

LED 기술 및 전망

최병덕 (성균관대학교)

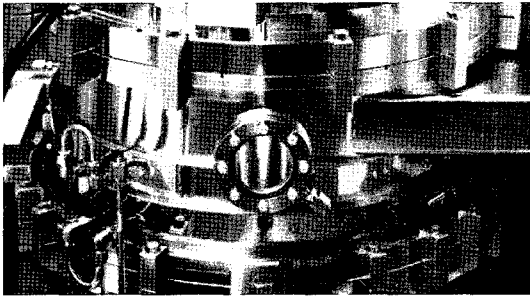
I. 서론

LED (Light-emitting Diodes)는 RCA 회사의 Braunstein이 1955년 GaAs에서 적외선이 방출되는 것을 보고한 이후 Texas Instruments의 Biard와 Pittman 이 1961년 적외선 빛이 방출됨을 발견하였다. 이후 1962년 GE의 Holonyak 이 가시광선 스펙트럼 LED를 최초로 개발 하였다. 1990년대 초 InGaAlP를 이용한 고휘도 적색 LED 개발과 질화물계(nitride) 청색 LED의 출현으로 산업, 환경, 그린에너지 분야에서 차세대 유망성장산업으로 부각되고 있다. 최근에는 삼성, 마이크론, TSMC, UMC 회사에서 LED 생산에 적극적으로 투자를 하고 있다. 어플라이드 머티어리얼스, KLA 텐서, 소이텍 등의 회사들이 장비와 재료를 개발하고 있다. 이러한 회사들이 장비의 투자뿐만 아니라 수출향상을 위해 연구 개발중이다. LED 의 수요는 TV, 모니터의 BLU 뿐만 아니라 광통신을 위한 LED 광소자, LED 조명기기 등 응용분야가 다양하고 수요가 매년 두배이상 증가할것으로 예상된다. 각국 정부도 R&D예산을 늘려 집행하고 있으며 시장 포화가 언제일지 예측이 불가능할정도인 성장산업이다.

디스플레이서치는 LED BLU 가 2010년 1억5천개에서 2015년 8억개가량 증가할것으로 예상하고 있다. Veeco (미국) 와 Aixtron (독일) 회사가 MOCVD (Metal Organic Chemical Vapor Deposition) (대당30억원) 시장을 각각 30%, 60% 를 차지하고 있다. LED 제조는 화합물 반도체를 성장시켜 에피웨이퍼를 만드는 단계가 가장 중요하여 고가의 MOCVD 장비를 사용하여야 한다. 삼성, LG전자, 마이크론 등에서 50~100대를 구매하고 있다. <그림 1>은 2009년도 마카오의 샌즈호텔 디스플레이로 1억7천만개의 LED로 제작되었다. <그림 2>는 기판위에 화합물 반도체를 성장시켜 에피웨이퍼를 제조하는 Veeco사의 최근 MOCVD 장비이다. 반도체 LED를 조명, 전광판 및 디스플레이로 사용하기



<그림 1> 1억7천만개의 LED로 제작된 마카오의 샌즈호텔 디스플레이(25m 6.7m)



〈그림 2〉 Veeco 의 최근 MOCVD 장비
출처: Semiconductor International

위해서는 고신뢰성 및 고효율을 갖는 질화물계 반도체 박막 성장 기술이 중요하며, LED 구조 설계와 재료/공정/소자의 최적화를 통한 발광효율을 극대화하여야 한다. 현재 50% 미만인 양자효율을 향상시킬 획기적인 기술개발과 광추출 기술 개발이 병행되어야 한다. 기관, 에피웨이퍼 제조, 칩생산, 패키징/모듈공정, 형광체기술 및 방열기술이 확보되어야 한다. 수율향상을 위해 에피 공정에서 발생하는 결함과 클린룸 공정에서 기인하는 결함을 관찰하고 조사해야 한다. 백색 LED 제작을 위해서는 청색 또는 UV LED 칩 위에 형광물질을 도포하는 방법과 적 (Red), 녹 (Green), 청 (Blue) LED 칩을 조합하는 방법이 있다.

