

Building-Integrated Photovoltaic 시스템의 연간 발전 에너지 향상을 위한 커버글라스 패턴의 최적설계

김태현, 이승철, 박우상 

인하대학교 전자공학과

Optimal Design of Coverglass Pattern in Building-Integrated Photovoltaic for Improved Yearly Electrical Energy

Taehyeon Kim, Seung-Chul Lee, and Woo-Sang Park

Department of Electronic Engineering, Inha University, Incheon 22212, Korea

(Received April 20, 2020; Revised April 23, 2020; Accepted April 23, 2020)

Abstract: A coverglass pattern was designed to improve the annual electrical energy production of a building-integrated photovoltaic (BIPV) module installed in the exterior walls of buildings. The transmittance pattern was calculated using ray tracing, and the results were derived by optimizing the simulation using Taguchi's method. We obtained the optimal pattern by analyzing the conventional patterns for improving the transmittance and derived design factors by quantifying the pattern. By calculating the influence of electrical energy on each design factor, we obtained the optimal coverglass pattern that produced the maximum annual electrical energy. The annual electrical energy production improved by approximately 11.79% compared to the non-patterned coverglass.

Keywords: Building-integrated photovoltaic, Solar cell, Taguchi's method

1. 서론

전 세계적으로 기후 변화에 대응하기 위해 화석 에너지의 탄소 배출을 줄이고 신재생에너지의 대체사용을 권고하고 있다. 특히 건축물 분야에서 사용되는 에너지의 경우 높은 비율을 차지하고 있으며 에너지효율이 낮은 건물의 시스템 특성상 신재생에너지 시스템의 필요성이 대두되고 있다. 신재생에너지원의 건축물 적용 방법에는 태양광, 태양열, 지열 등이 많이 적용되고 있는데, 특히 BIPV (building-integrated photovoltaic) 시스템은

건물의 외벽이나 지붕의 마감재를 PV (photovoltaic) 모듈로 대체하는 시스템으로 별도의 설치공간이 필요치 않아서 건물의 마감재를 절감하고 동시에 전기에너지를 생산할 수 있다는 장점이 있다 [1-4]. 또한, 신축건물 외 기존건물에도 설치가 용이하고 유지보수가 쉽고 대한민국이나 싱가포르 등과 같이 소요대지가 부족하고 고층건물이 많은 환경에서도 적합한 발전 시스템이다.

하지만 BIPV 모듈은 건축물과의 조화성과 건물 마감재로 사용되는 특성상 발전량을 고려하여 설치되기가 어렵기 때문에 신축건물 설계 시 BIPV 모듈의 발전량을 고려하여 설치하는 것은 비용과 시간이 필요하다. 또한, 기존건물에 설치하는 경우에도 건물의 외벽형태를 바꾸기가 어렵기 때문에 최대 발전량 얻을 수 있는 조건으로 BIPV 모듈을 설치하기 어렵다. 현재 건축물들은 지상과 수직으로 세워지게 되어 건물 외벽환경

✉ Woo-Sang Park; wspark@inha.ac.kr

Copyright ©2020 KIEEME. All rights reserved.
 This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

에서의 BIPV 모듈은 태양이 최대고도에 이를 때 태양광을 비스듬한 입사각으로 받게 되고 이것은 BIPV 모듈의 발전량을 감소시키게 된다.

이러한 문제를 해결하기 위한 방법으로 커버글라스의 코팅과 패턴 형성이 있다. 커버글라스 반사방지 코팅을 적용하여 공기와의 굴절률 매칭으로 글라스의 투과율을 높이고 설치형태 상에서 발생하는 태양광의 비스듬한 입사각에서의 반사를 줄일 수 있다 [5-7]. 하지만 실외에 설치되는 BIPV의 특성 상 코팅물질의 강도와 내구성 등을 필요로 하고 주기적인 재코팅이 불가피하다. 패턴 설계의 경우 커버글라스의 투과율 향상을 구현하기 위해 연구되고 있지만 태양광과 같은 유동적으로 변화하는 광원에 대한 것은 고려되지 않고 있다 [8-11]. 따라서 BIPV 모듈의 연간 발전 에너지를 향상시키는 패턴 설계가 필요하다.

