

# 신소재 및 신구조를 활용한 OLED의 광추출 향상 기술 동향 및 전망

고재현 <한림대학교 전자물리학과 교수>

## 1 개 요

### 1.1 OLED 기술

유기발광다이오드(Organic Light Emitting Diode, 이하 OLED)는 현재 모바일 디스플레이의 메인 화면으로 광범위하게 사용되는 소자기술이다. 최근 55인치급 OLED TV가 출시되며 대면적 제품이 본격적으로 시장에 진출하기 시작했고 평면 조명 광원으로도 활발하게 연구가 진행되면서 그 적용대상이 확대될 것으로 기대되고 있다. 액정표시장치(Liquid Crystal Display, LCD)가 비자발광 디스플레이라는 특징으로 인해 외부광원(백라이트)을 요구하는데 반해 OLED는 양 전극을 통해 주입되는 전자와 정공의 결합으로 형성되는 엑시톤(exciton)이 복사 재결합을 함으로써 빛을 방출하는 자발광 디스플레이이다. 기판을 제외한 부분의 두께가 마이크로미터 이하에 불과한 초박형의 구조, LCD에 비해 훨씬 넓은 색재현성, 빠른 응답 속도로 인한 동영상 화질 상의 장점, 플렉서블 및 투명 디스플레이와 같은 차세대 디스플레이로의 적용의 용이성 등의 다양한 장점은 OLED를 차세대 디스플레이 기술의 선두 주자로 부각시키고 있다

[1]. 이뿐만아니라 2차원의 백색 면광원으로써 응용이 가능해 점광원인 LED나 선광원인 형광등과는 다른 새로운 가치를 창출하는 조명기구로 활용될 수 있다. 백색 OLED는 다양한 발광층을 결합함으로써 색특성의 조절이 용이하고 높은 연색지수를 구현할 수 있다는 장점을 가진다. 최근 형광등의 발광효율을 넘어서는 연구결과들이 발표되면서 차세대 조명광원으로써의 OLED의 가능성이 커지고 있다[2].

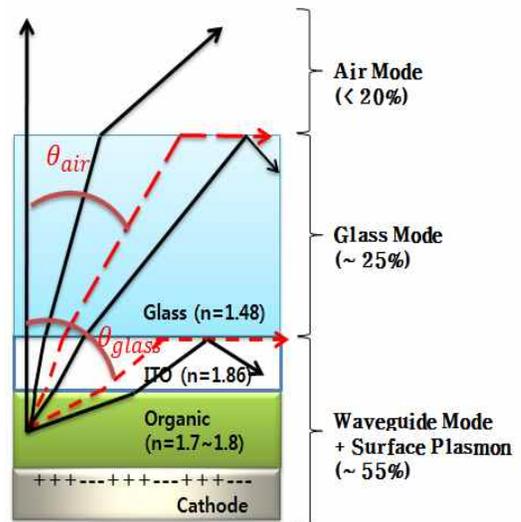


그림 1. OLED 내 빛 에너지의 배분 경로

## 1.2 OLED의 발광효율과 광추출 기술

OLED의 발광효율을 나타내는 외부양자효율(external quantum efficiency)은 내부양자효율(internal quantum efficiency)과 광추출 효율(outcoupling efficiency)의 곱으로 표현된다. 내부양자효율이란 주입된 전자-정공 쌍의 수에 대한 내부에서 생성된 광자의 수 사이의 비율로 정의된다. 현재 내부양자효율은 삼중항(triplet state)을 활용하는 인광재료(phosphorescent materials)의 적용에 의해 거의 1에 근접해 있다. 광추출 효율은 내부에서 생성된 광자의 수와 외부로 빠져나오는 광자의 개수 사이의 비로 정의되는데, 이 수치는 OLED가 가지는 구조적 문제로 인해 매우 낮은 수치를 나타내는 것이 일반적이다.

그림 1은 배면발광(bottom emission)형 OLED의 기본 구조를 보여준다. 그림에서 확인할 수 있듯이 OLED는 굴절률( $n$ )이 매우 높은 유기층( $n: 1.7 \sim 1.8$ )과 투명전극인 ITO( $n: 1.8 \sim 2.0$ ) 및 기판 유리( $n: \sim 1.5$ ) 등으로 구성되어 있다. 유기층은 보통 주입층(injection layer)을 제외하면 전자수송층(electron transport layer, ETL), 발광층(emission layer, EML), 정공수송층(hole transport layer, HTL) 등으로 구성되어 있다. 유기층/ITO와 기판의 굴절률로 인해 내부에서 생성된 빛이 빠져나오는 과정에서 유기층/ITO 및 유리 사이의 계면, 유리 기판과 공기 사이의 계면에서 전반사(total internal reflection)를 겪으면서 외부로 빠져나오지 못하고 내부에 갇혀 흡수되거나 측면을 통해 손실된다[3]. 음극에서의 손실 등을 고려하지 않는 단순한 기하광학적 계산에 따르면 유기층/ITO에 갇히는 도파관 모드(waveguide mode)의 비중이 약 50%, 유리 기판에 갇히는 기판 모드(substrate mode)의 비중이 약 30%, 그리고 외부로 빠져나오는 추출 모드(outcoupling mode 혹은 air mode로

도 불림)의 비중은 20%가 채 되지 않는 것으로 계산된다 [4]. 그림 1은 이러한 기하광학적 특성만을 고려해 OLED 내 빛의 경로를 보여주는 개략도이다. 두 개의 빨간색 점선은 각각 공기와 유리의 계면, 그리고 유리와 유기층의 계면에서 임계각(각각  $\theta_{air}$  및  $\theta_{glass}$ 로 표기)으로 입사하는 빛의 경로를 나타낸다. 이 임계각보다 더 큰 각도로 입사되는 광선들은 내부로 전반사하고 이 과정에서 음극이나 유기층 내에서 흡수되거나 측면을 통해 빠져 나가 측면 발광(edge emission)을 형성한다. 그렇지만 발광층의 쌍극자와 음극 내 자유전자의 결합에 의해 발생하는 표면 플라즈몬(surface plasmon, SP)의 여기(excitation)는 ETL의 두께가 얇을 경우 전체 발광효율의 저하에 심대한 영향을 끼친다[5]. 따라서 SP로 갇히는 빛을 빼내기 위한 연구도 활발히 이루어지고 있다.

