

LCD 제작용 급속 열처리 시스템내의 광학 및 열전달 특성

이성혁[†] · 김형준^{*} · 신동훈^{**} · 이준식^{***} · 최영기^{****} · 박승호^{*****}

Optical and Heat Transfer Characteristics in a Rapid Thermal Annealing System for LCD Manufacturing Procedures

Seong Hyuk Lee, Hyung June Kim, Donghoon Shin, Joon Sik Lee,
Young Ki Choi, and Seungho Park

Key Words : RTA(Rapid Thermal Annealing, 급속 열처리), thin film (박막), SPC (고상결정화)

Abstract

This article investigates the heat transfer characteristics in a RTA system for LCD manufacturing and suggests a way to evaluate the quality of a poly-Si film from the thin film optics analysis. The transient and one-dimensional conductive/radiative heat transfer equation considering wave interference effect is solved to predict surface temperatures of thin films. In dealing with radiative heat transfer, a one-dimensional two-flux method is used and the ray tracing method is also utilized to account for the wave interference effects. It is assumed that each interface is assumed diffusive but the spectral radiative properties are included. It is found that the selective heating region exists for various wavelengths and consequently may contribute to heat the poly-Si film. Using the formalism of the characteristic transmission matrix, the lumped structure reflectance, transmittance, and absorptance are calculated and they are compared with experimental data of the poly-Si film during the SPC process via the FE-RTA (Field-Enhanced RTA) technology.

기호설명

a_λ : 파장에 따른 흡수계수 ($=4\pi\kappa/\lambda$)

C_p : 열용량 [J/kg·K]

d : 박막 두께 [m]

h : 프랭크 상수 ($=6.6262 \times 10^{-34}$ [J·s])

i_λ^+ : 양의 z 방향의 파장별 복사강도 [$W/m^2 \cdot \mu m \cdot sr$]

i_λ^- : 음의 z 방향의 파장별 복사강도 [$W/m^2 \cdot \mu m \cdot sr$]

$i_{\lambda b}$: 파장에 따른 흑체 복사강도 [$W/m^2 \cdot \mu m \cdot sr$]

k : 열전도계수 [$W/m \cdot K$]

k_B : 볼츠만 상수 (1.380658×10^{-23} [J/K])

M : 특성전달행렬

\tilde{n} : 복소굴절지수 (complex refractive index)

q_r : 복사 열유속 [W/m^2]

r_F : 반사에 관한 프레스넬 계수

R : 반사율

t_F : 투과에 관한 프레스넬 계수

T : 온도 [K] 및 투과율

κ : 소실계수 (extinction coefficient)

κ_λ : 광학두께 (optical depth)

λ : 파장 [m]

μ : 방향 여현

θ : 각도 [radian]

ψ : 결정화 분율

[†] 중앙대학교, 기계공학부
E-mail : shlee89@cau.ac.kr
TEL : (02) 820-5254 FAX : (02) 814-9476

^{*} 홍익대학교, 신소재·화공시스템 공학부
^{**} 비아트론(주)

^{***} 서울대학교, 기계항공공학부

^{****} 중앙대학교, 기계공학부

^{*****} 홍익대학교, 기계시스템디자인공학부

1. 서론

급속열처리(RTA, Rapid Thermal Annealing) 방법은

반도체 제조 공정에서 필수적인 공정으로서 웨이퍼의 고속 가열 및 급속 냉각을 통해 무정형 실리콘박막(amorphous silicon film)으로부터 디스플레이 장치에서 필수적인 폴리실리콘 박막(polycrystalline silicon film)을 만드는 데 이용된다. 급속열처리하는 램프에 의한 복사에너지를 가열에너지원으로 사용하기 때문에 보다 저렴한 비용으로 고품질의 박막을 제작할 수 있는 기술개발이 요구되고 있다. 최근 기존의 급속 열처리 장치를 이용하면서 보다 경제적이고 균일한 결정구조를 가지며 높은 순도를 가진 박막을 제조할 수 있는 FE-RTA(Field-Enhanced RTA) 장비가 개발된 바 있다⁽¹⁾.

