

백종협 팀장 (한국광기술원 LED소자팀)

1. 서론

1907년 Sandpaper재료로 사용되었던 SiC를 통해서 우연히 빛이 관찰된 이후 [1], 일부 화합물반도체에서 전기에너지가 빛에너지로 천이되는 현상이 발견되었지만, 1962년 Nick Holonyak에 의해 적색 발광다이오드가 개발되면서 비로소 LED (Light-emitting Diode)의 역사가 시작되었다 [2]. LED는 화합물반도체의 p-n접합을 이용한 발광소자로서 레이저다이오드(LD, Laser Diode) 개발과정에서 저온 유도발광 (Stimulated Emission)이 상온에서는 자발발광 (Spontaneous Emission)에 그치는 현상을 이용하여 자발발광만을 이용한 발광소자에 관심을 돌린 것이 계기가 된 것이다. LD와 달리 LED 응용제품의 대부분은 인간의 시각을 자극하는 것이 목적이기 때문에 LED 소자기술은 기본적으로 많은 광자 (Photon)를 생성해 내고 그 광자를 가능한 한 많이 밖으로 추출 (Light Extraction)하는 것에 관심을 둔다. 발광소자 개발 후 약 30년 동안은 발광재료의 빈곤과 장비 성능의 한계로 적색, 녹색, 주황색 정도의 미약한 발광구현이 가능하여 활용 가능한 응용제품이 매우 제한적이었다. LED의 성능이 비약적으로 발전할 수 있었던 계기는 1990년대 초 InGaAlP계 고휘도 적색 LED개발과 GaN기반의 재료를 이용한 청색 LED의 개발이었다 [3]. 특히, 사파이어와의 높은 격자부정합도와 많은 결정 결함에도 불구하고 GaN기반의 LED가 성공을 거둔 것은 매우 획기적인 일이었다.

이를 바탕으로 연이어 개발된 고휘도 녹색, 백색 LED에 의해 총천연색 구현이 가능하게 되었고 응용 분야가 급속히 확장되면서 LED는 많은 사람들의 관심사에 들어오기 시작하였다. 더 많은 전문가들이 개발에 참여하게 됨으로써 LED 소자기술은 경쟁적으로 발전하게 되었으며 장비기술, 소재기술, 설계 기술 등이 바탕이 되면서 다시 소자기술이 발전하고 산업의 팽창과 재투자의 선순환 고리가 정착되면서 LED는 이제 조명패러다임을 바꿀 정도로 인류의 생활 속에 깊이 자리 잡기 시작하였다.

2. LED 소자 기술동향

2.1 LED기초

LED의 특징은 반도체가 갖는 고유의 물성 특성에 기인한다. 우선 기술적인 측면에서 보면 반도체는 전기 전도성이 그다지 좋지 않고 발광층이 빛을 흡수하는 역할을 동시에 하기 때문에 칩 크기에 제약을 받는다. LED는 다른 반도체와 마찬가지로 온도에 매우 취약하고 물성과 구조자체가 광 추출을 방해하는 많은 요소를 포함하기 때문에 효율을 개선하기 위해 매우 다양한 형태로 구조가 개발되었다. LED 발광과장을 결정하는 활성층은 대부분의 화합물반도체 조합이 가능하지만 실험적으로는 기판과의 격자정합도와 Solubility 특성에 의해 제한적인 조합만 가능하다. 다행히 질화물 반도체의 발광 특성이 기판과의 격자 부정합도에 치명적인 영향을 받

지 않기 때문에 LED는 적외선(IR)-가시광선(Visible)-자외선(UV)까지 광범위한 파장의 구현이 가능하다. 다만, 광 효율의 문제로 인하여 현재 기술로는 모든 파장대를 커버하는 발광물질계는 없으며, 대표적으로 GaN계(녹색이하 단파장)와 InGaAlP계(적색이상 장파장) LED가 제작되고 있다. 그림 1(a)은 GaN기반 (b)은 GaAs기반 LED재료의 격자상수와 발광파장과 관계도를 보여주는 그림으로써 화합물조성의 변화에 따른 파장범위를 보여준다.

청색LED로 대표되는 GaN계 질화물 LED의 경우 대부분 부도체인 사파이어를 사용하는데 이 경우 전극패턴 형성법은 GaAs나 SiC를 기판으로 사용하

는 LED와는 다른 방법의 공정이 필요하다. 그림 2는 각각 사파이어 기판, SiC기판을 사용한 질화물계 LED칩 (청색, 녹색, 자외선)과 GaAs기판을 사용한 LED칩 (적색, 황색, 오렌지색) 에피 및 구조를 나타낸 그림이다. 세가지 기판 모두 에피 성장과 발광효율입장에서 보면 완벽한 기판은 아니기 때문에 새로운 후보기판을 이용한 에피 성장기술이 시도되고 있으며, 한편으로는 성장에 사용된 기판을 제거하고 새로운 기판을 인위적으로 붙이는 기술도 시도되고 있다.

LED기술은 일반적으로 그림3과 같이 에피, 칩 공정, 패키징 공정으로 나눌 수 있으며 칩 공정은 전극패턴을 형성하는 과정인 前공정 단계와 Chipping 및 평가 분류과정인 後공정 단계로 세분화 할 수 있다. 소자기술은 일반적으로 칩 기술에 해당되지만 패키징 기술을 포함하기도 한다. COB (Chip on Board)나 웨이퍼레벨 패키징 등 칩 공정과 패키징 공정 간의 경계가 모호한 경우도 있다. 최근에는 새로운 형태의 칩이 디자인되면서 나노 패터닝, 기판 분리, 웨이퍼본딩, Electro Plating, 이온주입 등 새로운 형태의 공정이 도입되고 있는 추세이다.