본 원고는 OLED의 내부에 갇히는 빛을 외부로 빼내는 광추출 기술의 최근 동향에 대해서 다룬다. 특히 광추출 효율 향상을 위해 적용되는 다양한 광학구조와 이를 구현하기 위한 신소재 및 공정기술 등에 초점을 맞추어 연구 동향을 정리해 보고자 한다. 주요한 논의는 기판을 통해 빛이 방출되는 배면발광형의 저분자(small molecules) OLED에 국한될 것이고, 가능한 한 화소 구조를 가진 OLED 디스플레이보다는 OLED 백색 조명에 적합한 광추출 기술로 논의를 국한할 것이다. OLED 기술에 대한 전반적인 리뷰 및 광추출 기술 연구 동향을 정리한 체계적인 리뷰 논문들은 그간 많이 출간되어 있으므로 더 자세한 연구 동향을 원하는 독자들은 여기 인용된 논문들을 참조할 수 있을 것이다[6-10].

## 1.3 OLED 광추출기술의 분류

OLED의 광추출 기술은 편의상 기판 모드에 갇힌 빛을 추출하는 외부 광추출 기술과 도파관 모드에 갇

힌 빛을 추출하는 내부 광추출 기술로 나뉜다[7]. 도파관 모드로 갇히는 빛의 양이 훨씬 많기 때문에 원리적으로는 내부 광추출 기술의 효과가 더 높을 것으로 예상된다. 그렇지만 기판과 유기층 사이의 복잡한 상호작용으로 인해 기판 모드와 도파관 모드가 각각 기판 구조와 유기층의 구조에만 의존하는 것은 아니고 OLED 소자로써의 전체적인 최적화가 요구된다 [11]. 특히 내부 광추출 기술은 두 전극을 포함한 유기층에 직접적인 영향을 주게 되므로 소자로써 가져야 하는 전기적 특성과 기계적 강도 등의 신뢰성 조건들을 저하시키지 않는 것이 중요하다.

외부 광추출 기술은 주로 평면 형태인 기판 유리의 광학 구조를 변형시켜 기판 내에 갇히는 빛을 외부로 추출하는 기술이다. 이 기술은 주로 빛이 최종적으로 빠져나가는 기판의 외부 표면에 마이크로 렌즈나 무작위적인 표면산란층을 형성해서 기판의 내부로부터 이 표면에 입사되는 빛의 전반사 각도에 변화를 주어 빛을 추출한다. 혹은 기판 내부에 산란 입자를 포함시켜 광산란 효과에 의한 빛의 무작위적인 방향 변화를 통해 빛의 탈출을 유도하기도 한다. 그렇지만 기판 모드로 갇히는 빛의 비중이 전체 발광량의 30% 정도에 불과하기 때문에 OLED의 광추출 효율을 현저히 향상시키기 위해서는 기판 모드 뿐 아니라 도파관 모드로 갇힌 빛을 방출시키기 위한 노력이 필요하다.

도파관 모드 및 SP 모드로 갇힌 빛을 빼내기 위해서는 유기층/ITO 내부나 표면에 내부산란층이나 저굴절률 그리드를 형성하거나 기판의 굴절률을 유기층의 그것과 거의 동일하게 만들어 기판-유기층 사이에서 전반사를 제거하는 방법 등이 활용된다. 이 외에 OLED 자체가 가지는 미소 공진기(micro-resonator 혹은 microcavity)로써의 특성을 활용하는 방법, 1차원 브래그(Bragg) 산란이나 2차원 광결정(Photonic Crystal, PC) 구조를 활용하는 방법 등이 광범위

하게 연구되어 왔다. 다음 장에서는 위에서 간략하게 요약한 광추출 기술들의 세부 유형별 연구 동향에 대해 상술하고자 한다.

## 2. 본 론

### 2.1 OLED 외부 광추출 기술

#### 2.1.1 마이크로 렌즈 배열

유리 기판 위에 마이크로 렌즈를 형성하는 방법은 기판 모드로 갇힌 빛을 빼내는 가장 대표적인 방법이다. 마이크로 렌즈의 배치는 그림 2의 오른쪽 그림에서 볼 수 있는 것처럼 기판의 평면 위에 기울기를 가진 곡면을 형성하기 때문에 입사되는 빛이 전반사를 피하고 탈출할 수 있는 탈출 각도의 범위를 넓힌다. 커다란 반구형 렌즈를 OLED 위에 올리는 경우 기판모드에 갇힌 빛들을 성공적으로 탈출시킬 수 있지만 소자의 두께가 증가하고 대면적 OLED에 적용할 수 없다는 문제점이 따른다. 따라서 주로 매우 얇은 두께로 기판 위에 올릴 수 있는 마이크로 렌즈 기술이 적용되어 왔다. 마이크로 렌즈에 의한 추출 효율의 상승률은 렌즈의 직경이 OLED보다 훨씬 적고 빛의 파장보다 큰 범위 내에서는 렌즈의 직경에 크게 의존하지 않는 것으로 알려져 있다. 마이크로 렌즈의 형상으로는 반구형 렌즈[12-14], 정각 90도의 피라미드 어레이[15], 프리즘 필름[16] 등 다양한 형상의 렌즈가 시도되었고 보통 1.5배 전후의 추출 효율 향상을 얻을 수 있는 것으로 보고되어 왔다.

마이크로 렌즈의 재료로는 PDMS(poly-dimethyl-siloxane)와 같은 탄성중합체(elastomer), PMMA 등의 고분자 계열 물질들이 많이 사용되어 왔는데 이들 재료들은 유리 기판의 굴절률과 거의 동일한 수치를 나타내기 때문에 기판과 렌즈 층 사이에서 발생할 수 있는 프레넬 손실(Fresnel loss)

을 방지할 수 있다. 마이크로렌즈 배열의 형상을 조정해 OLED가 방출하는 빛의 배광분포를 조절할 수 있지만 이 렌즈 배열에 의한 광추출 효율의 상승률은 렌즈의 형상에만 의존하지 않는다. 렌즈를 통해 외부로 탈출하지 않는 빛들은 보통 OLED의 후면으로 내려왔다가 일부분이 반사되어 올라가면서 그 일부가 다시 탈출할 기회를 얻게 되기 때문에 마이크로 렌즈에 의한 광추출 효율은 OLED의 전체적 구조와 각 층의 반사율에 크게 의존하게 된다 [11, 16].

