

세라믹 메탈할라이드 램프의 아크튜브 열화현상 분석

김우영¹, 이세일¹, 양종경¹, 장혁진², 박대희^{1,a}

¹ 원광대학교 정보통신공학과

² 한국조명연구원

Analysis of Degradation Phenomena in Arc-Tube of Ceramic Metal Halide Lamp

Woo-Young Kim¹, Se-Il Lee¹, Jong-Kyung Yang¹, Hyeok-Jin Jang², and Dae-Hee Park^{1,a}

¹ Department of Electrical & Information Engineering, Wonkwang University, Iksan 570-749, Korea

² Korea Institute of Lighting Technology, Bucheon 420-806, Korea

(Received September 20, 2010; Revised November 4, 2010; Accepted November 5, 2010)

Abstract: Recently, the demand of ceramic metal halide lamp has been expanded. Therefore, the lamp with high efficiency and long lifetime are increasing and the evaluation of reliability is needed. In this paper, the degradation phenomena of ceramic metal halide lamp was studied. The lamp was tested for 3000 on/off cycles with each cycle having a duration of 20 minutes on and 20 minutes off based on the accelerated aging experiment based on "Reliability Standards RS C 0085". As result, the corrosion of arc tube and leak was appeared from reaction between inner wall of PCA and chemical elements, and distortion of electrode was resulted from difference of thermal expansion between arc tube of PCA and electrode. Also, the efficiency of lamp was decreased by the change of inner pressure, operation temperature, and driving voltage from wall blackening.

Keywords: Ceramic metal-halide, Arc-tube, Deterioration, Electrode, HID

1. 서 론

HID 램프의 한 종류인 메탈할라이드 램프는 석영 재질의 아크튜브 (arc-tube) 내에 Na, Tl, In, Sc 등의 금속 할로젠 화합물과 완충기체 (buffer gas)로 수은이 봉입되어 있고 그 봉입금속의 발광으로 광 특성 개선과 함께 뛰어난 연색성 특성을 보인다 [1]. 이로 인해 그 적용분야가 점차로 넓어져 외부 조명용이나 대형 산업체의 공장 내부 조명용으로 사용되어 지고 있다. 하지만 뛰어난 광학적 특성을 보이는 금속 할로젠 화합물의 경우에 석영관 내에서의 재반응을 일

키는 특성 때문에 고온에서 사용할 수 없는 단점이 있었으며, 지속적인 점등시간의 경과에 따른 아크튜브 내의 나트륨 화합물의 소진으로 색온도 및 연색성에 영향을 미치고, 단수명의 원인을 제공하였다. 이러한 단점을 보완하기 위해 최근에는 순도 99 [%] 이상의 다결정 알루미늄 (polycrystalline alumina, PCA)를 아크튜브로 사용한 세라믹 메탈할라이드 램프가 개발되었다. 세라믹 아크튜브는 높은 온도에서 동작할 수 있는 새로운 혼합물을 사용할 수 있고 램프 수명 동안 나트륨과의 반응에 내성이 있어 나트륨 손실을 줄일 수 있어 기존의 석영관 램프에 비해 높은 연색성과 색 안정성, 개선된 광속유지율과 장수명 특성을 보였다 [2,4]. 이러한 개선된 특성으로 인해 기존

a. Corresponding Author; parkdh@wonkwang.ac.kr

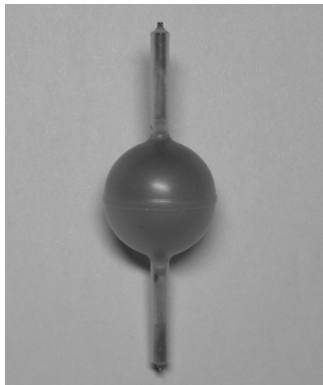


Fig. 1. The wall blackening of arc tube.

