

마이크로 렌즈 어레이와 회절격자 레지스트 패턴을 이용한 유기광원(OLED)의 광 추출 효율 향상

장지향 · 김경조 · 김진현 · 오민철[†]

부산대학교 전자공학과 나노 바이오 광소자 연구실
Ⓣ 609-735 부산광역시 금정구 장전동 산 30번지

(2007년 10월 16일 받음, 2007년 11월 21일 수정본 받음)

OLED 소자는 유리기판과 공기 층의 경계면에서 발생하는 전반사와 ITO-유기층으로 형성되는 광도파로를 따라 진행하는 도파모드 결합으로 인해 내부에서 생성된 빛의 80% 이상이 외부로 추출되지 못하게 된다. 본 연구에서는 마이크로 렌즈 어레이와 회절격자 레지스트 층을 이용하여 소자 내부에서 손실되는 빛을 외부로 추출시킴으로써 OLED의 발광효율을 향상시킨다. 마이크로 렌즈 어레이를 이용하여 유리기판-공기 전반사로 인해 내부에 갇히는 빛을 외부로 출력시키고, ITO 와 유기물 사이에 회절격자 레지스트 층을 삽입하여 ITO-유기층 광도파로에 갇힌 빛들을 수직방향으로 추출될 수 있도록 하였다. 제작된 OLED 소자에 전류밀도 20 mA/cm² 를 인가한 경우, 마이크로 렌즈 어레이를 적용한 OLED에서 22%의 효율 개선을 얻었고, 회절격자 레지스트 층을 가지는 OLED 의 경우 41%의 효율개선을 얻을 수 있었다.

주제어 : OLED, Outcoupling enhancement, Microlens array, Diffractive grating, Nano-imprinting

I 서 론

OLED 소자의 효율을 높이기 위해서 발광재료의 개발이나 전자-정공의 원활한 공급을 위한 다층 구조 연구와 더불어 내부에서 생성된 빛을 소자의 외부로 추출하는 출력결합 효율을 향상시키는 연구가 진행되고 있다. 일반적인 OLED의 구조는 유리기판, ITO, 여러 유기층들, 금속 전극의 다층구조로 이루어진다. OLED 에서 외부로 추출되지 못하고 내부에 갇히게 되는 빛들은 그림 1(a)에서 보여지듯이 유리기판과 공기 층의 굴절률 차이로 인해 발생하는 전반사 모드와 높은 굴절률을 가지는 ITO-유기물 층을 따라 진행하는 도파모드가 있다. Ray optics을 이용한 계산 결과에 따르면, 내부에서 생성된 빛 중에서 ITO-유기층 도파모드로 가장 많은 46.9%의 빛이 결합되고, 34.2%의 빛이 유리기판-공기 층 경계면의 전반사로 갇히게 되며 나머지 18.9%의 빛만이 외부로 방출된다.^[1] 이와 같이 소자내부에 갇혀서 외부로 나오지 못하는 빛들을 외부로 추출해 내기 위하여 다양한 연구결과가 발표되고 있다. 먼저 유리기판-공기 층 경계면에서의 전반사를 줄이기 위해서 유리기판 위에 마이크로 렌즈를 형성하는 방법이 연구 되어왔다.^[2,3] 또한 ITO-유기층 광도파로 모드를 OLED 외부로 추출시키기 위한 방법으로 ITO-유리기판 사이에 격자구조를 형성하는 연구를 진행해 오고 있다. ITO-유기층은 수백 나노미터의 두께만을 가지지만 높은 굴절률을 가지기 때문에 광도파로를 형성하게 되며 이로 인해 50% 가까운 빛이 ITO-유기층 광도파로를 따라 도파하게 된다.^[4-6] 본 연구는 OLED 내부에 빛이 갇히는 두 가지 원인을

