

# 실리콘 태양전지 최적설계에 관한 연구

## A Study on Optimal Design of Silicon Solar Cell

柳鎮洙\* · 文相一\*\* · 金景海\* · Suresh Kumar Dhungel\* · 李準信\*\*\*

(Jin-Su Yoo · Sang-Il Mun · Kyung-Hae Kim · Suresh Kumar Dhungel · Junsin Yi)

**Abstract** - In this work, we used the PC1D simulator for simulation of solar cell and examined the effect of front-back surface recombination velocity, minority carrier diffusion length, junction depth and emitter sheet-resistance. As the effect of base thickness, the efficiency decreased by the increase in series resistance with the increase of the thickness and found decrease in efficiency by decrease of the current as the effect of the recombination. Also, as the effect of base resistivity, the efficiency increased somewhat with the decrease in resistivity, but when the resistivity exceeded certain value, the efficiency decreased as a increase in the recombination ratio. The optimum efficiency was obtained at the resistivity 0.5  $\Omega$ -cm, and thickness 100  $\mu$ m. We have successfully achieved 10.8% and 13.7% efficiency large area(103mm  $\times$  103mm) mono-crystalline silicon solar cells without and with PECVD silicon nitride antireflection coating.

**Key Words** : recombination, minority carrier diffusion length, junction depth, sheet-resistance

### 1. 서 론

태양전지의 사용은 1839년 프랑스의 물리학자 E. Becquerel 가 전해질(electrolyte)속에 담긴 전극에 빛 조사시 발생하는 광전효과 (photovoltaic effect)를 처음으로 발견한 이후 관심을 가지기 시작하여[1], 1954년 D.M. Chapin과 Bell Telephone 연구소 동료들이 5% 효율의 최초의 p-n 접합 실리콘 태양전지 개발을 시작으로 태양전지는 차세대 에너지 자원으로 주목을 받게 되었다[2]. 최근까지 태양전지는 사회 각 분야에서 점차적으로 사용되어 에너지원으로 사용하고 있다. 태양전지 동작원리는 빛 에너지를 흡수, 전하 캐리어(정공, 전자)를 생성, 분리, 수집하여 외부에 전기 에너지를 공급하는 것이다. 태양전지 내부에 서로 다른 극성을 가지는 n-형과 p-형을 접합하면 물이 높은데서 낮은 곳으로 이동하는 것처럼 내부에 생성된 p-n 접합 전위차에 의해서 빛에 의해 생성된 전하가 분리되어 전극으로 수집됨으로 전류를 흐르게 한다. 이것이 태양전지의 p-n 접합에 의한 태양광발전의 원리이다.

현재 저가화, 대량생산화를 이루기 위해서 많은 연구 그룹에서 기계적인 표면 텍스처링(texturing)을 연구하고 있지만 이 방법으로 반사율을 줄이는데 한계가 있으므로 대부분의 고효율 태양전지에는 반사방지막이 필수적으로 적용되고 있다. 최근의 반사방지막은 표면 반사를 줄이기 위한 노력 이외에 표면 보호 역할을 동시에 수행할 수 있는 물질을 찾는

데 주력하고 있다[3-7].

본 논문에서는 고효율 실리콘 태양전지 구조개발을 위해서 PC1D simulator 모의 실험을 통해 특성을 분석하였는데, 전, 후면 재결합속도, 소수 캐리어 확산거리, 접합깊이, 에미터 면저항이 미치는 영향을 조사하였다.

### 2. 실험방법

고효율 태양전지를 제작하려면 태양전지 특성에 영향을 미치는 요소들을 정확히 알아야 하며, 각 요소들이 어떠한 영향을 미치는 지를 이해하는 것이 중요하다. 따라서 본 논문에서는 실리콘 p-n 접합 태양전지의 구조를 이용하여, 각 층의 파라미터가 변환 효율에 어떠한 영향을 미치는가를 조사하였다. 모의 실험에 이용된 프로그램은 IBM PC용으로 호주의 UNSW (University of New South Wales)에서 개발된 PC1D (version 5.0)로서 손쉽게 parameter를 변환시킬 수 있으며, 태양전지의 전류-전압 특성 뿐 아니라 IQE (Internal Quantum Efficiency)까지도 조사가 가능하다.

