

Effect of Temperature on the Luminous Properties of Remote-Phosphor White Light-Emitting Diodes

Min-Hyouk Choi, Hun Jae Lee, and Jae-Hyeon Ko[†]

Department of Physics, Hallym University, Hallydaehakgil 39, Chuncheon 200-702, Korea

(Received August 4, 2014; Revised manuscript September 3, 2014; Accepted September 5, 2014)

Two types of white light-emitting diodes (LEDs) with different phosphor structures were fabricated and compared in terms of their optical characteristics. Their spectroscopic properties were analyzed as a function of temperature, from room temperature to 80°C. The temperature dependence of the luminance and the color coordinates showed that the decrease in luminance and change in the color coordinates of the remote-phosphor type LED were much smaller compared to the conventional white LED. These improvements were attributed to the decrease in phosphor temperature, due to the distance between the LED chip and the phosphor layer, as well as to the reduced absorption by the LED chip of the light emitted from the phosphor layer.

Keywords: White LED, Remote phosphor, Luminous characteristics, Temperature stability

OCIS codes: (110.2945) Illumination design; (120.5240) Photometry; (230.3670) Light-emitting diodes

이격 형광체 구조가 적용된 백색 LED 광원의 온도변화에 따른 발광 특성 분석

최민혁 · 이헌재 · 고재현[†]

한림대학교 전자물리학과

Ⓣ 200-702 강원도 춘천시 옥천동 한림대학길 39

(2014년 8월 4일 받음, 2014년 9월 3일 수정본 받음, 2014년 9월 5일 게재 확정)

본 논문에서는 일반적인 코팅형 형광체와 이격 형광체 등 두 가지의 형광체 구조가 적용된 백색 LED를 제작한 후 온도변화에 따라 각 백색 LED의 발광 특성이 어떻게 변하는지 측정, 비교하였다. 상온에서 80°C 사이의 구간에서 측정된 두 백색 LED의 발광 스펙트럼을 분석하기 위해 Gaussian Lorentz-cross product 함수와 Asymmetric double sigmoidal 함수를 각각 청색 피크와 황색 피크의 곡선맞춤에 활용하였다. 이로부터 각 피크의 중심파장과 진폭, 반치폭 및 비대칭성을 온도의 함수로 구할 수 있었다. 온도에 따른 휘도와 색좌표를 측정된 결과 이격형광체 구조의 백색 LED의 온도에 따른 휘도저하율 및 색좌표 변화율이 훨씬 적었다. 이는 청색 LED 칩과 형광체가 분리됨에 따라 형광체의 온도가 일반 형광체 도포형 LED의 경우에 비해 낮아져서 효율이 상승했고 아울러 형광체에서 발생한 빛의 칩에 의한 흡수가 감소했기 때문인 것으로 해석된다.

Keywords: 백색 LED, 이격 형광체, 발광 특성, 온도안정성

OCIS codes: (110.2945) Illumination design; (120.5240) Photometry; (230.3670) Light-emitting diodes

I. 서 론

고체발광다이오드(Light Emitting Diode, LED)는 단순 표시등이나 특수 조명 용도를 넘어서 액정표시장치용 백라이트의 광원으로 광범위하게 사용되고 있고 아울러 일반 조명 시장으로도 급속히 침투하고 있다. 형광등이나 백열전구와 같은 기존 광원보다 환경친화적이고 소비전력이 작을 뿐 아니라 디지털 디밍(dimming)이나 가시광 통신 등 새로운 가

치를 창출할 수 있다는 면에서 LED의 활용 분야는 앞으로도 지속적으로 늘어날 것으로 기대된다. 백색 LED는 일반적으로 청색 혹은 자외선을 방출하는 단파장의 LED 칩 위에 파장변환물질인 형광체를 도포해서 백색을 구현한다^[1]. 이 경우 고온의 LED 접합부(junction)에 의해 인접한 형광체들의 온도 역시 올라가면서 형광체의 발광효율이 감소할 뿐 아니라 형광체가 발생시킨 가시광선의 일부가 LED 칩을 향하면서 칩에 의해 흡수되어 손실되는 문제가 발생한다^[2-4]. 기하

[†]E-mail: hwangko@hallym.ac.kr

Color versions of one or more of the figures in this paper are available online.

학적 구조만 고려하게 되면 형광체에서 방출된 빛의 절반 정도가 다시 LED 칩을 향할 것으로 예상될 뿐 아니라 칩에서 나온 여기광의 일부가 형광체에 의해 다시 칩으로 향한 후 흡수되는 손실도 상당할 것으로 보인다^[5]. 아울러 칩과 형광체의 밀착으로 인해 양쪽 모두 온도가 상승함에 따라 장기 신뢰성에도 좋지 않은 영향을 준다.

이 문제를 해결할 수 있는 하나의 방법으로 이격 형광체 (remote phosphor) 구조가 적용된 LED에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다^[4-9]. Figure 1(a)와 (b)에는 일반적인 백색 LED와 이격 형광체구조의 백색 LED의 한 예의 개략도가 각각 제시되어 있다. 이 그림을 통해 알 수 있는 것처럼 이격 형광체 구조란 청색 LED 칩에서 발생하는 많은 열이 형광체에 직접적인 영향을 끼치지 않도록 칩과 형광체 사이에 일정한 공간을 둔 구조를 말한다. 이 구조는 또한 형광체에서 발생한 장파장의 빛이 LED 칩에 의해 다시 흡수될 확률을 줄여준다. 실제 이격 형광체 구조는 형광체의 위치에 따라 다양한 형상을 띠 수 있는데, 가령 반사판 위에 형광체층을 형성할 수도 있고, 여기광의 초점을 이격 형광체 위에 형성해서 매우 강한 점광원을 만들거나 고리(Ring) 형태로 배치해 측면을 따라 전체적으로 백색광을 방출할 수도 있다^[6, 7]. 아울러, 이격 형광체를 값싸고 효율적으로 제조할 수 있는 재료와 공정에 대한 연구도 많이 진행되고 있다^[10-13]. 이 연구에서는 Figure 1(b)에 보이는 것처럼 반구형의 투과형 이격 형광체 구조를 LED 칩에 적용해서 백색광을 구현하였다.