해소시켜서 외부 출력 효율을 높이기 위한 것이다. 첫째로 유리기판-공기 층 전반사 현상을 줄이기 위한 마이크로 렌즈

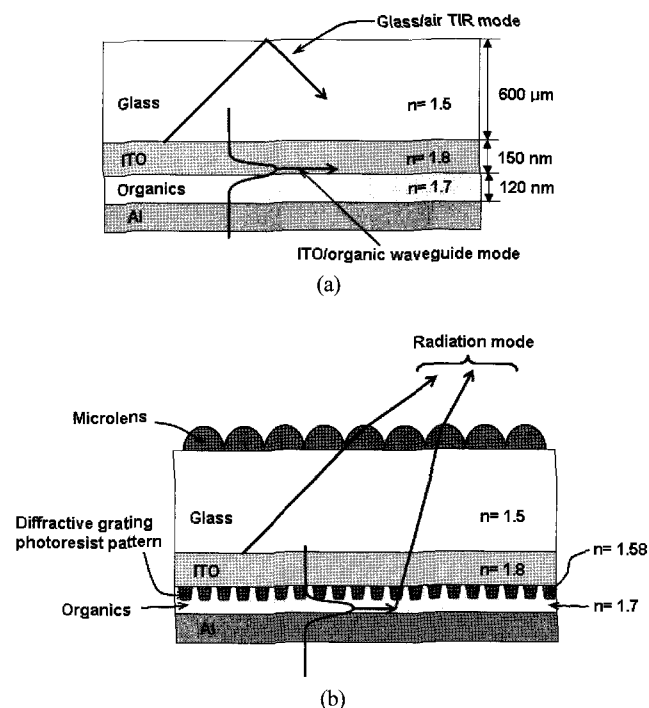


그림 1. (a) OLED에서 생성된 빛이 외부로 추출되지 못하고 소자 내부에 갇히는 유리기판-공기 층 전반사 모드와 ITO-유기층 도파모드에 대한 개념도.

(b) 본 연구에서 제안한 OLED 구조의 개념도: 마이크로 렌즈 어레이와 회절격자 레지스트 패턴을 이용하여 소자 내부에 갇혀있는 빛들을 외부로 추출해 낼 수 있음.

[†] E-mail: mincheoloh@pusan.ac.kr

어레이 구조를 설계하고 포토레지스트의 reflow 현상과 PDMS 임프린팅 공정을 이용하여 렌즈구조를 OLED 소자의 표면에 제작하였다. 두 번째, ITO-유기층 도파모드로 간히는 빛을 추출해 내기 위하여 도파모드가 발생하는 ITO와 유기층 사이에 회절격자 레지스트 패턴을 삽입하는 방법을 제안하였다. 그림 1(b)는 본 연구에서 제안하는 OLED 구조의 개념도이다. 마이크로 렌즈 어레이와 회절격자 레지스트 패턴을 제작하여 OLED의 내부에서 형성되는 모든 빛을 외부로 추출 시켜서 기존의 20%에 불과한 추출효율을 50% 이상으로 끌어 올리게 되면 발광효율이 기존 소자에 비하여 2.5배 수준으로 개선 될 수 있다.

II. 광 추출 효율 개선을 위한 구조 설계

2.1. 마이크로 렌즈 어레이를 가지는 구조

유리기판과 공기에 의해서 형성되는 경계면은 굴절률 차이가 0.5 정도에 이르게 되어 전반사를 일으키는 임계각이 41.8도가 되며 이 각도 이상으로 경계면에 입사되는 빛들은 외부로 추출되지 못하고 유리기판 내부에 갇혀있게 된다. OLED에서 발광되는 빛이 모든 각도 방향으로 균일하게 전파한다고 가정하면 경계면에서 투과 비율은 25%에 불과해진다. 마이크로 렌즈 어레이를 이용한 OLED 구조에서 광 추출효율을 최대화 시킬 수 있는 구조의 설계를 위해 Advanced System Analysis Program(ASAP) 시뮬레이션을 실행하였다. ASAP은 ray optics 방법을 이용하여 굴절률이 서로 다른 물질에 의한 경계면에서 발생하는 반사, 투과 문제를 해석하는 프로그램이다. 유기물 다층 박막으로 형성된 OLED 박막의 두께는 120 nm 굴절률이 1.7, ITO 층은 두께 150 nm 굴절률 1.8이 되고, OLED 소자를 제작하는데 이용된 유리기판의 두께는 600 μm 이며 굴절률은 1.5이다. 계산 시간을 고려하여 시뮬레이션을 위한 소자의 면적은 50 $\mu\text{m} \times 50 \mu\text{m}$ 으로 설정하였으며 반사경계조건을 통하여 computation boundary를 통과하는 빛은 생기지 않도록 하였다. 이 때 경계면에서는 mirror image 효과가 나타나게 되며, 이로 인해 넓은 면적의 소자를 해석하는 것과 동일한 효과를 얻게 된다. 시뮬레이션 과정에서 발생할 수 있는 수치해석상의 오류를 최소화하기 위한 계산 조건을 검토하였으며 최종적으로 7 \times 7개의 점 광원을 1 μm 간격으로 배열하고 각각의 광원에서 1000개의 광선이 출력되도록 설정하였다. 마이크로 렌즈의 효과를 살피기 위하여 렌즈의 크기와 렌즈간의 간격 그리고 렌즈의 굴절률을 변화시키며 시뮬레이션 하였다. 마이크로 렌즈 어레이를 가지지 않는 OLED 소자의 경우 외부로 추출되는 출력결합 효율은 15%로 나타났으며 렌즈의 직경이 10 μm , 렌즈의 굴절률이 유리기판과 동일한 1.5인 경우 외부 추출 효율은 35.8%로 증가하게 되었다. 한편, 렌즈 제작에 사용할 폴리머의 굴절률이 1.44인 점을 감안하여 시뮬레이션 하였을 때 외부 추출 효율은 32%로 조금 줄어들게 되었다. 렌즈의 굴절