의 사용 범위를 넘어 거리의 가로등 및 보안등, 종합 운동장, 공장, 체육관, 간판, TV, 무대조명, 프로젝터 그리고 자동차 헤드라이트 등의 분야에 까지 범위가 확대되고 있다 [5]. 이렇게 사용범위가 확대됨에 따라 램프의 신뢰성 또한 중요한 요소로 여겨지게 되었다.

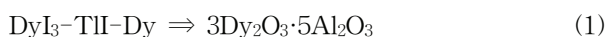
따라서 본 논문에서는 세라믹 메탈할라이드 램프에 대해 구형 (spherical)과 원통형 (cylindrical) 두 가지 형태의 아크 튜브를 바탕으로 가속열화 시험을 하였을 경우 구조적, 열적, 전기적 특성 분석을 통해 열화로 인한 영향에 대해 확인하고자 하였다.

2. 실험 방법

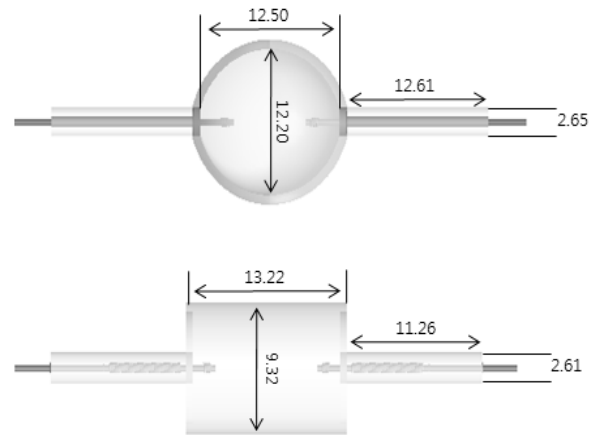
2.1 아크튜브의 흑화

세라믹 아크튜브는 램프 동작 후 열화가 되기 시작하면 아크튜브 내벽에 그림 1과 같은 흑화현상이 나타나게 되고 이는 광속저하를 야기한다.

흑화현상은 아크튜브 내부 봉입물이 램프 동작 시 식 1과 같이 PCA 아크튜브와 반응하게 되어 발생하게 된다 [7,8].



DyI₃-TII-Dy가 분해되는 과정에서 중력에 의해 아크튜브 하단부의 Dy 밀도가 더 높아지게 되는데 이로 인해 관벽흑화가 중력방향에서 더 빠르게 진행이 되며 [9-11], 아크튜브 내 플라즈마의 불안정한 대류를 야기하여 아크튜브 크랙의 주요한 원인이 된다



[Unit : mm]

Fig. 2. Construction and dimension of Arc tube.

[12].

또한 아크튜브 내벽에서 텅스텐 금속을 관찰할 수 있는데 이는 방전 초기 이그니션 (ignition) 동작 시 텅스텐 전극의 스퍼터링 (sputtering)이 원인으로 흑화현상을 보이게 된다. 텅스텐에 의한 흑화는 플라즈마 대류의 영향이 크지 않기에 중력방향과 상관없이 고른 분포를 보이게 된다.

2.2 시료 및 실험방법

열화실험은 ‘신뢰성기준 RS C 0085’에 기초하여 베이스를 상향으로 한 수직방향으로 점등하였고 외부온도는 25 [°C]를 유지하였다. 전원 주파수는 60 [Hz], 안정기는 IEC 61347-2-9의 규정을 만족하는 초크 코일형 안정기를 사용하였다. 램프는 아크튜브 형태에 따른 열화특성 비교를 위해 Osram社의 150 [W]급 구형 아크튜브 타입 Powerstar HCI-T NDL과 원통형 아크튜브 타입 Powerball HCI-T NDL 두 종류를 사용하였다. 시료의 아크튜브 형태는 그림 2와 같다.

시료는 텅스텐에 의한 흑화유도와 초기 구동에 의한 이그니션 발생 및 급격한 온도의 변화로 인해 아크튜브가 가장 큰 스트레스를 받는 것을 감안하여 그림 3과 같은 실험 장비를 구축하여 20분 점등 후 20분 소등을 한 주기로 3,000회를 반복하는 가속열화실험을 하였고, ON/OFF 방식이 아닌 지속적으로 구동하였을 경우 약 5,000시간의 구동 시간으로 확인할 수 있다 [1].

