

# 표면 플라즈몬 효과를 이용한 박막형 태양전지 효율향상

## Thin film solar cell efficiency improvement using the surface plasmon effect

변수환\*, 소현준\*, 유정훈†

Soo Hwan Byun, Hyun Jun Soh and Jeonghoon Yoo

(2012년 8월 25일 접수; 2012년 9월 9일 심사완료; 2012년 9월 17일 게재확정)

### Abstract

In spite of many advantages, the practical application of the thin film solar cell is restricted due to its low efficiency compared with the bulk type solar cells. This study intends to adopt the surface plasmon effect using nano particles to solve the low efficiency problem in thin film solar cells. By inserting Ag nano-particles in the absorbing layer of a thin film solar cell, the poynting vector value of the absorbing layer is increased due to the strong energy field. Increasing the value may give thin film solar cells chance to absorb more energy from the incident beam so that the efficiency of the thin film solar cell can be improved. In this work, we have designed the optimal shape of Ag nano-particle in the absorbing laser of a basic type thin film solar cell using the finite element analysis commercial package COMSOL. Design parameters are set to the particle diameter and the distance between each Ag nano-particle and by changing those parameters using the full factorial design variable set-up, we can determine optimal design of Ag nano-particles for maximizing the poynting vector value in the absorbing layer.

**Key Words :** Surface Plasmon (표면 플라즈몬), Thin film solar cell (박막형 태양전지), Ag nano particle (은나노입자), Optimal shape (최적형상)

### 1. 서론

태양광 발전은 태양이라는 무한한 에너지원으로 부터 에너지를 공급받고 태양전지를 이용하여 태양광을 추가적인 공정 없이 바로 전기로 변환하기 때문에 공해가 없는 친환경적인 에너지이다. 이러한 장점으로 인하여 태양광발전은 지구 온난화 현상 등 각종 환경오염과 기후변화의 원인이 되는 화석에너지를 대체할 자원으로 각광 받고 있다. 그러나 태양광 발전은 시스템을 구축하는데 있어서 태양광 전지모듈을 구성하는 주요 부품 중 하나인 실리콘기판이 고가이고 생산공정에 있어서도 연속공정이 불가능하기 때문에 공정에 필요한 비용 발전단가가 고가라는 단점을 가지고 있다. 이러한 이유로 인하여 태양광 발전은 그 보급과 사

용에 한계를 가지고 있다[1].

박막형 태양전지는 기존의 태양전지가 실리콘기판을 생산하는데 고가의 비용이 필요하다는 단점을 극복하기 위해 제안되었다. 기존의 태양전지인 1세대 태양전지는 모듈에 있어 실리콘 결정을 사용하기 때문에 그 재료의 준비와 생산공정에 있어서 높은 비용을 필요로 한다. 하지만 2세대 태양전지인 박막형 태양전지는 고가의 실리콘 기판 대신에 유리, 플라스틱과 같은 저렴한 재료로 구성된 기판에 실리콘을 박막 형태로 증착하는 방식으로 기판을 구성한다. 이를 통해 태양전지모듈의 가격을 절감하여 결과적으로 태양광발전의 발전단가를 낮추는 효과를 얻을 수 있다. 또한 태양전지의 생산공정에 있어서도 기존의 1세대 태양전지와 달리 박막형 태양전지는 연속 공정이 가능하기 때문에 생산공정에 드는 비용을 절감할 수 있고 박막형이라는 이점을 살려 기존 1세대 전지로는 형태와 두께 때문에 제한되었던 분야에도 광범위하게 적용할 수 있는 이점을 갖고 있다.

그러나 박막형 태양전지는 효율이 기존의 태양전지에 비해서도 낮다는 약점을 가지고 있다. 이를 보완하고 박막형 태양전지의 보급을 위해서 효

\* Department of Mechanical Engineering, Yonsei Univ.

† School of Mechanical Engineering, Yonsei Univ.

