

# GaN 광원의 應用과 主要 課題

홍 창 희

전북대학교 반도체 물성연구소 반도체 과학기술학과

## I. 서 론

현재 새로운 반도체 재료로서 각광을 받고 있는 wide bandgap 반도체는 제 1세대 Si과 제 2세대 GaAs, InP등의 화합물 반도체에 이어 제 3세대로 통하는 B, N, C 등의 輕元素계 III족 화합물 반도체 물질이다. 이 반도체 재료는 두 가지 화학원소의 bonding energy가 크고 열 전달계수가 높아 종래의 어려웠던 고압, 고온, 고주파 등의 극한상황에도 동작하는 반도체소자 구현이 가능하게 할 수가 있어 전세계 전자 산업에 미치는 파급 효과가 엄청날 전망이다. 이러한 wide bandgap 반도체중에서 GaN계 물질은 직접 천이형 energy bandgap을 갖기 때문에 청색을 비롯 가시광 대역으로부터 자외선 영역까지의 광원을 구현 할 수 있는 특징을 가지고 있다[그림 1]. GaN광원 개발은 1970년 전후부터 연구가 시작되어 1993년 12월 말 일본의 니치아 화학공업이 종래의 청색 발

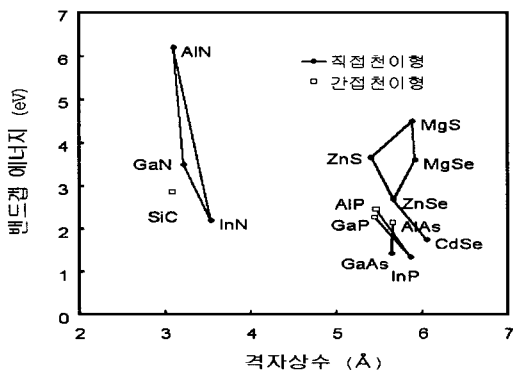
광다이오드(lighting emitting diode:LED)보다 100배나 밝은 1칸델라급 휘도를 가진 고휘도 청색 LED를 개발에 성공하고 1997년 10월 말 10000 시간 상온 발진 성공한 청색 레이저 다이오드 (laser diode:LD)가 나오기 까지 약 30년의 세월이 걸렸다. 적외, 적색 반도체 LD가 실용되고 있는 현재, 지금까지 실용화에 미치지 않고 있는 GaN를 이용한 청색 및 자외영역의 단파장의 반도체 LD가 실현된다면 차세대의 영상, 정보매체의 고밀도화와 의료, 계측 및 군사 등의 여러 분야에 의 획기적 응용이 기대되고 있다.

본 논문에서는 GaN 광원의 다양한 응용을 소개하고 향후의 시장 전망과 기술상의 문제점 및 해결에 대해서 서술 하겠다.

## II. GaN 광원의 應用과 시장 展望

### 1. LED에의 應用

GaN 광원의 대표적인 응용 예로서는 전광판용 청색 및 녹색 광원이다. 1994년 초 일본의 니치아 화학에서 개발한 고휘도 청색 LED가 시장에 본격적으로 등장함에 따라 적색, 황록색, 청색을 이용한 총천연색 표시가 비로소 가능하게 되었다. 그러나 GaP를 이용한 황록색 LED는 적색LED, 청색 LED보다 훨씬 휘도가 낮고 발광 파장이 550~570nm정도로 순수한 녹색이 아니기 때문에 진정한 총천연색 표현에는 한계를 보였다. 이러한 난점은 1995년에 역시 일본의 니치아 화학이 총천연색 표시에 적합한 파장이 525nm인 고휘도 녹색GaN



(그림 1) 밴드갭 에너지와 격자상수의 관계

LED를 생산함으로써 해결되게 되었다. 따라서 CRT방식보다 LED디스플레이로써 더욱더 장수명, 고휘도, 고신인성을 갖는 고품질의 충전연색 표시가 가능함에 따라, 현재 큰 건물 벽면에 설치할 수 있는 초대형 충전연색 옥외용 LED 영상 디스플레이가 속속 등장하게 되었다.

디스플레이 이외에도 적색, 황등색, 청/녹색의 고휘도 LED를 이용한 새로운 시장으로 부각되고 있는 곳은 교통기기 분야이다. 종래의 신호기보다 직사광에 따른 시인성이 뛰어나고, 전력소모를 1/10로 줄일 수가 있고, 5년 이상의 장수명이 보장되는 장점이 있어, 최근 미국, 일본, 유럽 등에서는 적극적으로 LED 신호기를 도입하려는 움직임이 일고 있다. 특히 위도가 높아 직사광 문제가 심각한 북미에서 LED신호기의 보급이 심각히 고려되고 있고 일부에서는 설치 운행 중이다. 한편 일본에서는 LED 신호기의 규격화를 진행시키고 시험 운행 중에 있다. 전세계의 신호기가 2000만대 정도인데, 신호기 한 대당 LED가 약 150개가 소요된다고 보면 고휘도 청/녹색LED의 가격이 현재 약 1 \$이라고 보면 앞으로 이 분야의 시장 규모를 가히 짐작 할 수가 있다. 그러나 현재는LED의 가격이 높아 본격 도입을 저해하는 하나의 원인이 되기도 한다. 한편 LED의 발광 성능지수가 15 lumens/watt를 넘어 백열전구(incandescent lamp)를 대체할 수 있는 정도까지 개선되어서 마침내 LED 램프가 출현하게 되었다[그림 2].