2.2 에피 성장기술

Epitaxy (에피탁시)는 그리스어 Epi(on)와 Taxis(Arrangement)에서 유래된 단어로써, 기판위에 유사한 격자구조를 갖는 원자 혹은 분자층 단위의 박막을 순차적으로 성장시키는 방법이다. 코팅과 다른 점은 기판과 에피층 간의 격자유사성에 있는데, 에피층은 기판 격자구조의 영향을 받아 동일한 방향을 유지하며 성장되기 때문에 기판의 선택이 중요한 변수가 될 수 있다. 상용 LED 구조 성장에 사용되는 에피 성장법은 모두 화학적 증착법으로써 MOCVD (Metal Organic Chemical Vapor Deposition)방법을 사용한다. 이 방법은 MO가스와 Hydride가스를 고온에서 반응시켜 고체상태의 화합물반도체를 성장시키는 방법으로써 GaAs를 기반으로 하는 AlGaAs, InGaAlP계 LED의 경우 800 °C 이하의 온도에서도 성장이 가능한 반면 Nitride계 LED의 경우에는 질소 원료가스의 열분해 온도가 높아 1000 °C 이상의 고온 성장을 필요로 한다.

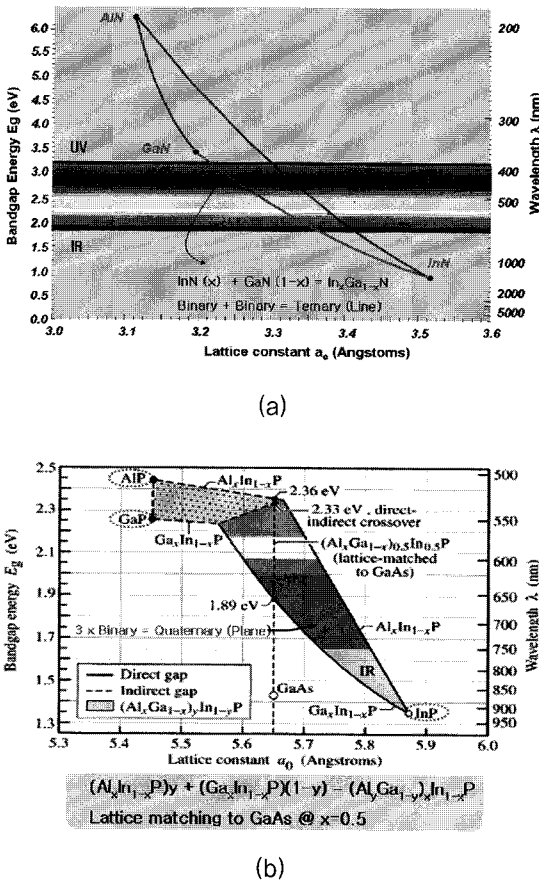
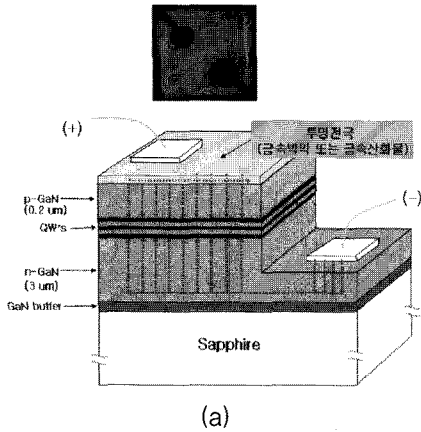
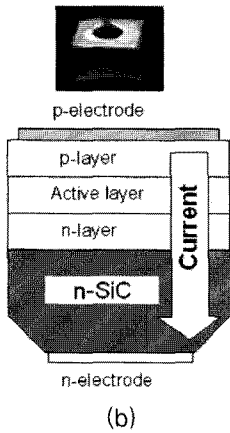


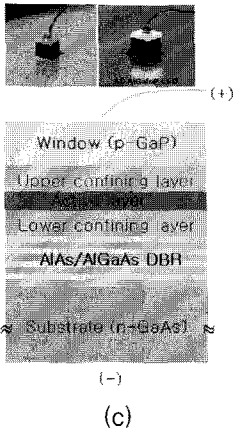
그림 1. (a) GaN기반 반도체재료와 (b) GaAs기반 반도체재료의 에너지 갭과 격자상수.



(a)



(b)



(c)

그림 2. 각기 다른 기판에 성장된 LED 에피 및 칩 구조
(a) GaN on Sapphire, (b) GaN on SiC,
(c) InGaAlP on GaAs.

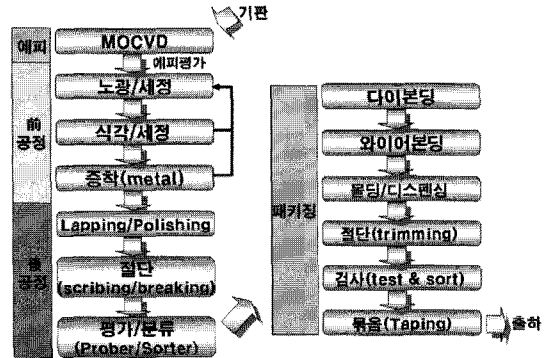
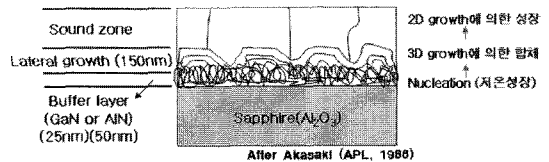


그림 3. LED 제조공정 기술단계.

GaAs를 기반으로 하는 적색 및 근적외선 영역의 LED는 에피층 재료의 발굴과 더불어 일찍부터 개발되었으며 격자 정합구조를 가지기 때문에 기판에 의한 에피층 성장자체는 문제가 되지 않았었다, 그러나 질화물계 LED에서는 기판과 에피층의 격자 부정합으로 인해 초기 성장조건을 찾는데 많은 애로가 있었는데 격자부정합이 크에도 불구하고 비교적 양질의 에피 성장이 가능했던 기술혁신이 일어난 것은 저온 버퍼층 성장기술에 있었다. 이는 500℃ 부근의 저온에서 $Al_xGa_{1-x}N$ ($0 \leq x \leq 1$) 핵 생성층 (Nucleation Layer)을 얇게 (20-30 nm) 형성한 뒤 온도를 올려 스스로 합체화 (3D 성장) 되게 한 후 에피 성장의 기본패턴인 계단성장 (2D 성장)으로 진행되게 하는 방법으로써 현재는 질화물 에피 성장의 보편적 기술이 되었다 [4].

