

기술 특 집

# OLED 소자의 광학특성 향상기술

신 동 찬 (조선대학교 신소재공학과)

## I. 서 론

다른 전자소자의 발달과 마찬가지로 정보디스플레이 소자의 발달방향도 소형화, 박막화, 대용량화, 모바일화를 추구하고 있다. 다양한 디스플레이 소자 중에서 TFT-LCD가 각광 받고 있는 이유는 박막화가 가능하고 고정세가 가능하여 좁은 면적에서도 고화질의 영상을 나타낼 수 있기 때문일 것이다. 최근에 양산이 시작된 OLED 소자는 TFT-LCD 소자와 비교하여 더 얇고 가벼우며 저소비전력으로 구동이 가능하기 때문에 모바일 응용에 가장 적합한 소자이다. 또한, 자발광소자이기 때문에 TFT-LCD에 비해서 색재현 범위가 넓으면서도 생동감 있는 색감을 얻을 수 있고 응답속도가 빠르기 때문에 TV용 디스플레이로서도 유망한 소자이다.

다른 디스플레이와 마찬가지로 OLED 소자의 휘도 향상을 위한 많은 연구가 이루어지고 있다. OLED 소자의 휘도 증가는 다른 디스플레이보다도 더 중요한 의미를 가진다. 모바일 소자의 소비전력을 낮추어 줄 수 있고, AMOLED의 경우는 고정세 소자의 제작에 도움을 줄 수 있고, 대형 디스플레이의 IR drop 문제를 완화시킬 수 있으며, 제조단가를 줄여줄 수 있는 장점들을 가진다. 또한, 시급한 현안인 수명 증가가 가능하기 때문에 OLED 소자를 연구하는 연구자나 제조사들은 발광효율을 증가시키기 위한 다양한 노력들을 시도하고 있다.

OLED 소자의 발광효율은 크게 EL 재료효율, 내부양자효율, 외부양자효율의 세가지 인자에 의해서 결정된다. 내부양자효율은 삼중항재료의 개발을 통하여 거의 100%의 값을 얻었기 때문에 더 이상의 진전이 어려운 상태이다. EL 재료의 효율은 지속적인 증가를 보이고 있는데 발광효율의 근본적인 기준이 되므로 재료효율의 증가는 소자경쟁력에 큰 기여를 한다. 외부양자효율이 낮다는 것은 점발광 소자인 OLED가 가지고 있는 단점이라고 할 수 있다. 최근 이 단점을 극복하고 높은 외부양자효율을 얻기 위한 연구결과들을 소개하고자 한다.

발광효율과 더불어서 OLED 소자가 모바일용으로 사용되

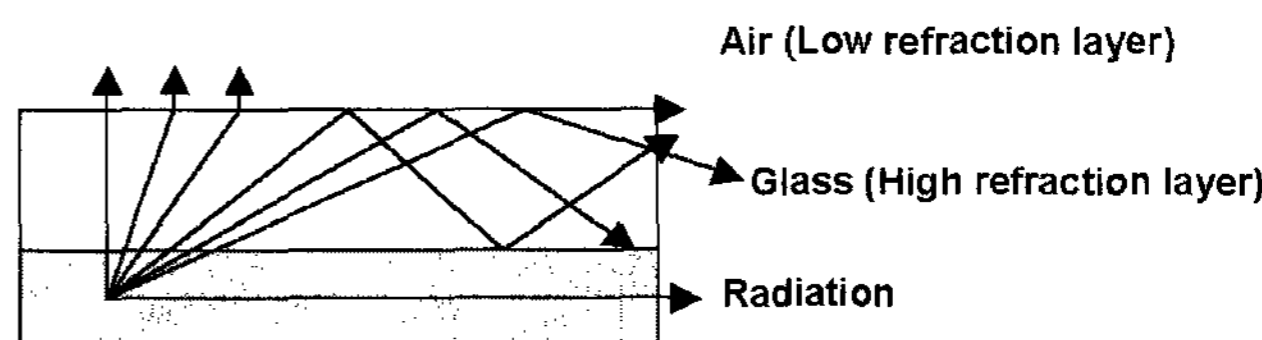
기 위해서는 명암비(Contrast ratio) 특성이 우수하여야 한다. 외광의 반사를 줄여주기 위해서는 적절한 BM 물질을 사용하고 구조에 따라서 최적화된 광학적 설계가 뒤따라야 한다. 외국사와 국내의 BM에 대한 연구결과와 제품화 예를 소개하겠다. 그 외에도 AMOLED의 다양한 구조에서 고려해야 할 광학적인 요소들과 전면발광에서 이상적인 광학특성을 얻기 위한 구조에 대해서도 간단하게 언급하고자 한다.

## II. 본 론

### 1. 외부양자효율 향상

디스플레이 소자를 발광형태에 따라 분류하면 점발광소자와 면발광 소자로 분류할 수 있다. 면발광소자는 광자가 면에서 고르게 발생하는 소자로서 종래의 대표적인 디스플레이인 CRT(실제 점발광 소자이지만 면발광으로 분류가능)와 별도의 면광원을 사용하는 LCD를 들 수 있다. 면발광소자는 발생한 광자가 대부분 외부로 100% 나오기 때문에 외부양자효율에 대한 고려가 필요하지 않다. 이에 반해서 LED와 OLED로 대표되는 점발광소자들은 내부의 한 점에서 발생한 광자가 굴절률이 다른 여러 층을 통과하여 외부로 나오기 때문에 외부양자효율이 중요한 변수가 된다.

[그림 1]은 점발광소자에서 일어날 수 있는 전반사에 의한 외부양자효율의 저하를 보여준다. 굴절률이 높은 층에서 낮은 층으로 광자가 진행할 때에는 굴절률 비에 따라서 임계각 이상으로 계면에 입사하는 광자는 전반사가 일어나서 외부로 나가지 못하는 현상이 발생한다. 전산모사를 통하여 계산을 해보면 전형적인 LED 소자의 경우는 전체 광자



[그림 1] 굴절률이 다른 계면에서 발생하는 전반사의 개략도

의 5%, OLED 소자의 경우는 20%의 광자만이 외부로 나올 수 있다. 따라서 내부에서 소멸되는 광자의 일부분만이라도 외부로 추출할 수 있다면 매우 큰 휘도개선 효과를 얻을 수 있다.

