

## 고효율 상부발광 올레드 응용을 위한 유기 나노렌즈의 형성 거동

박영삼<sup>†</sup> 

한국전자통신연구원 ICT 창의연구소

(2020년 9월 7일 접수, 2020년 9월 23일 수정, 2020년 9월 26일 채택)

### Formation Behavior of Organic Nano-lens Arrays for Highly Efficient Top-emitting Organic Light Emitting Diode Applications

Young-Sam Park<sup>†</sup> 

Electronics and Telecommunications Research Institute (ETRI), 218 Gajeongro, Yuseong-Gu, Daejeon 34129, Korea

(Received September 7, 2020; Revised September 23, 2020; Accepted September 26, 2020)

**초록:** 최근 상부발광형 올레드 소자를 구성하는 유기 박막의 열화없이 광추출 효율을 개선할 수 있는 유기 나노렌즈 기술이 개발되었다. 광학적으로 우수한 올레드를 구현하기 위해서는 렌즈 크기가 적어도 수백 나노미터가 되어야 하며 렌즈 특성을 결정하는 핵심 실험변수인 기화기 가열조건에 따른 렌즈 형성 거동에 대한 이해가 필요하다. 본 연구에서 가열온도가 300에서 320 °C로 증가하면 렌즈 생성, 320에서 340 °C로 증가하면 렌즈 성장이 관찰되는데 이 때 Ostwald ripening과 렌즈 병합 현상이 발견된다. 가열온도와 그 유지시간이 증가함에 따라 렌즈가 차지하는 면적 비율이 증가하는데, 이는 기화기 가열 도중 유기증기의 생성량이 증가하기 때문이다. 광학 전산모사를 통해 나노렌즈가 적용된 올레드 소자는 소자 내에 갇힐 뻔한 많은 양의 빛들을 추출할 수 있음을 알 수 있는데, 이로부터 나노렌즈는 우수한 광추출 구조물임을 알 수 있다.

**Abstract:** Recently, an organic nano-lens array (NLA) technology has been developed to increase light extraction efficiencies of top-emitting organic light emitting diodes (OLEDs) without the deterioration of organic films. To achieve optically efficient OLEDs, the size of NLA must be at least several hundred nanometers, explaining the importance of the understanding of formation characteristics of NLA determined by vaporizer heating conditions. Herein, nano-lens generation occurs dominantly when heating temperature increases from 300 to 320 °C. From 320 to 340 °C, its growth is predominant, which is explained by Ostwald ripening and coalescence. Additionally, as the temperature and the dwell time at target temperature increase, the area ratio of nano-lens to substrate increases, which is attributed to the increase in the amount of vapor generated during heating. With NLA, optical simulations indicate that a large amount of light is extracted otherwise trapped inside OLEDs, indicating that NLA is an optically excellent light extraction structure.

**Keywords:** organic nano-lens, top-emitting, organic light emitting diode.

## 서 론

올레드(organic light emitting diode, OLED) 디스플레이는 기관, 박막 트랜지스터(thin film transistor, TFT)와 올레드가 차례로 적층된 구조를 갖는다. 올레드는 하부로 빛을 빼내는 배면발광형(bottom-emission)과 그 반대인 상부로 빛을 빼내는 상부발광형(top-emission)으로 분류된다.

직관적으로 보면 하부에 위치한 TFT들을 피해서 빛이 밖으로 빠져나와야 하는 배면발광형 대비, 상부발광형은 빛을

빼냄에 있어서 TFT 면적이 크든 작든 영향을 받지 않으므로 훨씬 유리하다. 하지만, 텔레비전 산업에서는 주로 배면발광형이 적용되는데, 이는 상부발광형에 적용할 수 있는 광추출(light extraction) 기술이 거의 전무하기 때문이다. 올레드에서는 광추출 기술이 매우 중요한 이슈 중의 하나인데, 그 이유는 올레드 내부의 발광층(emissive layer)에서 생성된 빛 중 실제 밖으로 빠져나오는 비율인 광추출 효율(light extraction efficiency)이 20% 정도밖에 되지 않기 때문이다.<sup>14</sup> 배면발광의 경우 올레드를 제작하기 이전에 다양한 광추출 공정 기술을 적용할 수 있는 반면, 상부발광의 경우 올레드를 제작하고 나서 광추출 공정 기술을 적용해야 하는데, 현재까지 개발된 대부분의 광추출 공정으로 인해 올레드를 구성하는 유기층이 손상된다.<sup>14</sup>

<sup>†</sup>To whom correspondence should be addressed.  
s\_yspark@etri.re.kr, ORCID<sup>®</sup> 0000-0002-7924-4264  
©2021 The Polymer Society of Korea. All rights reserved.