급속 열처리 공정을 통해 얻어진 박막의 결정화 정도를 정성적으로 파악하기 위한 사진기법의 경우, 박막의 결정구조를 가시화할 수 있는 장점이 있는 반면 미세한 특성 변화를 정량화하기 어렵다. Raman shift 방법과 자외선분광기를 이용하여 빛의 강도와 투과율을 측정함으로써 비접촉식으로 제작된 폴리실리콘 박막의 결정화 정도를 상대적으로 평가할 수 있다. 그러나 결정구조로 진행되는 것을 절대적인 기준에서 정량화하기 위해서는 이론 해석이 뒷받침되어야 한다. 한편, Fig. 1 에서와 같이 급속 열처리 공정에서는 내부공간이 매우 협소하고 이송장치에 의해 박막이 연속적으로 이동하기 때문에 박막의 표면온도를 측정하는 것은 매우 어렵다. 따라서 박막이 급속 열처리 장치내부를 이동할 때 표면온도를 예측하는 열전달 해석이 필요하며 급속 열처리 시스템의 최적화를 위해 응용될 수 있다.

본 연구의 주된 목적은 LCD 제작용 급속 열처리 공정에서의 열전달 특성과 광학특성을 파악하고 보다 효과적인 열설계를 위한 이론 자료를 제공하는 것이다. 우선 급속 열처리 공정에 의해 제작된 폴리실리콘 박막의 품질을 정량화하기 위해서 다층 박막 구조물에 대한 광학 특성을 해석하고 실험을 통해 얻어진 투과율 값과 상호 비교한다. 또한 실리콘 박막 표면의 온도를 예측하기 위해 전도/복사 방정식을 이용하여 해석한다.

2. 지배방정식

2.1 박막 광학 해석(thin film optics simulation)

무정형 실리콘 박막에서의 온도변화는 물질의 굴절률의 변화에 영향을 받기 때문에 박막은 성층화된 다층 박막구조(multi-layer thin film structure)로 처리되어야 한다. 본 연구에서는 다층의 박막구조물의 광학특성을 해석하기 위해 특성 전달 행렬

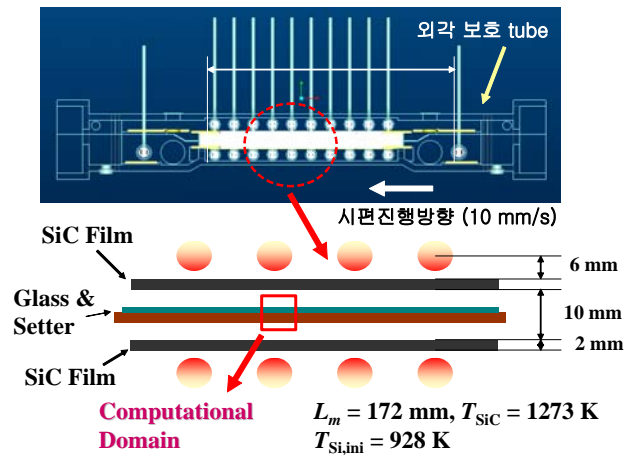


Fig. 1 Schematic of RTA system.

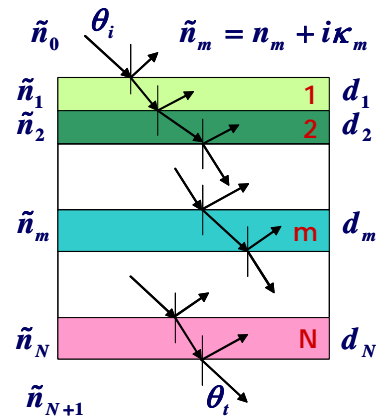


Fig. 2 Multi-layer thin film structure.