## 2.1.2 표면 산란층

유리 기판의 표면에 형성되는 미세한 무작위적 구조 역시 전반사의 조건을 깨뜨리며 기판 모드로 갇힌 빛을 빼내는 데 활용될 수 있다. 이러한 산란 구조를 표면에 적용한 OLED에 대한 단면 개략도가 그림 2의 왼쪽에 제시되어 있다. 이러한 표면 산란층은 처음에는 LED에 적용되어 추출효율 향상에 기여할 수 있음이 실험적으로 증명된 이후[17], TiO<sub>2</sub> 산란입자가 포함된 확산층[18], PDMS로 이루어진 마이크로 메쉬(mesh)층[19] 등을 유리 기판 위에 적층(lamination)하거나 기판 표면 자체에 샌드블라스트(Sandblasting)[20]나 스펀코팅법[21] 등을 통해 직접 거칠기를 주는 방법 등이 연구되었다. 표면산란층이 적용된 OLED는 보통 램버시안(Lambertian) 분포를 나타내고 시야각에 따른 휘도와 색좌표의 변화를 최소화할 수 있다는 장점이 있다. 무작위적인 산란 구조 대신에 일차원 혹은 이차원의 주기적인 회절 격자 패턴이나 2차원의 ZnO 나노기둥(nanopillar) 구조를 유리 표면에 형성해 이들에 의한 빛의 회절 효과로 광추출 효율을 향상시킨 방법들도 발표된 바 있다 [22-23]. 이 경우 주기적인 구조물의 주기와 빛의 파장에 의해 회절 조건이 결정되기 때문에 수직 방

향이 외의 특정 시야각으로 최대 휘도가 형성되는 배광분포를 나타낼 수 있다. 이러한 방법들이 적용된 OLED의 광추출 효율의 향상 정도는 마이크로 렌즈와 비슷하게 1.5배 전후의 수치를 보인다. 산란 효과는 시야각에 따른 색조의 변화를 일으키지 않고 램버시안 형태의 광도 분포를 형성하기가 용이하기 때문에 백색 조명용 OLED의 광추출 효율을 향상시키는데 있어서 적극적으로 활용될 수 있는 방법이다.

## 2.1.3 기판 변조

기판 모드로 갇힌 빛이 진행되는 유리 기판 내부에 산란입자를 포함시켜 체적 산란(volumetric scattering)을 유도하는 방법 역시 광추출 효율을 향상시키는 주요한 접근법으로 고려되어 시뮬레이션[24-25]이나 실험[24, 26]을 통해 연구되어 왔다. 포함되는 입자의 크기에 따라 산란의 성격을 기하광학적 굴절이나 미 산란(Mie scattering) 등으로 분류할 수 있는데 보통 빛의 파장 정도의 크기를 가진 입자를 포함시킴으로써 미 산란 효과를 이용하는 것이 일반적이다. 미 산란은 레일리 산란(Rayleigh scattering)과는 다르게 산란 강도의 파장 의존성이 크지 않기 때문에 OLED 발광 스펙트럼의 각도에 대한 의존성을 최소화할 수 있다. 이러한 체적 산란 방법은 특히 고굴절률 기판 유리와 결합될 경우 기판 모드뿐 아니라 도파관 모드로 갇힌 빛까지 추출할 수 있는 가능성을 보여 주었다[26].

## 2.2 OLED 내부 광추출 기술

### 2.2.1 미소 공진 효과

OLED의 음극과 ITO가 파브리-페롯(Fabry-Perot) 간섭계의 구조를 띠며 다중광 간섭 효과인

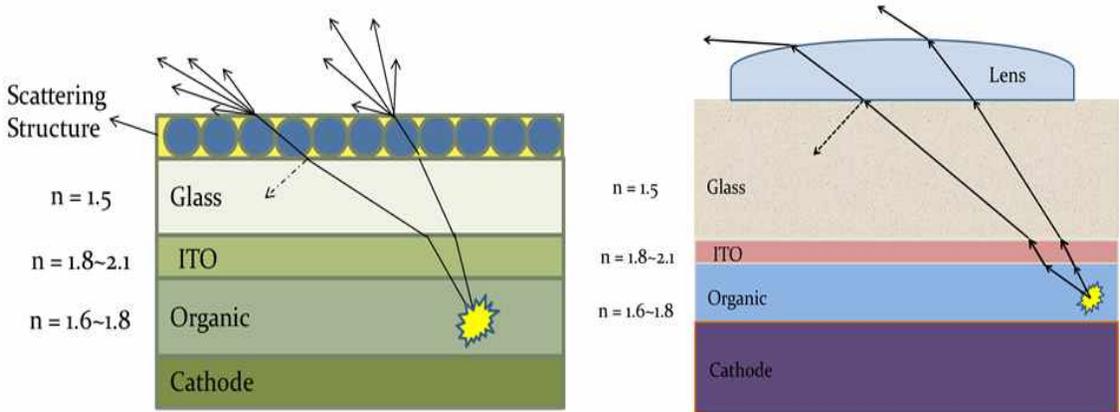
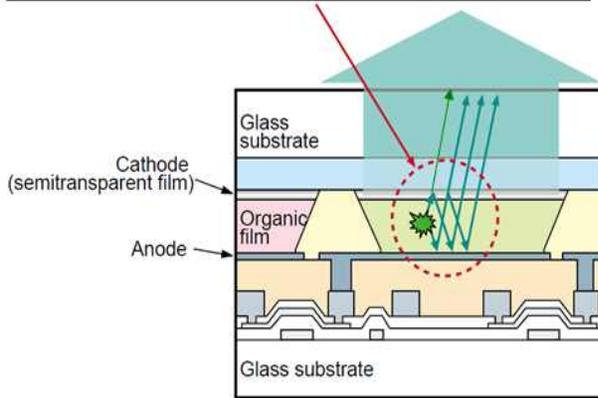


그림 2. 내부 광추출 기술의 예 (왼쪽:표면산란층, 오른쪽: 마이크로렌즈)