버퍼층 위에 순차적으로 n-층, 활성층 (발광층), p-층의 구조를 성장시켜 p-n 다이오드 구조를 형성함



After Akasaki (APL, 1986)

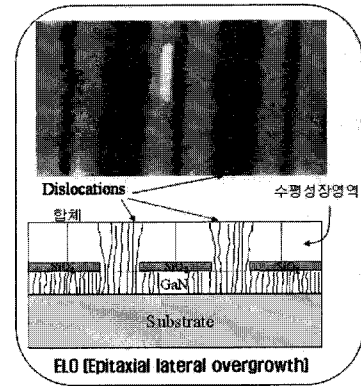
그림 4. 저온 버퍼층 성장의 단계.

으로서 칩 구조가 완성된다. 활성층으로는 효율을 높이기 위해 일반적으로 다중양자우물구조 (Multiple Quantum Well : MQW)를 삽입하는데 우물층과 장벽층의 조성 및 두께를 제어하여 원하는 파장을 방출한다. 도핑 원료로는 n-형의 경우 Si가 가장 많이 사용되며 p-형의 경우 InGaAlP계 재료에서는 Zn, Mg 또는 Te, 질화물계에서는 Mg이 주로 사용되고 있다. 질화물계에서 Mg의 활성화가 충분치 않아 p층 저항이 높은 문제가 있는데 이는 성장분위기 중의 수소가 억셉터 도핑물질인 Mg과 결합하여 Mg-H 복합체를 형성하며 전기적으로 불활성된 결정이 형성되기 때문이다. Mg-H 결합을 끊어주기 위해 아카사키 교수에 의해 LEEBI (Low-energy Electron Beam Irradiation)방법이 처음 시도되었고 [5] 후에 나카무라 박사에 의해 시도된 고온 열처리 방법으로도 큰 효과를 보게 되면서 비로소 청색 LED의 개발이 완성되었다.

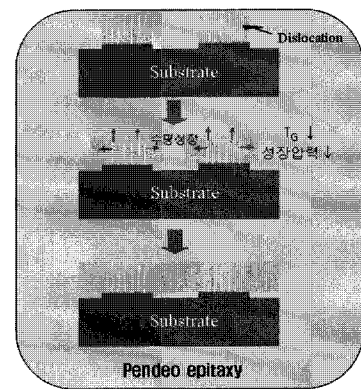
Epitaxial Lateral Overgrowth (ELO)기술은 1980년대 초 Integrated Circuits (IC)제조를 위한 Si의 ELO기술에서부터 시작되었는데 질화물반도체에는 1997년 North Carolina State University의 R. Davis Group에서 GaN/SiC의 결정성 향상을 위해 적용된 것이 처음이다 [6]. 이 성장기술은 GaN박막이 Sapphire, Si, SiC 등의 이종물질 기판 위에서 마스크 및 기판의 패턴에 따라서 선택적으로 수직, 수평 성장하고, 수평성장 영역에서 Threading Dislocation (TD)은 Bending되거나 Mask에 의해 차단됨으로써 표면으로의 침투가 억제되어 결과적으로 결정결함이 적은 에피를 성장할 수 있었다. 한편, 비슷한 개념의 성장기술로써, GaN를 Sapphire 기판 위에 성장한 후, 기판까지 건식 식각하여 기판을 Patterning하고 그 위에 다시 GaN을 성장하면, 노출된 기판 위에는 성장이 되지 않고 GaN 위의 성장을 우월하게 할 수 있는 Pendeo 에피 성장기술도 제안되었다 [7]. 이 방법은 성장 변수를 조절하여 측면 성장 속도를 수직 성장속도의 2배 이상까지 증가시킬 수 있으며, SiO₂ 등의 Mask재료가 에피층에 잔존하지 않는 장점도 있다. 이러한 측면 성장기술들은 개발 당시에는 성장이 번거롭고 비용이 추가된다는 점에서 LED 분야에서는 오래 주목을 끌지는 못하

였으나 최근 기판의 패터닝을 이용한 추출효율 향상, 나노 산란점을 이용한 외부양자효율 개선 등 타 기술을 구현하기 위한 방법으로 매우 좋으며 특히 최근 포화되고 있는 LED의 성능을 조금이라도 올려보기 위해 재고되고 있는 성장 기술이다. 그림 5(a)와 (b)는 각각 ELO와 Pendeo 성장기술의 개념도를 나타낸다.

2002년 니치아의 Mukai 등은 Patteren된 사파이어 기판 (PSS, Patterned Sapphire Substrate)을 이용하여 성장한 LED가 더 높은 광출력을 갖는다는 결과를 발표하였다 [8]. 이 성장방법은 수 마이크로 크기의 반구형 패턴을 사파이어 위에 형성한 후 에피



(a)



(b)

그림 5. ELO 및 Pendeo 에피 성장기술에 의한 결정 결함 감소.

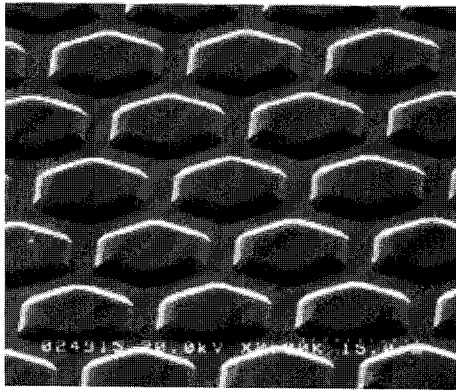


를 성장하는 방법으로써 다음 장에서 설명하는 광추출효율의 향상에 크게 기여를 하기 때문에 광출력이 높아지기도 하지만 한편으로는, 앞서 설명한 Pendeo 에피 성장의 개념처럼 수평성장에 의한 결정결함 감소가 내부양자 효율을 상승시킨 부분도 있기 때문이다. 이런 성장기술에 의한 소자의 광출력은 평면 기판을 이용한 경우대비 30 % 내외의 상승을 가져오는데 패턴의 형상과 크기에 약간의 차이를 보인다. 현재 대부분의 상용화된 LED구조는 PSS 위 에 성장되고 있다.