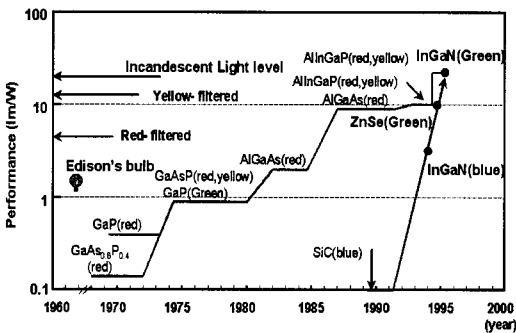
또한 빛의 삼원색인 적색, 녹색, 청색의 광원을 조합하면 백색 광원을 만들 수가 있고, 그밖에 조

합 조건에 따라 색을 자유롭게 변화 시킬 수 있어서 LED 램프에 인한 다양한 간접 조명 기기에의 응용을 점칠 수가 있다. 더욱이 1996년 9월 니치아 화학 회사에서 고휘도 청색 LED칩 위에 YAG (Yttrium.Alumium.Garnet)계 형광물질을 증착하여 백색 광원 제조에 성공했다고 발표했는데 그의 밝기가 자동차 실내등의 반 정도로 알려져 있다. 이와 같은 결과는 초저전력, 고신뢰성의 장점을 바탕으로 앞으로 고휘도 백색LED램프를 조명에의 이용을 앞당길 수 있는 획기적인 일로 평가가 된다. 그 밖에 가전, 정밀기기에의 응용, 칼라 복사기, 액정 패널용 광원 등의 칼라 사무기기에의 응용, 식물의 생리 작용까지도 정밀하게 제어하려는 농업에의 응용도 미래에 기대되는 기술의 하나이다.

## 2. LD에의 應用

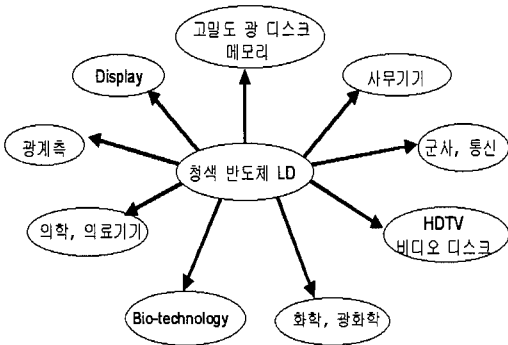
LD 파장을 단파장화 하는 것에는 두가지의 중요한 의미가 있다. 첫번째로는 간섭광의 높은 집광성과 두번째로는 단파장의 광이 장파장의 광에 비해 1개의 광자가 갖는 에너지가 커지는 성질이다. 우선 위에서 언급한 집광성이 우수한 성질을 이용한 분야로서는 광 디스크의 고밀도화 기술이다. 현대의 멀티미디어 시대가 갖는 특징으로 미루어 볼 때, 차세대의 영상, 정보매체의 다양화에 적극 대응하기 위해서는 대용량 광 기록 재생 시스템이 불가결하게 된다. 따라서 가까운 장래에 크게 공급될 DVD(Digital Versatile Disk 혹은 Digital Video Disk), 고화질 TV(HDTV)의 비디오 시스템을 위해서는 광디스크의 고밀도화 기술이 선행되어야만 한다. 이를 위해서는 픽업(pick-up)의 광원인 LD가 가장 중요하다. 종래의 780nm 혹은 670nm대의 반도체LD를 이용한 CD-ROM, 현재 동화상 135분을 저장시키기 위해 635~650nm대의 적색 반도체LD를 이용한 제 1세대 4.7 Gbytes DVD 시스템, 나아가서 2000년 이후에나 상용화될 예정인 410nm대의 청색 LD를 이용한 제 2세대 15 Gbytes DVD 시스템의 구현은 LD의 단파장화에 따른 대표적인 예가 된다.

