

# 청색혁명의 선두주자 - GaN LED & LD

신 현 민  
삼성코닝 광소재 연구소  
shin@tioz.co.kr

## 1. 서 론

청색혁명(Blue Light Revolution)을 불러 일으키고 있는 GaN (Gallium Nitride)는 3.4eV의 직접 천이형 밴드 갭(direct energy bandgap)을 갖는 광대역반도체(wide bandgap semiconductor)로서 AlN, InN와 더불어 디스플레이 산업에서 조명산업에 이르기 까지 우리들의 생활에 밀접한 영향을 미치고 있다. 흔히 Blue LED (Light Emitting Diode) 혹은 Blue LD (laser diode)라 불리는 GaN는 III-V족 반도체중에서 GaAs에 이어 차세대 반도체라 불리울 만큼 그 실용도와 잠재력이 무궁무진한 재료이다.

1970년대부터 미국과 일본에서 고품질의 GaN 성장을 시도하였으나 단결정 성장에 필요한 GaN의 격자 상수에 부합하는 기판물질이 없었으며 성장기술의 부족으로 1980년대에 들어서면서 MOCVD(Metal Organic Chemical Vapor Deposition)와 MBE(Molecular Beam Epitaxy) 성장법이 도입될 때까지 GaN 성장에 관련된 기술발전이 부진하였다. 1980년 Buffer층 도입에 의한 고품질의 GaN 성장과 p-doping이 가능해짐에 따라 p-n접합에 의한 GaN 청색 LED가 개발되기 시작하였으며 1994년 Nakamura (Nichia Chemical)는 고휘도 청색 발광다이오드를 상용화 하는데 성공함으로써 청색혁명의 장을 열었다.

Wurtzite 결정구조를 가지는 III-V족 질화물계 반도체는 1.9eV(InN)에서 3.4eV(GaN), 6.2eV(AlN)에 이르는 직접 천이형 bandgap을 갖는 반도체로서 가시광선(650 nm)에서 자외선(200 nm)까지의 스펙트럼 영역에서 bandgap engineering이 가능하다. 그에 따라 AlGaInN 고용체의 조성을 조절함으로써 다양한 파장의 발광 및 수광 광소자 제조가 가능하게 되었다. 이중 GaN는 기존의 III-V, II-VI

화합물 반도체에 비해 고온에서 구조적으로 매우 안정하고 AlGaIn/GaN 등의 hetero-structure 제작이 용이하여 고온 고주파 고출력 전자소자로서의 응용에도 용이하다.

현재 GaN 및 AlGaIn/InGaIn를 이용한 청색 LED는 기존에 개발된 GaAs 및 InP계 화합물 반도체를 이용한 녹색과 적색 LED와 함께 충전연색 display를 가능케 하여, 이를 이용한 그래픽 관련 분야에 새로운 바람을 일으키고 있다. 또한 GaN를 이용한 청색 및 자외선 영역의 단파장 LD를 사용할 경우, 기존의 적색 LD에 비해 광정보 처리 및 저장용량을 크게 증대시킬 수가 있다. 또한 GaN 및 AlGaIn를 이용한 수광소자 제작에도 많은 연구가 진행되고 있으며, 이러한 GaN계 자외선 photodiode는 기존의 Si를 이용한 photo-diode와 비교하여 감도 및 효율에 있어서 우수한 특성을 보이고 있으므로 의료용 및 군사용 레이저 등 다양한 분야에서 그 필요성이 증대되고 있다. 더불어 이러한 다양한 소자응용분야 특성에 기인하여 신뢰성 있는 소자개발을 위한 고품질의 GaN을 성장하는 여러 기술들이 개발되어 왔다.

## 2. GaN 성장기술

GaN의 성장은 GaN의 아버지라 불리는 Pankov가 1972년 GaN의 청색 발광소자의 가능성을 보인 이후 1980년대에 급속도로 연구 발전되었다. 소자개발을 위한 단결정의 성장은 GaN 기판이 개발되지 못한 이유로 주로 MBE나 MOCVD에 의해 사파이어( $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ )나 실리콘 카바이드(SiC)등의 격자상수가 매우 다른 기판위에 Heteroepitaxy에 의해 개발되어 왔다. 그러나 이러한 격자상수의 차이와 열팽창계수의 차이로 발생하는 부정합

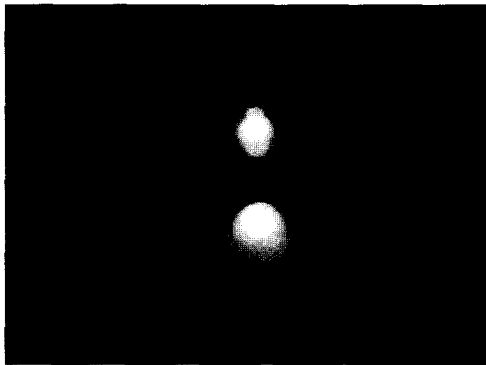


Fig. 1. Nichia에서 개발한 청색 LED.

