# 잉곳의 방향성 응고를 위한 주조 로 개발

주진영<sup>1</sup>, 이승준<sup>2</sup>, 백하니<sup>2</sup>, 오훈<sup>3</sup>, 조현섭<sup>4</sup>, 이충훈<sup>1,2\*</sup> <sup>1</sup>원광대학교 차세대방사선산업기술지역혁신센터, <sup>2</sup>원광대학교 반도체디스플레이학부, <sup>3</sup>원광대학교 전가·정보통신공학부, <sup>4</sup>청운대학교 이공대학 전자공학과

## **Development of Casting Furnace for Directional Solidification Ingot**

## Jin-Young Ju<sup>1</sup>, Seung-Jun Lee<sup>2</sup>, Ha-Ni Baek<sup>2</sup>, Hun Oh<sup>3</sup>, Hyun-Seob Cho<sup>4</sup>, and Choong Hun Lee<sup>1,2\*</sup>

<sup>1</sup>Regional Innovation Center Next Generation Industrial Radiation Technology, Wonkwang University <sup>2</sup>Division of Microelectronics and Display Technology, Wonkwang University <sup>3</sup>Division of Electrical and Telecommunications Technology, Wonkwang University <sup>4</sup>Division of Electronic Engineering, Chungwoon University

**요 약** 본 논문은 열 해석 시뮬레이션과 주조로의 구조 변경을 통한 실리콘 잉곳의 방향성 응고에 대한 연구이다. 열 해석 시뮬레이션에 의한 결과, 용용은 유지 시간이 80분일 때 실리콘이 전체적으로 고르게 용용 온도에 도달하였 고 냉각은 상부 냉각 온도가 1,400℃와 60분 냉각 시 가장 좋은 결과 값을 나타내었다. 제작된 웨이퍼가 기존의 상용 웨이퍼보다 결정립계에서의 에칭이 훨씬 적게 이루어졌다. FTIR 측정결과 산소와 탄소 모두 모두 임계값 이하의 불 순물로 존재함을 확인하였다. NAA 분석 결과 총 18가지 금속 불순물이 검출 되었지만, 농도 분포는 같은 위치에서 위와 아래의 차이는 크게 나지 않고, 어떤 특정한 위치에서 한쪽으로 집중되거나 어떤 경향성 없이 전체의 샘플의 모 든 부분에서 농도가 거의 일정하게 분포를 나타냈다.

Abstract This paper is the study for the directional solidification of the ingot through the thermal analysis simulation and structural change of casting furnace. With the results of thermal analysis simulation, the silicon as a whole has reached the melting temperature as the retention time 80 min. The best cooling conditions showed at the upper cooling temperature 1,400°C and cooling time 60min. The fabricated wafers showed the superior etching result at the grain boundary than that of existing commercial wafers. The FTIR measurements of oxygen and carbon impurities were not in the critical value for solar conversion efficiency. The NAA analysis of metal impurities were also detected the total number of 18 different metals, but the concentration distribution showed no significant positional deviations in the same position from the top to the bottom.

Key Words : Directional Solidification, Ingot, Casting Furnac, FTIR, NAA

## 1. 서 론

고유가와 환경 문제가 대두됨에 따라 새로운 대체 에 너지원으로 태양광에 대해 큰 관심을 가져 왔으며, 선진 국들의 집중적인 투자와 보급으로 전 세계적으로 태양전 지 시장이 21세기 들어 매년 최소 30% 이상의 급신장세

본 논문은 원광대학교의 2009년도 지원에 의해 수행되었음. \*교신저자 : 이충훈(chlee@wku.ac.kr) 접수일 12년 01월 10일 수정일 12년 01월 20일 로 매우 빠르게 성장되고 있다[1].

