

# 메디치 프로그램을 이용한 실리콘 솔라셀의 ARC 두께에 따른 전기적 특성 해석

김재규<sup>1</sup>, 김지만<sup>2</sup>, 송한정<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup>인제대학교 나노공학부, <sup>2</sup>인제대학교 나노시스템공학과

## Analysis of Electrical Characteristics of Silicon Solar cell according to the ARC thickness using Medici Program

Jae-Gyu Kim<sup>1</sup>, Ji-Man Kim<sup>2</sup> and Han-Jung Song<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup>Department of Nano Eng., Inje University

<sup>2</sup>Department of Nano Systems Eng., Center for Nano Manufacturing

**요약** 본 논문에서는 메디치 프로그램을 사용하여 반사방지막(ARC : anti reflectance coating) 두께에 따라 실리콘 솔라셀의 전기적 특성분석을 보여준다. ITO 투명전극으로 이루어지는 ARC를 이용한 실리콘 솔라셀의 메쉬구조를 구축하고 ARC 두께에 따른 특성해석 모델링을 실시하였다. ARC 산화층의 두께가 30 nm, 60 nm, 90 nm일 때 입사광의 파장에 따른 외부 수집 효율성, 투과율, Isc, Voc, I-V 특성 변화 등을 구하였다. 시뮬레이션 결과 60 nm의 반사방지막 두께에서 최대전력 22 mW/cm<sup>2</sup>, 0.83의 곡선 인자를 보였다.

**Abstract** This paper shows electrical analysis of the silicon solar cell according to the various ARC thickness using Medici program. we built a mesh structure of the solar cell that use ARC consisting of ITO(Indium-Tin-Oxide) transparent electrode, for the Medici modeling. About various oxide layer thickness of the ARC for 30 nm, 60 nm, 90 nm, changes of the I-V curve, Isc, Voc, transmittance and external collection efficiency performed according to wavelength of Incident ray.

Simulation results show maximum power 22 mW/cm<sup>2</sup>, fill factor 0.83 in condition of 60 nm ITO thickness.

**Key Words** : ARC, Wavelength, Medici, transmittance, External collection efficiency

### 1. 서론

청정에너지의 대표적인 솔라셀은 제조기술의 발달과 더불어 여러 가지 형태의 고효율 솔라셀 구현이 가능해지면서, 그 활용가능성이 갈수록 증대하고 있다. 이러한 고효율의 태양전지를 만들기 위해서는 최대한 많은 빛을 흡수 할 수 이것이 중요하다. 빛의 반사를 줄이는 방법으로 Texturing, Anti reflectance coating, 정교한 pn접합 등이 있다. Texturing 기술로는 전체 입사된 빛의 약 10%정도로 반사를 줄일 수 있으며,[1,2] Anti reflectance coating

으로 표면 반사를 줄이기 위해서는 반도체 표면에 투명하고, 굴절률이 반도체와 공기의 사이 값을 갖는 박막 층을 적당한 두께로 만들어 주며, 이때 박막 층을 반사방지막이라고 한다. 특히 유리나 금속판재와 같은 저가의 기판에 박막재료를 코팅하여 제조하는 박막(셀)형 태양전지는 대면적 양산화를 통한 저가격화 실현이 가능한 차세대 태양전지로 업계의 많은 관심을 끌고 있다.[3] 본 논문에서는 광 투과성 도전박막으로 가시광선에서의 투과성이 높으며 전기전도도 또한 높은 ITO를 반사 방지막으로 사용하였다. 그리고 이 박막을 사용하여 전기 에너지

본 논문은 IDEC(IC Design Education Center)의 지원으로 이루어졌음.

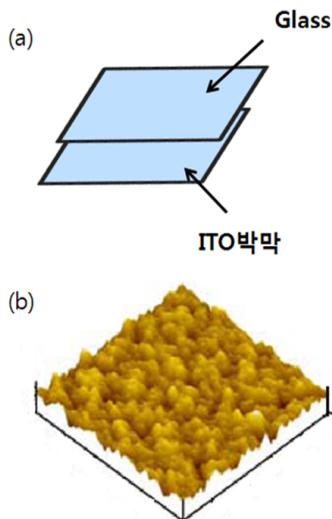
\*교신저자 : 송한정(hjsong@inje.ac.kr)

접수일 10년 06월 07일 수정일 (1차 10년 08월 06일, 2차 10년 08월 17일, 3차 10년 10월 04일) 게재확정일 10년 10월 15일

