를 자외선-가시광선 분광광도계(UV-Visible Spectrophotometer)를 이용하여 $400\text{--}700\text{ nm}$ 의 파장(λ)범위에서 측정하였다. 투과도값을 이용하여 광학적 흡수계수(optical absorption coefficient) $\alpha(\lambda)$ 는 $\alpha(\lambda) = -\ln(T)/d$ 의 관계식을 이용하여 얻었으며 이를 기초로 박막의 광에너지갭(optical energygap, E_{OP})을 평가하였다. 박막의 PL 특성은 325 nm 의 파장을 갖는 HeCd 레이저로 여기 후 1200 grooves/mm 의 격자를 갖는 모노크로미터와 광증폭관(photomultiplier tube; Hamamatsu R636-10)을 이용하여 측정하였다.

3. 결과 및 고찰

그림 2는 그림 1의 기판홀더를 사용하여 제작된 $\alpha\text{-As}_{40}\text{Ge}_{10}\text{Se}_{15}\text{S}_{35}$ 박막의 SEM 단면도이다. 박막의

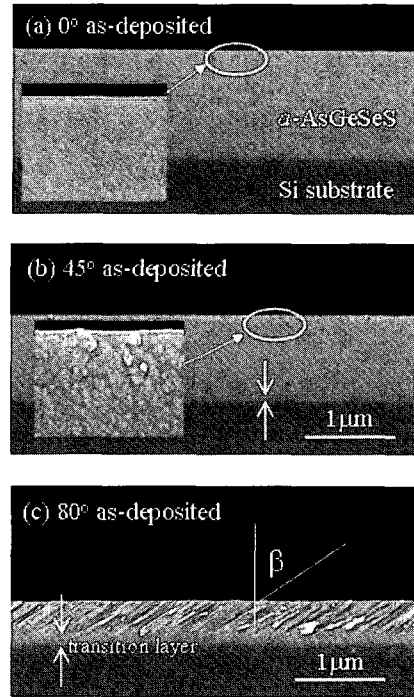


그림 2. (a) $\theta=0^\circ$, (b) $\theta=45^\circ$, (c) $\theta=80^\circ$ 로 경사 증착된 증착직후 $As_{40}Ge_{10}Se_{15}S_{35}$ 박막의 SEM 단면사진. 박막두께: (a) $1.64\ \mu\text{m}$, (b) $1.28\ \mu\text{m}$, (c) $0.72\ \mu\text{m}$.

Fig. 2. SEM cross-section images of as-deposited $As_{40}Ge_{10}Se_{15}S_{35}$ thin films deposited at (a) $\theta=0^\circ$, (b) $\theta=45^\circ$ and (c) $\theta=80^\circ$. Film thickness: (a) $1.64\ \mu\text{m}$, (b) $1.28\ \mu\text{m}$, (c) $0.72\ \mu\text{m}$.

두께는 증착 각도 0° , 45° , 80° 의 박막에 대하여 각각 $1.63\ \mu\text{m}$, $1.28\ \mu\text{m}$, $720\ \text{nm}$ 로 평가되었다.

그림 2(c)의 에서 보는 바와 같이 80° 로 증착된 박막의 경우 기둥각(columnar angle, β)이 약 $65\text{--}70^\circ$ 인 기둥구조(columnar structure)를 보였다. 이것은 증착각도 θ 와 기판위에 형성된 기둥각 β 와의 관계를 나타내는 Leamy의 실험식 $\tan\theta \sim 2\tan\beta$ [5,6]와 비교적 잘 일치되는 결과이다. 그림 2(b)에서 보인 45° 박막의 경우 80° 박막과 같은 뚜렷한 기둥구조는 관찰되지는 않았지만 0° 박막과 비교하여 단면 구조에서 차이를 보였다. 즉, 45° 박막의 경우 표면부근의 단면이 균일하지 못하였다. 또한, 45° 와 80° 경사 증착된 박막에 대해 기판-기둥 박막 간의 원자밀도 차이에 의해 생기는 약