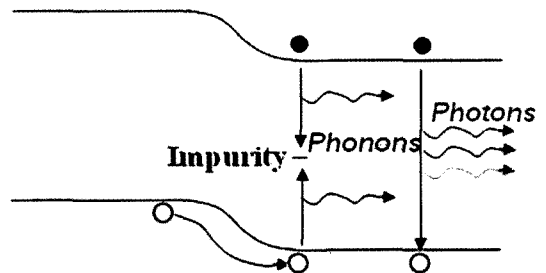
에너지절감 및 친환경적인 측면에서 이상적인 광원이라는 사실은 LED 시장의 팽창을 가속화시키고 있으며 일반 가정이나 사무실에서 사용되는 조명 영역에 까지 확대되고 있으며 21세기 전광판 및 차세대 조명용 광원으로 부각되고 있다. 백열전구 및 형광등과 비교할 때 수명, 다양한 컬러, 색감 등 여러가지 차별화할 수 있는 LED 특성 있다. LCD BLU, 자동차 라이트, 조명 등 잠재응용분야가 무한하다. 따라서 차세대 조명/디스플레이 분야에서 핵심기술로 각광받고 있는

LED는 미래의 핵심 원천기술을 확보함으로써 산업발전과 고부가가치를 창출하여 국가적으로도 막대한 경제적 파급효과를 가져다 줄 것으로 기대되고 있다. 본 고에서는 LED기술의 기초적인 원리를 설명하여 독자의 이해를 돕는데 목적이 있다.

II. LED 기술 소개

1. LED 파워와 효율

전자와 정공의 결합 메커니즘에는 Shockley-Read-Hall (SRH), 발광 (Radiative), 및 오제이 (Auger) 재결합이 있다. 발광 다이오드에서는 p-n 다이오드의 전자와 정공의 발광 재결합을 이용한 소자이다. 반도체에 금속오염이나 결함이 있게 되면 비발광 메커니즘인 SRH 재결합이 생기게 된다. SRH 재결합이 생기면 빛방출 대신에 열형태의 포논이 생긴다. 〈그림 3〉은 반도체 에너지 밴드 다이어그램에서 SRH 및 발광 재결합을 도식적으로 나타낸다. SRH 재결합에서는 열형태의 포논이 발생하며 밴드에서 밴드로 재결합하는 발광재결합은 빛을 방출한다. LED



〈그림 3〉 반도체 에너지 다이어그램에서의 SRH 재결합 및 발광 재결합 설명

는 빛을 발광하게 하는 발광 재결합(Radiative recombination)을 최대화 해야 한다.

LED에서의 파워와 효율은 전자와 정공의 발광 재결합에 따라 결정 지어 진다. 재결합 영역에서($n \cong p$)이며 초과 전자/정공 밀도가 초기 도핑 농도보다 크다고 가정하면 ($\Delta n, \Delta p > n_o, p_o$) 미분 방정식은 다음과 같다.

$$\left. \frac{dn}{dt} \right|_{t=0} = G - R = \frac{\eta_i I}{q \cdot Vol} - R = 0 \quad (1)$$

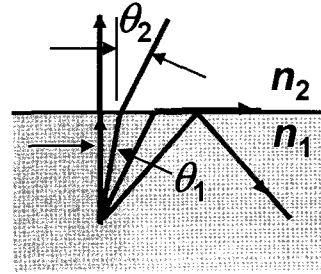
여기서 η_i 는 단위없는 내부 양자 효율이며 G는 전자/정공 발생비율, R은 재결합비율이다. 따라서 재결합비율은

$$R = \frac{\eta_i I}{q \cdot Vol} \quad (2)$$

이다. 여기서 재결합 비율은 내부 양자 효율과 전류에 비례한다. 전자/정공 결합비율 R은 발광비율, R_{rad} 와 비발광비율, $R_{non-rad}$ 이며 ($R = R_{rad} + R_{non-rad}$) 광파워 $P_{sp} = R_{rad} \cdot h\nu \cdot Vol$ 이다. 발광 효율(Radiative efficiency), η_r 은

$$\eta_r = \frac{R_{rad}}{R_{rad} + R_{non-rad}} = \frac{1}{1 + \tau_{rad} / \tau_{non-rad}} \approx 1 \quad (3)$$

