

나노스피어 리소그래피를 이용한 OLED 광추출 효율의 향상

한광민¹, 여종빈¹, 이현용^{2,a}

¹ 전남대학교 기능성나노 신화학소재사업단

² 전남대학교 응용화학공학부

Improvement of Extraction Efficiency of OLED by Nanosphere Lithography

Gwang-Min Han¹, Jong-bin Yeo¹, and Hyun-Yong Lee^{2,a}

¹ Center for Functional Nano Fine Chemicals, Chonnam National University, Gwangju 500-757, Korea

² Faculty of Applied Chemical Engineering, Chonnam National University, Gwangju 500-757, Korea

(Received July 29, 2011; Revised August 30, 2011; Accepted November 24, 2011)

Abstract: The light extraction efficiency of top-emitting organic light-emitting diode (OLED) was improved by insertion of corrugation patterns between indium tin oxide and organic layers. The corrugation patterns was fabricated by nanosphere lithography, which could form a self-assembled particle monolayer over a large area. The electrical and optical properties for the OLED devices fabricated by vacuum evaporation, were investigated. We have demonstrated the enhancement of the power efficiency of corrugated OLED. As a result, the power efficiency of the corrugated OLED was found to be more than 42%.

Keywords: OLED, Nanosphere lithography, Power efficiency

1. 서 론

나노스피어 리소그래피는 저렴하고 높은 생산성을 보이며 대체 루틴을 가지고 주기적 나노 구조 어레이를 간단하게 제조할 수 있는 기술이다. 이 나노스피어 리소그래피는 1981년에 Fisher와 Zingsheim이 폴리스티렌 라텍스 나노구체 연구를 통해서 시작되었고 1990년대 후반에 노스 웨스턴 대학의 Van Duyne 교수와 연구진이 기본 개념과 기술을 확장시켰다. 이 Van Duyne 교수는 기판 위에 폴리스티렌 나노구를 도포하여 주기적 입자 어레이를 만들고 이 위에 금, 은, 구리 등의 금속 필름을 도포하여 금속 나노입자

어레이를 만들었다 [1]. 또한 은 나노 삼각형들이 주기적으로 100 nm의 너비와 50 nm의 높이를 가지고 합성되어 바이오센서로 제작되기도 하였다 [2]. 웨스트 버지니아대학 (West Virginia University) 연구진은 나노구체 리소그래피 방법을 향상시켰고 크기, 모양, 피치를 조절할 수 있는 대면적 (웨이퍼 크기)이며 고품질인 나노구조 어레이 패턴을 제조할 수 있었다. 특히 나노스피어의 RIE 식각하여 금속 물질의 증착 마스크로 사용하여 투명전극을 제작한 연구는 [3] 나노스피어 리소그래피 공정의 다양한 적용을 보여준 사례라고 할 수 있다. 이 방법의 또 다른 장점은 저가이며 높은 생산성을 보이며 고해상도 기술이라는 점이다. 연구진은 나노 패터닝을 용이하게 하기 위해서 전기증착 과정을 나노스피어 리소그래피 기술과 결합시켰다 [4]. 다양한 첨단 리소그래피 기술과 리소

a. Corresponding author; hyleee@chonnam.ac.kr

그래피 이외의 방법들이 나노크기와 마이크로 크기의 구조를 만드는데 사용되었고 여러 가지 패턴과 기능성 소재를 만드는 마스크 (mask)나 템플릿으로 기공의 잘 정렬된 어레이와 효율적인 비용을 가지고 있는 자기조립 콜로이드 결정 (colloidal crystal)을 사용했다는 점이 주목할 만하다.

