

도우핑된 비정질 실리콘의 온도에 따른 광학적 특성

(Temperature Effects on the Optical Properties of Doped Amorphous Silicon)

朴珍奭*, 韓民九*, 李晝漢**

(Jin Seok Park, Min-Koo Han and Chung Han Lee)

要 約

RF glow discharge에 의한 방법으로 증착되고, N- 및 P-type으로 도우핑된 비정질 실리콘의 동작온도에 따른 광학적 특성의 변화를 조사하였다. 광흡수계수 및 광학적 밴드갭을 온도의 함수로서 측정하고, 도우핑된 비정질 실리콘의 광흡수계수는 온도의 증가에 따라서 단조적으로 증가하였으며, 광학적 밴드갭의 온도에 따른 감소계수는 약 $4 \sim 7 \times 10^{-4}$ [ev/k]로 계산되었다.

Abstract

Experimental results are reported concerning temperature effects from room temperature to 100°C on the optical properties of N- and P-type hydrogenated amorphous silicon films prepared by RF glow discharge. Optical absorption coefficient and optical bandgap have been measured and analyzed as a function of temperature. Optical absorption coefficient increases monotonically with temperature, while the optical bandgaps of doped amorphous silicon decrease linearly by about $4 \sim 7 \times 10^{-4}$ [ev/k].

I. 序 論

수소화된 비정질 실리콘(hydrogenated amorphous silicon, a-Si:H)은 1975년 W. E. Spear 등이¹⁾ 비정질 실리콘의 dangling bond를 수소와 결합하여 국부적 준위(localized states)를 감소시킴으로써, 양질의 a-Si:H 박막을 제조한 것을 계기로 활발히 진행되었다.

수소화된 비정질 실리콘은 결정질 실리콘에 비하여 carrier의 이동도(mobility) 및 암전도도(dark conductivity) 등의 전기적 특성은 비교적 낮은 반면에 광흡수계수(optical absorption coefficient), 광학적 밴드갭(optical bandgap) 및 광전도도(photoconductivity) 등의 광학적 특성은 우수하기 때문에 그 광학적 특성을 이용하여 태양전지²⁾, image sensor, 박막 트랜지스터(TFT), 복사기용 드럼등 소자의 개발이 확대되고 있다.

a-Si:H 박막의 증착 방법으로는, RF나 dc glow discharge³⁾에 의한 silane(SiH_4) gas의 분해(decomposition)를 이용하는 방법과 silicon의 reactive sputtering에 의한 방법 및 SiH_4 gas를 $550 \sim 650^{\circ}\text{C}$ 에서 열 분해(thermal decomposition) 하는 CVD(chemical vapor deposition) 방법으로 박막을 증착한 후, 수소화

*正會員, 서울대학교 電氣工學科

(Dept. of Electrical Eng., Seoul National Univ.)

**正會員, 서울대학교 電子工學科

(Dept. of Elec. Eng., Seoul National Univ.)

接受日字: 1986年 2月 8日

(※ 本研究은 1985年度 文敎部의 支援에 의한 서울대학교 半導體共同研究所와 韓國進興財團의 도움으로 이루어졌음.)

(hydrogenation)시키는 방법 등이 실현되고 있다.

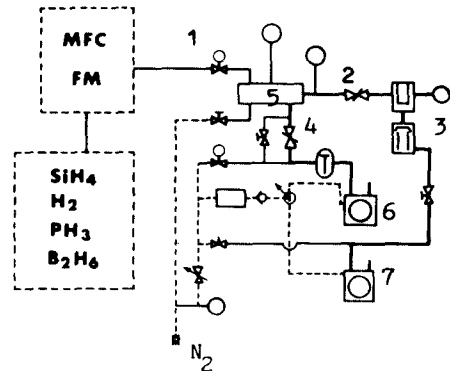
a-Si:H 박막을 이용한 소자 및 장치의 작동중의 온도는 빛의 흡수 및 주변 온도의 상승등으로, 실온에서부터 약 100°C 사이에서 동작하게 되는데, 이 때 이러한 온도 상승에 따른 광흡수계수 및 optical bandgap 등의 광학적 특성의 변화를 정량적으로 분석하는 것은 그 a-Si:H 박막을 이용한 소자와 장치의 설계 및 신뢰도 문제에서 필수적인 고려 대상이 된다. 그러나, 현재까지 이러한 작동 온도의 변화와 광학적 특성과의 상관 관계에 대한 정량적인 분석이 문헌에 보고된 예는 극히 드물다. 다만, 1979년 Harvard 대학에서 sputtering에 의한 방법으로 증착된 undoped a-Si:H 박막에 대하여, 온도 상승에 따른 optical bandgap의 감소계수가 약 $2.9 \times 10^{-4} [\text{ev/k}]^{[4]}$ 로 보고되었고, 같은 해 Xerox에서 RF glow discharge에 의하여 제작된 undoped a-Si:H 박막에 대한, 77°K 이하의 매우 낮은 온도에서 측정된 optical bandgap의 감소계수가 약 $4.8 \times 10^{-4} [\text{ev/k}]^{[5]}$ 로 보고된 예가 있었다. 그러나, 위에 보고된 결과는 모두 undoped a-Si:H 박막에 대한 것이며, 실제의 작동 온도 범위 이상의 높은 온도에서 혹은 매우 낮은 온도에서의 결과들이었고, 또한 sputtering에 의한 방법으로 제작된 박막은 ion의 bombardment로 인하여 증착되는 박막의 표면에 많은 결함을 초래하므로 양질의 박막을 만들 수 없기 때문에 현재 거의 사용되지 않고 있다.