본 모의 실험의 목적은 쉽게 구할 수 있는 기존의 단결정 기판을 이용한 p-n접합 태양전지의 제작에 있으므로 p층의 비저항을 0.1  $\Omega$ -cm에서 10  $\Omega$ -cm까지 변화시켰으며, 기판의 두께는 20  $\mu$ m에서 750  $\mu$ m까지 변화시켰다. 액체 POCl<sub>3</sub>로부터 기상 확산법을 이용하여 일반적으로 얻을 수 있는 n층 도핑 농도와 접합 깊이를 이용하였으며, 전면 재결합속도는 1000 cm/s를 이용하였다.

$L_n$ (소수 캐리어 확산거리),  $S_r$ (후면 재결합 속도)은 태양전지의 단락전류와 개방전압에 모두 큰 영향을 주는 인자이며, 장파장 영역의 IQE에 역시 큰 영향을 준다.  $L_n$ 은 길수록 좋으며,  $S_r$ 은 느릴수록 좋으나 도달할 수 있는 기술적 한계가

\* 準 會 員 : 成均館大學 情報通信工學部 博士課程

\*\* 準 會 員 : 東陽工業大學 電氣電子通信工學部 教授

\*\*\* 正 會 員 : 成均館大學 情報通信工學部 副教授 · 工博

接受日字 : 2003年 10月 23日

最終完了 : 2004年 2月 21日

존재하므로 이들의 영향을 고려하여 적절한 값을 정하는 것이 필요하다. 본 논문에서는 후면 재결합속도를 100 cm/s, 1000 cm/s, 10000 cm/s로 변화시키면서 이들의 영향을 조사하였다.

후면 전계층은 비교적 낮게 도핑된 p층과 금속 사이에 높게 도핑된 p+층을 형성시켜 소수 캐리어를 반사시킴으로써 후면에서 실효 재결합 속도를 낮추는 효과를 얻을 수 있다. 또한 후면 전계층이 변환효율에 미치는 영향을 조사하기 위하여, 도핑 농도 ( $N_a$ )와 침투 깊이의 영향을 고려하여 최적화하였다. 도핑 농도는  $3 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$  에서  $5 \times 10^{21} \text{ cm}^{-3}$ 까지 변화시켰다.

태양전지의 n층은 개방전압과 단락전류 특히 단파장 영역에서의 IQE에 큰 영향을 주는 곳이므로 매우 신중히 고려되어야 하는 부분이다. 높은 개방전압을 얻기 위해 높은 도핑을 하게 되면 캐리어의 이동도가 감소하며, 과도한 불순물의 도입으로 인해 재결합 속도가 매우 커지므로 캐리어가 수집되지 못하고 모두 재결합되는, 층(dead layer)이 생성된다. 또한 너무 낮게 도핑을 하는 경우, 표면저항이 너무 커지므로 이들에 의한 손실을 작게 하기 위해 finger와 finger 사이의 간격을 줄여야 하나, 그 결과 차광면적의 증가가 불가피하게 된다. 따라서, 적절한 범위에서 에미터층 형성조건을 최적화할 필요가 있다.

최적화 절차를 그림 1에 나타내었다. P층의 최적화를 위하여 사용된 변수는 후면 재결합 속도 ( $S_r$ ), 소수 캐리어 확산 거리 ( $L_n$ )이며, 이들이 변환효율에 미치는 영향을 조사하기 위해 나머지 변수들은 고정하였다. 표 1은 모의 실험에 사용한 파라미터들을 나타낸 것이다. 최적화를 위하여 사용된 변수는 접합 깊이 ( $X_j$ ), 표면저항 ( $R_{\square}$ ), 전면 재결합 속도 ( $S_f$ )이며, 나머지 parameter는 표 1과 같이 고정시켰으며, 후면 재결합 속도는 100 cm/s, 베이스층 확산 거리는 111.9  $\mu\text{m}$ 로 고정했다. 전면 재결합 속도가 100 cm/s, 1000 cm/s, 10000 cm/s인 경우에 대해서 조사하였다.