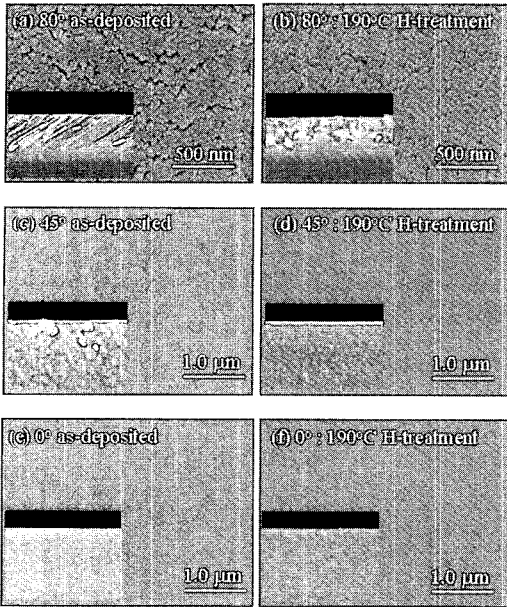


그림 3. 고압 수소 처리 전, 후 $As_{40}Ge_{10}Se_{15}S_{35}$ 박막의 표면 및 단면 SEM.

Fig. 3. SEM surface morphology and cross-section images of as-deposited and high-pressure H-treated amorphous $As_{40}Ge_{10}Se_{15}S_{35}$ thin films.

18.8 nm와 160 nm 두께의 전이층(transition layer)이 형성되었다. 이 전이층은 기둥구조가 없는 기판으로부터 기둥구조가 생성되기 위해 요구되는 두께로 판단된다. 단면 기둥구조에서 보이는 많은 틈(voids)은 그 주위에 덩글링본드를 갖기 때문에 수소를 포획할 확률이 커질 것으로 판단된다.

고압 수소처리 전, 후 박막의 표면 SEM 사진을 그림 3에 보였다. 각 사진의 내부는 단면 사진이다.

그림 3(e)와 3(f)에서 보는 바와 같이 0°로 증착된 박막의 경우 수소처리 전, 후의 표면 및 단면의 모습에서 어떠한 변화도 관찰되지 않았다. 그림 3(c)의 45° 증착직후의 박막의 경우 불균일한 단면을 볼 수 있으며 표면 사진에서 매우 미세한 틈들이 관찰되었으나 그림 3(d)에서 보는 바와 같이 190 °C, 200 atm(약 4시간)의 수소처리 후 틈들이 사라졌으며, 비교적 균일한 단면이 얻어 졌다. 80° 증착직후 박막은 그림 3(a)에서 보는 바와 같이 뚜렷한 기둥구조를 가지며 표면에 많은 틈들이 보였으나 수소처리를 통하여 틈들의 크기가 상당히 감소되었으며 기둥구조는 식별할 수 없을 정도로 붕

괴되었음을 알 수 있다. 기둥구조의 붕괴로 박막의 두께 변화가 예상되지만, 그림 3(a)와 3(b)에서는 이를 식별하기가 어려웠다. 비정질 $As_{40}Ge_{10}Se_{15}S_{35}$ 의 T_g 가 약 230 °C 임을 고려할 때 기둥구조의 붕괴가 190 °C의 열처리효과 만에 의한 것으로 판단하기는 어려우며 수소화가 동반된 결과로 판단된다. 이를 정량적으로 확인하기 위하여 SEM으로 틈의 위치를 찾아서 그 부근에 대해 EDX를 측정하였지만 증착직후에 비하여 박막 조성의 미세한 변화만을 관찰하였을 뿐 수소화되었다는 뚜렷한 증거는 찾을 수 없었다.

조금은 거시적이지만 수소처리 전, 후의 박막에 대하여 투과도를 측정하여 광학적으로 어떠한 변화가 발생하였는지를 고찰하였다. 그림 4는 고압 수소처리 전, 후 박막의 투과도 특성이다.

그림 4(a)의 0° 증착박막의 경우 투과도에서 큰 변화는 보이지 않았으나 약 570 nm 이상의 파장에서 보이는 간섭패턴(interference pattern)의 위치가 변화였다. 이러한 간섭패턴의 위치변동은 박막의 실제두께 d 와 굴절률의 곱으로 정의되는 광경로차(optical path difference)의 변화에 의해 발생된다고 볼 수 있다. 따라서 수소화된 박막에서 굴절률 변화를 예상할 수 있다. 그림 4(b)와 4(c)의 경우, 간섭패턴의 위치변동뿐만 아니고 전체 파장에 걸쳐 투과도가 약 10~20 % 이상 증가하였음을 알 수 있다.