전위(misfit dislocation)와 전파전위(threading dislocation) 등의 결함으로 소자의 전기적 특성을 저하시키는 결과를 가져왔다. 이러한 문제를 극복하기 위하여 여러 가지 방법들이 개발되었는데 일본 메이조 대학의 Akasaki에 의한 버퍼층(buffer layer)의 도입이 그 하나이다. 격자상수가  $a=0.31$  nm인 AlN를 사파이어나 SiC 위에 100 nm 정도의 두께로 증착시켜 GaN( $a=0.32$  nm)과의 격자상수 차이로 발생하는 응력을 완화시켜 그 위에 고품질의 GaN가 성장될 수 있도록 하였다. 이러한 버퍼층은 AlN 이외에 BN, 저온 GaN, ZnO 등이 사용되어 왔다. 그러나 이러한 버퍼층의 도입만으로는 소자의 특성을 향상시키기에는 충분치 않았다. 그만큼 GaN 자체의 성장이 까다로웠기 때문에 일본 Nichia의 Nakamura의 혁신적인 2채널가스 반응기(two flow reactor)에 의한 백그라운드 도핑수준,  $n \sim 5 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$  와 이동도가  $\sim 600 \text{ cm}^2/\text{Vs}$ 인 고품질의 GaN성장이 이루어질 때까지 상용화는 이루어 지지 않았다. 일반적으로 GaN성장기술을 크게 박막성장기술과 기관용 결정성장기술로 나눌 수 있다. 박막성장기술로는 MBE, MOCVD, HVPE(Hydride Vapor Phase Epitaxy)가 가장 많이 쓰이는 방법이다.

## 2.1 박막성장기술

### - MBE (Molecular Beam Epitaxy)법

MBE의 경우 다른 III-V 반도체 성장기술에서 축적된 know-how로 좋은 성과를 기대하였으나 소자 특성면에서 기대에 못 미치는 수준이었다. 질소분자의 강한 3중

결합으로 초기에는 플라즈마(ECR, RF)를 도입하여 활성화 질소를 만들어 사용하였으나 이후에는 반응성이 높은 암모니아를 사용하기 시작했다. MBE 성장방법의 장점은 CVD 성장방법에 비하여 성장온도가  $700^\circ\text{C}$  이하로 낮고 발전된 in-situ 분석방법을 통하여 성장조건을 체계적으로 조절할 수 있어 적층박막 미세구조를 갖는 소자의 제조에 유리하다는 것이다. 그러나 일반적으로 MBE에 의해 제조된 GaN 박막은 CVD에 의해 성장된 박막에 비하여 성장속도가 느리고 표정상태나 X-ray 회절분석(FWHM)을 통한 결정성이 우수하지 못하고 제조 공정 자체도 재현성이 떨어지는 단점이 발견되었다. 여러 가지 플라즈마원(plasma source)을 사용하여 활성화된 질소원자는 MFP (Mean Free Path)가 짧기 때문에 실제 GaN 성장표면에 도달하는 V족 원소의 양을 조절하는데 성장시스템의 구조에 따라 까다로운 면이 있고 플라즈마원이 작동되는 진공도가  $10^{-5} \sim 10^{-6} \text{ Torr}$  정도이기 때문에 박막의 특성을 향상시키기 위하여 V/III비를 조절할 경우 질소부족영역에서 주로 결정성장이 이루어지기 때문에 성장속도를 증가시키는데 있어서 한계가 있다. 이러한 문제를 극복하기 위하여 V족 원으로 암모니아를 사용하기 시작하였다. 최근에는 고주파소자 제조에 많은 연구가 진행되고 있다.