OLED 소자의 구조를 보면 유리와 공기의 계면에서 굴절률 차이가 가장 크기 때문에 유리기판에서의 전반사가 외부양자효율의 증가에 가장 큰 문제가 된다. 일본의 Tsutsui 교수팀은 에어로졸을 유리기판 위에 코팅한 소자를 만들어서 일반소자와 비교하여 2배의 외부양자효율을 얻을 수 있음을 보여주었다.<sup>[1]</sup> 그러나, 소자의 신뢰성 측면에서 에어로졸 코팅은 문제가 있다. 그 외에도 유리기판의 굴절률을 조절하는 방법이나 microlens를 사용하는 연구가 시도되기도 하였지만 제품에 적용하기에는 특성이나 가격 면에서 어려움이 있다.

Tsutsui 교수팀의 연구결과는 광자결정(photonic crystal)의 원리를 기본으로 하고 있다. 1997년 Yablonovich는 굴절률이 주기적으로 변화하면서 격자형태를 이루게 되면 빛에 대한 주기적 포텐셜의 변화로 인하여 광자에 대한 밴드갭이 형성될 것이라고 이론적으로 제안하였다.<sup>[2]</sup> 1991년에는 실험을 통하여 광자밴드갭의 존재를 증명하였다.<sup>[3]</sup> 광자결정을 사용하면 광자의 포획, 반사, 경로의 제한, 광 추출 등을 통하여 광자를 마치 반도체에서 전자를 제어하듯이 원하는 대로 다룰 수가 있다.

Yablonovich 등은 광자결정의 leaky mode를 이용하여 점발광 소자인 LED의 외부양자효율을 6배까지 증가시킬 수 있음을 보여주었다.<sup>[4]</sup> 최근 삼성SDI는 같은 원리를 OLED 소자에 적용하여 PMOLED에서 외부양자효율을 증

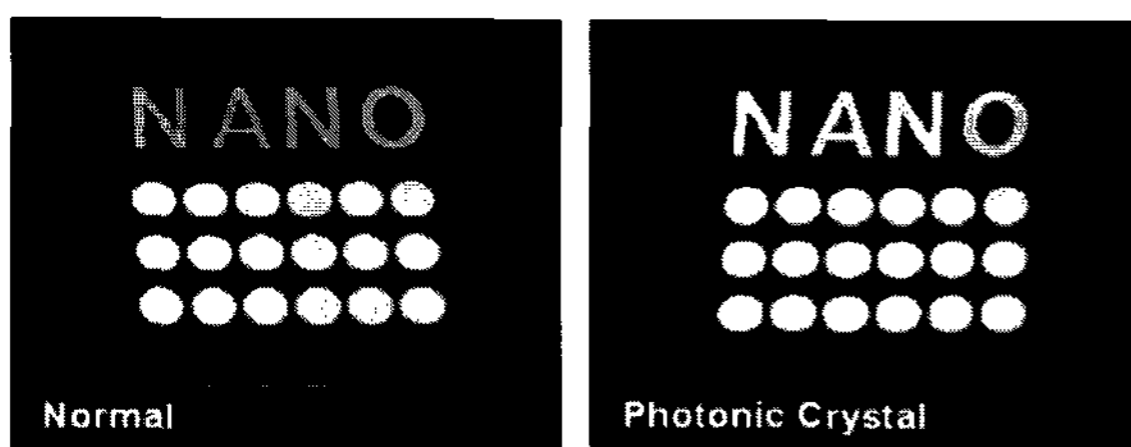
가시킬 수 있음을 발표하였다.<sup>[5]</sup> [그림 2]에서 볼 수 있듯이 광자결정을 도입한 경우가 도입하지 않은 경우에 비해서 휘도가 개선됨을 알 수 있다. 이용희 교수와 전현수 교수 등도 PMOLED에서 submicron patterning을 통하여 외부양자효율이 약 2배까지 증가할 수 있음을 보여주었다.<sup>[6,7]</sup>

이론적으로는 내부양자효율과 마찬가지로 광자결정 구조를 적절하게 형성시키면 외부양자효율도 100%를 달성할 수 있다. 그러나, 소자제작 공정에 문제점이 있기 때문에 100%를 달성하기는 어렵다. 각 제조사마다 자기회사의 구조에 최적의 광자결정 구조와 공정을 적용하여 휘도를 개선하는 것이 앞으로 해결해야 할 숙제로 남아 있다. 특히, 제조단가가 낮고, 다른 제조공정과 문제를 일으키지 않으면서, 신뢰성을 확보할 수 있는 2차원 광자결정 제조공정에 대한 연구가 필요하다.