이러한 성장과 더불어 태양전지 연구가 활발하게 진행 되고 있으며, 실리콘 태양전지는 크게 단결정, 다결정과 비정질 실리콘 태양전지로 나눌 수 있다. 단결정 실리콘 태양전지는 순도가 높고 결정 결함이 적어 고효율의 태 양전지를 제조할 수 있으나 비용이 높고, 다결정 실리콘

게재확정일 12년 02월 10일

태양전지는 상대적으로 낮은 변환효율을 갖지만 저비용 으로 생산이 가능하다. 비정질 실리콘 태양전지는 박막형 으로 가격이 낮은 장점이 있지만, 변화효율이 낮고 빛 조 사에 의한 광 열화 현상이 발생하는 문제점을 나타내고 있다[2].

경제적인 면에서 이점이 많은 다결정 실리콘 태양전지 가 현재 상용화 되고 있는 실리콘 태양전지의 60% 이상 을 이루고 있다. 다결정 실리콘 잉곳의 제작 방법으로 Silso법, HEM(Heat Exchanger Method)법, Bridgman법, 도가니 피복법, Polxy법과 EMC(Electromagnetic Casting) 법 등이 있다[2-5]. 현재 쓰이고 있는 여러 제조 방법들은 용융로의 구조적인 문제로 냉각할 때 측면의 열적 차페 가 제대로 이루어지지 않아 측면을 따라 결정이 형성되 어 방향성 응고를 실시함에 있어 결정 성장 방향의 제어 가 힘든 단점이 있다. 또한 최근 들어 웨이퍼의 두께가 점점 얇아짐에 따라 공정 진행 중 결정립계를 따라서 깨 짐 현상이 발생하고 있다. 이러한 실리콘 웨이퍼의 품질 저해 주요 원인 중 하나로 작용하는 결정 결함의 발생을 최소로 하면서 생산이 저비용이면서, 변환효율을 높이고, 대량의 잉곳의 제작을 위하여 방향성 응고에 대한 연구 가 많이 진행되고 있다[6-9].

본 논문에서는 현재 사용되고 있는 방향성 응고법의 문제점을 보완하기 위하여 내부 열전달 및 유동 특성에 대한 열 해석을 통하여 용기 측면부가 용융 시에는 열에 노출되고, 응고 시에는 열이 차단되어 방향성 응고가 될 수 있는 독립적인 주조로를 제작하였다. 제작된 주조로로 생산된 잉곳의 분석을 통하여 방향성 응고에 대한 새로 운 방향을 제시하고자 한다.

## 2. 실험 방법

#### 2.1 열 해석 시뮬레이션

#### 2.1.1 시뮬레이션 조건

실리콘 원료의 용용과 냉각시간을 최적화하고 용용된 실리콘의 냉각에 따른 온도의 경사가 수평방향으로는 발 생하지 않고 수직방향으로만 일정하게 유지되도록 하여 일정한 결정 성장 방향과 결정 내 불순물 농도 분포를 균 일하게 하기 위하여 시뮬레이션을 실시하였다.

다결정 실리콘 잉곳의 열전달 해석을 위하여 시뮬레이 션 프로그램인 Autodesk사의 ALGOR 프로그램을 이용하 였다. 분석 타입으로는 transient heat transfer analysis 타 입으로 하고 메쉬 타입을 quadrilateral과 triangular 함께 존재하는 혼합 타입을 적용하고 한 변의 길이를 5mm를 적용하였다. 각각 석영 도가니, 흑연 내벽, 냉각 플레이트 부로 나누었다. 적용된 각 재료의 물성 값을 표 1에 나타 내었다.

상부 히터의 영향을 받는 부분은 quartz crucible과 graphite wall로 설정하고, 하부히터의 영향을 받는 부분 은 cooling plate를 설정하였으며 hot zone의 내부 구조도 는 그림 1에 나타내었다.