변환효율의 향상과 제조단가 저하가 주 관심이고 이를 위해 제조공정을 거치기 전에 모의실험을 하여 변환효율의 특성을 확인할 필요가 있다.[5] 따라서 본 논문에서는 반도체 소자 분석용 메디치 프로그램을 이용하여, ITO 산화층의 반사방지막을 갖는 실리콘 솔라셀의 전기적 특성 분석을 하고자 한다. II장에서 ITO 반사방지막을 갖는 실리콘 솔라셀 구조를 소개하고, III장에서 메디치 모델링을 위한 ITO 전극구조의 솔라셀 메쉬 구현을 보인다. IV장에서 ITO 반사방지막의 두께에 따른 솔라셀의 I-V 특성,  $I_{sc}$ ,  $V_{oc}$ , 최대전력, 곡선 인자 특성해석을 실시하고 마지막으로 결론을 내린다.

## 2. ITO 투명전극 구조의 실리콘 솔라셀

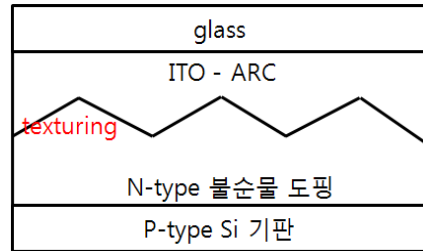
그림 1은 본 논문에서 두께에 따라 분석하고자 하는 ITO 투명전극의 구조 및 AFM(Atomic force microscope : 원자현미경)으로 측정된 표면결과를 보이고 있다. 빛의 반사를 줄이기 위해 표면을 매끄럽게 하지 않고 거칠게 만들며 그로 인해 빛 에너지를 전기 에너지로 바꿀 수 있는 효율성이 높아진다.



[그림 1] ITO 셀의 모습 (a) 기본모델, (b) AFM에 의해 ITO 표면을 나타낸 모습

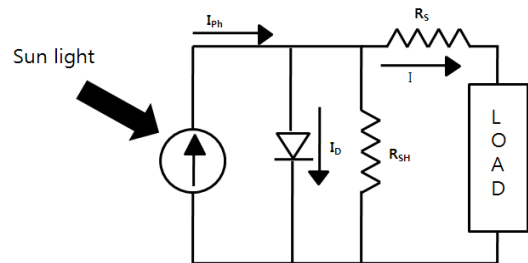
그림 1 중에서 (a)는 ITO를 박막으로 하고 결정질 실리콘을 기본으로 한 구조이다. 박막 위에 유리 같은 재료를 놓은 전형적인 구조이다. (b)는 n층 위에 박막이 Texturing을 이용해 표면을 거칠게 하여 실리콘 솔라셀의

기판 표면에서 반사되어 없어져 버리는 손실분을 줄여 줄 수 있다.



[그림 2] ITO 투명전극을 갖는 실리콘 솔라셀 기본 구조

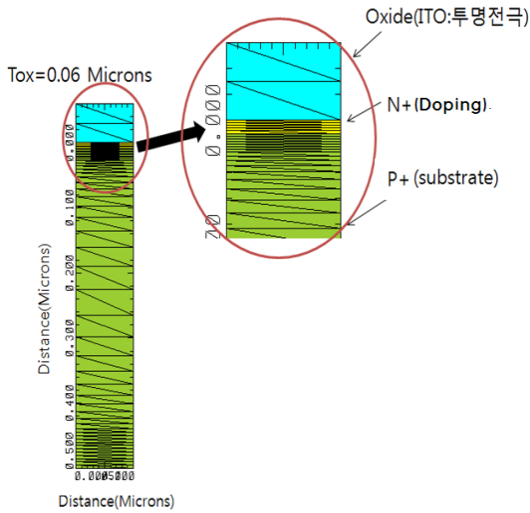
그림 2는 실리콘 솔라셀의 기본 구조를 나타낸 것이고 그림 3에 본 논문에서 분석하고자 하는 ITO 투명전극 구조의 결정질 실리콘 솔라셀의 전기적인 등가회로를 나타내고 있다.