Microcavity (multiple reflection interference) structure



EL spectrum

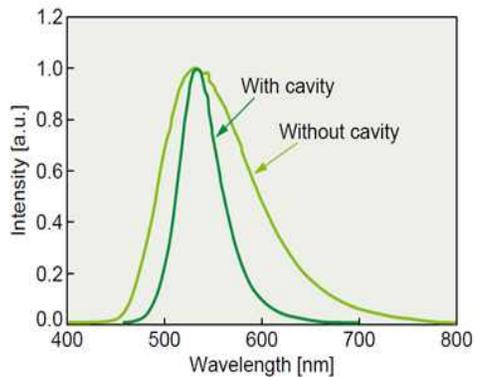


그림 3. 미소공진 구조(왼쪽) 및 이에 의해 변조된 (규격화된) 스펙트럼(오른쪽)[28]

미소 공진기 효과를 가진다는 점은 오래 전부터 잘 알려져 있었다[27]. 그림 3은 음극과 양극에 의해 형성되는 미소 공진 구조를 보여주고 있다[28]. 이러한 미소공진 구조 내에서 만들어진 빛의 발광 스펙트럼은 미소공진 효과에 의해 변조되면서 선폭이 줄어들고 특정 파장대의 빛이 증강되는 결과를 낳는다. 이러한 스펙트럼의 변조는 기본적으로 발광층에서 직접 방출되는 빛과 음극에서 반사된 후 방출되는 빛 사이의 간섭 및 그 이후 다중 반사에 의해서

방출되는 빛들 사이의 간섭에 의해 발생한다. 이러한 미소공진 효과를 이용하면 RGB 삼파장 화소 구조를 가진 OLED 디스플레이의 경우 색깔별로 미소공진 구조의 두께를 조절해 빛의 삼원색의 순도를 올리고 색재현성(color gamut)을 넓힐 수 있다[28]. 그렇지만 발광 스펙트럼의 폭이 좁아지고 시야각에 따른 밝기와 색도의 변화가 현저히 커질 수 있기 때문에 백색 조명용 OLED에 적용할 경우에는 신중한 접근이 필요하다.

## 2.2.2 내부 산란층

2.1.2절에서 소개했던 표면 산란층이 기판 모드의 빛을 탈출시키는 역할에 머무는 데 반해 OLED 소자의 내부에 형성되는 산란층은 도파관 모드 혹은 도파관 모드와 기판 모드 양쪽의 빛을 빼내는 데 활용될 수 있다. 산란구조로는 빛의 파장 정도의 직경을 가지는 실리카 구[29]나 나노 다공성 알루미늄 필름[30], 고굴절률의 프릿 글래스(frit glass)를 활용한 산란 구조[31] 등 다양한 광학적 구조가 시도되었고 1.5배 이상의 광추출 효율 향상을 거두는 것으로 보고되었다. 특히 유리기판의 굴절률을 유기층의 굴절률과 동일하게 설정하고 이 기판 속에 산란입자를 포함시키게 되면 도파관 모드와 기판 모드 사이의 구분이 없어지면서 전체적으로 도파 모드로 갇힌 빛을 광산란 효과로 추출할 수 있게 되어 광추출 효율이 매우 높아지게 된다[26].

## 2.2.3 저굴절률 재료의 적용

유기층과 ITO 구조 자체에 변화를 주어 도파관 모드로 갇힌 빛을 빼내는 OLED 구조에 대한 연구도 활발하다. Tsutsui 등은 그림 4의 왼쪽 개략도

와 같이 유기층과 기판 사이에 굴절률이 거의 1에 가까운 실리카 에어로겔(aerogel)층을 졸-겔법으로 형성한 구조에 대해 연구하였다[32]. 유기층의 두께를 빛의 파장의 절반 이하로 줄이게 되면 도파관 모드의 숫자가 감소되고 재분포되는 빛의 상당수가 에어로겔을 통해 빠져나올 수 있게 된다. Sun 등은 유기층 중간에 저굴절률( $n=1.03$ ) 그리드(grid)를 삽입하여 도파관 모드로 전파되는 빛의 일부를 빼낼 수 있음을 보여주었다[33]. 그림 4의 오른쪽 개략도에서 볼 수 있듯이 유기층을 따라 전파하는 빛이 저굴절률 그리드를 만나 방향이 꺾이면서 OLED를 탈출할 기회를 얻게 된다. 이 그룹은 저굴절률 그리드 구조에 마이크로 렌즈까지 결합할 경우 OLED의 광추출 효율이 2.3배 정도 향상된다고 보고한 바 있다.

Koh와 Lee 등은 ITO 전극 자체를 일정한 경사면을 가진 그리드 구조로 패터닝한 후에 ITO와 유기층 사이에 저굴절률의 전도성 고분자층(PEDOT:PSS)을 형성함으로써 ITO와 고분자층 사이, 그리고 고분자층과 유기층의 경사면에 입사하는 도파광에 대해 전반사를 유도해 빛을 빼내는 구조에 대해 발표하였다[34-35]. 이 방법에서는

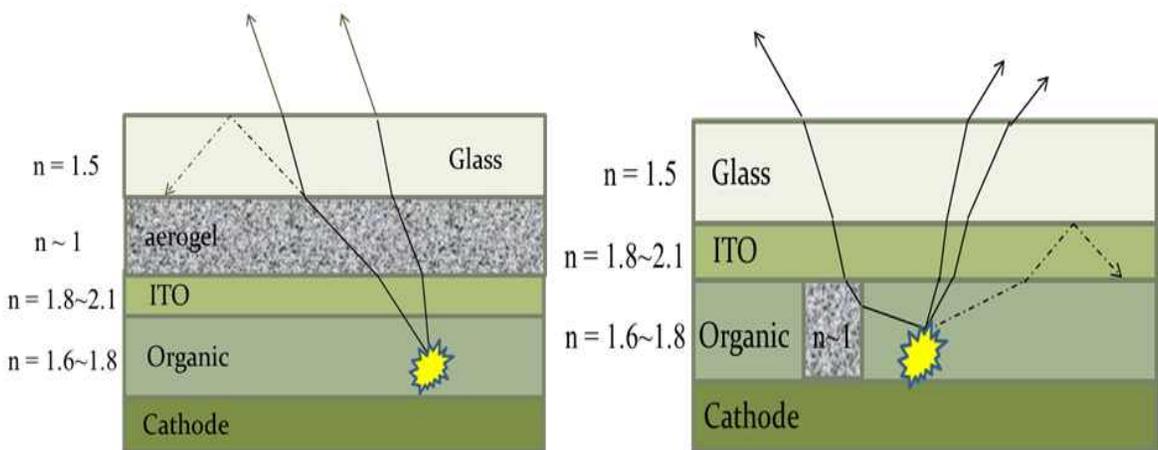


그림 4. 저굴절률 층(왼쪽) 혹은 그리드(오른쪽) 구조를 이용한 광추출 향상기술

경사각의 각도가 매우 중요한데, 최적화된 구조에서 약 1.5~1.7배 정도 추출효율이 향상되었으며, 구조의 적용 전후에 OLED 발광스펙트럼의 변화나 시야각에 따른 특성 변화가 없다는 장점을 가지는 것으로 보고되었다.