OLED 소자의 효율을 높이기 위한 방법은 크게 내부 양자효율을 높이는 방법과 외부 양자효율을 높이는 방법이 2가지로 구분된다. 내부양자효율은 외부 전극으로부터 주입된 전하 수에 대해 소자 내부에서 발생한 광자 수의 비율로 주어진다. 따라서 내부양자효율을 높이기 위해서는 발광재료의 개발이나 전자-정공의 원활한 공급을 위한 다층 구조 연구가 주로 진행되고 있다. 이에 반해 외부 양자효율을 높이기 위한 연구는 주로 내부에서 생성된 빛을 소자의 외부로 추출하는 출력결합 효율을 향상시키는 연구가 진행되고 있다. OLED에서 외부로 추출되지 못하고 내부에 갇히게 되는 빛들은 유리기판과 공기층의 굴절률 차이로 인해 발생하는 전반사 모드와 높은 굴절률 가지는 ITO (indium tin oxide)-유기층을 진행하는 도파 모드가 있다. 각 층에서 빠져 나오는 빛의 양은 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 [5]. 이와 같이 소자 내부에 갇혀서 외부로 나오지 못하는 빛들을 외부로 추출해 내기 위해서 다양한 연구결과가 발표되고 있다. 먼저 유리기판-공기 층 경계 면에서의 전반사를 줄이기 위해서 유리기판 위에 마이크로 렌즈를 형성하는 방법이 있다 [6,7]. ITO-유기층 광도파로 모드를 OLED 외부로 추출시키기 위한 방법으로 ITO-유리기판 사이에 격자구조를 형성하는 연구가 진행되어지고 있는데 ITO-유기층은 수백 나노미터의 두께만을 가지지만 높은 굴절률을 가지기 때문에 광도파로를 형성하게 되며 이로 인해 50% 가까운 빛이 ITO-유기층 광도파로를 따라 도파하게 된다 [8-10]. 이러한 손실을 줄여주기 위해 OLED의 내부에 2차원의 균일한 패턴 구조를 형성시키는 방법이 연구되었다 [11]. 또한 이와 유사하게 OLED 소자의 내부에 2차원 광자 결정 구조의 폴리머층을 삽입하여 구조를 변형한 OLED 소자에 관한 연구는 내부 구조의 병형에 따른 발광 효율의 변화에 대한 의미있는 결과를 보여주었다 [12].

본 연구에서는 다양한 장점을 갖는 나노스피어 리소그래피를 이용하여 OLED 소자의 외부 광 추출 효

율을 향상시키기 위한 실험을 진행하였다.

2. 실험 방법

2.1 ITO 박막의 패턴 형성

나노스피어의 정렬을 위해 OLED의 양극의 역할을 하는 ITO가 200 nm 정도 증착된 유리 기판을 사용하였다. 세척 순서는 아세톤 (acton), 트리클로로에틸렌(trichloroethylene), 이소프로필알콜 (iso-propyl alcohol), 탈이온화수 (DI water) 순서로 초음파발생기를 이용해 각각 10분 씩 진행하였다. 그리고 각 순서에 잔류 세척액은 탈이온화수로 제거하였다. 이 방법은 일반적으로 널리 사용되는 기판 세척 방법으로 기판에 묻어있는 유기 물질, 이온 물질, 금속 물질 등의 불순물 자국뿐만 아니라 표면에 있는 미립 물질을 제거하기 위해 화학적 세척법이다. 나노스피어의 스핀코팅을 위한 정렬을 위해서 꼭 필요한 작업인 기판의 표면 친수화 처리를 위하여 탈이온화수와 수산화암모늄 (ammonium hydroxide), 과산화수소 (H_2O_2)의 혼합액 (5:1:1)에 기판을 초음파발생기에서 1시간 이상 충분히 처리하였다. 초음파 처리이 끝난 후 탈이온화수로 린스 후 질소 가스를 이용해 기판을 건조하였다. ITO 기판 위에 나노스피어 단일층 배열을 형성하기 위해 스핀코팅 방법을 이용하였다. 전처리된 기판위에 제조한 직경 500 nm의 크기를 갖는 실리카 콜로이드 용액을 기판에 퍼트려주고 스핀코팅의 800 rpm의 저속 회전속도에서 서서히 진행하여 나노스피어가 자가 조립을 통해 단일막을 형성하도록 하였고 이후 남은 잔여 콜로이드 용액을 2,500 rpm 정도의 고속 회전속도에서 제거하였다. ITO박막에 단일층 정렬된 500 nm의 직경을 가지는 각 실리카 bead의 틈새는 매우 좁기 때문에 이후 ITO를 스퍼터링을 통해 채워주기에 어려움이 있다. 따라서 ITO박막의 패턴닝을 위해서는 실리카 bead의 크기를 ICP (inductively coupled plasma) 건식식각을 통하여 줄여주었다. ICP의 반응성 가스로는 CF_4 가스를 이용해 실리카 bead만 선택적으로 식각되도록 하였다. ICP의 공정 조건은 RF 파워 100 W, bias 50 W, 공정 압력 10 mTorr, CF_4 가스 유량 30 sccm으로 고정하였고 공정시간은 150 초, 300초, 450초, 600초, 750초, 900초로 하여 실험을 진행하였다. 충분히 식각된 실리카 나노스피어 단일층이 정렬된 ITO기판에 패턴을 만들어주기 위해 상