[그림 3] ITO 투명전극을 갖는 실리콘 솔라셀 전기적 등가 회로

## 3. ITO 투명전극 구조의 실리콘 솔라셀의 메디치 모델링

그림 4는 메디치 프로그램을 이용하여 전기적 특성분석을 위하여 구성된 실리콘 솔라셀의 메쉬 형태를 보인다. 결정질 실리콘의 기본 모식도를 메디치를 표현하기 위하여 대표적인 pn 접합구조를 선택하였다. 여기서 산화층은 ITO 즉 투명전극이고 중심은 도핑(n층) 그리고 아래 부분은 기판(p층)이다. p층은 기판층으로 전자를 주는 역할을 하고 n층은 불순물 도핑으로서 나타낸다. 본 구조를 통하여 ITO의 두께에 따른 솔라셀의 빛의 강도와 전압 전류의 특성 관계 그리고 투과율과 외부 수집 효율성 등에 대해서 알아본다.



[그림 4] ITO 반사방지막을 갖는 실리콘 솔라셀의 특성 해석을 위한 메쉬 구조

ITO는 투명전극으로 사용되어지는 광 투과성 도전박막으로서 가시광선에서의 투과성이 높으며 전기전도도 또한 매우 높다. 이러한 ITO 박막의 두께와 파장에 따라 투과율(transmittance)이 다르기 때문에 이 조건들을 충족시키는 것은 매우 중요하다. 여기서, ITO의 모델링 이름을 Tox(산화두께)라고 지정하고 두께를 30 nm, 60 nm, 90 nm으로 하는 세 가지 조건과 함께 파장을 20 nm부터 1000 nm까지 투과율의 변화를 메디치 프로그램을 이용하여 ITO의 투과율, 단락회로 전류, 외부 수집 효율성 등 세 가지의 모델을 만들어 보았다. 이 모델을 만들기 위한 과정은 모두 3단계로 나누어지는데 ASSGIN, PLOT, LABEL 이다. ASSIGN은 이름과 값을 지정해주고 PLOT은 축의 이름 등을 지정해 준다. 그리고 LABEL은 색깔이나 그래프의 이름을 붙여 준다. 그림 5는 투명전극을 갖는 결정질 실리콘 솔라셀의 메디치 프로그램 분석 파라미터 모델을 나타낸다. 여기서 메디치 프로그램 장점은 반사방지막의 두께를 조절하기 위한 다른 절차 없이 수치만 바꿔 넣으면 그 수치에 따른 특성변화를 알 수 있다는 것이다.

```
TITLE      Plot results of  silicon solar cell
MESH      IN.FILE=SSMSH2
PLOT.2D   TITLE="Tox=0.06 Microns"  GRID  FILL  BOUND REGION
+        SCALE

COMMENT   Transmittance of the ITO
LOOPS    STEPS=3
ASSIGN   NAME=TOX   N.VALUE=(0.03,0.06,0.09)
ASSIGN   NAME=L1    N.VALUE=(1,2,3)
ASSIGN   NAME=CLEAR C1=CLEAR C2=ACLEAR C3=ACLEAR
PLOT.1D  IN.FILE="MDEX19.SPL"@L1 X.AXIS=WA Y.AXIS=TR
+        COLOR=@L1 SYMB=@L1 LEFT=0.2 RIGHT=1.0
+        BOT=0.2 TOP=1 @CLEAR
+        TITLE="MDEX19B Transmittance -vs- Wavelength"
LABEL    "Tox=@TOX" Microns" COLOR=@L1 SYMB=@L1
+        X=0.6 Y=0.3+@L1/25 C.SIZE=0.3
L.END

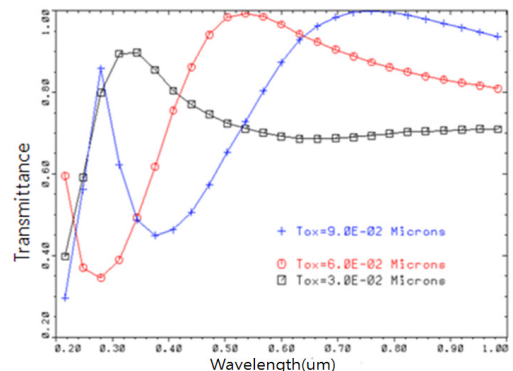
COMMENT   Short-Circuit Current
LOOPS    STEPS=3
ASSIGN   NAME=TOX   N.VALUE=(0.03,0.06,0.09)
ASSIGN   NAME=L1    N.VALUE=(1,2,3)
ASSIGN   NAME=CLEAR C1=CLEAR C2=ACLEAR C3=ACLEAR
PLOT.1D  IN.FILE="MDEX19.SPL"@L1 X.AXIS=WA Y.AXIS=I(1) ABS
+        COLOR=@L1 SYMB=@L1 @CLEAR BOT=0 TOP=0.3E-11
+        TITLE="MDEX19B Short Circuit Current -vs- Wavelength"
LABEL    "Tox=@TOX" Microns" COLOR=@L1 SYMB=@L1
+        X=0.25 Y=2.0E-12+@L1*1.5E-13
L.END

COMMENT   External Collection Efficiency
LOOPS    STEPS=3
ASSIGN   NAME=TOX   N.VALUE=(0.03,0.06,0.09)
ASSIGN   NAME=L1    N.VALUE=(1,2,3)
ASSIGN   NAME=CLEAR C1=CLEAR C2=ACLEAR C3=ACLEAR
PLOT.1D  IN.FILE="MDEX19.SPL"@L1 X.AXIS=WA Y.AXIS=CE(1) ABS
+        COLOR=@L1 SYMB=@L1 @CLEAR BOT=0 TOP=100
+        TITLE="MDEX19B External Collect. Efficiency"
LABEL    "Tox=@TOX" Microns" COLOR=@L1 SYMB=@L1
+        X=0.5 Y=15+@L1*5 C.SIZE=0.3
L.END
```