### 2.2.4 광결정 구조

광결정(photonic crystal)이란 굴절률이 서로 다른 두 유전체가 빛의 파장 정도의 주기를 가지고 반복적으로 형성된 광학적 구조를 말하는데 주기성의 방향과 성격에 따라 1차원, 2차원, 그리고 3차원 광결정으로 구분된다[36]. 이러한 구조는 주기적 전자 구조가 형성하는 에너지 밴드갭(energy bandgap)과 비슷하게 빛의 전파가 허용되지 않는 광 밴드갭(optical bandgap)을 형성하게 된다. 따라서 2차원 광결정을 유기층과 기판 사이에 형성해서 도파관 모드의 진행을 불가능하게 하고 기판 쪽으로 빠져나가도록 유도할 수 있다. 이 때 광추출 효율을 결정하는 인자들은 광결정의 격자상수, 광결정 패턴의 깊이, 직경 등인데 이런 변수들의 최적화를 위해서 보통 유한차분 시간영역(finite difference time domain, FDTD) 방법이 활용된다[37]. Lee 및 Do 등은 굴절률이 1.90~1.95인  $\text{SiN}_x$ 와 굴절률이 1.5정도인  $\text{SiO}_2$ 로 형성된 이차원 광결정을 ITO와 유리기판 사이에 배치해서 1.5배 이상의 광추출 효율 향상을 얻

었다고 보고하였다[38-39].

광결정구조를 OLED에 적용할 경우에는 광결정의 평탄화 정도가 매우 중요하다. 높이가 고르지 않고 거칠기가 남아 있는 경우 이는 누설전류가 형성되는 직접적인 원인이 되고 소자의 장기신뢰성 및 수명에도 영향을 끼친다. 따라서 평탄화된 광결정구조를 OLED에 적용할 수 있는 공정기술에 대한 연구가 활발히 진행 중이다[40]. OLED 소자에 광결정을 형성하기 위한 방법으로는 화학진공증착법(CVD), 전자빔 리소그래피, RIE(reactive ion etching), 나노임프린팅(nanoimprinting) 등 다양한 방법이 사용되고 있는데, 이 방법들은 보통 공정시간이 길고 비용이 높은 공정들이라는 문제점이 있다. 이를 대체하기 위해 레이저 간섭 리소그래피나 용액공정법 등 다양한 기술들이 연구되고 있는 중이다[40-41]. 특히 Cho 등은 최초로 진공 증착 장비를 이용하지 않고 저온 solution-process(졸-겔)법을 이용해 ZnO에 기반한 광결정 구조를 OLED 내에 형성할 수 있음을 보였다[40].

조명용 백색 OLED에 광결정기법을 적용하는데 있어서 가장 큰 걸림돌 중 하나는 광결정구조가 적용될 경우 OLED의 광도 분포가 램버시안에서 벗어나게 되고 광결정의 배치에 따른 특정한 대칭성을 보인다는 것이다. 그림 5는 FDTD 기법으로 시뮬레이션

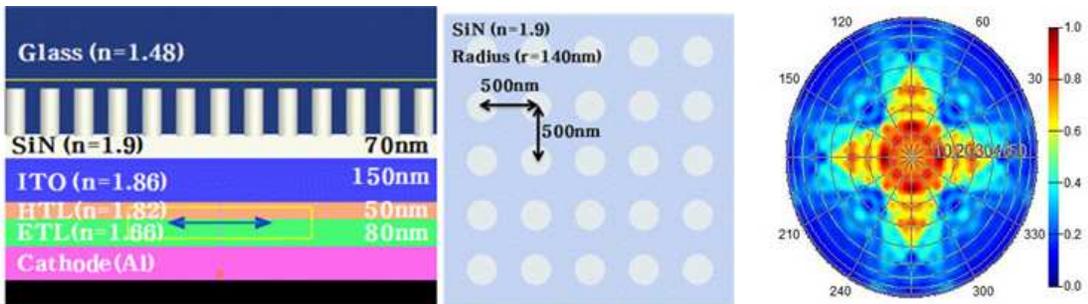


그림 5. FDTD기법을 활용해 연구된 광결정 적용 OLED모델(왼쪽) 및 광도분포(오른쪽)

을 수행한 광결정의 구조 및 광도 분포를 보여주고 있다. 광결정은 지름이 140nm, 높이 150nm, 주기 500nm의 조건으로 정사각형으로 배치되었다. OLED의 효율이 가장 높은 값을 보였던 ETL의 두께(100nm)에 대해 얻어진 광도 분포는 정사각형으로 배치된 광결정의 분포가 가지는 대칭성을 띠고 있음을 알 수 있다. 이 뿐 아니라 편광의 종류에 의존해서 특정 각도에서 광추출효율이 증가하는 스펙트럼 상의 변화도 발생하게 되고 이것이 시야각 상의 색조 변화를 일으킬 수 있다[41]. 이러한 문제점을 해결하기 위해 광결정의 배열을 무작위적으로 배치하는 등 다양한 방법이 모색되고 있는 중이다. 결국 광결정 구조를 백색 OLED에 적용하기 위해서는 적절한 광도분포의 형성, 시야각에 따른 색조의 변동 폭 등에 대한 세심한 고려가 필요함을 알 수 있다.

