

## 랜덤 텍스처 필름을 이용한 유기 발광 소자의 광추출 효율 향상에 관한 연구

김혜숙<sup>1</sup>, 황덕현<sup>1</sup>, 장경욱<sup>2</sup>, 김태완<sup>1,a</sup>

<sup>1</sup> 홍익대학교 정보디스플레이공학과

<sup>2</sup> 가천대학교 전기공학과

### A Study on the Improvement of Light-Extraction Efficiency of Organic Light-Emitting Diodes with a Use of Random-Textured Film

Hye Sook Kim<sup>1</sup>, Deok Hyeon Hwang<sup>1</sup>, Kyeong Uk Jang<sup>2</sup>, and Tae Wan Kim<sup>1,a</sup>

<sup>1</sup> Department of Information Display Engineering, Hongik University, Seoul 121-791, Korea

<sup>2</sup> Department of Electrical Engineering, Gachon University, Seongnam 406-701, Korea

(Received August 7, 2014; Revised June 17, 2015; Accepted June 19, 2015)

**Abstract:** An improvement of light-extraction efficiency of organic light-emitting diodes was studied by using random-textured films (RTF). Device was made in a structure of RTF/glass/ITO/TPD/Alq<sub>3</sub>/LiF/Al. RTF mold was made by spreading PDMS solution on a sandpaper. By pressing this mold on the glass substrate pre-coated with ZPU material, the RTF was obtained. From this study, there was an improvement of external quantum efficiency by about 30% in the device with the random-textured film (RTF 40) compared to that of the reference one.

**Keywords:** Organic light-emitting diodes, Random-textured film, Light-extraction efficiency

#### 1. 서 론

유기 발광 소자는 스마트폰, 텔레비전과 같은 디스플레이 용도로 개발되어 왔으며, 또한 친환경 및 에너지 절감을 지향하는 조명용 광원의 필요성에 따라 무기 발광 소자와 더불어 조명 분야에서 유망한 조명 광원으로 각광받고 있다.

유기 발광의 현상은 1960년대 Helfrich 등이 청색 전기 발광을 고전압 하에서 안트라센으로부터 얻음으로써 보고한 바 있다 [1]. 약 20년 후, 1987년 Tang

그룹은 유기물 박막 구조를 이용하여 10 V 이하에서 양자 효율 1%를 달성하여 유기 발광 소자의 상용화 가능성을 제시하였다 [2]. 이로부터 유기 발광 소자의 성능 향상 및 안정성을 위한 다양한 노력이 있어 왔다 [3].

유기 발광 소자는 유리, 발광층, 전극 등과 같이 다층 구조로 되어 있는 구조상의 특징으로 내부에서 생성된 빛이 광도파로나 내부 전반사에 인하여 많은 손실이 일어난다. 1997년 Gu 그룹은 내부에서 생성된 빛 중 유리 기판에서 30%의 빛이 갇히게 되고 ITO (indium-tin-oxide) 내에서 50%의 빛이 갇히게 됨을 광선 광학을 이용한 계산을 통해 보고하였다 [4].

빛의 트랩을 개선하기 위하여 다양한 연구가 진행되었다. 2000년 Lin 그룹은 높이 21 μm, 폭 30 μm 크기의 삼각 피라미드 마이크로 구조물을 이용하여 광

a. Corresponding author; [taekim@hongik.ac.kr](mailto:taekim@hongik.ac.kr)

추출 효율 20% 향상을 보고하였고 [5], 2002년 Möller 그룹은 PDMS (polydimethylsiloxane)를 이용한 마이크로 렌즈 어레이를 제작하여 광 추출 효율의 향상을 보고하였다 [6]. 이와 같이 내부에 갇힌 빛들을 외부로 추출하기 위한 방법으로 마이크로 피라미드, 마이크로 렌즈 어레이를 이용한 방법 등이 있다 [5-8]. 한편, 이러한 마이크로 구조의 제작 공정을 보다 간소화하고 저렴하게 진행하기 위해 샌드 블라스팅, 마이크로 볼과 같은 방법을 이용하기도 하였다. 2010년 Chen 그룹은 유리 표면에 모래를 강력하게 분사시킨 샌드 블라스팅을 이용하여 광 추출 효율의 향상을 보고하였고 [9], 2013년 Bocksrocker 팀은 스피ن 코팅을 이용한 마이크로 볼 층을 만들어 광추출 효율 향상에 관한 연구를 수행하였다 [10].