일반적으로 (Se, S)를 기본으로 하는 비정질 칼코게나이드 박막은 광에너지갭보다 큰 광에 노출됨($h\nu > E_{op}$)에 따라 투과도가 감소하고, 광에너지갭 및 굴절률이 증가하는 광흑화현상(photo darkening effect)을 보이며, 박막의 T_g 부근의 열처리를 통해서 광흑화와 반대의 현상(투과도의 증가)을 보이는 열적 표백화현상이 나타나는 것으로 알려져 있다 [7,8].

그러나, 그림 4(b)와 4(c)는 기판온도 190 °C에서 수소 처리되었으며 이는 $As_{40}Ge_{10}Se_{15}S_{35}$ 의 T_g 보다 약 40 °C 정도 낮은 값이다. 따라서, 이 온도 범위에서 약 10 %의 투과도 증가는 열표백화만의 효과에 의한 결과라고 보기에는 너무 큰 값으로 판단된다. 우리는 투과도 증가의 이유를 다음의 두 종류 현상 중의 한 결과로 추측하였다. 첫째, 수소화로 인한 투과도의 증가이거나, 둘째, 수소화로 T_g 가 감소하였고 이로 인한 열표백화현상이 동반된 경우가 그것이다. 어느 쪽이든 수소화에 기인한 것이다.

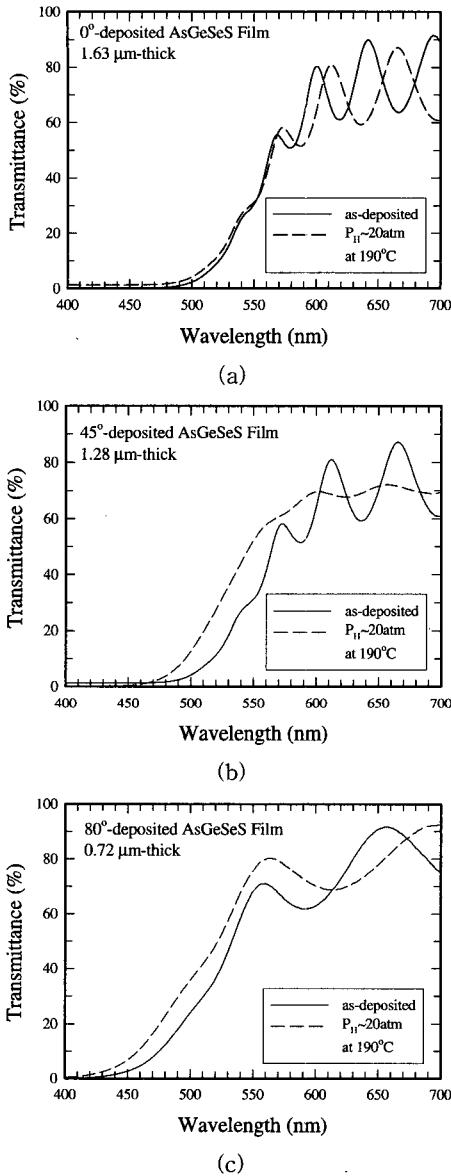


그림 4. (a)0°, (b)45°, (c)80°로 증착된 As₄₀Ge₁₀Se₁₅S₃₅ 박막의 수소 처리 전, 후의 투과도 변화.

Fig. 4. Changes of transmittance in (a)0°, (b)45°, (c)80° as-deposited and H-treated As₄₀Ge₁₀Se₁₅S₃₅ thin films.

강한 전자-포논 상호작용을 보이는 비정질 칼코게나이드 박막은 광에너지($h\nu$)에 대해 $\alpha(\lambda)h\nu$ 가 $(h\nu - E_{OP})^2$ 에 비례하는 특성을 보인다[6-9]. 따라서

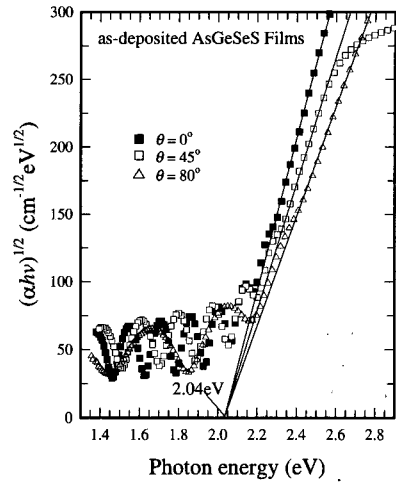


그림 5. 증착직후 박막의 광에너지에 대한 $(\alpha h\nu)^{1/2}$ 의 그래프.