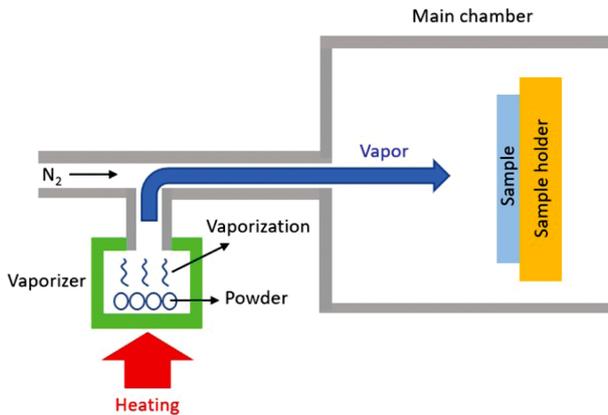


Figure 1. Schematic illustration of nano-lens fabrication.

최근 본 연구진은 진공증착 공정만을 활용하는 나노렌즈 어레이(nano-lens array, NLA, 상부 표면이 반원과 같은 곡면 표면을 가지며  $1\ \mu\text{m}$  미만의 크기를 가지는 나노렌즈의 군집체) 제작 기술을 발표하였다.<sup>5,6</sup> 곡면 표면을 이용하면 올레드에 갇힌 빛을 밖으로 손쉽게 빼내는 광추출이 용이하다는 것은 스넬의 법칙을 활용하여 설명되는데, 이는 곡면 표면을 가지면 평면 표면에 비해 입사각이 작아지는 효과가 있기 때문이다. 나노렌즈 어레이뿐만 아니라 마이크로렌즈 어레이(micro-lens array, MLA, 상부 표면이 곡면 표면을 가지며  $1\ \mu\text{m}$  이상의 크기를 가지는 마이크로렌즈의 군집체) 역시 곡면 표면을 이용하기 때문에 광추출 효율이 증가하지만, MLA를 제작하기 위해서는 증착공정에 더하여 마스크나 열처리 등의 추가 공정이 필요하다.<sup>14</sup>

NLA 기술은 마스크나 열처리 등의 추가 없이 상부발광 올레드 위에 바로 나노렌즈를 형성하는 기술로서, 렌즈 제작공정 적용으로 인해 올레드가 손상되지 않을 뿐만 아니라 광추출 효율이 약 1.5배 향상되었다.<sup>5,6</sup> 더구나 진공증착 공정만을 이용하기 때문에, 제작공정이 매우 간단하고 올레드 산업현장에 바로 적용할 수 있는 기술이다. 나노렌즈를 형성하기 위해 유기 기상증착 공정(Figure 1)을 활용하는데, 기화기(vaporizer) 가열로 인해 생성된 증기는, 기화기 셔터를 열면 질소( $\text{N}_2$ ) 가스의 도움으로 메인 챔버(main chamber)로 이동하며, 그 후 샘플에 도달하여 렌즈를 형성하게 된다. 이로 부터 증기 생성량의 결정적인 실험변수들로는 기화기 가열온도와 가열 목표 온도에 도달한 후의 유지시간임을 알 수 있다. 본 논문에서는 핵심공정 변수들인 기화기 가열 온도와 유지시간에 따른 렌즈 형성 거동과 광학 전산모사 결과를 보고하고자 한다.