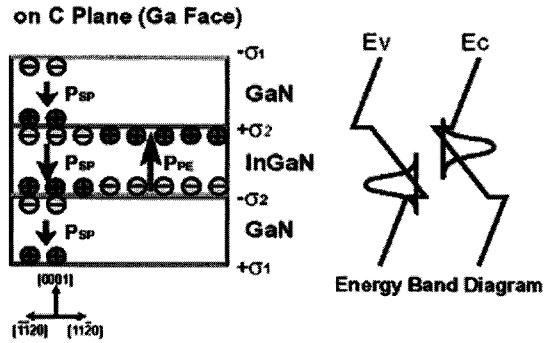
LED 에피 성장용 기판으로 가장 많이 사용되고 있는 c-plane (0001) 사파이어 기판은 그림 7(a)와 같

이 에피 성장방향으로 이온간의 거리가 각기 다른 장주기성 결정구조를 갖는다. 이러한 구조는 전하가 이온간의 자발분극(Spontaneous Polarity)을 유발하여 내부에 전기장이 형성되면서 Band Bending과 Charge Separation을 유발한다. 결과적으로 내부양자효율의 감소를 가져오므로 바람직한 에피 성장방향은 아니다. 이런 문제를 인식하여 그림 7(b)와 같이 자발분극이 일어나지 않는 a-plane (11 $\bar{2}$ 0)의 방향으로 에피 성장이 일어나도록 r-plane 사파이어 기판을 이용한 성장방법이 S. DenBaar 그룹에 의해 제안되었다 [9].

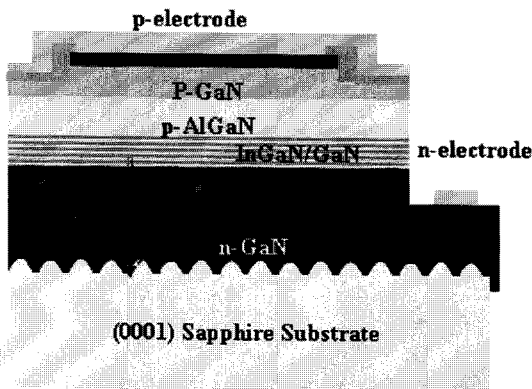
비극성 기판 외에 반극성 기판에서도 비슷한 효



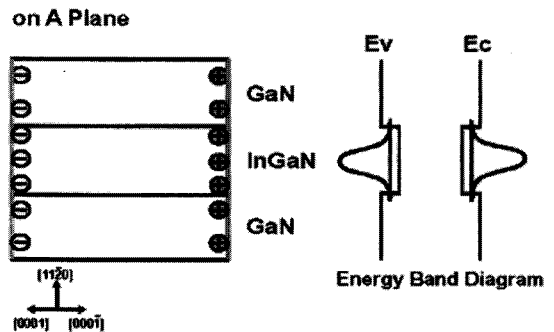
(a)



(a)



(b)



(b)

그림 6. (a) PSS 형상과 (b) PSS 위에 성장된 LED칩.

그림 7. (a) c-plane 에피와 (b) a-plane 에피의 결정주기 및 Band Bending.

과를 볼 수 있으며 그림 8과 같이 다양한 면을 활용하여 에피 성장에 이용할 수 있다. 그러나 비극성 또는 반극성 기판을 이용한 에피 성장은 이론적으로는 바람직하지만 실험적으로는 에피층 입장에서는 그다지 선호하는 방향이 아니기 때문에 충분히 만족스러운 결정특성을 얻기가 어렵다. 비극성 사파이어 기판을 이용한 에피 성장에 어려움을 회피하기 위해 Free Standing m-plane ($10\bar{1}0$) GaN 기판을 이용한 밀리 와트급 LED를 발표하기도 하였으나 이는 상용화 측면에서는 아직은 큰 의미가 없는 결과이다. 비극성 에피의 장점은 내부양자효율의 증가뿐만 아니라 p-도핑의 우수성, 편광빔 생성, 전류변화에 둔감한 파장 안정성 등 많은 장점이 있기 때문에 최근 많은 에피 연구자들의 연구 테마이다.

발광파장은 3원화합물 또는 4원화합물로 조성을 제어하여 결정할 수 있는데 기판과의 격자상수와 비슷한 범위에서 조절해야 한다는 한계가 있다. 이를 위해 격자상수가 비슷한 기판을 LED구조의 성장용으로 사용하는 것이 이상적이나 질화물계 LED용 기판으로 사용되는 사파이어 기판은 그런 점에서 매우 제한적인 기판이라고 할 수 있다. 반면 SiC는 사파이어에 비해 격자부정합도가 작아서 유리하다고 볼 수 있으나 큰 굴절률로 인한 광 추출효율의 감소, GaN 보다 작은 밴드 갭 에너지 (3.02 eV)로 인한 단파장 광흡수, Micro Pipe에 의한 결정결함 등 완벽한 기판으로는 볼 수 없으며 여전히 가격이 비싸다는 점도 불리한 점으로 작용한다. 사파이어와 SiC를 대체할 기판으로 GaN기판을 비롯한 많은 후보기판들이 시도되고 있으나 가격적인 측면과 결정성장의 어려움 등으로 아직 상용화되지는 못하고 있다. 한편 Si기판을 이용한 질화물계 LED개발도 시도되고 있는데 Si기판은 저가형 대구경 기판으로서 전기 전도성이 있으며 열전도성도 좋아 최근 중요시되고 있는 LED 대량생산화를 위한 기판으로 매우 좋은 장점을 갖고 있다. 그러나 가시광을 흡수한다는 점과 에피층과의 열팽창 계수가 커서 쉽게 크랙을 발생시킨다는 좀 등 치명적인 단점들이 있다. 그럼에도 불구하고 저온 AlN 버퍼층, 스트레인 완화용 AlN/GaN 초격자 구조성장, 브래그거울 (Distributed Bragg Reflector) 등을 이용하여 상용화에 매우 근접한 상태까지 기술