E-mail : yoojh@yonsei.ac.kr

TEL : (02)2123-2859

FAX : (02)362-2736

율을 향상시키기 위한 다양한 방법이 연구 중에 있다. 그 중의 하나인 표면 플라즈몬 효과(surface plasmon effect)는 금속의 나노 입자와 빛 사이의 상호작용을 이용한 방법으로써 입사하는 전자기파인 빛을 이용하여 금속입자의 자유전자의 집단적인 움직임인 플라즈몬의 생성을 유도하고 생성된 플라즈몬은 금속입자 주변의 자기장과 전기장을 증폭시키는 효과를 이용한다. 금속이 나노 사이즈일 경우 이 플라즈몬이 나노 입자의 표면에 집중되기 때문에 표면 플라즈몬이라 불린다. 이 표면 플라즈몬을 태양전지의 흡수층에 유도하게 되면 증폭된 자기장과 전기장으로 인하여 포인팅벡터가 증가하게 되고 이는 태양전지로 하여금 빛을 흡수할 수 있는 기회를 증가시켜줌으로써 전지의 효율을 증대시킬 수 있다 [2-4].

본 연구에서는 표면 플라즈몬을 유도하는 다양한 방법 중 박막태양전지의 흡수층에 균질한 은(Ag)나노 입자를 추가하고 가시광선 영역의 고정된 파장을 이용하여 은나노 입자와 빛 사이의 표면 플라즈몬 현상을 유도하고, 이로 인한 전자기장 증폭효과를 통해 효율을 증가시키고자 하였다.

## 2. 이론적 배경

### 2.1 지배방정식 : Helm-holtz Equation.

Maxwell 방정식으로부터 유도된 Helmholtz 방정식은 기존의 파동방정식에서 시간 부분을 단순 조화운동으로 변환시킨 방정식이다. 간의 변화부분을 단순조화운동으로 고정시킴으로써 시간에 대한 변화보다는 그 외의 상수들인 파장, 광속, 유전율과 같은 재료와 주어진 조건의 물성에 따른 전자기장 변화의 파악이 용이한 장점을 갖는다.

$$\nabla^2 \mathbf{H} + (\frac{\omega}{c})^2 \epsilon_r \mathbf{H} = \mathbf{J} \quad (1)$$

여기서  $\mathbf{H}$ 는 자기장의 세기,  $\omega$ 는 입사빔의 주파수,  $c$ 와  $\epsilon_r$ 은 빛의 속도와 매질의 유전 상수(electric permittivity)를 나타낸다. 이 방정식을 해석을 위한 지배방정식으로 선정함으로써 해석을 수행함에 있어 고정된 파장의 빛을 사용하고 이를 단순조화로 가정함으로써 전지를 구성하는 물질의 재질 변화에 따른 전자기장의 변화의 예측이 가능하다.

### 2.2 주기 조건의 설정

태양광전지의 구조를 살펴보면 동일한 구조를 갖고 있는 태양 전지가 동일한 패턴으로 연결되어 있음을 파악할 수 있다. 이를 이용하여 유한 요소

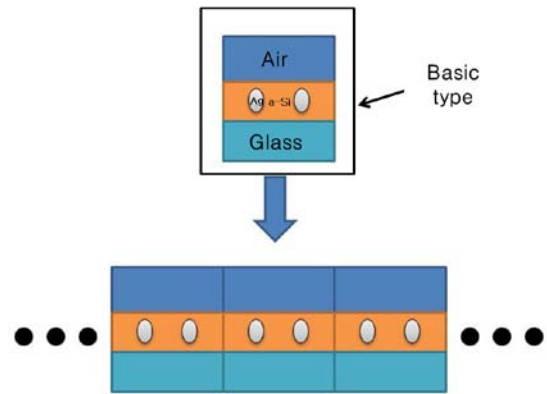


Fig. 1 Periodic structure of a thin film solar cell

해석을 수행할 때 전체의 구조가 아닌 단위 구조(unit structure)를 대상으로 해석을 수행함으로써 소요되는 시간을 줄이고 신뢰성 있는 해석 결과를 기대할 수 있다.

본 연구에서는 해석 과정에서 상용 패키지 COMSOL 내부에 존재하는 기능인 주기 조건(periodic condition)기능을 이용하였다. 주기 조건은 특정 경계나 점을 기준으로 하여 시작점과 종착점을 지정해주면 그에 따라 구조를 반복해 주는 기능으로써 기본 모델의 양 좌측 경계를 시작점으로 하여 동일한 구조의 태양전지가 양쪽으로 뻗어나가는 구조를 가지도록 설정해 주었다. Fig. 1은 주기 조건을 도식적으로 설명하고 있다. 이는 해석의 부하와 시간을 절감하고 보다 효율적인 해석을 가능케 한다.

