

## III-N 질화물 반도체 연구개발 동향

박 중 서\*, 유 태 경\*

(\*LG 종합기술원 소자재료 연구소 OE Team)

### 1. 서 론

III-N 반도체는 LED, LD, Transistor, Photodetector, 그리고 Photocathodes 등 다양한 소자를 실현할 수 있는 소재로서 최근에 크게 각광을 받고 있다[1]. 특히 이 반도체 물질이 제공하는 파장이 지금까지는 존재하지 않았던 청색 파장의 빛을 제공할 수 있기 때문에 인류에게 새로운 영역을 제공하는 것에 큰 의미가 있다고 하겠다. AlN, GaN, InN로 대표되는 이 반도체 군들은, 여러 가지 조합으로 InGaN, AlGaAs와 같은 물질은 구성하는데 이것은 GaAs 반도체 물질에 InGaAs 및 AlGaAs 반도체 성질과 그대로 유추된다. 다만 다른 것은 이들의 3원 혹은 4원 화합물은 주로 wurtzite 결정 구조를 갖는다는 것이고, 적색 (Eg(InN) ~2.0 eV)에서 자외선 (Eg(AlN) ~6.0 eV) 전 조성 영역에서 직접천이형 밴드 구조를 갖기 때문에 매우 다양한 광소자를 구현하는데 적합하며, Band gap이 큰 특성으로, 매우 높은 열적 안정성을 가지므로 고온, 고출력 반도체 transistor 소자에도 적합하다는 것이다.

이런 훌륭한 물질 특성을 갖고 있었음에도, 90년대초까지는 거의 화합물 반도체계에는 등한시 되었었는데, 이것은 양질의 결정을 얻기가 매우 힘들었었고, 이에 대한 해결책을 ZnSe반도체에서 찾고 있었기 때문이었다. 93년 말 일본의 두 기관 Nichia 및 Akasaki group이 고 휘도 LED 보고 후 관심이 집중되었으나, 새로운 물질에 대한 기술이 거의 know-how에 가까워서 대부분의 기술 개발 과정이 선두한 두 회사에 의해 이루어지고 있다. 이것은 다른 반도체, GaAs, InP 등의 역사를 볼 때 매우 특이한 상황이다. 그러나, 기술의 발전 속도가, 최근 5~6 여년 동안 III-N 반도체 연구개발은 예상되는 것을 훨씬 추월하여 비약적 발전을 거듭하였고, 고휘도 청색, 녹색 LED는 이미 상용화되어 실내의 Full Color LED Display, 교통 신호등, 백색 조명, 식물 재배 응용, 의료용 기기 등 그 응용 범위를 넓혀 가고

있다. 2mW급 청자색 LD의 경우 최근에 10,000 시간 상온 연속 발진으로 샘플이 출하되고 있으며, 상용화 문턱에 이르고 있다. 청자색 LD의 대표적 응용으로는 광 디스크의 광원으로 DVD의 차후 세대인 광원으로서, 광기록 밀도를 약 2.5 배 증가시킬 수 있기 때문에 차세대 광 디스크 장치를 개발하기 위한 첫 단추이기도 하다. 한편 Rewritable DVD용으로 사용하기 위해서는 광출력을 20~30 mW까지 향상시키는 것이 요망되고 있다. 현재, 어렵게 샘플 정도가 가까운 시일내에 가능하리라 기대되지만, 이런 상용화 샘플의 수준을 볼 때 완전한 상용화까지는 아직 특성 개선이 많이 요구되는데 이 부분이 LD에서 가장 힘든 부분이라 하겠다.

국내의 연구 개발 동향은 비교적 제한되게 발달되어 온 것 같다. 94년 연구소에는 MOCVD 기법에 의해 화학 연구소에서 GaN 단일 층에 대한 연구가 진행되고 있었고, LG 종합기술원에서 MOCVD를 이용한 소자 개발이 진행 중을 시작으로 국내에서도 III-N 반도체 연구가 시작되고 있었으나, 대부분의 주력 연구가 ZnSe 반도체에 집중하고 있었고, 96년이 지나서야 III-N 반도체 연구로 무게 중심이 옮겨지게 되었다. 초기에는 MBE(Molecular Beam Epitaxy)로 소자 개발이 진행된 연구실은 현재 대부분 정리되었고, 최근에는 대학 중심으로 GaN 전자 소자용으로 MBE 연구가 다시 태동되는 것 같다. 그러나, 현재까지 GaN 광 소자는 MOCVD만이 가능하였고, MOCVD로도 그 성능은 천차 만별이다. 국내에서도 청색 LED의 경우 96년에 LG 연구소에서 처음 개발 보고를 시작으로 활성화 되었고, 청자색 LD의 경우 99년에 LG 와 삼성에서 상온 연속발진을 달성하고 계속 성능 향상에 전력 투구하고 있다.