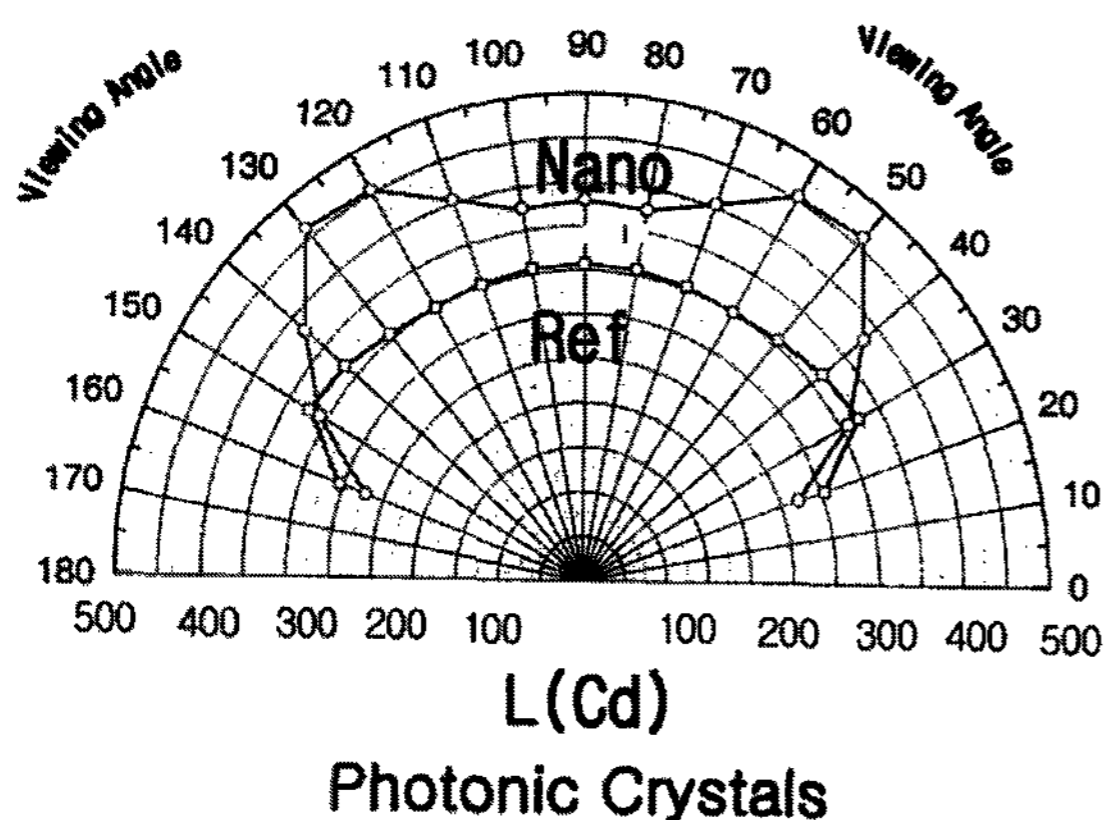
## 2. Black Matrix를 이용한 명암비 향상

서론에서 설명하였듯이 OLED 소자는 모바일 응용 면에서 우수한 특성을 가진다. 모바일 소자의 광학특성 중에서는 외광에 의한 반사가 디스플레이의 화질에 큰 영향을 미치므로 명암비(contrast ratio)가 중요 특성이 된다. [그림 3]은 PMOLED 소자의 단면구조를 개략적으로 표시하고 있다. 소자의 뒷면에 존재하는 금속전극으로 반사율이 좋은 Ag 등이 주로 사용되기 때문에 외부광의 반사가 문제가 된다. 명암비를 올리는 방법은 크게 두 가지로 나눌 수 있다. 한 가지는 polarizer를 이용하는 방법이고 다른 한 가지는 black matrix(BM)를 사용하는 방법이다. Polarizer를 사용하는 방법은 금속전극에서 반사된 광이 polarizer 표면에서 상쇄간섭이 이루어지게 한다. Polarizer를 사용하는 방법은 단가가 높고 색깔의 변화를 일으키는 문제점이 있다. BM은 제조공정에서 새로운 층을 도입해야 하기 때문에 기술적인 어려움이 있지만 AMOLED 등에서는 전극으로의 활용이 가능하기 때문에 기술적인 문제점만 해결하면 가격과 성능 면에서 polarizer에 비해서 월등히 우수한 장점이 있다. 추가적인 구조변화가 없다면 polarizer를 사용한 경우와 BM을 사용한 경우의 휘도는 큰 차이가 나지 않는다.

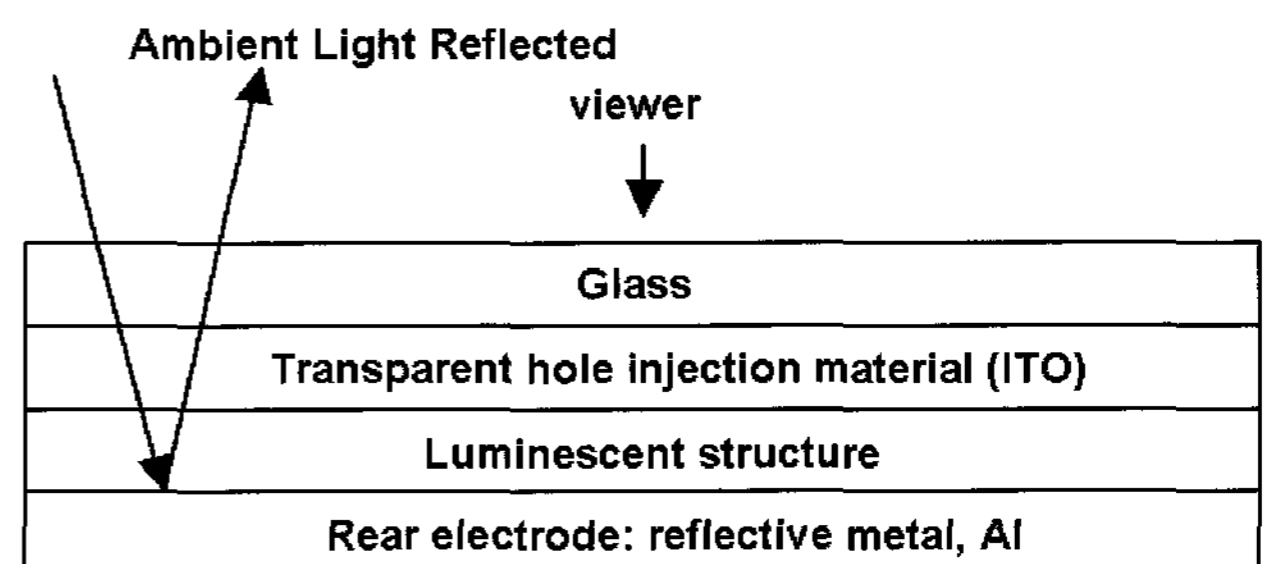
BM은 각 회사마다 다양한 구조와 재료를 사용하고 있다. [그림 4]는 미국의 Luxell사에서 개발한 BM의 구조를 보여준다.<sup>[8]</sup> 기본 구조는 얇은 금속층과 두꺼운 금속층 사이에 투명한 도전성 산화물 층을 넣은 구조를 하고 있다.