률을 1.44로 설정하고 렌즈간의 간격을 변화시키며 시뮬레이션 한 결과에서는 렌즈간의 간격이 2 μm 일 때 외부 추출 효율이 35.4%였고, 5 μm 일 때 32%, 10 μm 일 때 28%로 나타났다. 본 연구에서는 렌즈 구조 제작 공정의 한계를 고려하여 10 μm 의 직경과 10 μm 의 간격을 가지는 렌즈 어레이 구조를 채택하였다.

2.2. 회절격자 레지스트 층을 이용한 구조

OLED 내부에서 생성된 빛 중 50% 가량이 ITO-유기층의 높은 굴절률로 인해 형성된 광도파로를 따라 도파하게 된다. 이러한 도파모드를 외부로 추출하기 위하여 ITO와 유기층 사이에 포토레지스트로 형성된 회절격자 패턴을 삽입하였다. ITO 층 위에 포토레지스트를 이용하여 회절격자를 제작하면 포토레지스트 패턴이 질연층 역할을 하면서 발광이 되지 않는 영역이 발생하게 된다. 2차원 회절격자를 가지는 OLED의 경우 회절격자를 가지지 않는 OLED에 비하여 발광면적이 3/4으로 줄어들게 되고, 두 소자에 동일한 전류를 인가한다고 할 때 단위면적당 전류밀도가 회절격자 소자에서 4/3배로 증가하게 된다. OLED 전류밀도-전압관계에서 전류밀도가 전압의 제곱에 비례하므로($J \propto V^2$) 전류밀도가 4/3배로 증가하면 전압은 $\sqrt{4/3}$ 배 큰 값으로 나타나게 된다. 한편 소자의 휘도(luminance)를 계산해보면 단위면적당 휘도는 전류밀도에 비례하여 격자가 있는 경우 4/3배 큰 값이 되지만 면적을 곱한 총 휘도 값은 전체 인가된 전류와 비례하게 되어 회절격자를 가지는 소자와 회절격자를 가지지 않는 소자 모두 동일한 값을 가지게 된다. 결론적으로 동일한 전류를 인가한 경우 휘도는 일정하게 유지되나 OLED 소자에 걸리는 전압이 증가하여 인가전력이 $\sqrt{4/3}$ 만큼 올라가게 되며 이로 인해 동일 전력당 발광효율(lm/W)은 $\sqrt{3/4}$ (=0.87)으로 감소하게 된다. 그러나 제안된 회절격자 구조를 이용하여 ITO-유기층 도파모드로 인해 손실되던 빛들을 모두 외부로 추출해 낼 수 있다고 가정하면, 소자내부에서 발생한 빛 중 18.9%만이 외부로 추출되던 것이 65.8%로 추출되면서 외부추출 효율은 3.48배가 된다. 광원의 파장은 Alq₃ 발광파장인 530 nm로 두고, 유리기판의 굴절률 1.5 두께 600 μm ; ITO의 굴절률 1.8 두께 150 nm, 유기층의 굴절률 1.72 두께 120 nm, 그리고 회절격자의 제작에 사용할 포토레지스트의 굴절률 1.58, 두께 150 nm로 설정하였다. ITO-유기층 도파모드로 도파하던 530 nm 파장의 빛이 회절격자에 의해 외부로 출력 결합될 때 그 빛의 각도가 수직이 되도록 하는 1차 회절격자 주기는 317 nm가 된다.