표 1. 베이스층 모의 실험에 사용된 파라미터  
Table 1. Optimum parameters of base layer

Parameter	Value
Base thickness	300 $\mu\text{m}$
Emitter thickness	0.5 $\mu\text{m}$
Emitter concentration	$8 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$
Base resistivity	0.5 $\Omega\text{-cm}$
Front SRV	Variable
Rear SRV	Variable
Lifetime in base	9.82 $\mu\text{s}$
contact resistance	Ignore

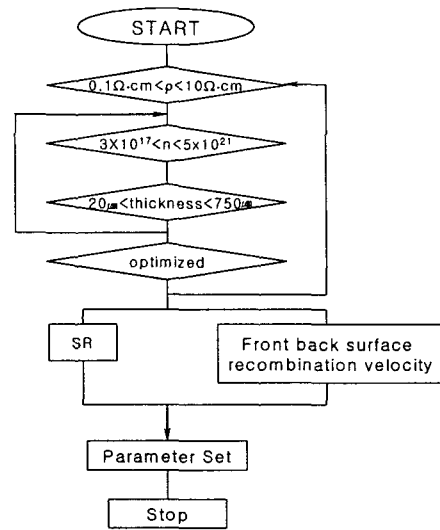
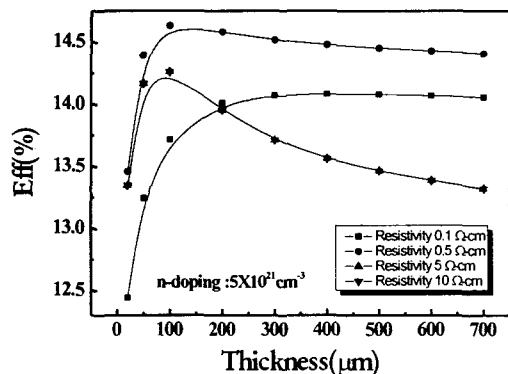


그림 1. PC1D 모의 실험을 통한 다결정 실리콘 태양전지 최적화 순서  
Fig. 1. Optimum procedure of poly-Si solar cell using PC1D

### 3. 실험결과 및 고찰

#### 3.1. 베이스층의 두께에 따른 영향

그림 2은 베이스 층 두께에 따른 태양전지 효율과 내부양자효율의 변화를 나타낸 것이다. 그림에서 보는 바와 같이 두께가 너무 작아지면 오히려 효율이 감소한다. 그 이유는 너무 얇은 경우 장파장 영역에서의 투과에 의해 빛의 양적 손실이 많아지기 때문이다. 또한 너무 얇다보면 충격에 쉽게 부서질 수도 있는 단점을 내포하게 된다. 베이스 비저항이 클 때, 즉 비저항이 10  $\Omega\text{-cm}$ 일 때에는 베이스의 두께가 두꺼워짐에 따라 효율이 감소하는데 직렬저항을 크게 가지기 때문이다. 베이스 비저항이 0.1  $\Omega\text{-cm}$ 일 때는 베이스층의 두께가 두꺼워져도 효율의 변화는 거의 없다. 이는 비저항이 작기 때문에 두께가 두꺼워져도 직렬저항의 변화에 큰 영향을 미치지 못하기 때문이다. 두께가 두꺼워질수록 장파장에서 적은 양자효율을 나타내고 있다. 이는 재결합의 영향으로 전류가 작아지기 때문이다. 모의실험에서 사용된 확산거리(diffusion length)는 111.4  $\mu\text{m}$ 이다. 두께가 100  $\mu\text{m}$ 일 때 가장 높은 전류의 값을 나타내고 있다.