### - OMVPE (Organometallic Vapor Phase Epitaxy)법

OMVPE 또는 MOCVD법은 GaN 박막성장 방법으로 가장 각광 받고 있는 공정으로 Gallium 공급원으로 TMG (trimethylgallium)나 TEG (triethylgallium)와 같은 저온에서 휘발성이 높은 MO-전구체를 사용하며 Nitrogen 공급원으로 암모니아를 사용한다. 이 같은 MO-전구체의 장점은 높은 휘발성으로 인하여 Ga의 공급을 원활하고 균일하게 할수 있어 Ga액체를 공급원으로 할 때 액체표면에 형성되는 GaN막으로 인해 발생할 수 있는 불균일한 Ga의 공급을 방지하여 미세한 공정조절로 우수한 박막특성을 기대할 수 있다. MOCVD공정의 단점은 MO-전구체의 가격이 높고 MO-전구체가 갖고 있는 탄소에 의한 오염을 들 수 있다. 이러한 탄소오염은 yellow band의 원인으로 작용하기도 한다. 원천적으로 기상반응과 성장하는 GaN 표면에서의 표면반응을 조절

하는 것이 우수한 박막제조의 첩경이지만 반응의 복잡성으로 인하여 공정 자체에 변수가 많다는 것도 제조공정 상 어려운 점의 하나이다. 예를 들어 V/III비, 전체압력, Ga- 혹은 N-공급원의 유속, 성장온도, 운반가스의 종류(수소 혹은 질소), 결정표면에 도달하기전의 기상반응의 유무 등의 변수들이 복합적인 유대관계를 갖고있어 단일변수로서 공정을 조절하는데 어려움이 있다. MBE 공정과의 가장 큰 차이는 MBE 공정에서는 낮은 V/III비에서 우수한 박막이 성장하지만 MOCVD에서는 높은 V/III비에서 우수한 박막이 얻어진다는 것이다. 이것은 암모니아나 수송가스로 사용되는 수소가스가 성장하는 GaN표면의 화학반응에 영향을 준다는 것을 의미한다. 수소가스는 GaN 표면을 에칭 할 때 쓰이는 대표적인 가스이다. 이러한 공정상의 어려움에도 불구하고 LEO (Lateral Epitaxial Overgrowth) 나 PENDEO 같은 결함밀도를 낮추기 위한 최첨단 기술들이 개발되어 우수한 박막을 성장할 수 있게 되었다.

**- HVPE(Hydride Vapor Phase Epitaxy)법**

HVPE는 MO-전구체 대신에 Ga금속을 HCl가스와 반응시켜 GaCl형태로 기관영역으로 수송 시킨다는 점을 제외 하고는 MOCVD 공정과 매우 흡사하다. HVPE 공정은 MOCVD공정에 비하여 저가의 운전비용으로 박막제조가 가능하고 이론적으로 시간당 1 mm의 성장속도를 얻을 수 있어 잠재력이 높은 박막공정으로 평가 받고 있다. 그러나 동시에 몇 가지 단점들이 내재해 있다. HCl 가스를 사용하기 때문에 성장 시스템 내부에 부식 가능성이 있는 재료는 사용이 불가능하며 Ga과 반응하지 않은 HCl이 암모니아와 반응하여 NH<sub>4</sub>Cl이 생성되어 시스템의 저온영역에 축적이 되어 정기적인 클리닝이 요구된다. 박막공정 상 가장 문제가 되는 것은 Ga원의 계속적이고 균일한 공급이다. Ga원의 표면에 GaN가 형성되면 HCl과의 반응을 방해하여 Ga의 공급속도에 변화를 줌으로써 균일한 박막성장에 영향을 준다. HVPE 공정은 빠른 성장속도 때문에 기관용 결정성장에 유리하나 Ga 공급원의 지속적인 Ga 공급과 기상반응을 제어 할 수 있는 반응기의 설계가 고품질의 결정을 성장하는데 있어서 관건이다.

**2.2 단결정기관 성장기술**

기관용 결정성장에 이용되는 방법에는 고압고온성장 방법, 증발-응축방법, Flux 성장방법 그리고 기상운송성장 방법등이 있다. 그러나 현재도 LD제조를 위한 저결함밀도(<10<sup>6</sup>/cm<sup>2</sup>)의 GaN 기관은 상용화 되지 않은 상태이고 세계적으로 GaN 기관을 제조하기 위해 지금도 치열한 연구가 진행되고 있다.

**- 고압고온성장방법(High-Pressure High-Temperature Growth)**

이 방법은 폴란드의 Porowski그룹을 중심으로 연구가 진행되고 있는데 성장속도 향상을 위한 2,000K 정도의 고온과 그 온도에서 열역학적인 GaN의 열분해 영역을 안정한 성장영역으로 끌어내리기 위한 20,000기압 정도의 질소 고압으로 Ga 액체속에 질소를 용해시켜 Ingot 형태의 GaN 보울(boule)을 반응기의 저온영역에서 결정화 시키는 기술이다. 현재 순수한 GaN를 이용한 성장 방법중에서 가장 큰 단결정(~20 mm)을 만들 수 있는 방법이기도 하나 공정조절과 대량생산이 용이하지 않으므로 실용화가 되지 않고 있는 실정이다.