III. 소자제작 공정 및 특성 측정

3.1. OLED 소자구조

마이크로 렌즈 어레이와 회절격자를 포함하는 OLED 소자

를 형성하는 전극과 유기물 재료는 그림 2에서 보인 바와 같다. OLED 소자의 기본적인 제작공정은 다음과 같다. 먼저 ITO 전극 표면 위의 수분을 제거하기 위하여 ITO 패터닝되어 있는 유리기판을 200°C hotplate 위에 2시간 동안 baking 한다. 이후 홀 주입 향상을 위하여 산소 플라즈마를 이용한 표면처리를 20초간 하게 된다. 전처리를 마친 ITO 기판 위에 그림 2에서 보여지는 유기물들을 차례대로 열증착 하여 OLED 구조를 제작한다. 10^{-7} Torr의 고 진공상태에서 정공 전달층으로 NPB(N, N-bis-naphthalene-1-yl-N, N-bisphenyl benzidine)를 60 nm, 전자 전달층인 동시에 발광층인 Alq₃(tris-8-Hydroxy quinoline aluminum emitter layer)는 20 nm, 그리고 높은 전자 이동도를 가지는 BPhen(4,7-diphenyl-1,10-phenanthroline)은 전자 전달층으로 40 nm 증착하고, LiF(0.5 nm)와 Al(80 nm)을 차례로 증착한 뒤 질소 분위기에서 encapsulation 하여 OLED 소자 제작을 완성하였다. BPhen 재료는 전자이동도를 향상시켜서 소자의 구동전압을 떨어뜨리는 역할을 담당하게 되며 본 연구에서 634 nm 주기의 2D 격자구조를 가지는 소자 제작 과정에 도입되었다. 그 외의 소자들은 BPhen이 없는 기본적인 두 종류의 유기물로 구성된다.

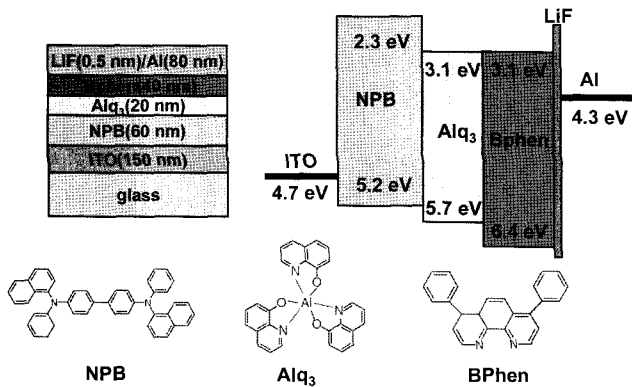


그림 2. 본 연구에서 제작한 OLED 소자의 구조도와 에너지 밴드 다이어그램, 그리고 소자 제작에 사용된 유기물들의 분자 구조를 나타냄.

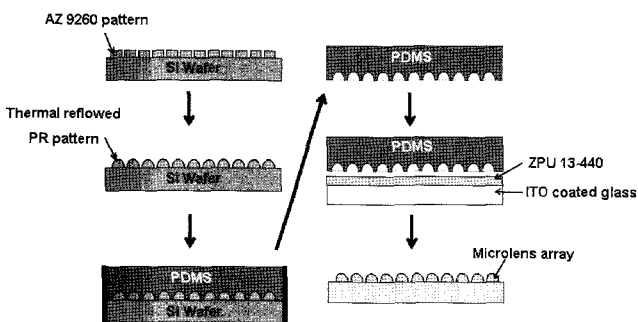


그림 3. 마이크로 렌즈 어레이 제작 방법: 실리콘 웨이퍼 위에 포토레지스트 AZ 9260을 이용하여 포토리소그래피 한 뒤 thermal reflow 하여 마이크로 렌즈를 제작하고, 제작된 마이크로 렌즈 어레이를 이용하여 PDMS 몰드를 제작한 뒤 ZPU 13-440 위에 soft nano-imprinting 하여 마이크로 렌즈 어레이를 전사함.

3.2. 마이크로 렌즈 어레이를 가지는 OLED

마이크로 렌즈를 제작하는 대표적인 방법들에는 thermal reflow 방식, diffuser를 이용한 포토리소그래피 방식, RIE(Reactive Ion Etching)을 이용한 방식이 있다. 이 중 포토레지스트를 이용한 thermal reflow 기술은 낮은 가격으로 간단히 제작할 수 있다는 장점을 가진다.^[8] 본 실험에서는 thermal reflow 방식을 이용하여 마이크로 렌즈 어레이를 제작하고 PDMS(poly-dimethylsiloxane) 몰드를 이용한 soft nano-imprinting 방식으로 OLED 상부에 렌즈 어레이 구조를 전사하였다. Thermal reflow를 통한 렌즈 형성과정은 그림 3과 같다. 먼저 실리콘 웨이퍼 위에 AZ 9260 포토레지스트를 스핀 코팅 한 후 포토리소그래피 공정을 통하여 원하는 크기의 포토레지스트 패턴을 만든다. 이 때 실험에 이용한 AZ 9260은 유리전이온도(T_g) 115°C 이상에서 표면장력에 의해 반구형으로 변하게 된다. 포토레지스트 패턴이 형성된 실리콘 웨이퍼를 160°C hotplate 위에 30분 동안 올려두게 되면 포토레지스트 thermal reflow를 통해 마이크로 렌즈 어레이가 형성된다. 그림 4는 thermal reflow 된 마이크로 렌즈 패턴을 현미경으로 관측한 사진이다. 제작된 마이크로 렌즈 어레이를 이용하여 soft nano-imprinting을 하기 위한 PDMS 몰드를 제작한다. 그리고 ITO가 코팅된 유리기판 뒷면에 UV 경화 폴리머의 일종인 ZPU($n=1.44$)를 코팅한 후, 코팅된 ZPU 위에 PDMS 몰드를 찍은 상태로 20분간 UV 경화 하게 되면 손쉽게 마이크로 렌즈 어레이를 형성할 수 있다. 이후 마이크로 렌즈 어레이가 제작된 기판 위에 열 증착 방식을 이용하여 3.1절에서 설명한 방식대로 OLED 구조를 형성하게 된다. 그