### 2.2.5 표면 플라즈몬 모드의 추출

표면 플라즈몬(SP)이란 금속과 유전체 사이의 계면을 따라 전파하는 TM(Transverse Magnetic) 편광성분의 전자기파로써 계면에서 멀어짐에 따라 지수함수적으로 감소하는 특성을 갖는다[42-43]. 광파와 플라즈몬의 결합을 고려해서 SPP(Surface Plasmon Polariton)이라 불리기도 한다. SPP의 파수벡터(wavevector)의 크기는 동일한 주파수의 광자가 가지는 파수벡터에 비해 작기 때문에 SPP 모드는 비복사적 성격을 가지게 되고 보통 음극 내에서 열에너지로 소모된다[44]. SPP에 의한 에너지 손실은 저분자량 OLED가 고분자 OLED에 비해 훨씬 심한데, 정밀한 시뮬레이션 결과에 의하면 SP에 의한 에너지 손실은 조건에 따라 생성된 총광량의 절반에 육박하기도 한다. 특히 발광층과 음극 사이의 거리가 SPP의 여기에 있어서 결정적인 요인이므로 ETL의 두께가 OLED의 외부양자효율을 결정하는 가장 중요한 요소가 된다.

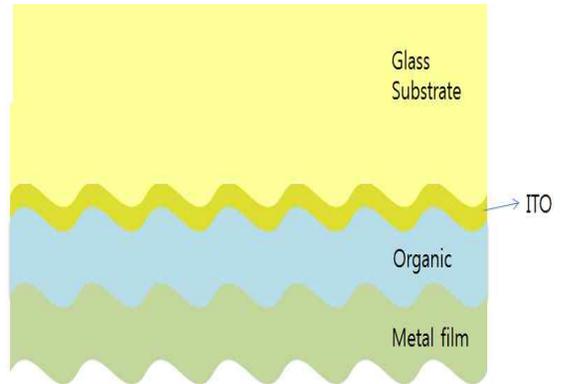


그림 6. 브래그 회절 격자가 도입된 OLED 구조의 단면도

SPP 모드에 의한 에너지 손실을 줄이기 위해서는 SPP와 빛의 파수벡터의 차이를 보상해 줄 수 있는 주기적 구조가 필요하다. 보통 음극 그리고 그 주위에 주기적인 브래그 회절 격자(Bragg diffraction grating) 구조를 형성하는데, 이 격자의 주기성이 브래그 조건을 만족하게 되면 SPP 모드로 손실되는 빛에너지의 일부를 회복시킬 수 있다 [45]. 그림 6은 음극에서부터 기관까지 주기적 미세 구조가 형성되어 있는 OLED 소자의 단면 개략도를 보여준다. SPP는 기관과 음극 등 두 방향을 따라 지수함수적으로 감소하는 특성을 가지기 때문에 회절격자구조와의 결합을 통해 양 방향으로 빛을 추출하는 것이 가능하다. 그렇지만 이러한 주기적 구조는 브래그 조건을 만족하는 방향으로 특정 파장의 빛의 세기를 증강시키기 때문에 시야각에 따른 빛의 세기와 색조의 급격한 변화라는 문제점을 야기할 수 있다[10]. 이 문제를 해결하는 방법의 하나로 넓은 주기 분포와 방향의 임의성을 가지는 준주기적인(quasi-periodic) 버클링(buckling) 구조가 제시되었다[46]. 브래그 격자 구조가 보통 전자 빔, 홀로그래피, 나노임프린트 리소그래피 등의 방법으로 형성되는데 반해 이 방법은 PDMS 위에 알루미늄 필름을 증착한 후, 이 두 물질 사이의 열팽창 계

수의 차이에 근거해 버클링 구조가 스스로 형성되는 원리에 근거하고 있다. 기존 방법이 발광 스펙트럼 상에 날카로운 피크 구조가 존재하는데 반해 이 구조에 의해 제작된 OLED는 각도에 의존하지 않는 넓은 발광 스펙트럼을 보일 뿐 아니라 램버시안 광도 분포를 갖는 것으로 확인되었다.

SPP 모드의 여기를 줄이는 또 다른 방법은 발광 쌍극자의 방향을 조절하는 것이다. SPP는 TM 편광의 특성 상 OLED 면에 수직 방향으로 정렬해 있는 쌍극자의 방출 패턴과 강하게 결합한다. 따라서 OLED 면 내 쌍극자가 누워 있도록 발광 분자의 방향을 조절할 수 있다면 SPP의 여기를 큰 폭으로 줄일 수 있다[47]. 저분자량 기반 OLED와는 다르게 고분자 OLED의 경우에는 쌍극자가 주로 OLED 면 내에 누워 있게 되고 이로부터 발생하는 빛은 전기장이 주로 수직 방향인 SPP와 약하게 결합한다. 이 외에 LiF/Ag-나노입자/LiF 구조의 음극 내 포함된 은(Ag) 나노입자에 의해 여기된 SP 모드가 음극 근처에 놓인 형광분자의 자발 방출률(spontaneous emission rate)을 높이는 성질을 이용해 OLED의 광효율을 향상시킬 가능성을 모색한 연구 등이 최근 보고된 바 있다[48]. 국소화된(localized) 표면 플라즈몬은 금속 표면을 따라 전파하지 않고 작은 영역에 국소화되어 있다는 특징으로 인해 SPP에 비해 에너지의 손실이 적을 뿐 아니라 나노입자의 크기와 형태, 간격을 조절함으로써 소자의 특성을 조절할 수 있다는 장점을 가지게 된다.

### 3. 맺음말

이상으로 OLED 소자에서 광추출 효율 향상 기술이 가지는 중요성 및 이와 관련된 최근의 연구 동향을 상술해 보았다. OLED 광추출 기술을 형식적으로 외부 광추출 기술과 내부 광추출 기술로 구분하고 이를 각각 세부 기술별로 나누어 서술하였지만 이렇게 구

분된 기술들은 서로 독립적인 효과를 나타내지 않고 상호 연관성을 가지게 된다. 외부 광추출 기술에 적용되는 광학 구조들이 보이는 효율 상승률은 그 자체의 광특성에만 의존하지 않고 OLED 소자 전체의 구조와 밀접한 관련성을 가지고 있다는 사실이 2.1절에서 강조된 바 있다. 내부 광추출 기술들의 경우도 그것이 도파관 모드나 표면 플라즈몬 모드 어느 한 쪽의 추출에만 기여하는 것이 아니라 경우에 따라서는 두 모드의 추출에 동시에 기여할 수 있다. 예를 들어 광결정 구조나 내부산란층이 도입된 영역에 표면 플라즈몬의 감쇄 전기장이 걸쳐 있다면 이 구조들은 표면 플라즈몬에 의해 손실되는 에너지를 줄일 수 있다. 이러한 결과들은 OLED 소자의 최적화를 시도할 때에 각 구성요소들의 상호 연관성을 종합적으로 고려해 OLED의 구조를 설계해야 한다는 것을 의미한다. 이에 따라 향후에는 손실의 상당 부분을 차지하는 플라즈몬 모드를 줄이는 방법 및 기판모드와 도파관모드, 그리고 플라즈몬 모드를 동시에 추출할 수 있는 복합구조에 대한 연구가 매우 중요해질 것으로 예상된다. 가령 기판 위에 마이크로렌즈 구조를 형성하고 동시에 음극 근처에 회절격자구조를 적용하는 광학구조가 이러한 연구의 하나의 예가 될 수 있을 것이다[49].