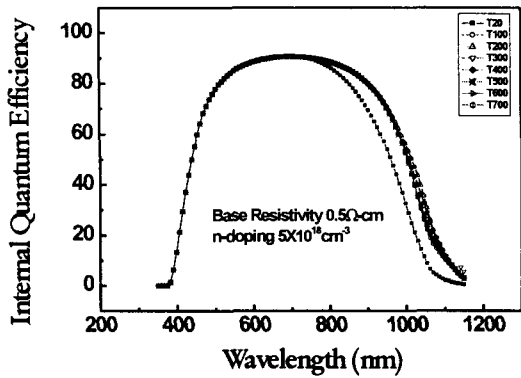


그림 2. 베이스층 두께에 따른 태양전지 효율과 양자효율의 변화  
 Fig. 2. Efficiency and Internal quantum efficiency of the solar cells as a function of different base thickness

3.2. 베이스 비저항에 따른 영향

그림 3는 베이스 비저항에 따른 태양전지의 효율 변화를 나타낸 것으로서, 일반적으로 베이스 비저항이 작아지면 효율이 증가하는 형태를 보이고 있다. 비저항은 도핑농도와 관계되며 비저항이 크다는 것은 도핑농도가 작아지는 것을 의미한다. 따라서, 비저항이 클수록 도핑농도가 작아져 효율이 떨어짐을 볼 수 있다. 그러나 너무 작은 비저항 즉, 지나치게 도핑한 경우 오히려 효율이 감소하는데, 도핑농도가 높아지면 불순물이 많아지고 결국 이것은 생성된 전자-정공쌍이 재결합하기 쉬워짐을 의미한다. 그래서 어느 정도까지는 효율이 증가하지만 그 이상이 되면 재결합 확률이 더 높아져 효율이 감소한다. 실험 결과 베이스 비저항 0.5 Ω-cm, 두께 100 μm 일 때 최대 효율을 갖는 것으로 조사되었다. 이는 모의 실험 시 확산 거리를 111.4 μm로 설정했기 때문에 이와 가장 가까운 두께에서 최대 효율을 나타낸다.

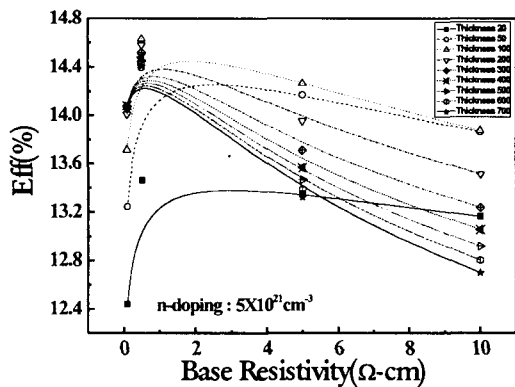


그림 3. 베이스 비저항에 따른 태양 전지 효율 변화  
 Fig. 3. Effect of base Resistivity on the efficiency of solar cell with different base resistivity

그림 4에서 베이스 비저항이 커질수록 개방전압이 떨어짐을 볼 수 있다. 이는 직렬저항이 커지기 때문이다. 그러나 단락전류는 베이스 비저항이 커질수록 커지는데 이는 재결합이 점점 작아지므로 단락전류가 증가됨을 알 수 있다. 또한 베이스 비저항에 따른 내부양자효율 (Internal Quantum Efficiency)은 낮은 비저항에서 작은 값을 보이고 있다. 이는 낮은 비저항에서는 재결합이 증가함으로 낮은 전류의 값을 나타내게 된다.

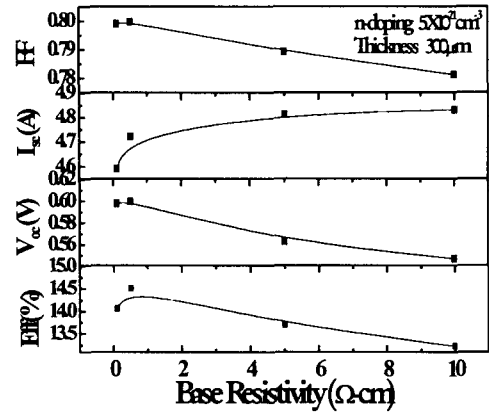


그림 4. 베이스 비저항에 따른 태양전지 특성과 내부양자효율 변화  
 Fig. 4. Cell parameters and internal quantum efficiency as a function of the base resistivity

3.3. 에미터 도핑농도에 따른 영향

그림 5은 에미터 도핑농도에 따른 효율의 변화를 나타내었고, 에미터의 도핑농도가 5×10<sup>19</sup> cm<sup>-3</sup>까지는 효율에 거의 변화가 없음을 볼 수 있다. 따라서 일정 도핑 농도까지는 재결합에 거의 영향을 주지 않음을 알 수 있다. 또한 도핑농도가 높을수록 재결합이 증가하여 효율이 감소함을 알 수 있다.