Fig. 5. Plot of $h\nu$ vs. $(\alpha h\nu)^{1/2}$ in as-deposited thin films.

광 에너지에 대한 $(\alpha h\nu)^{1/2}$ 의 그래프를 외삽(extrapolation)하므로 E_{OP} 를 얻을 수 있으며 증착직후 박막에 대한 결과를 그림 5에 보였다.

그림 5에서 보는 바와 같이 증착각도 변화에 무관하게 증착직후 As₄₀Ge₁₀Se₁₅S₃₅ 박막의 E_{OP} 는 약 2.04 eV임을 알 수 있다. 특히, 그림 5의 실선은 E_{OP} 보다 큰 광에너지 영역(확장영역, extended region)에서의 박막의 지수함수 흡수특성으로써 기울기를 일반적으로 1/F의 매개변수로 표현한다. 이 1/F의 감소는 원자배열의 무질서도(randomness 또는 disorder)의 증가에 기인한 결과이다[10,11]. 따라서 증착각도가 증가할수록 박막의 원자배열의 무질서도가 증가하는 것을 알 수 있으며, 이 무질서도의 증가는 그림 1과 그림 2에서 설명한 것과 같이 증착각도가 증가함에 따른 틸과 뎅글링본드의 증가와 관련될 것이다.

수소처리 전, 후 박막에 대한 광에너지- $(\alpha h\nu)^{1/2}$ 의 그래프를 그림 6에 나타내었다. 증착각도 0° 박막의 경우 수소처리 전, 후의 E_{OP} 의 변화는 거의 없으나, 기울기 1/F의 미소한 감소가 관찰되었다. 증착각도 45°와 80° 박막의 경우는 그림 4의 투과도 증가에 대응하는 E_{OP} 의 변화를 동반하였다. 즉, 그림 6(b)와 6(c)에서 보는 바와 같이 수소 처리된 45° 박막의 경우 E_{OP} 는 약 2.09 eV로 약 0.05 eV 증가하였으며, 수소 처리된 80° 박막의 경우 E_{OP} 는

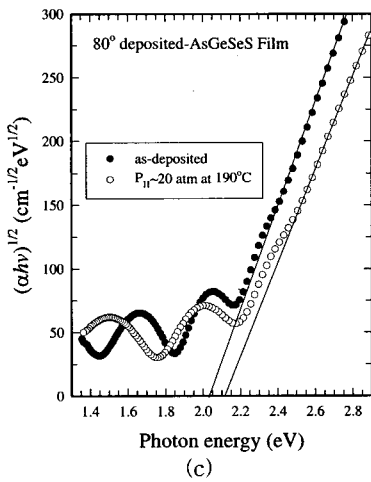
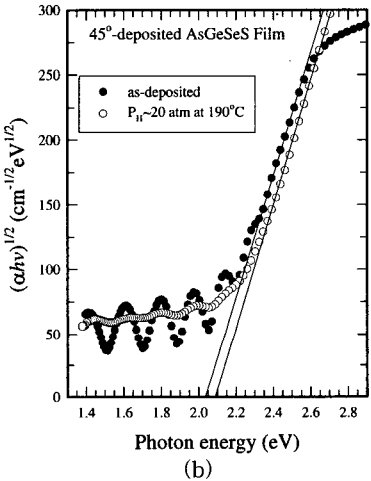
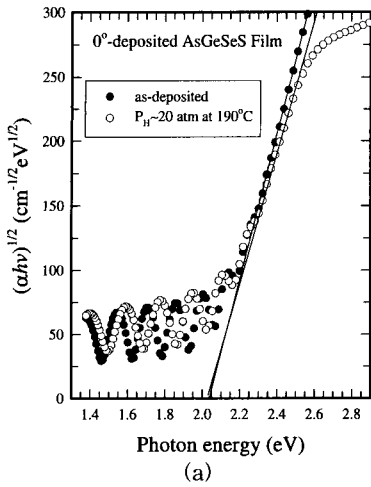


그림 6. 수소처리 박막의 광에너지에 대한 $(\alpha h\nu)^{1/2}$.
 Fig. 6. Plot of $h\nu$ vs. $(\alpha h\nu)^{1/2}$ for the H-treated thin films.

