무기 전계발광표시소자(TFELD)

이윤희
KIST, 정보재료소자센터, 표시소자연구팀, 선임연구원

1. 서 론

1.1. 미래의 평판디스플레이

표시화면의 두께가 1~2cm에 불과한 초박형의 평판(flat panel) 디스플레이는 주로 노트북 컴퓨터용 모니터에 채용되어 왔으나, 최근에는 40인치 이상의 초대형 PDP 벽걸이 TV까지 채택되고 있다. 한편, 초소형 평판 디스플레이의 주 응용 분야인 휴대폰은 기존의 단순 통신 단말기의 역할로부터 e-mail과 internet 정보검색 기능을 갖는 움직이는 통신/정보 컴퓨터인 "스마트폰" 까지 연일 새로운 제품형태로 등장하고 있다. 이는 조만 간에 " wearable 폰(의복형의 착용가능 컴퓨터)" 형태로 발전하여 21세기 진입과 동시에 손목시계형, 허리띠형, 이어폰형, 헤드폰 형, 포켓형, 조끼형의 출현까지를 어렵지 않게 예상케 한다. 이들 제품을 위한 평판 표시 판넬들은 기본적으로 저 전력소모, 초경량, 초박형, 초 고해상도, 빠른 응답속도, 고 내환경성 등을 만족시키는 표시소자들이 채택될 것이다. 통신전용 단말기는 정보검색, 영화 및 TV 와 같은 멀티미디어용 기능이 부가되는 한편, 종래의 TV는 컴퓨터 기능을 겸비한 인터넷 TV 기능까지 "*첨단기능의 fusion*" 시대가 도래하고 있다. 따라서, 외부 backlightening 장착이 필수적인 수동발광형(예, LCD) 표시판넬은 새로운 종류의 고효율 자체발광형 표시 판넬기술로의 대체가 필수적인 것으로 예고되고 있다. 또한, 사회 구성원의 사회/경제/문화활동의 대부분이 전자 모니터를 통해 이루어지게 되므로 표시판넬의 유/무형의 전자기적 특성 및 표시품질은 사용자들의 생체심리학적인 건강에 직접적인 영향을 미치게 된다. 최근 선진국에서 심각한 문제로 지적되고 있는 PC 사용자들의 증후근 분석결과 화면으로부터 방출되는 유해전자파 문제가 심각한 수준에 이르고 있어 전자파가 발생되지 않는 보다 고품질의 표시장치 개발은 매우 중요한 과제가 되고 있다.

본내용에서는 평판표시기술의 하나인 교류구동형(AC) 무기 thin film electroluminescent device(TFELD)에 대한 기본 동작원리, 관련 재료, 소자 공정법 등에 대하여 살펴보고 간략하게 제품기술과 향후 발전방향에 대하여 논의하였다.

1.2. EL의 종류 및 구조

Electroluminescence(EL)은 전기적인 에너지가 광에너지로 변환되는 현상이다. EL 소자은는 그 적용원리에 따라 흔히 Light emitting diode(LED)라고 불리는 소자와 본 논문에서 관심있는 ELD라고 불리는 소자 두 가지로 구분된다.

LED는 p-n 접합부근에서 발생하는 전자-정공 재결합과정의 복사성 전이과정을 이용하는데 종래까지는 주로 GaAs 와 같은 무기재료들이 사용되었으나, 최근 수년사이에 유기재료를 이용한 LED의 급속한 발전이 이루어지고 있다. 한편, 발광중심이 첨가된 매질 내에서 고에너지의 전자가 생성되고 이러한 전자들이 발광중심을 충격 여기(impact excitation)시킬 때 발생되는 발광현상을 이용한 소자는 ELD 라고 부르며 특히 전자가 전기장으로부터 에너지를 얻으므로 "고전계 EL" 로 구분하고 있다[1]. 이러한 고전계 EL 소자는 다수 운반자인 전자가 우선적으로 소자의 물리적 거동을 결정한다. 고전계 EL 현상은 1936년 Destriau(프)에 의해 처음으로 관측된 후 면광원으로서 주목을 받았으나 휘도와 수명 등의 개선이 어려워 침체기를 맞는다[2]. 1950년대에 투명전극의 개발과 박막기술의 급속한 발전에 힘입어 74년에 Sharp(일)사의 Inoguchi 등이 오늘날과 같은 이중 절연 박막 EL 구조를 도입하게 되고 고휘도화와 장수명을 특징으로 하는 박막 ACTFEL에 대한 본격적인 연구개발이 시작되었다[3].

EL은 소자의 제작법이나 구조, 구동방법 등에 따라 regin과 발광분말(light emitting powder, phosphor)을 혼합하여 후막 인쇄하는 분산형 EL(powder EL)과 박막기술로 구조가 완성되는 Thin film EL 기술로 나누어지며 각각은 다시 구동방법에 따라 AC 형과 DC 형으로 구분되어진다[4~6]. 이러한 소자가운데에서도 TFEL 소자는 투명 전극부터 최종 Al 전극까지 총 1~2μm 두께의 완전 고체박막으로만 구성되는 초박형 소자로서 평판 표시소자 중 그 제작공정이 가장 간단하다. 완전박막 고체소자 특유의 내충격성, 내진동성, 넓은 시야각, 양자적인 턴널현상을 이용한 소자로서 갖는 온도에 무관한 동작특성은 매우 큰 장점이다. 특히 비디오 속도로 동작되므로 TFEL 소자는 CRT와 동급의 영상품질을 가지면서도 대용량의 정보를 표시하기에 충분한 특성들을 가지고 있다.

2. 박막 EL (TFEL) 디스플레이

2. 1. TFEL 소자구조

그림 1은 전형적인 TFEL 소자의 구조를 보여주고 있는데 통상의 박막기술을 사용하여 실험실에서 손쉽게 제작할 수 있다. 즉, 화면역할을 하는 유리 기판 위에 투명전극이 형성되고 절연층/발광층(light emitting layer)/절연층/Al 전극 순으로 적층되어 있다. 투명전극과 Al 전극사이에 교류전압이 인가되며 임계전압이상이 되면 발광층에서 빛이 발생되어 이 빛은 투명한 박막층들을 지나 유리 기판 쪽으로 방출된다. 소자구조의 가운데에 형성된 발광층은 충분히 높은 전기장이 인가된 경우에 가시광을 발한다.

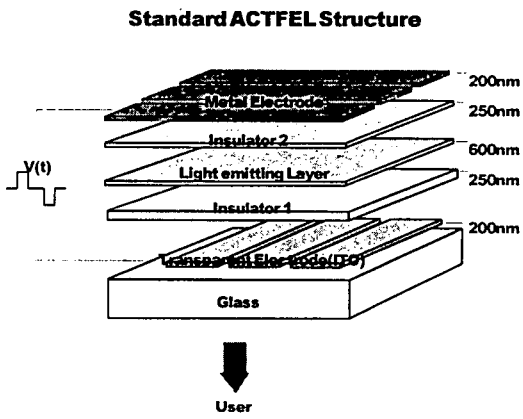


그림 1. 단색(ZnS:Mn) TFELD의 구조.

이 과정에 요구되는 전기장세기는 약 1.5MV/cm 정도로서, 고 전기장하에서는 박막구조에 항시 존재하는 임의의 결함에 의한 단락현상이 쉽게 발생되며 발광층이 양쪽 전극에 직접 닿아있는 경우에는 전극으로부터 전자의 직접 주입으로 인한 치명적인 항복현상이 초래된다. 따라서, 신뢰성 있는 소자를 구현하기 위하여 그림과 같이 발광층의 상하에 전류 제한층으로서 절연층이 필요하며 이 절연층은 소자에 흐르는 최대전류의 크기를 절연층의 방전 및 충전 변위전류 수준으로 제한하게 된다. 또한 절연층은 발광층을 외부 습기나 불순물로부터 보호하는 역할을 한다. 이와 같이 TFEL 소자는 상하의 전극을 포함하여 완전한 하나의 용량형 구조를 형성하고 있으며 특히 신뢰성 있는 소자 제작을 위해서는 양질의 절연층 형성이 매우 중요하다[7].