본 논문에서는 III-N 질화물 반도체 소자 개발의 핵심 기술인 MOCVD 박막 성장과 그 물질 특성에 대해 알아 보고, III-N 반도체 LED, LD의 소자 특성과 개발 방향 현황을 살펴 보고자 한다.

## 2. MOCVD 결정 성장

신소재로서 최근에야 주목을 받는 III-N 반도체는 사실 개발 역사가 매우 오래된 III-V 반도체이다. AlN은 1907년에 합성되었으며[2], GaN의 결정 구조는 1937년에 이미 보고된 바 있다[3]. 1969년에 Maruska와 Tietjen이 HVPE (Hydride Vapor Phase Epitaxy)를[4], 1971년에 Manasevit가 MOCVD를[5] 각각 이용하여 (0001) 사파이어 기판 위에 GaN 박막 성장에 성공하였다.

현재까지 MBE를 포함한 거의 모든 박막 성장법이 사용되었지만, MOCVD가 가장 GaN 반도체의 박막 성장에 적합한 방법으로 보고 되어왔다. III-N 반도체의 MOCVD 박막 성장에는 III족 precursor로는 TMGa, TEGa, TMIn, TMAI, V족 precursor로는 NH<sub>3</sub>, 도핑 소스로는 N형에 SiH<sub>4</sub>, Si<sub>2</sub>H<sub>6</sub>등이, P형에 (bis)cyclopentadienyl Mg 등이 주로 사용되고 있다. 기판으로는 사파이어(Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>)가 가장 널리 사용되고 있으며, 이외에 SiC, MgO, BeO, ZnO, GaAs, Si, LiAlO<sub>2</sub>, MgAl<sub>2</sub>O<sub>4</sub>(spinel) 활발히 시도되고 있다. 특히 SiC는 GaN과의 격자불일치가 ~3%로 비교적 낮고(Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>의 경우 ~13%), 전도성 기판이 가능하고, 열전도성이 좋고, cleaving이 용이해 사파이어의 단점을 보완하는 기판으로 많은 기대를 받고 있다.

III-N 반도체 박막 성장의 가장 큰 걸림들은 고품질의 GaN 기판이 없다는 점이다. 주로 사용되는 사파이어 기판과 GaN과의 격자불일치는 무려 13%나 되어, 초기 GaN 박막 성장은 그 격자불일치와 기판과의 화학적 불일치로 인해서 3차원 hexagonal island surface morphology를 나타내었다[6]. 따라서 그 광학적, 전기적 성질이 매우 열등하였으며, 또한 P-형 도핑이 불가능하여 소자 재료로서 부적합한 것으로 인식되었다[1]. MOCVD 박막 성장에 큰 전기를 마련한 것은 저온에서 얇은 buffer층을 성장시킨 후 고온에서 GaN 박막을 성장시키는 "2 단계 박막 성장법"의 개발이었다[7]. Akasaki는 사파이어 기판에 AlN buffer층을 이용하여 GaN 박막의 결정성을 비약적으로 개선시켰다[7]. background carrier level을 N ~3x10<sup>17</sup>/cm<sup>3</sup>로 끌어 내려 무려 100 배, Mobility는 300K에서 ~400 cm<sup>2</sup>/Vs 이리러 10 배 정도 향상시켰다. 그 후 Nichia의 Nakamura는 사파이어 기판과 GaN buffer층을 사용하여 GaN의 결정성을 더욱 개선하였다[8]. (0001) C-face 사파이어 기판을 H<sub>2</sub> 분위기에서 ~1050°C 까지 가열하여 기판 위의 산화막을 제거한 후, 다시 400 ~ 600°C로 냉각시켜 약 200Å 두께의 GaN buffer층을 성장시켰다. 이어 기판의 온도를 1000~1030°C까지 상승시킨 다음 GaN 박막층을 성장시켰다. 이러한 "2 단계 박막 성장법"을 이용하여, background carrier level을 N ~4x10<sup>16</sup>/cm<sup>3</sup>, Mobility는 300K에서 600 cm<sup>2</sup>/Vs, 77K에서 1500 cm<sup>2</sup>/Vs 로 향상시켰다. 최근에 이러한 AlN와 GaN buffer이외에 InGaN 및 이들의 다층조합으로 이루어진 저온 buffer가 여러 연구 그룹에서 시도되고 있으며

거의 대등한 결과를 나타내고 있다[33].