또한 두 번째 성질인 광자의 에너지가 큰 것을



〈그림 2〉 연도별 가시광 LED의 발광성능지수

이용하여 얻을 수 있는 기술은 레이저 프린터의 고속화이다. 레이저 프린터에는 광도전체가 이용되고 있지만, 광도전체의 파장에 따른 감도와 광원인 레이저 파장과의 정합성이 고속화 과제가 되고 있다. 일반적으로 광도전체는 단파장에 대하여 고감도를 갖는 것이 많다. 따라서 청색LD의 실현은 광도전체를 선택하는 자유도를 증대 시킴으로써, 레이저 프린터의 고속화에 커다란 공헌을 할 것으로 여겨진다. 한편, 그 밖에 광 계측, 광 화학, 생물학, 생체, 의료, 군사 등의 계측, 반응 및 평가, 진단 등의 분야에도 커다란 파급 효과를 미칠 것으로 기대된다[그림 3].



(그림 3) 청색 반도체 LD의 응용범위

청색 LD는 위와 같이 간섭성이 좋고, 컴팩트한 광원으로서 광자의 에너지가 크기 때문에 물질의 여기와 특정의 반응을 촉진하는 광원으로서 이용될 수도 있다. 예로서, 특정한 항원의 고정과 정량화가 가능하게 되고, 질병의 예측과 예방에 대응할 수 있는 장비의 개발이 가능하게 될 것으로 여겨지며, 일반적으로 색소는 단파장에 고감도를 갖는 것이 많으므로 청색LD는 그와 같은 색소에 대하여 양호한 여기 광원으로서도 이용될 수 있다.

3. 광 검출기에의 應用

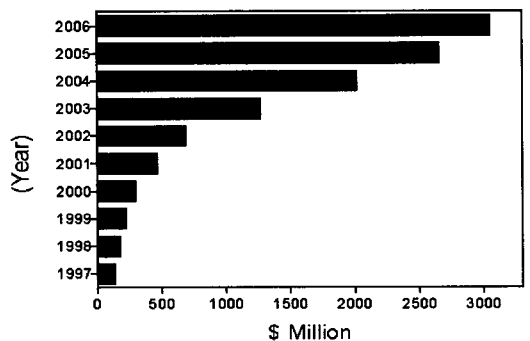
GaN반도체의 자외선(UV) 광 검출기로서의 응용으로서는 환경, 우주 및 군사 등의 영역에서 측정과 감지 목적으로 다양하게 이용될 수가 있다. 현재 오존, SO<sub>2</sub>등의 대기 오염을 감시하고 검지하

는 응용 시스템의 광원을 엑시머 레이저(248nm) 광원 대신에 GaN계 소형 광원으로 구현하려는 연구가 진행되고 있다. 또한 우주 연구에서는 UV영역에서 원자 공명 관찰을 통해 궤적시의 형성과 진화를 이해 하기 위한 노력이 NASA를 중심으로 이루어지고 있는데 UV 스펙트로스코피, UV 카메라 등이 좋은 응용의 예이다. 군사적 목적으로 크게 대두되는 것은 미사일 방어 시스템을 위한 성능이 우수한 UV 광 검출기의 구현이다. 현재 미국방성을 중심으로 "Solar blind, UV detectors"를 위한 새로운 기술 구현에 많은 투자를 하고 있는데 GaN가 가장 주목 받고 있는 프로그램중의 하나이다. 이 밖에 연소(combustion) 검지, 불꽃(frame) 검지, 엔진의 불완전 연소(flame-out) 검지 등 UV 광 검출기의 응용은 광 계측, 광 화학, 항공, 자동차 등의 영역에도 파급 효과가 크며, 관련된 광 기술 분야에 많은 공헌을 할 것으로 기대된다.

4. 시장 展望

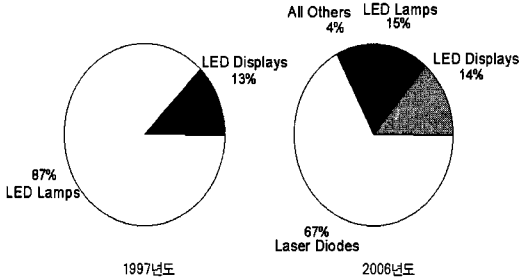
GaN계 소자의 시장 형성은 주로 LED램프, 초천연색 LED 디스플레이, LD, UV 광 검출기, 전자 소자 등이 이루고 있으며, 세계 시장 규모는 1997년에는 1.44억불에 불과했으나 이후 연 40%이상의 초고속 시장 성장에 따라 2006년에는 약 30억불 이상 해당 할 것으로 예상되어진다 [그림 4].

초기 2001년 전 까지 광 소자의 시장 점유율은



(그림 4) 연도별 GaN 소자의 예상 시장 규모

주로 청/녹색LED가 주축을 이룰 것이며 2001년 이후에는 청색 LD로 대체 될 것으로 예상 된다. 또한 전자 소자 시장은 2000년 이후에나 형성될 것이라고 기대되어 진다[그림5].