2.2. 발광과정

박막 EL의 발광 현상은 1MV/cm 이상의 고전계하에서 발광층내의 전자가 전계로 부터 에너지를 얻어 에너지성 전자(hot electron)가 되고 이 에너지성 전자가 발광중심을 여기, 완화시키는 과정에서 광을 발생하는 현상이다. 발광층 내부로 주입되는 일차전자는 발광층-절연층 사이의 계면 준위(interface states)로부터의 터널링 효과, 발광층 내부의

깊은 준위로 부터의 Poole-Frenkel 효과, 격자결함에 의한 정공 포획준위로부터 발생되는 것 등이 고려되나 주요 과정은 절연층과 발광층 사이의 계면 준위에 포획된 전자의 터널링에 의하여 일어난다. TFEL 소자의 동작특성이 광범위한 온도범위에서 안정적인 현상은 발광과정이 양자적인 터널현상에 의해 개시된다는 사실과 밀접한 관련이 있다. 이 계면 준위로부터 터널링하는 전자의 선속, F_c는 다음과 같이 주어진다[8].

$$F_c \propto \int_0^{\infty} f_0 \cdot N_s \cdot A(\epsilon, E_c) \exp(-a\epsilon^{3/2}/E_c)\, d\epsilon$$

여기서 E_c는 계면에서의 전계, ϵ는 계면 준위의 구속에너지, f_0는 계면 상태의 점유함수, $A(\epsilon, E_c)$는 ϵ와 E_c에 의존하는 상수, a는 상수를 나타낸다. 결국, TFEL의 발광과정을 주도하는 일차전자의 수는 절연층과 발광층 사이의 계면 상태에 의존하며 계면상태는 적층된 재료의 종류, 두께와 박막 형성 공정에 의존한다. 계면 전계에 의해 발광층의 전도대로 주입된 일차전자는 발광층내의 전계에 의해서 에너지를 얻어 가속되며 가속된 전자는 발광중심 이온의 내각 전자를 직접충돌 여기시키며 에너지를 획득한 내각 전자는 높은 에너지 준위로 여기되었다가 기저상태로 천이하면서 복사과정을 일으킨다. 한편, 에너지를 잃은 에너지성 전자(hot electron)는 반대편의 계면에 포획되었다가 외부전압의 극성이 반전되면 이상의 과정이 반복되면서 발광과정이 연속해서 일어난다. 따라서, TFEL소자는 구동주파수가 높을수록 휘도가 증가한다.

이러한 TFEL 소자의 발광 휘도는 물리적으로 다음과 같은 인자들에 의해 영향을 받는다.

$$L = L(E \cdot F_c(E) \cdot f(v, k, E) \cdot \sigma(v, k, E) \cdot N_{sth} \cdot P_{ss} \cdot N_c \cdot \lambda)$$

즉, 인가전기장, 계면에서의 전기장세기, 전도전자의 수, 전도대의 전자분포함수, 전도전자와 발광중심의 충돌 단면적, 에너지 전달 확률, 발광중심의 첨가 농도, 전도 전자의 평균 자유행로 등에 관계된다. 이들 물리 변수들은 TFEL 소자의 설계 구조, 박막 적층 순서/박막 공정 인자, 발광층과 절연층 계면의 종류, 박막 형성방법 및 계면상태 등에 좌우된다. 여기서, 전도 전자와 발광중심의 충돌 단면적은 발광중심의 종류, 첨가농도, 도핑조건에 의해 결정되며 전자의 평균자유행로는 발광막의 결정화 정도에 의해 결정되는 인자로서 박막 제조공정이나 후처리 공정을 통하여 제어한다.

TFEL 소자의 EL 현상은 계면으로부터 발광층의 전도대로의 전자 터널링 과정에 의해 시작되므로 마치 발광층의 '유전체 항복(dielectric breakdown)'과 같다. 발광층은 저전기장하에서는 저항이 매우 높아 일종의 저항체로 거동하다가 임계전기장 이상에서는 그림 3와 같이 전류가 순간적으로 증가하면서 동시에 EL이 관측되는데 EL 현상이 지속되려면 이러한 "비파괴적 항복" 현상을 유지시켜야 한다[9~10]. 따라서, 발광층의 상하에 전류 제한자 역할의 절연층을 적층하며 이들 절

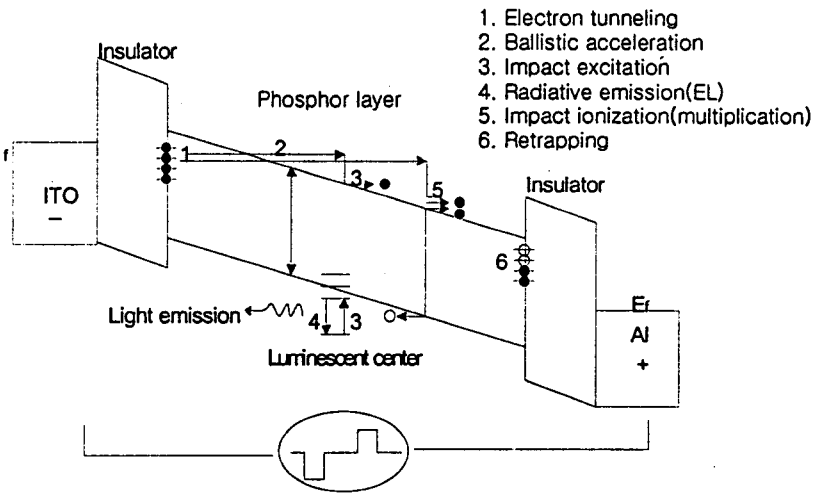


그림 2. TFEL 소자의 동작기구를 나타내는 에너지띠 다이아그램.

연층의 전기적 특성은 소자의 기본 동작과 안정성에 결정적으로 영향을 주는 인자로 작용하게 된다. 절연층에 관한 연구는 주로 유전특성과 기본적인 항복특성이 연구되어왔으며, 최근에는 TFEL 용 절연층 자체의 계면 특성과 시간-종속-항복-특성 (time-dependent-dielectric breakdown) 연구 등이 시도되고 있다.

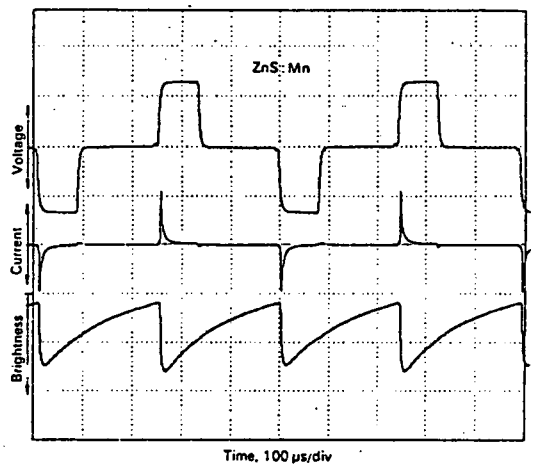


그림 3. 펄스전압 인가에 따른 전도 전류와 광출력 파형 모습.

AC TFEL 소자에서 발광층 만큼 중요한 부분은 역시 상하 절연층-발광층 계면이나, 이에 관한 연구는 최근에 시작되었다. 공정이나 구조면에서는 전자의 터널 가속과정을 용이하게 하는 가속층(전도성 혹은 반절연성 박막), 기판이나 하부 절연층으로부터 발광층 내부로의 이온 침투 등과 같은 전기-화학적 반응을 억제하기 위한 완충층 혹은 이온장벽층, 콘트라스트를 개선하기 위한 불투명 절연층, 내습성을 높이기 위한 보호막, 내 산화막 등의 개념으로 TFEL 소자 구조내에 다양한 종류의 박막들이 도입되고 있다[11]. 물리적 측면에서는 절연층과 발광층의 계면의 morphology 즉, 거칠기 인자를 고려하여 계면특성을 해석하려는 시도가 최근 시작되어 이 분야의 새로운 관찰점이 제공되고 있다.