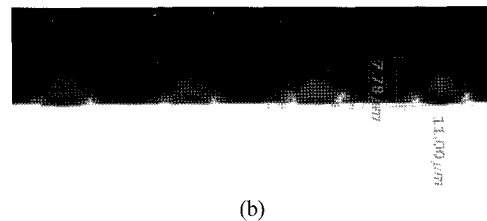
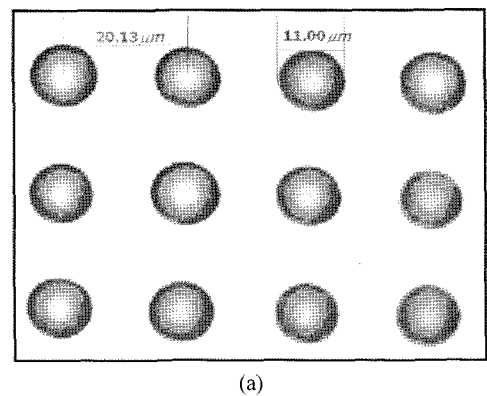


그림 4. Thermal reflow 된 마이크로 렌즈 어레이 현미경 관측 사진: 평면도와 측면도.

림 5는 마이크로 렌즈 어레이를 가지는 OLED와 마이크로 렌즈 어레이를 가지지 않는 OLED의 J-V 특성과 발광효율 (lm/W) 그래프이다. J-V 특성은 동일한 결과를 보이는 반면 발광전력효율에서는 마이크로렌즈 어레이를 가지는 소자가 20 mA/cm² 전류밀도에서 발광효율이 22% 개선됨을 볼 수 있다. 마이크로 렌즈를 가지는 소자에서는 정면에서의 효율 개선보다 측면에서의 개선이 훨씬 더 큰 폭으로 이루어 질 것이라 예상할 수 있다. 그러므로 설계상에서는 소자의 정면과 측면에서 관측할 수 있는 효율개선을 한꺼번에 보이는 반면에 정면에서만 발광특성을 측정할 실험 결과는 설계상의 예상 치에 미치지 못하는 것으로 생각된다.

3.3. 회절격자구조를 가지는 OLED

주기가 317 nm인 회절격자를 OLED 소자의 ITO 층 위에 제작하기 위하여 Ar laser(Coherent Innova70, 488 nm) 광원을 이용하여 holographic interference 방법으로 TSMR 포토 레지스트를 감광시킨다. 주기가 317 nm인 경우에는 488 nm 광원을 이용한 이차원 격자 구조 제작에 어려움이 있어서 일

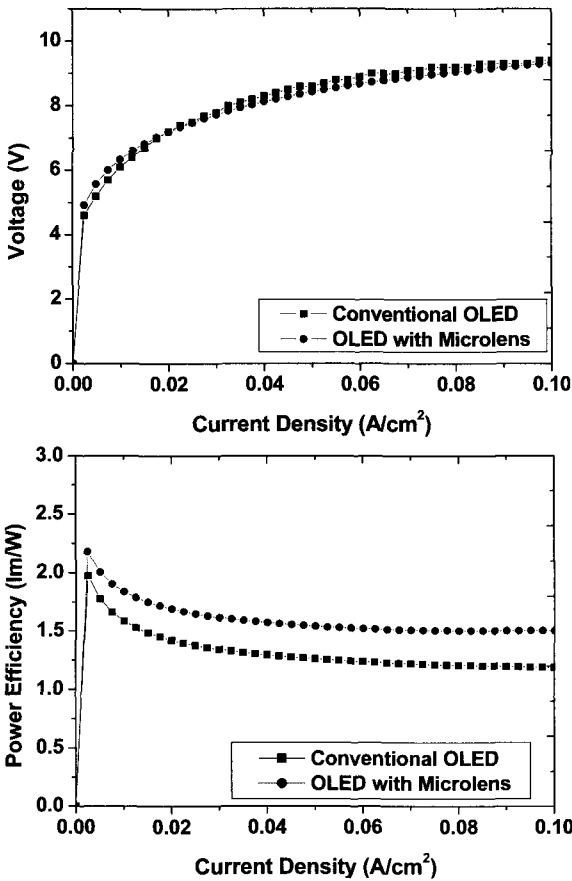
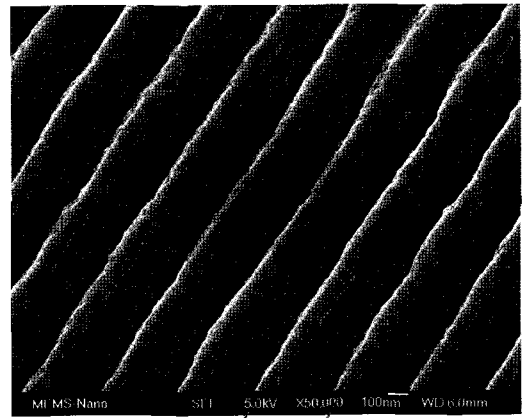
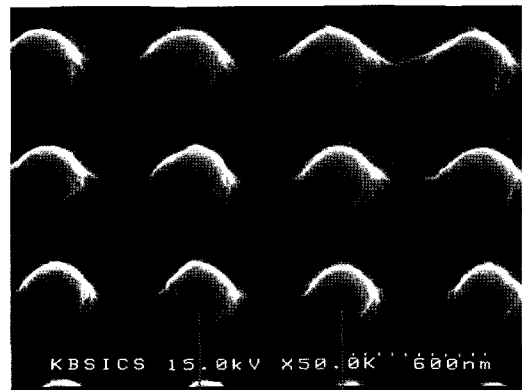