이에 본 연구에서는 BIPV 시스템의 연간 발전 에너지 향상을 위해 태양의 움직임을 고려하여 커버글라스의 최적패턴을 설계하고자 한다. 먼저 광선추적법을 통해 커버글라스의 패턴 경계 면에서의 태양광을 추적하여 투과율을 계산하였다. 커버글라스 뒷면의 solar cell의 발전효율을 25%로 하여 태양광의 투과광에 따른 발전 에너지를 환산하였다. 또한 다구찌 방법을 적용한 시뮬레이션을 수행하여 기존의 BIPV 시스템에 비해 우수한 연간 발전 에너지를 얻을 수 있는 커버글라스 패턴을 최적화하였다.

2. 실험 방법

2.1 패턴의 모델링 및 설계

BIPV 모듈은 건물 외벽환경에 설치되어야 하기 때문에 최적의 설치경사각(32도: 서울기준)을 설정해 주지 못한다. 외부 구조물을 이용하여 외벽환경에 설치경사각을 설정할 수 있지만 설치의 번거로움과 낮은 신뢰성, 그리고 외관 상 디자인적인 측면이 저하된다 [12,13]. 우선 제한된 설치경사각으로 BIPV 모듈에 비스듬하게 입사되는 태양광의 투과율을 높이기 위해 기존의 투과율 향상 패턴의 입사각에 따른 투과율을 계산하였다. 패턴은 비스듬하게 입사한 태양광을 커버

글라스에서의 전반사를 일으켜 외부로 반사되는 광선을 줄이고 cell로 흡수되는 광선을 늘려 준다. 투과율의 계산은 Synopsys사의 'LightTools'를 이용하여 계면에서의 프레넬 손실 특성을 기반으로 한 광선추적

법으로 계산하여 얻었다. 프레넬 손실 특성은 물질 계면에서 프레넬 계수에 의해 투과광과 반사광의 비율을 고려하여 계산하기 때문에 패턴의 광선추적법에서 보다 정확한 투과특성을 얻을 수 있다.

그림 1은 커버글라스에 패턴을 입힌 후 입사각에 따른 투과율을 계산한 선행 시뮬레이션 결과이다. 패턴의 종류는 패턴이 없는 것과 기존 투과율 향상에 사용하고 있는 이등변삼각형과 직각삼각형의 단면을 갖는 stripe 패턴, 피라미드와 반구형태의 입체구조로 하고 입사각은 커버글라스에 대해서 수직입사 하는 것을 0°로 하였다. 최적설계에 앞서 되는 비스듬한 입사각에 대해 투과율이 떨어지지 않는 형태를 도출하고자 하였다. 커버글라스의 굴절률은 SCHOTT사의 N-BK7을 기준으로 하였고 모듈의 크기는 1 m × 1 m로 하였다. 그림에서 보면 0°에서는 패턴 커버글라스의 투과율이 패턴을 하지 않았을 때보다 우수한 것을 볼 수 있지만 30°에서는 모두 투과율이 오히려 떨어지는 것을 볼 수 있다. 이등변 삼각형의 경우 40~60°까지 구간에서 투과율이 패턴이 없을 때에 비해 현저히 낮다가 70° 이상에서 다시 우수한 특성을 보였다. 패턴 중 직각 삼각형의 경우 30~50°까지 구간에서 패턴이 없을 때에 비해 투과율이 낮았지만 비슷한 수준이고, 이외의 구간

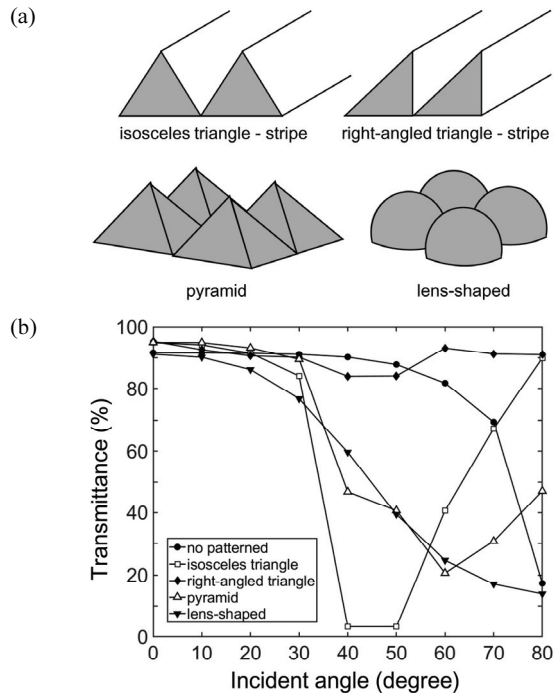


Fig. 1. (a) Coverglass patterns and (b) transmittance according to the incident angle of each coverglass pattern.