따라서, 현재 가장 널리 사용되고 또한, 비교적 박막 표면에 defect가 적고, 넓은 면적에 대체로 균일한 박막을 증착할 수 있고, 기판의 선택이 용이하고 반응 가스량에 비하여 증착속도가 크며 저온(상온~수백°C) 및 저압(0.1~수 Torr)에서 증착이 가능한 점등의 많은 장점들을 가지고 있는, RF glow discharge 방식인 PECVD(plasma-enhanced chemical vapor deposition)에 의한 방법으로, 반응가스인 SiH₄ gas와 carrier gas인 H₂ 외에 PH₃ 및 B₂H₆의 doping gas를 각각 혼합하여 N-과 P-type으로 도우핑된 박막을 제작하여, 소자가 실제로 사용되는 온도인, 상온에서부터 100°C 까지 온도를 상승시키면서 광흡수계수 및 optical bandgap을 각각 작동온도의 함수로서 그 상관관계를 계산하였다. 또한, doped a-Si:H의 silicon과 hydrogen의 bonding을 알아보기 위하여, N-및 P-type에서의 기판온도에 따른 infrared spectrum^[6]을 각 type별로 조사하였고 이들을 비교하였다.

II. 本 論

1. Doped a-Si:H 박막의 제작

RF (13.56MHz) glow discharge로써 SiH₄ gas를 분해하여 박막을 증착하는 PECVD(Model: PED-301, ANEL VA) 방식을 이용하여 doped a-Si:H 박막을 제작하였다. 그림 1에서 PECVD reactor의 전체적인 구조를 소개하였다.



- 1 : gas inlet unit
- 2 : main valve
- 3 : oil diffusion pump
- 4 : exhaust valve
- 5 : chamber
- 6 : mechanical pump, 300 l/h
- 7 : mechanical pump, 75 l/h

그림 1. PECVD Reactor의 구조
Fig. 1. PECVD system.

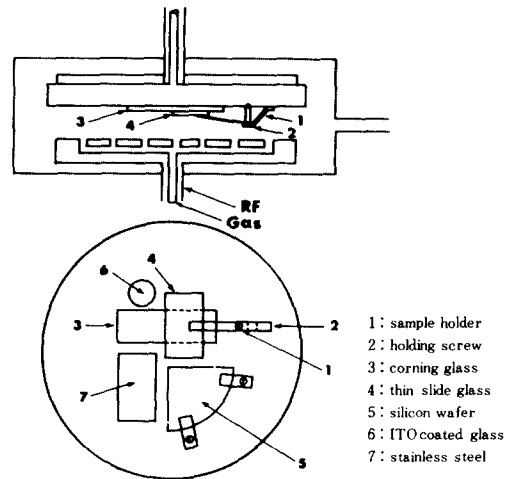


그림 2. 반응실의 내부구조
Fig. 2. Internal structure of chamber.

SiH₄ gas와 H₂gas는 99.9[%] 이상의 순도를 사용했으며, 모든 gas의 flow rate는 MFC(mass flow controller)로 조절하였고, doping gas를 SiH₄ 유입량

의 0.2[%], 1[%]로 각각 혼합하여 도우핑하였다. 또한 chamber내의 증착전 진공도는 약 1×10^{-7} [Torr]정도의 고진공을 유지하여 증착되는 박막의 순도(purity)를 높이고자 하였다. 박막의 증착은 불순물의 영향을 극소화시키기 위하여 upper electrode에 기관을 부착하였으며, 증착되는 박막의 lateral uniformity를 좋게 하기 위하여 전극을 5RPM 정도의 낮은 속도로 회전시켰다. Lower electrode에는 RF power 및 gas line이 설계되어 있으며, 양전극간의 거리는 약 5[cm]를 유지하였다. (그림 2 참고) 기관은, 광학적 특성을 다양하게 조사하기 위하여 ITO coated glass (7059 Base), 현미경 유리, 실리콘 웨이퍼, 스테인레스 스틸등을 같은 증착 조건에서 동시에 loading 하였다. a-Si:H 박막의 증착조건을 표1에 표시하였다.

표 1. 증착조건
Table 1. Deposition conditions.

R. F.	13.56MHz
Power	50w
SiH ₄	5 SCCM
H ₂	20SCCM
Chamber pressure	0.5Torr
Substrate Temperature	200~350°C

2. 광학적 특성의 측정

1) 광흡수계수의 측정

a-Si:H 박막에 그 박막의 밴드갭 에너지(E_g)보다 큰 photon에너지를 갖는 광원이 照射(illumination) 될때, 그 때의 photon flux를 Φ_0 (photons/cm²·sec)라 하면, 박막에 흡수된 photon의 수는 조사된 photon flux의 강도(intensity)에 비례하게 된다. 즉, 미소거리 ΔX 내에 흡수되는 photon의 수는 $\alpha \Phi(X) \Delta X$ 가 되며, 이때의 비례상수 α 를 광흡수계수(optical absorption coefficient)라 정의한다.