이 구조에 대해 전류 변화에 따른 특성은 선행연구^[14]를 통해 이미 보고한 바 있다. 본 연구에서는 기존의 코팅 형광체와 이격 형광체가 적용된 두 종류의 백색 LED에 대해 이들의 온도 변화에 따른 분광특성을 측정하고 후 효율 및 색도 안정성의 관점에서 분석을 하고자 하였다.

II. 백색 LED 제작 및 평가 방법

두 가지 구조의 백색 LED 모두 CIE(Commission International de l'Eclairage) 색도도 상에서 등에너지(Equal Energy)조건인 $x=0.333, y=0.333$ (색온도 ~5600K)이 충족되도록 하였다. 일반 (코팅형) 백색 LED 제작에 사용된 청색 LED 패키지 (ITSWELL-IWS-L5056-UB-K3)의 중심 파장은 455~460 nm 영역이었고, 사용된 황색 형광체는 YAG($Y_3Al_5O_{12}:Ce$)계 형광체(Intermatix, YAL539-02)였다. 자외선 경화 에폭시인 NOA 65(Norland Optical Adhesive)을 봉지재로 사용하였으며, 혼합량은 형광체 0.6971 g에 에폭시 2.7721 g이었다. 일반 백색 LED의 자세한 제작 과정은 이미 발표된 바 있다^[15, 16]. 이격 형광체형 백색 LED의 칩은 동일한 패키지를 사용하였고 파장변환층의 역할을 하는 형광체층은 상용화되어 판매되는 반구형 이격 형광체를 구하여 활용하였다. Figure 1(c)는 위의 과정을 통해 제작된 기존 백색 LED의 실물 모습이고 Fig. 1(d)는 본 연구에 사용된 이격 형광체의 사진이다. 이 반구형 형광체의 내면과 외면에는 각각 동일한 형상의 PMMA

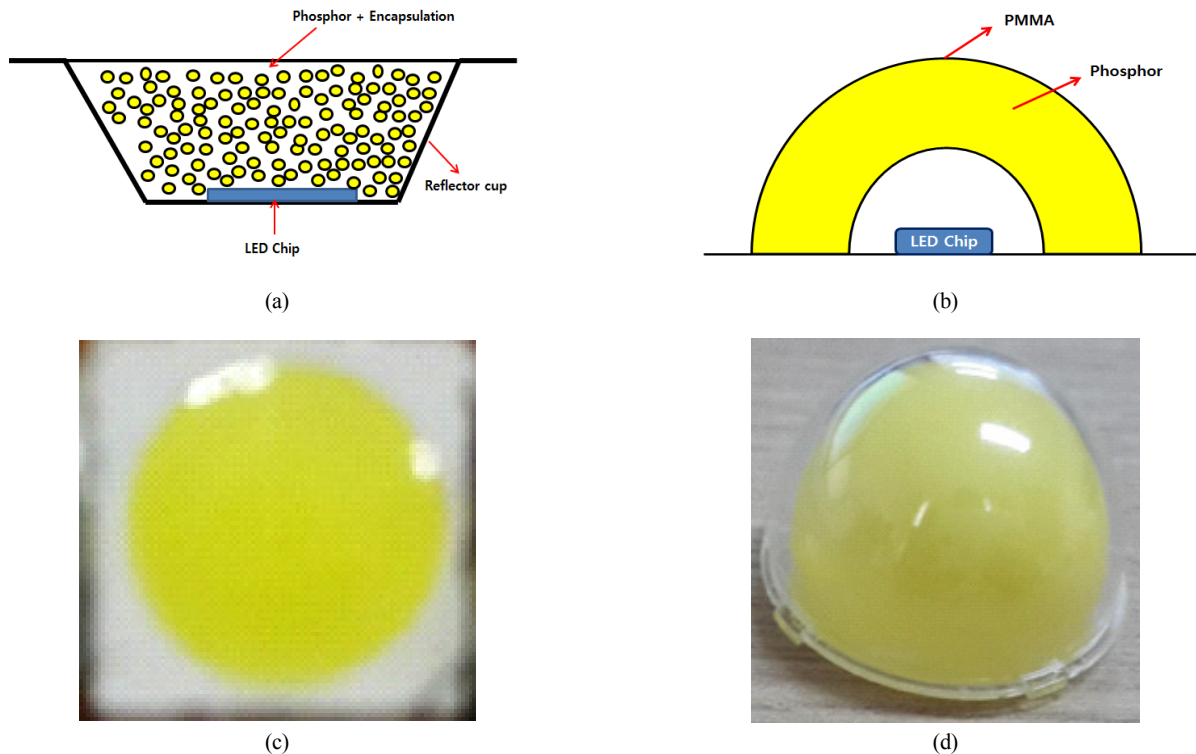


FIG. 1. Schematic cross-sections of (a) a conventional phosphor-coated white LED and (b) a remote-phosphor white LED. Photographs of (c) a conventional phosphor-coated white LED and (d) a remote-phosphor white LED used in this study.

(polymethyl methacrylate) 재질의 보호층이 감싸고 있는데, 보호층을 포함한 이 반구형 형광체의 직경은 19 mm, 높이는 11.5 mm, 색온도는 5600 K를 만족하고 있다.

LED의 온도에 따른 특성 변화를 조사하기 위해 투명한 유리창이 달려 있는 가열로 속에 LED를 고정시킨 후, 분광휘도계(PR-670, Photo Research)와 LED 사이의 거리를 1 m로 유지하여 LED의 휘도와 색좌표, 발광 스펙트럼을 측정하였다. 상온(25°C)에서부터 80°C까지 5°C 단위로 온도를 증가시켰고, 측정 중 온도의 변화폭은 ±0.05도 이내로 조절하였다. 온도는 K-타입(chromel-alumel) 열전대(thermocouple)를 이용해 측정하였다. 해당 온도에 도달한 후 LED를 1분 정도 발광시킨 후에 광 특성을 측정하였다. 구동전압 및 전류는 온도가 변하더라도 동일한 값을 유지하도록 조정하였고 일반 백색 LED의 경우, 3.003 V와 40 mA, 이격 형광체형 백색 LED는 3.113 V와 40 mA로 구동전압과 전류를 설정하였다.