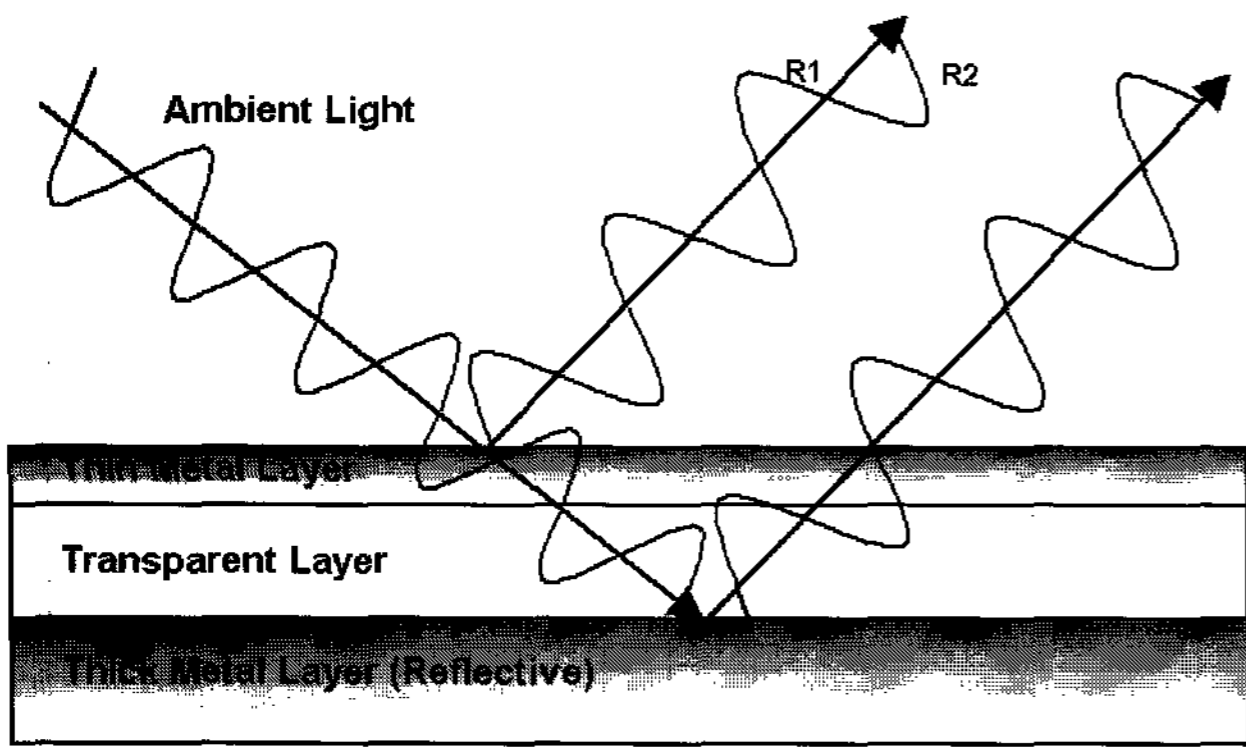
G: 78 cd/m<sup>2</sup> @100mA      G: 134 cd/m<sup>2</sup> @100mA