**- 증발-응축방법(Evaporation-Condensation Growth)**

이 방법은 Sublimation 성장법 이라고도 불리며 SiC 단결정 성장에 성공적으로 사용되었던 방법으로 GaN 분말을 원재료로 사용하여 고온에서 증발시켜 Homogeneous 또는 Heterogeneous 핵 생성에 의해 GaN 단결정을 성장시키는 방법으로 1 mm/h의 성장속도와 고품질의 단결정을 제조할 수 있는 장점은 있으나 원재료인 GaN 분말이 모두 소진되었을 경우 재충전 해주어야 한다는 공정상의 단점이 있다.

**- Flux 성장법(Flux Growth)**

이 방법은 NaOH, KOH 등의 알칼리염을 사용하여 Ga을 용해시킨 후 암모니아나 상압보다 약간 높은 고압의 질소 분위기에서 GaN 단결정을 결정화 시키는 방법으로 미국의 Clemson 대학에서 활발히 연구중이다. 결정성이나 전기적 특성은 우수하나 아직 결정크기가 소자제조에 적합한 크기에 다다르지 못했고 제조 공정상

핵 생성의 조절이 용이하지 않아 다량의 다결정이 생성된다는 어려움이 있다.

**- 기상운송성장법(VPT, Vapor Phase Transport)**

Ga 금속을 암모니아 분위기에서 증발시켜 저온영역에서 GaN를 Homogeneous 핵 생성에 의해 성장시키는 방법으로서 지속적으로 단결정을 성장시킬 수 있는 현재까지 알려진 가장 유망한 성장방법이다. 미국의 R. F. Davis 그룹에서 많이 연구되었던 방법으로 Hot wall 반응기를 사용하여 지정된 기판영역 이외의 지점에서 형성될 수 있는 GaN 결정의 성장을 방지하여 Ga과 암모니아의 손실을 최소화 함으로써 성장속도를 증대시켰고 성장된 GaN seed를 이용하여 Seeded growth에 성공한 방법이다. 고온 핵생성법(high temperature nucleation)을 개발하여 핵생성 조절을 통하여 기상반응에 의한 다중 핵생성을 최소화하였고 수소가스에 의한 GaN의 부식을 질소가스의 희석으로 방지하여 5 mm 정도의 단결정을 성장하는데 성공하였다. 상용화가 가능한 GaN 단결정기판을 제조하기 위해서는 공정의 체계화가 더욱 필요하고 재현성 있는 반응기의 설계가 필요한 것으로 사료된다.

**3. 결정결합 저감기술**

현재 소자개발을 위한 박막공정은 많은 연구가 진행되어 왔다. 그럼에도 불구하고 꾸준히 공정개발에 연구가 계속되고 있는 것은 단결정의 결합밀도를 낮추기 위해서이다. 이미 언급한 바와 같이 misfit dislocation과 threading dislocation을 통한 전하의 방전이 소자특성을 저하시키는 치명적인 요인으로 작용하고 있다. LED의 경우 이 결합밀도가  $10^7 \sim 10^8$  정도 되어도 소자작동에는 큰 무리가 없지만 LD의 경우 결합밀도가  $10^6$  이하가 되어야 소자수명이 상용화가 가능한 영역에 들어온다.

단결정 결함을 저감하기 위해 활용되는 방법으로 LEO (Lateral Epitaxial Overgrowth)법과 PE (Pendeo-Epitaxy) 성장법이 개발되었다. 두 방법 모두 결정형태가 hexagonal 인 GaN의 전위성장을 억제하는데 그 중점을 둔다. Hexagonal 결정은 전위 core energy 가 c축