[그림 5] ITO 투명전극을 갖는 실리콘 솔라셀의 파라미터 모델

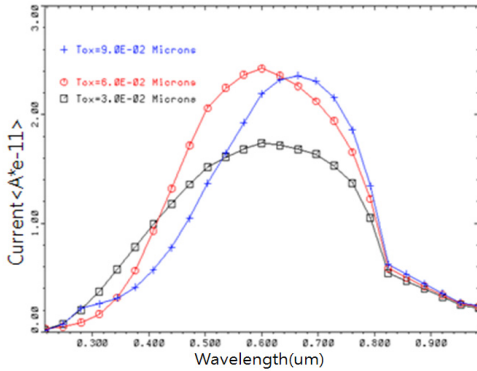
#### 4. ITO 투명전극 구조의 솔라셀 메디치 해석 결과

그림 6을 보면 박막의 두께가 두꺼울수록 높은 파장에서 투과율이 높은 것을 알 수 있다. 여기서 박막의 두께에 따른 투과율을 살펴보면 최고 투과율을 나타내는 파장에서 90 nm의 두께를 가진 박막이 가장 높은 투과율을 나타내었다. 그리고 상대적으로 중간 파장에서 최고 투과율을 보이는 것은 60 nm이고 파장이 가장 짧은 곳에서 최고 투과율을 보이는 것은 박막의 두께가 30 nm인 것으로 나타났다. 즉 두께가 두꺼울수록 긴 파장의 빛에서 높은 투과율을 보였다.

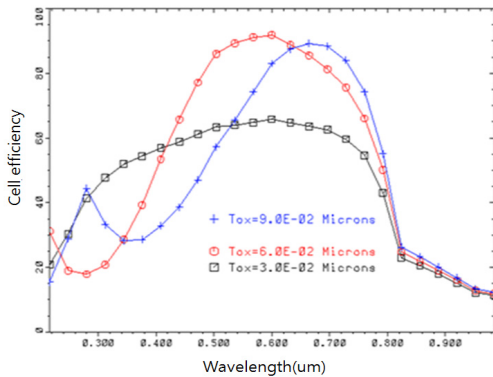


[그림 6] ITO두께와 파장에 따른 투과율 변화

단락회로에서는 60 nm ITO 셀에서 최고 전류값을 보여주고 있다. 여기서 대체적으로 투과율 특성과는 비슷하게 나타났으나 파장의 크기 차이는 투과율을 측정할 때 보다 크지 않았다. 그리고 전류에 따른 외부 수집 효율성은 전하량을 측정된 셀의 표면위에 입사된 광자 수에 의해 나누어지는 파장에서 전체 광전류 밀도  $J(\lambda)$ 로서 정의 되어진다. 이것은 소자 안에서 광 생성되는 전자-정공 쌍 발생속도인 양자효율과는 다르다. 단락회로, 외부 수집 효율성(External collection efficiency)에서 30 nm ITO 셀이 다른 두께를 가진 두 셀보다 훨씬 더 낮게 나타났는데 이것은 파장이 400 nm 이후에 투과율이 좋지 않기 때문이다. 그림 8에서 60 nm ITO 셀은 관련된 대부분의 태양에너지의 파장범위(가시광선)인 400 nm에서 700 nm까지 가시광선 영역에서 가장 높은 효율을 보여주고 있다.