본 연구에서는 외부 광 추출 효율을 높이면서도, 기존의 마이크로 구조를 비교적 간단한 공정으로 제작할 수 있는 랜덤 텍스처 필름(random-textured film, RTF)을 제작하였다. 그리고 랜덤한 크기와 모양의 기공을 갖는 랜덤 텍스처 필름을 이용한 외부 발광 효율 향상에 관한 연구를 수행하였다.

## 2. 실험 방법

그림 1은 랜덤 텍스처 필름 제조 과정이다. 랜덤 텍스처 필름은 사포 위에 PDMS 용액을 부어 몰드를 제작한 후 이를 이용하여 임프린팅하여 제작한다. 이 때 사용한 PDMS는 다우 코닝사의 Sylgard 184 silicon elastomer이며, 액상으로 된 실리콘 합성 고무와 화학적 반응으로 경화를 촉진시키는 촉매로 이루어져 있다.

액상으로 된 실리콘 합성 고무와 경화제를 5:1 부피 비로 골고루 섞은 후 기포가 사라질 때까지 약 20분간 상온에 방치해 둔다. 기포가 다 사라졌는지 확인하고, 일정한 크기로 잘라 놓은 사포 위에 기포가 최대한 생기지 않도록 주의하며 주사기를 사용하여 혼합한 용액을 도포한다. 이 때 사포는 크기 별로 여러 개를 준비한다. 여기서 사포 크기를 나타내는 숫자의 의미는 1인치×1인치 안에 들어가 있는 모래 알갱이 수이다.

즉 RTF 40은 1인치×1인치 안에 모래 알갱이가 40개 들어가 있음을 의미한다. 사포 위에 도포한 후에 핫플레이트를 이용하여 90°C에 약 20분간 열을 가해 굳힌다. 이 때 두께를 일정하게 하기 위해서 사포 위 아래에 유리 기판을 올려놓은 후 일정한 하중을 줄 수 있는 물체를 올려놓았다.

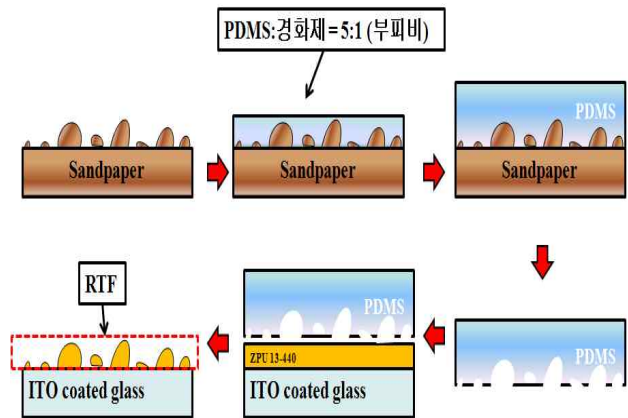


Fig. 1. Fabrication process of random-textured film.

일정한 두께로 만들어진 필름을 사포에서 떼어 내어 ChemOptics사의 ZPU13-440 위에 임프린팅하여 제작하였다. 이는 굴절률이 1.44로 유리의 굴절률인 1.5와 거의 차이가 없으며, 필름으로 만들어졌을 때 균열이 일어나지 않는 특징이 있다. 유리 기판 위에 ZPU13-440을 한 방울 떨어뜨린 후 PDMS 몰드를 이용하여 30초 동안 UV에 노출시켜 랜덤 텍스처 필름을 제작하였다.