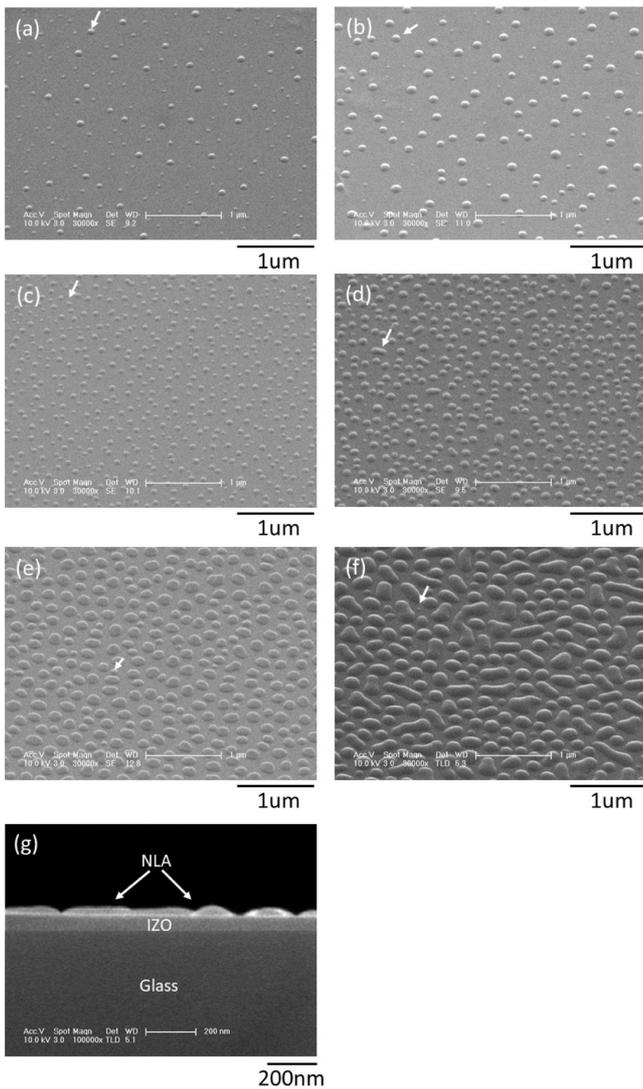
## 실 험

샘플 제작을 위하여 가로 2 cm, 세로 2 cm의 유리기판에

스퍼터 장비를 활용하여 투명 전도성 산화막인 인듐아연산화막(indium zinc oxide, IZO)을 60 nm 두께로 증착한 후 유기 기상 증착 공정을 활용하여 렌즈를 형성하였다. 렌즈 증착을 위하여 순도 99.9% 이상의  $N,N'$ -di(1-naphthyl) $N,N'$ -diphenyl-(1,1'-biphenyl)-4,4'-diamine(NPB) 고체 분말을 기화기에 넣은 후 이를 가열하여 NPB 증기를 생성시켰다. NPB 증기는  $7.5\ \text{cm}^3/\text{s}$ 의 기체 유속(gas flow rate)을 갖는 질소 가스( $\text{N}_2$ )의 도움으로 샘플에 도달하여 렌즈를 형성한다. 기화기 목표 가열 온도는 3개 그룹(300, 320 및 340 °C), 목표 온도에 도달한 후 유지시간은 2개 그룹(5분과 10분)으로 나눔으로써, 총 6개 그룹의 유리/IZO/나노렌즈 샘플을 확보하였다. 미세조직을 분석하기 위하여 2 nm 두께의 얇은 백금(platinum) 박막을 샘플에 먼저 코팅한 후 주사전자현미경(scanning electron microscope, SEM) 분석을 진행하였다. 또한 SEM 이미지 내의 나노렌즈 면적 값은 이미지 분석기(IMAQ, National Instruments, USA)를 활용하여 계산하였고, 이를 SEM 촬영 면적(가로 4  $\mu\text{m}$ , 세로 3  $\mu\text{m}$ )으로 나눔으로써 유리/IZO 기판에서 나노렌즈가 차지하는 면적 비율(fill factor) 값을 계산하였다. 렌즈 형성 여부에 따라 상부발광 올레드 소자 내부에서 생성된 빛을 공기 중으로 얼마나 많이 뽑아내는지 분석하기 위하여 광학 전산모사를 진행하였다. Finite difference time domain(FDTD) 프로그램을 활용하였고 올레드 내부와 바깥의 메쉬 크기(mesh size)는 각각 가로 20, 세로 20, 높이 2 nm와 가로 20, 세로 20, 높이 20 nm로 설정하였다. 발광층으로부터 거리별로 총 100개의 전기 다이폴(electric dipole)을 배치하였고 이를 활용하여 올레드 내부와 외부의 electric field intensity 값을 계산하였다. 이때 올레드 유기층, IZO, 공기, 그리고 나노렌즈의 굴절률 값을 각각 1.8, 2.0, 1.0 및 1.8로 설정하였다.<sup>14</sup>

