


교류 LED 조명 시스템에서 휘도 편차 감소를 위한 점등 제어 방식

이동원¹, 김병철² 

¹ 신일기술

² 경상국립대학교 전자공학부

A Lighting Control Method for Reducing Luminance Deviation in AC-LED Lighting Systems

Dong Won Lee¹ and Byungcheul Kim²

¹ Shin-il Technology, Busan 46057, Korea

² School of Electronic Engineering, Gyeongsang National University, Jinju 52828, Korea

(Received January 12, 2026; Revised January 23, 2026; Revised February 5, 2026; Accepted February 5, 2026)

Abstract: Long lifetime, low power consumption, and environmental friendliness have enabled light-emitting diode (LED) lighting to rapidly replace conventional light sources such as incandescent and fluorescent lamps. In particular, AC-LED lighting systems can be directly powered by commercial alternating current (AC) sources; however, they suffer from significant luminance deviation caused by uneven current distribution among LED light-emitting modules. This paper proposes a lighting control method that improves flicker performance while maintaining lamp brightness and effectively reduces luminance deviation in AC-LED lighting. The proposed method reduces luminance deviation by controlling the lighting order of multiple LED light-emitting modules. Among four LED modules, only the required number of modules is continuously turned on, and the lighting priority alternates between rectification cycles. Specifically, during odd rectification cycles, LED modules are activated sequentially in ascending order (11→12→13→14), whereas during even rectification cycles, they are activated in descending order (14→13→12→11). By alternately applying continuous lighting control with opposite activation orders, the proposed reverse alternating lighting control method equalizes the current distribution among LED modules. As a result, luminance uniformity is improved, electrical stress concentration on specific modules is reduced, and the operational lifetime of the LED modules is extended compared with the conventional fixed-sequence lighting control method.

Keywords: AC-LED lighting, Multi-LED modules, Luminance deviation, Continuous lighting control, Reverse alternating lighting control method

1. 서론

수명이 길고 소비 전력이 낮으며 친환경적인 LED 조명은 교류 상용 전원을 직접 사용할 수 있게 되면서 조명 시장에서 백열등이나 형광등과 같은 전통 조명을 빠르게 대체하고 있다 [1]. 하지만 교류 LED 조명은 여전히 개선해야 할 문제가 많이 있다. 첫째로 교류 LED 조명에서는 교

✉ Byungcheul Kim; philip-b.kim@gnu.ac.kr

Copyright ©2026 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.

류 입력 전압의 변동에 따른 LED 램프의 휘도 편차가 매우 크기 때문에 전류 제한이 필요하다. 이를 위해 교류 입력 전압의 크기가 변해도 LED 전류를 항상 일정하게 유지할 수 있는 교류 구동 LED 조명 기술이 필요하다 [2]. 둘째로 LED의 문턱 전압(threshold voltage)이 높을수록 전류 파형에서 전류가 흐르지 않는 구간이 더 많이 발생하므로 문턱 전압을 낮추어야 한다. 순시 정류 전압에 따라 LED 발광 모듈의 점등 개수를 제어하여 LED 램프의 등가 정격 전압을 조절할 수 있다 [3]. 셋째로 교류 입력 전압은 정현파인데 LED 발광 모듈에 흐르는 전류가 계단파이므로 [4,5] 대전력 LED 조명에는 부적합하다. 따라서 LED 발광 모듈에 흐르는 전류를 계단파가 아닌 교류 전압과 같은 위상의 정현파로 제어할 수 있다면 THD (total harmonic distortion) 특성이 개선된다 [3,6]. 넷째로 교류 입력 전압이 0 V일때 LED는 점등되지 않으므로 퍼센트 플리커(percent flicker)가 100%이다. 독서용, 방송용, 경기장용 조명 등과 같이 고품질이 요구되는 조명에 사용이 제한된다. 이를 해결하기 위하여 광 플리커(light flicker)를 개선하는 방법이 연구되고 있다 [5,7-11]. 마지막으로 여러 개의 LED 발광 모듈을 사용하면 계속 소등된 LED 발광 모듈과 계속 점등된 LED 발광 모듈의 휘도 차이를 사람이 느낄 수도 있다. 더욱이 고정 순차 점등 방식은 LED 발광 모듈마다 흐르는 전류가 다르기 때문에 휘도의 차이가 발생할 수도 있다. LED 램프가 점 광원일 때는 휘도의 차이가 발생하여도 사람이 쉽게 인지하지 못하지만, 면 광원일 때는 휘도의 차이를 인지할 수도 있다.