Photon flux의 연속성(continuity)으로부터 다음의 관계식이 성립한다. (그림 3 참고)

$$\Phi(X+\Delta X) - \Phi(X) = \frac{d(\Phi(X))}{dX} \Delta X = -\alpha \Phi(X) \Delta X \tag{1}$$

$$\frac{d(\Phi(X))}{dX} = -\alpha \Phi(X) \tag{2}$$

식(2)에서의 minus(-)부호는 흡수에 따라 photon flux의 강도가 감소하게 됨을 의미한다. 최초의 photon

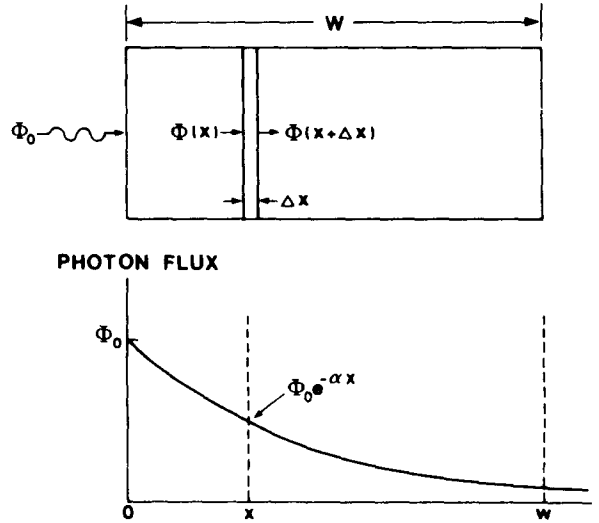


그림 3. 광흡수 및 광속의 감소
Fig. 3. Optical absorption and exponential decay under illumination.

flux가 Φ_0 이었으므로, $\Phi(X=0) = \Phi_0$ 의 경계조건을 이용하면,

$$\Phi(X) = \Phi_0 e^{-\alpha X} \tag{3}$$

의 관계식을 얻을 수 있게되어, 시편의 두께가 d일때 시편을 통과한 투과율(transmittance), T는 다음의 식으로 표현된다.

$$T = \frac{\Phi(d)}{\Phi_0} = e^{-\alpha d} \tag{4}$$

그러므로, 식(4)로부터 각 파장(λ)에 따른 광흡수계수, α 는 다음의 관계식으로부터 계산된다.

$$\alpha(\lambda) = \frac{\ln T}{-d} \tag{5}$$

식(5)에서 사용된 투과율은 multipurpose dual-beam recording spectrophotometer (model; MPS-5000)을 이용하여, 파장범위가 340~740[nm]의 가시영역에서 측정된 투과율의 결과들을 인용했다. 단 이때 측정된 반사율(reflectance)은 다음의 식,

$$R = \frac{(n-1)^2}{(n+1)^2} \tag{6}$$

에서, 굴절율을 $n=3.5$ 로 취하면, $R=0.39$ 로 되어 무시할 수 없는 값이 된다. 그러나, 기관으로서, quartz나 유리 등의 비흡수기관(nonabsorbing substrate)을 사용하는 경우에 있어서, multiple reflection등을 고려할 때 substrate의 reflectance는 다음의 식으로 표현된다.⁹⁾

$$R_s = \frac{|t_1|^4}{1 - |r_1|^2} \frac{|\tilde{r}_{10}|^2}{|r_{10}|^2} \tag{7}$$

여기서,

t_i, \bar{r}_i = transmission and reflection amplitudes for light impinging from the substrate on the film, respectively.

\bar{r}_{i0} = the fresnel coefficients for a light beam going from medium 1 (i. e. substrate) to medium 0 (i. e. air).

이러한 경우에, n_1 (refractive index) = 1.5 및

$|\bar{r}_{i0}|^2 = 0.04, |\bar{r}_i|^2 \approx 0.49$ 로 각각 주어지므로,

$$R_s \approx |t_i|^2 \cdot 0.0408 \pm 2\% \quad (8)$$

의 식이 얻어지는데, 이때 계산된 $|t_i|^2$ 의 값은 1보다 상당히 작으므로, 건국 비흡수기관을 사용하는 경우의 기관에 대한 reflectance는 무시할 수 있다. 박막에 대한 reflectance는 굴절율이 3.5일때 약 30(%) 가 되는데, 이러한 영향은 T_{auc} 의 식에서 optical bandgap이 α 에 따라서 변함으로서 감소하게 된다. 즉, α 의 측정오차가 E_{opt} 에 미치는 영향은 $\delta E_{opt} / E_{opt} = (h\nu - E_{opt}) / 2E_{opt} \cdot (\delta\alpha/\alpha)$ 로 주어지고, 이때 $h\nu = 2.3(eV)$, $E_{opt} = 1.6(eV)$ 로 취하고, α 의 측정오차를 30(%)까지 계산하여도, optical bandgap에의 영향은 약 8(%) 이내의 작은 비율이 된다. 본 연구에서는 α 의 정확한 값보다는 온도의 변화에 따른 α 의 상대적인 변화를 고찰하고, optical bandgap의 감소계수를 정량적으로 계산하는데 목적이 있었으므로 이러한 reflectance의 영향은 무시될 수 있다고 생각된다. T_{auc} 의 optical bandgap 계산에 사용된 흡수계수의 값들은 660[nm]이하의 가시영역으로부터 얻어진 것인데, 이 영역에서는 간섭(interference) 현상이 나타나지 않았기때문에, multiple reflection에 의한 interference는 문제가 되지 않는다. Ellipsometer 부터 측정된 박막의 굴절율은 3.6이었고, 두께는 약 1500[Å]으로 얇게 증착되어, 광학적 특성의 변화를 보다 확실하게 계산하고자 하였다.