방향으로 가장 높기 때문에 이 방향으로만 전위가 성장하게 된다. 따라서 a축으로의 수평성장을 이용하면 결정 성장시의 전위성장을 최소화할 수 있다. LEO 성장법은 GaAs 반도체 결정 성장에서 사용되는 선택적 결정 성장(selective area growth)기술을 응용한 기술로써 이미 성장된 수  $\mu\text{m}$ 의 GaN 박막 위에 부분적으로 얇은  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Si}_3\text{N}_4$  등을 패터닝하여 다시 GaN를 성장하게 되면 opening부분에서 성장되는 결정이  $\text{SiO}_2$ 나  $\text{Si}_3\text{N}_4$  마스크 위로 수평성장이 고품질의 GaN 단결정을 얻을 수 있다. Nichia는 LEO성장법으로 사파이어위에 LEO-GaN단결정을 형성하고 그 위에 LD를 제작해서 수명을 10,000 시간 정도 증대시킬 수 있었다. PE 성장법은 6H-SiC기판위에 GaN층을 형성한 후 건식예칭방법(가스 :  $\text{Cl}_2$ )으로 6H-SiC기판의 일정부분까지 GaN를 예칭해서, column과 trench를 형성한다. 형성된 column에서 a축 방향으로 수평성장이 일어나 결합밀도가 낮은 GaN 단결정을 제조하는데 LEO에 비하여 제조 공정상  $\text{SiO}_2$ 나  $\text{Si}_3\text{N}_4$  등의 마스크를 사용하지 않아도 된다는 장점이 있다. 미국 노스캐롤라이나주의 Nitronex 에서는 PE성장법을 이용하여 Si 위에 고품질의 GaN 고주파 고온 소자제작에 박차를 가하고 있다. 반면에 위의 두 방법 모두 수평성장이 일어나는 동안 각각의 trench 위에서 일어나는 coalescence 부분의 불일치나 bending 현상 때문에 수율이 떨어지는 문제점이 있지만 현존하는 소자제조 기술 중에서 가장 진보된 성장법이며 저결함밀도의 고품질 GaN를 성장시킬 수 있는 잠재력이 높은 성장방법이다.

**4. GaN응용 및 시장전망**

GaN 반도체 소자에 대한 연구는 LED 개발로부터 시작되었고 현재 LD 와 자외선 수광소자, 고주파 고속 소자에 이르기까지 다양하게 연구되고 있다. 현재 우리의 생활에 밀접하게 다가오는 조명산업 분야에서의 LED와 청색혁명을 가져올 청색 LD 응용성에 대하여 알아보려고 한다.

**4.1 GaN LED (Light Emitting Diode)**

GaN LED의 연구는 1993년말 S. Nakamura의 혁신

적인 연구덕택으로 Icd급의 고휘도 청색 LED가 상용화됨으로써 세계적으로 박차를 가하게 되었다(Fig. 1). 반도체 LED 시장은 그 이후 꾸준한 성장을 거듭해 2000년에는 약 \$6M에 이르렀고, 2010년에는 \$2000M에 가까운 시장이 형성할 것으로 예측된다. 고휘도 청, 녹, 백색 LED는 LED color display에 적용되고 있고 옥내외 광고나 실내외 경기장 등에서의 활용도 점차 증가하고 있는 추세이다. 또한 조명기구, 교통신호등, 자동차 내부전등, 휴대전화 배경조명용 등으로 개발 상용화 되고 있다. 자동차에 사용되는 LED는 주로 계기판, 스위치, 라디오 등에 사용되는 각종 램프들이다. 1980년대 중반에는 미국의 운수성 교통안전국으로부터 LED 광원이 자동차등의 광원으로 인정을 받았다. 1999년 유럽에서 생산된 약700만대의 실내등에 실제로 이를 적용하고 있다. 교통신호등에 주로 사용되는 LED는 적, 황, 녹색이다. 기존의 incandescent 램프가 95%의 전기를 열로 변환시키는데 비하여 LED는 거의 100%에 가까운 에너지 변환율을 갖기 때문에 상당한 에너지 절감 효과를 기대할 수 있다. LED의 교통신호등의 상용화는 1999년 현재 \$13M 정도이지만 그 사용이 전세계적으로 확산될 경우 시장의 성장이 급속도로 성장 할 것으로 예측된다.

백색 LED의 효율과 휘도가 기존의 백열전구나 형광등 수준을 넘어서게 되면 조명기기에 사용되는 거의 모든 램프가 대체될 것으로 예상된다. LED 조명기기가 상용화 될 경우 미국의 에너지부의 연구에 의하면 2025년까지 전세계적으로 전기소비량을 10% 정도 절감할 수 있어 연간 \$10000M 를 절약할 수 있다고 보고하였다. 백색광 제조방법은 청색LED로 형광물질을 발광시키는 방법, 청색과 노랑색의 조합에 의한 백색발광, 그리고 적색, 녹색, 청색 LED를 조합하는 방법 등이 있다. 현재의 백색 LED의 조명효율은 약 20~30 lm/W정도로 일반조명으로 사용하기에는 휘도가 떨어지지만, 해마다 백색 LED의 효율이 점차적으로 증가하여 수 년 내에 기존의 형광등을 대체할 수 있는 제품이 개발될 수 있을 것으로 전망된다. 그러나 백색 LED가 일반조명 시장에서 사용되기 위해서는 몇 개 정도의 LED의 조합이 필요하다. 가격 경쟁력을 고려한다면 형광램프는 \$0.01/lumen 정도인데 반하여 현재의 백색 LED로는