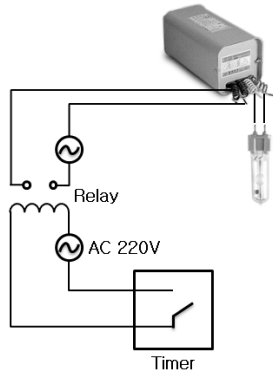


Fig. 3. Accelerated degradation test equipment.

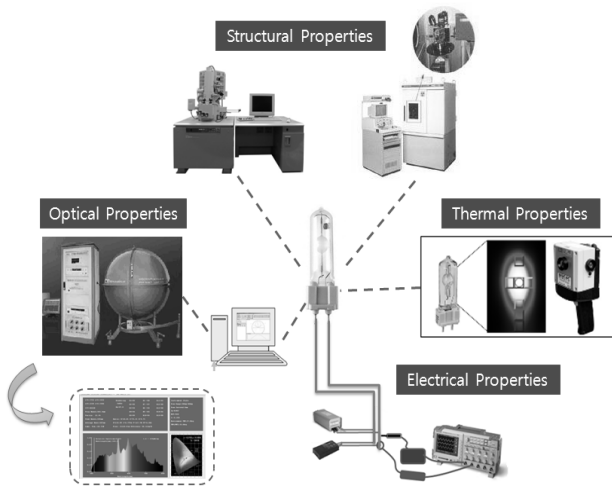


Fig. 4. Measurement equipments.

2.3 측정장비 및 방법

구조적 특성 분석을 위해 아크튜브를 절단한 후 미세초점 3차원 X선 투시검사 장치 (Shimadzu, SMX-225CT, Japan)를 통해 아크튜브 및 전극의 구조적 변화를 확인하였고 주사전자현미경 (Hitach, S-4800, Japan)으로 전극과 아크튜브 내부 관벽을 촬영 후 에너지 분산형 X선 분광분석기 (Horiba, EDS, Japan)로 성분분석을 하였다.

아크튜브 내부의 열적 특성을 확인하기 위해 비접촉식 열화상 카메라 (IRISYS, IRI 1001E, UK)를 사용하여 상부, 중심부, 냉점부의 온도를 측정하였으며 전기적 특성 평가를 위해 오실로스코프 (Tektronix, TPS-2014, USA)를 사용하여 30분의 안정화 시간을

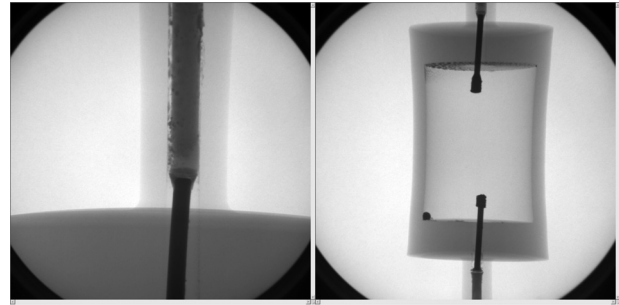


Fig. 5. Structural change of a arc tube by degradation.

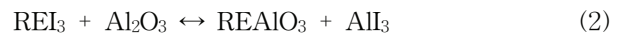
가진 후 안정화 상태의 전압, 전류 특성을 확인하였다. 마지막으로 열화로 인한 광속 변화를 확인하기 위해 적분구 시스템 (Everfine, PMS-50, China)을 사용하여 실험 전후의 광속변화를 측정, 비교하였다. 그림 4에 측정장비를 나타내었다.