에미터의 표면저항은 전면 전극을 설계할 때 매우 중요한 요소이므로 이를 이용하여 도핑농도를 변화 시켰으며 이들이 변환 효율에 주는 영향을 그림 5에 나타내었다. 도핑 농도가 높아짐에 따라 에미터층의 캐리어 이동도가 현저히 떨어지고 좋은 IQE를 얻기 위해서는 낮은 표면재결합속도가 필요하며, 이를 달성하지 못할 경우 낮은 도핑 농도와 접합깊이가 필요함을 알 수 있었다.

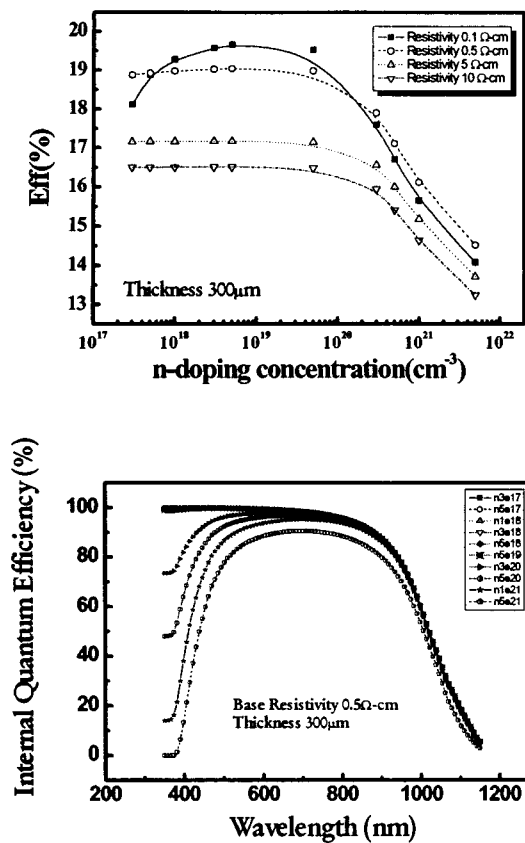


그림 5. 에미터 도핑 농도에 따른 효율과 내부양자효율 변화  
 Fig. 5. Efficiency and Internal quantum efficiency of solar cells as a function of the n-doping concentration

3.4. 표면 재결합 속도에 따른 영향

에미터 층의 특성 중 전지의 효율에 큰 영향을 주는 요소 중 하나는 전면 재결합 속도이다. 그림 6에 전면 재결합이 변환효율에 미치는 영향을 보였다. 내부양자효율 (Internal Quantum Efficiency)은 태양전지가 입사된 포톤의 에너지를 얼마만큼 효과적으로 이용하는가를 평가할 수 있는 매우 중요한 특성이다. 베이스 층은 비교적 낮은 에너지를 가지고 있는 장파장 영역의 IQE 특성에 많은 영향을 주고 있으며 이를 높이는 것은 효율 향상을 위해 필수적이다.

태양전지의 에미터층은 도핑농도와 표면 재결합 속도가 에미터 포화전류에 직접적인 영향을 주므로 개방전압에 상당히 밀접한 관계가 있으며, 단파장 영역에서의 수집효율을 향상시키기 위하여 일반적으로 접합깊이를 짧게 한다. 적절한 에미터의 접합깊이, 도핑농도, 표면 재결합 속도를 결정하기 위해 이들이 변환 효율에 미치는 영향을 조사하였다.

베이스층의 모의 실험과 마찬가지로 베이스층의 두께와 비저항은 고정하였으며, 일반적인 단결정 실리콘의 수소 캐리어 수명이 약 5~10 μs임을 고려하여 확산거리를 111.4 μm로 고정하였다. 후면의 재결합이 에미터층의 모의 실험에 주는 영향을 최소화하기 위하여 재결합 속도는 1000 cm/s로 고정하고 에미터층의 모의 실험을 수행하였다. 그림 6에서 전면 표

면 재결합 속도가 10,000 cm/s 이상인 경우 단파장 영역에서 현저하게 IQE값이 떨어짐을 알 수 있다.