[표 1] 재료의 물성 값 [Table 1] Value of material properties

	Density [ <sup>kg/m<sup>s</sup>]</sup>	Thermal conductivity [W/m·K]	Specific heat [J/kg·K]
Quartz	2,200	1.32	670
Si	2,329	131	700
Graphite (IG-70)	1,830	130	710
Ar	1.67	0.0163	523



[그림 1] Hot Zone의 내부구조 [Fig. 1] The interior structure of hot zone

#### 2.1.2 용융 시 열적 거동 해석 조건

용용 해석의 경우 상·하부 히터에서 방사되는 열로 실리콘의 온도 분포 해석을 시도하였으며, 가열 조건을 표면에 직접적으로 적용하였다. 고체와 액체 사이의 열방 사는 없는 것으로 가정하였고, 다음과 같이 두 가지 조건 으로 시뮬레이션을 행하였다.

#### (1) 용융 해석 조건-1

총 해석시간은 300분으로 승온 속도는 5.3℃/min를 적 용하였다. 실리콘 부와 석영 도가니, 흑연 내벽(상부히 터), 냉각 플레이트(하부히터)의 초기온도 25 ℃로 설정 하고, 300분 동안 1,600℃까지 선형적으로 증가하였다.

#### (2) 용융 해석 조건-2

총 해석시간은 330분으로 160분의 가열 구간과 170분 동안 온도 유지구간으로 구분하였다. 실리콘 부, 석영 도 가니, 흑연 내벽, 냉각 플레이트의 초기 온도는 25℃를 적용하였다. 석영 도가니, 흑연 내벽은 160분 동안 1,50 0℃까지 선형적으로 증가시키고, 냉각 플레이트는 160분 동안 1,550℃까지 선형적으로 증가시킨 후 모두 330분까 지 유지하였다.

#### 2.1.3 응고 시 열적 거동 해석 조건

응고 해석은 용용해석 결과를 바탕으로 각 부의 초기 온도조건을 실리콘은 1,420℃, 그 외의 부는 1,500℃를 적용하였다. 응고의 시작은 하부에서 상부방향으로 진행 이 되며, 이상적인 냉각속도는 최소 0.5mm/min부터 최대 2mm/min로 제한하였다.

총 해석시간은 440분을 적용하였으며, 실리콘 부의 온 도는 용용된 상태의 온도인 1,420℃로 설정하였다. 냉각 플레이트는 초기온도 1,500℃에서 60분 동안 1,300℃로 냉각 후 380분 동안 1,200℃로 냉각하였다. 석영 도가니 와 흑연 내벽은 초기온도 1,500℃로 440분 동안 같은 온 도로 유지하는 조건과 석영 도가니와 흑연 내벽은 초기 온도 1,500℃로 380분 동안 유지한 후 60분 동안 1,400℃ 로 냉각하는 조건 총 2가지 조건으로 시뮬레이션을 시행 하였다.

#### 2.2 Pilot plant 및 잉곳 제작 실험

#### 2.2.1 Pilot plant

시뮬레이션 결과를 토대로 하여 제작된 Pilot plant의 기본 사양은 표 2에, 제작된 Pilot plant의 개략적인 구조 는 그림 2에 나타내었다.

최대 사용온도가 1,600℃이면, 단열재 외벽온도를 30 0℃미만으로 볼 때, 단열재의 두께는 60mm로 설계하였 다. 히터의 용량은 전체 주조로 재료의 열량과 방산열량 을 고려하여 설계하였다.

[표 2] Pilot plant의 기본 사양 [Table 2] Basic specification of Pilot plant

구분	사양	
사용온도	<b>Мах. 1,600</b> °С	
Silicon 정제량	150kg	
Carbon Mould	□ 580×400H mm	
분위기	Ar	
진공 챔버	2중 수냉벽 구조	
발열체	Carbon Rod Heater(150kW)	



[그림 2] Pilot plant의 구조 [Fig. 2] Frame of pilot plant

#### 2.2.2 Pilot plant

제작된 pilot plant을 이용하여 실제 잉곳 제작 실험을 사용된 다결정 실리콘 덩어리는 순도 99.9%(3N)를 사용 하였다. quartz 도가니는 [ 215×300mm를 이용하였고, 다음 두 가지 조건으로 제작하였다.