본 논문에서는 교류 LED 조명에서 다수의 LED 발광 모듈을 사용할 때 발생하는 모듈 간 휘도 불균일 문제에 주목하였다. 특히 고정 순차 점등 방식에서 나타나는 전류 및 휘도 편차를 개선하기 위한 역순환 점등 방식을 제안하였다. 제안된 방식은 LED 발광 모듈 간 전류 분포를 균일화함으로써 휘도 균일성을 향상시키고, 특정 모듈에 집중되는 전기적 스트레스를 완화하여 LED 수명 개선 효과를 동시에 제공한다.

2. 실험방법

교류 LED 조명에서는 LED의 문턱 전압이 높을수록 전류 파형에서 전류가 흐르지 않는 구간이 더 많이 발생한다. 이 문제를 개선하기 위하여 LED 램프는 1개 이상의 LED 발광 모듈을 직렬로 구성한다. 그림 1에 LED 발광 모듈 4개를 직렬 연결한 교류 LED 조명을 나타냈다.

그림 1에 나타난 교류 LED 조명은 교류 입력을 정류 전압으로 변환하는 정류부, 4개의 LED 발광 모듈(11-14)이 직렬 연결된 부하부, 각 LED 발광 모듈과 병렬 연결된 스위치(S11-S14)로 구성되는 스위치 블록, 전류원(CS) [3], 그리고 정현파 기준 전류(Csin) 생성, 순시 정류 전압 검출, 스위치 제어 신호(SC11-SC14)를 생성하는 제어기(sw control logic/sine generator/voltage detector)로 구성된다.

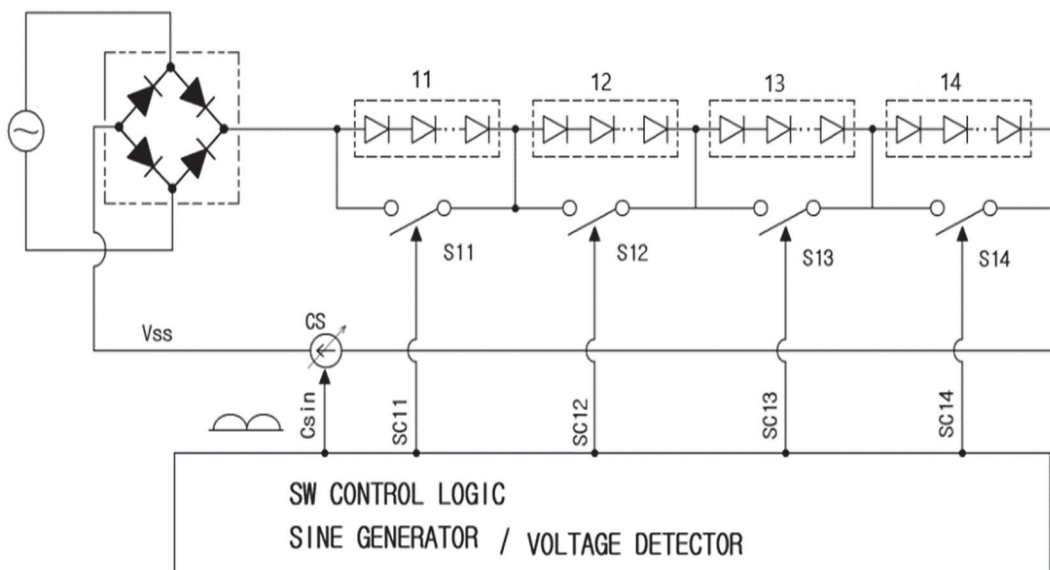


Fig. 1. The AC-LED lighting with multi-LED modules.

3. 결과 및 고찰

LED 발광 모듈의 전류-전압 특성 곡선을 그림 2에 나타냈다.

그림 2에 나타낸 LED 발광 모듈의 전류-전압 특성 곡선은 LED 발광 모듈 11, 12, 13, 그리고 14가 모두 연결된 경우이며, 그림 1에서 모든 스위치(S11, S12, S13, S14)가 차단된 경우이다.

LED 발광 모듈의 전류-전압 특성 곡선을 간단하게 직선 d로 연결하면 132 V에서 전류는 0 mA이고, 220 V에서는 20 mA의 전류가 흐르는 것을 알 수 있다.