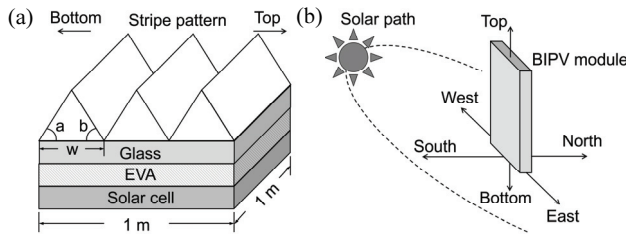


Fig. 2. Schematic diagrams of the patterned BIPV module.

에서는 투과율이 월등히 우수한 것을 볼 수 있다. 따라서 직각 삼각형은 비스듬한 입사광에 대해서 우수한 투과율을 가지므로 BIPV 모듈의 연간 발전 에너지를 향상시킬 수 있는 커버그라스의 패턴으로 결정하여 최적설계를 수행한다.

건물 외벽환경에서의 BIPV 모듈의 모델링은 그림 2에 나타내었다. 1 m²의 모듈에 너비 w, 밑변의 두각이 a, b인 삼각형의 단면을 갖는 stripe 패턴을 적용하였다. 각 a의 방향은 지면방향인 bottom이고 각 b의 방향은 지면과 반대인 top 방향으로 하여 설계 인자를 설정하였다. 삼각형의 높이는 각 a, b와 너비 w에 따라 결정된다. 그림 2(b)에서 보는 바와 같이 건물 외벽 환경을 지면에 수직, 정남향으로 설정하여 시간에 따른 태양의 위치를 고려하여 모듈에서의 광선추적법을 수행하고 투과광에 대한 모듈의 발전효율 25%로 발전 에너지를 계산하였다. 1년 동안의 태양 위치와 radiation data는 Tokyo (Japan)에서의 meteonorm의 data sheet를 이용하였고 태양광의 radiation power는 1 W로 하였다. 시간에 따라 태양의 고도와 경로가 다양하고 패턴의 설계인자도 여러 개이기 때문에 최적설계를 위한 시뮬레이션에 있어서 다구찌 방법을 이용하였다.

2.2 다구찌 방법을 이용한 최적화

BIPV 모듈의 1년간 발전 에너지를 최대화하는 것이 최적화 목표이고 커버그라스 패턴의 크기가 기준파장 550 nm에서 회절효과를 무시할 정도로 크고 공정이 용이하도록 고려하였다. 사전 시뮬레이션에서 직각삼각형의 단면을 갖는 stripe 패턴이 우수한 결과를 보였으므로 비스듬한 입사광에 직접 입사되는 각 b 부분의 빔 면을 최대 90°, 지면방향의 각 a를 최대 45°로 하였다. 모듈의 발전 에너지를 최대화하는 것이 목표이므로 본 연구의 시뮬레이션의 특성치는 망대특성(larger-the-better characteristics)을 가지며 이 경우 다구찌 signal-to-noise ratio (SNR)은 다음과 같이 나타낸다 [14].

$$SNR = -10 \log \left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{1}{y_i^2} \right) \quad (1)$$

여기서 y_i 는 1년간 발전 에너지, n 은 총 시뮬레이션 수를 나타낸다. SNR을 최대화시키는 설계인자들의 최적조합을 시뮬레이션을 통해 도출해 낸다.

표 1은 첫 번째 최적화에서 다구찌 방법의 설계인자를 설정한 것이며, 각 레벨에 따른 수치를 나타낸다. 그림 2에서 모델링한 stripe 패턴의 단면의 삼각형 각도 a, b와 너비 w이다. 직각삼각형을 기준으로 하였기 때문에 각도 a는 최대 45°에서부터 10°씩 감소하여 최소 15°로 설정하였고, 각도 b는 최대 90°부터 15°씩 감소하여 최소 45°로 설정하였다. 너비는 공정의 용이성을 생각하여 최소 200 μm에서 최대 1,000 μm까지 설정하였다.

표 2는 첫 번째 최적화의 결과를 나타낸다. L16의 직교배열표를 이용하여 시뮬레이션 횟수를 줄이고 각 설계인자에 따른 결과에 대한 손실함수를 다구찌 SNR로 나타내었다. 사전 투과율 시뮬레이션에서 보았듯이

Table 1. Levels of each control factor in first simulation.