(characteristic transmission matrix) 기법⁽²⁾을 이용한다. 이 방법은 근본적으로 박막내의 파장간섭(wave interference)효과를 고려할 수 있다. Figure 2 와 같은 N 개의 박막들로 구성된 경우 임의의 m 층의 박막의 특성전달행렬은 다음과 같다.

$$M_m(z) = \begin{bmatrix} \cos\left(\frac{2\pi}{\lambda} \tilde{p}_m z_m\right), & -\frac{i}{\tilde{p}_m} \sin\left(\frac{2\pi}{\lambda} \tilde{p}_m z_m\right) \\ -i\tilde{p}_m \sin\left(\frac{2\pi}{\lambda} \tilde{p}_m z_m\right), & \cos\left(\frac{2\pi}{\lambda} \tilde{p}_m z_m\right) \end{bmatrix}, \quad (1)$$

여기서 $\tilde{p}_m = \tilde{n}_m \cos \tilde{\theta}_m$ 이고 $\tilde{\theta}_m$ 은 복소수 형태의 입사각을 나타낸다. 또한 $\tilde{n} = n - i\kappa$ 이고 n 과 κ 은 파장에 따른 함수이다. 입사각은 Snell의 법칙에 따라 $\sin \theta_i = \tilde{n}_m \sin \tilde{\theta}_m$ 와 같은 관계를 갖는다. 따라서 다층박막구조물의 전달행렬 M 은 다음과 같다.

$$M = \prod_{m=1}^N M_m(z). \quad (2)$$

또한 반사 및 투과 프레스넬(Fresnel) 계수, r_F 와 t_F 는 각각 다음과 같다.

$$r_F = \frac{(M_{11} + M_{12}\tilde{p}_{N+1})\tilde{p}_0 - (M_{21} + M_{22}\tilde{p}_{N+1})}{(M_{11} + M_{12}\tilde{p}_{N+1})\tilde{p}_0 + (M_{21} + M_{22}\tilde{p}_{N+1})}, \quad (3)$$

$$t_F = \frac{2\tilde{p}_0}{(M_{11} + M_{12}\tilde{p}_{N+1})\tilde{p}_0 + (M_{21} + M_{22}\tilde{p}_{N+1})}. \quad (4)$$

위의 식을 이용하면 다층 박막구조물에 대한 반사율(R)과 투과율(T)을 다음과 같이 결정할 수 있다.

$$R = |r_F|^2, \quad (5a)$$

$$T = \frac{\tilde{p}_{N+1}}{\tilde{p}_0} |t_F|^2. \quad (5b)$$

2.2 전도/복사 열전달 방정식

Figure 1 은 본 연구에서 다루는 LCD 제작용 급속 열처리 장치이다. 이송 장치 위에 구성된 다층 박막 구조물은 Fig. 3 과 같이 무정형 실리콘 박막과 SiO₂ (glass), 그리고 퀴츠(quartz)로 구성된다. 박막이 입구에서 928 K 로 예열되어 급속 열처리장치 내부로 들어오면 램프와 SiC 박막을 통해 발생하는 복사에너지에 의해 박막이 급속히 가열된다. 이송장치에 의해 구조물이 이동하기 때문에 시간에 따른 공간의 변화로 나타내기 위해 본 연구는 1 차원 비정상 전도/복사 방정식을 이용하여 열전달 해석을 수행한다. 또한 대류에 의한 영향을 무시하였으며 파장에 따른 복사 물성값을 고려하여 고체내의 복사열전달 현상을 해석한다.

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left(k \frac{\partial T}{\partial z} \right) - \frac{dq_r}{dz}. \quad (6)$$

한편 복사열유속의 변화는 다음과 같다.

$$\frac{dq_{r,\lambda}(z)}{dz} = \frac{d}{dz} \left(\pi \int_0^\lambda \{i_\lambda^+(\kappa_\lambda, \mu) - i_\lambda^-(\kappa_\lambda, \mu)\} d\lambda \right), \quad (7)$$

여기서 광학두께(optical depth) $\kappa_\lambda = \int_0^z a_\lambda(z) dz$ 이다.