직선 a는 4개의 LED 발광 모듈을 균등하게 4등분하여 그중 1개의 LED 발광 모듈만을 점등하는 경우로서, 직선 a의 등가 직렬 저항(equivalent series resistance)은 LED 발광 모듈(11-14) 4개의 1/4이 되기 때문에 정격 전압은 직선 d의 1/4 인 33 V가 되고, 전류 20 mA가 흐르는 전압은 직선 d의 1/4 인 55 V가 된다.

직선 b는 4개의 LED 발광 모듈을 균등하게 4등분하여 그중 2개의 LED 발광 모듈을 직렬 연결한 경우로서, 직선 b의 등가 직렬 저항은 LED 발광 모듈(11-14) 4개의 2/4가 되기 때문에 정격 전압은 직선 d의 2/4 인 66 V가 되고, 전류 20 mA가 흐르는 전압은 직선 d의 2/4 인 110 V가 된다.

직선 c는 4개의 LED 발광 모듈을 균등하게 4등분하여 그중 3개의 LED 발광 모듈을 직렬 연결한 경우로서, 직선 c의 등가 직렬 저항은 LED 발광 모듈(11-14) 4개의 3/4이 되기 때문에 정격 전압은 직선 d의 3/4 인 99 V가 되고, 전류 20 mA가 흐르는 전압은 직선 d의 3/4 인 165 V가 된다.

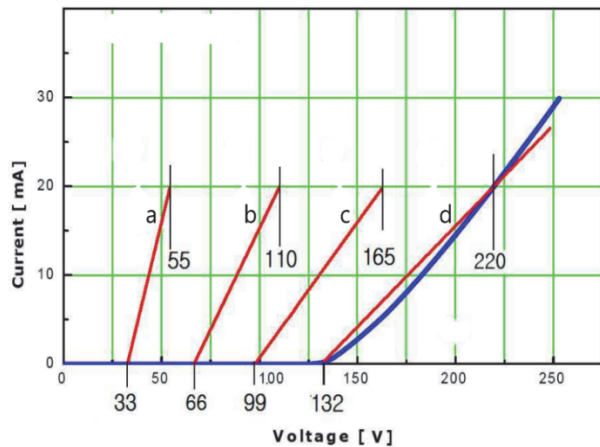


Fig. 2. Current-voltage characteristic curve of the LED modules.

그림 2에 나타낸 LED 발광 모듈의 전류-전압 특성 곡선으로부터 전원 주파수가 50 Hz이고 최대 정류 전압이 230 V인 경우의 전류와 전압을 그림 3과 같이 나타낼 수 있다.

그림 3에서 정류 전압은 전압 파형 V로 나타냈다. 그리고 LED 발광 모듈 11, 12, 13, 그리고 14가 모두 연결된 부하에 흐르는 정류 전류는 전류 파형 I로 나타냈다. 전류 파형 1a와 1a'는 그림 2의 직선 a를 이용하여 정류 전압에 대한 부하 전류를 나타낸 것이고, 전류 파형 2b와 2b'는 그림 2의 직선 b를 이용하여 정류 전압에 대한 부하 전류를 나타낸 것이다. 또한 전류 파형 3c와 3c'는 그림 2의 직선 c를 이용하여 정류 전압에 대한 부하 전류를 나타낸 것이며, 전류 파형 4d와 4d'는 그림 2의 직선 d를 이용하여 정류 전압에 대한 부하 전류를 나타낸 것이다.

전류원에 제공되는 정현파 설계 전류는 최고 순시 전류가 20 mA인 검은색 점선 파형 DI로 나타냈다. 제어기에 의해 스위치가 적절히 조절된 경우에 흐르는 정류 전류는 붉은색 점선 파형 CI로 나타냈다. 그림 1에 나타낸 교류 LED 조명 회로에서 교류 전원과 직렬로 저항을 연결하여 LED 발광 모듈에 흐르는 정류 전류를 측정하였다.