2.2. TFEL 동작 특성

흔히 단색 TFEL 이라고 불리는 등황색 발광 ZnS:Mn TFEL 소자의 휘도-전압 및 효율-인가전압 특성은 그림 4와 같이 빛의 발생이전의 문턱과 문턱전압 이상에서의 급격히 상승하는 휘도 특성, 최종적으로 휘도의 포화 등을 특징으로 한다. 이러한 매우 비선형적인 특성은 TFEL 소자에서 고대비율 특성을 유지하면서도 전기적으로 빠르게 어드레스할 수 있다는 사실을 시사한다. 발광효율은 L-V 곡선을 따르는 모양을 보이나, 보다 급격하며 L-V 곡선에서 가장 기울기가 급격한 부근에서 최대효율을 가지며 이후로는 여기된 Mn 중심으로부터의 빛 방출이 포화됨에 따라 외부전압이 증가되어도 서서히 감소하는 경향을 보인다. 상용 ZnS:Mn TFEL 소자의 발광효율은 최대 6(lm/Watt) 이다. 통상 TFEL 소자에서는 여러 가지 특성을 문턱전압에서 40V 높은 전압에서 평가하는데 이 전압에서는 대개 단위 와트당 3 루멘의 효율을 나타낸다. 고대비전극을 갖는 통상의 320×240 QVGA 급은 휘도 150 nits, 500 룩스(lux) 밝기의 조명아래서 대비율은 150:1을 나타내고 있다[12].

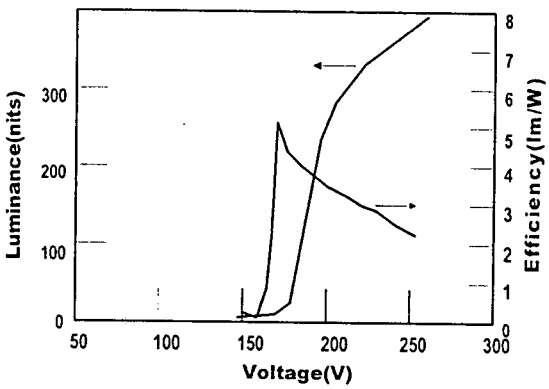


그림 4. ZnS:Mn TFEL 소자의 휘도-인가전압 및 발광효율-인가전압 특성곡선.

Alt 등이 제안한 TFEL 소자 모델은 그림 5와 같이 임계 전압 이하에서의 TFEL의 총용량은 상·하 절연층과 발광층 용량의 합으로 나타나고, 발광층은 BACK-TO-BACK 다이오드의 제너 항복 전압으로 모사 되는 문턱전압 이하에서 커패시터로서 거동한다. 임계 전압이상에서 계면으로 부터 전자의 터널방출(일종의 발광층의 항복과정) 이후에는 절연층의 용량만으로 나타난다는 것을 알 수 있다.

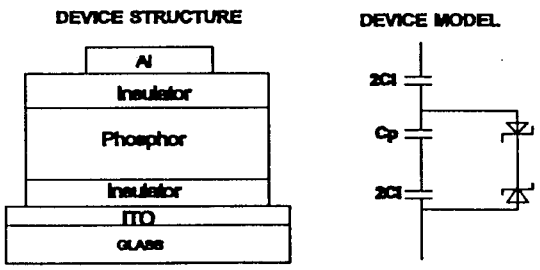
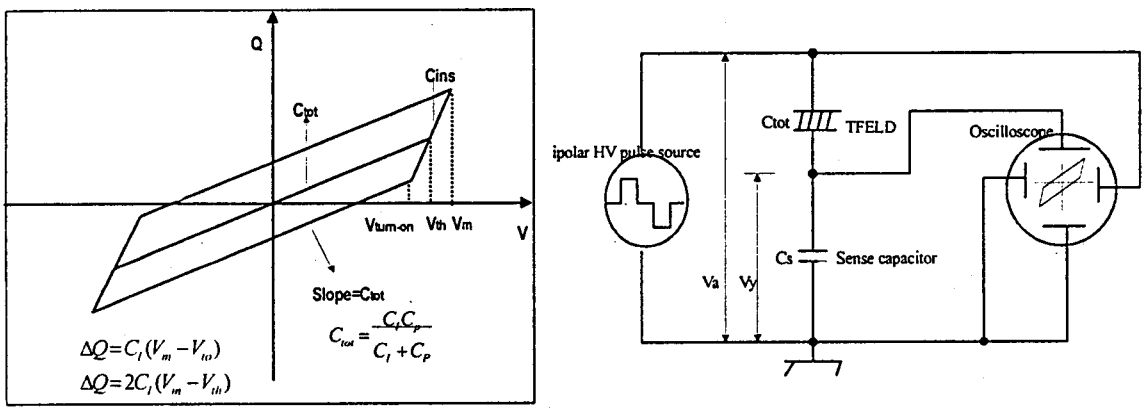


그림 5. TFEL 소자와 소자에 대한 등가회로 모델.

그림 6은 그림 5에 보인 소자모델에 대한 Q-V 다이아그램이다. 문턱전압이하에서 Q-V 다이아그램은 직선으로 나타나며 기울기는 직렬로 연결된 절연층과 발광층의 총 절연용량을 나타낸다. 문턱 이상에서는 발광층이 도전되기 시작하므로 turn-on 이후에 나타나는 기울 총 용량에서 발광층의 용량이 빠진 절연층 만의 전기용량을 나타내게 된다. 발광층을 통해 전송된 전하는 반대편의 발광층-절연층에 축적되고 축적된 전하는 외부 인가전압에 의한 전기장과는 반대 방향의 내부 전계를 구축하게 된다. 계면에는 전하이동이 종료되는 시점에 다이오드에 걸리는 전압이 문턱 이하가 될 수 있도록 계속해서 전하가 축적된다. 외부 인가 전압이 완전히 영으로 감쇠 되면, 다이오드에 걸리는 전압은 문턱 이하로 감쇠 되고 결국 계면에 축적된 전하는 그 자리에 그대로 남아 있게 되는데 이 전하는 V=0에 대한 Q 값을 나타낸다. 평행사변형의 내부면적은 EL 소자로부터 빛을 생성하는데 소모된 에너지를 나타낸다.

TFEL 소자의 성능은 발광층의 효율과 발광층을 지나는 이동 전하량(절연층의 용량에 의해 제어됨)의 함수이다. 유전상수와 항복전압의 곱으로 정의되는 절연층의 성능지수는 TFEL 소자의 성능에 중요한 역할을 하는데 주어진 변조 전압 하에서 절연층의 용량이 클수록 (절연층의 두께가 얇고 유전상수가 높을수록) 더욱 더 많은 전하가 발광층 내로 이동되며 그 결과 높은 휘도 특성을 얻을 수 있기 때문이다.

다음으로 TFEL 소자의 전기적 특성은 C-V와 Q-F_p 방법으로 조사하며 이를 통하여 발광과정과 관련한 소자의 물리적 거동을 고찰할 수 있다[14]. TFEL 소자의 특성연구에서 권장되고있는 구동파형은 주파수 50~60Hz와 1KhZ의 정현파나 사각펄스파이며 휘도가 peak 전압(Vmax)의 크기에 비례하기 때문에 전압펄스는 rms 값보다는 zero-to-peak 값(Vop)으로 나타낸다. 사각펄스 파형을 인가할때는, 그림 7과 같이 여러가지 파라미터를 명시하여야 한다. 펄스폭은 실제 EL 소자에 인가된 다소 변형된 펄스 구동파의 최대 반치폭(FWHM)으로 정의되며, 상승시간 및 하강시간은 실제전압의 10%-to-90%와 90%-to-10%에 대응하는 시간주기를 나타낸다. 실제 소자연구시에는 펄스폭 40μs, tr=8μs, tf=8μs의 파형을 사용할 것을 권장하고 있다[15].



(a) (b)

그림 6. TFEL 소자에 대한 이동전하량(Qext)-외부인가전압(V) loop(a). 실제 TFEL 소자에 대한 외부 이동전하량(Qext)-외부 인가전압(Va) 측정용 Sawyer-Tower 회로(b)[13].

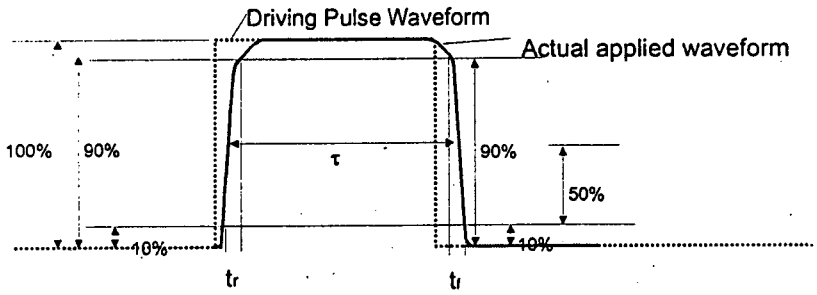


그림 7. 이상적인 구동파형과 실제 소자에 인가되면서 변형된 실제파형.