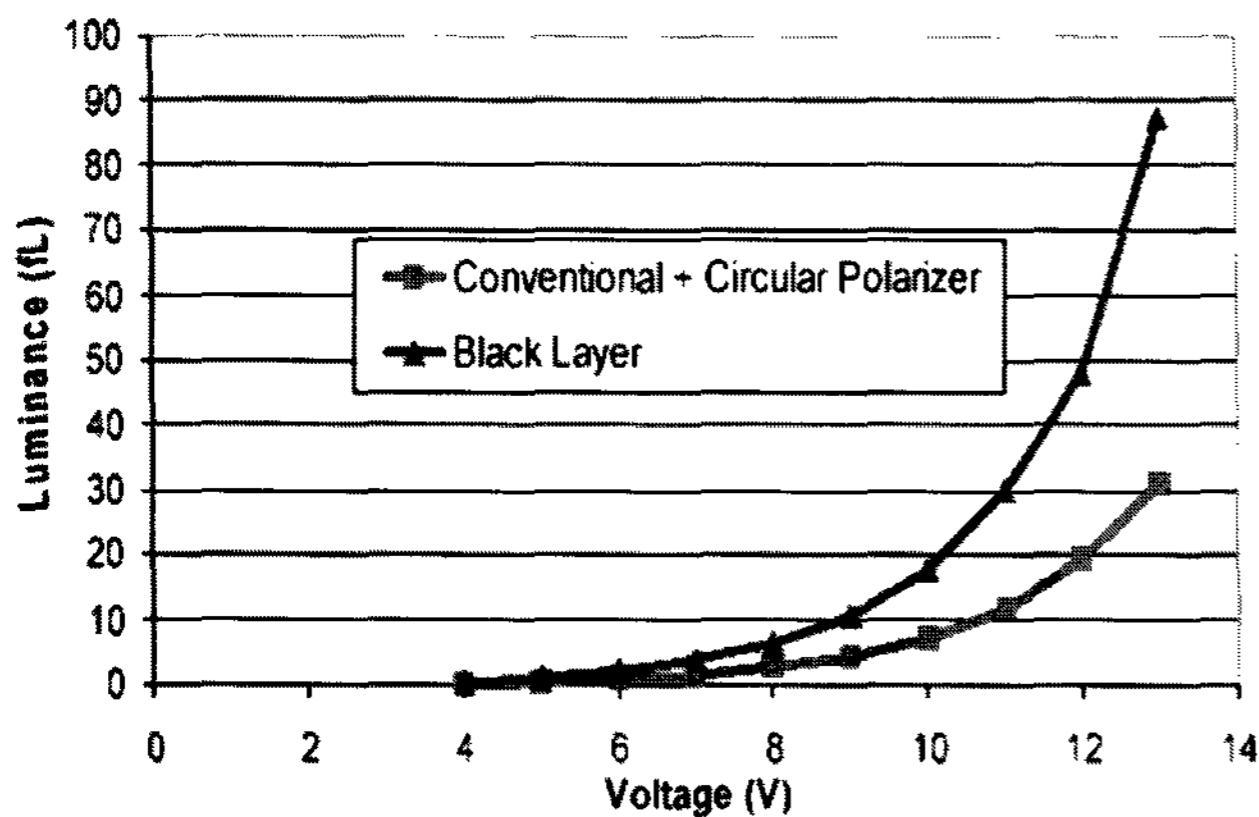
[그림 2] 광자결정에 의한 휘도개선



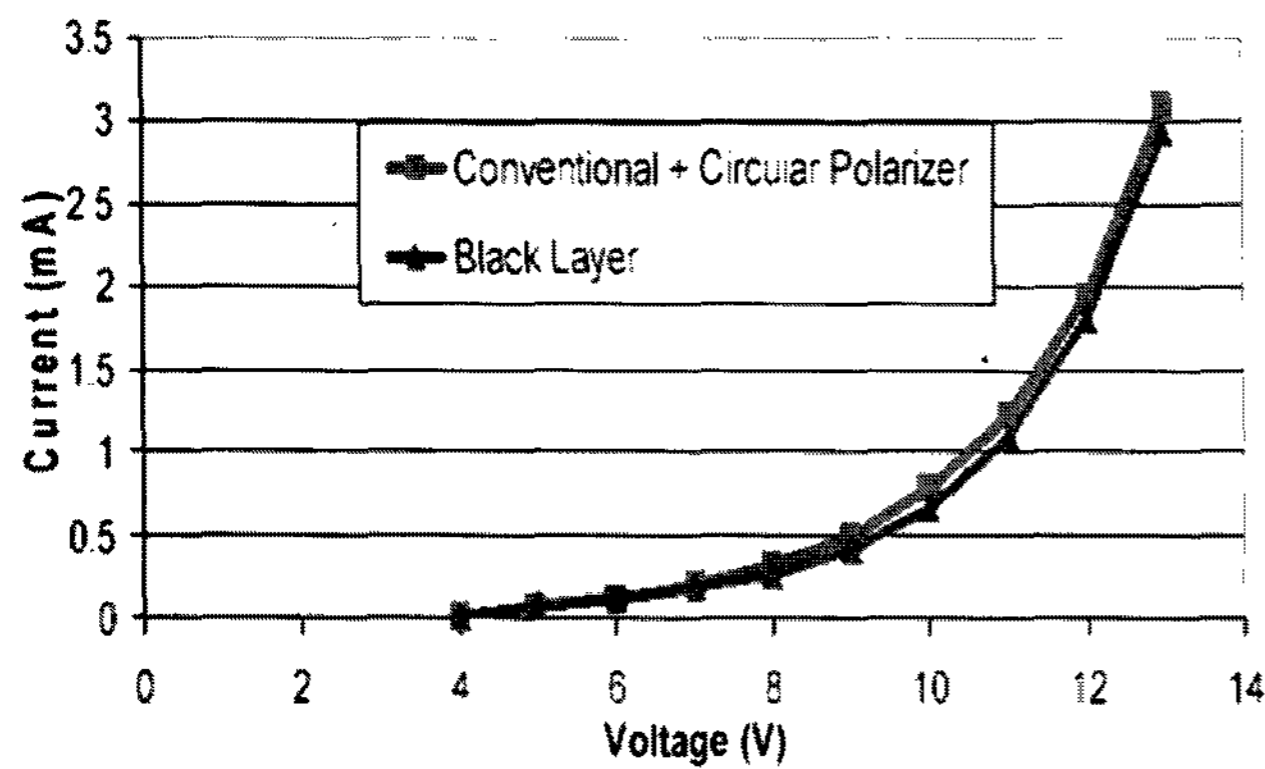
[그림 3] PMOLED에서 외부광의 반사



[그림 4] Luxell사 BM의 구조와 외광의 상쇄간섭<sup>[8]</sup>



[그림 5] Luxell사 BM의 LV 특성<sup>[8]</sup>



[그림 6] Luxell사 BM의 IV 특성<sup>[8]</sup>

PMOLED에서는 기판 위의 층은 보통 하부전극으로 사용되기 때문에 이런 구조를 선택하였다. 최근 특히 중에서는 금속층과 투명한 dielectric 층을 교대로 여러 번 증착하여 생생한 구조도 있고, 한번에 금속층과 dielectric 층을 동시에 증착하면서 농도비가 점차 변하는 구조도 있다.<sup>[9]</sup> 어떤 구조이거나 BM의 기본구조는 표면은 투명하고 유리기판에 가까운 아래쪽은 금속으로 형성되어야만 한다.

[그림 5]와 [그림 6]은 Luxell사의 BM을 적용한 소자의 광학적 특성을 보여준다. BM층을 적용한 경우 LV특성은 기본 구조(circular polarizer를 사용한 경우)에 비해서 조금 높은 휘도를 보여주고 있다. 따라서 같은 휘도를 얻기 위해서 낮은 전압에서의 구동이 가능하다는 장점이 있을 수

있다. IV 특성을 살펴보면 거의 차이가 없다는 것을 알 수 있다. 이것은 BM층의 도입이 유기발광층에는 영향을 미치지 않는다는 것을 의미한다. 물론 수명에 영향을 미치는지에 대한 자료를 보여주지는 않았지만 BM은 두 가지 특성으로부터 충분히 그 장점을 인정받을 수 있다.

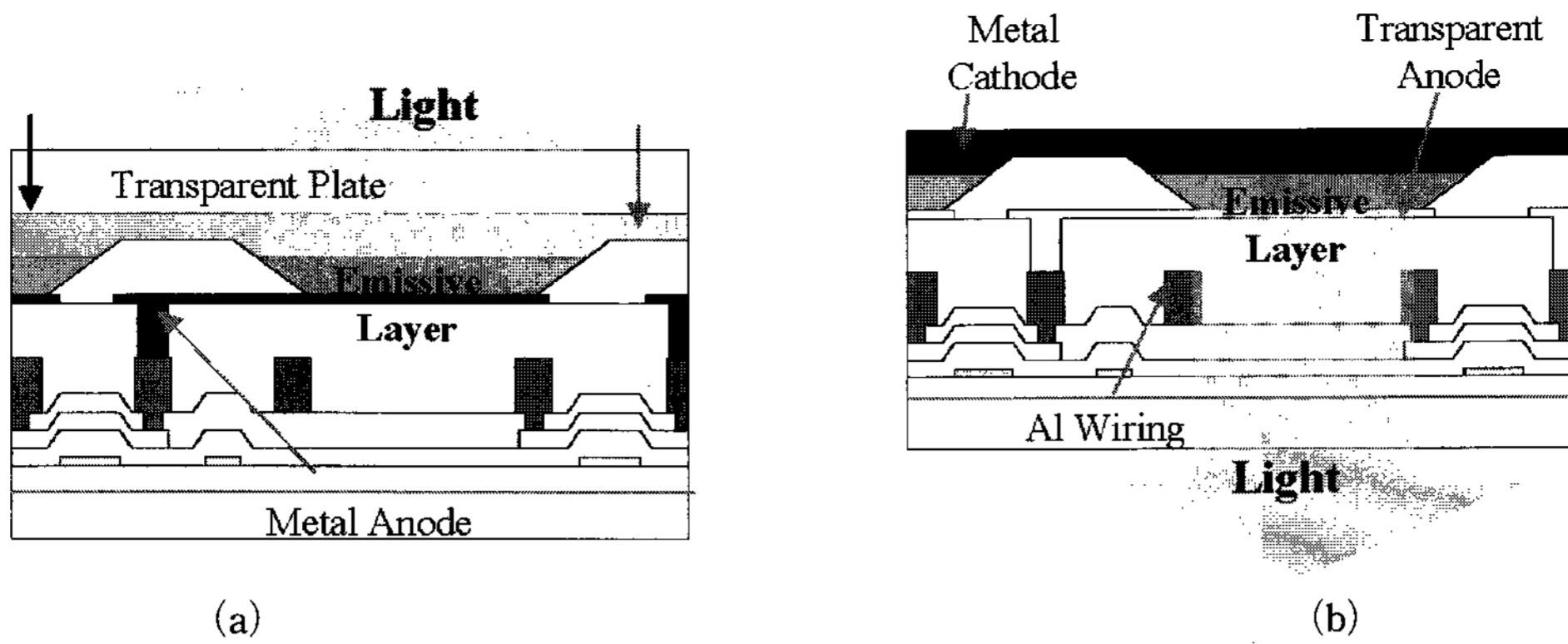
BM의 또 다른 장점을 보여주는 것이 [그림 7]이다. 기본 구조를 채용한 소자의 경우는 Alq<sub>3</sub>의 두께에 따라서 R, G, B 색깔이 변화하는 현상이 나타나지만 BM을 적용한 경우에는 전혀 색깔의 변화가 발생하지 않는다. Full color 디스플레이를 만들기 위해서는 white balance가 중요한 변수가 된다. Alq<sub>3</sub>의 두께나 다른 층의 두께에 따라서 색깔의 변화가 일어나면 전체 소자의 설계에 어려움이 존재하게 된다. Alq<sub>3</sub>의 두께에 의해서 색깔이 변하는 이유는 여기에서도 광자결정의 원리가 적용되기 때문이다. 이 현상에 대해서는 다음 절에서 다룰 AMOLED에서 다시 알아보기로 하겠다.