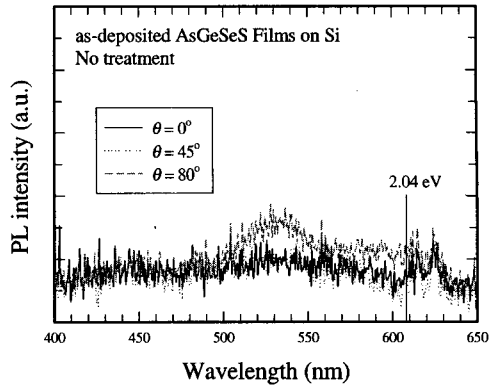


그림 7. 증착직후 박막의 PL 특성.
 Fig. 7. PL spectra of as-deposited films.

약 2.11 eV로 약 0.07 eV 증가하였다. 더욱이 45° 박막의 경우는 1/F의 변화가 없는 반면 80° 박막의 경우 1/F의 값은 약간의 감소를 보였다.

이상의 흡수단 특성을 종합하면 증착각도를 달리하여도 증착직후 박막의 광에너지갭의 변화는 없지만, 증착각도 증가에 따른 기동구조 형성으로 박막의 무질서도는 더욱 증가한다. 수소 처리된 박막의 광에너지갭은 단파장 쪽으로 이동(blue shift) 하며 확장영역의 기울기는 감소하는 경향을 보이는 것으로 판단된다. 그림 7은 증착직후 박막의 PL 특성이다.

그림 7에서 2.04 eV는 박막의 E_{OP} 를 나타낸다. 그림에서 보는 바와 같이 0°와 45°로 증착된 박막의 경우 전체 파장범위에 대해 두드러진 PL 밴드는 관찰되지 않았다. 이는 통상적인 AsGeSeS 박막이 간접천이를 하기 때문이다. 그러나 80° 증착 박막의 경우 약 500~550 nm 파장대인 yellow 영역에서 PL 밴드를 보였다. 일반적으로 PL 밴드가 E_{OP} 이하의 에너지대에서 보여 지는 것과는 상이하게 E_{OP} 이상의 에너지대에서 관찰되었다.

이러한 PL 밴드가 수소처리 시 기판 온도에 어떠한 의존성을 갖는 지를 관찰하기위해 수소처리 박막에 대한 PL의 기판 온도 의존성을 고찰, 그림 8에 나타내었다. 그림 8의 시료는 증착직후 박막에 대해 PL 밴드가 보이지 않는 45° 박막에 대한 결과이다.

그림 8에서 150 °C와 210 °C의 PL 스펙트라는 거의 겹쳐 보인다. 그림 8에서 보는 바와 같이 수소처리 기판온도가 증가함에 따라 확장영역(약 500~

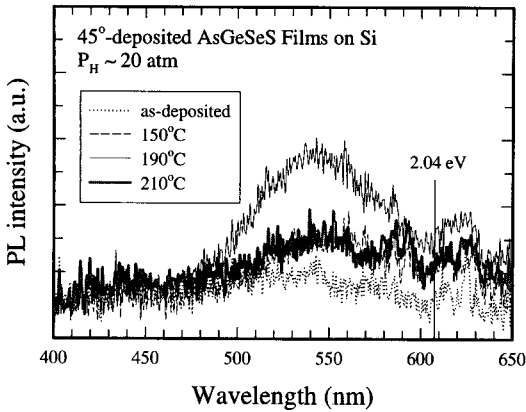


그림 8. 수소처리 기판온도에 따른 80° 증착 박막의 PL 스펙트라.

Fig. 8. PL spectra of 80°-deposited films as function of substrate temperature during H-treatment.

600 nm 파장 범위)에서 PL 밴드가 생성되며 150 °C, 190 °C, 210 °C의 기판온도에 대하여 190 °C의 경우 PL 밴드의 크기가 최대임을 알 수 있다.

수소처리($P_H \sim 20$ atm, 190 °C) 전, 후 박막에 대한 PL 스펙트라의 변화를 그림 9에 보였다. 증착각도 0° 박막[그림 9(a)]을 제외하고 확장영역에서 PL 밴드가 관찰되었다. 더욱이 2.04 eV 부근의 밴드단(band edge)에서 작은 PL 밴드가 관찰되었다. 이상 PL 특성을 종합하면 다음과 같은 결론을 유추할 수 있다.