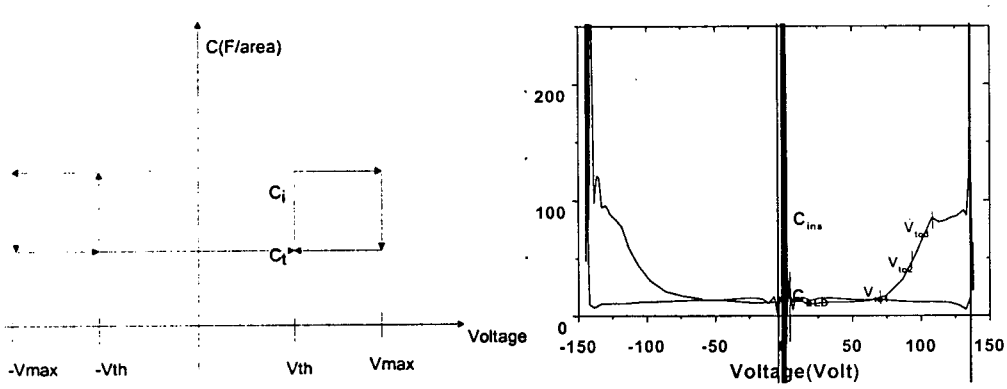


그림 8. 이상적인 C-V loop와 실제 소자에 대해 얻어진 C-V loop.

이상적인 TFEL 소자의 등가회로는 그림 3과 같이 임계전압 이하에서 상하의 절연층 용량과 발광층 용량의 합으로 나타나며 발광층의 turn-on 후에는 절연층의 용량만이 존재하므로 그림 8과 같은 C-V 특성이 관측된다.

다음에는 발광과정중의 절연층-발광층 계면, 발광

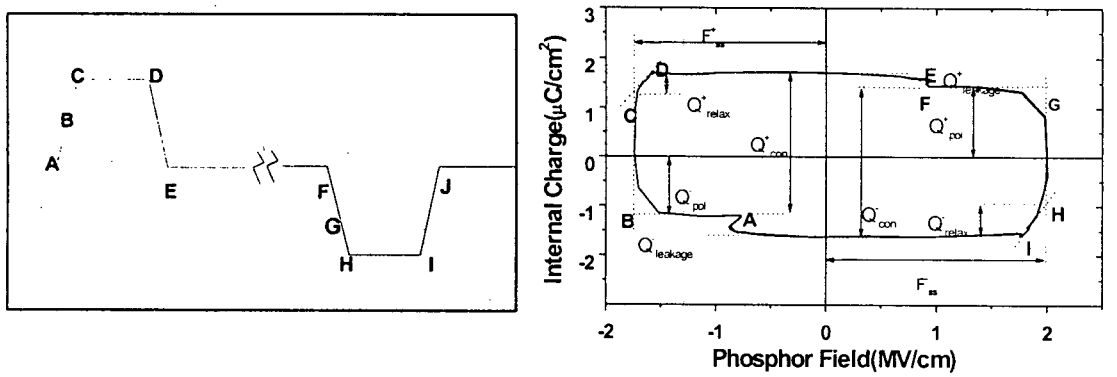


그림 9. TFEL 소자에 인가되는 쌍극성 파형(a), (b) 실제 ZnS:Pr, Ce 소자에 대한 Qint-Fp loop. 각각의 표시점은 (a) 그림의 표시점에 해당함[16].

층 내부에 대한 물리적 거동에 대한 정보를 조사하기 위하여 그림 9의 왼쪽에 보인 펄스전압의 인가하에서 내부 이동전하량(Qint)-발광층 내부의 전기장(F_p) loop를 조사한다. 이 과정에서 이때 C-V 특성에서 얻어진 절연층, 발광층의 용량값이 파라미터로서 사용된다.

그림 9의 loop는 인가 전압하에서 TFEL 소자내부의 전도전하와 누설전하, 계면 분극전하 등에 대해 매우 정확한 정보를 제공할 수 있기 때문에 소자연구 분야에서는 최근 가장 우수한 평가법으로서 활용되고 있다. 특히, 외부적인 특성인 휘도-인가전압 특성과는 달리 발광과정과 직접적으로 관련된 내부적 현상을 관찰할 수 있는 장점을 갖는다. 단, 소자의 절연층이 특성이 불완전 한 경우는 거의 정보를 얻을 수 없다. 이러한 내부 특성은 결국 L-V 특성에 직접적인 영향을 미치므로 TFEL 소자의 발광층 재료, 절연층 재료, 이들의 적층 구조/순서, 각 박막의 박막공정 방법 및 공정 변수 등에 따라 가변되므로 이러한 평가법을 사용하여 보다 우수한 표시품위를 가지는 TFEL 소자를 개발 할 수 있다.

3. 재료 및 제조공정

3.1. EL 발광체 재료

일반적으로 발광체는 모체와 발광의 중심 역할로 도핑된 활성자로 이루어진다. 예를 들어 등황색 발광 TFEL 소자는 ZnS 모체에 발광 중심으로서 Mn 원자가 첨가되어 있다. 박막 EL 발광체의 모체재료로서는 적당한 발광중심을 첨가하여 가시영역의 발광이 얻어질 수 있어야 하고, 여기에 필요한 1MV/cm 이상의 고전압인가가 가능한 정도의 내압특성이 요구된다. 이 때문에 EL 모체재료는 비교적 에너지 대역폭이 큰 반도체가 이용된다. 발광중심으로는 천이금속이나 희토류의 발광 중심 이온을 첨가하며 모체와 발광중심과의 전하보상 및 이온반경의 정합성이 중요하다. 주로 사용되는 모체재료는 ZnS, SrS, CaS 등이며 표 2에 나타낸 바와 같이 ZnS내에 첨가된 Mn은 이온반경이 매우 잘 일치하고 발광중심의 첨가가 용이하게 이루어지므로 현재까지 알려진 박막 EL 발광용 발광소자중에서 가장 높은 휘도와 효율 특성을 갖는다.

알칼리 토류 황화물의 양이온 반경은 희토류 이온의 반경과 유사하며 화학적 성질도 비슷하여 희토류 발광중심의 첨가가 용이하나 내습성이 취약하므로 산화와 열화 현상을 방지하기 위한 세심한 주의가 필요하다. NTSC 집계에 의한 색도에서 삼원색의 휘도비는 청색:녹색:적색=1:6:3이 되어야 이상적인 백색표시가 가능하며 천연색 EL을 위해서는 60Hz 구동시에(펄스폭 약 30~40 sec) 청색휘도는 약 100cd/m² 이상을 목표로 하는 추세이다.

표 1. TFEL 제품에 사용된 발광재료와 색·휘도 특성(참고 : 1999 SID(USA), EL Workshop/Phosphor Conf. '98(USA).)

Emission Color	Phosphor Material	CIE X	CIE Y	Luminance (nits @60Hz)
Yellow	ZnS:Mn	0.5	0.5	400
Red	ZnS:Mn/Filter	0.65	0.35	70
Green	ZnS:TbOF	0.66	0.33	25
	ZnS:Mn/Filter	0.30	0.60	100
Blue	SrS:Ce	0.47	0.53	160
	CaGa2S4:Ce	0.28	0.53	110
	SrS:Cu	0.17	0.16	28
White	SrS:Ce/ZnS:Mn	0.46	0.50	470
	SrS:Cu/ZnS:Mn	0.45	0.43	240

ZnS:Mn은 현재까지 개발된 EL 발광체중에서 가장 높은 휘도와 효율을 나타내는 발광체로서 최대세기의 발광은 발광막의 증착방법에 따라 580 혹은 585nm에서 나타나며, 녹색부터 적색까지 매우 폭넓은 스펙트럼을 나타내므로 칼라필터를 사용하여 높은 휘도의 적색과 녹색을 얻어낼 수 있고, 색도도 CRT의 적색 및 녹색과 거의 유사하여 상용의 칼라제품에서도 가장 많이 사용된다. ZnS:Tb, F는 ZnS:Mn에 버금가는 휘도를 나타내는 형광체로서 다중칼라 TFEL 판넬에서 사용되고 있다. ZnS 모체를 사용한 청색 발광체로서 ZnS:Tm, F가 연구되었는데 청색 색순도는 매우 우수하나 발광성분중 적외선 성분이 많아 정작 청색 휘도는 매우 낮아 거의 사용되지 않고 있다.