III. 결과 및 논의

Figure 2는 온도 변화에 따른 두 LED의 휘도 변화를 나타낸 것이다. 온도가 올라가게 될수록 발광 다이오드와 형광체 모두 비복사 전이(non-radiative transition) 확률의 증가로 효율이 떨어지는 것으로 알려져 있다. 전체 온도 구간에서 LED의 소비전력을 동일하게 유지하였으므로 측정된 휘도는 발광효율에 비례하는 것으로 생각할 수 있다. Figure 2는 두 LED 모두 온도 증가에 따라 휘도가 감소하는 것을 보여주는데, 이격 형광체형 백색 LED의 휘도감소율이 일반 백색 LED에 비해 훨씬 적은 것을 알 수 있다. 특히 온도가 45°C 이상 증가하게 되면서 두 LED 사이의 휘도 차이가 커지면서 일반 백색 LED의 휘도가 급격하게 감소하는 것을 살펴볼 수 있다. 80°C까지 온도를 증가시켰을 때, 두 LED 사이의 휘도 차이는 동일 소비전력에서 약 40,000 cd/m² 정도 난다. 초기 휘도를 100%로 보았을 때 휘도 감소율을 그래프로 표현

하면 Fig. 2(b)와 같다. 상온에서 80°C까지의 온도 구간에서 이격 형광체의 휘도 감소율이 10% 정도인데 반해 일반 형광체는 27% 정도로 약 3배 정도 더 휘도가 감소하는 것으로 확인되었다. 이러한 결과는 LED 칩과 형광체가 분리된 이격 형광체형 LED의 발광효율 및 온도 변화에 대한 휘도 유지율이 더 좋다는 것을 의미한다. 가열로 속의 온도가 동일하게 설정되어 있었지만 LED 칩의 온도, 특히 집합부의 온도는 도포된 형광체층에 의해 둘러 쌓여 있는 일반 형광체 구조에서 더 높을 것으로 예상되고 아울러 칩의 국소적인 온도 상승으로 인해 도포층의 형광체 온도도 더 높을 것으로 보인다. 형광체를 구성하는 모체(host)의 열적 진동은 온도가 상승하면 더 심해지면서 활성체(activator)의 전자가 여기상태에서 바닥상태로 비복사의 형태로 전이하면서 열로 바뀔 가능성이 높아진다. 반면에 이격 형광체 구조 속의 형광체는 가열로 내 설정된 온도와 거의 동일한 온도를 유지할 것으로 예상된다. 상대적으로 낮은 형광체 온도에 따른 효율 저하폭의 감소, 그리고 칩과의 상대적 거리가 큰 데 따른 빛의 흡수 손실의 감소가 이격 형광체형 백색 LED가 발광효율의 측면에서 기존 형광체 도포형 LED보다 더 우수한 특성을 나타낸 원인인 것으로 판단된다. 고풍력 LED 패키지에 대한 실험에서도 형광체의 효율이 이격 형광체 구조에서 50% 이상 상승했다는 보고가 있다⁴¹.

Figure 3(a)와 (b)는 온도 변화에 따른 색좌표의 변화폭 (Δx , Δy)을 나타낸 그래프이다. 즉, 상온에서의 색좌표를 기준으로 해서 각 온도별로 측정된 색좌표와의 차이를 표시한 것이다. 상온에서 80도까지의 변화폭은 일반 백색 LED의 경우 $\Delta x=0.52$, $\Delta y=0.97$ 의 변화를 나타냈고, 이격 형광체형 백색 LED의 경우에는 $\Delta x=0.33$, $\Delta y=0.4$ 정도로 상대적으로 작은 변화율을 보였다. 결국, 동일한 온도 변화에 대해 일반 백색 LED가 이격 형광체 구조의 LED에 비해 색좌표 변화량이 x 와 y 각각 1.58배 2.43배 정도 더 크다는 것을 알 수 있다. 이상의 결과는 이격 형광체 구조가 적용된 LED가 일반 코팅

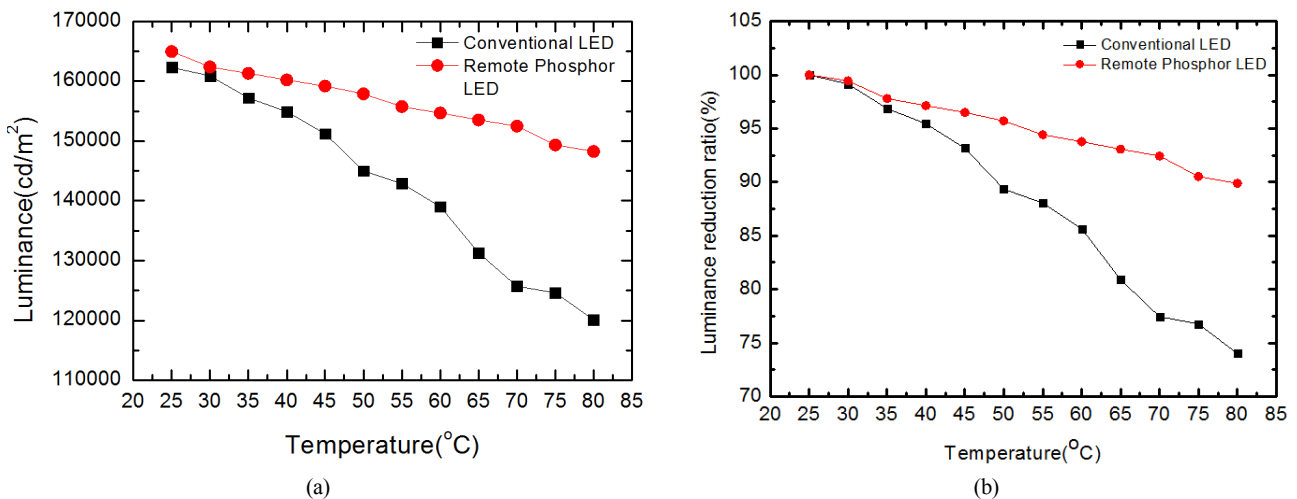


FIG. 2. (a) Temperature dependence of the luminance of both white LEDs. (b) Normalized luminance with respect to the value at room temperature as a function of temperature.