3. 결과 및 고찰

3.1 아크튜브와 전극의 구조 및 성분 변화

PCA 아크튜브는 cool-down시 가장 큰 스트레스를 받는다 [13]. 가속열화로 인한 스트레스의 반복은 세라믹 아크튜브의 크랙과 봉지부의 금속 할로겐화물의 간격에의 침입을 유발하게 된다. 그림 5를 보면, 전극과 세라믹 아크튜브 간 열팽창계수 차이로 인해 접촉 부분의 간격이 벌어지고 그 사이로 원소들이 침입한 것을 확인 할 수 있다. 이는 아크튜브와 전극의 열화를 촉진하며 전극의 틀어짐을 유발하게 된다.

희토류 금속 요오드화물 (rare earth iodides)은 고온에서 PCA 관벽과 식 2와 같은 반응을 일으켜 아크튜브를 부식시키게 된다 [14].



여기서, RE는 Dy, Ho, Tm등의 희토류 금속을 나타낸다.

아크튜브의 열화는 리크 (leak)에 도달하게 하여 내부 증기압 변화의 원인이 된다. 또, 램프 내에 존재하는 냉점 (cold-spot)에 방전 시 증발하지 않은 침전물 (salt)이 쌓이게 되고 전극에도 증착되게 되는데 이 또한 아크튜브 내부 온도 변화 및 증기압 변화의 원인이 된다.

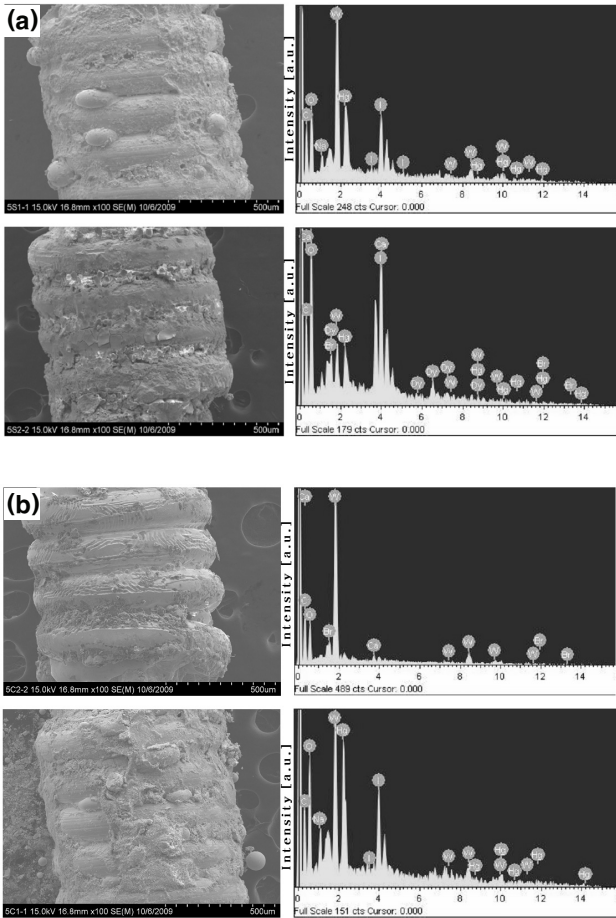


Fig. 6. The change of the electrode after accelerated degradation test; (a) Spherical arc-tube and (b) Cylindrical arc-tube.

그림 6은 그룹 2의 실험 전후 전극을 주사전자현미경으로 촬영한 후 EDS로 성분분석을 한 결과이다. 전극이 열화되면서 전자 방출을 돕기 위해 전극 표면에 도포되어 있던 이산화탄소로 사료되는 에미터(emitter)가 소모되고 텅스텐 전극 또한 증발되게 된다. 이렇게 증발된 텅스텐은 그림 7과 같이 비교적 온도가 낮은 관벽과 증착하게 되어 흑화현상을 유발하게 된다.

내부 증기압 변화 및 흑화현상으로 인해 램프의 광속이 저하되고 내부 봉입가스의 구성비 변화로 인해 램프의 전체적인 광특성이 변화하게 된다.