CaS를 모체로 사용한 대표적인 발광체는 CaS:Eu이며 발광중심파장이 약 650nm로서 CIE 색좌표는 X=0.68, Y=0.31로서 ZnS:Sm, F보다 더 우수하며 발광중심인 Eu의 모체내 유입이 용이하다. 알칼리 토류황화물 이용한 대표적인 SrS:Ce 청색발광체는 각각 475nm와 530nm에 중심파장을 갖는 발광을 일으킨다. 고휘도, 구색순도를 목표로 새롭게 선보인 SrS:Cu와 SrS:Cu,Ag는 CRT 수준의 칼라휘도와 색좌표를 보이고 있다. 한편, 1999년 5

월 SID에서는 oxygen free CaS:Pb 발광막이 색순도와 휘도가 우수한 새로운 TFEL용 청색발광체로서의 충분한 가능성을 예고하였다[17~18].

한편, 백색발광체는 백색발광 소자로도사용될 수 있으며 칼라필터를 사용하여 적, 청, 녹색을 모두 걸러내어 천연색 EL 소자를 구현할 수도 있다. 현재 개발되어 있는 백색 TFEL 시스템은 ZnS:Mn/SrS:Ce의 다층구조로 구성되며 1kHz에서 액 4000cd/m² 이상의 휘도를 얻어내었다. 19995월 미국의 Sanhose에서 열린 세계최대의 SID 학회에서 발표된 최근에 개발된 SrS:Cu, Ag/ZnS:Mn 다층구조를 갖는 시제품은 CRT와 거의 유사한 색도를 나타내었다.

3.2 TFEL 소자의 제작기술

TFEL 소자의 성능향상에 가장 중요한 것은 발광층의 결정성이다. 발광층을 형성시키기 위한 박막 성장기술에는 물리적 증착(PVD) 방법 및 화학적 증착(CVD) 방법이 있다. PVD 방법에는 전자선 증착법(electron beam evaporation : EBD), 다원증착법(Multi source deposition : MSD) 및 sputtering 법 등이 있으며 CVD 법으로는 원자선 증착법(atomic layer deposition : ALD) 및 hylide-transport chemical vapor depositon(HTCVD) 법 등이 있다. 이들 공정가운에서 EBD와 ALE법이 양산 제품공정으로 주로 사용된다. 특히 ALE 법은 원자층 단위의 구께의 박막을 정교하게 조절하므로써 절연층-발광층 계면의 일명 "dead-layer" 를 최소화 시킬 수 있을 뿐만 아니라 완벽한 모서리 덮기(step coverage)가 가능하고 핀홀이 거의 없는 양질의 박막을 제공하고 있다. 향후 TFEL 소자의 주요 응용분야가 초소형의 head-mounted display(HMD) 분야임을 감안한다면 Si-기판상부에 active matrix가 먼저 형성되고 그 상부에 TFEL 구조가 적층되는 AMEL 기술에서는 절대적으로 가장 적합한 박막 공정인 것으로 평가되고 있다. 한편, 하부의 ITO 투영전극, 상하부 절연층 형성공정으로 적합하고 대면적 저가격 공정이 용이한 스퍼터법이 발광막 적층 공정으로도 개발되어 최근 1999년 5월 미국에서 개최된 SID 학회에선 in-line 스퍼터법을 이용한 ZnS:MN/SrS:Cu, Ag-based 전색 TFEL 시제품이 선 보였다.

3. 3. 단위박막 공정기술

소자전체의 성능 향상을 위해서는 각 단위박막의 형성기술이 먼저 개발되어야 한다. 먼저, 발광층 제작에 가장 널리 사용되는 기술로는 전자선 증착법(electron beam evaporation)이며 ZnS:Mn은 평이한 조건에서 결정화된 양질의 박막이 쉽게 얻어진다. 반면, 녹는점이 매우 높은 CaS, SrS 등과 같은 알칼리 토류 황화물들은 EB 증착시 S의 증기압이 높기 때문에 S의 결손이 심하게 나타나므로, 기판온도를 400 ℃ 이상으로 높이거나 S의 공증착 혹은 H_2S 를 반응성가스로 사용하여 우선 배향성을 갖는 결정화된 막을 얻어낸다.

저가의 대면적 박막형성이 용이한 스퍼터법은 TFEL 소자용 투명 전극층과 상하 절연재료의 성막에 주로 사용되고 있으나 최근 개발된 고휘도 청색발광 SrS:Cu, Ag 박막과 같은 고융점 물질에 대해선 가장 적합한 제품기술로서 인정되고 있다. 주로 Ar 기체대신에 Ar+He+H_2S 등과 같은 혼합가스를 사용하여 비교적 저온에서도 결정화가 잘된 고품질 발광막을 얻고 있다. 이 방법은 저가격을 특징으로 하면서도 TFEL의 전체구조를 one cycle로 제조할 수 있다는 장점이 있다.

한편, 기판표면에서 화합물 구성원자와의 표면반응을 이용하여 고진공중에서 단위 원자층을 순차적으로 적층하는 원자층 에피텍시(atomic layer deposition : ALD) 방법은 조성이 완벽한 고품질의 발광막이 얻어지나 성막속도가 느리고 공정시의 기판온도가 매우 높은 것이 단점이다. Planar 사의 경우, 발광층 제조시에 EBE와 ALD 방법을 공히 사용하여 왔다.

발광층의 결정성을 높이고 발광중심의 농도 및 site 등을 정교하게 제어하기 위한 목적으로 제안된 다원증착법(multi source deposition : MSD)은 증착막의 구성원소를 장착한 도가니를 고진공상태에서 각각 독립적으로 가열/온도 제어하여 저온에서도 화학양론적인 조성을 갖는 결정화정도가 우수한 발광막이 증착된다. 이방법으로 성장된 발광막은 'dead layer'가 거의 없으며 최근에 활발히 적용되고 백색 발광소자에서 다층의 발광막 형성에 효율적이다.

4. 제품기술

이미 개발된 적, 녹, 청색과 백색 발광체를 이용한 여러 종류의 단색, 다색, 전색 TFEL 제품이 선을 보였다. 전색 TFEL 소자의 구조는 기본적으로 각각의 적, 녹, 청색 발광체를 기판의 한 평면에 구성하는 "Patterned phosphor" 방법과 기사광 전 영역의 넓은 스펙트럼을 방출하는 백색 발광체에 칼라 필터를 사용하여 전색을 구현하는 "color by white" 방

법이 있다.

4. 1. Patterned Phosphor법

각각의 적, 녹, 청색 발광체를 이용한 ELD 를 구현하기 위해서는 각 발광체의 휘도가 가장 중요한 요소가 되는데 하나의 화소내에 sub-pixel을 갖도록 서로 다른 발광색을 내는 발광층을 패터닝하는 방법이다.

적색발광 화소에 사용될 발광체로서는 ZnS:Mn에 적색 필터를 사용하여 구성하며 이와같은 적색 발광체의 휘도와 열화 특성은 CaS:EU 나 ZnS:Sm 혹은 SrS:Eu 등 보다 매우 우수하다. 특히 무기박막인 CdSSe를 이용하여 적색 필터를 쉽게 구현할 수 있으므로 ZnS:MN을 이용한 적색구현은 좋은 방법이다. CdSSe 적색 필터를 통과해 얻어내 적색의 휘도는 약 70 cd/m²이며 CIE 색좌표는 (x=0.65, y=0.35)이다. 녹색 화소에 사용될 발광체로서는 CIE 색좌표가 x=0.31,y=0.6 이며 60Hz 에서의 휘도가 100 cd/m² 인 ZnS:Tb가 있으며 적색과 마찬가지로 ZnS:Mn에 녹색필터를 사용하여 녹색 화소로 사용할 수도 있다. Filter를 통과한 녹색광의 휘도는 60Hz 에서 약 160 cd/m²이며 CIE 색좌표는 x=0.44, y=0.56 이다. 청색화소에 사용될 발광체로서는 1999년 5월 현재까지 TFEL 제품용으로서 응용된 청색 발광체 중에서 가장 휘도가 높은 SrS:Cu, Ag가 있으며 60Hz에서 약 60~100cd/m²가 얻어지고 있고 색 순도도 CRT 와 거의 유사하여 칼라 필터를 채용하지 않고서도 사용할 수 있는 것으로 평가되고 있다.