\$0.5/lumen으로 약 50배 정도가 비싸다. 고수명과 저소비 전력을 고려하면 LED 조명이 경제적이지만, 초기 구입 가격이 높으면 시장 진입에 어려움이 따른다. 따라서 가격 경쟁력을 갖기 위해서는 LED 칩의 수를 줄여야 하고 광출력도 높여야 한다. 칩의 광출력을 높이기 위해서는 수 백 mA의 높은 전류로 사용해야 하는데, 이때는 발생하는 열 때문에 결합밀도가 높은 소자는 그 수명이 단축되는 문제가 있다. 이러한 문제 때문에 GaN 결정의 결합밀도를 낮추기 위한 연구가 계속되고 있다. 조명용 LED는 일본의 경우 통산성을 중심으로 “21세기 빛 프로젝트”라는 이름아래 1998년 후반부터 연구가 시작되었고, 미국에서는 최근 에너지부(DOE)를 중심으로 “비전 2020” 프로젝트를 기획하여 반도체 조명에 대한 연구를 시작되었다. 또한 Opto Semiconductors, Agilent, 오스람, 필립스, GE 등의 세계적으로 유명한 조명 기기 회사들이 앞 다투어서 반도체 조명 연구를 시작하고 있다.

1923년에 SiC에서 발광효과가 보고된 이래 1968년에 GaAsP의 3원계 화합물로 된 적색 LED가 양산되어 미국에서 상용화된 이후에 GaAs와 GaP 등의 단결정 성장 기술이 현저하게 발달 된 1980년대 후반에 들어서서야 비로소 에너지 효율이 백열전구 수준을 능가하는 AlGaAs 기술을 이용한 고휘도 적색 LED 가 출현하게 되었다. LED는 백열전구에 비하여 작은 전류로 작동하고 신뢰성이 높으며, 점등 시 발열이 작아 에너지 절감 측면에서 백열전구의 대체가 이미 예견되었다. 1992년에는 AlGaAs 보다 훨씬 휘도가 높고 신뢰성이 높은 InGaAlP 기술이 개발됨으로써 고휘도 적색 및 주황색 LED가 상용화되기 시작하였다. 1993년 말에는 일본의 Nichia Chemical에서 InGaN 고휘도 청색 LED가 개발되었고, 1995년에는 고휘도 녹색 LED가 개발 됨으로써 백색LED의 기초가 되는 빛의 삼원색인 적색, 청색, 녹색 LED가 등장하게 되었다. 1996년에는 청색 LED에 형광물질을 첨가 시켜서 구현한 백색 LED가 개발되었고, 2000년도에는 LED의 성능지수가 형광등보다도 훨씬 좋은 100 lm/W를 능가 하는 고휘도 AlGaInP 적색 LED가 미국의 Agilent사에 의해 개발됨으로써 반도체 조명시대를 예고하게 되었다. 적색 LED의 조명효율이 백열전구에 비하여 200% 이상 높기 때문에 전력소모량도 저감시킬 수 있는 가능성을

보였다. 빛의 삼원색을 구현할 수 있는 고휘도 LED가 모두 개발됨에 따라 대형 디스플레이의 제작에도 LED 열풍이 불기 시작했다.

#### 4.2 GaN LD(Laser Diode)

최초의 LD는 루비레이저가 발명된지 수년후인 1960년대 중반 GaAs를 이용하여 제작되었다. 이때 제작된 반도체 레이저는 Single hetero-junction 소자로서 액체질소 온도(77K)에서 동작하였으며 그 수명도 매우 짧았으나 AlGaAs를 clad 층으로 이용한 double hetero-structure의 발명과 더불어 상온 발진에 성공하였고 소자의 특성 및 수명도 점차 증가하였다. 이후 1980년대 양자우물(quantum well) 개념이 도입되면서 반도체 레이저는 비약적인 발전을 거듭하게 되었다.