정상적으로(증착각도 0°) 증착된 AsGeSeS 박막은 간접전이를 하기 때문에 루미네선스를 관찰하기 어렵지만 증착각도를 달리한 박막의 경우 E_{OP} 보다 작은 에너지대인 국재영역(localized region) 보다는 E_{OP} 보다 큰 에너지대인 확장영역에서 구조적 변화를 일으킨다. 또한, 0° 증착박막의 경우는 수소처리에 불구하고 PL 변화를 보이지 않았으나, 45°, 80° 증착박막에서는 수소처리에 따라 상대적으로 큰 확장영역 PL 밴드와 흡수단 PL 밴드가 관찰되었다.

초기 비정질 Si이 국재영역에 국재상태가 너무 넓게 퍼져있어서 불순물 도핑이 어려웠고 α -Si:H을 제작하여 국재상태들을 줄여줌으로써 비정질 Si 박막이 전자소자로서 응용될 수 있었다. 본 연구는 이에 착안하여 비정질 칼코게나이드 박막 역시 수

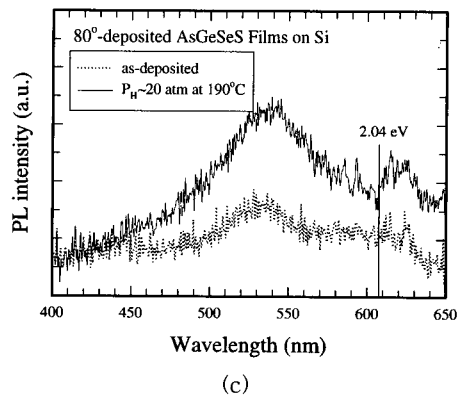
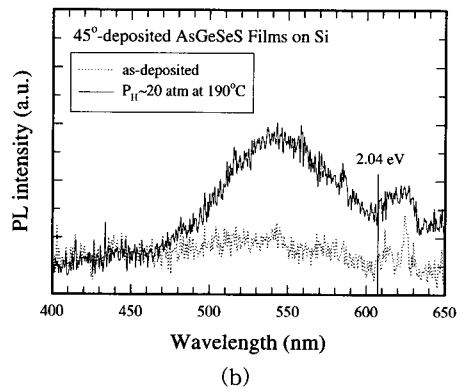
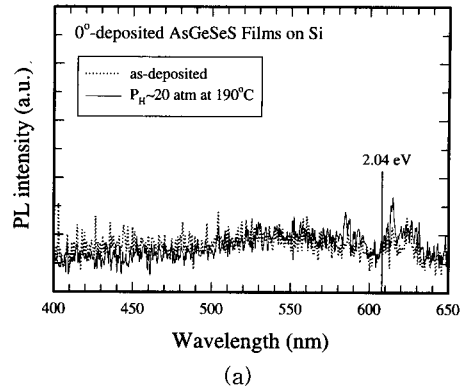


그림 9. (a)0°, (b)45°, (c)80°로 증착된 $As_{40}Ge_{10}Se_{15}S_{35}$ 박막의 수소 처리 전, 후의 PL 변화.

Fig. 9. Changes of PL in (a)0°, (b)45°, (c)80° as-deposited and H-treated $As_{40}Ge_{10}Se_{15}S_{35}$ thin films.

소화 처리하므로 국재준위를 줄일 수 있지 않을까 하는 생각 하에 출발하였다. 본 연구 결과로 수소화가 국재준위를 줄이는지에 대한 어떤 결론을 얻지는 못했다. 그러나 수소화된 칼코게나이드 박막

은 광학적, 구조적으로 상당한 변화를 일으키는 것은 확실한 것으로 판단된다. 또한, 증착각도를 변화시킨 수소화 박막에서 PL 특성이 관찰된다는 것은 새로운 능동소자로서 응용이 가능할 수 있다는 것을 제공한다. 더욱이 수소화 비정질 칼코게나이드 박막이 α -Si:H와 같이 국제준위를 줄여준다면 비정질 칼코게나이드 박막에 도핑을 할 수 있고 루미네센스를 얻을 수 있을 것이다.