본 연구는 계산을 단순화시키기 위해서 산란을 무시하였고 등방성 가정에 기초하여 각 방향으로의 복사강도 변화를 무시하였다. 이러한 가정을 기초

로 복사에너지전달방정식은 이중 유속법(two-flux method) ⁽³⁾을 이용하여 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\mu \frac{di_\lambda^+}{dz} = -a_\lambda(z) (i_\lambda^+(z) - i_{\lambda b}(z)), \quad \text{for } 0 \leq \theta \leq \frac{\pi}{2} \quad (8)$$

$$\mu \frac{di_\lambda^-}{dz} = -a_\lambda(z) (i_\lambda^-(z) - i_{\lambda b}(z)), \quad \text{for } \frac{\pi}{2} \leq \theta \leq \pi \quad (9)$$

여기서 $\mu = \cos \theta$ 이다. 또한 $a_\lambda(z)$ 는 공간에 따른 파장별 흡수계수를 나타내며 $i_\lambda^+(z)$ 와 $i_\lambda^-(z)$ 는 각각 양과 음의 방향으로의 파장별 복사강도를 나타낸다. 그리고 $i_{\lambda b}$ 는 주어진 파장에서의 흑체복사 강도를 나타내며 굴절지수 n 을 갖는 물질에서 다음과 같이 나타난다⁽³⁾.

$$i_{\lambda b}(z) = \frac{2n^2 C_1}{\lambda^5 (e^{C_2/\lambda T(z)} - 1)}. \quad (10)$$

위 식에서 $C_1 = hc_0^2$, $C_2 = hc_0/k_B$ 이고, h 는 플랑크 상수이고 k_B 는 볼츠만 상수를 나타낸다.

3. 수치해석

본 연구에서는 특성전달행렬을 이용하여 Fig. 3 과 같은 구조에 대해 광학특성을 해석한다. 무정형 실리콘, 결정 실리콘, SiO₂(glass), 그리고 퀴츠들에 대한 광학계수들은 문헌⁽⁴⁻⁶⁾에서 제공하는 값을 이용하였고 Figs. 4-5 에 나타내었다. 또한 박막의 결정화 정도를 정량화 하기 위해서 다음과 같은 가중 형태의 굴절지수를 정의한다.

$$n_{poly} = \psi n_{aSi} + (1 - \psi) n_{cSi}, \quad (11)$$

$$\kappa_{poly} = \psi \kappa_{aSi} + (1 - \psi) \kappa_{cSi}, \quad (12)$$

여기서 ψ 는 결정화 정도를 나타내는 상수로서 1.0 의 값은 100% 순도의 결정 실리콘을 나타내며 0.0 인 경우는 0%의 무정형상태의 실리콘을 나타낸다. 본 연구에서 고려하는 박막구조물의 광학해석은 주로 2 μm 까지의 파장에 대해 다룬다. 해석 결과들은 자외선분광기를 이용하여 측정한 폴리실리콘 박막의 투과율 값⁽¹⁾과 상호 비교된다. 이 경우, 박막 두께는 50 nm 이며 SiO₂ 와 퀴츠의 두께는 각각 0.5 μm 과 700 μm 이다.

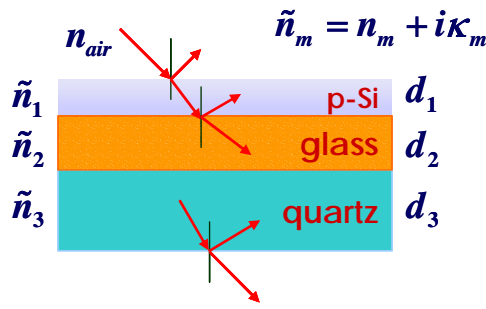


Fig. 3 Computational domain for optical analysis.

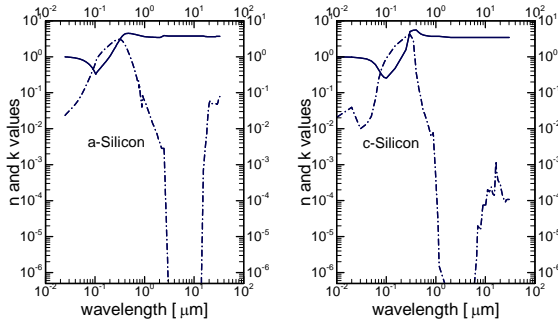


Fig. 4 Optical constants of amorphous and crystal silicon⁽⁵⁻⁶⁾.