Factor	Description	Levels			
		1	2	3	4
A	Angle a	15°	25°	35°	45°
B	Angle b	45°	60°	75°	90°
C	Width w	200 μm	400 μm	800 μm	1,000 μm

Table 2. Taguchi's SNRs in first simulation.

No.	A	B	C	SNR (dB)
1	1	1	1	39.40
2	1	2	2	39.66
3	1	3	3	40.08
4	1	4	4	40.23
5	2	1	2	38.27
6	2	2	1	38.46
7	2	3	4	39.90
8	2	4	3	40.71
9	3	1	3	36.37
10	3	2	4	37.50
11	3	3	1	39.82
12	3	4	2	40.63
13	4	1	4	34.36
14	4	2	3	36.66
15	4	3	2	39.57
16	4	4	1	40.96

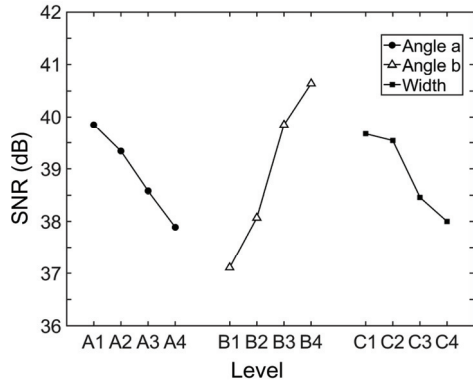


Fig. 3. Average SNR according to the levels of each factor in first simulation.

B, 즉 각도 b의 경우 직각일 때가 우수한 특성을 가졌다. 표 2를 통해 각 설계인자의 레벨에 따른 SNR의 평균치를 구하면 그림 3과 같다. 그림에서 보면 B의 기울기가 가장 큰 것을 볼 수 있다. 이것은 인자 B인 각도 b의 특성치에 관한 영향도가 가장 큰 것을 나타낸다. 따라서 인자 B의 변화가 클수록 특성치의 변화도 큰 것을 알 수 있다. 또한, 인자별 SNR을 보면 A의 경우 수준 1, B의 경우 수준 4, C의 경우 수준 1에서 가장 좋은 특성치를 가진다. 인자 B의 경우 수준 4가 90°이고 이는 직각삼각형을 의미한다.

Stripe 패턴에서 단면의 각도가 90°를 넘어가면 공정이 까다롭기 때문에 인자 B의 최대치인 90°가 최적 조건이다. 또한, 인자 A의 경우 수준별 평균 SNR은 수준 1에서 가장 높은 SNR을 나타내지만 실제 시뮬레이션에서는 A4B4C1에서 가장 높은 SNR을 보인다. 따라서 A의 최적조건을 45°로 두고 추가적인 최적화 과정을 진행하였다.

표 3은 두 번째 최적화의 수준별 설계인자이며, 표 4는 L9의 직교배열표를 사용한 두 번째 최적화의 결과를 나타낸다. 첫 번째 최적화에서 얻은 인자 B를 90°로 고정시켜 두고 인자 A와 C를 수준을 표 2와 같이 바꾸어 시뮬레이션을 수행하였다. 표 3에서 보면 A가 2수준, C가 1수준일 때 가장 우수한 결과를 가진다. 표 4를 이용하여 인자별 수준에 따른 SNR 평균치를 그림 4와 같이 나타낼 수 있다. 두 번째 최적화이기 때문에 인자의 수준별 SNR 차이가 크게 나지 않지만 특성치에 관한 영향도를 보면 인자 C가 A에 비해 낮은 것을 볼 수 있다. 인자 C 너비는 인자 A 각도 a에 비해 특성치에 영향을 덜 준다는 것을 알 수 있다. 따라서 최적화의 결과 BIPV에서 1년간의 최대 에너지를

Table 3. Levels of each control factor in second simulation.

Factor	Description	Levels		
		1	2	3
A	Angle a	43°	45°	47°
C	Width w	190 μm	200 μm	210 μm

Table 4. Taguchi's SNRs in second simulation.