지금까지는 주로 PMOLED에서의 BM 적용에 대한 연구와 제품 예에 대해서 설명하였다. AMOLED에서는 조금 다른 고려가 필요하다. 우선 AMOLED에서는 세 개 이상의 배선층이 필요하다. 이러한 금속배선들은 적절한 층에 형성하여야만 층간 절연문제를 일으키지 않는다. 현재 개발되고 있는 BM층들은 대부분 아래층들은 금속재질로 구성되어 있기 때문에 필요한 배선층 중에 하나로 활용될 수 있다. BM층은 유리 기판 위에 형성이 되기 때문에 AMOLED에서는 기본구조에 비해서 한 개의 층이 더 형성된다고 볼 수 있다. 그냥 그 층을 무시하고 TFT 구조를 형성할 수도 있지만, BM층을 한번 patterning하면 하나의 배선층이 생기게 된다. 배선 하나를 유리기판 위에 형성하게 되면 TFT층을 설계하는데 많은 자유도를 가진다는 장점이 있다.

### 3. AMOLED 소자의 광학특성 향상

AMOLED 소자는 크게 전면발광구조와 배면발광 구조로 나눌 수가 있다. OLED 소자는 전류구동 소자이므로 TFT의 V<sub>th</sub> 불균일성이 화질에 미치는 영향이 TFT-LCD에 비해서 크다. 따라서 고화질 디스플레이의 경우는 보상회로의 도입이 필수적이므로 개구율의 확보를 위해서는 전면발광 구조가 필요하다. 휴대폰 등의 모바일 응용에서는 배면발광 구조로도 응용이 가능하다. [그림 8]은 전면발광구조와 배면발광구조의 개략도를 보여준다.

우선 전면발광구조에서는 발광층에서 나온 광자는 TFT 구조의 passivation layer, interlayer, gate insulator, buffer layer, BM layer, 유리기판 등의 층을 통과하여 외부로 나오게 된다. 이러한 층들은 소자구조에 따라서 다양한 dielectric layer로 구성된다. 주로 많이 사용되는 것은 SiO<sub>2</sub>와 SiN<sub>x</sub>이다. 이러한 층들이 교대로 계속 쌓인 구조는 바로 1차원 광자결정 구조가 될 수 있다. 잘 알려진 1차원 광자결정 구조로는 Bragg reflector를 들 수 있다. 반도체 제조공정에서 deep UV에 대한 반사거울로 많이 사용되는데 이때 그 구조는 두 가지 이상의 dielectric layer가 교대로 증착된 구조를 가진다. 이러한 구조는 특정 파장에 대해