이러한 background carrier level의 향상은 N형 혹은 P형 도핑 조절할 수 있는 필요 조건을 만족시켰다. N형 도핑의 경우 Si를 Ga 격자점에 대치시켜 비교적 쉽게 얻을 수 있는데, MOCVD에서는 SiH<sub>4</sub>나 SiH<sub>6</sub>를 도핑 소스로 일반적으로 사용한다. GaN에서 Si activation energy는 ~15meV 정도로 매우 낮아 쉽게 이온화되며, 향상된 10<sup>16</sup>/cm<sup>3</sup> 정도의 back ground doping level으로 10<sup>17</sup>에서 10<sup>20</sup>/cm<sup>3</sup> 영역의 Si doping level을 조절할 수 있다. P-형 도핑의 성공은 III-N 반도체를 소자 재료로 격상시키는 주요한 전기를 마련한 것이었다. Amano와 Akasaki는 (bis)cyclopentadienyl Mg를 사용하여 도핑시킨 후, low energy electron beam irradiation (LEEBI) 공정을 이용하여, Mg acceptor를 활성화 시키는데 성공하였다[9]. 그 후 Nakamura는 N<sub>2</sub> 분위기에서 thermal annealing(700 ~800°C) 공정으로도 Mg를 활성화시키는 것이 가능하다는 것을 보였으며[10], 현재 이 방법이 널리 사용되고 있다. 그렇지만 GaN에서 Mg의 activation energy가 160 meV로 높아 자유 홀의 밀도를 P ~10<sup>18</sup>/cm<sup>3</sup> 이상으로 높이는 것이 매우 어렵다. MOCVD로 성장되는 GaN:Mg 박막은 H<sub>2</sub> 분위기에서 성장되므로, 쉽게 Mg-H complex를 형성하며, Mg acceptor state가 수소에 의해 passivation 된다. Mg-H complex에서 수소의 activation energy는 그리 높지 않아, 수소는 N<sub>2</sub>분위기에서의 thermal annealing으로 분리가 가능하게 된다[11]. 최근 특히 문제와 관련하여 O<sub>2</sub>를 부분 기체로 사용하면 열 처리 없이 p-type을 얻는다고 보고, 질소 분위기에서 Mg doped GaN을 성장시키면 p-type을 얻는다는 것, 400도 미만에서 UV 광원을 조사하면 p-type이 가능하다는 다양한 방법이 제시되고 있다.

III-N 반도체 광소자에서 활성층 물질로 많이 사용되는 것은 InN와 GaN의 3원 혼정물질인 InGaN이다. InGaN 박막층은 InN의 증기압이 GaN에 비해 매우 높으므로 GaN의 성장 온도(~1050°C) 보다 낮은 700~850°C에서, In의 incorporation을 높이기 위해 N<sub>2</sub> 분위기에서 성장된다. InGaN이 광소자의 활성층을 구성하므로, 성장조건의 최적화로 고품질의 박막을 성장하는 것은 매우 중요하다. 일반적으로 높은 In 구성비를 얻기 위해서는 InGaN의 성장온도를 낮추어야 하고 이는 결과적으로 InGaN의 결정성 및 광학적 성질을 열악하게 한다. 그렇지만 적색 LED의 실현도 보고된 바 있어 III-N 반도체의 무한한 가능성을 보게 한다[12]. III-N 반도체 광소자에서 클래드층은 band gap이 크고 굴절율이 낮은 AlGaIn을 주로 사용한다. AlGaIn은 일반적으로 GaN과 같은 온도에서 성장되며, 높은 Al구성비에서 도핑이 용이하지 않은 단점이 있다. Davis 등은 SiC 기판 위에 LP-MOCVD를 이용하여, Al의 구성비를 5%에서 70%까지 성장하여 그 전기적 성질을 조사하였는데, Background carrier level이 undoped Al<sub>0.05</sub>Ga<sub>0.95</sub>N의 경우 N~1.0x10<sup>18</sup>/cm<sup>3</sup>이나, undoped Al<sub>0.35</sub>Ga<sub>0.65</sub>N의 경우 N~1.0x10<sup>16</sup>/cm<sup>3</sup>으로, Al 구성비가 증가함에 따라 급격히 감소함을 보고하였다. 또한 N형 도핑의 경우 Al 구성비가 40% 미만에서 2.0x10<sup>17</sup> ≤ N ≤ 2.0x10<sup>19</sup>/cm<sup>3</sup>의 비교적 광범위의 도핑 영역을 얻었으며,

표 1. 동작 전류 20 mA에서의 Nichia LED의 특성. 실험실 수준의 특성으로 상업용 LED specification과는 차이가 있다. 괄호 안의 수치는 상업용 LED specification이고, 녹색 LED의 경우 실험실 수치는 초기 개발 시 Data로 보여짐.