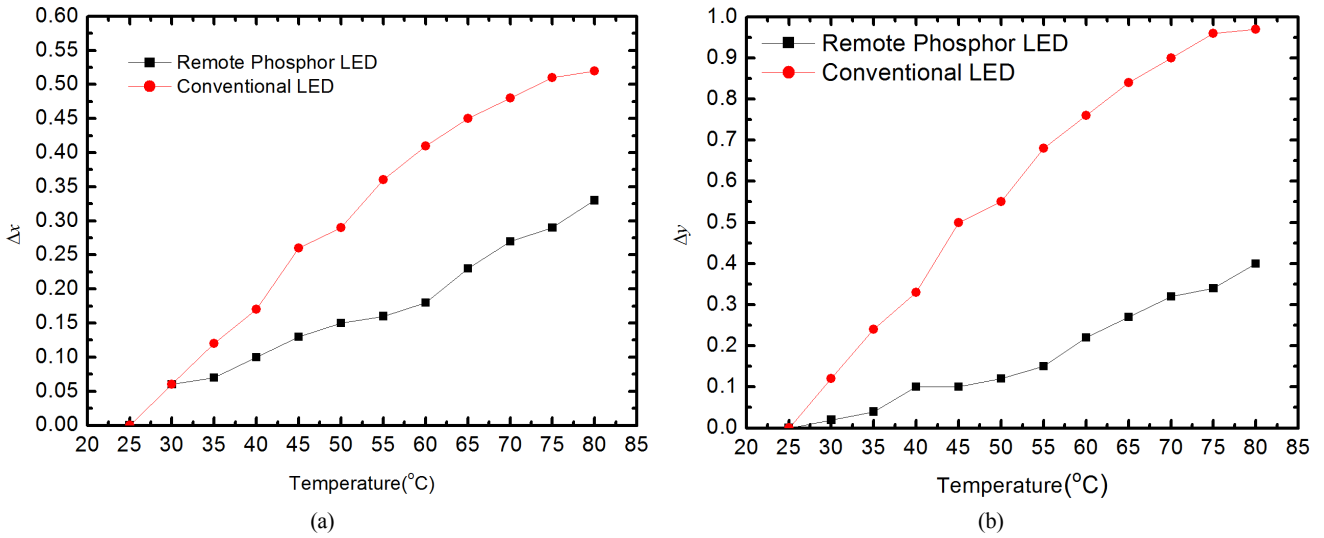


FIG. 3. Temperature dependence of the change in the color coordinates (a) x and (b) y with respect to the value at room temperature.

형 백색 LED에 비해 발광효율뿐 아니라 색도 안정성 측면에서도 우수하다는 것을 보여준다. 형광체의 온도가 높아지면 활성자의 여기상태와 바닥상태 사이의 에너지 차이도 변하면서 청색천이(blue shift) 혹은 적색천이(red shift)가 발생하고 이는 온도가 올라감에 따라 더 심해진다^[2]. 상대적으로 온도가 낮은 이격 형광체에서 스펙트럼의 중심파장의 천이 정도가 작을 것이고 이로 인해 색좌표의 변화 역시 작을 것으로 예상할 수 있다.

온도 상승에 따른 발광 스펙트럼의 변화를 보다 정량적으로 분석하기 위해 측정된 발광스펙트럼을 곡선맞춤(fitting)할 수 있는 함수를 조사하였다. 이러한 방법은 발광스펙트럼을 구성하는 피크의 중심파장, 폭, 세기, 비대칭성 등 스펙트럼의 특성을 표현하는 매개변수들을 정량적으로 조사하는데 있어서 매우 유용하게 활용되어 왔다^[14-19]. 분광학에 사용되는 다양한 형태의 함수를 적용한 결과, 청색 LED 칩에 의해 형성되는 450 nm 부근의 피크에는 Gaussian Lorentz-Cross Product Function(GLCP)이, 형광체에 의해 형성되는 황색 피크에는 Asymmetric double sigmoidal Function (ADSF)이 가장 적합하였다. GLCP와 ADSF는 각각 식 (1)과 식 (2)에 그 형태가 제시되어 있다.

$$y = y_0 + \frac{A}{1 + \frac{e^{\frac{0.5(1-s)(x-x_c)^2}{w^2}}}{s(x-x_c)^2}} \quad (1)$$

$$y = y_0 + A \cdot \frac{1}{1 + e^{-\frac{x-x_c+w_1}{w_2}}} \cdot \left(1 - \frac{1}{1 + e^{-\frac{x-x_c-w_1}{w_3}}} \right) \quad (2)$$

이 두 식에서 y_0 는 상수이고 x_c 와 A 는 공통적으로 중심파

장과 스펙트럼의 세기와 관련이 있는 진폭매개변수를 표현한다. 식 (1)의 w 와 식 (2)의 w_1 은 반치폭(full width at half maximum)을 반영하는 매개변수이다. 식 (1)의 s 는 스펙트럼의 비대칭성(skewness)을 반영하는 매개변수이고 식 (2)의 w_2 와 w_3 은 각각 스펙트럼의 좌/우 비대칭(Skewness) 정도를 나타내는 매개변수이다. Figure 4의 (a) (b)에 보이는 스펙트럼들은 각각 기존 백색 LED와 이격 형광체형 백색 LED의 두 온도(상온과 80도)에서의 발광스펙트럼을 나타낸 것이다. 온도 증가에 따라 스펙트럼의 전체적인 세기(및 높이)가 줄어든 것을 알 수 있고 이는 Fig. 2에 제시된 휘도 변화를 반영한다. 아울러 식(1)과 (2)를 이용해 곡선맞춤을 수행한 결과도 실선으로 함께 보여주고 있다. 두 함수에 의한 곡선맞춤이 전반적으로 잘 이루어진 것을 알 수 있지만 황색 형광체의 피크 부근에서는 두 LED 모두 미세한 불일치가 존재함을 알 수 있다. 특히 이격 형광체에 의한 스펙트럼을 보게 되면 적색 부분이 보강되어 피크의 폭이 매우 넓은 것을 알 수 있고 따라서 연색지수가 더 우수할 것으로 예상된다.