광추출 기술은 OLED의 발광효율을 높이는 데 있어서 가장 중요한 기술로 부각되었다. 우리 기판 내에 갇힌 기판 모드의 빛을 탈출시키는 것은 기판이 공기와 접해 있다는 사실 때문에 비교적 단순한 공정과 재료를 이용해 용이하게 달성할 수 있다. 그렇지만 유기층 및 SP 모드로 갇힌 빛을 빼내는 기술의 경우에는 OLED 소자의 전기적, 기계적 신뢰성을 확보하는 문제 뿐 아니라 대량 생산에 적합한 저비용의 공정 기술이 함께 확보되어야 한다는 면에서 기판 모드에 대한 접근보다 더 까다로운 측면이 존재한다. 특히 시야각에 따라 밝기나 색상이 변하는 광학구조는 조명용 백색 OLED에 적용하기 힘들기 때문에 미소 공진 효과나 광결정, 브래그 회절 격자 등의 구조를 적용할 경

우에는 매우 세심한 고려와 접근이 필요하다. 광결정이나 회절격자에 무작위성(randomness)을 도입해 각도에 따른 특성 변화를 완화하는 것이 이러한 문제점을 보완하는 하나의 방법이 될 것이다.

백색 OLED는 커다란 면을 통해 균일한 확산광이 방출되는 유일한 면광원으로써 별도의 조명 설비가 필요하지 않다는 장점을 지닌다. 고가이기는 하나 이미 상용화된 제품을 구할 수 있을 정도로 OLED 조명의 개발 속도는 빠르고 미래의 잠재성이 높다고 할 수 있겠다[50]. 향후 OLED 조명이 시장을 잠식하는 속도는 광추출 효율을 포함해 얼마나 빨리 발광효율을 향상시킬 수 있을 것인가와 더불어 기존의 조명 장치에 필적할 정도의 가격경쟁력을 언제쯤 가질 것인가에 좌우될 것으로 예상된다.

#### 감사의 글

본 논문에 실린 그림들을 준비해 준 한림대학교 전자물리학과 정수성, 이주섭, 박건우에게 감사의 인사를 포함합니다.

#### 참고문헌

[1] T. Tsujimura, "OLED Displays", Wiley, 2012.  
 [2] S. Reineke, F. Lindner, G. Schwartz, N. Seidler, K. Walzer, B. Lussem, and K. Leo, Nature, Vol. 459, No. 7244, pp. 234~238, 2009.  
 [3] N. C. Greenham, R. H. Friend, and D. D. C. Bradley, Adv. Mater. Vol. 6, No. 6, pp. 491~494, 1994.  
 [4] G. Gu, D. Z. Garbuzov, P. E. Burrows, S. Venkatesh, and S. R. Forrest, Opt. Lett., Vol. 22, No. 6, pp. 396~398, 1997.  
 [5] R. Meerheim, M. Furno, S. Hofmann, B. Lussem, and K. Leo, Appl. Phys. Lett., Vol. 97, No. 25, p. 253305, 2010.  
 [6] K. Meerholz, and D. C. Muller, Adv. Funct. Mater. Vol. 11, No. 4, pp. 251~253, 2001.  
 [7] K. Saxena, V. K. Jain, and D. S. Mehta, Opt. Mater., Vol. 32, pp. 221~233, 2009.  
 [8] 조두희, 이정익, 추혜용, 오민철, "OLED 조명 피널의 광추출 기술", 인포메이션 디스플레이, 제12권, 제4호, pp. 49~60, 2011.  
 [9] K. Hong, and J.-L. Lee, Electron. Mater. Lett., Vol. 7, No. 2, pp. 77~91, 2011.  
 [10] W. Brutting, J. Frischeisen, T. D. Schmidt, B. J. Scholz, and C. Mayr, Phys. Status Solidi A, Vol. 201, No. 1, pp. 44~65, 2013.  
 [11] H. Greiner, Jpn. J. Appl. Phys., Vol. 46, No. 7A, pp. 4125~