	소자 구조	중심 파장 (nm)	FWHM (nm)	동작 전압 (V)	광출력 (mW)	External Quantum Efficiency (%)
자색 LED	DH	385	10	-	1	1.5
	QW	405	20	-	5.8	9.2
청색 LED	DH	450	70	3.6	3	5.4
	QW	450 (470)	20	3.1	5 (3)	9.1
청녹색 LED	DH	500	80	3.5	1	2.1
녹색 LED	QW	520	30	-	1 (2)	2.1

P형 도핑의 경우 Al 구성비가 13% 미만에서만 P형 전도성이 가능하였음을 보고하였으나[14], 좋은 광소자를 구현하기 위해서는 25~30%에서도 p-type을 얻는 결정 기술의 확보가 요구된다. 특히 III-N 반도체 물질은 매우 까다롭기 때문에 연구실마다 다른 실험치를 보고하고 있어서 의미있는 기술을 검증하는 논문 및 기술자료는 매우 드물다 하겠다.

### 3. GaN 반도체 LED

초기 III-N 반도체 LED는 InGaN/GaN(혹은 AlGaIn) 활성층의 DH 구조로 개발되었다. 1994년 Nichia는  $In_{0.06}Ga_{0.94}N/Al_{0.15}Ga_{0.85}N$  DH 구조의 고휘도 청색 LED를 개발하여 상용화에 성공하였다[14]. 활성층은 두께가 약 500Å이고, Zn/Si으로 이중 도핑하여 D-A recombination을 유도함으로써 발광효율을 높였고, P형 전극은 Ni/Au, N형 전극은 Ti/Al으로 구성되었다. 소자 특성은 20mA 표준 구동 전류에서 중심 파장 450nm, FWHM 70nm,  $V_{op}$  3.6V, 광출력 1.2mW, external quantum efficiency 1.6% 등으로 15° conic viewing angle에서 약 2.5 cd의 휘도를 얻었다. 이러한 DH LED는 EL spectra의 FWHM이 넓어 색상이 선명하지 못하며, 활성층이 두꺼워 In의 구성비가 높아질 경우 의한 광효율의 감소로 녹색 LED의 구현이 불가능하였다. 이 구조로 최대 청녹색(500nm) LED까지 가능하여 신호등에 이용되고 있다[15].

이러한 DH 구조의 단점을 극복하고 광효율을 증가시키기 위해 양자우물(Quantum Well) 구조의 활성층이 질화물 반도체 LED에 도입되었다. 양자우물층과 양자벽층의 두께는 InGaIn의 In 조성비 critical thickness 내에서 조정됨으로써 원리적으로 InGaIn 결정질의 열등화 없이 높은 In 조성이 가능하다. InGaIn 양자우물층은 N, P형 AlGaIn barrier층으로 둘러 쌓여있고, 그 두께는 20~30Å, P형 전극은 Ni/Au, N형 전극은 Ti/Al으로 구성되었다[16]. 이러한 QW LED 구조로 Nakamura는 5mW급 청색, 2mW급 녹색, 0.5mW급 황색 LED를 구현하였고[15], 최근에는 5mA 구동 전류에서 적색 발광까지 보고하였다[12]. 표 1에서 볼 수 있듯이, 양자우물 구조의 도입으로 LED의 장파장화와 함께

광효율의 증대를 이룰 수 있었다. 또한 청색 LED chip에 YAG phosphor를 코팅하여 청색과 보색 관계인 황색 발광을 내어 LED chip에서 발광하는 청색광과 합쳐 백색광을 얻는 방법으로 백색 LED를 구현하였다. 이 백색 LED의 발광 효율은 5 lm/W로서 백열 전구의 5배, 형광등의 1/4 정도이다[15].

III-N 반도체 QW LED에서는 InGaIn 양자우물층의 "stress free band edge emission"에 비해 EL emission은 red shift한다. 녹색 QW LED의 경우 InGaIn 양자우물층에 사용된 In의 조성비는 43%로서 "stress free band edge emission"은 490nm이나, 실제 EL 발광 파장은 525nm으로 밴드 에너지 차이가 170meV에 이른다. 또한 LED의 구동 전류가 증가함에 따라서 EL 중심 파장이 blue shift한다. 이러한 특이한 현상은 아직 완전히 규명되지 않았으나, piezoelectric field에 의한 Quantum-confined stark effect[32]와 InGaIn 양자우물층에 In 조성의 불균일성에 의한 "localized state"의 형성 등으로 설명되고 있다[12,17].