## 결과 및 토론

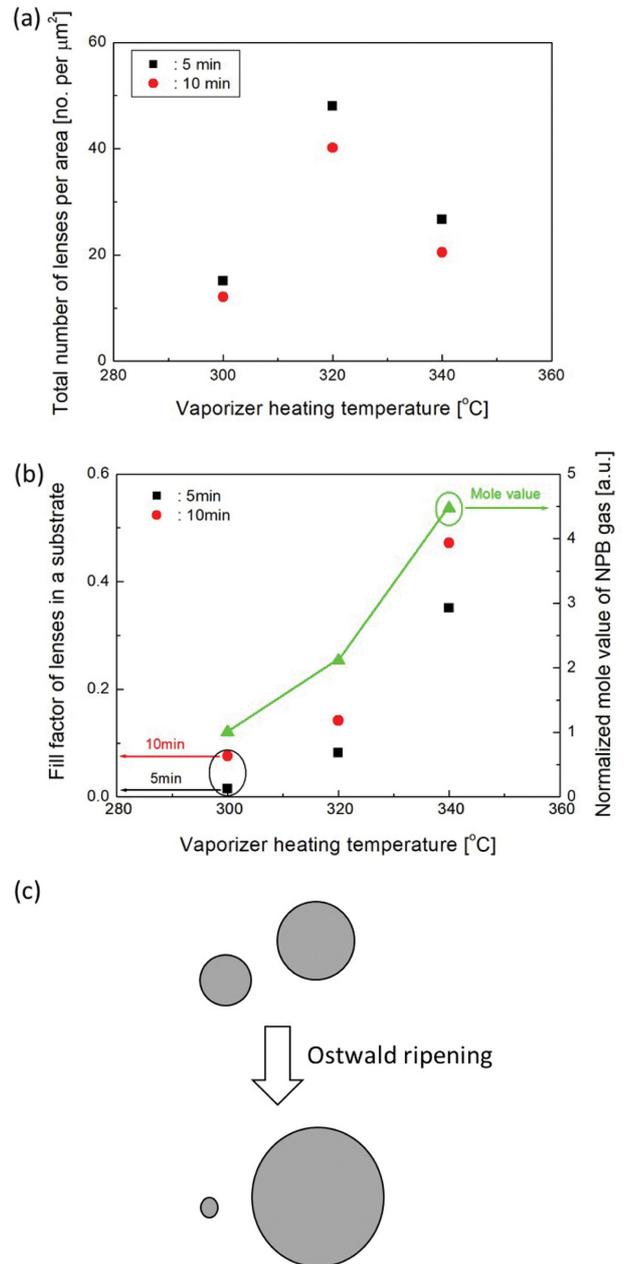
Figure 2(a)부터 2(f)까지는 기화기 가열조건에 따른 평면(planar) SEM 이미지이며 각 그림에 표기된 흰색 화살표는 유리/IZO 기판 위에 형성된 나노렌즈를 나타낸다. 300 °C/5분 조건(Figure 2(a))에서는 구 형태이며 최소 50 nm, 최대 100 nm의 직경을 갖는 나노렌즈가 관찰된다. 10분으로 유지시간을 증가시키면 나노렌즈 갯수는 다소 줄어들지만 직경 값은 전반적으로 증가하며(Figure 2(b), 3(a)), 최대 직경 값은 약 150 nm를 갖는다. 320 °C/5분 조건(Figure 2(c))에서는 Figure 2(a) 대비 갯수가 크게 증가한다. 10분으로 유지시간을 증가시키면(Figure 2(d)), 300 °C의 경우처럼 갯수는 다소 줄어들지만 렌즈 직경이 증가한다. 340 °C/5분 조건(Figure 2(e))에서는 Figure 2(c) 대비 렌즈 갯수는 줄어들지만 렌즈 크기가 약 200 nm로 증가하며 유지시간을 10분으로 증가시키면(Figure 2(f)), 200부터 600 nm 범위의 직경을 갖는 나노



**Figure 2.** Planar SEM images of (a) 300 °C/5 min; (b) 300 °C/10 min; (c) 320 °C/5 min; (d) 320 °C/10 min; (e) 340 °C/5 min; (f) 340 °C/10 min vaporizer heating conditions; (g) vertical SEM image of 340 °C/10 min condition.