유리 기판 뒷면에 제작된 RTF와 열 증착을 통해서 유기 발광 소자를 제작하였다. 실험에서 사용한 소자의 구조는 ITO(170 nm)/TPD(40 nm)/Alq<sub>3</sub>(60 nm)/LiF(0.5 nm)/Al(100 nm)으로 하였으며, 정공 수송층으로 N,N'-diphenyl-N,N'-di(m-tolyl)-benzidine (TPD)을, 그리고 발광층은 Alq<sub>3</sub>를 사용하였고, 전자 주입층으로 LiF를 사용하였다. 증착 조건은  $2 \times 10^{-6}$  Torr의 진공도에서, 증착 속도는 유기물은 1.0~1.5 Å/s, LiF는 0.5 Å/s, 음전극은 1.0~5.0 Å/s로 하였다. 소자의 전압-전류 특성은 Keithley 236 source-measure unit과 Keithley 617 electrometer를 이용하여 측정하였고, 광학적 스펙트럼 특성은 Ocean Optics 2000을 이용하여 측정하였다.

## 3. 결과 및 고찰

그림 2는 광학 현미경과 주사 전자 현미경을 통해 살펴본 랜덤 텍스처 필름 RTF 150의 표면 사진이다. 이를 통해 랜덤 텍스처 필름이 표면에 형성되어 있는 모습과 평균 알갱이 크기를 알 수 있다.

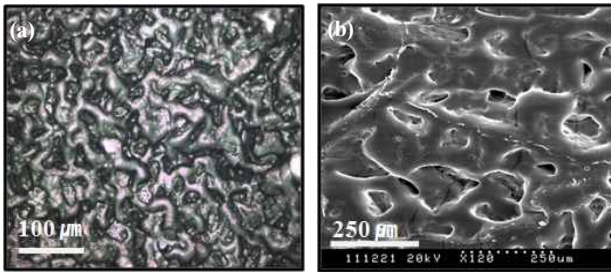


Fig. 2. Pictures of random-textured film (RTF 150) taken by (a) optical microscope and (b) scanning-electron microscopy.

그림 3은 RTF 40부터 RTF 1200까지 평균 모래 알갱이 크기를 나타낸 그래프이다. RTF 40, RTF 60, RTF 80, RTF 150, RTF 220, RTF 1200의 평균 모래 알갱이 크기는 각각 450  $\mu\text{m}$ , 300  $\mu\text{m}$ , 200  $\mu\text{m}$ , 150  $\mu\text{m}$ , 110  $\mu\text{m}$ , 25  $\mu\text{m}$ 이다. 이를 통해 RTF 40의 평균 모래 알갱이 크기가 가장 크고, RTF 숫자의 크기가 커질수록 평균 모래 알갱이 크기가 작아지는 것을 알 수 있었다.

그림 4는 사포 크기에 따라서 만든 랜덤 텍스처 필름을 유기 발광 소자에 부착한 후 측정된 전압에 따른 전류 밀도 및 휘도 그래프이다. 이를 통해 전압에 따른 전류 밀도 그래프는 기본 소자와 비교하여 랜덤 텍스처 필름을 부착한 소자의 전류 밀도 증가 패턴이 유사한 것을 확인할 수 있다. 10 V에서의 휘도는 RTF 40부터 RTF 1200까지 각각 945  $\text{cd}/\text{cm}^2$ , 633  $\text{cd}/\text{cm}^2$ , 679  $\text{cd}/\text{cm}^2$ , 615  $\text{cd}/\text{cm}^2$ , 699  $\text{cd}/\text{cm}^2$ , 290  $\text{cd}/\text{cm}^2$ 로서, RTF 1200을 제외하고는 모두 기본 소자의 휘도보다 향상되는 것을 알 수 있었다. 특히 10 V에서 RTF 40의 휘도는 945  $\text{cd}/\text{cm}^2$ 로 기본 소자의 휘도인 505  $\text{cd}/\text{cm}^2$ 와 비교하여 약 87% 향상된 것을 알 수 있다.