4. 결 론

비정질 $As_{40}Ge_{10}Se_{15}S_{35}$ 박막을 증착각도를 달리 해 제작하였다. 제작된 박막은 고압(20 atm)의 수소분위기하에서 기판온도를 유리질천이온도 이하로 변화시켜가며 수소화 처리 전, 후 박막의 모폴로지 변화, 흡수단 변화 및 PL 변화를 고찰 하였다. 80° 경사 증착된 박막은 전체 박막에 걸쳐 약 $65\sim 70^\circ$ 의 기울기를 갖는 기둥구조가 형성되었으며 이 기둥구조 주위로 많은 틈(voids)들이 관찰되었다. 기둥구조는 수소화처리 후 소멸되었다. 증착 직후의 박막은 증착각도에 무관하게 약 2.04 eV의 광에너지갭(E_{op})를 가지나 증착각도 증가에 따라 확장영역의 기울기는 감소하였다. 이는 무질서도의 증가로 설명하였다. 수소 처리된 박막에서 약 10~20 % 정도의 투과도 증가가 관찰되었으며 그에 대응하는 E_{op} 의 증가를 보였다. 증착각도 0° 박막은 수소처리 전, 후 박막 모두에 대해 확장영역 및 흡수단 부근에서 어떠한 PL 밴드도 관찰되지 않은 반면, 45° , 80° 증착박막의 경우는 증착직후 박막에서 조차 확장영역에서 구조적 변화에 기인하는 PL 밴드가 관찰되었다. 수소처리로 이 확장영역 PL 밴드는 더욱 증가하였으며 더욱이 흡수단 부근에서 PL 밴드가 나타났다. 현 단계에서 비정질 칼코게나이드 박막의 수소처리가 국제상태들을 줄이는 데 기여하는지는 알 수 없다. 그러나, 증착각도를 달리한 박막에 대한 수소처리가 광학적, 구조적인 변화를 야기한다는 것은 입증하였다. 좀 더 확실한 결론은 현재 진행 중인 수소화 처리 박막의 전기적 특성변화에 대한 실험을 통해 얻어질 것이다.

감사의 글

본 연구는 차세대성장동력반도체사업 과제에 삼성전자가주식회사의 지원으로 수행되었음.

참고 문헌

- [1] R. C. Chittic, J. H. Alexander, and H. F. Sterling, "Method of forming semiconductor materials and barriers using a dual enclosure apparatus", J. Electrochem. Soc., Vol. 116, p. 77, 1969.
- [2] V. G. Zhdanov, B. T. Kolomiets, V. M. Lyubin, and V. K. Malinovsky, "Photo-induced optical anisotropy in chalcogenide vitreous semiconducting films", Phys. Status Solidi A., Vol. 52, p. 621, 1979.
- [3] K. Tanaka, "Photoinduced processes in chalcogenide glasses", Curr. Opin. Solid State Matter. Sci., Vol. 1, p. 567, 1996.
- [4] H. Y. Lee, S. H. Park, J. Y. Chun, and H. B. Chung, "Photoinduced transformation in amorphous SeGe thin films by XeCl excimer laser exposure", J. Appl. Phys., Vol. 83, p. 5381, 1998.
- [5] S. R. Elliott, "Physics of Amorphous Materials", Wiley, 1990.
- [6] H. Y. Lee, J. Y. Chun, C. H. Yeo, and H. B. Chung, "Photoinduced dichroism and its low temperature characteristics in obliquely deposited a-AsGeSeS thin films", J. Vac. Sci. Technol. A, Vol. 18, p. 485, 2000.
- [7] K. Tanaka, "Reversible photostructural change : mechanisms, properties and applications", J. Non-Cryst. Solids, Vol. 35&36, p. 1023, 1980.
- [8] N. F. Mott and E. A. Davis, "Electronic Processes in Non-Crystalline Materials", 2nd ed., Clarendon, Oxford, 1979.
- [9] H. Y. Lee and H. B. Chung, "Low-energy focused-ion-beam exposure characteristics of an amorphous $Se_{75}Ge_{25}$ resist", J. Vac. Sci. Technol. B, Vol. 15, p. 818, 1997.
- [10] Y. Utsugi and Y. Mizushima, "Photo-structural change in the Urbach tail in chalcogenide glasses", J. Appl. Phys., Vol. 51, p. 1773, 1980.
- [11] J. P. deNeufville, "Optical Properties of Solids-New Development", edited by B. O. Seraphin, North-Holland, Amsterdam, 1976.