### 2.3 최적화 문제의 설정

포인팅 벡터(Poyinting vector)는 전자기파의 에너지 흐름의 밀도를 나타내는 척도으로써 단위 면적에 흐르는 에너지를 전기장과 자기장의 벡터곱으로 다음의 식과 같이 표시한다.

$$\langle S \rangle = \text{Re} \left[ \frac{1}{2} \frac{1}{j\omega\epsilon_0} \left\{ \left( \frac{1}{\epsilon_r} \frac{\partial H_z}{\partial x} H_z^* \right) \hat{i} - \left( \frac{1}{\epsilon_r} \frac{\partial H_z}{\partial y} H_z^* \right) \hat{j} \right\} \right] \quad (2)$$

위 식에서  $\epsilon_0$ 는 진공 상태에서의 유전율을 의미한다. 포인팅 벡터의 값이 크다는 것은 동일한 면적을 일정한 시간에 지나는 에너지가 많다는 것을 의미한다. 이는 태양전지에서 흡수층 내부의 포인팅벡터 값이 증가하게 되면, 즉 동일한 시간에 지나는 에너지가 증가하게 되면, 태양전지가 빛을 흡수할 수 있는 기회가 증가하게 되고 이는 결과적으로 태양광이 전기로 변환될 수 있는 양이 증가하는 것으로 효율이 증가함을 의미한다.

따라서 본 연구에서는 최적화 문제를 정의함에 있어 흡수층에서의 (2) 식으로 표시된 포인팅 벡

터의 시간에 대한 평균값 최대화함을 목적함수로 설정함으로써 표면 플라즈몬 효과를 통하여 흡수층에 지나가는 포인팅벡터의 값이 얼마나 향상되었는지를 정량적으로 나타내고자 하였다.

설계 과정을 수행함에 있어 몇 가지 제한조건을 부여하여 해석의 효율과 신뢰성을 높이하고자 하였다. 첫 번째로는 흡수층의 은나노 입자를 추가함에 있어서 복잡한 패턴보다는 간격이 일정하고 중심의 위치가 동일한 한 층의 규칙적인 구조로 은나노 입자를 배치함으로써 흡수층에 규칙적인 구조를 부여함으로써 앞에서 언급한 주기 조건의 적용이 가능케 하였다. 즉 흡수층과 은나노 입자의 관계가 균질하다는 가정을 통해 해석의 효율을 높이하고자 하였다. 두 번째로는 입자의 기본적 형태를 고정하였다. 우리가 선택할 수 있는 은나노 입자의 형태는 다양하다. 하지만 이 형태 중 하나인 구(sphere)의 형태는 그 크기를 결정하는데 있어 변수가 하나만 필요하고 위치하는 방향에 따라 구조적인 영향을 받지 않기 때문에 은나노 입자의 형태를 구로 고정하여 해석 및 설계 과정을 수행하였다. 세 번째로 태양전지에 입사하는 빛의 파장을 고정하였다. 이번 연구에서 사용한 빛의 입사조건은 파장이 800nm 일 때를 가정하였다. 본 연구는 가시광선 영역대의 전 파장에 걸친 결과를 확인하는 것 보다 표면 플라즈몬에 의한 성능 향상을 의도하였으므로 최적화 설계 과정에 의한 포인팅벡터의 증가 효과를 확인하기 위하여 파장을 가시광선 대역의 장파장으로 고정하여 사용하였다.

### 3. 기본 모델

박막형 태양전지는 세부적인 구조의 차이에 따라 비결정형 실리콘으로 구성된 하나의 박막을 흡수층으로 하는 단일접합, 비결정형 실리콘에 마이크로 실리콘을 추가한 이중접합, 이중접합의 구조에 비결정형 실리콘 저마늄(Germaniu, Ge)을 추가한 삼중접합으로 나뉘어진다.[1] 이번 연구의 목적이 특정한 종류의 박막형 태양전지에 특화된 전지의 효율 향상을 목적하기 보다는 표면 플라즈몬 효과가 박막형 태양전지의 흡수층에 적용되어 효율에 끼치는 영향을 정성적으로 알아보는 데 있으므로, 박막형 태양전지의 가장 기본적인 형태인 비결정형 실리콘이 유리 기판에 증착되어 있는 형태를 기준으로 모델을 설정하였다. 이에 따라 기본 모델의 구조를 크게 세 부분으로 나누어서 가장 상단에는 공기(air)로 이루어진 입사층, 중간에