0 ms에서 설계 전류 DI와 직선 모델 전류 1a가 만나는 T1까지는 1개의 LED 발광 모듈이 점등되도록 스위치 블록을 설정하였다. 이때 설계 전류 DI보다 낮은 모델 전류 1a가 흐르고 있으므로 전류원 양단 전압을 최소(전류원 포화 전압)로 만들어 부하에 모델 전류 1a가 흐르게 하였다. T1에서 설계 전류 DI와 직선 모델 전류 2b가 만나는 T2까지는 계속 1개의 LED 발광 모듈이 점등되도록 스위치 블록을 설정하였다. 이때 설계 전류 DI보다 높은 모델 전류 1a가 흐르므로 전류원(CS) 양단에 전압 강하를 일으켜 1개의 LED 발광 모듈 양단 전압을 조절하여 부하 전류를 설계 전류 DI와 일치시켰다. 이 구간에서 점등되는 LED 발

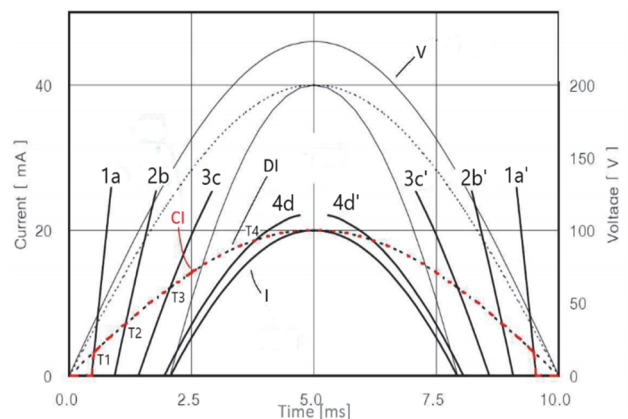


Fig. 3. Current and voltage of the LED modules for maximum pulsating voltage of 230 V and power frequency of 50 Hz.

광 모듈은 LED 발광 모듈(11-14) 중 어느 하나가 계속 점등된다(1단 연속 점등 방식). 1단 연속 점등 방식에서는 계속 소등된 LED 발광 모듈과 계속 점등된 LED 발광 모듈의 밝기 차이를 사람이 느낄 수도 있으므로, 모든 LED 발광 모듈을 빠르게 번갈아 가면서 교대로 한 번에 1개의 LED 발광 모듈을 점등하여 모든 LED 발광 모듈의 밝기를 동일하게 느끼도록 하는 것이 중요하다(1단 순환 점등 방식).

T2에서 설계 전류 DI와 직선 모델 전류 3c가 만나는 T3까지는 2개의 LED 발광 모듈이 점등되도록 스위치 블록을 설정하고, 설계 전류 DI보다 높은 모델 전류 2b가 흐르므로 전류원(CS) 양단에 전압 강하를 일으켜 2개의 LED 발광 모듈 양단 전압을 낮추어 부하 전류를 설계 전류 DI와 일치시켰다. 이 구간에서 점등되는 LED 발광 모듈은 LED 발광 모듈(11-14) 중 어느 2개가 계속 점등된다(2단 연속 점등 방식). 2단 연속 점등 방식에서도 모든 LED 발광 모듈을 빠르게 번갈아 가면서 교대로 한 번에 2개의 LED 발광 모듈을 점등하여 밝기 차이를 최소화하는 것이 중요하다(2단 순환 점등 방식).

T3에서 설계 전류 DI와 직선 모델 전류 4d가 만나는 T4까지는 3개의 LED 발광 모듈이 점등되도록 스위치 블록을 설정하고, 설계 전류 DI보다 높은 모델 전류 3c가 흐르므로 전류원(CS) 양단에 전압 강하를 일으켜 3개의 LED 발광 모듈 양단 전압을 낮추어 부하 전류를 설계 전류 DI와 일치시켰다. 이 구간에서 점등되는 LED 발광 모듈은 LED 발광 모듈(11-14) 중 어느 3개가 계속 점등된다(3단 연속 점등 방식). 3단 연속 점등 방식에서도 모든 LED 발광 모듈의 밝기를 동일하게 느끼도록 3단 순환 점등 방식을 적용하는 것이 중요하다.

설계 전류 DI와 직선 모델 전류 4d가 만나는 T4에서 정류 전압 위상 90° 까지는 4개의 LED 발광 모듈이 모두 점등되도록 스위치 블록을 설정하고, 설계 전류 DI보다 높은 모델 전류 4d가 흐르므로 전류원(CS) 양단에 전압 강하를 일으켜 4개의 LED 발광 모듈 양단 전압을 낮추어 부하 전류를 설계 전류 DI와 일치시켰다. 이 구간에서는 모든 LED 발광 모듈(11-14)이 계속 점등된다(4단 연속 점등 방식).