온에서 RF-magnetron sputtering으로 제작하였다. 스퍼터링 공정조건은 RF 파워가 75 W, 공정 압력은 2.4 mTorr, Ar 가스 유량은 30 sccm으로 하였고 공정시간은 5분, 10분, 15분 정도로 하여 ITO를 스퍼터링하였다. 스퍼터링 직후 높은 저항을 보이는 ITO 박막을 개선하기 위해 질소분위기에서 5°C/min의 승온속도로 300°C에서 1시간 동안 열처리를 진행하여 기존에 증착되어 있던 ITO와의 저항차이를 4-point probe method로 박막의 면저항을 측정하여 확인하였다. 또한 패터닝 공정의 마스크의 역할을 하였던 실리콘 나노스피어를 초음파세척기에서 1시간 동안 처리하여 제거하였다. ITO는 삼성코닝에서 제작한 것으로 빛 투과율이 80% 이상이고, 면 저항이 10 Ω/□인 것을 사용했다. 패터닝 순서는 ITO가 전면 코팅된 4 cm×4 cm 유리 기판을 준비하고 다시 4 mm × 2 cm 크기의 직사각형 라인에 해당하는 ITO 부분만을 남겨두고 산 (酸)으로 에칭한다. 이때 산 (酸)은 왕수 (王水)로써 질산 : 염산 = 1 : 3 비율로 제조하여 사용하였다. 내산 재료로는 절연 테이프를 사용하였으며, 에칭 시간은 약 10분 정도로 최적화된 시간 동안 진행하였다. 기판의 표면 상태는 제작된 박막의 특성에 커다란 영향을 미친다. 따라서 기판의 처리에 있어서 청결성이 가장 중요하다. 패터닝된 ITO를 cell holder에 고정시킨 후, 아세톤 (acetone), 트리클로로에틸렌 (trichloroethylene), 이소프로필알콜 (iso-propyl alcohol), 탈이온화수 (DI water) 순서로 초음파세척기를 이용해 각각 10분 씩 진행하였다. 각 순서에 잔류 세척액은 탈이온화수로 제거하였다.

2.2 열 증착을 이용한 OLED 소자 제작

OLED 소자의 제작을 위한 재료로 HTL (hole transport layer) α-NPD, EL (emitting layer) Alq₃, EIL (electron injection layer) LiF를 사용하였다. 그리고 양극 전극으로 ITO 박막을 사용하였고, 음극 전극으로 Al을 사용하였다. 유기 단분자 박막은 thermal evaporator를 이용하여 진공 증착하였다. 각 물질은 증착기의 최대 압력 Torr에서 증착속도는 2~5 Å/s 증착하였고, Al 전극은 20 Å/s 이상의 비교적 빠른 증착속도에서 막을 증착하였다. 파형 패턴으로 제작된 OLED 소자의 발광특성 비교를 위하여 일반적인 평판 OLED 소자를 같은 방법으로 제작하였다. 이러한 OLED 소자의 제작 순서의 개략도를 그림 1에 나타내었다.

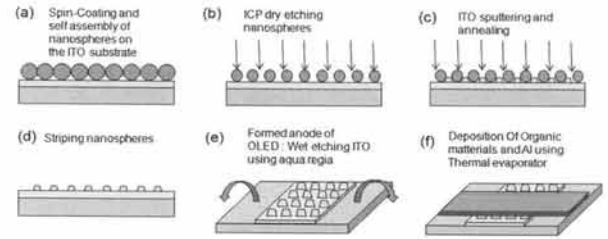


Fig. 1. Schematic diagram of OLED device manufacturing process.

2.3 분석 및 특성 평가

나노스피어 리소그래피의 스핀 코팅 후 단일층 정렬 확인 및 ICP 공정 이후 식각된 실리콘 나노스피어의 크기 분석과 나노스피어 마스크로 이용한 ITO 스퍼터링 후 표면의 패턴을 확인하기 위하여 SEM (scanning electron microscope)과 AFM (atomic force microscopy)를 사용하였다. 제작된 OLED 소자의 전기적 광학적 특성 평가를 위하여 평판형 소자와 패터닝된 소자와 비교하여 current-voltage-luminescence 장치를 이용하여 측정하였다. 이 때 측정에 사용된 일반적 평판 OLED 소자와 패터닝된 OLED 소자의 구조를 그림 2에 나타냈다.

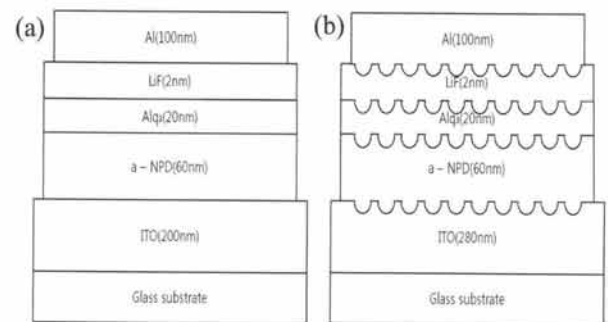


Fig. 2. Schematic diagram of the structure of (a) flat OLED cell and (b) patterned OLED cell.