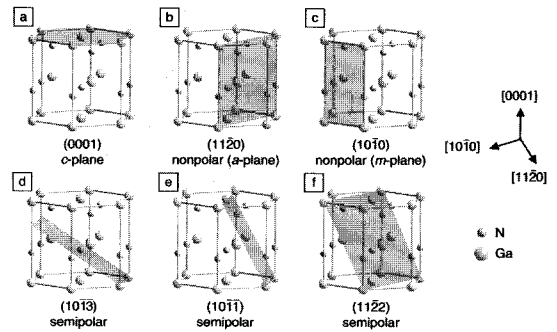


그림 8. 육방구조에서의 비극성 및 반극성 면.

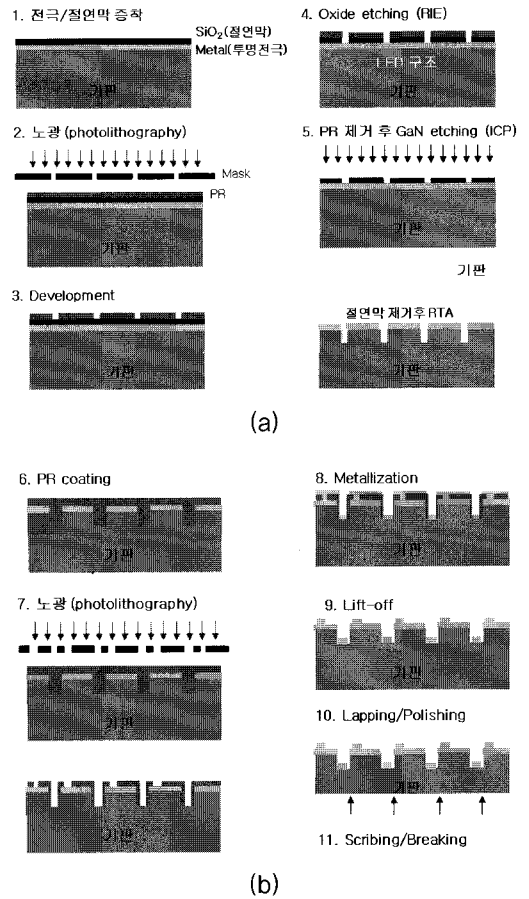


그림 9. 질화물계 LED칩 제작공정.



이 진보되었다.

2.3 LED칩 제조공정

LED의 칩 제조공정은 내부에서 생성된 광자를 가능한 한 많이 밖으로 추출하기 위한 구조로 디자인되며 한편으로는, 단순 강건한 공정을 지향하여 제조원가를 절감하기 위한 고려가 필요하다. 질화물계 LED에 사용되는 사파이어 기판은 부도체이기 때문에 그림 2(a)처럼 에피층에서 p, n 전극을 모두 해결해야 하며 p층의 저항이 매우 높기 때문에 전류의 수평흐름을 원활하게 하기 위한 투명전극이 필요하다. 반면에 그림 2(b), (c)처럼 SiC나 GaAs기반 LED는 기판이 전도성 재료이기 때문에 상하 수직방향으로 전류를 흐르게 하는 등 조급은 더 단순하게 제조된다. 최근에는 사파이어 기반 LED에도 기판 분리방법 후 수직방향으로 전류를 흐르게 하는 등 패키지를 단순하게 하는 구조가 개발되었으나 공정과정이 복잡해지는 문제도 있다. 그림 9는 사파이어 기반 LED의 일반적인 칩 제조공정도를 나타내는 그림으로서 노광 (Photolithography), 세정, 식각 (Etching), 금속전극 증착 (Metallization), 후공정 등의 세부 단위공정을 거쳐서 완성된다.

LED칩의 성능은 주입된 전기에너지 대비 방출되는 광 에너지의 비로 평가된다. 전기회로의 손실을 제외하고 조명모듈 단위의 공정이 이루어지기 전 개별 소자의 성능은 외부양자효율 (η_{external})로 평가되며 다음과 같이 표시된다.

$$\eta_{\text{external}} = \eta_{\text{internal}} \times \eta_{\text{extraction}} \times \eta_{\text{injection}}$$

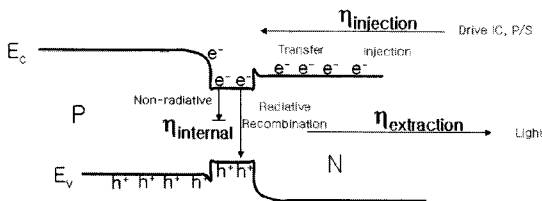


그림 10. LED 외부양자효율 개념도.

여기서, η_{internal} 은 내부양자효율 (Internal), $\eta_{\text{extraction}}$ 은 광 추출효율 (Extraction), $\eta_{\text{injection}}$ 은 전류주입효율(Injection)을 의미한다. 그림 10에 LED 외부양자효율의 개념을 설명하였다. 내부양자효율은 에피 성장단계에서 대부분 결정되는 인자로서 성장되는 재료의 물성과 에피 구조 설계에 좌우되는 발광 및 비발광 효율에 관계되는 인자이고, 전류 주입효율은 반도체 내부로 전자가 주입되는 효율로써 에피층의 전기적 특성과 전기공정에 동시에 영향을 받는다.