이다. GaAsP/GaAs, GaP, 등의 LED 반도체에서는 $\tau_{rad} \ll \tau_{non-rad}$ 이기때문에 발광효율은 100%에 가깝다. 문제는 발광빛이 공기중으로 나오는 비율이 적다는 것이다. <그림 4>와 같이 반도체에서 공기중으로 나오는 빛을 계산하면 $n_1 \sin(\theta_1) = n_2 \sin(\theta_2)$ 이며 총내부반사는 $\theta_2 = 90^\circ$ 에서 발생하기 때문에 임계각도는 다음



<그림 4> 반도체에서 공기중으로 발광하는 빛의 경로

식과 같다.

$$\sin \theta_c = \frac{n_2}{n_1} \quad (4)$$

GaAs의 경우 n_1 은 3.6, 공기, n_2 는 1 이어서 임계 각도는 16° 로 매우작다. 즉 16° 각도인 빛만 공기중으로 나오게 된다. 광추출 효율은 빛의 임계각에 의하여 결정된다. 임계각을 변화 시키는 기술로 광추출 효율을 크게 개선시킬수 있다. 파워효율, 즉 n_1 (반도체)에서 n_2 (공기)로 통과되는 빛의 양은 다음식에 의하여 주어진다.

$$\eta_p = \frac{P_{escape}}{P_{source}} \cong \frac{1}{4} \left(\frac{n_2}{n_1} \right)^2 \left[1 - \frac{(n_1 - n_2)^2}{(n_1 + n_2)^2} \right] \approx \frac{n_2}{n_1 (1 + n_1/n_2)^2} \quad (5)$$

GaAs LED의 경우 n_1 (GaAs:3.6), n_2 (공기:1)이어서 파워 효율은 1.3%이다. LED의 외부 효율 (external efficiency)는 매우낮아 10% 미만이다. 예폭시나 그외 다른 물질로 봉지(encapsulating)를 할경우 파워 효율을 높일수 있다. 청색 LED의 내부 양자 효율 약 70%, 광추출효율 70%, 전류 주입 효율은 약 90% 정도이며, 최대로 올릴수 있는 외부 양자효율은 50%보다 작다. 따라서 휘도를 높이기 위해 전류를 높

이게 되며 높은 전류에 의해 열이 발생 하게 된다. 현재의 기술로 150 lm/W의 luminous efficiency 를 얻기 위해서는 공정중에 기인한 효율 손실을 줄여야 한다. 실제 구동 전류는 10mA 정도이며, 전압은 대개 2V 내외이다.

2. 응답속도

LED 의 응답속도는 수 ns 전후로서 고주파수 에 이용 가능하다. 다음 연속 방정식(continuity equation),

$$\frac{\partial \Delta n}{\partial t} = G - R + \frac{1}{q} \frac{\partial J_n}{\partial x} \quad (6)$$

으로 부터 방정식의 해(solution)는 다음과 같다.

$$\tau \propto \frac{1}{B \cdot p_0} \quad \tau \propto \sqrt{qL_n / B \cdot J_n} \quad (7)$$

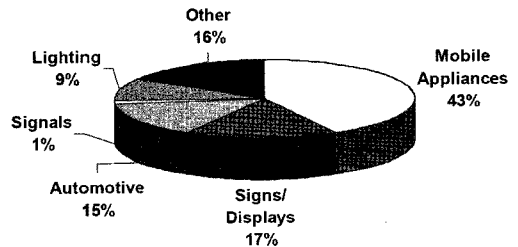
방정식, (7) 에서 저전류 동작에서는 직접전 이형 밴드갭 반도체의 도핑밀도(p_0) 가 높으면 응답속도를 빠르게 할수 있으며 고전류 동작에 서는 전류 밀도(J_n)가 높아지면 응답 속도를 빠 르게 할 수 있다. 즉 구동 전류를 증가시키면 재 결합 수명이 감소하여 고주파에 사용할수 있다. 응답속도는 광변조와 광섬유로 빛을 전달할때 중요한 역할을 한다.