Figure 5의 (a)~(d)은 각 온도별로 측정된 청색 스펙트럼을 식 (1)을 적용해 곡선맞춤한 결과 얻은 매개변수의 온도 의존성을 나타내고 있다. Figure 6(a)~(d)는 식(2)에 기반해서 황색 피크에 대해 곡선맞춤을 수행한 결과로부터 구한 매개변수들을 온도에 따라 나타낸 것이다. Figure 5(a)는 청색 발광 피크의 중심파장이 온도에 대해 거의 선형으로 증가하고 있음을 나타낸다. Varshni 이론^[20]에 의하면 LED 접합부 온도 T 에서의 에너지 밴드갭(bandgap)은 $E_g(T) = E_g(0) - \alpha T^2 / (T - \beta)$ 로 표현된다. 이 식에서 $E_g(0)$ 는 절대온도 0도에서의 밴드갭이고 α 와 β 는 Varshni 매개변수라 불리는 곡선맞춤 변수들이다. 상온 이상의 온도에서는 밴드갭이 온도에 대해 선형으로 감소하게 되고 이에 따라 LED 방출 파장도 근사적으로 선형으로 증가함이 잘 알려져 있고, Fig. 5(a)는 그러한 변화를 잘 보여주고 있다. Figure 5(b)의 경우에는 청색광 스펙트

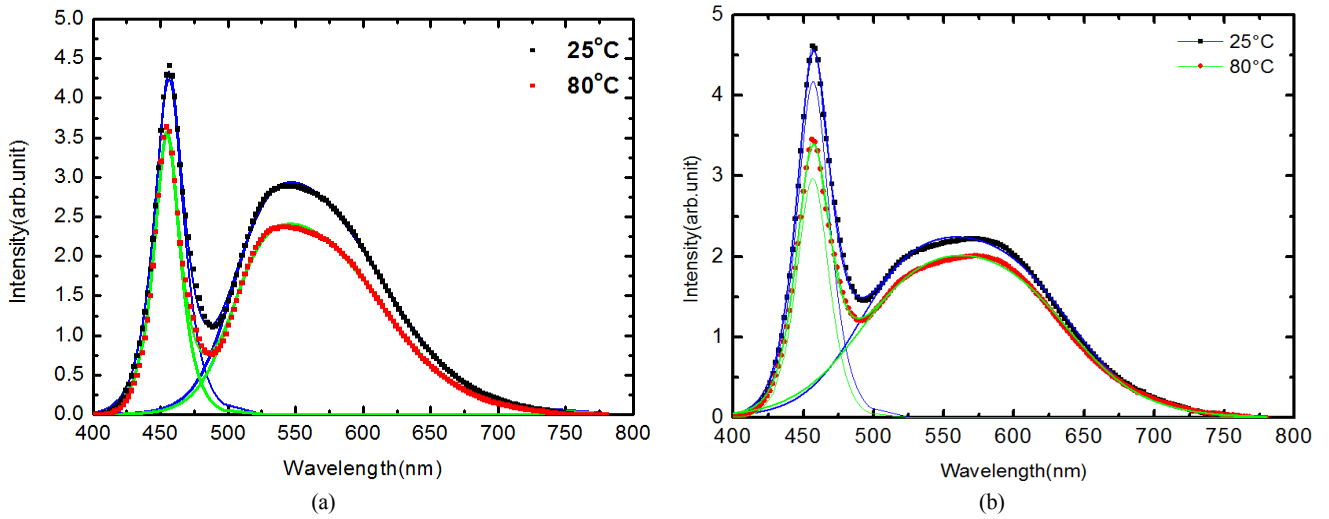


FIG. 4. Emitting spectra of (a) a conventional phosphor-coated white LED and (b) a remote-phosphor white LED at 25 and 80°C. The symbols are experimental data and the solid lines are best-fitted results based on Eq.(1) and (2).