표 1에서 EDS로 측정된 전극의 성분을 백분율로 나타내었다. 전극의 표면 일부분만을 측정하였기에 전체적인 전극의 성분이라고는 할 수는 없지만 에미

Table 1. Ingredient analysis of the electrode.

Element	Spherical type		Cylindrical type	
	Initial	Test	Initial	Test
C	44.29	33.75	60.63	40.95
O	34.57	44.02	28.91	39.54
Na	2.72	-	-	4.23
I	7.91	10.31	-	6.82
W	7.13	1.06	8.41	4.51
Hg	3.38	1.02	-	3.95
Ca	-	7.01	0.92	-
Br	-	1.08	1.13	-
Dy	-	1.75	-	-

[단위: %]

터의 소모와 증발되지 않은 여러 원소들이 전극에 증착했음을 확인할 수 있다.

그림 7은 관벽의 성분변화를 EDS로 측정된 결과이다. PCA 결정 사이로 텅스텐이 침투한 모습을 확인할 수 있다. 특히 원통형 아크튜브의 경우는 관벽 열화가 더욱 두드러짐을 알 수 있다.

3.2 내부 온도 변화 및 전기적 특성 변화

내부 증기압 변화와 아크튜브의 흑화에 의한 열흡수, 전극의 열화로 동작온도 상승하였으며, 그림 8과 같이 아크튜브 내부의 온도의 상승은 램프 구동전압의 증가를 가져왔다.

여기서 측정된 온도는 외관의 아웃벌브 및 반사계수 차이로 인해 상대적인 값만 확인할 수 있지만, 전체적으로 아크튜브의 온도가 상승하였음을 확인할 수 있다. 특히 원통형 아크튜브 타입은 중심부의 온도가 70 [°C] 가까이 증가한 반면에 냉점부의 온도는 오히려 감소하였다. 아크튜브 형태의 특성상 구형에 비해 플라즈마 대류가 원활하지 못해 증발되지 않은 salt가 냉점부에 더 많이 쌓이게 됨에 따라 더 많은 봉입물 손실과 열화를 초래하게 된다. 이러한 구동 온도의 상승은 동작 전압 상승을 가져오게 되어 램프의 효율 감소 원인이 된다.

표 2는 30분의 안정화 시간을 가진 후의 전기적 특성을 측정된 값이다. 구형의 경우 전압이 크게 상승한 것이 확인되는 반면에 원통형의 경우 오히려 전압이 감소하고 전류는 증가하였는데 이는 다량의 봉입물 손실로 인해 급격한 광속의 저하와 관계가 있을 것이라 사료된다.