2) Optical Bandgap의 측정

비정질 반도체에서는 결정질에서와는 달리 localized state의 존재로 인하여 band-tail 현상이 나타나므로 수소의 양이나 증착온도등의 증착조건에 따라 optical absorption edge 부분이 매우 민감하게 변화하므로 실험적으로 정확히 optical bandgap⁴을 정의하기는 매우 어려운 일이다. 다만, band edge가 parabolic하고 optical transition의 matrix 성분이 energy에 무관한기 경우의 비정질 반도체에서 그 적용성이 높은 $(\alpha \cdot E_{ph})^{1/2}$ 과 E_{ph} 와의 선형관계¹¹를 이용하여 E_{ph} 측의 절편으로부터 optical bandgap을 계산 하였다. 이러한 $(\alpha \cdot E_{ph})^{1/2}$ 과 E_{ph} 와의 선형관계는 J. Tauc에 의하여 도출되었는데 그 유도과정은 다음과 같다.⁹

$$\alpha \propto \frac{1}{\omega n(\omega)} |p(\omega)|^2 N_{vc}(\omega) \quad (8)$$

여기서, ω = frequency

$n(\omega)$ = refractive index

$p(\omega)$ = average of matrix element of one component of the momentum operator between valence and conduction states

$N_{vc}(\omega)$ = the convolution of the valence and conduction densities of states

식 (8)에서 N_{vc} 와 N_c 가 $\alpha \geq 10^{17}[cm^{-3}]$ 이상에서 $(E - E_g)^r$ 에 비례하는 power-law 영역으로 표현되고, 일정한 matrix 성분에 대하여 다음과 같은 식이 유도된다.

$$\sqrt{\alpha \cdot \omega \cdot n(\omega)} = C_2 (h\omega - E_g) \quad (9)$$

식(9)에서 refractive index는 선형성에 영향을 주지 못하므로 결국 식 (10)과 같은 $(\alpha \cdot E_{ph})^{1/2}$ 과 E_{ph} 사이의 선형관계를 얻을 수 있다.

$$(\alpha \cdot E_{ph})^{1/2} = C_1 (E_{ph} - E_{opt}) \quad (10)$$

여기서 사용된 기울기 C_1 의 범위는 670~690[eV^{-1/2}cm^{1/2}]이었으며, 이러한 기울기는 optical bandgap이 1.6에서 1.85[eV]사이의 값일 경우에 보통 560~900[eV^{-1/2}cm^{1/2}]의 넓은 범위의 값으로 보고 되어 있다.¹⁰

3) Heater의 제작

광흡수계수와 작동온도와의 상관관계를 규명하기 위하여 spectrophotometer의 sample holder 부분에 특별히 제작된 4×4[cm]의 정방형 heater를 부착하여, 제작된 doped a-Si:H 박막의 온도를 실온에서 100[°C]까지 20[°C]마다 증가시키면서 각각의 투과율을 측정하였다. 이 때 시편과 동판과의 온도 평형을 위하여 충분한 시간적 고려를 하였고, 시편의 온도는 시편에 부착된 digital thermometer로 측정하였다. 또한, spectrophotometer의 sensor 부분이 heater에 의한 영향을 받지 않게 하기 위하여 단열재를 사용하여 heater에 box를 만들어 줌으로써 온도를 차폐하였다. 동판 및 box에는 spectrophotometer의 광원이 통과할 직경 0.8[cm]의 구멍을 앞, 뒷 면에 만들어 광원의 손실을 최소로 하였다.

2. 實驗結果

기관온도가 250[°C]와 300[°C]일때, PH₃을 SiH₄ 유입량의 1[%]로 도우핑한 N-type 비정질실리콘 박막의 작동온도에 따른 광흡수 계수의 변화를 각각 그림 4, 5에 표시하였다. 각각의 경우에 있어서 모두 온도가 실온에서 100[°C]로 증가함에 따라서 광흡수계수가 약 10~15[%]로 증가되었음을 알 수

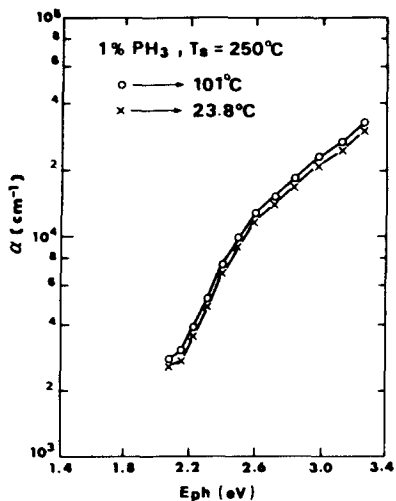


그림 4. 250°C의 기판온도에서 증착된 N-type a-Si:H 박막의 온도에 따른 광흡수 계수의 변화
 Fig. 4. Optical absorption coefficient of an N-type a-Si:H film deposited at $T_s=250^\circ\text{C}$ as a function of temperature.

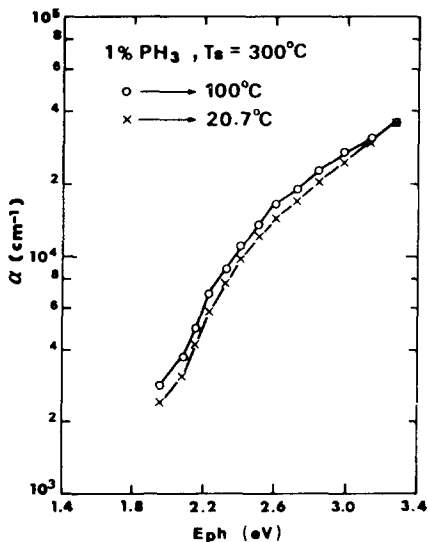


그림 5. 300°C의 기판온도에서 증착된 N-type a-Si:H 박막의 온도에 따른 광흡수 계수의 변화
 Fig. 5. Optical absorption coefficient of an N-type a-Si:H film deposited at $T_s=300^\circ\text{C}$ as a function of temperature.