3. 결과 및 고찰

3.1 표면 친수화 처리에 따른 나노스피어의 정렬

ITO박막 위에 나노스피어의 단일층 정렬시키기 위해서는 선행되어야 하는 공정이 탈이온화수와 수산화

암모늄 (ammonium hydroxide), 과산화수소 (H₂O₂)의 혼합액 (5:1:1)을 이용한 초음파처리 방법이다. 이러한 친수화 처리는 ITO 기판에서 나노스피어 콜로이드 용액의 퍼트림에 영향을 주기 때문에 나노스피어의 단일층 정렬에 큰 영향을 줄 수 있다. 더욱이 친수화 처리가 되지 않은 소수성 기판에서의 나노스피어 콜로이드 용액은 친수화 처리가 되어 있지 않을 경우 공정자체가 불가능해지기도 한다. ITO 박막의 친수화 여부는 물방울 접촉각 측정을 통해 확인하였다.

친수성 전의 물방울 접촉각이 58°인 것에 반해 친수성 처리 후에는 13°로 접촉각이 작아짐을 확인할 수 있었다. 이러한 물방울 접촉각의 차이는 ITO의 표면이 친수화되었음을 의미한다. 표면 친수화 처리가 잘되지 않은 기판의 경우 나노스피어의 정렬 형태가 불규칙하고 채워진 정도 역시 확연하게 구분될 정도로 미흡함을 확인할 수 있었다.

3.2 ICP를 이용한 나노스피어의 건식 식각

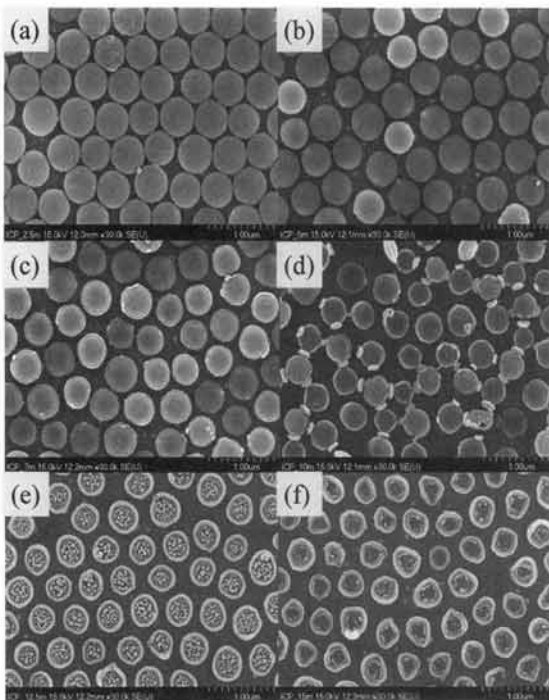


Fig. 3. SEM top view image of dry etched silica nanosphere by ICP at process condition of RF power 100 W, bias power 50 W, process pressure 10 mTorr, CF₄ gas 30 sccm (a) 150 s, (b) 300 s, (c) 450 s, (d) 600 s, (e) 750 s, (f) 900 s.

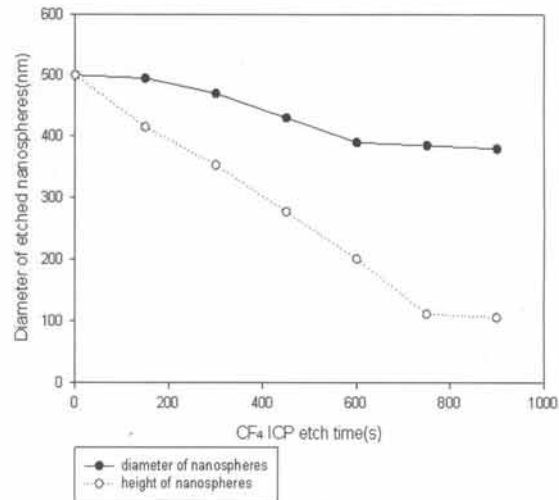


Fig. 4. A change of diameter and pitch of nanosphere in proportion to etch time by ICP.