그림 5. 마이크로 렌즈 어레이를 가지는 OLED와 마이크로 렌즈 어레이를 가지지 않는 OLED의 J-V 특성과 power efficiency 그래프: 두 소자의 J-V 특성은 동일하게 나타났고, 마이크로 렌즈 어레이를 가지는 OLED의 경우 22%의 효율 개선이 이루어졌음.

차원 구조로만 제작하게 되었다. 그림 6은 제작된 회절격자들의 SEM 사진이다. 회절격자가 제작된 ITO 위에 열 증착 방식을 이용하여 유기물을 증착 하였다. 317 nm 1D 회절격자 OLED는 NPB(60 nm) / Alq₃(60 nm) / LiF(0.5 nm) / Al(80 nm)의 구조를 가지며 634 nm 2D 회절격자 OLED는 NPB(60 nm) / Alq₃(20 nm) / BPhen(40 nm) / LiF(0.5 nm) / Al(80 nm) 구조를 가진다. 그림 7은 317 nm 1D 회절격자를 가지는 OLED의 J-V 특성과 발광효율(lm/W)을 나타내는 그래프이다. 1D 회절격자를 가지는 경우에 전류가 흐를 수 있는 발광영역이 절반으로 줄어들므로 인해 20 mA/cm² 전류밀도를 형성하는 구동전압이 1.21배 높게 나타났다. 이 같은 구동전압의 상승에도 불구하고 회절격자로 인한 광 추출효율 개선으로 발광효율은 26% 개선되는 것을 확인하였다. 그림 7은 634 nm 2D 회절격자를 가지는 OLED의 J-V 특성과 발광효율(lm/W)을 나타내는 그래프이다. 2D 회절격자를 가지는 경우에는 발광영역이 3/4로 감소하게 되며 회절격자를 가지지 않는 경우보다 20 mA/cm²인 경우 구동전압이 1.04배 크



(a) 317 nm 일차원 회절격자



(b) 634 nm 이차원 회절격자

그림 6. 레이저 간섭계를 이용하여 제작한 회절격자 레지스트 패턴의 SEM 사진.

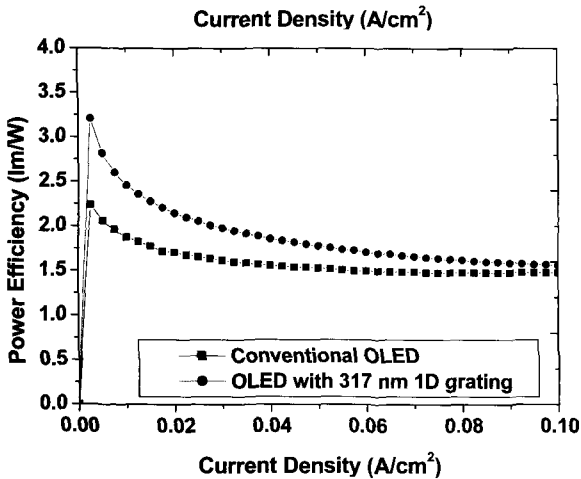
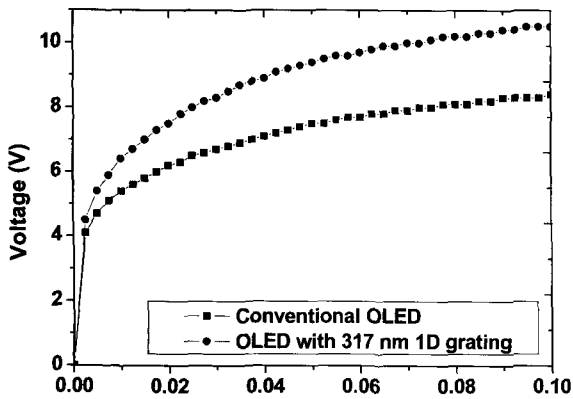