렌즈가 관찰된다. Figure 2(g)는 Figure 2(f)에 대한 10만배 배율의 단면 SEM 이미지로서 유리/IZO 기판 위에 곡면 표면을 갖는 나노렌즈가 형성됨을 알 수 있다.

평면 SEM 이미지들은 모두 3만배로 촬영하였으므로 촬영 범위는 가로 4 μm, 세로 3 μm이다. 이는 수십 nm부터 수백 nm의 크기를 갖는 나노렌즈를 관찰하기에 충분히 큰 면적이라 판단된다. 따라서 Figure 3(a)와 3(b)와 같이 기화기 가열 변수에 따른 나노렌즈 생성과 성장 거동을 분석하는 것이 가능하다고 판단된다. 기화기 가열온도가 300에서 320 °C로 증가함에 따라 나노렌즈 갯수가 증가하므로 면적 비율 값이 증가한다. 또한 두 온도 조건 모두에서 유지시간이 5에서 10분



**Figure 3.** (a) Total number of lenses per area; (b) fill factor of lenses in a substrate and normalized mole value of NPB gas with vaporizer heating conditions; (c) nano-lens growth explained by Ostwald ripening mechanism.

으로 증가하면 갯수는 다소 줄어들지만 크기 증가효과가 더 크기 때문에 비율 값은 증가한다. 320에서 340 °C로 증가하면 갯수는 크게 줄어들지만 렌즈 크기 증가 효과가 더 크므로 면적 비율 값은 증가하며, 유지시간이 증가하면 비율은 더욱 증가한다. 6개 실험 그룹 중 340 °C/10분 조건에서 최대 0.47의 면적 비율을 갖게 된다.

Figure 3(a)에서 300에서 320 °C로 온도가 증가하면 나노렌

즈 갯수가 증가하므로 렌즈 생성이 지배적으로 일어나고 340 °C로 온도가 증가하면 갯수가 줄어들지만 면적 비율이 증가하기 때문에 렌즈 성장이 지배적으로 일어남을 알 수 있다. 나노렌즈 성장을 설명하기 위해 Figure 2(f)의 화살표로 표기된 나노렌즈를 살펴보면 이전 단계인 Figure 2(e)의 화살표로 표기된 나노렌즈 대비 그 크기가 아주 작음을 알 수 있다. 이로부터 유리/IZO 기판 위에서 렌즈 성장 시 Ostwald ripening 이<sup>7</sup> 관찰됨을 알 수 있다(Figure 3(c)). Ostwald ripening 성장의 대표적인 특징으로는 하나의 입자는 성장 이전 대비 더 커지는 반면, 나머지 하나의 입자는 이전 대비 더 작아지는 것이다. 한편, Figure 2(c)의 화살표로 표시된 나노렌즈 대비 Figure 2(d)의 화살표로 표시된 나노렌즈는 형태가 길쭉해지고 크기는 더 커지는데, 이로부터 렌즈와 렌즈의 병합에 의한 성장 역시 관찰됨을 알 수 있다.

NPB 소재에 대한 진공 압력에 따른 녹는점과 끓는점의 변화 및 상태도에 대한 보고에<sup>8</sup> 따르면,  $1.33 \times 10^{-6}$ 에서  $1.33 \times 10^5$  Pa의 압력범위에서 녹는점은 압력 변화에 관련없이 280 °C로 일정한데 반하여, 끓는점은  $1.33 \times 10^{-6}$ 에서  $1.33 \times 10^{-1}$  Pa까지는 305 °C의 값을 가지다가 1.33 Pa에서는 310 °C, 3.99 Pa에서는 320 °C, 13.3 Pa에서는 340 °C, 133 Pa에서는 400 °C의 끓는점을 갖는다. 끓는점은 증기압이 주변 환경의 기압과 같을 때의 온도로 정의되며, 상태도의 끓는점은 무한 시간이 지속된 후의 값이다. 본 연구에서 기화기 압력은 3.99 Pa로 유지되었으므로 끓는점에서 무한시간이 지속된다고 가정한다면 기화기 내 NPB 증기압은 3.99 Pa의 값을 갖게 되지만, 본 실험에서는 목표 온도에 도달한 후 5분 혹은 10분 후에 공정을 진행하였다. 따라서 증기압은 1기압(101325 Pa) 대비 훨씬 작은 압력으로 가정할 수 있다. NPB 증기 압력이 대기압보다 상대적으로 매우 작고, NPB의 분자 부피는 수십  $\text{nm}^3$  수준으로 기화기 부피( $1500 \text{ cm}^3$ ) 대비 매우 작으므로, NPB 증기의 경우 증기 분자간에 상호 작용하는 힘이 없는 이상기체 거동을 가진다고 가정할 수 있다.<sup>9</sup> 이상기체는 식 (1)을 따른다.