#### (1) 잉곳 제작 실험 조건-1

상, 하부 Hot-Zone의 온도 Profile은 그림 3(a)에 나타 내었다. 진공도를 5×10<sup>-2</sup>Torr이하의 상태가 이루어졌을 때 배기 후 500L/min 유량계를 이용하여 아르곤 가스를 유입시켰다. 챔버 압력이 상압이상 도달하면 상부 Hot-Zone에 유입되는 아르곤 가스를 Mass Flow Controller를 이용하여 5L/min로 유량계를 이용하여 챔버 내부를 아르곤 가스 분위기로 유지시켰다.

#### (2) 잉곳 제작 실험 조건-2

도가니의 측면부 열손실을 보충하기 위해 그림 1의 Hot Zone 모식도에서 설명한 흑연 내벽을 흑연 단열재를 이용하여 냉각 플레이트에서 50mm 높게 설치하였다. 온 도 Profile은 그림 3(b)에 나타내었다. 잉곳 제작 과정에서 도가니의 온도변화를 관찰하기 위하여 thermocouple을 설치하였다.





[그림 3] 온도 제어 스케쥴 [Fig. 3] Schedule of controlled temperature

#### 2.3 특성 분석

제작된 잉곳의 특성 평가를 위해 잉곳을 5mm 두께로 수평방향으로 wire sawing을 하였고, 그 과정은 그림 4에 나타내었다. 이렇게 제작된 웨이퍼 중 하나를 선택하여 미세조직을 관찰하기 위해 KOH 용액을 이용하여 20분 과 30분 etching을 진행하였고, 주사전자현미경(FE-SEM) 을 이용하여 미세조직을 타사 제품과 비교 관찰하였다 [10]. 또한 웨이퍼의 탄소와 산소의 정성 및 정량 분석을 통한 웨이퍼의 품질을 측정하기 위하여 적외선 흡광분석 기(FTIR)을 이용하였고, 잉곳 내의 모든 금속 불순물 정 량 분석을 위하여 NAA(Neutron Activation Analysis)를 이용하여 금속 불순물의 정량을 측정하였다[11].



### 3. 실험 결과 및 고찰

#### 3.1 열 해석 시뮬레이션

용융 해석 조건-1의 결과는 실리콘의 온도 분포는 Max. 1,324℃, Min. 1,315℃로 9℃정도의 온도편차를 보 이고 있으며, 상부와 하부는 대략 7℃의 온도 편차를 나 타내었고, 실리콘의 용융점인 1,414 ℃까지 이르지 못하 였다.

그림 5에 나타나듯이 용융 해석 조건-2의 결과는 승온 완료 후 유지 시간이 60분일 때 실리콘 온도분포는 Max. 1,367℃, Min. 1,363℃로서 10℃의 온도 편차를 보이고, 실리콘 잉곳의 온도가 전체적으로 용융 온도에 도달하지 못하였다.

유지 시간이 80분일 때의 온도 분포는 Max. 1,416℃, Min. 1,414℃로서 2℃의 온도 편차를 보이고, 실리콘이 전체적으로 고르게 용용 온도에 도달하였다.

유지 시간이 120분일 때 Si 온도분포는 Max. 1,468℃, Min. 1,467℃ 로서 1℃의 온도 편차를 보이며, 고른 용용 상태임을 알 수 있지만 실리콘의 용용온도가 필요 이상 으로 과승온 되었음을 나타내고 있다. 이를 통해 Si의 용 용이 완전히 이루어지기 위해서는 용용온도까지 승온 완 료 후 최소 80분 이상의 유지시간을 확보해야 함을 알 수 있었다.