No.	A	C	SNR (dB)
1	1	1	40.88
2	1	2	40.88
3	1	3	40.87
4	2	1	41.01
5	2	2	40.96
6	2	3	40.96
7	3	1	40.98
8	3	2	40.90
9	3	3	40.97

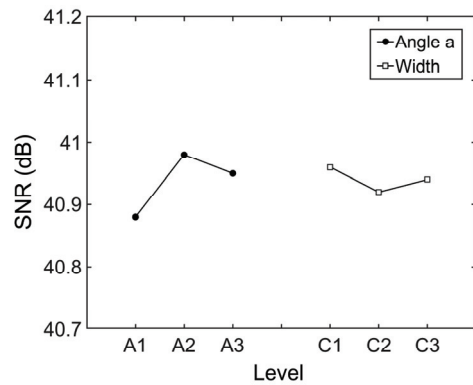


Fig. 4. Average SNR according to the levels of each factor in second simulation.

얻을 수 있는 커버글라스 패턴의 설계인자는 너비가 190 μm이고 45° 직각삼각형의 단면을 갖는 stripe 패턴이다.

3. 결과 및 고찰

다구찌 방법을 이용한 커버글라스 패턴최적화를 통해 얻은 패턴의 인자들을 적용하여 BIPV 모듈의 1년간의 발전 에너지를 구하였다. 그림 5는 커버글라스의 패턴이 없을 때와 최적패턴일 때의 BIPV의 1년간 월별 평균 발전 에너지를 보여준다. 건물 외벽환경에서 지면에 수직으로 설치된 BIPV의 특성상 태양의 남중고

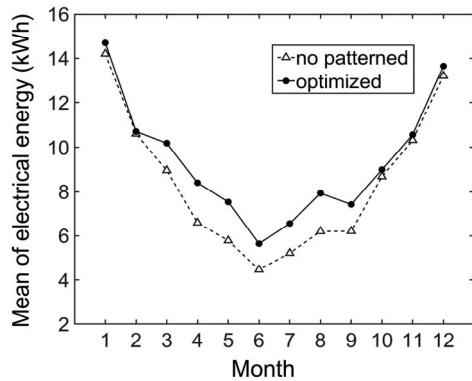


Fig. 5. Electrical energy according to month.

태양광의 입사각이 작게 입사되기 때문에 패턴이 없을 때와 최적패턴의 차이가 크게 벌어지지 않는다.

그림 6은 커버글라스의 패턴이 없을 때와 최적패턴의 BIPV의 1년간 월별 하루 시간에 따른 평균 발전 에너지를 보여준다. 그림 5에서 보인 바와 같이 태양의 남중고도가 높아져 입사각이 커지는 12시에 가까워질수록 발전 에너지 차이가 커지고 태양의 고도가 낮은 아침과 저녁에는 큰 차이를 보이지 않는다.

결과적으로 최적패턴의 1년간 발전 에너지는 112.31 kWh이고 패턴이 없을 때와 비교하여 11.79%가 향상된 것을 확인하였다.

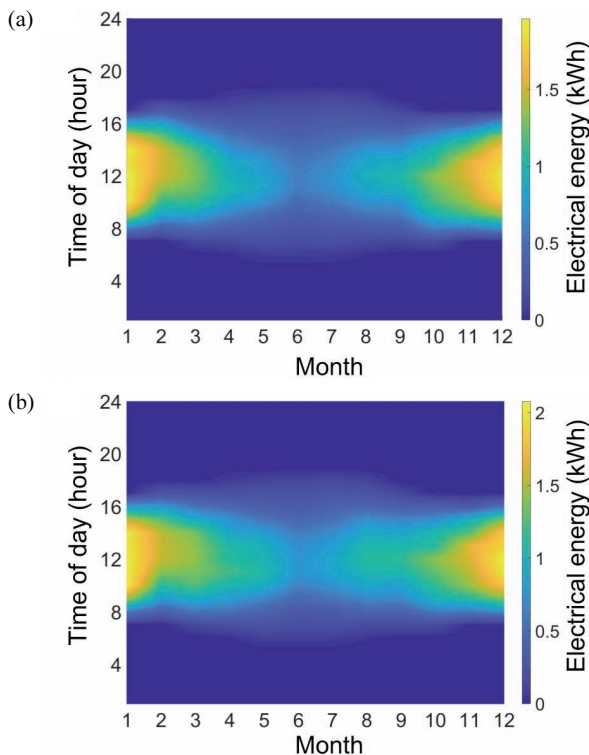


Fig. 6. Electrical energy according to month and time of day (a) without pattern and (b) with optimized pattern.