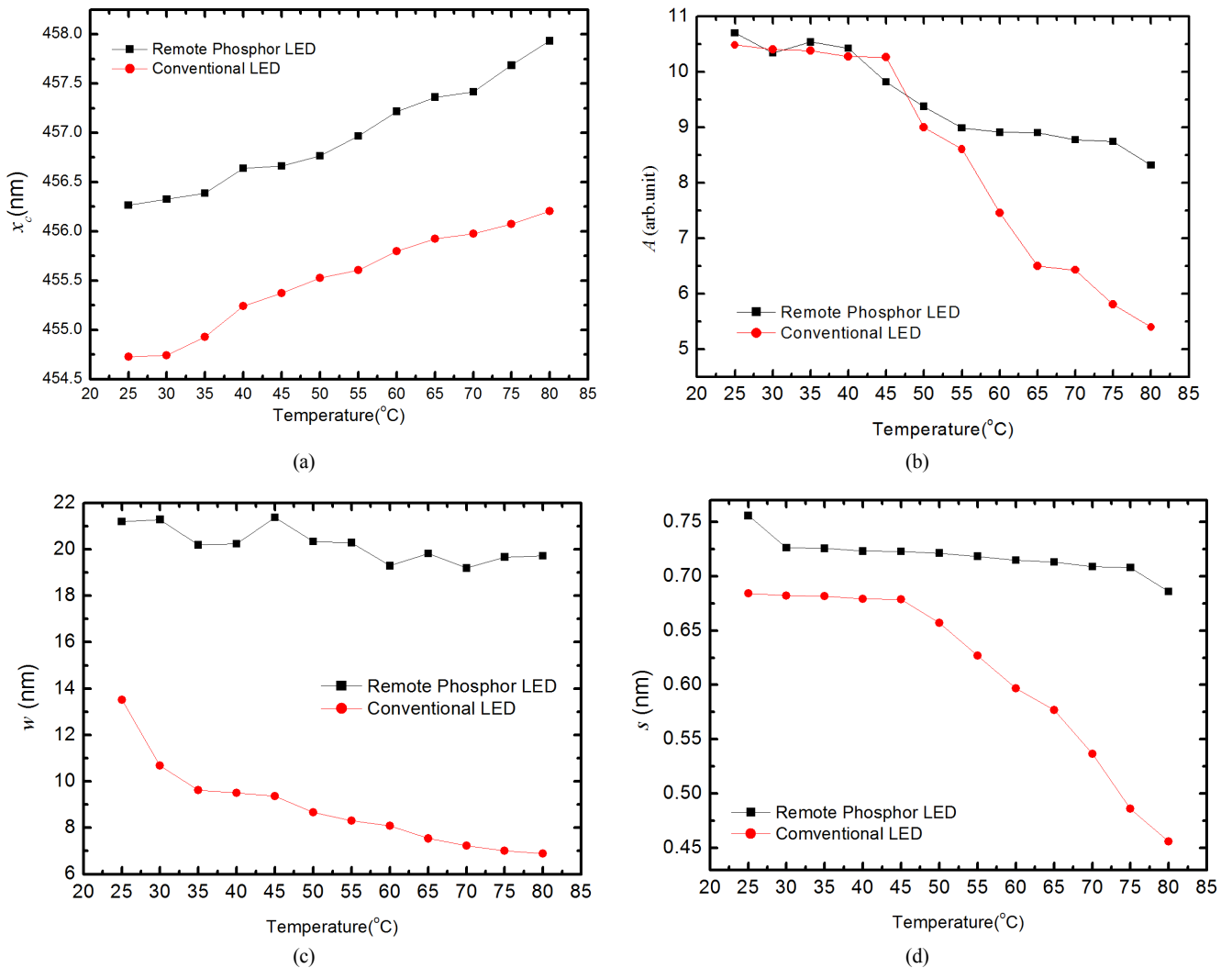


FIG. 5. Temperature dependence of x_c , A , s , and w of the spectra of blue peaks.

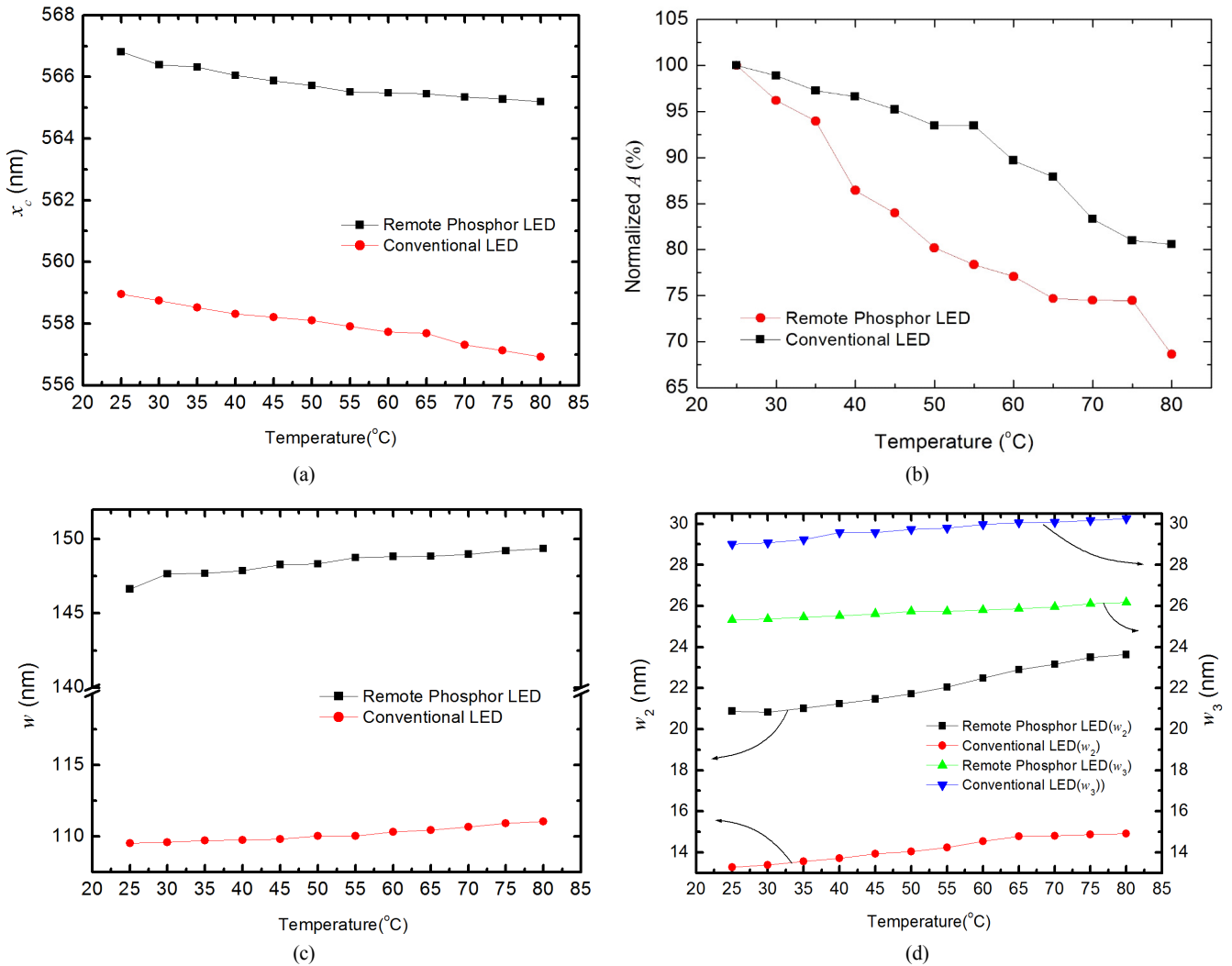


FIG. 6. Temperature dependence of x_c , A , w_1 , w_2 and w_3 of the spectra of yellow phosphors.

림의 세기를 표현하는 A 가 온도가 증가할수록 감소하는 것을 볼 수 있는데, 특히 일반 LED의 경우 온도가 45°C 이상이 되면서 급격하게 감소하는 것을 확인할 수 있다. 스펙트럼의 형상, 즉 폭과 비대칭성을 표현하는 w 와 s 매개변수는 각각 Fig. 5(c)와 (d)에 제시되어 있다. 일반 백색 LED의 경우 청색피크의 폭이 온도 증가에 따라 현저히 감소하지만 이격 형광체가 적용된 LED의 경우에는 큰 변화가 없음을 알 수 있다. 비대칭성 역시 이격 형광체 적용 LED의 경우 큰 변화가 없는데 반해 일반 LED는 45°C 이상의 온도에서 급격히 변하는 것을 확인할 수 있다. 이처럼 일반 백색 LED에서 보이는 상대적으로 큰 변화는 앞에서 제시된 색좌표의 변화와 상관성을 가지고 있을 것이다.