(a) 승온 시간 160분 경과 후



(b) 승온 완료 후 60분 온도 유지





1467.419

[그림 5] 용용 해석 조건-2 [Fig. 5] Melting analysis of condition-2

석영 도가니와 흑연 내벽은 초기온도 1,500℃로 440분 동안 같은 온도로 유지하는 조건의 결과는 실리콘 잉곳 하부가 80분 이후부터 냉각이 진행됨을 알 수 있다. 해석 완료 후 실리콘 온도 분포는 Max. 1,355℃, Min. 1,349℃ 로 6℃의 온도 편차를 보이고, 실리콘 상부와 하부의 온 도 편차는 6℃를 보였다.

석영 도가니와 흑연 내벽은 초기온도 1,500℃로 380분 동안 유지한 후 60분 동안 1,400℃로 냉각하는 조건의 결 과는 그림 6에 나타나듯이 상부 냉각 온도와 시간을 찾은 결과 최종 1,400℃로 60분 냉각 시 가장 좋은 결과 값을 나타내었다. 상부 냉각을 적용하기 전 silicon의 온도분포 는 Max. 1,361℃, Min. 1,355℃로 6℃의 온도편차를 보였 다. 해석 완료 시간인 440분 후 si의 온도분포는 Max. 1,348℃, Min. 1,343℃로 5℃의 온도 편차를 보이고, 실리 콘 상부와 하부의 온도 편차는 약 5.5℃를 나타내었다. 실리콘 상부의 온도가 1,350℃에 근접했고 440분 동안 응고 완료가 된 것으로 나타났다.





(b) 해석시간 440분 경과

[그림 6] 응고 해석 [Fig. 6] Analysis of Solidification

#### 3.2 잉곳 제작 및 결과

잉곳 제작 실험 조건-1의 결과를 살펴보면 석영 도가 니와 다결정 실리콘이 융착되어 제대로 잉곳과의 분리가 이루어지지 않았다. 다결정 실리콘에 포함되어 있던 불순 물은 응고가 진행되는 과정에서 고상에서 액상으로 배출 되면서 마지막에 잉곳의 상부에서 응고되었음을 알 수 있었다. 잉곳의 측면을 살펴본 결과 여러 곳에서 크랙에 의한 파손을 관찰할 수 있었다. 이는 액상에서 고상으로 의 응고과정에서 급격한 밀도 변화가 일어났기 때문으로 사료되다.

이곳 제작 실험 조건-2로 제작된 다결정 실리콘 이곳 의 외관은 그림 7에 나타내었고, 이곳은 석영 도가니와의 융착없이 쉽게 분리되었다. 또한, 이곳의 상부사진을 보 면 불순물 층이 이곳 제작 실험 조건-1과는 달리 이곳 상 부 전체에 비교적 고르게 분포된 결과를 나타내었고, 측 면과 바닥면에는 다수의 기공들이 관찰되었다. 석영 도가 니의 높이에 다른 온도변화를 측정한 결과 온도 스케쥴 과 동일한 거동을 하고 있음을 나타내었다.



 (a) 상부
 (b)측면
 (c)하부

 [그림 7] 제작된 잉곳 사진

 [Fig. 7] Photography of manufactured ingot

잉곳 제작 실험 조건-2로 제작된 잉곳의 특성 평가를 위해 그림 4와 같이 sawing한 웨이퍼를 에칭 시간에 따른 미세구조를 FE-SEM으로 관찰한 결과는 그림 8에 나타내 었다.



분석 결과 웨이퍼 표면의 이미지에 나타나듯이 새로운 장비를 이용하여 제작한 웨이퍼가 기존의 상용 웨이퍼보 다 결정립계에서의 에칭이 훨씬 적게 이루어졌음을 확인 하였다. 이를 통하여 결정립계에서의 결함 농도가 적어 결정립계에서의 carrier trap이 작아 효율이 증가하고, carrie life time에도 영향을 줄 것으로 사료된다.