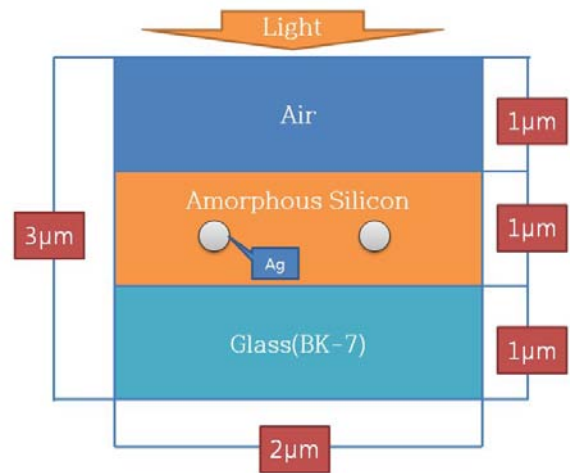


Fig. 2 Structure of the basic model

Table 1 Material properties for analysis

Material	Permittivity(at $\lambda=800\text{nm}$ )
Air	1
Amorphous Silicon	16.819+0.244i
Glass(BK-7)	2.283
Ag	-2.95-1.523i

위치한 비결정형 실리콘(amorphous silicon)으로 이루어진 흡수층, 최하단에 위치한 유리(glass, BK-7)으로 이루어진 기판층으로 구성하였고 흡수층의 가운데에 은나노 입자를 추가하였다.

세부적 모델링에 있어서는 Fig. 2에 제시된 모델과 같이 각 층의 두께는 1 $\mu\text{m}$ 로 동일하게 설정하였다. 각 층의 너비는 설계 변수인 입자간의 간격과 주기적 조건의 적용을 고려하여서 현재 설정된 기본 간격인 1 $\mu\text{m}$ 의 2배인 2 $\mu\text{m}$ 로 설정하였다. 표면 플라즈몬 효과를 적용하기 위한 은나노 입자의 삽입은 기본 입자의 지름을 100nm로 설정하여 흡수층 중앙에 두 개의 입자를 대칭을 이루게 배치하였다. Table 1은 기본모델을 구성하는 물질의 유전률(electric permittivity)의 값을 보여 주고 있으며 이 값은 해석의 지배방정식인 Helmholtz 방정식에 사용된다[3].

### 4. 실험계획을 통한 입자의 형상 결정

박막형 태양전지의 효율을 높이기 위한 흡수층 내부의 은나노 입자의 최적설계 방법으로는 변수 설계 방법인 실험계획법(design of experiments, DOE)을 적용하였다. Fig. 3은 적용된 설계 변수를 도식적으로 나타내고 있다. 이전 연구에서는 은나

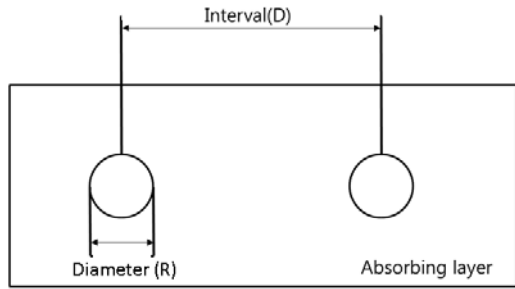


Fig. 3 Design variable set up

노 입자의 직경에 따른 표면 플라즈몬 효과의 차이를 알아본 것에 반해[5] 본 연구에서는 은나노입자의 직경(R)과 입자의 중심 사이의 간격(D)를 설계변수로 설정 하였다. 변수의 수준(level)에 있어서는 직경은 최저 50nm에서 최고 150nm까지 10nm간격으로 11수준(level)으로 설정하였고 간격은 최저 600nm를 시작으로 최고 1500nm까지 100nm 간격으로 10개의 수준으로 설정되었다. 이는 설계변수가 많지 않은 2개라는 점과 표면 플라즈몬 효과가 입자의 분포와 그 크기에 민감하다는 점에 기인한 것으로 해석을 하는데 있어서 설계변수가 많지 않다는 것은 최적 설계를 위한 경우의 수가 적어진다는 것을 의미한다. 따라서 다소 많은 변수별 수준을 부여함으로써 해석의 신뢰도를 높이고자 하였다. 따라서 실험의 배치에 있어서 변수간의 상호 작용까지 고려한 모든 수준에 대한 사례를 전부 해석하는 다음의 Table 2와 같은 완전요인 직교배열표(full factorial orthogonal array)를 사용하였다[6]. 완전요인배치법을 통한 총 110가지 사례의 해석을 COMSOL을 이용하여 진행한 결과 각 사례별 흡수층에서의 포인팅 벡터값을 Table 2