정류 전압 1주기 동안 고정 순차 점등 방식에 의해 LED 발광 모듈에 흐르는 전류를 그림 4에 나타냈다. 고정된 순서로 각 단 연속 점등 방식을 시행하는 고정 순차 점등 방식은 모든 정류 주기에서 1단 연속 점등은 LED 발광 모듈 11로 점등하고, 2단 연속 점등은 LED 발광 모듈 11과 12가 점등되며, 3단 연속 점등은 LED 발광 모듈 11, 12, 13이 점등되고, 4단 연속 점등은 모든 LED 발광 모듈(11, 12, 13, 14)을 점등하는 방식이다.

그림 4(a)와 같이 LED 발광 모듈 11에는 다른 LED 발광

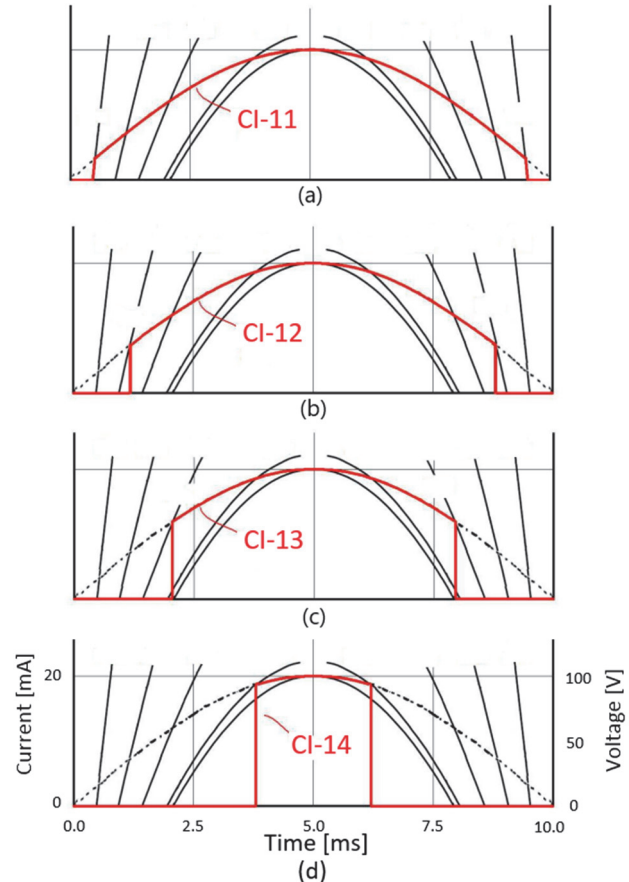


Fig. 4. The current flowing through LED module during one cycle of pulsating voltage by the fixed-sequence lighting control method: (a) LED module 11, (b) LED module 12, (c) LED module 13, and (d) LED module 14.

모듈(12-14)보다 전류 파형 CI-11과 같이 가장 많은 전류(17.9 mA)가 흐르며, LED 발광 모듈 12에는 그림 4(b)와 같이 LED 발광 모듈 11보다 전류 파형 CI-12와 같이 적은 전류(17.6 mA)가 흐른다. 또한 그림 4(c)와 같이 LED 발광 모듈 13에는 전류 파형 CI-13과 같이 더 적은 전류(17.1 mA)가 흐르고, LED 발광 모듈 14에는 그림 4(d)의 전류 파형 CI-14와 같이 가장 적은 전류(16.3 mA)가 흐른다. 이와 같이 LED 발광 모듈마다 흐르는 전류가 다르기 때문에 휘도의 차이가 나타날 수 있으며, 상대적으로 많은 전류가 흐르는 LED 발광 모듈은 수명이 더 짧아질 수 있다.

LED 발광 모듈간의 휘도 차이는 역순환 점등 방식으로 감소시킬 수 있다. 홀수 번째 정류 주기에서는 LED 발광 모듈 11→12→13→14 순서로 낮은 번호의 LED 발광 모듈이 우선하여 점등되는 연속 점등 방식을 적용하였다. 즉, 1단 연속 점등은 LED 발광 모듈 11로 점등하고, 2단 연속 점등은 LED 발광 모듈 11과 12를 점등하고, 3단 연속 점