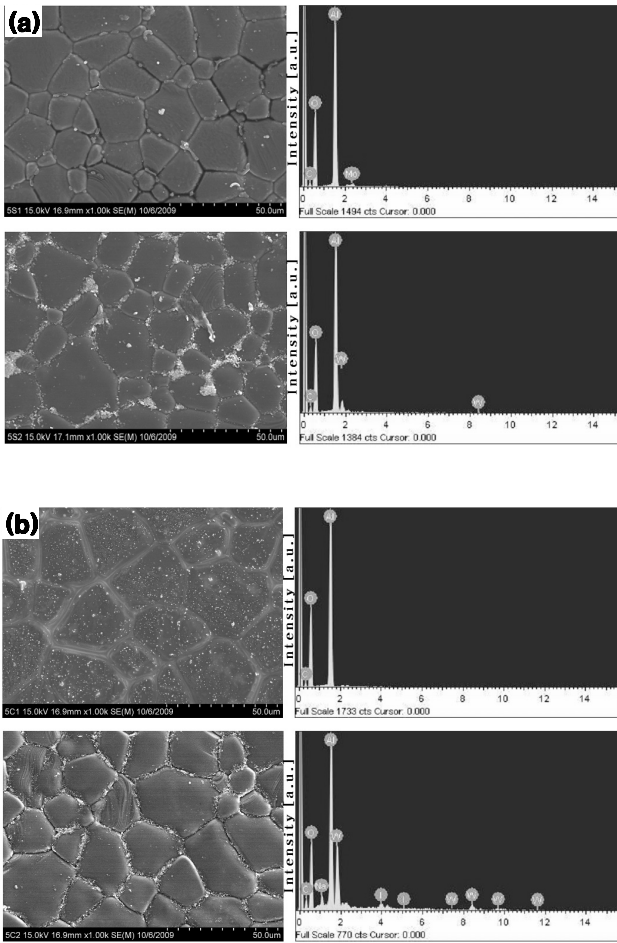


Fig. 7. The change on the surface of the inner wall after accelerated degradation test; (a) Spherical arc-tube and (b) Cylindrical arc-tube.

3.3 광출력 변화

표 3에 실험 전후의 광속 및 효율 변화를 정리하였다. 실험 후 구형 아크튜브는 25.2 [%]의 광속 감소를, 원통형의 경우는 27.4 [%]의 광속감소를 보였다. 잦은 점멸을 하게 되는 가속열화의 특성상 전극 스퍼터링에 의한 흑화가 대부분을 차지하기에 두 시료간의 광속 저하율은 크게 차이가 나지 않았다. 하지만 앞서 설명한 원활한 플라즈마 대류로 인한 아크튜브 내 고온 온도분포로 인해 전극 스퍼터링 이외의 광속 감소 요인이 적은 원통형 아크튜브 타입의 광속 저하가 조금 더 적음을 확인할 수 있다. 이를 바탕으로 실험 조건을 달리하여 점등 횟수를 감소시켜 텅스텐

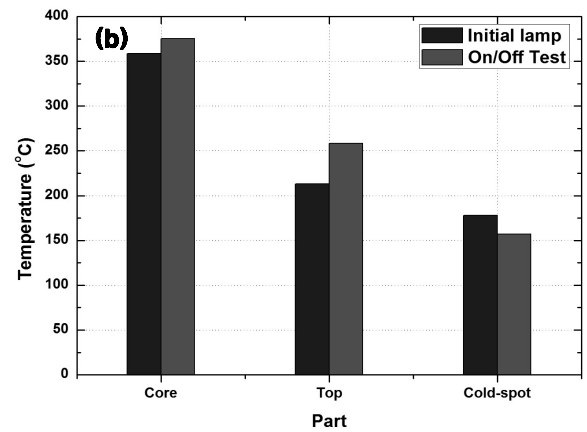
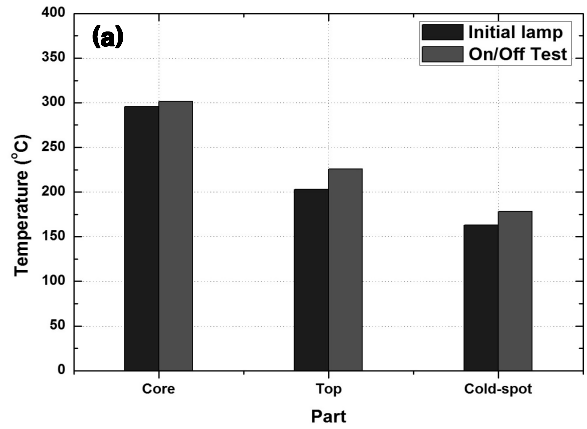


Fig. 8. The change of temperature in the arc-tube; (a) Spherical arc-tube and (b) Cylindrical arc-tube.

Table 2. The change of the electrical characteristic.

	Spherical type		Cylindrical type	
	Initial	Test	Initial	Test
Voltage [V]	90.2	97.0	85	82.1
Current [I]	1.61	1.63	1.63	1.68
Resistance [Ω]	56.02	59.5	52.14	48.86

Table 3. The change of the optical power by degradation.

	Spherical type		Cylindrical type	
	Initial	Test	Initial	Test
Luminous flux [lm]	10,960	8752	9800	7693
Efficiency [lm/W]	73.1	58.3	65.3	51.3
Luminous flux degradation ratio [%]	-	25.2	-	27.4

원소에 의한 흑화를 줄인다면 두 시료간의 광속 저하율 차이는 더 커지게 될 것으로 사료된다.