Table 2 Full factorial orthogonal array and its numerical simulation results

R(nm) D(nm)	50	60	70	80	90	100	110	120	130	140	150
600	0.248	0.252	0.655	0.325	0.533	0.425	0.262	0.208	-0.825	0.521	0.579
700	0.815	0.582	0.002	0.229	0.261	0.815	0.222	0.286	-0.240	0.511	0.338
800	0.362	0.467	0.453	0.324	0.237	0.815	0.811	0.438	-0.047	0.097	0.089
900	0.203	0.431	0.256	0.258	0.290	0.487	0.759	0.666	0.929	0.873	0.205
1000	0.447	0.387	3.097	0.760	0.572	0.357	-0.015	0.252	0.757	0.390	0.571
1100	0.239	0.316	0.304	0.424	0.301	0.215	0.287	0.305	0.182	0.416	0.059
1200	0.275	0.290	0.624	0.198	0.296	0.302	0.366	0.317	0.247	0.321	0.225
1300	0.199	0.584	0.460	0.390	0.185	0.300	0.194	0.400	0.747	0.292	0.087
1400	-0.160	-0.151	-0.180	-0.163	-0.253	-0.167	-0.137	-0.148	-0.180	-0.150	-0.140
1500	0.174	0.196	-0.952	0.268	0.230	0.246	0.335	0.217	0.177	0.179	0.219

[Poynting vector (W/m<sup>2</sup>) x 10<sup>-25</sup>]

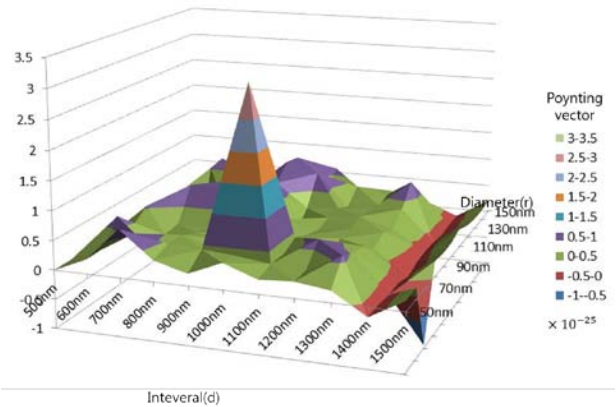


Fig. 4 Distribution of Poynting vector values

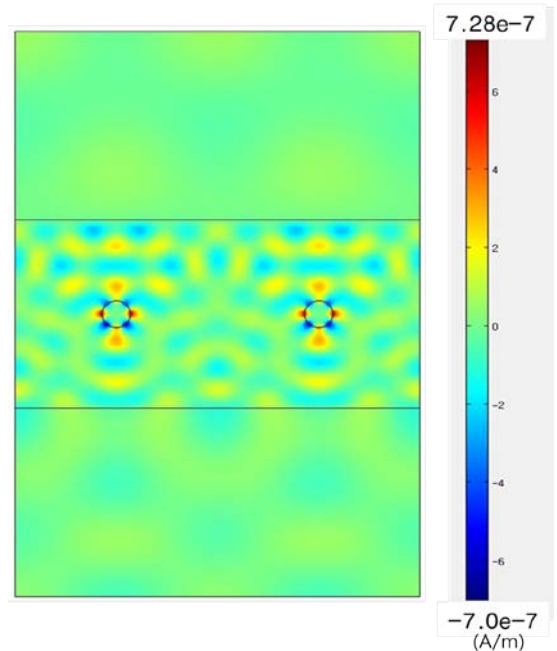


Fig. 5 Magnetic field contour of the optimized model

에 표시된 바와 같이 얻을 수 있었다. 가장 높은 값을 갖는 경우는 입자간 간격이 1000nm, 입자의 직경이 70nm인 경우로 측정되었다.