[그림 7] 단락 회로 전류의 파장 및 두께에 따른 변화



[그림 8] 파장에 따른 외부 수집 효율성

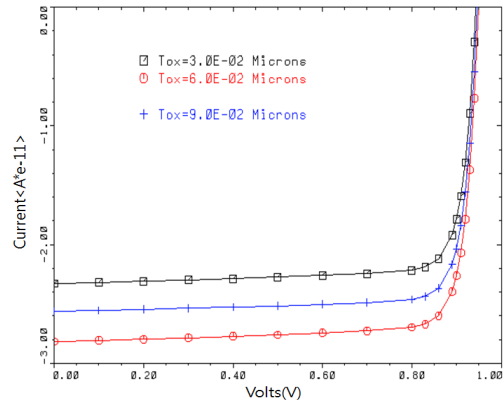
솔라셀은 빛에너지를 전기에너지로 변환시키고 다이오드는 전기에너지를 빛에너지로 변환시키는 반도체 소자로서 정반대 개념이지만 pn접합을 이용하여 변환시키므로 비슷한 전압-전류 특성 곡선을 가진다. 이 솔라셀의

전압-전류 특성 곡선은 암 상태에서의 다이오드 전류-전압 곡선에 광생성 전류를 중첩시키면 된다. 즉, 암 상태에서의 다이오드 전압-전류 곡선을 아래쪽으로 광생성 전류만큼 이동시키면 된다.

그림 9는 ITO 셀의 두께에 따라 광생성 전류만큼 이동시킨 것이다. 이 때 다이오드 방정식은 다음과 같이 주어진다.

$$I = I_d - I_L = I_0 \left[ \exp\left(\frac{qV}{nkT}\right) - 1 \right] - I_L \quad (1)$$

실리콘 솔라셀은 그림 9에서 전압이 0V일 때 -값의 전류 값이 나타나고 0.7V이상이 되면 ITO 셀의 두께와 관계없이 급격히 상승한다. 소자가 100 nm 길이이고 1 μm 깊이이기 때문에 상대적으로 전류밀도는 23.2 mA/cm<sup>2</sup>, 28 mA/cm<sup>2</sup> 그리고 25.8 mA/cm<sup>2</sup>이다. 개방회로 전압  $V_{OC}$  은 두께에서와 상관없이 모두 대략 0.94 V에서 만들어진다.



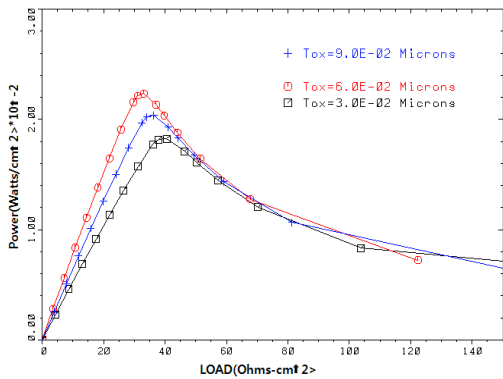
[그림 9] 실리콘 태양전지의 I-V 특성곡선

전력은 셀 전류와 셀 전압의 곱이고 부하저항은 셀 전압에서 셀 전류를 나누어 주면 된다. 그림 10에서 보면 대략 부하저항 32(Ω - cm<sup>2</sup>)에서 60 nm ITO셀이 22.0 mW/cm<sup>2</sup>로 전력이 가장 높게 나타났다. 이 최대 전력을 이용하여 곡선 인자를 구하면

$$FF = \frac{V_m}{V_{OC}} \left[ 1 - \frac{\exp\left(\frac{qV_m}{nkT}\right) - 1}{\exp\left(\frac{qV_m}{nkT}\right) - 1} \right]$$

$$= \frac{P_{max}/cm^2}{J_{SC} V_{OC}} = \frac{22mW/cm^2}{28mA/cm^2 \cdot 0.94V} = 0.83$$