GaN 소자는 1960년대 중반에 개발이 시도되었으나 격자정합이 되는 기판의 부재와 p-형 도핑이 불가능하여 개발이 지체되었다. Sapphire 기판 위에 AlN 저온 buffer층을 형성하는 기술이 개발되고, GaN buffer기술, 열처리에 의한 p-형 도핑으로 계승 발전되어 상온 펄스 발진의 청자색 반도체 레이저의 개발로 이어졌다. 1995년에 Nichia사가 개발한 최초의 청자색 LD의 특성은 발진 파장 417 nm, 문턱전류밀도 4 kA/cm<sup>2</sup>, 문턱 전압 34 V로서 실용화되는 거리가 있었다. 이후 Nichia사는 발전을 거듭하여 1년 후인 1996년에는 상온연속 발진에 소자수명 27시간을 발표하였으며, 문턱 전압 값도 10V로 감소시켰다. LD의 수명에 직접적으로 영향을 미치는 인자는 GaN 결정내의 전위밀도이다. 따라서 전위밀도를 낮추는 성장방법의 개발이 고수명의 LD를 개발하는데 중요한 역할을 할 것이다. 미국의 North Carolina대학의 Davis 그룹은 LEO 라고 불리는 결정 성장 방법을 발표하였다. 이 기술은 GaN template 위에 SiO<sub>2</sub> stripe를 패터닝 한 후 결정성장을 하여 SiO<sub>2</sub> 위로 수평 성장된 영역의 전위밀도를 크게 감소시키는 것이다. 2000년에는 마스크가 필요 없는 PE (Pendeo Epitaxy) 성장법을 개발하여 LEO 성장법의 단점을 보완하였다.

Nichia사의 LD 수명은 1997년 초까지 35시간 수준에서 머물다가 같은 해 9월 1,150시간이라는 기록적인 발전을 이룩하였는데 이는 두 가지 새로운 기술, 즉 전술

한 LEO법에 의한 전위밀도 감소와 AlGaN clad층 대신 Modulation Doped Strained Layer Supper Lattice (MDSLS)라는 새로운 구조를 도입하여 성장전후의 가열 냉각에 따른 박막내의 응력을 완화시킴으로써 가능하였다. 여기서 전술한 기술은 전위밀도를 10<sup>4</sup>/cm<sup>2</sup> 수준으로 감소시켰다. 1997년 10월 Nichia는 상용화에 필요한 최소 수명인 10,000시간용 5mW 급 자색 LD 개발에 성공하였으며, 1999년 1월부터 동사는 GaN 청자색 LD 샘플의 시판을 개시하였다.

청색 LD는 광기록 저장장치, projection display장치, 레이저 프린터, 레이저 의료기기 등에 사용될 수 있다. 청색 LD를 사용할 경우 650 nm LD에 비하여 4배 정도 저장능력이 증가된다. 파장이 짧은 고수명 고효율(30 mW급) 청색 LD를 사용함으로써 display의 resolution을 현격히 증대시킬 수 있고 또한 레이저 프린터의 resolution도 현재 1200 dpi 정도에서 2400 dpi 이상도 기대할 수 있어 HP와 같은 회사들이 전력을 다하여 개발에 임하고 있다. 또한 청색 레이저는 수중에서의 전파가 용이하기 때문에 해저 탐지용등의 군사적 용도로도 가능성이 높다. 또한 라식수술에 이용되는 적색 레이저를 대체함으로써 수술의 정밀도를 높일 수 있어 의료용으로도 개발 가능성이 크다. 광통신 분야에서도 기존의 적색레이저 보다 파장이 짧은 청색레이저를 사용함으로써 더 많은 정보를 처리할 수 있어 그 개발에 기대를 걸어볼 만하다.

#### 4.3 GaN Wafer 시장

1993년말 고휘도 GaN LED가 소개된 이후 1999년에는 \$420M의 시장이 형성되었고 연평균성장율이 80% 정도에 이르렀다(Fig. 2). 2009년까지 예측되는 평균성장율은 LED(18.8%), LD(117.6%)로 예측되고 있다.

국내시장에서의 사파이어 기판의 수요량만 보아도 GaN LED 시장의 성장율을 예측할 수 있는데 연평균 wafer 시장의 성장율은 50% 이상으로 예측된다. 에피텔리나 에피플러스 같은 GaN 관련 회사들이 2002년에 사파이어위에 성장한 GaN pseudo-wafer 생산량을 ~4배 정도 규모로 증대시킨 것만 보아도 GaN 소자시장이 기하급수적으로 발달하고 있다는 것을 시사한다.

GaN Wafer 시장은 2004년까지의 평균 성장률이

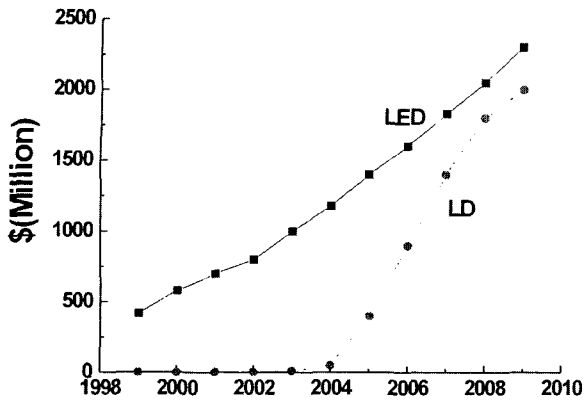


Fig. 2. GaN LED와 LD의 세계시장.