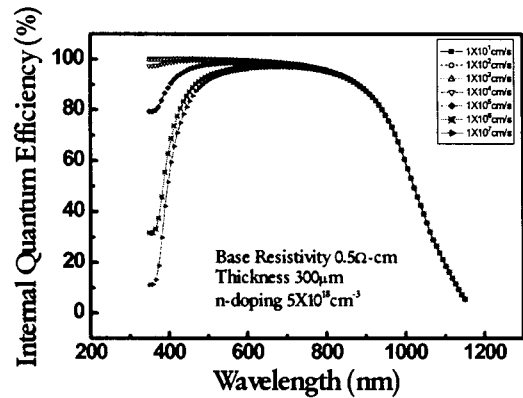


그림 6. 전면 재결합 속도에 따른 내부 양자 효율의 변화  
 Fig. 6. Internal Quantum Efficiency in relation to wavelength with front surface recombination velocity

모의실험 결과를 토대로 SiN<sub>x</sub> SLAR(Single layer anti reflect coating) 층을 적용한 BCSC(buried contact solar cell)를 제조하였다. 50 mW/cm<sup>2</sup>의 입사광을 조사한 후 전류-전압 특성 측정 결과를 그림 7에 나타내었다. SiN<sub>x</sub> SLAR 박막을 적용한 경우, BCSC의 변환 효율은 10.8%에서 13.7%로 증가된다. 특히 여기서 주목할 것은 SiN<sub>x</sub> SLAR 적용에 따라서 태양전지의 효율향상이 전류-전압 특성 곡선인자 (fill factor)에 기인하고 있다는 점이다. 이는 태양전지 전극과 실리콘 기판과의 접촉저항과 표면 재결합을 크게 개선한 수소 패시베이션에 의한 결과이다. 따라서 SLAR SiN<sub>x</sub> coating은 반사 방지막으로서의 역할과 수소에 의한 패시베이션에 의한 효과가 동시에 기여한 것으로 사료된다.

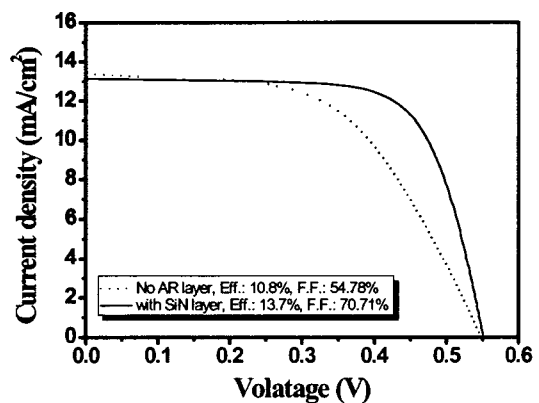


그림 7. SiN<sub>x</sub> SLAR의 적용 전, 후에 대한 BCSC 광 상태 I-V 특성  
 Fig. 7. Light I-V characteristics of BCSC with and without SiN<sub>x</sub> SLAR

4. 결 론

본 연구에서는 태양전지의 모의실험을 위해서 PC1D simulator를 이용하였으며, 전, 후면 재결합속도, 소수 캐리어 확산거리, 접합깊이, 에미터 면저항이 미치는 영향을 조사하였다. 베이스층 두께에 따른 영향으로, 두께가 증가함에 따라 직렬저항의 증가로 효율이 감소하였고, 재결합에 영향을 주어 전류가 작아짐으로 인하여 양자효율이 감소함을 알 수 있었다. 또한 베이스 비저항에 따른 영향으로서, 비저항이 감소할수록 어느 정도까지는 효율이 증가하지만 그 이상이 되면 재결합 확률이 높아져 효율이 오히려 감소하였다. 이때 최대 효율은 베이스 비저항 0.5 Ω-cm, 두께 100 μm 였다. 에미터 도핑농도는 5×10<sup>19</sup> cm<sup>-3</sup>까지는 효율의 변화가 없는 것으로 보아 일정 도핑농도까지는 재결합에 거의 영향을 주지 않음을 알 수 있었고, 도핑 농도가 높을수록 재결합이 증가하여 효율이 감소하였다. 또한 전면 재결합 속도는 10,000 cm/s 이하가 되어야 함을 알 수 있었다. 모의실험 결과를 토대로 SiN<sub>x</sub> SLAR(Single layer anti reflect coating) 층을 적용한 BCSC(buried contact solar cell)를 제조하였다. SiN<sub>x</sub> SLAR 박막을 적용한 경우, BCSC의 변환 효율은 10.8%에서 13.7%로 증가된다.