$$PV = nRT \quad (1)$$

여기서,  $P$ 는 NPB 증기압,  $V$ 는 NPB 증기 부피,  $n$ 은 NPB 증기 몰수,  $R$ 은 상수이며  $T$ 는 절대온도이다. 한편, NPB 분자 부피는 기화기 부피 대비 약  $10^{23}$  배 작고 기화기 내에 NPB 증기가 골고루 퍼진다고 가정하면  $V$ 값은 상수로 표현할 수 있다. 따라서 식 (1)은 다음과 같이 바뀐다.

$$P_{\text{NPB}} = \alpha \cdot n_{\text{NPB}} \cdot T \quad (2)$$

여기서,  $\alpha$ 는 상수이다. 한편, methyl chloride, butane, diethyl ether, methyl acetate, fluobenzene와 같은 소재의 경우 가열 온도가 100 °C 상승하면 증기압은 50배 증가하는 것으로 알려져 있다.<sup>10</sup> 따라서 가열 온도가 20 °C 증가하면 증기압은 50의 5제곱근, 즉 2.187배 증가한다고 가정할 수 있다. 이로

부터 식 (2)는 가열온도에 따라 다음과 같이 변경된다.

$$300 \text{ }^\circ\text{C}: P_{300} = \alpha \cdot n_{\text{NPB-300}} \cdot (573) \quad (3-1)$$

$$320 \text{ }^\circ\text{C}: 2.187 P_{300} = \alpha \cdot n_{\text{NPB-320}} \cdot (593) \quad (3-2)$$

$$340 \text{ }^\circ\text{C}: 2.187^2 P_{300} = \alpha \cdot n_{\text{NPB-340}} \cdot (613) \quad (3-3)$$

식 (3)에서  $n_{\text{NPB-300}}$ ,  $n_{\text{NPB-320}}$ 과  $n_{\text{NPB-340}}$ 은 각각 300, 320 및 340 °C에서의 NPB 증기 몰 값들이다. 식 (3)으로부터 식 (4)가 얻어지며, 이는 Figure 3(b)의 우측 y축에 대한 값으로 나타내었다.

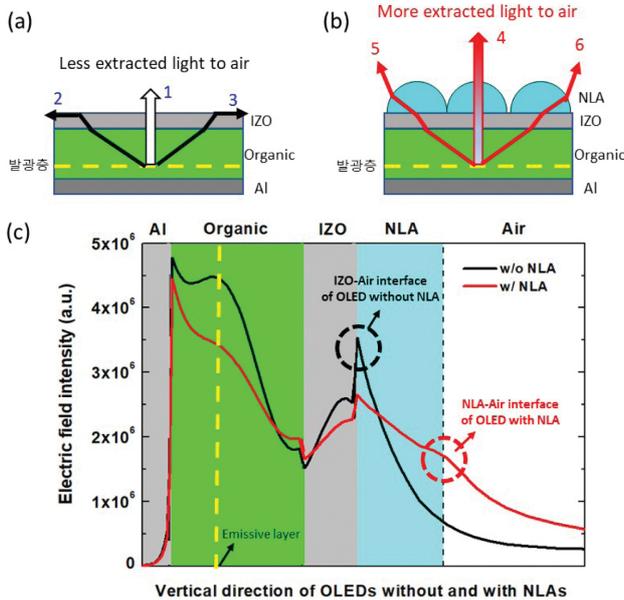
$$n_{\text{NPB-320}} = 2.11 n_{\text{NPB-300}} \quad (4-1)$$

$$n_{\text{NPB-340}} = 4.47 n_{\text{NPB-300}} \quad (4-2)$$

Figure 3(b)에서 기화기 가열 온도에 따른 NPB 증기의 몰 값 변화와 나노렌즈 면적 비율의 변화 거동이 유사함을 알 수 있다. 이로부터 고체 상태인 NPB를 가열하면 증기가 생성되며, 생성된 증기량에 의하여 나노렌즈 면적 비율이 결정됨을 알 수 있다.