있다(그림 6 참고).

이러한 결과는 undoped a-Si:H 박막의 경우에 대하여도 보고된 바가 있는데, doped a-Si:H 박막의 경우에서도 거의 같은 경향을 나타냄을 알 수 있었다.

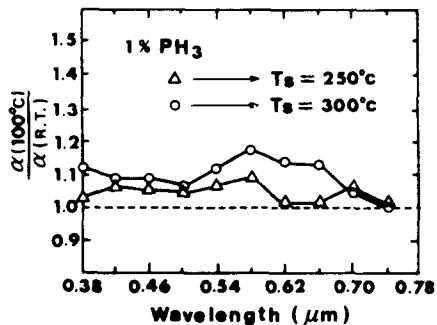


그림 6. N-type a-Si:H 박막의 광흡수계수의 변화
 Fig. 6. The change of optical absorption coefficient of N-type a-Si:H.

Optical bandgap을 측정하기 위하여 $(\alpha \cdot E_{ph})^{1/2}$ 와 E_{ph} 의 관계를 기판온도가 250[°C]와 300[°C]일때의 경우에 대하여 각각 그림 7과 그림 8에 표시하였다. 온

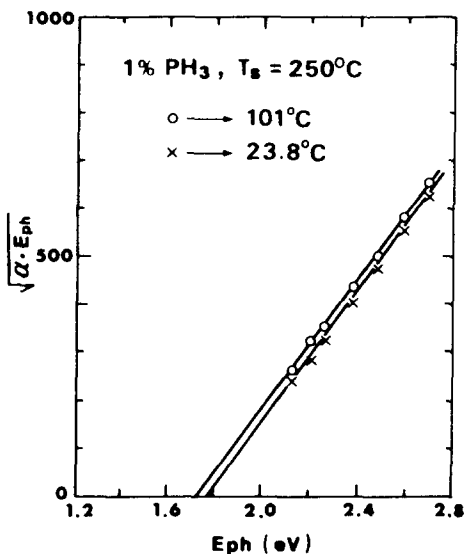


그림 7. 250°C의 기판온도에서 증착된 N-type a-Si:H 박막의 $(\alpha \cdot E_{ph})^{1/2}$ 와 E_{ph} 의 선형관계
 Fig. 7. A plot of $(\alpha \cdot E_{ph})^{1/2}$ versus E_{ph} for an N-type a-Si:H film prepared at $T_s=250^\circ\text{C}$.

도가 증가함에 따라서 optical bandgap이 감소하는 방향으로 이동되었음을 알 수 있다. 그림9는 optical bandgap이 온도의 증가에 따라서 거의 직선적으로 감소하는 것을 나타낸다. 실온에서 100[°C]까지 20[°C]씩 증가시키면서 측정된 각각의 optical bandgap 및 사용된 기술기 등을 표 2에 요약하였다.

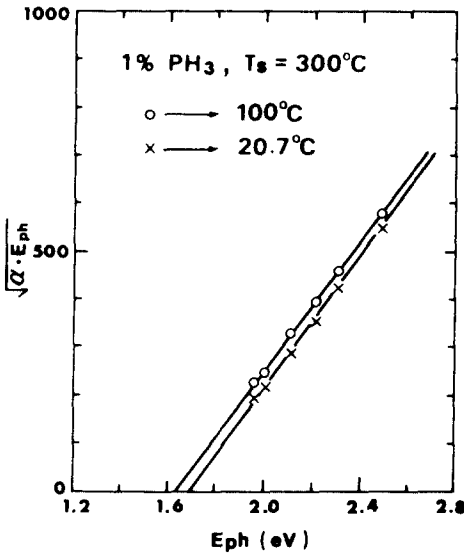


그림 8. 300°C의 기판온도에 증착된 N-type a-Si:H 박막의 $(\alpha \cdot E_{ph})^{1/2}$ 와 E_{ph} 의 선형관계
 Fig. 8. A plot of $(\alpha \cdot E_{ph})^{1/2}$ versus E_{ph} for an N-type a-Si:H film prepared at $T_s = 300^\circ\text{C}$.

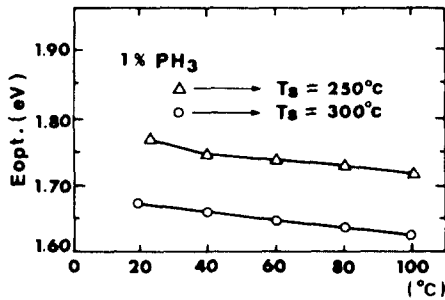


그림 9. N-type a-Si:H 박막의 온도에 따른 광학적 밴드갭의 변화
 Fig. 9. Temperature dependence of the optical bandgap for an N-type a-Si:H film.

또한, B_2H_6 가 SiH_4 의 1[%]로 도우핑된 P-type a-Si:H 박막에 대한 광흡수계수 및 optical bandgap의 동작온도에 따른 변화를 그림 10, 11, 12, 13, 14, 15 및 표 3에 나타내었다. P-type a-Si:H 박막에 대하여도 전체적인 결과는 N-type의 경우와 거의 같은 경향을 나타내었으나, 그림 4와 그림 10 및 그림 5와 그림 11을 비교할 때, 같은 기판온도에서 N-type 보다 P-type에서 광흡수계수가 더 큰 값을 나타내었고, 표 2와 표 3의 비교로부터, 같은 기판온도에서 증착된 박막에 대하여, P-type의 optical bandgap이 N-type

표 2. N-type a-Si:H 박막의 측정온도별 광학적 밴드갭

Table 2. Optical bandgap of an N-type a-Si:H film as a function of an operating temperature.