한편 Nichia에서 상업용으로 판매하는 청색, 녹색 LED의 광출력 specification은 각각 3 mW, 2mW로서 실험실 수준과는 차이를 나타내며, Nichia외에 Cree, Toyodagosei, HP, LG 등이 청, 녹색 LED 생산에 참여하고 있는데, 광출력은 현재 청색은 2~2.5 mW, 녹색은 1 mW 정도에 이르고 있는 수준이다. 그림1은 현재 양산 중인 LG의 고휘도 청색 LED로 중심 파장 470nm에 광출력은 2.5 mW급이다.

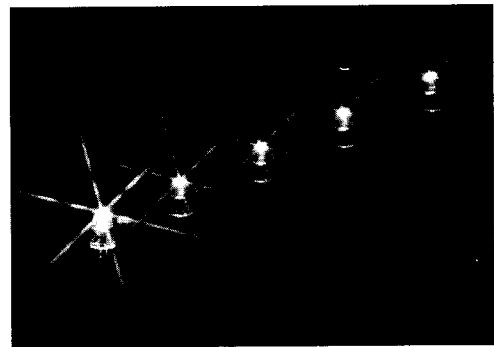


그림 1. LG에서 생산 중인 고휘도 청색 LED. 광출력은 중심파장 470nm에서 2.5 mW이다.

#### 4. 질화물 반도체 LD

첫 번째 III-N 반도체 LD는 1996년 Nichia에 의해 성공되었다[18]. 이 LD 구조는 2.5nm의  $In_{0.2}Ga_{0.8}N$ 의 양자우물과 5.0nm의  $In_{0.05}Ga_{0.95}N$  양자벽으로 구성된 26 주기의 MQW 활성층과,  $Al_{0.12}Ga_{0.88}N$ 의 p형과 n형 클래딩층, Ni/Au p형, Ti/Al n형 전극으로 이루어졌다. LD의 크기는  $30 \times 1500 \mu m$ 이며, Laser 거울은  $Cl_2$  플라즈마 RIE를 이용하여 형성되었다. 상온에서 펄스 구동으로 임계전류밀도는  $4kA/cm^2$ , 발진 파장은  $\sim 417 nm$  (FWHM  $\sim 1.6 nm$ )였다. 이어 ridge LD 구조의 적용으로 소자 특성의 커다란 향상을 하였으며[19], 마침내 같은 해에 상온 연속 발진에 성공하였다[20]. LD 구조는 3 주기  $In_{0.05}Ga_{0.95}N/In_{0.2}Ga_{0.8}N$  활성층에,  $4 \mu m \times 700 \mu m$  ridge 구조를 가졌으며, Laser 거울은 RIE에 의해 형성되었고 임계전류를 낮추기 위해 거울면은 HR coating(30%)되었다. 이 때 파장은  $\sim 411nm$ , 임계 전류밀도는  $9 kA/cm^2$ , 임계 동작 전압이 8 V였다. 그러나 LD 발진 시 열생성이 너무 커 수명이 1초에 불과하였다. 계속적인 에피 및 공정의 최적화로, 특히 ohmic contact과 도핑 프로파일의 향상으로 동작전압을 5 V 대로 낮추는데 성공하여 수개월 만에 수명을 35 시간으로 향상시키는데 성공하였다[21].

앞서 언급된 바와 같이 GaN 에피의 가장 큰 결함은 고품질 격자일치 기판이 없어, hetero 에피를 해야 한다는 점이다. 따라서 GaN 에피층의 격자불일치에 의한 threading dislocation의 밀도가  $10^8 \sim 10^{10}/cm^2$  정도로 매우 높다. 이러한 높은 결함 밀도에도 불구하고 고효율 광소자가 실현된다는 것은 여러 방향으로 설명되고 있지만 아직도 이론적으로 규명되지 않은 부분이다[22]. 그렇지만 소자의 수명 향상을 위해서는 이 결함밀도를 줄이는 것이 타당한 방향으로 보여진다. 현재 여러 방향이 모색되고 있는 데, 대표적인