산소의 경우 웨이퍼 공정 과정 중, 공기 중의 입자나 실리콘 용탕이 담긴 석영에서 용해되어 나와 실리콘 용 탕으로 이동하여 실리콘 결정 안에 침입형으로 존재하고, 탄소의 경우 공기 중의 입자, 내부 열선, 로 부품으로부터 유입되어 실리콘 자리에 탄소가 대신 자리 잡아 치환형 으로 존재하게 된다. 그 밖의 오염원으로 존재하는 금속 의 경우 로 부품이나 실리콘 내에 존재하는 불순물로부 터 공급된다. 이들 오염원의 존재는 MCLT(Minority Carrier Life Time)에 영향을 끼쳐 웨이퍼의 품질에 영향 을 미친다.

FTIR 측정결과를 이용하여 웨이퍼의 탄소(Carbon)와 산소(Oxide)의 정성, 정량 분석하여 웨이퍼의 품질을 측 정한 결과는 그림 9에 나타내었다. 21번 시편의 분석결과 Top-1의 경우는 산소 피크인 1,107cm<sup>-1</sup>지점에서 피크가 관찰되지 않았고, 탄소 피크인 607cm<sup>-1</sup> 지점에 피크가 있 어 탄소가 미량 존재한다고 할 수 있다. Top-2는 산소 피 크가 존재하지 않고, 탄소 피크도 거의 관찰되지 않았다. Bottom-1은 산소 피크가 존재하지 않고, 탄소 피크도 나 타나지 않는 것으로 관찰되었다. Bottom-2의 경우는 산 소 피크와 탄소 피크가 임계값 이하로 미량 측정이 되었다.

금속 불순물 농도도 어느 일정한 한계치 이상으로 존 재하게 되면 태양전지의 효율에 영향을 미치게 되는데 각각의 원소마다 그 한계치가 큰 차이를 보이고 이들이 동시에 존재할 경우에는 서로 보강효과나 상쇄효과를 나 타낼 수도 있기 때문에 이 수치가 절대적인 기준이라고 할 수는 없다. 그러나 불순물의 농도와 분포 등을 고려하 여 어느 정도 예상은 가능하다.



[그림 9] FTIR 분석 [Fig. 9] Analysis of FTIR

잉곳 내의 모든 금속 불순물 정량 분석을 위하여 NAA(Neutron Activation Analysis)를 이용하여 금속 불순 물의 정량을 측정한 결과는 그림 10에 나타내었다. 분석 결과 총 18가지 금속 불순물이 검출 되었다. 제 작된 잉곳은 낮은 순도의 원재료(3N)를 사용하여 경향성 확인을 위한 시험 제작으로 불순물의 농도가 임계값 이 상이 검출되었다. 그러나 금속 불순물의 농도 분포는 같 은 위치에서 top-1 ~ bottom-2의 차이는 크게 나지 않고, 어떤 특정한 위치에서 한쪽으로 집중되거나 어떤 경향성 없이 샘플의 1번부터 21번까지 모든 부분에서 농도가 거 의 일정하게 분포되어있음을 확인하였다. 이로 불순물의 농도 분포에 따른 앞으로 실제 잉곳을 제작함에 있어 고 순도의 원재료를 사용하여 불순물들의 농도제어가 이루 어진다면 실제 태양전지의 제작에 적용될 수 있을 것으 로 예상한다.



[그림 10] 각 Sample의 NAA 분석 [Fig. 10] NAA analysis for each sample

4. 결 론

현재 사용되고 있는 방향성 응고법의 문제점을 보완하 기 위하여 내부 열전달 및 유동 특성에 대한 열 해석을 통하여 용기 측면부가 용융 시에는 열에 노출되고, 응고 시에는 열이 차단되어 방향성 응고가 될 수 있는 독립적 인 주조 로를 제작하고, 제작된 주조 로로 생산된 잉곳의 분석을 통하여 방향성 응고에 대한 연구 결과는 다음과 같다.