(a) $T_s = 250^\circ\text{C}$

T(°C)	E _{opt.} (eV)	slope
23.8	1.7571	672.8
40	1.7499	672.3
60.6	1.7426	671.2
80.7	1.7364	669.8
101	1.7235	667.0
감소계수 = 4.35×10^{-4} (eV/K)		

(b) $T_s = 300^\circ\text{C}$

T(°C)	E _{opt.} (eV)	slope
20.7	1.6710	688.5
40	1.6619	684.5
60	1.6484	680.8
80	1.6401	678.8
100	1.6292	676.3
감소계수 = 5.27×10^{-4} (eV/K)		

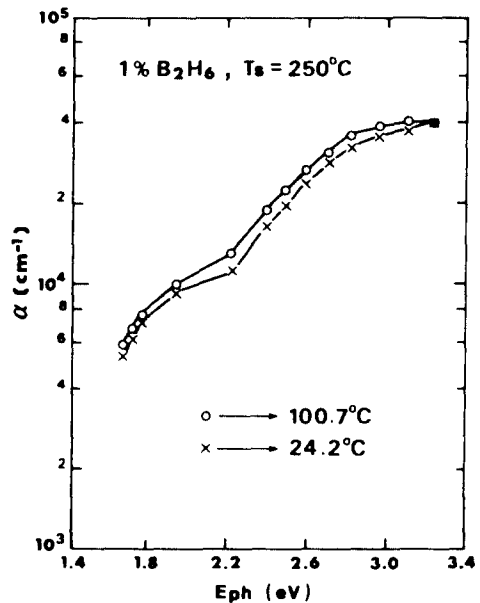


그림 10. 250°C의 기판온도에서 증착된 P-type a-Si:H 박막의 온도에 따른 광흡수계수의 변화
 Fig. 10. Optical absorption coefficient of a P-type a-Si:H film deposited at $T_s = 250^\circ\text{C}$ as a function of temperature.

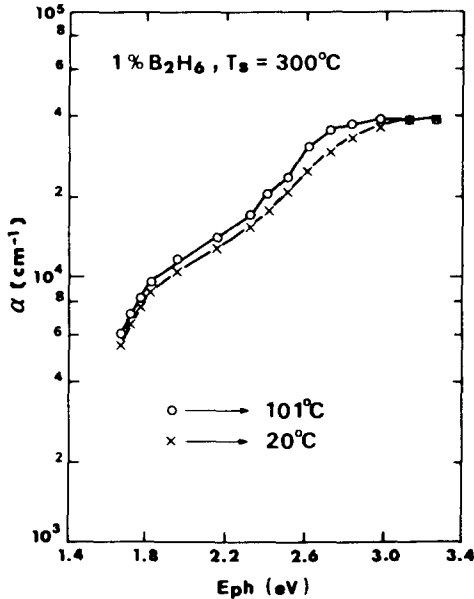


그림 11. 300°C의 기판온도에서 증착된 P-type a-Si:H 박막의 온도에 따른 광흡수계수의 변화

Fig. 11. Optical absorption coefficient of a P-type a-Si:H film deposited at $T_s=300^\circ\text{C}$ as a function of temperature.

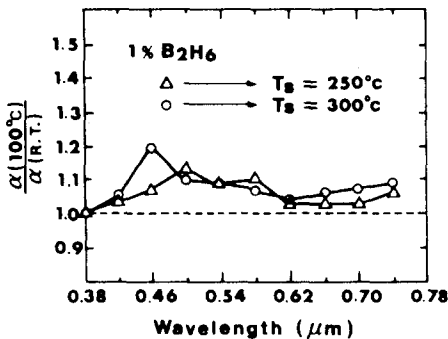


그림 12. P-type a-Si:H 박막의 광흡수계수의 변화율
Fig. 12. The change of optical absorption coefficient of P-type a-Si:H film.

의 경우보다 작게 측정되었다. 이러한 이유에 대하여는 현재까지 확실한 규명은 되지 않고 있으며, 이에 대한 보고도 그 사례를 거의 찾아 볼 수 없다. 또한, N-과 P-type에서의 silicon과 hydrogen의 bonding 상태를 비교하기 위하여 그림 16, 17, 18, 19에 IR spectrum을 각각 표시하였다. N-type에서는 $630[\text{cm}^{-1}]$ 근처에서 silicon과 hydrogen의 bonding이 비교적 확실하게 나타났다으나, P-type에서는 silicon-hydrogen bonding이

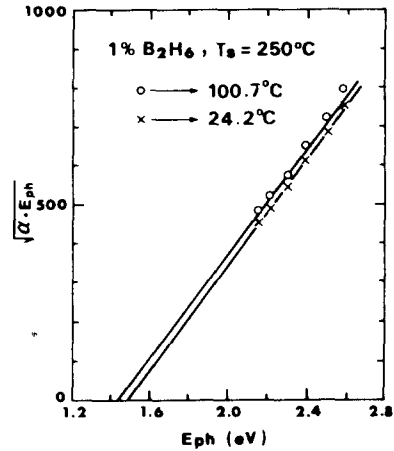


그림 13. 250°C의 기판온도에서 증착된 P-type a-Si:H 박막의 $(\alpha \cdot E_{ph})^{1/2}$ 와 E_{ph} 의 선형관계

Fig. 13. A plot of $(\alpha \cdot E_{ph})^{1/2}$ versus E_{ph} for a P-type a-Si:H film prepared at $T_s=250^\circ\text{C}$.