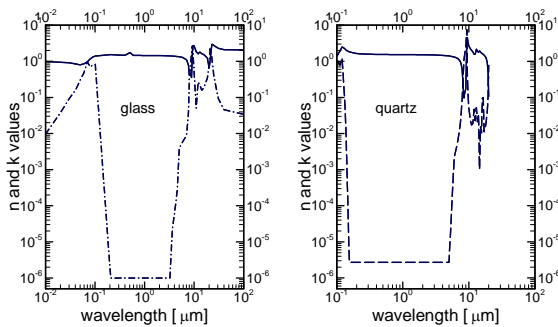


Fig. 5 Optical constants of SiO₂ (glass) and quartz⁽⁴⁾.

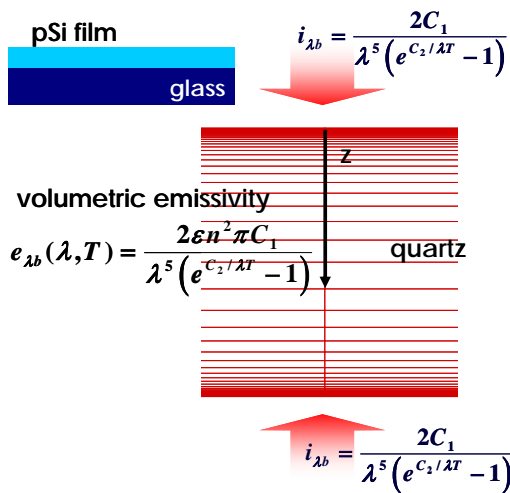


Fig. 6 Computational domain for heat transfer analysis.

본 연구는 비정상, 1차원 전도/복사 열전달 현상을 해석하기 위해 식 (6) ~ (9)들을 유한 차분법을 이용하여 계산한다. 본 연구에서 고려하는 다층박막구조에서 폴리실리콘의 박막 두께는 50 nm 이므로 파장간섭현상을 고려하여야 한다. 따라서 복사 방정식 (8)과 (9)를 해석하는 데에 있어서 박막간 경계면에서의 복사강도는 Ray-tracing 방법⁽³⁾을 이용하여 결정하고 양의 방향과 음의 방향으로 수렴된 값에 도달할 때까지 반복적으로 계산한다. 수렴조건은 이전 단계에서 계산된 값과 상대적인 오차로 결정하며 상대 오차 값이 10⁻⁶ 까지 도달하면 수렴된 것으로 간주한다. 각 파장에 대해서 Ray-tracing 방법을 통해 얻어진 복사강도는 적분되어 전도 열전달 방정식과 함께 해석된다. Figure 6 은 해석 격자를 나타내며 다양한 격자시스템에 대한 의존시험을 통해 결정되었다.

한편, 고온에서 운전되는 급속열처리 공정에서 방사율(emissivity)은 온도와 파장에 따라 현격한 변화를 보인다. Chen 과 Borca-Tasciuc⁽⁷⁾는 급속열처리과정에서 램프에서 발생하는 포톤(photon)들이 실리콘의 복사 물성에 영향을 준다는 것을 보였다. 그러나 본 연구에서 다루는 온도범위는 800 K 이상이기 때문에 방사율은 거의 0.7 로 일정하게 유지된다⁽⁷⁾. 따라서 본 연구에서는 실리콘의 방사율을 0.7 로 일정하게 고정하였다. Figure 1 에서 이송 장치에 의해 이동하는 거리는 172 mm 이고 스캔 속도가 10 mm/s 임을 고려할 때, 이동하는 총 소요 시간은 17.2 s 이다. 또한 램프에 의해 가열된 SiC 박막의 온도는 1273 K 로 고정된다고 가정한다. 표면에 조사(irradiation)되는 복사강도는 흑체로 가정하여 주어진 온도 및 파장에 대해 계산하였다.