솔라셀 기술에서 나오는 곡선 인자는 실제 최대 얻을 수 있는 전력의 비율로서 정의되어진다. 이 곡선 인자로써 솔라셀의 성능을 판단할 수 있다. 대표적인 상업 솔라셀은 곡선 인자가 0.7이상을 가지고 B급은 0.4~0.7이 나타나는데 높을수록 솔라셀의 성능이 좋은 것이다.[4] 표 1은 위의 그래프들과 그림 10의 그래프를 표로 정리한 것이다. 여기서 파장 1은 투과율이 최대가 되는 파장을 나타내었고 파장 2는 전류가 최대가 되는 파장을 나타낸 것이다. 그리고 전류는 전압이 0V일 때 나타나는 전류의 크기이고, 전력과 외부 수집 효율성은 각 박막 두께에서 파장에 따라 나타나는 최고 수치이다. 표에서도 보이듯이 60 nm의 박막 두께에서 가장 우수한 특성들이 나타나고 있는 걸 보여주고 있다.



[그림 10] ITO 투명전극 두께에 따른 부하와 전력과의 관계

다음 표는 위의 그래프들을 표로 정리한 것이다. 여기서 파장 1은 투과율이 최대가 되는 파장이고 파장 2는 전류가 최대가 되는 파장을 나타낸 것이다.

[표 1] ITO 두께에 따른 솔라셀의 특징

	30 nm	60 nm	90 nm
파장1(nm)	340	540	750
파장2(nm)	600	600	660
전류(A)	$-2.32 \times 10^{-11}$	$-2.8 \times 10^{-11}$	$-2.58 \times 10^{-11}$
외부수집효율성	64%	90%	88%
전력( $mW/cm^2$ )	18	22	20
F.F	0.82	0.83	0.82

## 5. 결론

메디치 프로그램은 반도체 소자 공정 시뮬레이션으로

서 공정 전에 임의의 상태에서의 자동적인 I-V 곡선을 그리는 것, 물리적인 성질을 나타내는 것이 가능한 프로그램으로서 본 논문에서는 실리콘 솔라셀에 입사되는 파장과 ITO의 두께에 따라 외부 수집 효율성, 투과율, I-V 특성, 단락회로 전류에 대해서 비교 분석해 보았다. ITO박막의 두께가 두꺼울수록 투과율이 최고점이 되는 파장은 커지고, 특정파장과 특정 두께에서 높은 효율과 전기적인 특성이 나타났다. 위에 실험 중 60 nm의 두께에서 가장 우수한 특성을 나타냈고 실제로 그렇게 나타날 것으로 생각된다. 곡선 인자 또한 0.83으로 상업적으로 사용되는 솔라셀보다 더 높게 나타났다. 본 해석결과는 솔라셀의 전기적 특성을 이해하고 좀 더 나은 솔라셀 제작을 위해 아주 유용하게 사용될 것으로 사료된다.

## 참고문헌

- [1] A.I. Stoller, The Etching of Deep Vertical Walled Pattern in Silicon (RCA Review, June 1970)
- [2] O.B. Lee, J. Appl. Phys, 1969, p.40.
- [3] 윤재호, 김동호, 권정대, 임동찬, "박막형 태양전지 소재 기술", 녹색 소재 기술 특집 21권, 2009, pp.77
- [4] 이재형, 임동진, 이준신, "태양전지 원론", 홍릉 과학출판사, 2005, pp.104~116
- [5] 이병인, 류태규, 한정만, 최규하, "Preparation and Characterization of Transparent Conductive ITO Films by MOD Process" 추계전력전자학술대회 논문집, 1998, pp.385~387

김재규(Jae-Gyu Kim)

[정회원]



- 2004년 3월 ~ 현재 : 인제대학교 나노공학부(학부과정)

<관심분야>  
반도체, 회로설계, 소자

**김 지 만(Ji-Man Kim)**

[정회원]



- 2010년 2월 : 인제대학교 나노공학부(공학사)
- 2010년 3월 ~ 현재 : 인제대학교 나노시스템공학과 재학 중)

<관심분야>

반도체, 회로설계, 소자

---

**송 한 정(Han-Jung Song)**

[정회원]



- 1986년 2월 : 한양대학교 전자공학과(공학사)
- 1988년 2월 : 한양대학교 전자공학과(공학석사)
- 2000년 2월 : 한양대학교 전자공학과(공학박사)
- 2004년 3월 ~ 현재 : 인제대학교 나노공학부 부교수

<관심분야>

반도체 소자 신뢰성 및 회로설계