4.2. "Color by White" 법에 의한 TFEL

약 10년전에 일본의 Tanaka 등이 칼라 TFEL 장치의 개발을 위해 최초로 제안된 'color by white' 방법은 유용한 칼라화 기술로 인정되고 있다. 특히 이 가운데에서도 SrS:Ce(1999년, SrS:Cu)/ZnS:Mn의 이중층 구조를 사용한 백색 발광체는 가장 먼저 제품으로 출시되어있다. 즉, 그림과 같이 ZnS:Mn에 칼라필터를 사용하여 적, 녹색을 걸러내고 종래의 TFEL 구조를 역으로 쌓는 역구조의 소자구조를 채택하여 다중칼라 TFEL을 제작하였다[19].

통상의 단색 TFEL 소자와는 달리, 먼저 유리기판 상부에 Mo, W 등과 같은 불투명 전극을 형성한 후 마지막으로 칼라필터, 투명전극 순으로 쌓는 방법을 사용하되 각 색상과 휘도의 균형을 위하여 필터의 폭을 조절하는 방법을 사용하였다.

5. TFEL 기술의 과제와 전망.

5.1. 과제해결

앞서 기술한 바와 같이 TFEL 소자를 이용한 ELD는 다른 평판 디스플레이에 비하여 선명한 색상, 넓은 시야각, 긴수명, 넓은 동작온도 범위, 내충격성, 저소비전력 등의 장점을 가지고 있다. 그러나 천연색의 ELD를 위해서는 아직 개선해야 할 많은 문제점을 가지고 있다.

현재의 TFEL 구조에서는 발광층에서 발생하는 빛

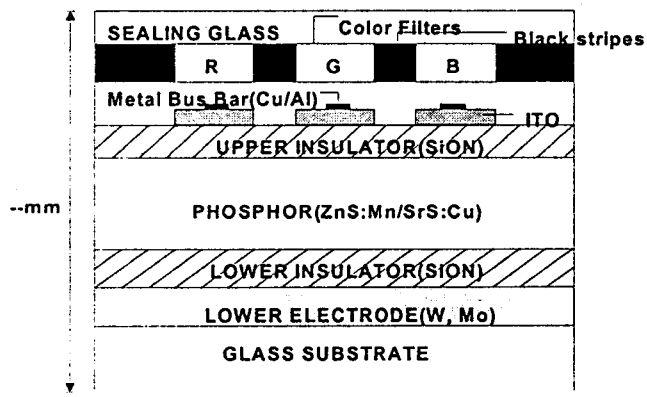


그림 10. 'Color by White' 방법을 사용한 역구조의 칼라 TFEL 제품의 단면모습.

의 90%는 절연층과의 계면에서 발광층 내부로 전반사(inyternal reflection)되어 발광층에 재포획되고 약 10% 정도만이 전면으로 방출되며 표시용으로 활용된다. 따라서, 적층박막의 광학적 특성을 최적화하여 전면 방출량을 증가시키거나 발광층 내부로 재포획된 광을 측면 방출광으로 활용하는 방법이 연구되고 있다. 측면방출광은 초소형 MIRROR 기술을 사용하여 효과적으로 전면으로 반사시킬 수 있으며 이를 활용할 수 있는 기술들이 보고되고 있다 [20~21].

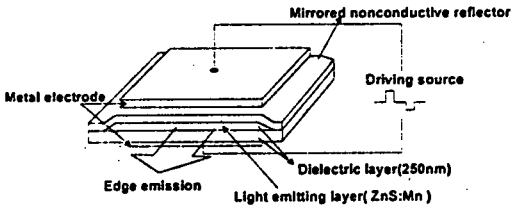


그림 11. 측면 방출광을 이용한 Edge emitter

TFEL 소자는 적어도 다섯 개층 이상의 다층 박막 구조이므로 본래적으로 광간섭현상이 존재하고 후면 전극으로서 사용되는 금속막에 의한 빛 반사현상으로 인하여 대비율이 감소된다. 절연막과 발광층의 두께를 적절히 조절하고 후면전극과 절연막 사이에 광흡수층을 삽입하여 후도 및 대비를 개선할 수 있으며 Planar사의 제품중에서 고휘도 고대비 제품은 이러한 구조를 채택하고 있다.

TFEL 의 가장 큰 문제점의 하나는 동작 전압이 매우 높은데 있고 이를 구동시키기 위한 고가의 고전압 IC가 필요하다는 점이다. 저가의 ELD를 구현하기 위해서는 ELD의 동작전압을 낮추어야 하며 결과적으로 TFEL 소자용으로서 내압특성이 유수한 고유전율 절연박막의 개발을 필요로 한다. 그림 12는 상하 절연층을 고유전상수물질로 대체했을 경우, TFEL 소자의 발광 문턱 전압의 변화를 모사한 결과이다. 고유전율 박막을 사용하면 발광시에 절연층에 인가되는 전계의 크기(Eib)는 매우 낮아지기 때문에 저유전율 절연층에 대해 필수적으로 요구되는 3MV/cm정도의 항복전계강도 규칙은 상당히 완화된다는 사실을 알 수 있다. 이는 TFEL소자의 가격대비 성능면에서 경쟁력을 확보하는데 매우 중요한 기술이다.

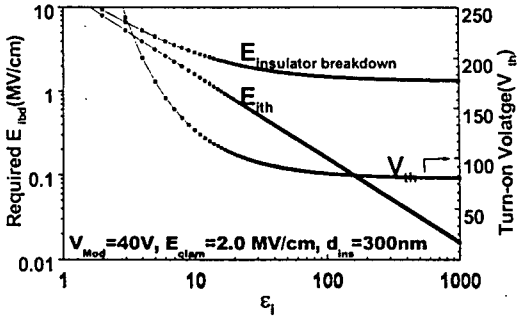


그림 12. 상하 절연층의 유전상수값과 소자의 발광 개시전압과의 관계.

이밖에도 chip-on-glass(COG), ELD 의 화소수 증가에 따른 interconnect density의 향상, 구동방법의 개선을 통한 저전력화, 고광투과의 칼라필터 연구 등이 진행중이다. 표 3은 최근에 TFEL 소자의 저전력화의 사례인데 소형디스플레이의 경우 이미 LCD 수준까지 낮추었으며 중대형의 소자의 저전력화 연구도 계속되고 있다.

표 3. 저전력 소모형 ZnS:Mn 단색 TFEL 소자.

5인치 Diagonal	1세대	현재
Luminance(면밝기)	60nits	60nits
20% 화소 "ON"	24W	1.1W
100% 화소 "ON"	31W	2.2W

5.2 Microdisplay용 Active matrix ELD

미래에 가장 유망한 표시소자기술은 초소형 microdisplay 인데, DARPA(미)가 주도하는 head mounted display(HMD) 용 표시소자로서 active matrix(AM) TFEL 개발되고 있다. AMEL 기술은 실리콘 웨이상에 초소형의 고해상도 표시소자를 구현하기 위하여 IC 상에 TFEL 구조를 집적화하는 기술이다[22]. 집적화된 능동발광 표시장치를 위하여 웨이퍼상부에 먼저 전자 회로를 제작한 다음 상부에 TFEL 구조를 형성하여 완성한다(그림 13). 이러한 기술은 구동회로를 웨이퍼상에 집적화하고 이를 TFEL 용 기판으로 사용하므하므로 종래의 TFEL 소자를 초소형화 하기에 매우 적합하다. 현재 Planar 사가 주도하고 있는 이 기술은 0.5 인

치의 화면에 1280×1024 화소를 구현한 초고해상도의 AMEL 제품이 출시되고 있는 상황이다. 95년에 등장한 최초의 AMEL 소자는 ZnS:Mn 발광층을 갖는 단색소자이었으나 이제 백색 발광체에 칼라필터를 채택하여 다중 삼원색 전색으로 출시되고 있다.