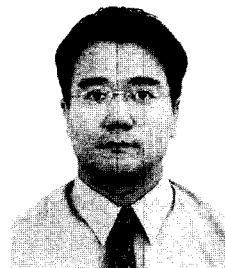
20%에 달하고 있다. 2004년까지의 성장주도는 옥내외 광고판, 휴대폰, 교통신호등, 자동차표시등 등에 사용되는 LED가 주류를 이룰 것으로 예측되나, 그 이후부터는 실용성이 있는 LD의 시장 진출로 인해 광메모리 장치, Display장치 등의 개발을 촉진시켜 LED의 개발제품과 함께 성장을 주도 할 것으로 예측된다. 따라서 이들 전자제품의 시장확장과 함께 Wafer시장도 급성장 할 것으로 예측되고 있다.

GaN 광소자의 방대한 응용분야는 전세계적으로 GaN 성장기술에 대한 연구를 가속시키는 촉진제 역할을 하고 있다. 전세계적으로 GaN 관련 연구는 총300곳 이상의 회사와 학교 그리고 연구소에서 진행되고 있다. 미국 기업은 Agilent Tec., ATMI, Astralux, Cree, APA Optics, Lumileds, Nitronex를 중심으로, 일본에서는 Nichia, Sony, Toyoda Gosei, Matsushita Electronics, NEC등 기업 및 연구기관을 중심으로, 한국에서는 LG, Samsung을 중심으로 연구 및 생산이 활발하게 진행되고 있다. 현재까지 청자색 반도체 레이저의 개발에는 수많은 연구가 이루어져 왔으나 GaN LD의 상용화에 성공한 회사는 미국의 Cree 와 일본의 Nichia 등이다. 그러나 현존하는 저효율 광소자 특성상의 문제를 해결하기 위해서는 결합밀도의 감소와 기관용 GaN의 개발이 관건이다. 특히 고수명, 고출력 청색 LD개발에 있어서 Homoepitaxy만이 유일한 방법이라고 믿고 있는 현재 Wafer 시장의 확대는 피할 수 없는 현실이다. 일본의 Nichia, 미국의 Cree, 한국의 삼성이 GaN를 이용한 광소자 개발에 끊임없는 노력을 기울이고 있지만 향후에

는 고수명, 고출력의 백색LED와 청색LD 그리고 고주파 반도체 소자를 제조할 수 있는 단결정 GaN Wafer의 개발이 GaN 관련 광소자 산업을 주도할 것으로 기대된다. 세계적으로 GaN Wafer의 추세는 SiC나 사파이어위에 LEO 나 PE 같은 침탄기술로 결합밀도를 저하시킨 GaN박막을 이용한 pseudo-wafer이다. 이와 같은 기관들은 LED를 제조하기에는 충분하지만 LD제조에는 아직도 높은 결합밀도를 포함하고 있어 Si wafer 와 같이 GaN 단결정 boule 성장이 시급한 실정이다. 새로운 소자 개발도 중요하지만 가장 기초가 되는 그리고 아직 상용화가 되어있지 않은 wafer의 개발에도 적극적으로 참여함으로써 광소자 및 광소자 개발의 후발국으로서 국제적 경쟁력을 가질 수 있는 기회를 만드는 것도 상당히 중요하다. 따라서 GaN 단결정 성장에 대한 기초연구와 투자가 활발히 이루어져, 도래하는 청색혁명의 시장에 철저히 대비해야 할 것이다.

## 참고문헌

1. S. Nakamura and G. Fasol, "The Blue Laser Diode", Springer-Verlag, p201-222,1997.
2. "Gallium Nitride and Related Wide Bandgap Materials and Devices, A Market and Technology Overview 1998-2003" Elsevier Advanced Technology (Second Edition).
3. "Gallium Nitride-2000" Strategies Unlimited (Mountain View, CA 94040).
4. H. Shin, "Growth and Characterization of GaN Crystals via Vapor Phase Transport", NCSU Ph.D Thesis, 2001.



### 신현민

- 1987년 연세대학교 공과대학 학사
- 1989년 연세대학교 공과대학 석사
- 1993년 Northeastern Univ., MS
- 2001년 North Carolina State Univ., Ph.D.
- 2002년 (주)티오즈 연구소 연구소장
- 2003년 한국 광촉매 표준화 위원회 전문위원
- 2003년 삼성코닝 광소자 연구소 기술자문