것이 HVPE로 성장한 GaN 기판[23]과 LEO(Lateral Epitaxial Overgrowth) 기법[24,25]이다. HVPE는 에피성장율이 매우 높아 두꺼운 GaN film을 성장시키기에 적합하나, surface morphology와 기판과 에피층의 strain에 의한 크랙의 발생을 제어하는 것이 난점이다. LEO는  $SiO_2$ 나  $SiN_x$ 와 같은 유전체 stripe mask에 GaN을 옆 방향으로 성장시켜 mask 위에 성장된 GaN에서 threading dislocation을 제거하는 기법이다. 1997년 Nichia의 Nakamura는 AlGaIn 클래딩층의 개선과 LEO 기판을 이용하여 10,000 시간 상온 연속 발진에 성공한다[26]. (그림 2는 LEO 기판 위의 LD 구조를 도시한다.) 이때 임계전류는 90mA( $4 \times 550 \mu m$  cavity), 임계 동작전압은 4.6 V로 개선되었고, 발진 파장은 401.5 nm, 거울면 당 광출력은 2 mW 이었다. 이어 MOCVD로 성장된 LEO GaN 에피층에 다시 HVPE 두꺼운 GaN film 성장시키고 이어 사파이어 기판을 lapping하여 제거한 free standing GaN 기판을 이용하여 다소 성능을 개선하였다[27].

Nichia의 독주 속에서도 많은 연구 기판이 LD 개발에 참여하여 많은 성과를 거두고 있다 (표 2 참조). Fujitsu, NEC, Cree, Xerox 등이 상온 연속 발진에 성공하였고, 국내적으로는 LG종합기술원과 삼성 기술원이 최근에 상온 연속 발진에 성공을 거두었다. 그림 3는 최근 상온 연속 발진에 성공한 LG의 청자색 LD로서 5 MQW InGaIn/InGaIn의 활성층에  $4 \times 400$  ridge 구조이며, 임계 전류 밀도는  $9 kA/cm^2$ , 파장은 403 nm, 동작 전압은 10 V이다.

이러한 최근의 급격한 LD의 개발 속도가 당분간 이어지리라 전망된다. Rewritable DVD 등에 적용하기 위해서는 20~30 mW의 고출력화와 동작온도의 범위도  $-10^\circ C \sim 60^\circ C$ 로 확장이 필요하다. 현재 주로 에피층의 최적화로 임계 전류 밀도를 낮춰 LD 동작시 열방출량을 줄이는 방향과, 또한 전도성 기판을 이용한 P-형 전극을 heat sink에 부착시키는 junction down bonding 방법이 모색되고 있다[34]. 전도성 기판으로는 주로 N형 SiC 기판이 유망한 후보 중의 하나이고, 최근에는 HVPE로 성장시킨 두꺼운( $100 \mu m$  이상) GaN film을 기판으로 활용하는 방안이 연구되고 있다[35]. Free standing GaN 기판의 개발은 이러한 소자 구조적 측면에서의 잇점 뿐만 아니라 에피층의 질도 향상시켜, LD에 있어서는 고출력화와 함께 파장을 현재의 청자색에서 장파장 영역으로 확장시킬 수 있으리라 예상된다. LED의 경우에도 마찬가지로 고출력화와 장파장화가 가능하리라 보이며, 특히, 고효율, 고출력 백색 LED의 출현은 기존의 조명 체계의 판도를 뒤바꾸게 될 것이다. 그렇지만 아직 양질의 free standing GaN 기판을 얻기 위해서는 많은 노력이 필요하며, 이의 성공은 III-N 반도체에서의 '2 단계 박막 성장법', 'P-형 도핑의 성공'에 이은 또 한번의 혁명이라 할 수 있겠다.

#### 5. 결론

III-N 반도체는 최근 몇 년간 괄목할 만한 소자 개발

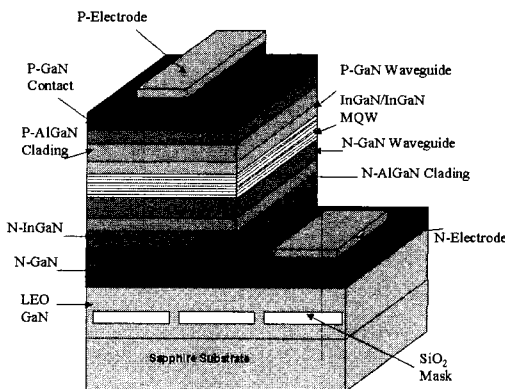


그림 2. LEO 위의 LD 구조. p-전극은  $SiO_2$  mask 위의 LEO GaN 위에 위치한다.