광 추출효율은 칩 내부에서 발생된 광자를 외부로 최대한 탈출시키기 위해 중요하게 고려되는 인자로서 칩 공정방법을 통해 극대화 시켜야한다. 광 추출효율을 향상시키기 위해서 표면거칠기, PSS성장, 칩 Shaping, 플립 칩, 수직형 칩 공정 등 여러 가지 방법들이 시도되고 있는데 결국 내부에서 발생하는 광자들을 외부로 최대한 추출시키기 위한 목적이다. 최근에는 나노 공정기술을 접목하여 높은 효율을 보여주는 결과들도 발표되고 있다. 그림 11은 이러한 광 추출효율의 개념을 설명하는 그림이다. 칩 외부로 탈출하는 광자는 외부와의 경계면에서 반사, 투과와 현상이 일어나는데 임계각 이내의 각도에서만 부분투과 현상이 발생하며 그 이상의 각도로 반사되는 광자는 전반사 (Total Internal Reflection)에 의해서 칩 내부로 되돌아 나가는 현상이 발생한다. 이때,

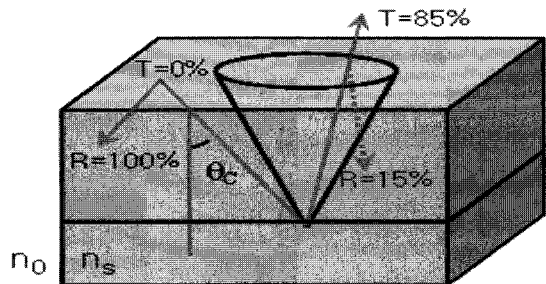
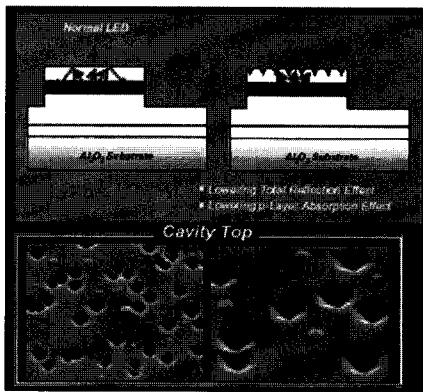


그림 11. 광자의 탈출과정에서 투과 반사에 의해 형성되는 탈출콘.

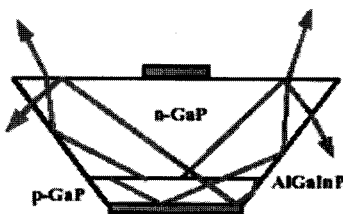
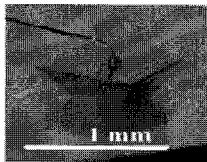
임계각 이내에서 부분투과가 가능한 궤적을 그려보면 원뿔 모양의 탈출콘(Escape Cone)이 형성된다.

전반사에 의해 내부로 되돌아 나간 광자는 다시 반사가 되면서 결국 결정결함에 갇히거나 진동자와의 충돌에 의해 열에너지로 바뀌면서 사라지게 된다. 광자의 탈출율 즉, 광 추출효율을 근사적으로 계산해보면 아래와 같은 식으로 나타내지는데,

$$\eta_{\text{extraction}} = \frac{P_{\text{escape}}}{P_{\text{source}}} \approx \frac{1}{2} \left[1 - \left(1 - \frac{\theta_c^2}{2} \right) \right] = \frac{1}{4} \theta_c^2 = \frac{1}{4} n_o^2$$



(a)



(b)

그림 12. (a) 표면 Roughening된 LED 칩 (에피스타 비너스 칩), (b) Shaping된 LED 칩 (루미레즈 TIP 칩).

여기서, P_{source} 는 칩 내부에서 생성된 광자의 수, P_{escape} 은 탈출에 성공한 광자의 수, θ_c 는 임계각, n_o 와 n_s 는 각각 공기와 LED재료의 굴절률을 나타낸다. 여기서 임계각은 외부환경의 굴절률에 의존하는 값임을 알 수 있으며 칩의 외형을 고려하여 계산해보면 공기일 경우 (굴절률 1) 8%, 에폭시 봉지재일 경우 11% (굴절률 1.5) 만이 밖으로 빠져나오는 것을 알 수 있다. 이처럼 기본적으로 낮은 광 추출효율을 극대화하기 위해 그림 12(a)처럼 칩의 표면에 Roughening을 주거나, (b) 칩의 외형을 사각형이 아닌 사다리꼴 모양으로 Shaping하여 임계각을 넓히는 기술이 개발되었다. 그러나 전기적 특성의 저하(Roughening), 제조단가의 상승(Shaping) 등의 이유로 크게 활용되지는 못하였다.

상업적으로 성공을 거둔 기술은 PSS기술이었다. PSS기술은 매우 간단하여 그림 13처럼 사파이어에 원하는 모양의 패턴을 형성한 뒤 패턴된 기판위에 에피층을 성장하는 방법이다. 패턴모양은 건식 또는 습식 식각을 통해 얻을 수 있다. PSS상에 성장된 LED는 최고 30%까지 효율을 높일 수 있으며 표면 Roughening에 의한 효율상승과 중복효과가 없기 때문에 일반적으로 PSS를 쓰는 것만으로 충분하다.

표면 Roughening효과 외에 광자를 선택적으로 투과, 반사시키기 위한 나노 공정도가 개발되었는데 광자의 파장과 비슷한 주기의 나노 패턴을 형성한 광자결정 LED (Photonic Crystal LED)의 경우 광자의 탈출파장과 방향을 임의로 제어할 수 있다. 이런 공정은 보통 수백 nm 범위의 패턴형상을 가지므로 그림 14와 같이 레이저 홀로그래피방법이나 나노 임

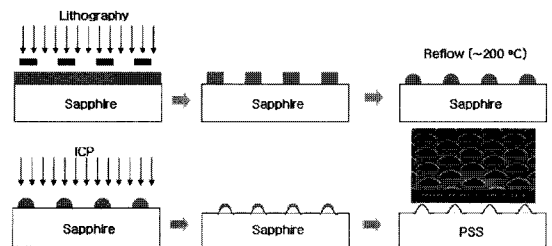


그림 13. PSS 식각공정.