그림 5는 그림 4로부터 얻은 전류 밀도에 따른 외부 양자 효율 그래프이다. RTF 40부터 RTF 1200까지 전류 밀도 20  $\text{mA}/\text{cm}^2$ 에서 외부 양자 효율은 각각 1.25%, 1.04%, 0.91%, 0.95%, 0.91%, 0.99%로 나타났다. 이는 기본 소자의 외부 양자 효율인 0.95%와 비교해 보면 RTF 40과 RTF 60, 그리고 RTF 1200은 각각 외부 양자 효율이 약 31%, 약 9%, 약 4% 향상되었음을 의미한다. 이로부터 휘도 특성에서와 같이 평균 모래 알갱이 크기가 가장 큰 RTF 40의 외부 양자 효율이 기본 소자에 비해서 가장 큰 폭으로 향상되는 것을 알 수 있었다.

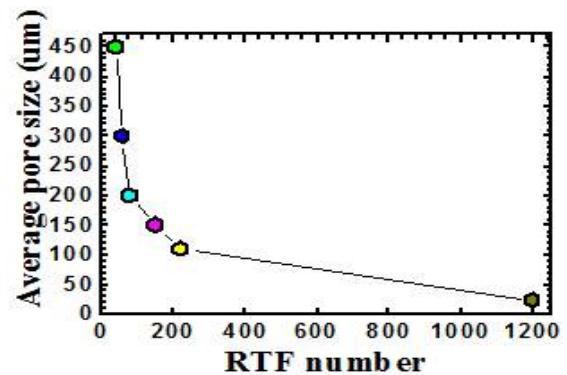


Fig. 3. Average pore size of sandpaper depending on the number.

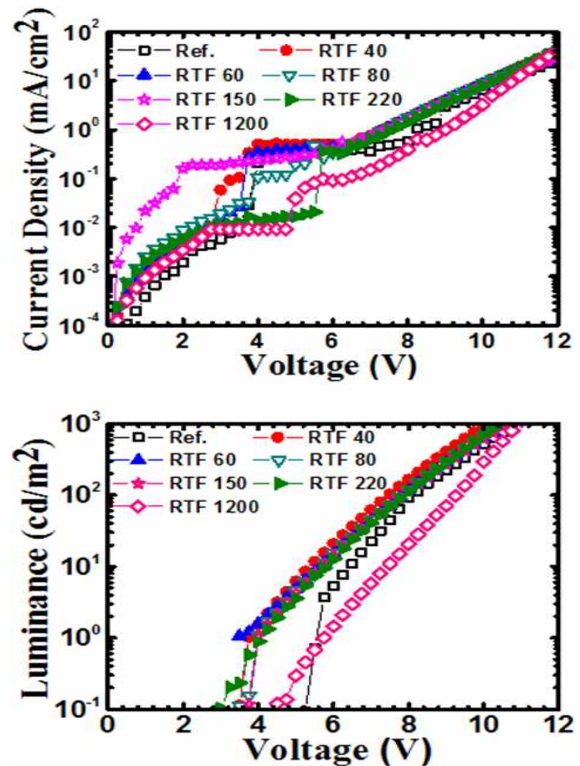


Fig. 4. Current density-voltage and luminance-voltage characteristics for the reference device and the devices with random-textured films.

이는 Light Tools 프로그램을 이용하여 얻은 마이크로 렌즈 어레이에서 렌즈의 크기에 따른 광추출 효율의 시뮬레이션 결과에서, 렌즈의 크기가 커짐에 따라 광추출 효율이 증가하는 결과와 일치한다 [7].

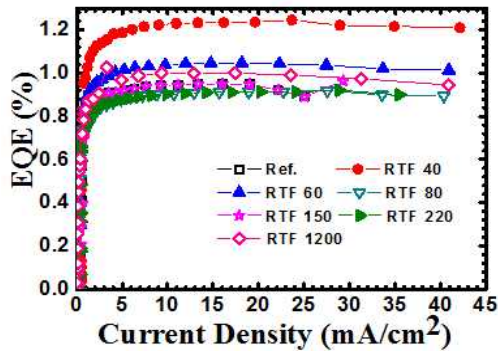


Fig. 5. External quantum efficiency-current density characteristics for the reference device and the devices with random-textured films.