Figure 6(a)는 황색형광체의 중심파장의 변화를 나타내고 있는데, 온도 증가에 따라 중심파장이 둘 다 단조감소 하는 것을 보여준다. 고온으로 감에 따라 이격 형광체 적용 백색 LED의 파장 변화는 완만해 지는데 반해 일반 백색 LED의 파장은 기울기의 변화가 거의 없다가 65°C 이상에서 변화가

조금 더 심해지는 것을 볼 수 있다. Figure 6(b)에 표현된 규격화된 진폭 매개변수 A 도 온도 증가에 따라 감소함을 알 수 있다. 사람 눈의 시감도 곡선에서 녹색과 황색 영역이 발광 출력에서 차지하는 비중이 가장 크므로 황색형광체 피크의 세기는 바로 휘도와 직접적인 관련이 있다고 볼 수 있다. Figure 2와 비교를 해 보면 두 LED의 온도에 따른 휘도 변화와 매개변수 A 의 변화가 매우 비슷한 양상을 보이고 있음을 알 수 있다. Figure 6(c)에 표현된 반치폭은 이격 형광체 적용 백색 LED의 폭이 더 넓다는 것을 보여주고 있고, 이에 따라 이 LED의 연색지수 특성이 더 우수할 것으로 예상된다. Figure 6(d)는 황색 피크의 좌우 비대칭성을 나타내는 두 매개변수의 온도 변화를 보여주고 있는데, w_2 와 w_3 모두 온도 상승에 따라 단조증가하는 경향을 보이면서 황색 피크의 전체적인 폭이 조금씩 늘어나고 있음을 나타낸다.

본 실험에서는 고정된 반지름을 가진 이격형광체에 대한 실험 결과만을 담고 있으므로 이격형광체의 반지름이 백색 LED의 효율에 미치는 영향에 대해서는 논의할 수 없었다.

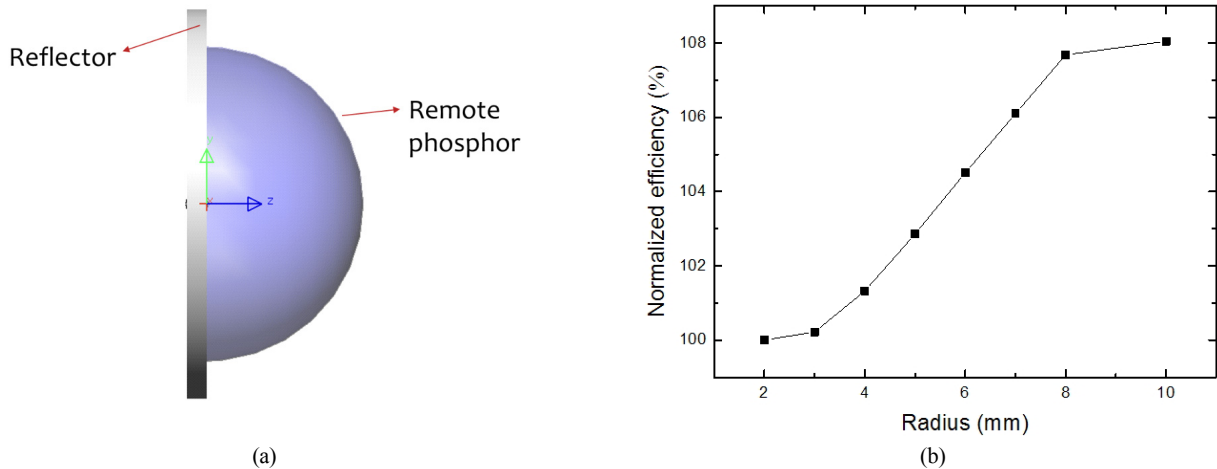


FIG. 7. (a) A schematic figure of the remote phosphor-based white LED used in the optical simulation. (b) Dependence of the normalized efficiency on the radius of the semi-spherical remote-phosphor.

이 영향을 알아보기 위해 상용 소프트웨어(LightTools, Synopsys Optical Solutions)를 사용, 이격형광체 적용 백색 LED에 대한 시뮬레이션을 수행하였다. 시뮬레이션에서는 주파장이 455 nm인 청색 lateral LED 칩 위에 두께가 0.1 mm인 반구형 이격형광체를 배치한 후 반구의 반지름을 2에서 10 mm 까지 변경시켰다. YAG 형광체의 특성은 문헌상의 데이터^[21]를 이용하였고 형광체의 평균 입경은 11 μm로 설정했다. 반구형 형광체입자를 감싸고 있는 투명 수지의 굴절률은 1.63, 밀면 반사판의 반사율은 100%로 설정하였고 반사는 가우시안 분포(퍼짐 각도=20°)를 가지는 확산 반사로 설명하였다. Figure 7(a)는 시뮬레이션에서 구축한 백색 LED 모델의 개략도이고 Fig. 7(b)는 이격형광체의 반지름에 따른 상대 효율을 보여준 것이다. 이 효율은 LED 칩에서 발생한 빛과 형광체를 거쳐 외부로 방출된 빛 사이의 광속(luminous flux)비이다. 모든 조건에서 상관색온도는 거의 6500 K가 되도록 형광체 밀도를 조정하였다. Figure 7(b)의 결과는 이격형광체의 반지름이 주어진 범위 내에서 증가할 경우 백색 LED의 효율도 증가함을 보여주고 있다. 형광체의 반지름이 작을 경우에는 형광체에서 형성된 빛의 일정 부분이 LED 칩에 의해 흡수되고 손실될 가능성이 높아지지만 반지름이 커지게 되면 밀면을 향하는 빛이 LED 칩에 의해 흡수되지 않고 반사판에 의해 외부로 방출될 확률이 커질 것이다. 이러한 결과는 이격형광체 구조가 백색 LED의 효율 상승에 기여하기 위해서는 LED 칩과의 거리가 충분히 떨어져야 한다는 것을 의미한다.