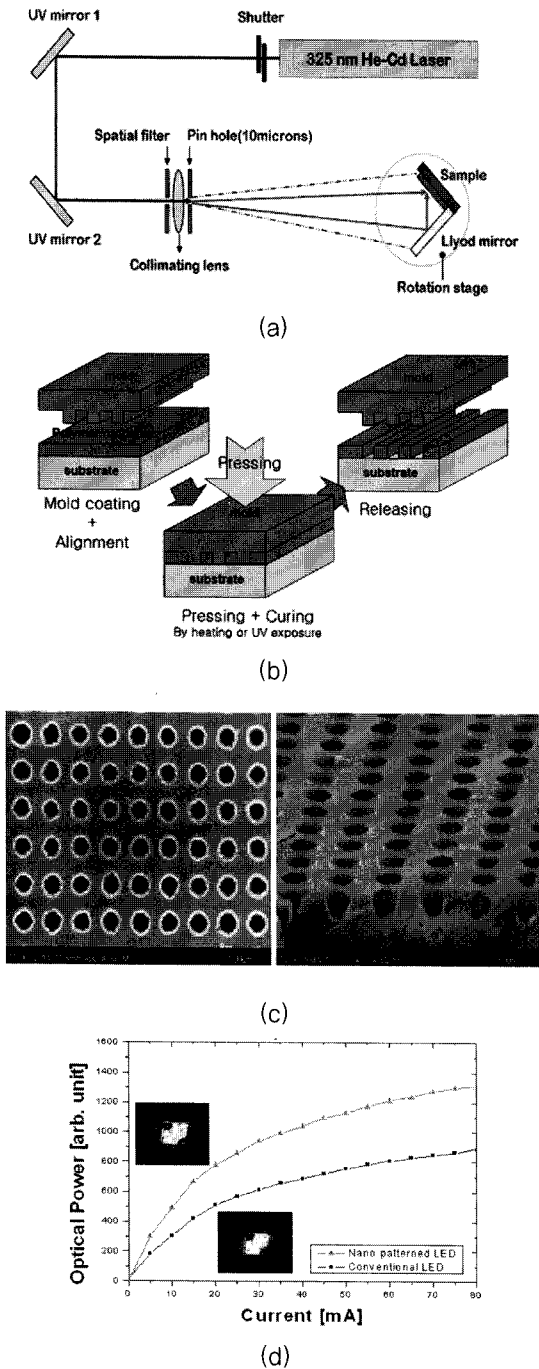
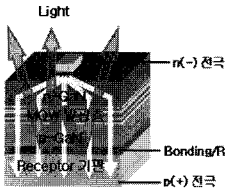


그림 14. (a) 레이저 홀로그래피 나노 공정법, (b) 나노 임프린팅방법, (c) 나노 공정에 의한 표면 패턴 형상, (d) 나노 패턴된 LED와 일반 LED의 광 출력 변화비교 (한국광기술원).

프린팅방법으로 구현할 수 있다. 광출력의 향상에도 불구하고 아직 전기적 특성의 저하, 제조공정의 상승, 균일성 유지 어려움 등으로 상용화까지는 시간이 좀 걸리겠지만 현재까지는 LED 칩의 최종 표면에 적용할 마지막 기술로 생각할 수 있을 것이다.

최근 이슈가 되고 있는 또 하나의 칩 구조는 일명 “수직형 칩”이다. 수직형 칩의 어원은 전류가 칩 면의 수직방향으로 흐른다는 뜻으로 붙여진 이름이지만 사실상 SiC나 GaAs기반 LED가 모두 수직형 칩이므로 이 명칭은 사파이어 기반 LED에만 특별히 붙여진 이름이다. 사파이어 기반 LED는 그림 2(a)와 같이 에피층 표면에 p, n전극이 형성되는 관계로 전류가 수평으로 흐를 수밖에 없는데 n전극 가까운 쪽에서의 전류밀도 증가에 의해 내부양자 효율이 낮아지며, n전극을 형성하기 위해 식각된 부분만큼 발광층이 없어지는 구조이기 때문에 광 효율이 좋은 구조는 아니다. 이러한 단점을 보완하기 위해 개발된 수직형 칩 구조는 그림 15와 같다. 수직형 칩은 기본적으로 전기전도성을 갖는 Receptor기판을 준비하여 에피 성장이 끝난 웨피웨이퍼의 표면에 부착시킨 뒤 (또는 증착시킨 뒤) 사파이어 기판을 떼어냄으로써 전류의 수직흐름을 구현할 수 있다. 여기서 중요한 기술이슈는 Receptor기판의 반사율이 좋아야 한다는 사실이며 보통은 고반사 금속을 증착한 기판을 사용한다. Receptor기판은 웨이퍼본딩법으로 부착하기도 하지만 Electro Plating방법으로 금속을 증착시키기도 한다. 두 방법 모두 완벽한 방법은 아니며 수율 개선, 신뢰성 개선 등 양산화를 위한 공정 Tuning이 더 필요한 상황이다.

사파이어 기판을 떼어내는 방법은 Laser Lift-off (LLO)방법 [10,11]을 많이 사용하고 있는데 장비 성능의 발전으로 거의 완전히 기판분리 작업이 가능하게 되었으나 장비가격이 고가인 점이 부담으로 작용한다. 최근에는 더 간편하게 에피 성장과 연계한 Chemical Lift-off (CLO)와 같은 화학적 분리방법이 개발되었다. 이 방법은 GaN 버퍼층 대신 금속화합물을 성장하는 방법으로서 웨이퍼 본딩 후 Acid용액에 담가 금속 버퍼층을 녹임으로써 자연스럽게 분리가 되게 하는 방법이다[12]. 그밖에 에피층의 도핑농도 또는 초격자층 구조 등을 활용한 선택적 분리방법도



	<2" GaN Epi growth>	<Trench Etching>	<P-Contact + Reflector>	<Wafer bonding>
상면 (top)				
하면 (bottom)	<Laser Lift Off> Wafer transfer	<u-GaN Etching>	<N-metal depo.>	<Chip 분리>

그림 15. 수직형 LED칩 구조와 웨이퍼본딩을 이용한 제조 공정과정.