올레드 위에 나노렌즈가 형성되지 않은 경우(Figure 4(a))와 형성된 경우(Figure 4(b))에 대하여 광추출 거동을 비교하여 설명하기 위하여 광학 전산모사를 진행하였다. Figure 2의 SEM 결과를 기반으로 나노렌즈는 200 nm 직경의 반원 형태를 갖는 것으로 가정한 후 올레드 소자 내부와 외부의 위치별 electric field intensity 값을 계산하였다(Figure 4(c)). 올레드를 활용한 선행논문<sup>11,12</sup> 따르면 빛의 양이 많은 부위에서 electric field intensity 값은 높다. Figure 4(c)에서 발광층에서는 빛이 생성되기 때문에 intensity 값이 높다. 생성된 빛은 모든 방향으로 전파되는데, 예를 들어 IZO 방향으로 전파되는 경우를 고찰해보자. 나노렌즈가 없는 올레드 소자에서 공기층과 소자의 경계는 IZO와 공기 경계이며 이 곳에서 intensity 값이 높고 intensity profile은 매우 뽕족하다. 한편, 나노렌즈가 있는 올레드에서 공기층과 소자의 경계는 나노렌즈와 공기 경계인데, 이 곳에서 intensity 값이 낮고 profile은 무디다. 이로부터 나노렌즈가 없는 경우 IZO와 공기 경계에서 많은 양의 빛이 공기로 나아가지 못하고 소자 내에 갇히지만 나노렌즈가 있는 경우 나노렌즈와 공기 경계에서 다량의 빛이 갇히지 않고 공기중으로 빠져나감을 알 수 있다. 이는 나노렌즈 적용으로 인해 올레드 광추출 효율이 증가한다는 측정결과와<sup>5,6</sup> 일치한다.

이를 시각적으로 간단히 설명하기 위하여 Figure 4(a)의 빛 1, 2, 3번의 경로와 같이 표기하였다. 스넬의 법칙에 따르면 굴절률 값이 큰 매질을 통과하던 빛이 굴절률 값이 작은 매질을 만나게 되면 입사각 보다 굴절각이 더 커진다. 올레드의 관점에서 보면 굴절각이 커지는 것은 빛을 밖으로 빼내지 못하고 소자 내에 갇히게 됨을 의미한다. 나노렌즈가 없는 경우 빛 1, 2, 3번은 발광층의 동일 점 광원(point light source)에서 생성된다(Figure 4(a)). 빛 1번과 같이 입사각이 0°인 경



**Figure 4.** Top emission OLEDs (a) without; (b) with NLAs; (c) the variation of electric field intensity in top emitting OLEDs without and with NLAs.

우 큰 문제없이 공기중으로 빠져 나간다. 하지만, 빛 2번과 3번의 경우 유기층(organic, 굴절률 1.8)에서 IZO(굴절률 2.0)로 갈 때는 굴절률 값이 커지므로 문제없이 전파하지만, IZO를 통과하던 빛이 공기(굴절률 1.0)를 만나게 되면, 굴절률 값이 2.0에서 1.0으로 큰 폭으로 감소하기 때문에 공기로 가지 못하고 소자 내에 갇힌다. 나노렌즈가 있는 경우 나노렌즈와 공기 경계에서 상대적으로 매우 낮은 electric field intensity 값을 가지는데, 이는 나노렌즈(굴절률 1.8)를 통과한 빛이 공기를 만나면, 비록 굴절률 값은 1.8에서 1.0으로 큰 폭으로 감소하지만 소자 내에 갇히지 않고 공기로 나가기 때문이다. 이를 시각적으로 간단히 설명하기 위하여 Figure 4(b)의 빛 4, 5, 6번 경로와 같이 설명할 수 있다. 빛 5와 6번의 경우 나노렌즈를 통과한 빛이 공기를 만나게 되면, 나노렌즈가 곡면을 가지기 때문에 입사각이 작아지는 것과 같은 효과를 가지기 때문이다.