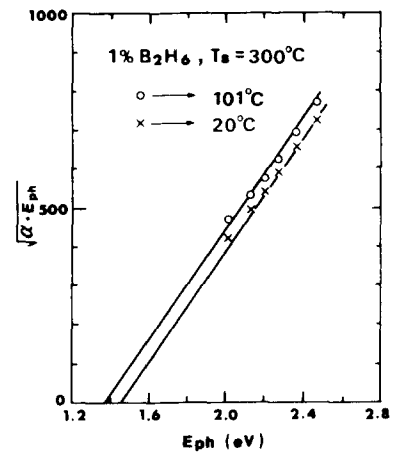


그림 14. 300°C의 기판온도에서 증착된 P-type a-Si:H 박막의 $(\alpha \cdot E_{ph})^{1/2}$ 와 E_{ph} 의 선형관계

Fig. 14. A plot of $(\alpha \cdot E_{ph})^{1/2}$ versus E_{ph} for a P-type a-Si:H film prepared at $T_s=300^\circ\text{C}$.

외에 여러가지 불순물에 의한 bonding이 형성되어 있음을 확인할 수 있었다. 이 결과는 P-type의 doping efficiency가 N-type의 경우보다는 좋지 않다는 실험적 근거가 될 수 있다고 생각된다. 또한 P-type에서는 광흡수계수가 매우 크게 측정되었고, optical bandgap도 표 2와 표 3과 같이 N-type보다 작은 값을 나타낸 결과로부터 태양전지에의 응용에서 이러한 점이 고려되어야 할 것이다.

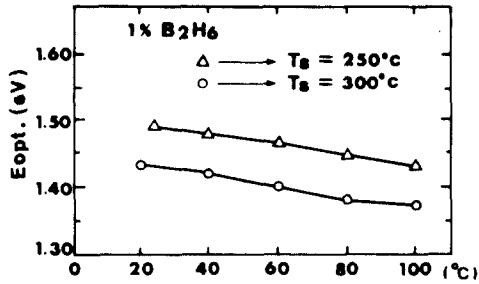


그림 15. P-type a-Si:H 박막의 온도에 따른 광학적 밴드갭의 변화

Fig. 15. Temperature dependence of the optical bandgap for a P-type a-Si:H film.

표 3. P-type a-Si:H 박막의 측정온도별 광학적 밴드갭
Table 3. Optical bandgap of a P-type a-Si:H film as a function of an operating temperature.

(a) $T_s=250^\circ\text{C}$

T (°C)	Eopt. (eV)	slope
24.2	1.4895	680.7
40	1.4799	680.1
60.4	1.4671	678.0
80.3	1.4491	669.5
100.7	1.4371	668.3
감소계수 = 6.85×10^{-4} (eV/K)		

(b) $T_s=300^\circ\text{C}$

T (°C)	Eopt. (eV)	slope
20	1.4329	684.5
40.7	1.4239	689.5
60.5	1.4073	690.1
80.7	1.3840	684.3
101	1.3785	690.9
감소계수 = 6.72×10^{-4} (eV/K)		

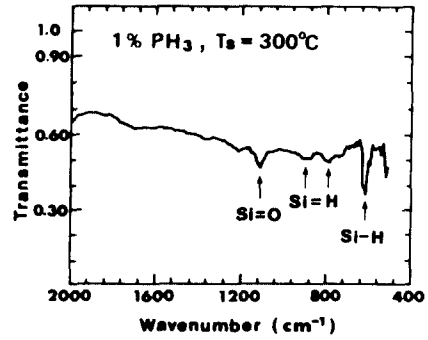


그림 17. 기판온도 300°C에서 증착된 N-type a-Si:H 박막의 적외선 스펙트럼

Fig. 17. Infrared spectrum for an N-type a-Si:H film prepared at $T_s=300^\circ\text{C}$.

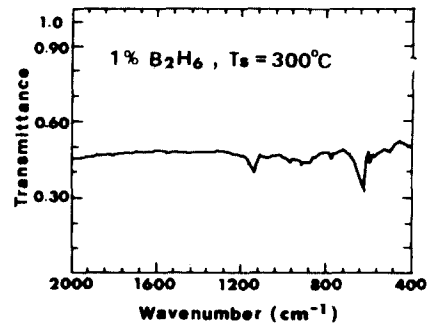


그림 18. 기판온도 250°C에서 증착된 P-type a-Si:H 박막의 적외선 spectrum

Fig. 18. Infrared spectrum for a P-type a-Si:H film prepared at $T_s=250^\circ\text{C}$.

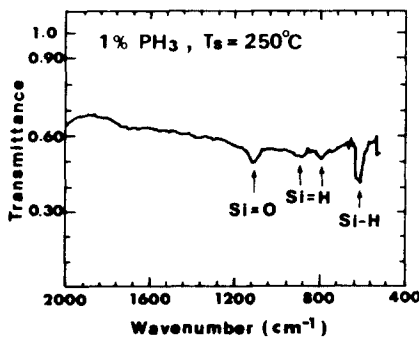


그림 16. 기판온도 250°C에서 증착된 N-type a-Si:H 박막의 적외선 스펙트럼

Fig. 16. Infrared spectrum for an N-type a-Si:H film prepared at $T_s=250^\circ\text{C}$.