4. 결론

본 논문에서는 세라믹 메탈할라이드 램프의 수명 특성을 알아보기 위하여 램프를 가속열화 하여 램프의 핵심이 되는 세라믹 아크튜브의 열화로 인한 구조적, 전기적, 열적 특성 변화를 분석하였고 이로 인한 광속 저하를 확인하였다.

가속열화를 위한 잦은 점멸에 의한 스트레스로 전극의 틀어짐을 유발하였고 내부에 봉입된 회토류 금속 요소드화물이 고온에서 PCA 관벽과 반응하여 전극과 아크튜브의 부식의 직접적인 원인이 되었다. 또한 열화에 의한 내부 증기압이 변화와 아크튜브의 흑화에 의한 열흡수로 아크튜브 내부 온도가 상승하게 되었으며 램프 구동전압 증가의 원인이 되었다. 형태에 따라서는 플라즈마 대류가 이루어지는 구형 아크튜브의 경우 원통형에 비해 냉점부로 인한 봉입물 손실이 적었고 이로 인해 광출력 손실 역시 작아짐을 확인하였다.

본 논문에서 분석한 열화 원인을 바탕으로 PCA 아크튜브와 가장 근접한 열팽창계수를 갖는 전극의 재질 선택, 효율적인 전극 및 에미터 설계 및 아크튜브 형태의 연구가 지속적으로 이루어져야 하겠다.

감사의 글

본 논문은 전북지방중소기업청 “태양광 조명구동 시스템 개발”의 지원에 의해 작성되었습니다.

REFERENCES

- [1] T. K. Park, Y. J. Lee, H. S. Jeong, C. S. Kim, J. S. Kim, and S. H. Cheon, *KIIE spring conference* (KILE, Chungbuk Univ., Korea, 2005) p. 674.
- [2] W van Erk, J Tu, and J Suijker, *J. Phys. D: Appl. Phys.* **38**, 3040 (2005).
- [3] Keiichiro Watanabe, suneaki Ohashi, *J. Illum. Engng. Inst Jpn.* **90**, 41 (2006).
- [4] S. Carleton, P. A. Seinen, and J. Stoffels, *J. Illum. Eng. Soc.*, **26**, 139 (1997).
- [5] Honda Jiro, *J. Illum. Engng. Inst. Jpn.* **90**, 10 (2006).
- [6] W. W. Stoffels, T. Nimalasuriya, A. J. Flikweert, and H. C. J. Mulders, *Plasma Phys. Control. Fusion*, **49**, 505 (2007).
- [7] K. Takatsu, *J. Illum. Engng. Inst. Jpn. (in Japanese)*, **174**, 601, (1990).
- [8] H. Honda, A. Ito, and S. Sekine, *J. Illum. Engg. Inst. Jpn. (in Japanese)*, **87**, 898 (2003).
- [9] Yuji Shata, Toshiro Kasuya, Yasuyuki Kimura, Shigeo Gotoh, Motoi Wada, *J. Plasma Fusion Res. SERIES*, **8**, 1313 (2009).
- [10] Kumi Okazaki, Shigeo Gotoh, Toshiro Kasuya, Motoi Wada, *The Science and Engineering Review of Doshisha University*, **48**, 2 (2007).
- [11] A. J. Flikweert, T. Nimalasuriya, C. H. J. M. Groothuis, G. M. W. Kroesen, and W. W. Stoffels, *J. Appl. Phys.* **98**, 301, (2005).
- [12] W. W. Stoffels, F. van den Hout, and G. M. W. Kroesen. *Appl. Phys. Lett.* **88**, 502 (2006).
- [13] Raghu Ramaiah, *Light Sources conference* (Shanghai, 2007) p. 39.
- [14] Junming Tu, *IEEE Transactions on Industry Applications*, **44**, 1987 (2009).