본 연구에서는 500 nm 크기의 실리카 나노스피어를 사용하고, 이를 CF₄ ICP 건식 식각 공정을 통해 나노스피어의 크기를 줄였다. 그 다음 축소된 나노스피어 위에 스퍼터링으로 ITO를 성막한 후, 나노스피어를 제거함으로써 ITO 박막의 2차원 패턴 구조를 제작할 수 있다. 그림 3은 500 nm 크기의 나노스피어를 CF₄ ICP 건식식각 시간을 (a) 150초, (b) 300초, (c) 450초, (d) 600초, (e) 750초, (f) 900초 각기 달리하여 공정한 후의 SEM 측정이미지이다. CF₄ ICP 식각 시간을 300초로 하였을 때의 나노스피어의 직경은 약 460 nm였고, 450초에서는 430 nm, 600초에서는 380 nm의 직경을 나타내었다. 하지만 그 이상의 시간에서는 직경에 변화가 거의 없이 나노스피어가 링형태로 외벽을 제외한 중앙 부분만 식각됨을 알 수 있다. 나노스피어의 직경과 높이의 식각 차이를 알아보기 위해 ICP 식각 이후 나노스피어가 정렬된 기판의 SEM 단면도를 이용하였다. 식각 시간에 따라 줄어든 나노스피어의 높이는 직경의 식각과 다소 차이가 남을 알 수 있었다. 이러한 식각 정도의 차이는 ICP 건식 식각 공정의 방향성에서 기인한다. ICP 건식 식각이 수직 방향으로 이뤄짐에 따라 넓은 면적으로 식각되는 스피어 면에 의한 스피어의 높이와 조금씩 식각되는 외벽 식각량에 의한 직경 간에 차이가 발생한다. 그림 4에 나타난 바와 같이 직경의 변화에 비해 높이의 변화의 폭이 더 크며 식각 정도는 일정 시간 이후에 saturation됨을 확인할 수 있다.

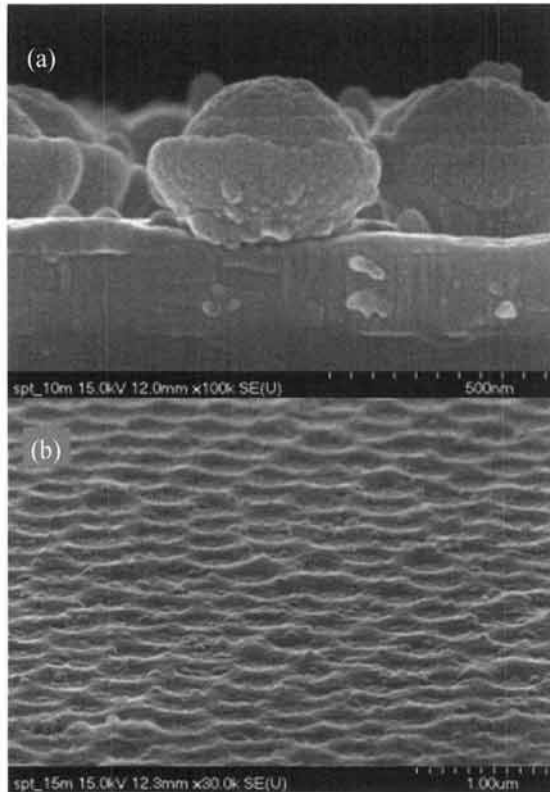


Fig. 5. (a) a SEM image sputtering ITO at opening in shrunk nanosphere, (b) a SEM image of patterned ITO removed nanosphere.

3.3 박막의 열처리와 corrugation 패턴 확인

나노스피어의 사이에 ITO를 채워 패턴을 만들기 위해서 450초의 ICP 공정조건에서 충분히 식각된 샘플로 결정하고 ITO 스퍼터링을 10분 정도 진행하였다. 만약 크기에 변화가 없이 정렬된 나노스피어를 이용할 경우 스퍼터링된 ITO가 기판이 아닌 나노스피어 위쪽으로만 성장된다. ITO는 스퍼터링 직후 투명전극으로써 필요한 요소인 높은 광투과율과 낮은 비저항을 나타내지 못하는데 이는 열처리를 통하여 해결할 수 있다. 열처리에 의한 박막의 면저항의 감소를 4-point probe method를 통해 측정하였다. 표 1에 나타난 것과 같이 300°C 정도의 고온에서 열처리한 ITO 박막의 면저항이 스퍼터 직후 열처리되기 전의 박막에 비해 월등히 낮은 면저항 값을 보임을 알 수 있다. 열처리 이후 ITO 기판의 corrugation 패턴 형태를 정확하게 확인하기 위해 초음파 세척을 이용하여 나노스피어를 제거하였고, 제거되기 전과 후의

Table 1. Sheet resistance of ITO thin film about annealing.

Sample	Sheet resistance [Ω/\square]
as - ITO	8.302×10^3
160°C annealed ITO	10.48×10^3
300°C annealed ITO	3.466
substrate ITO	6.979

ITO박막의 패턴 형태의 SEM 사진을 그림 5에 나타내었다. (a) image에서 나노스피어 측면에 볼록한 부분이 ITO 기판 위에 스퍼터링 방법으로 다시 증착된 두 번째 ITO 박막층으로 약 80 nm 정도의 높이를 가진다. (b)에서는 초음파 세척을 통해 나노스피어를 제거하여 ITO박막의 corrugation 패턴을 명확히 할 수 있다.