- 열 해석 시뮬레이션에 의한 결과 용용은 유지 시간 이 80분일 때의 온도 분포는 Max. 1,416℃, Min.
   1,414℃로서 2℃의 온도 편차를 보이고, 실리콘이 전체적으로 고르게 용용 온도에 도달하였고, 냉각 은 상부 냉각 온도가 1,400℃와 60분 냉각 시 가장 좋은 결과 값을 나타내었다.
- 2) 제작된 웨이퍼 표면의 이미지 분석 결과 새로운 장 비를 이용하여 제작한 웨이퍼가 기존의 상용 웨이 퍼보다 결정립계에서의 에칭이 훨씬 적게 이루어졌 음을 나타내었다. 이결과로부터

- 3) FTIR 측정결과를 이용하여 웨이퍼의 탄소(Carbon) 와 산소(Oxide)의 정성, 정량 분석하여 웨이퍼의 품 질을 측정한 결과 산소와 탄소 모두 임계값 이하의 불순물로 존재하였다.
- 4) NAA 분석 결과 총 18가지 금속 불순물이 검출 되 었지만, 농도 분포는 같은 위치에서 top-1 ~ bottom-2의 차이는 크게 나지 않고, 어떤 특정한 위 치에서 한쪽으로 집중되거나 어떤 경향성 없이 샘 플의 1번부터 21번까지 모든 부분에서 농도가 거의 일정하게 분포되어있음을 확인하였다.

이러한 결과를 바탕으로 볼 때 순도가 높은 실리콘 원 재료를 이용하여 불순물 농도를 제어하고 웨이퍼로 가공 한 후, dopant를 첨가하여 carrier life time 측정을 통하여 태양전지의 변환 효율을 예상하고 실제 태양전지 셀을 제작함으로써 앞으로 더 나은 기술을 발전시킬 수 있을 것이라 생각한다.

#### References

- Ministry of Knowledge Economy, Korea Energy Management Corporation New & Renewable Energy, 2010 New & Renewable Energy, Ministry of Knowledge Economy, 2010
- [2] D. L. Staeble and C. R. Wronsi, Recersible conductivity changes in discharge-produced amorphous Si J. Appl. Phys. Lett., vol. 31, 292-294, 1977
- [3] Lee Jun Shin, Kim Gyeong hae, Solar Cell Engineering, Green book publishing, 96-100, 2007
- [4] KHATTAK. C. P., SCHMID. F., Photovoltaic Solar Energy Conference, 2nd, Berlin, West Germany; Netherlands; 23-26 Apr., 106-113. 1979
- [5] Th. J. Berben and D. J. Perduijin, Composition Controlled Bridgman Growth of Mn-Zn Ferrite Single Crystal, Proceedings of the ICF3, Edited by H Watanabe, S. Iida and M. Sugimoto, Center for Academic Publication, 722- 725 in Ferrites, 1981
- [6] J.W. Shur, B.K. Kang, S.J. Moon, W.W. So, D.H. Yoon, Growth of multi-crystalline silicon ingot by improved directional solidification process based on numerical simulation, Solar Energy Materials & Solar Cells, 95, 3159-3164, 2011
- [7] Dae il Kim, Young Kwan Kim, Characteristics of structural defects in the 240kg silicon ingot grown by directional solidification process, Solar Energy Materials & Solar Cells, 90, 1666-1672, 2006

- [8] D. Franke, T. Rettelbach, C. Häßler, W. Koch, A. Müler, Silicon ingot casting: process development by numerical simulations, Solar Energy Materials & Solar Cells, 72, 83-92, 2002
- [9] Jiuan Wei, Hui Zhang, Lili Zheng, Chenlei Wang, Bo Zhao, Modeling and improvement of silicon ingot directional solidification for industrial production systems, Solar Energy Materials & Solar Cells, 93, 1531-1539, 2009
- [10] Nam-ihn Cho, Inho Chon, solutions, "Anisotropic etching characteristics of single crystal silicon by KOH and KOH-IPA" Journal of the Korean Vacuum Society, 11(4), 249-255, 2002
- [11] A. A. Istratova and T. Buonassisi, R. J. McDonald and A. R. Smith, R. Schindler, J. A. Rand, J. P. Kalejs, and E. R. Weber, Metal content of multicrystalline silicon for solar cells and its impact on minority carrier diffusion length, Journal of Applied Physics 94(10), 6552-6559, 2003