IV. 결 론

본 연구에서는 기존의 형광체 코팅형 백색 LED와 형광체를 LED 칩으로부터 일정 거리만큼 분리한 이격형광체형 백색 LED의 발광 특성을 온도의 함수로 조사하였다. 상온에서 80°C까지 온도를 올리며 두 백색 LED의 색좌표, 휘도, 그리고 스펙트럼을 조사하였다. 그 결과 이격형광체형 백색

LED의 휘도유지율, 색좌표 유지율이 일반 백색 LED에 비해 뛰어나다는 것을 알 수 있었다. 적절한 함수를 이용해 스펙트럼 상 청색 및 황색 피크를 곡선맞춤해서 중심파장, 폭, 비대칭성 등을 조사한 결과 이격형광체형 백색 LED의 스펙트럼의 형상 변화가 더 작은 것을 알 수 있었다. 이러한 특성은 LED 칩과 형광체의 분리에 따라 LED 칩 및 이격형광체의 온도가 상대적으로 낮아 상대적으로 높은 발광효율을 유지할 수 있었고 아울러 형광체에서 방출된 빛이 LED 칩 쪽으로 돌아가 흡수되는 확률이 줄어들었기 때문인 것으로 해석되었다. 향후 이격형광체 구조는 백색 LED의 효율 향상과 장기신뢰성의 개선에 기여할 수 있을 것으로 기대된다. 광학 시뮬레이션을 통해 이격형광체의 반지름에 따른 발광 효율을 조사한 결과, 형광체의 반지름이 커질수록 백색 LED의 발광효율이 증가한다는 것을 알 수 있었다.

References

1. E. F. Schubert, *Light-Emitting Diodes* (Cambridge University Press, Cambridge, New York, 2006).
2. C. C. Lin and R.-S. Liu, "Advances in phosphors for light-emitting diodes," *J. Phys. Chem. Lett.* **2**, 1268 (2011).
3. M. Zachau, D. Becker, D. Berben, T. Fiedler, F. Jermann, and F. Zwaschka, "Phosphors for solid state lighting," *Proc. SPIE* **6910**, 691010 (2008).
4. H. Luo, J. K. Kim, E. F. Schubert, J. Cho, C. Sone, and Y. Park, "Analysis of high-power packages for phosphor-based white-light-emitting diodes," *Appl. Phys. Lett.* **86**, 243505 (2005).
5. S. C. Allen and J. Steckl, "ELiXIR-Solid-state luminaire with enhanced light extraction by internal reflection," *J. Disp. Tech.* **3**, 155-159 (2007).
6. C. Hoelen, H. Borel, J. de Graaf, M. Keuper, M. Lankhorst, C. Mutter, L. Waumans, and R. Wegh, "Remote phosphor LED modules for general illumination - towards 200 lm/W

- general lighting LED light sources,” *Proc. SPIE* **7058**, 70580M (2008).
7. M. T. Lin, S. P. Ying, M. Y. Lin, K. Y. Tai, S. C. Tai, C. H. Liu, J. C. Chen, and C. C. Sun, “Design of the ring remote phosphor structure for phosphor-converted white-light-emitting diodes,” *Jpn. J. Appl. Phys.* **49**, 072101 (2010).
 8. H.-C. Kuo, C.-W. Hung, H.-C. Chen, J.-J. Chen, C.-H. Wang, C.-W. Sher, C.-C. Yeh, C.-C. Lin, C.-H. Chen, and Y.-J. Cheng, “Patterned structure of REMOTE PHOSPHOR for phosphor-converted white LEDs,” *Opt. Express* **19**, A930-A936 (2011).
 9. S.-C. Park, I. Rhee, J.-Y. Kim, H. J. Bark, and J. Jeong, “Luminous efficiency of open remote phosphor-converted white-light-emitting diodes,” *J. Korean Phys. Soc.* **60**, 1191-1195 (2012).
 10. J. Burgin, V. Jubera, H. Debéa, B. Glorieux, A. Garcia, and Lucat, “Screen-printed phosphor coatings for white LED emission,” *J. Mater. Sci.* **46**, 2235-2241 (2011).
 11. Y. K. Lee, J. S. Lee, J. Heo, W. B. Im, and W. J. Chung, “Phosphor in glasses with Pb-free silicate glass powders as robust color-converting materials for white LED applications,” *Opt. Lett.* **37**, 3276-3278 (2012).
 12. C.-C. Tsai, W.-C. Cheng, J.-K. Chang, L.-Y. Chen, J.-H. Chen, Y.-C. Hsu, and W.-H. Cheng, “Ultra-high thermal-stable glass phosphor layer for phosphor-converted white light-emitting diodes,” *J. Disp. Tech.* **9**, 427-432 (2013).
 13. L. Yang, M. Chen, Z. Lv, S. Wang, X. Liu, and S. Liu, “Preparation of a YAG:Ce phosphor glass by screen-printing technology and its application in LED packaging,” *Opt. Lett.* **38**, 2240-2243 (2013).
 14. M.-H. Choi, H. J. Lee, and J.-H. Ko, “Comparison of spectral characteristics of conventional and remote-phosphor white LEDs as a function of driving current,” submitted to *New Phys.: Saemulli*.
 15. H. W. Choi and J.-H. Ko, “Analysis of luminous characteristics of white LEDs depending on yellow phosphors,” *Korean J. Opt. Photon. (Hankook Kwanghak Hoeji)* **24**, 64 (2013).
 16. H. W. Choi and J.-H. Ko, “Temperature effect on the optical properties of YAG and silicate phosphor-based white light emitting diodes,” *Korean J. Opt. Photon. (Hankook Kwanghak Hoeji)* **24**, 135 (2013).
 17. F. Reifegerste and J. Lienig, “Modelling of the temperature and current dependence of LED spectra,” *J. Light Vis. Environ.* **32**, 18-24 (2008).
 18. A. Keppens, W. R. Ryckaert, G. Deconinck, and P. Hanselaer, “Modeling high power light-emitting diode spectra and their variation with junction temperature,” *J. Appl. Phys.* **108**, 043104 (2010) and references therein.
 19. S. S. Jeong and J.-H. Ko, “Analysis of the spectral characteristics of white light-emitting diodes under various thermal environments,” *J. Inf. Disp.* **13**, 37-42 (2012).
 20. A. Keppens, W. R. Ryckaert, G. Deconinck, and P. Hanselaer, “High power light-emitting diode junction temperature determination from current-voltage characteristics,” *J. Appl. Phys.* **104**, 093104 (2008).
 21. B.-W. Lee and J.-H. Ko, “Simulation study on the optical performances of LED flat illumination devices based on remote phosphor designs,” *New Phys.: Sae Mulli* **62**, 47-55 (2012).