3.4 OLED 소자의 제작과 AFM 표면 분석

ITO 박막의 corrugation 패턴을 완성하기 위해 열 증착 장치를 이용하여 유기층을 증착하고 기존 ITO 평평한 박막과 패터닝된 박막 그리고 유기층이 증착된 후 패턴의 표면의 morphology를 비교하기 위해 AFM을 이용하여 표면 분석을 진행하였다. 그림 6(a)는 실험에 사용된 ITO 기판의 표면을 나타낸 AFM 사진이다. 그림 6에서 나타난 것과 같이 표면의 최대 최소의 높이 차이는 박막의 10 nm 정도로 비교적 평평한 형태를 보인 것을 알 수 있다. 이후 나노스피어 리소그래피를 통하여 corrugation 패턴된 ITO의 박막의 형태를 (b)에서 확인할 수 있다. 앞서 SEM 사진을 통해서 확인한 것과 같이 패턴의 높이는 최대 80 nm 정도임을 확인할 수 있다. 나노스피어의 식각과 ITO의 증착과정에서 표면 거칠기가 증가됨을 볼 수 있는데 이러한 표면 거칠기의 증가는 누설전류의 증가로 이어져 소자의 효율을 떨어트릴 수 있지만 본 연구에서는 이러한 변수는 다루지 않았다.

제작된 패턴 위에 열 기상 증착 장치를 이용하여 유기물 층을 증착하게 되는데 이러한 증착 후 corrugation 패턴이 유지가 되는 지 또한 확인할 필요가 있다. (c)에서 α -NPD와 Alq_3 가 각각 80 nm, 20 nm 정도로 증착된 후 패턴의 형태를 확인할 수 있다.

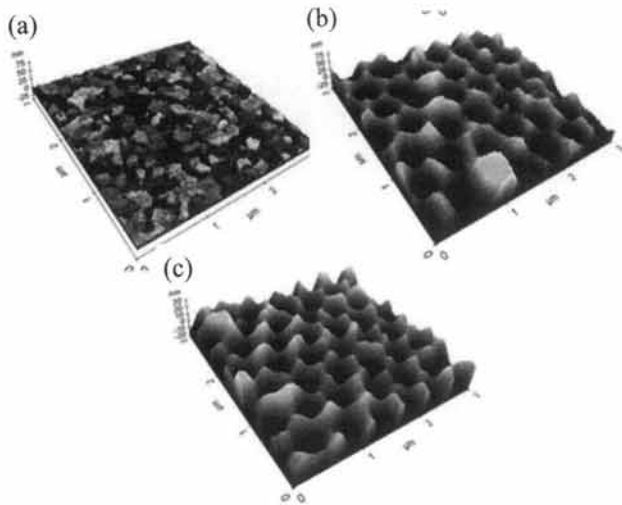


Fig. 6. (a) Surface of flat ITO substrate, (b) surface of ITO corrugation pattern by produced nanosphere lithography process, (c) deposited α -NPD 80 nm, Alq₃ 20 nm on patterned ITO.

패턴의 형태는 기존의 패터닝된 ITO 박막과 거의 동일하며 유기층의 열 증착으로 인하여 morphology 향상됨을 알 수 있다. 또한 패턴의 최대 높이 차이가 기존 80 nm 정도에서 45 nm 정도로 줄어든 것을 확인할 수 있었다.

3.5 OLED 소자의 전기적 광학적 특성평가

본 실험에 의해 제작된 corrugation 패턴 OLED 소자의 전기적 광학적 특성 평가를 위해 그림 2에서 나타낸 것과 같이 두 가지 형태의 OLED 소자를 제작하여 비교하였다. 그림 7는 OLED 소자의 current density-voltage와 power efficiency-voltage 특성을 나타낸 그래프이다. (a)에 나타난 것과 같이 일반적인 평판형 소자와 패터닝된 소자의 current density-voltage의 특성은 거의 유사한 형태로 나타나지만 패터닝된 소자의 구동전압이 조금 더 낮은 것을 확인할 수 있다. 이러한 특징은 그림 7(b)의 power efficiency-voltage 특성 그래프에서 명확히 나타난다. 평판형에 비해 패터닝된 소자의 구동 전압이 5 V ~ 6 V로 평판형 소자의 6 V ~ 7 V에 비해 낮아지고 발광 초기의 I-V 그래프의 기울기가 패터닝된 소자가 좀 더 급격히 상승하는 것을 확인할 수 있다. 이는 corrugation 패턴으로 인하여 OLED의 유기층의 오목한 구간과 볼록한