표 2. 자색 질화물 반도체 개발 현황

회사	발표 일자	소자구조	소자크기 ( $\mu\text{m}$ )	임계전류밀도 ( $\text{kA/cm}^2$ )	동작온도 ( $^{\circ}\text{C}$ )	동작조건	인용 논문
Nichia	96/12/23	3 InGaN/InGaN MQW c-Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Stripe 30x700	9	20	CW/1sec	[20]
Nichia	98/3/15	4 InGaN/InGaN MQW ELO GaN/c-Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Ridge 3x450	5	20	CW/10 <sup>4</sup> h	[21]
Cree	97/12/1	8 InGaN/GaN MQW 6H-SiC	Stripe 5x500	21	21	CW/30sec	[28]
NEC	99/2/15	3 InGaN/InGaN MQW FIELO GaN	Ridge 3x440	11	20	CW	[29]
Fujitsu	99/5/1	3 InGaN/InGaN MQW 4H,6H-SiC	Ridge 3x500	4	25	CW/57h	[30]
Xerox	99/7/26	5 InGaN/InGaN MQW c-Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Ridge 3x750	8	20	CW/1.1h	[31]
삼성	99/6/15	InGaN/InGaN MQW c-Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	-	-	20	CW	
LG	99/10/1	5 InGaN/InGaN MQW c-Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Ridge 4x400	9	20	CW	

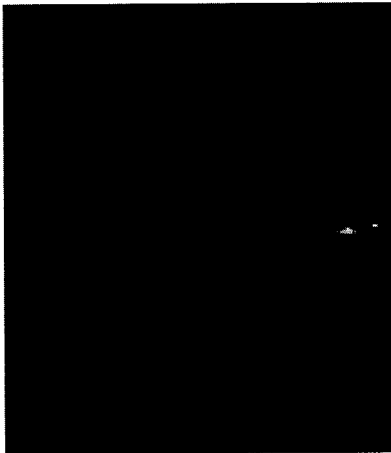


그림 3. LG의 청자색 LD.

성과에서도 보여 지는 바와 같이 매우 잠재력이 큰 소재이다. 현재 개발된 LED, LD의 고효율, 고출력화에 따른 새로운 응용 범위의 확장과 함께, 파장 영역이 자외선에서 적색에 이르고 있어 앞으로 광범위한 응용이 예상되고 있다. 또한 III-N 반도체에 대한 기초적 이해가 더욱 요망되며, 이것은 이미 발전된 실용적 기술과 결합하여 III-N 반도체의 응용 범위를 더욱 더 넓히게 될 것이다.

참고문헌

[1] R.D. Dupuis, J. Crystal Growth 178 (1997) 56.  
 [2] F. Fitcher and Z. Anorg. Chem. 54 (1907) 322.  
 [3] J.V. Lirman and H.S. Zhdanov, Acta Physicochim. USSR 6 (1937) 306

[4] H.P. Maruska and Tietjen, Appl. Phys. Lett. 15 (1969) 327  
 [5] H.M. Manasevit and W.I. Simpson, J.Electrochem. Soc. 118 (1971) C291  
 [6] S.N. Mohammad and H. Morkoc, Prog. Quant. Electr. 20 (1996) 361  
 [7] H. Amano, N. Sawaki, I. Akasaki, and Y. Toyoda, Appl. Phys. Lett. 48 (1986) 353  
 [8] S. Nakamura, Jpn. J. Appl. Phys. 30 (1991) L1705  
 [9] H. Amano, M. Kito, K. Hiramatsu and I. Akasaki, Jpn. J. Appl. Phys. 28 (1989) L2112  
 [10] S. Nakamura, N. Iwasa, M. Senoh and T. Mukai, Jpn. J. Appl. Phys. 31 (1992) 1258  
 [11] S.J. Pearton et al, J. Electrochem. Soc. 142 (1995) L163  
 [12] S. Nakamura, Electronic Materials Conference, 1999, UC-Santabarbara, USA  
 [13] R.F. Davis, T.W. Weeks Jr., M.D. Bremser, S. Tanaka, R.S. Kern, Z. Sitar, K.S. Ailey and C. Wang, in Gallium Nitride and Related Materials, MRS Symp. Proc. Vol. 395 (1996) 3  
 [14] S. Nakamura, T. Mukai and M. Senoh, Appl. Phys. Lett. 64 (1994) 1687  
 [15] S. Nakamura and G. Fasol, " The Blue Laser Diode", 1st ed. (Springer-Verlag, Heidelberg, 1997)  
 [16] S. Nakamura, T. Mukai and M. Senoh, J. Appl. Phys. 76 (1994) 8189  
 [17] T. Wang, D. Nakagawa, M. Lachab, T. Sugahara and S. Sakai, Appl. Phys. Lett. 74 (1999) 3128  
 [18] S. Nakamura, M. Senoh, S. Nagahama, N. Iwasa, T. Yamada, T. Matsushita, H. Kiyoku and Y. Sugimoto, Jpn. J. Appl. Phys. 35 (1996) L74