4. 결과 및 고찰

4.1 다층박막구조물의 광학특성

Figure 7 은 결정화 분율 ψ 의 변화에 따라 50 nm 두께를 가진 실리콘 박막에서 계산된 투과율을 나타낸다. 결정화 정도가 높아짐에 따라 가시광선범위에서 투과율이 커진다. 본 연구에서 고려하는 구조물에서의 투과율은 약 0.48 μm 에서 최대값을 가지며 최대값을 가지는 파장은 박막의 두께에 따라 변화한다. Figure 8 은 비아트론(주)에서 제공한 실험결과⁽¹⁾와 본 연구에서 계산한 값을 상호 비교한 것이다. 실험은 기존 SPC(Solid Phase Crystallization)공정과 비아트론(주)에서 개발한 FE-

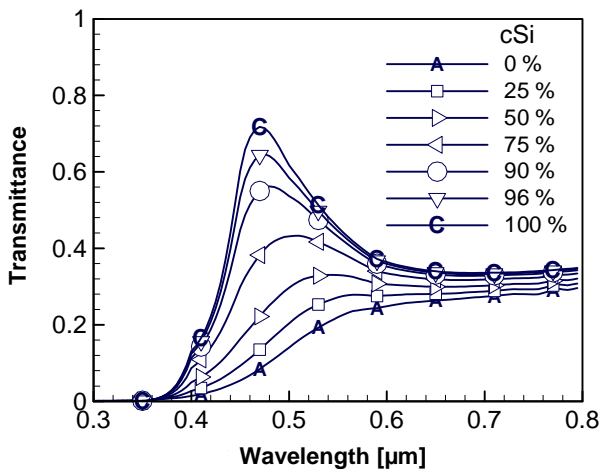


Fig. 7 Predictions of transmittance for different ψ .

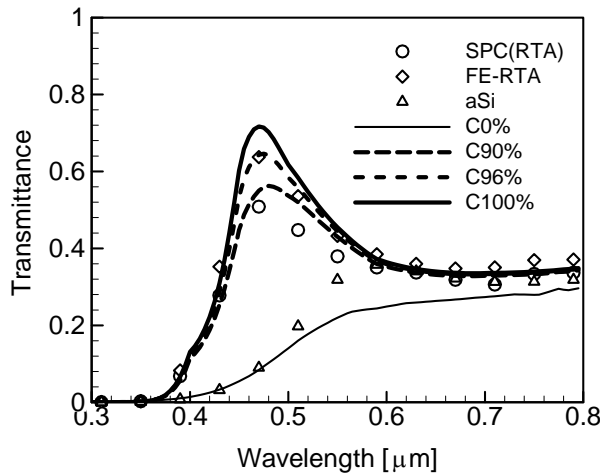


Fig. 8 Comparison between predictions and measurements for transmittance.

RTA 공정을 통해 얻어진 50 nm의 폴리실리콘 박막들에 대해서 자외선분광기(UV spectrometer)를 이용하여 수행되었다. 기존의 SPC 공정에 비해 FE-RTA의 경우 고품질의 폴리실리콘 박막을 보다 경제적이고 효과적으로 얻을 수 있고 장비가 단순하다는 장점을 가지고 있다⁽¹⁾. 본 연구에서는 비아트론(주)에서 제공한 두 가지의 박막 샘플에 대한 결정화 정도를 평가하였다. 기존 SPC 공정으로 얻어진 박막은 최대 약 50% 정도의 투과율을 보이는 반면 FE-RTA의 경우 최대 63%의 투과율을 보이고 있다. 이론결과와 비교할 때 이것은 96%의 순도를 가지는 박막으로 평가되며, 이러한 정량적 방식은 폴리실리콘의 품질을 결정하는 데에 중요한 기초 자료가 될 수 있다. 특히 0.6 μm 이상의 파장에서는 무정형의 실리콘 및 폴리실리콘의 투과율이 거의 동일하게 나타난다. 이것은 박막의

두께와 실리콘 자체의 물성특성에 의해 나타나는 현상이다.