그림 7. 317 nm 일차원 회절격자 레지스트 패턴을 가지는 OLED와 회절격자를 가지지 않는 OLED의 J-V 특성과 power efficiency 그래프: 회절격자를 가지는 소자의 구동전압이 1.26배 크게 나타났지만 전류밀도 20 mA/cm²에서 26%의 효율이 개선됨.

게 나타났다. 하지만 발광효율은 회절격자로 인하여 41% 개선되었다.

IV. 결 론

OLED에서 발광되는 빛들은 유기광원-공기 층 경계면의 전반사와 ITO-유기층 광도파로 모드에 의해 갇히게 되는데 본 연구에서는 마이크로 렌즈 어레이와 회절격자 레지스트 패턴을 이용하여 내부에 갇혀있는 빛들이 외부로 추출될 수 있도록 하였다. 마이크로 렌즈 어레이를 가지는 OLED의 경우 10 μm 직경과 10 μm 간격의 마이크로 렌즈 어레이를 제작하여 유기광원-공기 층 전반사 되는 빛들의 일부를 외부로 출력 결합시켜 22%의 효율개선을 얻었다. 그리고 회절격자 레지스트 패턴을 가지는 OLED의 경우 317 nm 일차원 회절격자와 634 nm 이차원 회절격자를 ITO와 유기물 사이에 삽입하여 도파모드의 빛을 외부로 추출함으로써 각각 26%, 41%의 효율개선을 얻었다.

마이크로 렌즈 어레이의 위치와 간격을 수정하고 좀 더 많은 마이크로 렌즈를 가지는 구조로 제작하게 되면 보다 나은

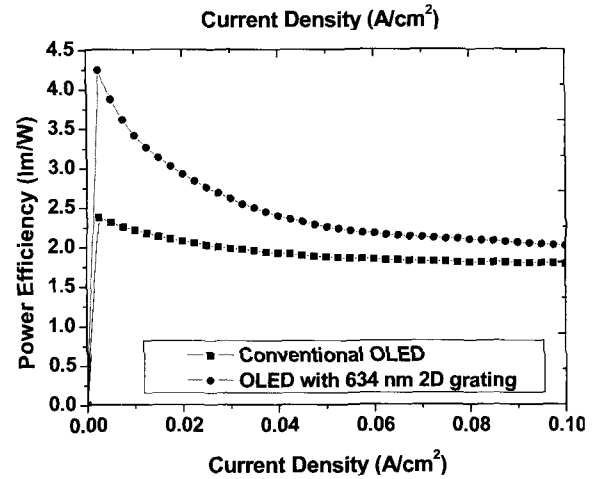
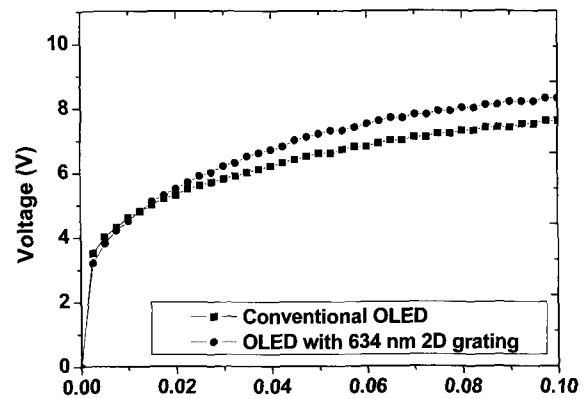


그림 8. 634 nm 이차원 회절격자 레지스트 패턴을 가지는 OLED와 회절격자 패턴을 가지지 않는 OLED의 J-V 특성과 power efficiency 그래프: 회절격자를 가지는 소자의 구동전압이 1.15배 크게 나타났지만 전류밀도 20 mA/cm²에서 41%의 효율이 개선됨.