## 결론

본 논문에서는 핵심 공정 변수인 기화기 가열조건에 따른 나노렌즈 형성 거동에 대한 연구 결과를 보고하였으며, SEM 분석과 이미지 분석기를 활용한 분석을 통하여 나노렌즈 생성과 성장에 대해 고찰하였다. 또한 광학 전산모사를 통해 나노렌즈를 올레드 소자에 도입하면 많은 양의 빛이 소자 밖으로 추출된다는 결과를 발표하였다. 진공증착을 활용하는 나노렌즈 기술은 대면적 기판으로도 적용이 가능하다. 이 기술은 올레드 생산 라인의 큰 개조없이 나노렌즈 제작을 위한

진공 공정 장비만 접속시키면 되므로 패널 제조업체뿐만 아니라 장비 제조업체에서도 수용할 가능성이 매우 높은 기술이다. 생산라인에 적용되기 위해서는 나노렌즈 형성 단계에 따른 광추출량 변화를 확인하기 위한 후속 실험이 향후 필요할 것으로 판단된다.

**감사의 글:** 이 논문은 2020년도 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 정보통신기획평가원의 지원을 받아 수행된 연구입니다(과제번호: 2020-0-00887, IITP20200008870012002, 과제명: 500ppi급 지문인식 센서를 위한 유기포토다이오드 핵심기술 개발).

## 참고 문헌

- Saxena, K.; Jain, V. K.; Mehta, D. S. A Review On the Light Extraction Techniques in Organic Electroluminescent Devices. *Opt. Mater.* **2009**, *32*, 221-233.
- Möller, S.; Forrest, S. R. Improved Light Out-coupling in Organic Light Emitting Diodes Employing Ordered Microlens Arrays. *J. Appl. Phys.* **2002**, *91*, 3324-3327.
- Kim, J.-B.; Lee, J.-H.; Moon, C.-K.; Kim, K.-H.; Kim, J.-J. Highly Enhanced Light Extraction from Organic Light Emitting Diodes with Little Image Blurring and Good Color Stability. *Org. Electron.* **2015**, *17*, 115-120.
- Tsutsui, T.; Yahiro, M.; Yokogawa, H.; Kawano, K.; Yokoyama, M. Doubling Coupling-Out Efficiency in Organic Light-Emitting Devices Using a Thin Silica Aerogel Layer. *Adv. Mater.* **2001**, *13*, 1149-1152.
- Park, Y.-S.; Han, K.-H.; Kim, J.; Cho, D.-H.; Lee, J.; Han, Y.; Kim, J.-J. Crystallization-assisted Nano-lens Array Fabrication for Highly Efficient and Color Stable Organic Light Emitting Diodes. *Nanoscale* **2017**, *9*, 230-236.
- Kwon, J.; Kim, J.; Park, Y.-S.; Cho, D.-H.; Kwon, O. E.; Lee, K. M.; Yu, B. Fab-compatible Nano-lens Array Integration for Optically Efficient Flexible Top-emitting Organic Light-emitting Diodes. *J. Appl. Phys.* **2019**, *58*, SDDH01.
- Thanh, N. T. K.; Maclean, N.; Mahiddine, S. Mechanisms of Nucleation and Growth of Nanoparticles in Solution. *Chem. Rev.* **2014**, *114*, 7610-7630.
- Kim, J. T.; Shim, S.; Yun, J. Y.; Kwon, O. *Abstract no. 1588*, 225th ECS Meeting, Orlando, USA, May 11-15, 2014.
- <https://terms.naver.com/entry.nhn?docId=5662961&cid=62802&categoryId=62802>.
- M. Beychok, Vapor pressure chart, [https://ko.m.wikipedia.org/wiki/%ED%8C%8C%EC%9D%BC:Vapor\\_pressure\\_chart.svg](https://ko.m.wikipedia.org/wiki/%ED%8C%8C%EC%9D%BC:Vapor_pressure_chart.svg).
- Gather, M. C.; Reineke, S. Recent Advances in Light Outcoupling from White Organic Light-emitting Diodes. *J. Photonics Energy* **2015**, *5*, 057607.
- Kim, J. Y.; Cho, S. Y.; Choi, K. C. Analysis and Structure Optimization of Nanostructure-embedded Organic Light-emitting Diodes. *J. Inform. Display*, **2013**, *14*, 73-77.

**출판사 공지사항:** 한국고분자화학회는 게재된 논문 및 기관 소속의 관할권 주장과 관련하여 중립을 유지합니다.