4.2 급속열처리장치내의 다층박막구조물의 열전달 특성

Figures 9(a)와 9(b)는 무정형 실리콘 박막과 결정 실리콘 박막의 경우, 두께방향으로의 복사열유속의 분포를 나타낸다. 무정형 실리콘의 경우, 복사열유속의 기울기가 결정 실리콘의 경우보다 크게 나타난다. 즉, 이것은 결정 실리콘 내부에서는 복사에 의한 열흡수가 거의 이루어지지 않고 대부분의 복사광선이 투과됨을 의미한다. 이러한 경향은 광학 특성 해석에서 지적한 바와 같이 결정화가 진행할수록 투과율이 증가하고 있다는 사실을 뒷받침하는 것이다. 이와는 달리 SiO₂(glass)영역 ($z > 50$ nm)에서는 복사 열유속의 기울기가 무정형 및 결정실리콘 영역에 비해 크게 나타난다. 이것은 이 영역에서 복사에 의한 열 흡수가 보다 활발하게 일어난다는 것을 의미한다. 따라서 결정화가 진행되면, 박막내부로 흡수되는 복사에너지에 비해 SiO₂(glass)내로 흡수되는 복사에너지가 커지게 되어 다층 박막 구조 내에서 선택적 가열 영역(selective heating region)이 존재할 수 있다는 것을 알 수 있다. 즉 결정화가 진행되면서 실리콘 박막은 SiO₂(glass)의 온도 상승으로 인한 전도 열전달에 의해 영향을 받게 된다. 이 현상은 Figs. 4와 5의 광학계수의 특성을 통해 설명된다. 온도가 1000 K 일 때 복사강도의 약 75% 정도는 적외선 영역에 밀집된다. $\lambda = 20 \mu\text{m}$ 에서 결정실리콘의 소실계수(extinction coefficient)는 무정형 실리콘에 비해 약 100 배 정도 높다. 또한, SiO₂(glass)는 가시광선영역에서는 투과성이 높지만 $\lambda = 8 \sim 20 \mu\text{m}$ 에서는 실리콘에 비해 매우 높은 흡수율을 보인다. 따라서 파장에 따른 흡수율의 차이로 인해 선택적 가열 영역이 존재하며 입사되는 복사광선의 파장영역을 적절하게 선택한다면 보다 효율적인 열처리 성능을 얻을 수 있다고 생각된다.

Figure 10은 박막의 표면온도를 시간에 따라 나타낸 것이다. 급속열처리 장치는 Fig. 2에서 볼 수 있듯이 높이가 10 mm 정도로 매우 협소하고 이송장치에 의해 박막이 시간에 따라 이동하기 때문에 실시간으로 박막의 온도를 측정하기가 매우 어렵다. 따라서 본 연구에서는 이론 해석을 통해 측정하기 어려운 박막의 온도를 예측하고 정성적 결과를 통해 최적 열설계에 유용한 데이터를 제공하고자 한다. 앞서 언급한 바와 같이 박막이 복

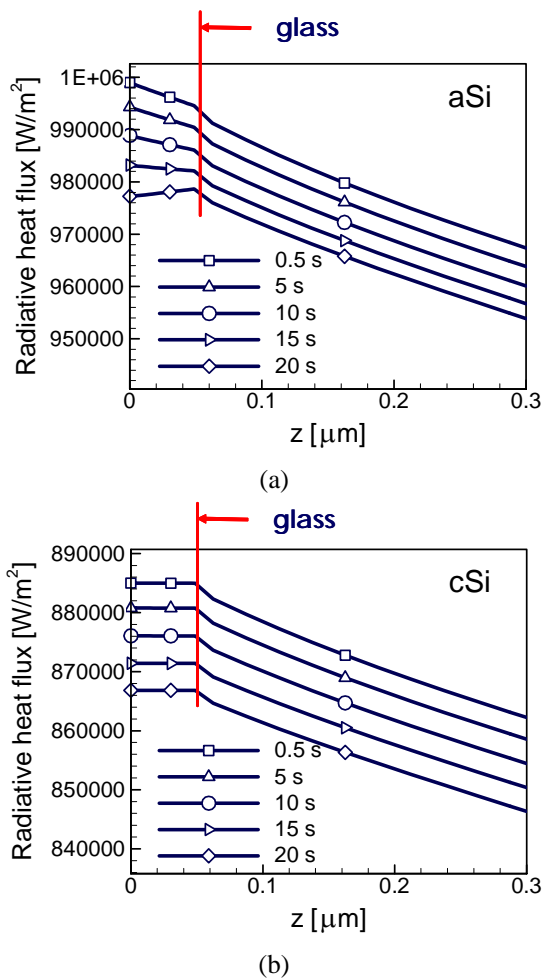


Fig. 9 Radiative heat flux distributions for (a) amorphous and (b) crystal silicon films.