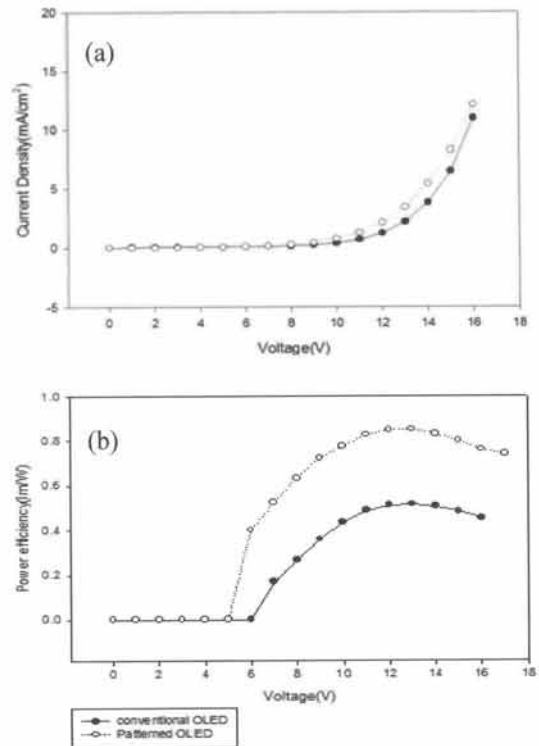


Fig. 7. Comparison with current density-voltage (a) power efficiency-voltage (b) characteristics of flat OLED and patterned OLED.

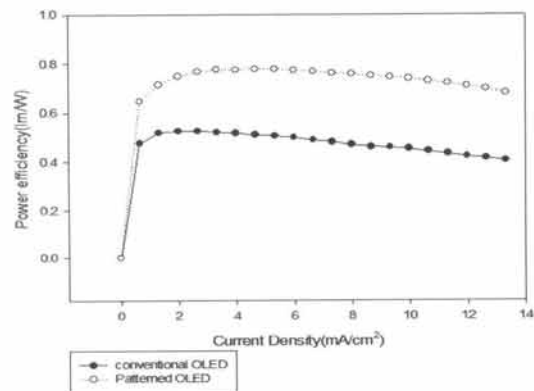


Fig. 8. Comparison with power efficiency - current density characteristics of flat OLED and patterned OLED.

구간에 두께의 차이가 발생한 것과 ITO 전극의 동일 발광면적에서 상대적 표면적 증가에 따른 현상으로 풀이된다. 또한 각각의 구동 전압에서 패터닝된 소자의 발광 효율이 월등히 높은 것을 확인할 수 있다.

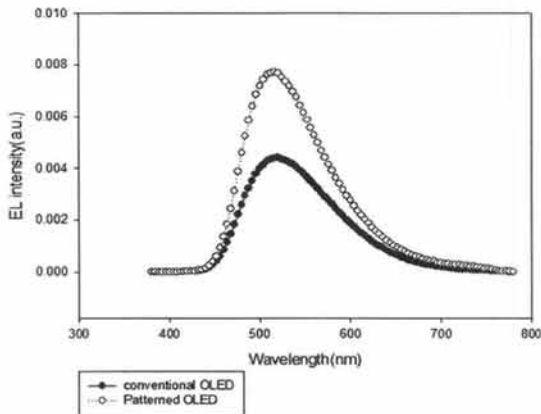


Fig. 9. EL spectra of flat OLED cell and corrugation patterned cell.

각 소자의 발광 효율의 비교를 위해 current density에 따른 power efficiency 특성 비교를 그림 8에 나타내었다. 그림에 나타난 것과 같이 패터닝된 소자의 발광 효율이 동일 current density에서 더 높음을 확인할 수 있다. 평판 소자와 패터닝된 소자의 power efficiency의 최댓값은 각각 2 mA/cm^2 에서 0.525 lm/W , 4 mA/cm^2 정도에서 0.774 lm/W 으로 나타났으며 평판형 소자에 비해 corrugation 패터닝된 소자의 발광효율이 약 42% 정도 높음을 알 수 있었다. 이러한 발광효율의 향상은 corrugation 패턴으로 인하여 ITO와 유기층 사이에서 발생하는 도파모드 (waveguide mode)가 완화됨에 따른 것으로 보인다.

그림 9는 각 소자의 EL 스펙트럼을 나타낸 것이다. 최대피크는 Alq_3 의 발광 영역인 520 nm 정도로 동일하며 상대적 EL값이 패터닝된 소자에서 더 크게 나타남을 확인할 수 있다.