등은 LED 발광 모듈 11, 12, 13을 점등하며, 4단 점등은 모든 LED 발광 모듈을 점등하는 낮은 번호의 LED 발광 모듈부터 우선 연속 점등 방식을 실시하였다. 반면 짝수 번째 정류 주기에서는 LED 발광 모듈 14→13→12→11 순서로 높은 번호의 LED 발광 모듈이 우선하여 점등되는 연속 점등 방식을 적용하였다. 즉, 1단 연속 점등은 LED 발광 모듈 14를 점등하고, 2단 연속 점등은 LED 발광 모듈 14와 LED 발광 모듈 13을 점등하며, 3단 연속 점등은 LED 발광 모듈 14, 13, 12를 점등하며, 4단 점등은 모든 LED 발광 모듈을 점등하는 높은 번호의 LED 발광 모듈부터 우선 연속 점등 방식을 적용하였다. 이와 같이 서로 반대되는 점등 순서를 교대로 적용하는 역순환 점등 방식을 사용하면 LED 발광 모듈마다 평균 전류가 17.1 mA로 균일하게 흐른다. 두 방식 모두 플리커 지수(flicker index)는 0.13으로 동일하지만, 모든 LED 발광 모듈이 골고루 열화되는 역순환 점등 방식이 LED 수명을 연장하고 장기적인 광학 품질을 안정화시키는 효과가 있다.

4. 결론

본 논문에서는 교류 LED 조명의 휘도 편차를 감소시키기 위한 점등 방식에 대하여 연구하였다. 제안된 역순환 점등 방식은 LED 발광 모듈마다 흐르는 평균전류가 17.1 mA로 균일하였다. 두 점등 방식 모두 플리커 지수(flicker index)가 0.13으로 동일하였으나, 특정 모듈에 집중되던 전류 스트레스를 골고루 분산시킴으로써 LED 발광 모듈의 열화 속도를 완화하고, 장기적인 신뢰성 및 수명 향상 가능성을 확인하였다. 따라서 본 연구에서 제안한 점등 방식은 고품질 교류 LED 조명 시스템에 효과적으로 적용될 수 있다.

ORCID

Byungcheul Kim

<https://orcid.org/0000-0001-7756-8671>

감사의 글

이 연구는 2024년도 경상국립대학교 연구년제 연구교수 연구지원비에 의하여 수행되었음.

REFERENCES

- [1] R. Dayal, K. Modepalli, and L. Parsa, *Proc. IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE)* (IEEE, Raleigh, NC, USA, 2012), pp. 4230–4234.
doi: <https://doi.org/10.1109/ECCE.2012.6342248>
- [2] D. W. Lee, H. M. An, and B. Kim, *J. Korean Inst. Electr. Electron. Mater. Eng.*, **35**, 466 (2022).
doi: <https://doi.org/10.4313/JKEM.2022.35.5.7>
- [3] D. W. Lee, B. H. Lee, and B. Kim, *J. Korean Inst. Electr. Electron. Mater. Eng.*, **36**, 255 (2023).
doi: <https://doi.org/10.4313/JKEM.2023.36.3.7>
- [4] K. Seo, V. H. Nguyen, J. Jung, J. Park, and H. Song, *IEICE Electron. Express*, **11**, 20140810 (2014).
doi: <https://doi.org/10.1587/elex.11.20140810>
- [5] J. Kim and S. Park, *J. Semicond. Technol. Sci.*, **15**, 390 (2015).
doi: <https://doi.org/10.5573/JSTS.2015.15.3.390>
- [6] K. I. Hwu and W. C. Tu, *IEEE Trans. Ind. Inform.*, **9**, 1330 (2013).
doi: <https://doi.org/10.1109/TII.2012.2226042>
- [7] D. W. Lee, H. M. An, and B. Kim, *J. Nanoelectron. Optoelectron.*, **10**, 234 (2015).
doi: <https://doi.org/10.1166/jno.2015.1737>
- [8] K. Örüklü and D. Yildirim, *Eskisehir Tech. Univ. J. Sci. Technol. A Appl. Sci. Eng.*, **23**, 109 (2022).
doi: <https://doi.org/10.18038/estubtda.978478>
- [9] Y. Shen, J. Xia, and C. Cai, *World Electr. Veh. J.*, **14**, 75 (2023).
doi: <https://doi.org/10.3390/wevj14030075>
- [10] J. Tan and N. Narendran, *J. Light Vis. Environ.*, **38**, 6 (2014).
doi: <https://doi.org/10.2150/jlve.IEIJ130000531>
- [11] S. F. Wang, C. M. Kung, Y. C. Yeh, C. R. Lee, and W. T. Tsai, *IEEE Access*, **11**, 97400 (2023).
doi: <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2023.3308197>