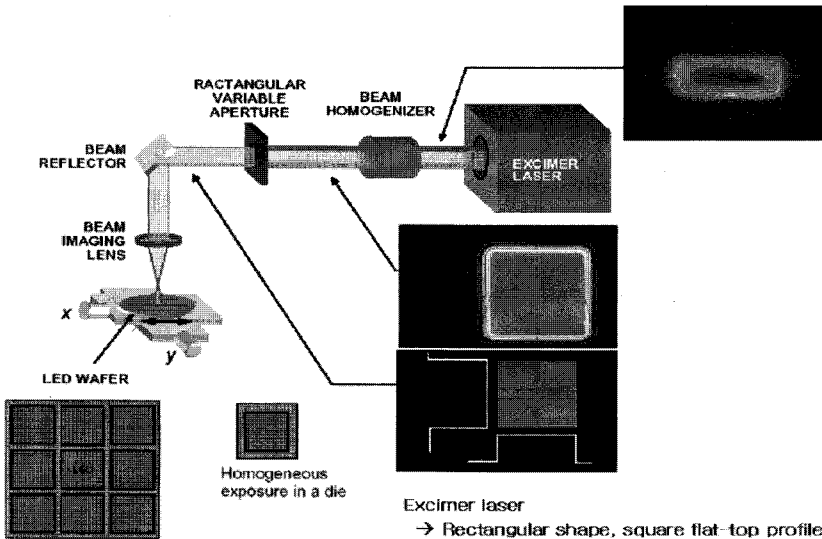


그림 16. LLO방법에서의 레이저 빔 Shape (from JPSA, 2007).

개발되고 있으나 화학적 분리방법은 아직 생산성과 신뢰성에 검증이 더 필요한 상황이다. 그림 16은 LLO 장치의 구조로서 광학적 기구를 이용하여 Excimer Laser의 Beam 형태를 칩 사이즈와 동일하게 하고 빔 전면에 균일한 레이저 파워가 가해지게 하는 광학적 정렬이 필요하다. 보통 레이저 펄스는 수십 나노초 동안 cm^2 당 수백 mJ의 에너지가 가해지는데 한번의 shot으로 칩 분리가 가능할 정도로 강력하다. 보통은 1 shot 1 chip으로 분리하지만 2x2, 3x3 배열을 한번에 커버하여 1 shot multi-chip 분리도 가능하다.

3. 결론

LED는 글로벌 에너지 위기에 대응하고 친환경 정책에 부합하는 미래형 광원으로써 많은 관심을 받고 있으며, 차세대 먹 을거리 산업으로써의 경제 적 가치도 높게 평가되고 있다. 단순 조명이 아닌 기능적 조명으로써 새로운 부가가치를 창출한다는 점에서도 연관 산업 과의 융복합성이 뛰어난 광원이다. 원천특허와 기술을 선점하지 못한 한국 과 같은 후발 진입국 입 장에서는 선진기술의 장

벽을 뛰어넘는 원천기술의 개발이 절실한 상황이며, 최근 LED BLU, Notebook PC, 자동차 등 응용제품의 수요가 폭발적으로 늘어나 생산성이 매우 중요시되는 시점에서 관련 인프라의 확충 또한 시급한 상황이다. 다행스러운 점은 그동안 한국이 반도체와 LCD 산업에서 기술우위를 보이고 있다는 점이며 이들 산업에서 파생된 기술을 활용한다면 멀지 않은 장래에 또 한 번의 산업혁신을 이룰 수 있을 것으로 생각된다. LED산업의 과열현상을 경계하고 내부 경쟁보다



는 대외 경쟁력을 키워야 할 것이며, 소재부품과 장비 등 주변산업과의 고른 발전을 도모한다면 질 좋은 LED산업 강국으로 거듭 날 것이다.

참고 문헌

- [1] Henry Joseph Round, Electrical World 49, 309 (1907).
- [2] Nick Holonyak Jr., et al. Appl. Phys. Lett., 82 (1962).
- [3] Shuji Nakamura et al. J. Appl. Phys., 32, L8 (1993).
- [4] I. Akasaki et al., Appl. Phys. Lett. 48, 353 (1986).
- [5] I. Akasaki et al. Jpn. J. Appl. Phys. 28, L2112 (1989).
- [6] Ok-Hyun Nam et al., Appl. Phys. Lett. 71, 2638 (1997).
- [7] Robert F. Davis et al., J. Cryst. Growth 231, 335 (2001).
- [8] T. Mukai, Jpn. J. Appl. Phys. 41, L1431 (2002).
- [9] M. Craven, et al., Appl. Phys. Lett. 81, 1201 (2002).
- [10] M. K. Kelly, et al., Phys. Stat. Sol(a) 159, R3 (1997).
- [11] W. S. Wong, et al., Appl. Phys. Lett., 72, 559 (1998).
- [12] J. S. Ha, et al., IEEE Photon. Tech. Lett., 20, 175 (2008).
- [13] E. F. Schubert et al., Light-Emitting Diode, 2nd ed. (Cambridge University Press, Cambridge, England 2006).

저자|약력



성 명 : 백종협

◆ 학 력

- 1989년
고려대 재료공학과 공학사
- 1991년
고려대 대학원 재료공학과 공학 석사
- 1999년
고려대 대학원 재료공학과 공학 박사

◆ 경 력

- 1991년 - 1999년 한국전자통신연구원 선임연구원
- 1999년 - 2000년 UC San Diego 박사 후 연구원
- 2001년 - 2002년 Nova Crystal Inc, Member of Technical Staff
- 2002년 - 현재 한국광기술원 LED 소자팀장