[그림 8] 전면발광(a) 및 배면발광(b) AMOLED 구조도

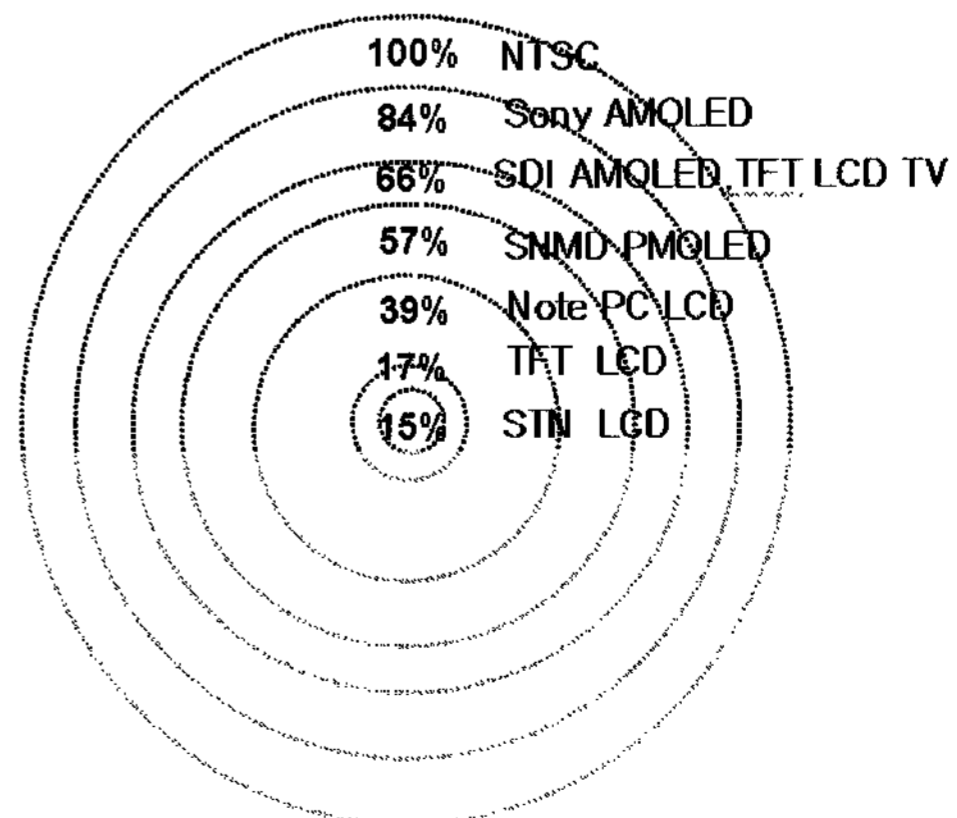
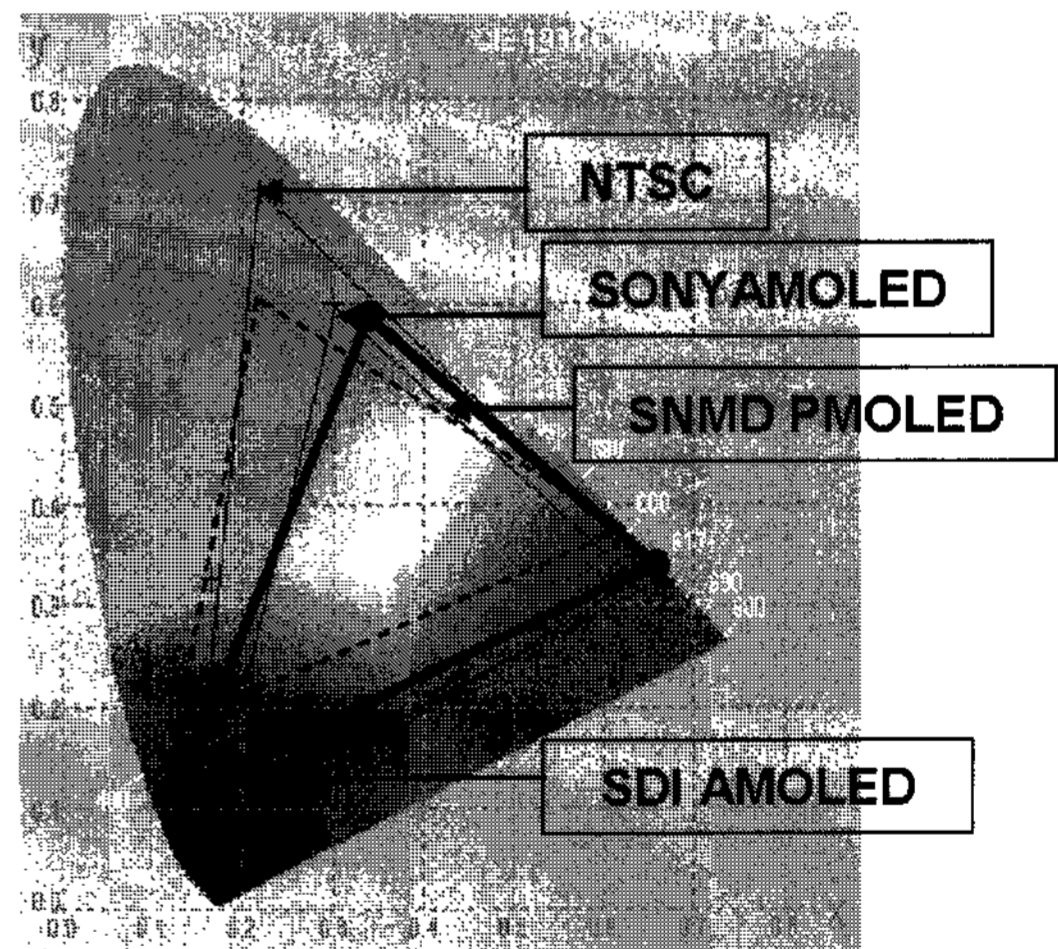
서 밴드갭이 형성되어 그 파장이 투과하지 못하고 반사되는 특징을 가진다. 배면발광 AMOLED 소자에서도 발광경로에 증착되는 다양한 dielectric layer들은 광자결정 구조를 형성할 수 있기 때문에 광학설계를 할 때 classical ray optics가 아닌 photonic simulation이 필요하다.

예를 들면 TFT 구조에서 상하 short를 일으키는 pin hole을 막기 위하여 interlayer를 두 가지 물질로 증착하면서 buffer layer, gate insulator 층과 dielectric layer가 교대로 구성되는 구조를 형성하면 특정 파장대에 대해서 광자밴드갭이 형성되어 그에 해당하는 빛이 약해지면서 color change가 발생할 수 있다. 이러한 원리는 PMOLED에서도 적용될 수 있지만 PMOLED의 경우는 구조가 간단하기 때문에 밴드갭을 형성하기 어렵다. 단지 외광의 경우에는 소자 내부에서 다양한 층을 지나면서 완전하지는 않지만 광자밴드갭이 형성될 수 있다. 앞의 [그림 7]에서 Alq<sub>3</sub>의 두께에 따른 색깔 변화도 이러한 원리로 설명될 수 있다. TFT 구조에 들어가는 박막들은 그 두께나 재료가 바뀌면 TFT의 특성에도 영향을 미치기 때문에 TFT 특성과 광학적 고려가 항상 같이 이루어져야만 소자의 특성을 최적화할 수 있다는 어려움이 따른다.

전면발광구조를 채용한 AMOLED의 경우는 빛이 유리기판과 반대로 나가기 때문에 전혀 다른 고려가 필요하다. 배면발광에 비해서는 TFT구조와 상관이 없기 때문에 광학적 설계에 대한 자유도가 높다는 것이 큰 장점이다. 전면발광의 경우는 두께를 더 얇게 하고 일괄공정을 통한 공정의 관리와 tact time의 절약을 위해서는 thin film encapsulation이 필수적이다. 현재까지 연구되고 있는 봉지층들은 다양한 무유기 투명박막을 교대로 증착하는 구조를 가지고 있다. 이러한 구조는 역시 1차원 광자결정구조가 되기 때문에 광자밴드갭을 형성할 가능성이 높다.