## 주 진 영(Jin-Young Ju)

[정회원]



- 1999년 2월 : 원광대학교 대학원 전기공학과(공학석사)
- 2002년 2월 : 원광대학교 대학원 전기공학과(공학박사)
- 2002년 2월 ~ 2005년 4월 : 한 보니스코 기술연구소
- 2007년 1월 ~ 2011년 2월 : 발 산공업 연구개발부 선임연구원
- 2011년 10월 ~ 현재 : 원광대학교 차세대방사선산업기 술지역혁신센터 실장

<관심분야> 전기전자, 반도체소자/시스템, 에너지/자원

## 이 승 준(Seung-Jun Lee) [준회원]



2010년 2월 : 전남대학교 신소재 공학부 세라믹재료전공(공학사)
2010년 3월 ~ 현재 : 원광대학 교 일반대학원 반도체·디스플레 이학부(석사과정)

<관심분야> 전기전자, 반도체소자/시스템, 에너지/자원

## 백하니(Ha-Ni Baek)

#### [준회원]

[정회원]



- 2010년 8월 : 원광대학교 전기전
   자 및 정보공학부(공학사)
- 2011년 3월 ~ 현재 : 원광대학
   교 일반대학원 반도체·디스플레
   이학부(석사과정)

<관심분야> 전기전자, 반도체소자/시스템, 에너지/자원

## 오 훈(Hun Oh)



- 1993년 2월 : 원광대학교 대학원 전기공학과(공학석사)
- 1997년 2월 : 원광대학교 대학원 전기공학과(공학박사)
- 2011년 10월 ~ 현재 : 원광대학 교 전기·정보통신공학부 교수

<관심분야> 전기전자, 공장자동화, 전기기계

### 조 현 섭(Hyun-Seob Cho)

[종신회원]



- 1992년 2월 : 원광대학교 대학원 전기공학과(공학석사)
- 1996년 2월 : 원광대학교 대학원 전기공학과(공학박사)
- 1996년 1월 ~ 1997년 1월 : Department of Electrical and Computer Engineering, University of California Irvine(UCI) 연구원
- 1998년 1월 ~ 현재 : 한국전력기술인협회 고급감리원 (전력감리)
- 1998년 10월 ~ 현재 : 중소기업청 기술경쟁력 평가위원
- 1997년 3월 ~ 현재 : 청운대학교 교수

<관심분야> 전기공학, 공장자동화, 응용전자

## 이 충 훈(Choong-Hun Lee)

[정회원]



- 1986년 2월 : 한국과학기술원 반 도체물리(이학석사)
- 1991년 2월 : 한국과학기술원 반 도체물리(이학박사)
- 1984년 1월 ~ 1994년 8월 : 현 대전자 반도체연구소 책임연구 원
- 1997년 1월 ~ 1997년 12월 : 현 대전자 부품 소재부분 LCD 연 구소 소장
- 1997년 12월 ~ 2000년 6월 : 현대전자 정보 디스플레
   이 선행 연구소 소장
- 2002년 1월 ~ 2003년 12월 : 나노종합Fab.센터 구축 사업 전문위원
- 2004년 1월 ~ 2006년 12월 : 전북나노기술직접센터 전문위원
- 1994년 9월 ~ 현재 : 원광대학교 반도체·디스플레이학 부 교수
- 2006년 3월 ~ 현재 : 차세대 방사선 산업기술 지역혁 신센터 센터장

<관심분야> 반도체소자/시스템, 에너지/자원, 전기전자