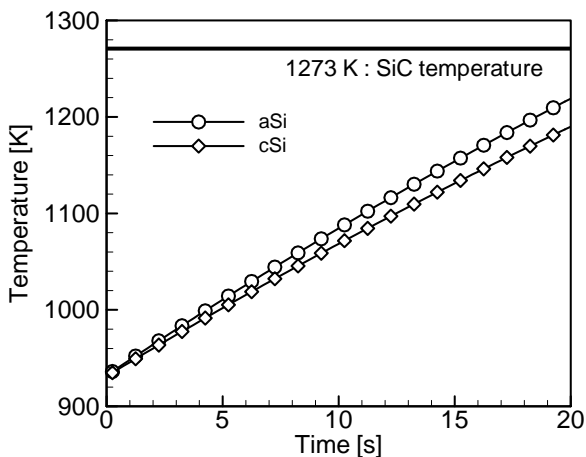


Fig. 10 Edge temperature variation with time.

사에 의해 노출되는 시간은 약 17 s 이다. $t = 17$ s에서의 온도는 무정형 실리콘 박막의 경우 1167 K 인 반면 결정실리콘의 경우는 1143 K 이다. 또한 평균 온도 상승률은 13.8 K/s 으로 나타난다. 이러한 온도차이는 무정형 실리콘 박막내부로 흡수되

는 복사에너지가 결정실리콘에 비해 크기 때문이다.

5. 결 론

본 연구에서 얻은 결론은 다음과 같이 요약된다.

우선 다층 박막 구조의 광학해석을 통해 투과율을 예측하였고 실험에서 얻어진 값과 상호 비교하였다. 결정화가 진행되면서 가시광선 영역에서 투과율의 최대값이 발생하였고 실험에서 얻어진 박막의 결정화 비율을 이론적으로 계산하여 평가하였다. 한편, 본 연구에서는 급속열처리장치내에서의 열전달 특성을 해석하였다. 무정형 실리콘 박막내부로 흡수되는 복사에너지가 결정실리콘과 비교할 때 높게 나타났으며 이것은 파장에 따른 흡수율의 차이 때문이다. 또한 $\text{SiO}_2(\text{glass})$ 내로 흡수되는 복사에너지가 크게 나타나 선택적 가열영역이 존재함을 알 수 있었다. 본 연구에서 선택한 시스템에서 시간에 따른 박막표면의 온도는 1147 ~ 1167 K 정도로 나타났고 온도상승률은 13.8 K/s 로 예측되었다.

후 기

본 연구는 한국과학재단에서 지원하는 마이크로 열시스템 연구센터 연구사업에 의해 수행되었습니다.

참고문헌

- (1) www.viatron.com
- (2) Born, M. and Wolf, W., 1980, *Principles of Optics: Electromagnetic Theory of Propagation, Interference, and Diffraction of Light*, 6th Edition, Cambridge University Press, Cambridge, UK.
- (3) Siegel, R. and Howell, J.R., 1992, *Thermal Radiation Heat Transfer*, Taylor & Francis, Washington, DC.
- (4) Philipp, H.R., 1998, *Handbook of Optical Constants of Solids*, Edited by Palik, E.D., Academic Press, San Diego, pp. 749~764.
- (5) Piller, H., 1998, *Handbook of Optical Constants of Solids*, Edited by Palik, E.D., Academic Press, San Diego, pp. 571~586.
- (6) Edwards, D.F., 1998, *Handbook of Optical Constants of Solids*, Edited by Palik, E.D., Academic Press, San Diego, pp. 547~570.
- (7) Chen, G. and Borca-Tasciuc, T., 1997, "Photon Effect on Radiative Properties of Silicon During Rapid Thermal Processing," *J. Appl. Phys.*, Vol. 82, No. 2, pp. 830~835.