전면발광에서는 소자의 하부구조와 상관없이 봉지특성과 광학적 특성만을 고려하면 된다. 배면발광에 비해서는 최후의 공정에서 이 특성이 좌우되므로 설계뿐만 아니라 공정면에서도 많은 자유도를 보장할 수 있다. 제조되는 소자의 특성들이 결정이 된 상태에서는 봉지층에 형성되는 광자밴드갭을 적극적으로 이용할 수도 있다. 예를 들면 기존의 RGB 재료의 색좌표가 나쁜 경우에는 순도가 높은 쪽으로 색좌표

를 개선하는 것이 가능하여 소자의 색재현범위를 넓힐 수 있다. [그림 9]에서 볼 수 있듯이 보통 TV에 사용하는 음극선관의 경우를 100%라고 할 때, Note PC용 TFT-LCD의 경우는 57%의 색재현 범위를 가지는데 반해서 삼성SDI의 AMOLED는 66%의 색재현 범위를 가지며, Sony가 발표한 AMOLED는 84%의 색재현 범위를 가진다. 현재 사용되고 있는 R, G, B 재료에 광자결정 구조를 응용하면 NTSC를 능가하는 색재현 범위를 가지는 소자의 제작이 가능하다.<sup>[10]</sup>



[그림 9] 다양한 디스플레이의 색재현 범위

광자결정 구조가 가지는 다양한 장점과 응용 예들을 설명하였지만, 광자결정 구조는 한번의 패터닝으로 형성하면 한 가지 밴드갭만을 가진다는 것이 단점이 될 수 있다. 즉, R, G, B 세 개의 파장에 대해서 동시에 밴드갭을 형성할 수는 없다는 것이다. 실제 응용을 위해서는 가장 휘도가 낮은 파장에 맞추어서 응용이 이루어져야만 한다. 현재 OLED 소자는 blue 재료의 휘도가 낮고 수명이 짧다는 문제점을 가지고 있다. 이러한 문제로 인하여 white balance를 맞추기가 어렵고 white를 맞추어서 제품을 제작하여도 blue 재료가 먼저 열화되면서 전체적인 색깔이 노란색 쪽으로 치우치는 문제가 발생한다. 따라서 1차원과 2차원 광자결정을 응용하여 blue재료의 휘도를 높여 준다면, 상대적으로 높은 휘도를 얻을 수 있고, 상대적으로 전류량이 줄어들어서 수명증가도 기대할 수 있기 때문에 휘도증가와 white balance 열화문제를 동시에 해결할 수 있다.

### III. 결 론

본 논문을 통하여 점발광 소자인 OLED의 특성향상을 위해서 광자결정의 이론을 응용하면 여러 가지 단점을 극복할 수 있음을 보여주었다. 또한, 소자 구조상 거울과 같은 전극을 사용함으로써 발생하는 명암비 저하라는 단점은 적절한 BM 재료를 선택함으로써 명암비의 향상과 소자 설계의 자유도를 얻을 수 있었다. 얇은 발광층에서 광자가 생기고 이 광자가 파장보다 얇은 두께의 많은 박막들을 통과하여 외부로 나가기 때문에 기존의 classical ray optics가 아닌 photonic simulation이 필요하다. 이러한 어려움이 있지만, 오히려 광자결정 등의 이론을 적극적으로 활용한다면 기존의 소자에 비해서 우수한 특성을 얻을 수 있다. 본 논문에서 열거한 방법들은 아직은 제품에 적용되지 못하고 있다. 앞으로의 다양한 연구를 통하여 특성의 최적화가 더 이루어져야 하고 타 공정과 연관된 문제들을 해결해야 하며, 신뢰성과 저가의 제조공정도 개발해야만 한다.

본문에서 제시한 광학적특성 향상기술이 최적화가 된다면 OLED 소자의 휘도가 지금의 2배 이상으로 커지는 것이 가능하리라 생각된다. 휘도의 2배 개선은 OLED 디스플레이의 수명, 소비전력, 고해상도 등의 문제에서 획기적인 개선점을 제공할 수 있다. 뿐만 아니라 광자결정의 응용을 통해 휘도가 100lm/W까지 증가한다면 OLED를 이용한 면발광 조명기구의 실현을 앞당기는 핵심기술이 될 수 있다.

OLED 디스플레이는 기존의 디스플레이들과는 달리 아직도 연구개발의 여지가 많이 남아 있다. 이러한 사실은 이 분야를 연구하는 연구자에게는 행복한 일이라고 하겠다. 그러나, 본문에서도 설명하였듯이 구조의 변화는 반드시 광학적

인 특성, 전기적인 특성, 기계적인 특성에 복합적인 영향을 미치므로 소자구조와 특성에 대한 완벽한 이해를 바탕으로 연구가 이루어져야 한다. 이를 위해서는 산학연이 각각 장점을 가지고 있는 부분을 활용하는 공동연구가 절실히 필요하다.

### 참 고 문 헌

- [1] "Doubling Coupling-Out Efficiency in Organic Light-Emitting Devices Using a Thin Silica Aerogel Layer", T. Tsutsui, M. Yahiro, H. Yokogawa, K. Kawano, M. Yokoyama, Adv. Mater. 13, 1149-1152 (2001).
- [2] "Inhibited Spontaneous Emission in Solid-State Physica and Electronics", E. Yablonovitch, Phys. Rev. Lett. 58, 2059-2062 (1987).
- [3] "Photonic Band Structure: The Face-Centered-Cubic Case", E. Yablonovitch and T.J. Gmitter, Phys. Rev. Lett. 63, 1950-1953 (1989).
- [4] "Light extraction from optically pumped light-emitting diode by thin-slab photonic crystals", M. Boroditsky, T. F. Krauss, R. Coccioli, R. Vrijen, R. Bhat, and E. Yablonovitch, Applied Physics Letters 75, 1036-1038 (1999).
- [5] "OLED 디스플레이 성능향상을 위한 광학기술", OLED 디스플레이의 이해, 2004년 ISRC 심화하게교육.
- [6] "A high-extraction-efficiency nanopatterned organic light-emitting diode", Yong-jae Lee, Se-Heon Kim, Joon Hun, Guk-Hyun Kim, and Yong-Hee Lee, Applied Physics Letters 82, 3779-3781 (2003).
- [7] "Enhanced Light Extraction from Organic Light-Emitting Diodes with 2D SiO<sub>2</sub>/SiN<sub>x</sub> Photonic Crystals", Young Jag Do, Yoon Chang Kim, Young-woo Song, Chi-O Cho, Heonsu Jeon, Yong-Jae Lee, Se-Heon Kim, and Yong-Hee Lee, Adv. Mater. 15, 1214-1218 (2003).
- [8] <http://www.luxellresearch.com/black.htm>
- [9] 국내특허출원 2001-0085187, 출원일 2001.12.26 "블랙매트릭스를 구비한 평판 표시장치 및 그의 제조방법", 신동찬, 구제본.
- [10] 제14회 OLED 기술세미나, 2004.4.23, 한국 디스플레이 연구조합.