4. 결론

나노스피어 리소그라피는 기존의 복잡한 포토닉 리소그라피와는 다르게 공정이 간단하며 대면적의 균일한 2차원 구조를 형성할 수 있는 리소그라피의 방법이다. 하지만 나노스피어의 정렬 구조의 결함은 미세한 공정 조건의 변수에도 쉽게 발생하므로 공정 조건의 확립이 무엇보다 중요하다. 본 논문에서는 OLED 소자의 발광 효율을 높이기 위한 방법으로 나노스피어 리소그라피를 이용하여 corrugation 패턴을 구조를

소자에 삽입하였다. 신뢰성 있는 ITO corrugation 패턴을 제작하기 위해서 나노스피어의 패턴 공정의 확립하였고 그 패턴을 가진 OLED 소자를 제작 하여 일반적인 소자와 전기적, 광학적 특성 및 발광 효율을 비교 분석 하여 다음과 같은 결과를 얻었다.

첫째, 나노스피어의 ICP 건식 식각 공정에서 나노스피어의 크기는 비등방적으로 이뤄지며 일정시간이 지난 후 saturation되고 링 형태의 식각 형태를 보인다.

둘째, corrugation 패턴을 갖는 OLED 소자는 일반적인 평판형 소자에 비해 구동 전압이 $6\sim 7 \text{ V}$ 에서 $5\sim 6 \text{ V}$ 로 좀 더 낮아진다.

셋째, corrugation 패턴을 갖는 OLED 소자는 4 mA/cm^2 의 전류 밀도 값에서 0.774 lm/W 의 최대 발광 효율을 갖는다. 이는 평판형 소자의 2 mA/cm^2 에서 나타나는 0.525 lm/W 비해 최대 42% 향상되었을 뿐만 아니라 동일 전류 밀도 값에 발광하는 전 영역의 파장대에서 향상된 값을 나타낸다.

넷째, EL spectra 측정을 통해 패터닝된 OLED 소자의 발광 파장 영역이 평판형 소자와 intensity만 차이가 있을 뿐 발광 파장 영역대는 Alq_3 의 고유 영역과 동일하다.

본 연구에 사용된 ITO 패턴은 기존의 평판 구조와의 광 추출 효율을 향상을 비교하기 위해 일정한 높이로만 실험이 진행하였다. OLED 소자 내부에 광자 결정을 삽입하여 bragg reflection을 이용한 연구에 의하면 각 패턴의 주기와 깊이에 따라 효율이 달라지게 된다 [12]. 따라서 본 연구는 패턴 형태의 최적화가 이뤄지지 않았을 것으로 판단되며 앞으로 연구를 통해 더 나은 광 추출효율을 갖는 소자 구조를 찾을 수 있을 것이다.

감사의 글

이 논문은 2011년도 정부 (교육과학기술부)의 재원으로 한국 연구재단의 일반연구자 지원 사업으로 수행된 연구임 (2011 - 0004820).

REFERENCES

- [1] C. L. Haynes and R. P. V. Duyne, *J. Phys. Chem., B* 105, 5599 (2001).
- [2] E. M. Hicks, O. Lyandres, W. P. Hall, S. Zou, M. R. Glucksberg, and R. P. Van Duyne, *J. Phys. Chem.,*

- C111, 4116 (2007).
- [3] Y. H. Ho, K. Y. Chen, and S. W. Liu, Y. T. Chang, D. W. Huang, and P. K. Wei, *Organic electronics*, 12, 961 (2011).
- [4] H. Li and N. Wu, *Nanotechnology*, 19, 275 (2008).
- [5] D. Z. Garbuzov and S. R. Forrest, *Phys. Rev. Lett.*, 58, 3730 (1998).
- [6] S. Moller and S. R. Forrest, *J. Appl. Phys.*, 91, 3324 (2002).
- [7] H. Peng, Y. L. Ho, X. J. Yu, M. Wong, and H. S. Kwok, *J. Disp. Tech.*, 1, 278 (2005).
- [8] Y. J. Lee, S. H. Kim, J. Huh, G. H. Kim, Y. H. Lee, S. H. Cho, Y. C. Kim, and Y. R. Do, *Appl. Phys. Lett.*, 82, 3779 (2003).
- [9] K. Ishihara, M. Fujita, I. Matsubara, T. Asano, S. Noda, H. Ohata, A. Hirasawa, H. Nakada, and N. Shimoji, *Appl. Phys. Lett.*, 90, 111114 (2007).
- [10] Y. C. Kim and Y. R. Do, *Opt. Express.*, 13, 1598 (2005).
- [11] P. Hobson, A. Hobson, S. Wedge, J. A. E. Wasey, I. Sage, and W. L. Barnes, *Adv. Mater.*, 14, 1393 (2002).
- [12] A. O. Altun, S. H. Jeon, J. Y. Shim, J. H. Jeon, D. G. Choi, K. D. Kim, J. H. Choi, S. W. Lee, E. S. Lee, H. D. Park, J. R. Youn, J. J. Kim, Y. H. Lee, and J. W. Kang, *Organic Electronics*, 11, 711 (2010).