도가 가장 높은 6월과 7월 사이에 발전 에너지가 낮은 것을 볼 수 있다. 높은 남중고도로 인해 태양광이 비스듬하게 입사하면 패턴이 없을 때와 최적패턴의 발전 에너지 차이가 크게 생기는 것을 볼 수 있다.

이는 최적설계 과정 시 비스듬한 입사광을 보상하려는 설계의도와 부합한다. 11월과 2월 사이 남중고도가 낮은 겨울철에는 지면과 수직으로 설치된 BIPV 모듈에

4. 결론

건물 외벽환경에 설치된 BIPV 모듈의 연간 발전 에너지 향상을 위한 커버글라스의 패턴을 최적설계하였다. 기존의 투과율 향상을 위한 패턴들을 분석하여 최적의 패턴 형태를 도출하고 패턴의 형태를 수치화하여 설계 인자를 얻었다. 각각의 설계인자들에 대한 발전 에너지의 영향도를 다구찌 방법으로 계산하여 최대의 연간 발전 에너지를 갖는 최적의 커버글라스의 패턴인 45° 직각삼각형의 단면을 갖는 stripe 패턴을 도출하였고 패턴의 투과 특성은 광선추적법을 이용하여 계산하였다. 그 결과 태양의 고도가 높아져 비스듬한 입사광을 갖는 6월, 7월과 정오에서의 발전 에너지가 크게 향상되는 것을 확인하였고 패턴이 없을 때와 비교하여 연간 발전 에너지가 약 11.79% 향상하는 것을 확인하였다.

ORCID

Woo-Sang Park

<https://orcid.org/0000-0001-6087-5595>

REFERENCES

[1] Y. S. Lim, G. Lalchand, and G.M.S. Lin, *Energy Policy*, **36**, 2130 (2008). [DOI: <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2008.02.016>]
 [2] F. Cucchiella, I. D'Adamo, and S.C.L. Koh, *J. Cleaner Prod.*, **98**, 241 (2015). [DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2013.10.043>]
 [3] F. Azadian and M.A.M. Radzi, *Renewable Sustainable Energy Rev.*, **22**, 527 (2013). [DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2013.01.056>]
 [4] L. Lu and H. X. Yang, *J. Sol. Energy Eng.*, **126**, 929 (2004). [DOI: <https://doi.org/10.1115/1.1701883>]
 [5] S. Y. Lien, D. S. Wu, W. C. Yeh, and J. C. Liu, *Sol. Energy*

- Mater. Sol. Cells*, **90**, 2710 (2006). [DOI: <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2006.04.001>]
- [6] J. H. Selj, T. T. Mongstad, R. Søndena, and E. S. Marstein, *Sol. Energy Mater. Sol. Cells*, **95**, 2576 (2011). [DOI: <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2011.03.005>]
- [7] K. H. Nielsen, D. K. Orzol, S. Koynov, S. Carney, E. Hultstein, and L. Wondraczek, *Sol. Energy Mater. Sol. Cells*, **128**, 283 (2014). [DOI: <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2014.05.034>]
- [8] K. Tvingstedt, S. D. Zilio, O. Inganäs, and M. Tormen, *Opt. Express*, **16**, 21608 (2008). [DOI: <https://doi.org/10.1364/OE.16.021608>]
- [9] K. Tvingstedt, Z. Tang, and O. Inganäs, *Appl. Phys. Lett.*, **101**, 163902 (2012). [DOI: <https://doi.org/10.1063/1.4759125>]
- [10] S. B. Rim, S. Zhao, S. R. Scully, M. D. McGehee, and P. Peumans, *Appl. Phys. Lett.*, **91**, 243501 (2007). [DOI: <https://doi.org/10.1063/1.2789677>]
- [11] C. Cho, H. Kim, S. Jeong, S. W. Baek, J. W. Seo, D. Han, K. Kim, Y. K. Park, S. Yoo, and J. Y. Lee, *Sol. Energy Mater. Sol. Cells*, **115**, 36 (2013). [DOI: <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2013.03.014>]
- [12] L. Sun, L. Lu, and H. Yang, *Appl. Energy*, **90**, 233 (2012). [DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2011.01.062>]
- [13] D. Paul, S. N. Mandal, D. Mukherjee, and S.R.B. Chaudhuri, *Renewable Energy*, **35**, 2182 (2010). [DOI: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2010.02.026>]
- [14] G. Taguchi, M. El Sayed, and C. Hsaing, *Quality Engineering and Quality System* (McGraw-Hill, New York, 1989).