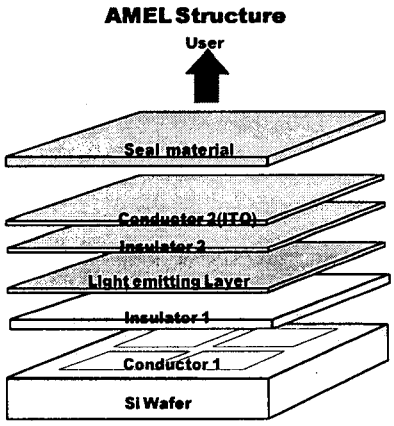


그림 13. Active matrix TFEL(AMEL) 소자의 구조.

5.2.1. AMEL용 IC에 대한 요구조건

실리콘 칩상에 초소형의 고해상도 TFEL 소자를 만든다는 것은 기본적으로 제작될 트랜지스터가 AC 80V 이상의 내압 특성을 가져야 한다는 것을 의미한다. 따라서, 화소 트랜지스터의 구조 설계시에 트랜지스터를 80V 를 저전압 회로부로부터 격리시킬 수 있도록 세심한 주의가 필요할 뿐만 아니라, 화소동작을 불가능하게 하는 기생용량을 피할 수 있도록 하여야 한다. 이러한 요건을 만족시키려면 solicon-on insulator (SOI) 기판을 사용하는 것이 유리한다. SOI 웨이퍼는 우수한 절연특성 때문에 각각의 화소를 고전압으로부터 격리가능하고 저전압 논리 line들과 고전압의 발광 line 들을 격리할 수 있다. SOI 웨이퍼의 전기절연 능력과 IC 회로에 대한 1.0㎛의 설계규칙을 사용하면 2000×2000라인/인치(lpi) 즉, 12um×12um 크기의 화소 구현이 가능하다. 12㎛×12㎛ 크기의 화소는 DMOS 소자를 콤팩트하게 할 뿐만 아니라 EL 소자의 변조에 필요한 전압을 충분히 blocking 해낼 수 있는 정도이다. 드리프트 영역의 길이가 10㎛ 이하로 설계된 트랜지스터는 DMOS 역방향 항복전압이 약 80V 이상의 우수한 내압특성을 보이고 있으며 TFEL 소자의 표준두께를 고려할 때 80V 정도는 변조전압으로서 충분하다. 종래의 passive ACTFEL 소자의 구동에 필수적으로 요구되던 외부구동 IC가 불필요하도록 쉬프트 래지스터와 라인구동단 등은 그림과 같이 주변 회로로 구성된다. AMEL 어레이는 표시장치로부터 빛을 발생시키기 위한 외부 고전압회로에 의해 구동되는 공통 ITO 상부전극을 가지며 데이터 입력과 제어신호들은 표준 5V 논리신호로써 작동된다. 640×480 소자인 경우는 8개의 병렬신호가 AMEL에 입력되므로 종래의 passive TFEL 소자에서는 1000개 이상임

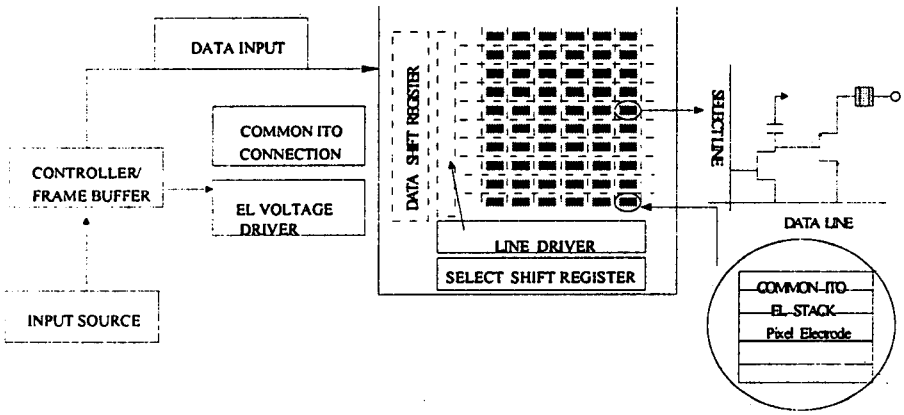


그림 14. AMEL 디스플레이에 대한 block diagram.

을 감안한다면 입력수가 대단히 적은 편이다.

5.2.2. AMEL용 EL 구조에 대한 필수조건

TFEL 구조와 IC 기술의 집적화에 가장 중요한 EL 공정은 바로 IC 구조의 특수한 표면 형상(morphology)을 잘 따르도록 TFEL 박막을 쌓는 기술에 있다. 또 하나는 종래의 소자와는 달리 역구조(inverted structure)의 TFEL 소자를 제작하는 것이다. AMEL 의 제조 업체의 경우 공정이 완료된 IC 상부에 ALE 공정을 사용하여 TFEL 구조를 쒸우는데 이 공정은 다양한 표면 형상을 가지는 상부에 신뢰성 있는 TFEL 구조 적층시에 사용된다.

소형 AMEL 은 1~10kHz의 고주파수로 구동하며 휘도가 주파수에 비례하는 특성을 이용하여 매우 다양한 수준의 휘도를 얻어 낼 수 있다. 단, 이 방법과 관련하여 고려해야 할 문제는 고주파수로 구동할 때 나타나는 EL 발광층의 열화 현상이다. 표준형의 ELD에 active matrix 를 이용하면 각 화소의 동작을 독립적으로 제어할 수 있다. Planar 사에서는 이와 같이 화소 회로 제작을 위한 표준 CMOS 공정과 TFEL 소자를 구성하기 위한 ALE 기술을 이용하여 1280×1024의 고해상도 AMEL 디스플레이를 개발하였다. 인가 전압의 주파수가 10kHz 일때 면밝기는 약 857 cd/m²(nits), 대비율은 100:1 이상이며 소모전력은 0.9 W를 나타내고 있다.

5. 3. 고휘도/고순도의 백색 TFEL 소자 개발

TFEL 기술의 최대 관심은 고휘도,고색순도의 청색발광체와 이를 이용한 'color by white' 기술에 있다. 1998년 6월 세계 최대의 TFEL 생산업체인 Planar가 IDRC 97에서 새롭게 발표한 백색발광체는 청색 발광체로서 SrS:Cu를 스퍼터법으로 형성하고 ZnS:Mn은 ALE 법으로 제조한 SrS:Cu/ZnS:Mn 구조인데, 구동 주파수에 따라 ZnS:Mn은 매우 빠르게 포화되는 반면, SrS:Cu는 증가하는 특성을 보여 두개의 서로 다른 박막을 동일 두께로 적층할 경우 균형감있는 백색이 얻어지고 있다. SrS:Cu는 SrS:Ce가 51~550nm 영역에 두개의 peak을 가지는 것과는 달리 390~620범위의 스펙트럼을 나타내며 특히 470에 단일 peak을 가지고 있고 460nm 이하의 발광이 전체 광 방출량의 약 40%를 차지하고 있어 460nm 이하의 발광이 5%에 불과한 SrS:Ce에 비하면 매우 우수한 발광 특성을 가지고 있다고 보아야 한다. 또한 SrS:Cu, Ag계는 더욱 색순도와 효율이 높고 850Hz 구동시 200시간 경과한 뒤에도 초기 휘도의 약 5% 정도만이 감소되는 것으로 나타났으며 효율도 매우 높아 약 0.22 lm/W를 보이는 것으로 보고되었다.

새롭게 개발된 SrS:Cu 청색발광체는 종래의 SrS:Ce와는 달리의 청색순도가 매우 deep하기 때문에 오히려 녹색 색도를 맞추는 연구가 필요하게 되어 bilayer구조에서 triple 혹은 multilayered 발광층 구조연구가 이루어지고있으며 SrS:Ce/SrS:Cu/ZnS:Mn 혹은 SrS:Cu/ZnS:Tb/ZnS:Mn 구조와 상부절연막 재료 및 구조연구가 최대의 관심주제로 떠오르고 있다. 녹색부터 적색에 이르는 발광 색분포를 갖는 ZnS:Mn은 현재까지 알려진 TFEL 소자중 가장 효율이 높은 소자이다. SrS:Cu와 ZnS:Mn을 사용한 백색발광체에서는 두 발광막의 두께비가 스펙트럼의 분포 특성을 결정하므로 원하는 칼라를 균형감있게 얻어낼 수 있도록 각각의 발광칼라에 대해 서로 다른 fill factor를 사용하여 balance 를 맞추는 방법이 사용된다. 또한, 구동단이 제공하는 최대 구동 전압이 한정되어있으므로

표 4. 최신 White TFEL의 성능(SID '99, 1999년 5월, Planar(미))

Parameters		160×80		192×192		문자 표시
Display area(㎟)		800×60		61×61 ㎟		
				Unit#1	Unit#2	
Driving Frequency(Hz)		240	360	460	460	4500
Areal luminance(cd/㎡)		100	132	136	198	1034
Chromaticity		0.41, 40	0.41, 40	0.36, 0.38	0.40, 0.38	0.35, 0.37
Contrast @	500 lux	23:1	30:1	30:1	39:1	225:1
	000 lux	3:1	4:1	4:1	5:1	32:1
Ower Consumption(W)		4.1	5.1	9.0		N.A.