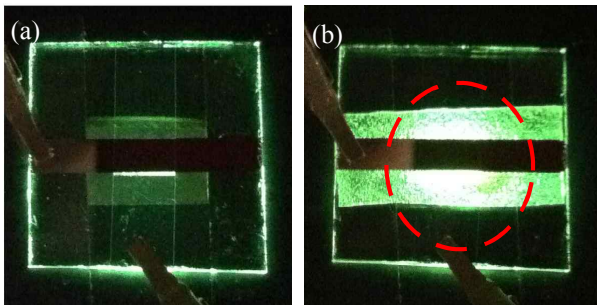


Fig. 6. Photographs of the electroluminescence radiated from (a) the reference device and (b) the device with RTF 150.

그림 6은 기본 소자와 랜덤 텍스처 필름을 부착한 소자의 휘도를 나타낸 것이다. 이를 통해 육안으로도 랜덤 텍스처 필름을 부착한 소자가 기본 소자에 비해 더 밝게 빛나는 것을 확인할 수 있다. 이는 랜덤 텍스처 필름을 부착하면 기본 소자에 비해서 휘도 특성이 향상됨을 알 수 있는 결과이다.

#### 4. 결 론

본 연구에서는 유기 발광 소자의 광추출 효율 향상을 위해서 유리 기판 뒷면에 랜덤 텍스처 필름을 RTF 40부터 RTF 1200으로 제작하여 부착하였다.

이를 통해 기본 소자에 비해 RTF 40을 사용한 소자의 외부 양자 효율이 약 30% 향상되는 결과를 얻었다. 이는 마이크로 렌즈 어레이를 사용했을 때 나타나는 결과와 유사하게 유기 발광 소자 구조 특성상 나타나는 굴절률 차이에 의한 전반사 효과로 소자 내부에 갇힌 빛들을 랜덤 텍스처 박막을 부착함으로써 외부로 추출할 수 있게 되었다. 또한 랜덤 텍스처 박막은 기존의 마이크로 렌즈 어레이 생성 시 필요한 고가의 공정이 필요하지 않음으로 생산 단가가 낮은 특성을 가지고 있다. 이로써 랜덤 텍스처 필름을 유기 발광 소자에 적용한다면 적은 비용으로 높은 효율을 얻을 수 있을 것이다.

#### REFERENCES

- [1] W. Helfrich and W. G. Scheider, *Phys. Rev. Lett.*, **14**, 229 (1965). [DOI: <http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevLett.14.229>]
- [2] C. W. Tang and S. A. VanSlyke, *Appl. Phys. Lett.*, **51**, 913 (1987). [DOI: <http://dx.doi.org/10.1063/1.98799>]
- [3] S. R. Forrest, *Org. Electron.*, **4**, 45 (2003). [DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.orgel.2003.08.014>]
- [4] G. Gu, D. Z. Garbuzov, P. E. Burrows, S. Venkatesh, and S. R. Forrest, *Opt. Lett.*, **22**, 396 (1997). [DOI: <http://dx.doi.org/10.1364/OL.22.000396>]
- [5] L. Lin, T. K. Shia, and C. J. Chiu, *J. Micromech. Microeng.*, **10**, 395 (2000). [DOI: <http://dx.doi.org/10.1088/0960-1317/10/3/314>]
- [6] S. Möller and S. R. Forrest, *Appl. Phys. Lett.*, **91**, 3324 (2002).
- [7] H. S. Kim, D. H. Hwang, J. W. Hong, M. J. Song, W. K. Han, and T. W. Kim, *J. Korean Inst. Electr. Electron. Mater. Eng.*, **27**, 307 (2014).
- [8] M. K. Wei, J. H. Lee, H. Y. Lin, Y. H. Ho, K. Y. Chen, C. C. Lin, C. F. Wu, H. Y. Lin, J. H. Tsai, and T. C. Wu, *Pure Appl. Opt.*, **10**, 1 (2008).
- [9] S. Chen and H. S. Kwok, *Opt. Express* **18**, 37 (2010). [DOI: <http://dx.doi.org/10.1364/OE.18.000037>]
- [10] T. Bocksroker, J. Hoffmann, C. Eschenbaum, A. Pargner, J. Preinfalk, F. M. Flaig, and U. Lemmer, *Opt. Electron.*, **14**, 396 (2013).