효율개선이 이루어 질 것이다. 또한 1차원 317 nm로 2D 회절격자를 제작하게 되면 회절격자를 가지지 않는 OLED 보다 1.15배 큰 전압을 요구하더라도 634 nm 2D 회절격자의 경우보다 더 많은 빛들이 수직으로 회절 되면서 더 큰 폭의 효율개선이 이루어 질 수 있을 것이다. 사실상 이러한 구조는 단색광 OLED의 경우에 내부에서 도파되는 빛을 특정 방향으로만 효율을 개선한다는 한계점이 있지만 제안된 구조를 통한 발광효율의 개선을 확인한 본 연구의 결과를 바탕으로 예상되는 이러한 한계점을 해결하기 위한 방법을 지속적으로 연구할 계획이다. 단주기 회절격자를 가지는 OLED가 아닌 불규칙한 산란 패턴을 가지는 OLED를 제작하여 소자 내부에 도파되는 빛에 각각의 파장들을 모두 수직 결합시킬 수 있는 구조를 통하여 White OLED 뿐만이 아니라 OLED를 이용한 제품에도 무리 없이 적용할 수 있도록 할 것이다. 이에 앞서 수정된 마이크로 렌즈 어레이와 317 nm 2D 회절격자 구조를 가지는 소자를 제작하여 각각의 경우에서 효율개선을 확인하고, 마이크로 렌즈 어레이와 회절격자 레지스트 층을 동시에 가지는 소자를 제작하게 되면 최대 2.5배까지의 효율개선이 이루어 질 수 있을 것이라 예상된다.

감사의 글

이 연구는 2006년도 교육인적자원부 한국학술진흥재단 기초연구 지원사업(KRF-2006-311-D00709), 부산대학교 자유과제 학술 연구비, BK 21 프로그램의 지원으로 수행되었음.

참고문헌

[1] D. Z. Garbuzov, and S. R. Forrest, "Weak microcavity effects in organic light-emitting devices," *Phys. Rev. Lett.*, Vol. 58, No. 7, pp. 3730-3740, 1998.

[2] S. Moller and S. R. Forrest, "Improved light out-coupling in OLED employing ordered microlens arrays," *J. Appl. Phys.*, Vol. 91, No. 5, pp. 3324-3327, 2002.

[3] H. Peng, Y. L. Ho, X. J. Yu, M. Wong, and H. S. Kwok, "Coupling efficiency enhancement in OLED using microlens array-theory and experiment," *J. Disp. Tech.*, Vol. 1, No. 2, pp. 278-282, 2005.

[4] Y.-J. Lee, S.-H. Kim, J. Huh, G.-H. Kim, Y.-H. Lee, S.-H. Cho, Y.-C. Kim, and Y.-R. Do, "A high-extraction-efficiency nanopatterned OLED," *Appl. Phys. Lett.*, Vol. 82, No. 21, pp. 3779-3781, 2003.

[5] K. Ishihara, M. Fujita, I. Matsubara, T. Asano, S. Noda, H. Ohata, A. Hirasawa, H. Nakada, and N. Shimoji, "OLED with photonic crystals on glass substrate fabricated by nanoimprint lithography," *Appl. Phys. Lett.*, Vol. 90, 111114, 2007.

[6] Y.-C. Kim, and Y.-R. Do, "Nanohole-templated OLED fabricated using laser-interfering lithography: moth-eye lighting," *Opt. Express.*, Vol. 13, No. 5, pp. 1598-1603, 2005.

[7] J. D. Wright, *Molecular Crystals*, 2nd Ed. (Cambridge University Press, 1995, Cambridge), p. 149.

[8] X. C. Yuan, W. X. Yu, M. He, J. Bu, W. C. Cheong, H. B. Niu, and X. Peng, "Soft-lithography-enabled fabrication of large numerical aperture refractive microlens array in hybrid SiO₂-TiO₂ sol-gel glass," *Appl. Phys. Lett.*, Vol. 80, 114102, 2005.

Outcoupling Enhancement of OLED using Microlens Array and Diffractive Grating

Ji-Hyang Jang, Kyung-Jo Kim, Jin-Hun Kim, and Min-Cheol Oh[†]

Nano-Bio Photonics Lab., Department of Electronics Engineering, Pusan National University, Pusan (Busan), 609-735, Korea

[†]*E-mail: mincheoloh@pusan.ac.kr*

(Received October 16, 2007, Revised manuscript November 21, 2007)

Outcoupling efficiency of the OLED device is improved by incorporating both a microlens array and a diffractive grating pattern. The microlens array improves the light transmission at the interface of glass and air, and the diffractive grating outcouples the guided mode propagating at the waveguide, which consists of ITO and organic layers. By using the PDMS soft mold imprinting method, the microlens array is fabricated on the glass substrate. The diffractive grating pattern is directly fabricated on the ITO surface by using laser interferometry. A microlens array with a diameter of 10 μm improves the light coupling efficiency by 22%. The diffractive grating made of TSMR photoresist enhances the luminance power efficiency by 41% at a current density of 20 mA/cm².