감사의 글

본 연구는 산업자원부에서 시행한 전력산업 인프라구조 지원 사업의 지원에 의해서 수행된 연구결과 입니다.

참 고 문 헌

[1] D. M. Chapin, C. S. Fuller, and G. L. Pearson, Journal of Applied Physics, 25, pp.676-677, 1954.  
 [2] J. Yi, Ph.D. Dissertation, SUNY at Buffalo, NY, 1994.  
 [3] J. Qian, S. Steegen, E. Vander Poorten, D. Reynaerts and H. Van russel, international Journal of Machine Tools and Manufacture, 42, pp.1657-1664, 2002.  
 [4] Takuya Matsui, Masaharu Tsukiji, Hiroyuki Saika, Toshihiko Toyama and Hiroaki Okamoto, Journal of Non-Crystalline Solids, 299-302, pp.1152-1156, 2002.  
 [5] Fuh-Hsiang Yang, Jih-Shang, Hwang, Kuei-Hsien Chen, Ying-Jay Yang, Tzung-Han Lee, Luu-Gen Hwa and Li-Chyong Chen, Thin Solid Films, 405, pp.94-197, 2002.  
 [6] R. Groenen, J. L. Linden, H. R. M. van Lierop, D. C. Schram, A. D. Kuypers and M. C. M. van de Sanden, Applied Surface Science, 173, pp.40-43. 2001.  
 [7] J. Müller, O. Kluth, S. Wieder, H. Siekmann, G. Schöpe, W. Reetz, O. Vetterl, D. Lundszen, A. Lambert, F. Finger, Solar Energy Materials and Solar Cells, 66, pp.275-281. 2001.

저 자 소 개



유진수(柳鎭洙)

1971년 5월 15일 생. 2000년 성균관대 정보통신공학부 졸업. 2002년 동 대학원 정보통신공학부 졸업(석사). 현재 동 대학원 박사과정  
 Tel : 031-299-6570, Fax : 031-290-7159  
 E-mail : jsyoo@joy.skku.ac.kr



문상일(文相一)

1944년 12월 12일 생. 1971년 한양대학교 전기공학과 졸업. 1984년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 2003년 성균관대 정보통신공학부 졸업(박사). 1980년~현재 동양공업대학 전기전자통신공학부 교수  
 Tel : 02-2610-1777  
 Fax : 02-2610-1854  
 E-mail : simun@faculty.dongyang.ac.kr



김경해(金景海)

1971년 5월 10일 생. 1997년 성균관대 전자공학과 졸업. 1999년 동 대학원 정보통신공학부 졸업(석사). 현재 동대학원 박사과정  
 Tel : 031-299-6570  
 Fax : 031-299-6899  
 E-mail : khkim@joy.skku.ac.kr



Suresh Kumar Dhungel

1966년 2월 2일 생. 1990년 Tribhuwan University(네팔) 물리학과 졸업. 1993년 동대학원 물리학과 졸업(석사). 현재 성균관대학교 정보통신공학부 박사과정  
 Tel : 031-299-6570  
 Fax : 031-290-7159  
 E-mail : suresh@joy.skku.ac.kr



이준신(李準信)

1962년 12월 7일 생. 1989년 성균관대 전기공학과 졸업. 1991년 State University of New York 졸업(석사). 1994년 동대학원 졸업(공학박사). 2000년~현재 성균관대 정보통신공학부 부교수  
 Tel : 031-290-7139  
 Fax : 031-290-7179  
 E-mail : yi@yurim.skku.ac.kr