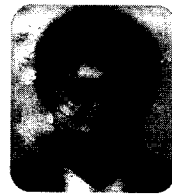
- [19] S. Nakamura, M. Senoh, S. Nagahama, N. Iwasa, T. Yamada, T. Matsushita, Y. Sugimoto and H. Kiyoku, Appl. Phys. Lett. 69 (1996) 1477
- [20] S. Nakamura, M. Senoh, S. Nagahama, N. Iwasa, T. Yamada, T. Matsushita, Y. Sugimoto and H. Kiyoku, Appl. Phys. Lett. 69 (1996) 4056
- [21] S. Nakamura, M. Senoh, S. Nagahama, N. Iwasa, T. Yamada, T. Matsushita, Y. Sugimoto and H. Kiyoku, Appl. Phys. Lett. 70 (1997) 2753
- [22] F.A. Ponce, "Optoelectronic Properties of Semiconductors and Superlattices" Vol. 2 (Gordon and Breach Science Publisher, 1997) p. 141
- [23] M. Kelly, R.P. Vaudo, V.M. Phanse, L. Gorgens, O. Ambarker and M. Stutzmann, Jpn. J. Appl. Phys. 38 (1999) L217
- [24] O.H. Nam, M.D. Bremser, T.S. Zheleva and R.F. Davis, Appl. Phys. Lett. 71 (1997) 2472
- [25] J. Park, P.A. Grudowski, C.J. Eiting and R.D. Dupuis, Appl. Phys. Lett. 73 (1998) 333
- [26] S. Nakamura, M. Senoh, S. Nagahama, N. Iwasa, T. Yamada, T. Matsushita, Y. Sugimoto and H. Kiyoku, T. Kozaki, H. Umemoto, M. Sano and K. Chocho, Jpn. J. Appl. 36 (1997) L1568
- [27] S. Nakamura, M. Senoh, S. Nagahama, N. Iwasa, T. Yamada, T. Matsushita, Y. Sugimoto and H. Kiyoku, T. Kozaki, H. Umemoto, M. Sano and K. Chocho, Jpn. J. Appl. 37 (1998) L309
- [28] Fall MRS Proceeding V.482 (1997) 1169
- [29] M. Kuramoto, C. Sasaoka, Y. Hisanaga, A. Kimura, A. Yamaguchi, H. Sunakawa, N. Kuroda, M. Nido, A. Usui and M. Mizuta, Jpn. J. Appl. 38 (1999) L184
- [30] A. Kuramata, S. Kubota, R. Soejima, K. Domen, K. Horino, P. Hacke and T. Tanahashi, Jpn. J. Appl. 38 (1999) L481
- [31] Michael Kneissl, David P. Bour, Chris G. Van de Walle, Linda T. Romano, John E. Northrup, Rose M. Wood, Mark Teepe, and Noble M. Johnson, Appl. Phys. Lett. 75 (1999) 581
- [32] J. Im, H. Kollmer, J. Off, A. Sohmer, F. Scholz and A. Hangleiter, Mat. Res. Soc. Symp. Proc. 482 (1998) 513
- [33] R. Kern, W. Gotz, C. Chen, H. Liu, D. Steigerwald, P. Martin, S. Rudaz, G. Christenson, C. Kuo and R. Fletcher, in Proceedings of the 2nd Int'l Sympo. on Blue laser and Lighting Emitting Diodes, (1998) 433
- [34] T.K. Yoo, Y.H. Choi, M. Yang, M.H. Kim, J.H. Yi, C.K. Kim, and S. T. Kim, in proceedings of CLEO/Pacific Rim (1999)
- [35] S.T. Kim, Y.J. Lee, D.C. Moon, C.H. Hong, and T.K. Yoo, J. Crystal Growth (1998) 37

## 저 자 소개



**박중서 (朴仲緒)**

1961년 12월 4일생. 1985년 서울대 물리교육학과 졸업. 1995년 미국 Auburn University, 이학박사(전공 반도체 물리학). 1996년 미국 University of Texas at Austin, Microelectronics Research Center, 연구원 역임. 현 LG 종합기술원, 소재재료 연구소, Optoelectronics Team, 책임 연구원



**유태경 (劉泰京)**

1960년 3월 6일생. 1983년 서울대 전자공학과 졸업. 1985년 한국과학기술원 졸업(석사). 1989년 한국과학기술원(KAIST) 졸업(공학). 1991년-92년 미국코넬 대학. 1989년-1992년 금성 중앙연구소 (현 LG 종합기술원) 선임연구원/팀장. 1993년-현재 LG 종합기술원 책임연구원/실장