III. LED 응용분야 및 연구 방향

가시광선 LED는 오렌지, 빨강, 녹색 및 청색

LED가 있다. 적/청/녹 의 삼원색을 조합하여 백 색을 포함한 여러 색깔의 빛을 만들수 있다. 가시 광선 LED의 시장 점유율은 90% 이상이다. 응용 분야는 조명, 표시장치, 광디스크 및 CD 의 헤드 에 사용 된다. 적외선 LED 는 리모콘 및 적외선 통신 등에 사용되며 자외선 LED는 살균, 피부 치료 및 의료 분야에 사용 되고 있다. 최근 액정 디스플레이의 BLU (LED), 및 조명기기 시장이 급성장 하고 있으며 새로운 응용 분야의 확대를 바탕으로 2010년 이후 매년 20% 이상 증가 될 것으로 예상하고 있다. 향후full color 조명 시장 진입을 통해 시장은 급격히 팽창할 것으로 예측 된다. <그림 5>는 Strategies in Light사 가 작성한 LED 제품 분야별 시장의 현황이다.

LED기술의 경향은 초저가, 고효율, 고풍력, 고신뢰성을 추구하고 있다. 따라서 개발 및 연구 동향은 광추출 향상, 저가격 백색 LED를 위한 형광체 기술, 방열 소재 기술 등이 핵심 기술로 부각 되고 있다. 칩의 모양을 변화 하거나 패터닝 기판을 이용하여 광추출 효율을 증가 시킬 수 있다. 기판을 떼어내고 열 특성과 전기적 특성이 우수한 이중기판을 본딩하는 방법과 n-GaN 표 면을 균일하게 가공하고 p-GaN 표면은 불균일 하게 하여 광추출 효율을 향상 시키 기도 한다. 최근에 수직 배열된 ZnO 나노 막대 템플리트 위 에 InGaN/GaN을 재성장하여 나노막대 LED 구



<그림 5> LED 제품 분야별 시장 현황

조를 제작하려는 연구가 진행되고 있다. 이러한 나노 구조체 및 광결정을 이용한 LED의 광 추출 효율 향상 기술이 진행되고 있다. LED용 형광체의 기술은 청색 LED 및 UV LED용 형광체 개발이 활발하게 진행되고 있다. 또한, 양자점 형광체 및 하이브리드 형광체 연구로 신규 발광체의 개발이 가능 할 것으로 생각된다. 고휘도 LED 기술 발전에 의해 응용 시장이 활발하게 성장함에 따라 LED 방열기술의 중요성이 강조되고 있다. 1와트 이상의 파워 LED는 전류량이 많아 발광 효율은 높지만 발열량이 높아 열화가 가속된다. 패키지 기술을 바탕으로한 방열 설계 기술이 필요한 이유이다. 이러한 기술적 난제가 극복되면 IT 강국인 우리나라는 LCD TV BLU, 모니터 BLU, 자동차 라이트, 및 휴대폰 등의 꾸준한 수요가 예상되며, 각종 광 부품 시장이 LED로 대체되면서 급격한 성장세를 유지할 것이다. 유해 물질이 없는 친 환경 광원, 친 소비자적 환경을 제공하여 화석 연료 소모 및 CO₂ 배출량의 감소 또한 기대된다. 혁신적인 조명 기술로 인해 반도체 조명 시대가 도래 할 것이며 천연색(Full color display)을 응용하는 다양한 형태의 전관 조명 구현이 가능하고 아름다운 조명 문화가 형성 될 것이다.

저자소개



최 병 덕

1998년 2월 Arizona State University 전자공학과 공학 석사

2001년 12월 Arizona State University 전자공학과 공학 박사

1999년 SEH America 연구원 (와싱턴주)

2002년~2008년 삼성 SMD 연구원

2008년~현재 성균관대학교 정보통신공학부 교수

주관심 분야 : LED/OLED 및 Flat Panel Display 관련 연구 개발