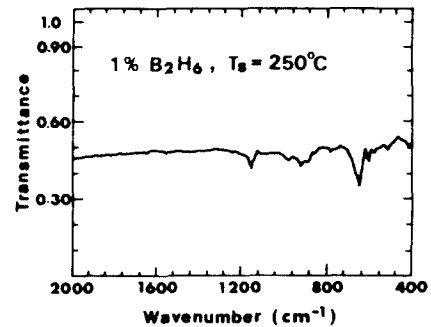


그림 19. 기판온도 300°C에서 증착된 P-type a-Si:H 박막의 적외선 spectrum

Fig. 19. Infrared spectrum for a P-type a-Si:H film prepared at $T_s=300^\circ\text{C}$.

III. 結論 및 檢討

RF(13.56MHz) glow discharge 방식인 PECVD 방식에 의하여 양질의 doped(1% PH₃, doped 및 1% B₂H₆, doped) a-Si:H 박막을 기판온도가 250[°C]와 300[°C]에서 각각 제작하였다. 제작된 doped a-Si:H 박막의 작동온도에 따른 광학적 특성을 알아보기 위하여 특별히 제작된 heater를 사용하여 그 상관관계를 N-및 P-type에서 각각 분석하였다. 분석결과, 실온에서 100[°C]까지 시편의 온도가 증가함에 따라서, 광흡수계수는 N-및 P-type에서 모두 약 10~15[%]의 증가를 나타내었고, 이러한 광흡수계수의 증가에 따른 optical bandgap의 감소계수를 표 4에 정리하였다.

표 4. N- 및 P-type a-Si:H 박막의 온도의 증가에 따른 광학적 밴드갭의 감소계수

Table 4. Temperature coefficients of optical bandgap for N- and P-type a-Si:H film.

	Substrate Temp. (°C)	E _{opt.} (eV/K)
N-type	250	4.4 × 10 ⁻⁴
	300	5.3 × 10 ⁻⁴
P-type	250	6.9 × 10 ⁻⁴
	300	6.7 × 10 ⁻⁴

Sputtering 방법에 의하여 제작된 undoped a-Si:H 박막의 경우에 대하여 보고된 optical bandgap의 감소계수는 2.9 × 10⁻⁴[eV/k]였고, 결정질 실리콘의 경우는 약 2.8 × 10⁻⁴[eV/k]이었다. 이와같이 비정질 실리콘에서의 optical bandgap의 감소계수가 결정질 실리콘의 그것보다 더 큰 값을 나타낸 것은 비정질 실리콘이 direct bandgap이므로 광흡수계수가 온도의 상승에 따라서 보다 급격히 증가하기 때문인 것으로 해석되며, 이러한 이유로 a-Si:H 박막으로 제작된 태양전지나 광 센서등은, 동작중에 온도가 실온 이상으로 증가하여도 광흡수계수가 크게 증가하게 되어 short-circuit current가 매우 증가하므로^[11] 특성에는 거의 무리를 주지 않기때문에 그 이용 범위가 더욱 확대되리라 생각된다. 또한 N-과 P-type에서 기판온도에 따른 IR spectrum을 조사한 결과, 같은 type에서는 투과율 및 silicon-hydrogen bonding에서의 흡수 깊이와 wavenumber 등이 기판온도에 거의 무관함을 확인 할

수 있었으며, P-type은 N-type보다 doping efficiency가 좋지 않은 것으로 나타났다.

參 考 文 獻

- [1] W.E. Spear and P.G. Lecomber, "Substitutional Doping of Amorphous Silicon," *Solid State Commun.*, vol. 17, pp. 1193-1196, 1975.
- [2] D.E. Carlson, "Solar Energy Conversion," *The Physics of Hydrogenated Amorphous Silicon I*. Ed. by J.D. Joannopoulos and G. Lucovsky, New York, pp. 203-244, 1984.
- [3] T.B. Gorczyca and B. Gorowitz, "Plasma-Enhanced Chemical Vapor Deposition of Dielectrics," *VLSI Electronics*, Ed. by Norman Einspruch, Academic Press, New York, pp. 69-88, 1984.
- [4] E.C. Freeman and W. Paul, *Phys. Rev. B.*, vol. 20, pp. 716, 1979.
- [5] C. Tsang and R.A. Street, "Recombination in plasma-deposited amorphous Si:H. Luminescence decay," *Phys. Rev. B.*, vol. 19, no. 6, pp. 3027-3040, March 1979.
- [6] M.H. Brodsky, M. Cardona, and J.J. Cuomo, "Infrared and Raman Spectra of the Silicon-Hydrogen Bonds in Amorphous Silicon prepared by Glow Discharge and Sputtering," *Phys. Rev. B.*, vol. 16, no. 18, pp. 3556-3571, Oct., 1977.
- [7] E.A. Davis, *Amorphous Semiconductor*, Ed. by P.G. Lecomber and J. Mort, Academic Press, New York, pp. 450, 1973.
- [8] J. Tauc, R. Grigorovici, and A. Vancu, *Phys. Stat. Sol.*, vol. 15, pp. 627, 1966.
- [9] L. Ley, "Photoemission and Optical Properties," *The Physics of Hydrogenated Amorphous Silicon II*, Ed. by J.D. Joannopoulos and G. Lucovsky, New York, pp. 141-144, 1984.
- [10] G.D. Cody, B. Abeles, C.R. Wronski, R.B. Stephens, and B. Brooks, *Sol. Cells*, vol. 2, pp. 227, 1980.
- [11] M.K. Han, W.A. Anderson, and H. Wiesmann, *Proc. IEEE Photovoltaic Spec. Conf.*, vol. 16, pp. 1102, 1982.