이점을 고려하여 발광층 두께를 설계하여야 한다. 대개 SrS:Cu 박막의 두께는 ZnS:Mn의 2배 정도로 형성하며 두 발광층에서의 전자주입 즉, 효율은 적절한 중간 매개층을 삽입하여 두 발광층을 분리하므로써 얻어내고 있으며 이들의 적층시에도 상하 절연층의 광학적인 특성을 고려하여 설계하는 것으로 알려져있다. 표 4는 1999년 5월 미국에서 개최된 Society for Infomation Displays(SID) '99에서 발표된 White TFELD 시제품의 특성을 보여주고 있다[23].

국내에서는 10여년 전 부터 십여개의 중소기업을 중심으로 휘어짐이 가능한 필림상에 후막기술을 사용한 EL 제품이 연구, 생산되어 왔으며 최근에는 이 기술을 이용하여 문자표시가 가능한 제품의 출시가 예고되고 있다(전자신문 '99. 6. 18일자). 반면, 본 기술해설에서 다루고 있는 영상 및 정보 표시장치용의 TFEL 소자 분야는 전적으로 박막공정을 사용하므로 초기연구용 설비 투자비가 후막기술에 비하여 매우 높아 기존 설비의 공동이용이 가능한 대학과 정부 출연연구소 중심으로 연구되어왔다.

해외의 TFEL 제품기술은 Planar (미), Sharp 등이 독점적으로 주도하였으나, 최근 Westaim (캐), Lite tech (미)., Luxell (미) 등과 같은 TFEL 의 전문업체 들이 17~19 인치급 워크스테이션용 모니터를 포함하여 보다 다양한 구조와 개념의 TFEL 디스플레이를 출시하고 있다. 현재 TFEL은 고신뢰성의 고속 신호 모니터링이 요구되는 의료 분야, 고성능의 내환경성이 필요한 군수분야, 산업용 계측 장비, 우주용, 항공기 탑재용, 등으로서 응용되고 있다.

향후에는 후면전극까지도 투명전극을 채택하므로써 자동차 네비게이터용 윈도우 장착형용 "투명 표시장치(tranasparent display)"와 표준 CMOS 공정을 이용한 HMD 용 천연색 0.5 인치급의 VGA AMEL 제품이 새로운 분야의 시장을 개척할 것으로 기대되고 있다. 특히, 21세기를 향한 TFEL 소자는 0.2~1 인치급의 화면에 초고해상도가 요구되는 micro 표시장치분야에서 기술우위를 확보하기 위한 연구가 가장 활발히 이루어질 전망이다.

참 고 문 헌

[1] A. H. Kitai, "Solid State Luminescece", Ch. 5., p. 134(Chapman & Hall, London, 1994).

[2] G. Destriau, J. Chim. Phys. 33, pp. 587-625(1936).

[3] T. Inoguchi, M takada, Y. Kakihara, Y. nakata, M. Yoshida, Digest of 1974 SID International Symposium, p. 84(1974).

[4] A. Fisher, J. Electrochem. Soc., 109, p. 1043(1962).

[5] S. Kobayashi, Y. Aoki, K. Enjoji, I. P. Johnson, M. H. Higton, and P. J. Huntley, Japan Display '89, p. 242(1989).

[6] A. Vecht, N. J. Werring, and P. J. F. Smith, J. Phys. D, Ser2, 2, p. 953(1963).

[7] M. J. Russ and Di. I. Kenne, J. Electrochem. Soc, 114, p. 1066(1967).

[8] P. M. alt, Proc. SID 229(1981) 11.

[9] R. Mach, G. O. Muller, Phys. Status Solidi A, 69, p. 11(1982).

[10] R. Mach, G. O. Muller, Phys. Status Solidi A, 81, p. 609(1984).

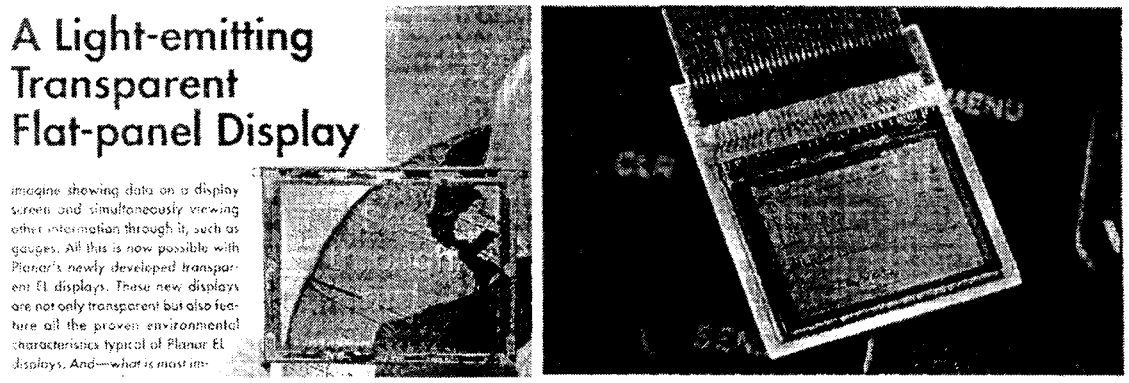


그림 15. 윈도우 장착형 투명 TFEL 표시장치(좌)와 0.5인치급의 AMTFEL 시스템(우).

[11] P. D. Rack, P. H. Holloway, L. Pham, J. F. Wager, Digest of 1974 SID International Symposium, p. 481(1995).
[12] C. N. King, Technical Review on Planar EL, 1999.
[13] Y. A. Ono, H. kawakami, M. Fuyama, and K. Onisawa, Jpn. J. Appl. Phys. 26, p. 1482(1987).
[14] A. Abu-Dayah, S. Kobayashi, and J. F. Wager, Appl. Phys. Lett. 62, 7. p. 744(1993).
[15] S. Shionoya, S. Ibuki, Applied Physics, 57, 1988, 935(in Japanese).
[16] Y. H Lee, Y. S. Kim, B. K. Ju, M. H. Oh, IEEE Trans. Elecetron Devices, ED-46, 5, p. 892(1999).
[17] W. A. Borrow, R. E. Coovert, C. N. King, Digest of 1984 SID International Symposium, p. 249(1984).
[18] M. Yoshida, A. Mikami, T. Ogura, M. Taniguchi, S. Nakajima, Digest of 1986 SID International Sympsium, p. 41(1986).
[19] K. Okibayashi, T. Ogura, K.Terada, T. Taniguchi, T. Yamashita, M. Yoshida, S. Nakajima, Digest of 1991 SID International Symposium, p. 215(1991).
[20] Z. K. Kun, D. Leksell, P. R. Malmbrg, J. Asara and G. B. Brandt, Digest of 1986 SID International Symposium, p. 270 (986).
[21] Y. H Lee, M. H. Song, D. H. Kim, B. K. Ju, T. S. Hahn, M. H. Oh, IEEE Trans. Electron Devices ED-44, no. 1, p. 39(1997).
[22] R. Kormaei, S. Thayer, K. Ping, C. N. King, G. Donly, A. Ipri, F. L. Hsu도, R. Stewart, T. Keyser, G. Becker, D. Kagey, M. Spitzer, Digest of 1994 SID International Symposium, p. 137(1994).
[23] S. S. Sun, M. S. Bowen, J. L. Daniel, S. Moehnke, A. Hodges, C. N. King, Digest of SID International Symposium. p. 1146(1999).