4137, 2007.  
 [12] C. F. Madigan, M.-H. Lu, and J. C. Sturm, Appl. Phys. Lett., Vol. 76, No. 13, pp. 1650~1652, 2000.  
 [13] J. Lim, S. S. Oh, D. Y. Kim, S. H. Cho, I. T. Kim, S. H. Han, and H. Takezoe, Opt. Lett., Vol. 14, No. 14, pp. 6564~6571, 2006.  
 [14] Y. Sun, and S. R. Forrest, J. Appl. Phys., Vol. 100, p. 073106, 2006.  
 [15] N. Sone, and Y. Kawakami, Tech. Digest of IDW'03, pp. 1297~1300, 2003.  
 [16] B. C. Krummacher, M. K. Mathai, V. Choong, S. A. Choulis, F. So, and A. Winnacker, J. Appl. Phys., Vol. 100, p. 054702, 2006.  
 [17] I. Schnitzer, E. Yablonovitch, C. Caneau, T. J. Gmitter, and A. Scherer, Appl. Phys. Lett., Vol. 63, No. 16, pp. 2174~2176, 1993.  
 [18] T. Nakamura, N. Tsutsumi, N. Juni, and H. Fujii, J. Appl. Phys., Vol. 96, No. 11, pp. 6016~6022, 2004.  
 [19] Y.-H. Cheng, J.-L. Wu, C.-H. Cheng, K.-C. Syao, and M.-C. M. Lee, Appl. Phys. Lett., Vol.90, p. 091102, 2007.  
 [20] J. Zhou, N. Ai, L. Wang, H. Zheng, C. Luo, Z. Jiang, S. Yu, Y. Cao, and J. Wang, Org. Electron., Vol.12, pp.648~653, 2011.  
 [21] W. J. Hyun, S. H. Im, O. O. Park, and B. D. Chin, Org. Electron., Vol. 13, pp. 579~585, 2012.  
 [22] J. M. Ziebarth, A. K. Saafir, S. Fan, and M. D. McGehee, Adv. Funct. Mater., Vol. 15, No. 5, pp. 451~456, 2004.  
 [23] S. W. Liu, J. X. Wang, Y. Divayana, K. Dev, S. T. Tan, H. V. Demir, and X. W. Sun, Appl. Phys. Lett., Vol. 102, p. 053305, 2013.  
 [24] R. Bathelt, D. Buchhauser, C. Garditzm, R. Paetzold, and P. Wellmann, Org. Electron., Vol. 8, pp. 293~299, 2007.  
 [25] S. S. Jeong, and J.-H. Ko, J. Inf. Disp., Vol. 13, No. 4, pp. 139~142, 2012.  
 [26] T. Nakamura, H. Fujii, N. Juni, and N. Tsutsumi, Opt. Rev., Vol. 13, No. 2, pp. 104~110, 2006.  
 [27] J. Gruner, F. Cacialli, and R. F. Friend, J. Appl. Phys., Vol. 80, No. 1, pp. 207~215, 1996.  
 [28] [http://www.sony.net/Products/SC-HP/cx\\_news/vol39/pdf/featuring39.pdf](http://www.sony.net/Products/SC-HP/cx_news/vol39/pdf/featuring39.pdf)  
 [29] T. Yamasaki, K. Sumioka, and T. Tsutsui, Appl. Phys. Lett. Vol. 76, No. 10, pp. 1243~1245, 2000.  
 [30] H. J. Peng, Y. L. Ho, X. J. Yu, and H. S. Kwok, J. Appl. Phys., Vol. 96, No. 3, pp.1649~1654, 2004.  
 [31] T. Yagi, R. Satoh, Y. Yamada, H. Kang, H. Miyao, and K. Sawa, J. SID, Vol. 20, No. 9, pp. 526~532, 2012.  
 [32] T. Tsutsui, M. Yahiyo, H. Yokogawa, K. Kawano, and M. Yokoyama, Adv. Mater., Vol. 13, No. 15, pp. 1149~1152, 2011.  
 [33] Y. Sun, and S. R. Forrest, Nat. Photon., Vol., 2, pp. 483~487, 2008.  
 [34] T.-W. Koh, J.-M. Choi, S. Lee, and S. Yoo, Adv. Mater., Vol. 22, pp. 1849~1853, 2010.  
 [35] J. Choi, T.-W. Koh, S. Lee, and S. Yoo, Appl. Phys. Lett., Vol. 100, p. 233303, 2012.  
 [36] 이현용, 황인각, 김선경, "광자결정의 기초", 북스힐, 2009.  
 [37] Y.-J. Lee, S.-H. Kim, G.-H. Kim, Y.-H. Lee, S.-H. Cho, Y.-W. Song, Y.-C. Kim, and Y. R. Do, Opt. Exp., Vol. 13, No. 15, pp. 5864~5870, 2005.  
 [38] Y.-J. Lee, S.-H. Kim, J. Huh, G.-H. Kim, Y.-H. Lee, S.-H. Cho, Y.O.C. Kim, and Y. R. Do, Appl. Phys. Lett., Vol. 82, No.

21, pp. 3779~3781, 2003.  
 [39] Y. R. Do, Y.-C. Kim, Y.-W. Song, and Y.-H. Lee, *J. Appl. Phys.*, Vol. 96, No. 12, pp. 7629~7636, 2004.  
 [40] H.-H. Cho, B. Park, H.-J. Kim, S. Jeon, J.-H. Jeong, and J.-J. Kim, *Appl. Opt.*, Vol. 49, No. 21, pp. 4024~4028, 2010.  
 [41] U. Geyer, J. Hauss, B. Riedel, S. Gleiss, U. Lemmer, and M. Gerken, *J. Appl. Phys.*, Vol. 104, p. 093111, 2008.  
 [42] H. Raether, "Surface Plasmons and Smooth and Rough Surfaces and on Gratings", Springer, 1988.  
 [43] W. L. Barnes, A. Dereux, and T. W. Ebbesen, *Nature*, Vol. 424, pp. 830, 2003.  
 [44] P. A. Hobson, S. Wedge, J. A. E. Wasey, I. Sage, and W. L. Barnes, *Adv. mater.*, Vol. 14, No. 19, pp. 1393~1396, 2002.  
 [45] D. K. Gifford, and D. G. Hall, *Appl. Phys. Lett.*, Vol. 81, No. 23, pp. 4315~4317, 2002.  
 [46] W. H. Koo, S. M. Jeong, F. Araoka, K. Ishikawa, S. Nishimura, T. Toyooka, and H. Takezoe, *Nat. Photon.*, Vol. 4, pp. 222~226, 2010.  
 [47] L. H. Smith, J. A. E. Wasey, I. D. W. Samuel, and W. L. Barnes, *Adv. Funct. Mater.*, Vol. 15, No. 11, pp. 1839~1844, 2005.  
 [48] K. Y. Yang, K. C. Choi, and C. W. Ahn, *Appl. Phys. Lett.*, Vol. 94, p. 173301, 2009.  
 [49] 장지향, 김경조, 김진현, 오민철, *한국광학회지*, 제18권, 제6호, pp. 441~446, 2007.  
 [50] 예를 들어, <http://www.universaldisplay.com/?contentID=590>.

◇ 저 자 소 개 ◇



고재현(高在賢)

1968년 3월 21일생. 1992년 2월 서울대학교 물리학과 졸업. 2000년 2월 KAIST 대학원 물리학과 졸업(박사).

2000~2003년 University of Tsukuba at Tsukuba in Japan, Research Associate. 2003~2004년 삼성코닝 주식회사, 책임연구원. 2004~2007년 삼성코닝 주식회사 기술고문. 2004년~현재 한림대학교 교수. 한국물리학회 정회원 및 국문지(새물리) 편집위원. 한국광학회 정회원, 국문지(한국광학회지) 편집위원장. 한국정보디스플레이학회 정회원, 영문지(Journal of Information Display) Associate Editor, 광원연구회 간사. 한국조명전기설비학회 정회원.

주요관심분야 : 광원, 디스플레이, 광학 시뮬레이션, 강유전체 물리, 응집물질 분광학

E-mail : hwangko@hallym.ac.kr