Fig. 4는 Table 2의 결과를 도식적으로 표현한 그래프로써 입자간 간격 1000nm, 입자의 직경 70nm에서 확연히 향상된 포인팅벡터의 값을 갖는 것을 확인할 수 있다. COMSOL을 통한 해석을 통하여 최적의 경우의 자기장의 강도를 나타낸 결과인 Fig. 5를 보아서도 알 수 있듯이 은나노 입자가 포함된 흡수층에 자기장이 집중적으로 분포한 것을 확인할 수 있었다. 은나노 입자 주변을 살펴보면 은나노 입자의 경계를 중심으로 강한 자기장이 형성된 것으로 보아 표면 플라즈몬 효과가 제대로 구현되고 있음을 확인할 수 있다. 수치적 해석결과를 비교하면 최종모델에서 표면

플라즈몬 효과를 적용하지 않은 상태, 즉 흡수층에 은나노 입자를 포함하지 않은 형태의 모델보다 최적화된 은나노 입자를 추가한 최종 모델에서의 포인팅벡터의 값이 적용 전  $1.4e-26W/m^2$ 에서 적용 후  $3.1e-25W/m^2$ 로 약 20배 가량 증가함을 확인할 수 있다. 물론 포인팅벡터의 값이 20배 증가하였다고 하여서 이 결과가 박막형 태양전지 효율의 20배 증가로 직결되는 것은 아니다. 하지만 포인팅벡터의 20배 증가는 태양전지의 흡수층에 흐르는 에너지의 양이 시간당 20배 가량 증가했다는 것을 의미하는 것으로, 태양전지로 하여금 빛을 효율적으로 흡수할 수 있는 조건을 형성함을 확인할 수 있고 이에 따른 결과로 박막형 태양전지의 효율을 높일 수 있다는 결론을 얻을 수 있다.

## 5. 결 론

본 연구에서는 박막형 태양전지의 보급에 있어 걸림돌이 되는 낮은 효율을 올리기 위한 방안으로 은나노 입자를 이용한 표면 플라즈몬 효과를 통한 성능 향상을 추구하였다. 이를 위하여 흡수층 사이에 은나노 입자를 삽입하고 그 직경과 간격을 설계변수로 삼아 최적의 수치를 도출하기 위하여 실험계획법을 적용하였다. 태양전지의 모듈 설계를 위한 단위 구조의 경계 조건을 적용시키기 위해 주기적인 경계 조건을 적용하였고, 실험계획법에 있어서는 완전요인 설계법을 이용하여 최적의 치수를 도출해내었다. 또한 해석 및 설계 결과를 통해 은나노 입자를 통한 표면 플라즈몬 효과가 흡수층에서의 포인팅 벡터 증가에 기여했음을 확인하였다. 본 연구는 800nm의 단일 파장 대역을 대상으로 해석과 설계를 수행하였으며 향후 다중 목적 최적화의 방법 등을 이용하여 가시광선 전체 영역을 대상으로 연구의 확장이 가능할 것으로 기대된다. 이러한 연구 결과는 박막 태양전지의 저효율 문제를 해결하는 하나의 방법으로 적용될 수 있을 것으로 기대된다.

## 후 기

이 논문은 2012년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(No. 2012-0005701).

## 참고문헌

- [1] Lee, J. C. and Yoon, K. H., 2005, "Technical trend of thin film silicon solar cell", *Ceramist*, Vol. 8, No. 5, pp. 7-20.
- [2] Xia, Y. and Halas, N. J., 2005, "Shape-controlled synthesis and surface plasmonic properties of metallic nanostructures.", *MRS Bulletin*, Vol.30, pp. 338-348.
- [3] Kelly, K. Lance., Zhao, L. L. and Schatz, G. C., 2003, "The optical properties of metal nanoparticles: The influence of size, shape, and dielectric environment", *J. Phys. Chem. B*, Vol.107, No.3, pp.668-677.
- [4] Pillai, S., Catchpole, K., Trupke, T. and Green, M. A., 2007, "Surface plasmon enhanced silicon solar cell", *J. Appl. Phys*, Vol. 101, 093105.
- [5] Akimov, Y. A. Yu. A. and Koh, W. S., 2009, "Surface plasmon enhancement of optical absorption in thin-film silicon solar cell", *Plasmonics*, Vol.4, pp.107-113.
- [6] Myers, R H, Montgomery, D. C., 1995, *Response surface methodology*, Wiley, New York.