(그림 5) GaN component market revenue

### III. GaN 광원의 技術 現況

GaN계 물질에 대한 연구는 1932년 W.C. Johnson등에 의해 처음으로 GaN 결정 합성에 성공 하였고, 1969년 Maruska등에 의해 VPE방법으로 GaN박막 성장, 1971년 Pankove가 청색 GaN LED의 가능성을 보고한 이래, 약 30년 동안 비약적인 발전을 거듭하였다. 가장 많이 연구되는 GaN 박막 성장 기술로는 분자선 증착(MBE)과 유기 금속 화학 증착법(MOCVD)인데 현재 MOCVD기술이 훨씬 앞서 있다.

고휘도 청색 LED의 성공에도 불구하고 GaN기술상의 가장 큰 문제점은 GaN기판의 부재로 인한 GaN 고품질 박막 성장, P형 도핑 기술 등으로 나눌 수가 있다. GaN기판으로는 주로 사파이어와 SiC가 쓰이고 있는데, 가격과 규격면에서 사파이어가 아주 유리하기 때문에 대부분 사파이어가 기판으로서 사용한다. 그러나 GaN와 사파이어기판 사이에는 약 14%라는 극도의 커다란 격자상수 부정합과 약 26%의 열팽창 계수 차이 때문에 고품질의 GaN박막 결정을 얻는 것이 매우 어렵다. 1986년 까지는 고품위 GaN 박막성장 기술 개발이 미진하였으나 Akasaki의 AlN와 Nakamura의

GaN를 buffer층으로 사용한 고품질의 GaN박막 성장 성공은 GaN 물질 연구에 활력을 불어 넣었다.

한편 p형의 GaN경우 1970년대 초반부터 Mg, Zn 혹은 Cd등을 acceptor로 첨가하면 고저항화하는 것으로 알려졌으며, 완전한 p형의 전도성을 나타내는 결정은 실현되지 않았다. 1989년 Amano 등은 고저항 Mg-GaN에 저가속전자선조사(low energy electron beam irradiation: LEEBI)처리를 하므로써 처음으로 p형 결정을 얻는데 성공하였다. 이후 Nakamura등은 단순 열처리방법을 개발함으로써 저저항의 p형 결정을 얻을 수 있었다.

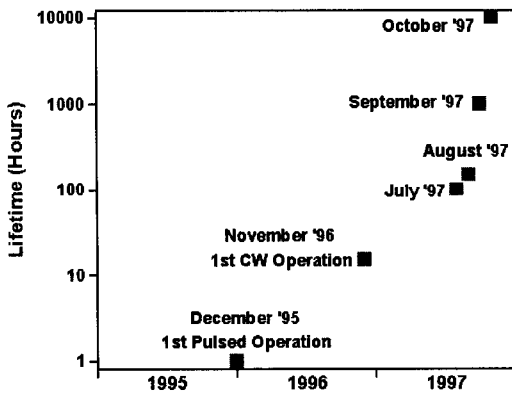
상기의 두개의 관점, 즉 고품질 결정 제작 기술의 확립과 저저항 p형 결정의 실현에 의하여 GaN계 단파장 발광소자의 효율과 특성은 비약적으로 향상되었다. 또한 박막 성장 기술 발달과 더불어 표면의 평활성이 향상되므로써 급격한 계면을 갖는 AlGaIn/GaN와 AlGaIn/InGaIn DH(double heterostructure)구조의 제작도 가능하게 되었다. 1993년 말 마침내 니치아 화학에서 Si, Zn codoped InGaIn를 활성층으로 1 칸델라급 고휘도 청색 LED구현에 성공 함으로써 상용화의 길을 터 놓았다. 표1은 니치아 화학의 GaN LED에 대한 기술 개발 현황을 나타내었다.

활성층에 DH구조 대신 단양자우물 구조(single quantum well)를 도입 함으로써 외부양자효율이 9%까지 높였고, InGaIn의 In 조성비를 50%까지 높혀 525nm의 순수 녹색 LED를 구현하기까지 이르렀다. 이와 같은 DH로 부터 전류 주입에 의한 레이저 발진은 아직 실현되지 않고 있지만, 고밀도 광여기에 의한 유도 방출이 관찰되므로써 이를 이용한 청색 LD의 실현 가능성은 가시화 되었다.

마침내 1995년 12월 니치아 화학의 Nakamura에 의해 MQW InGaIn을 이용한 최초의 펄스 구동의 청색 LD가 발전되었다. 이때 파장은 417nm, 문턱 전류는 1.7A, 문턱 전압은 34V이었다. 이후 2년이 못 미쳐 상용화를 이룰 수 있는 10000시간의 상온 연속 발진을 이루는 신기원을 이루었다. 그림 6는 니치아 청색 LD의 milestone을 나타내었다.

〈표 1〉 니치아 화학의 청/녹색 LED 기술 연혁

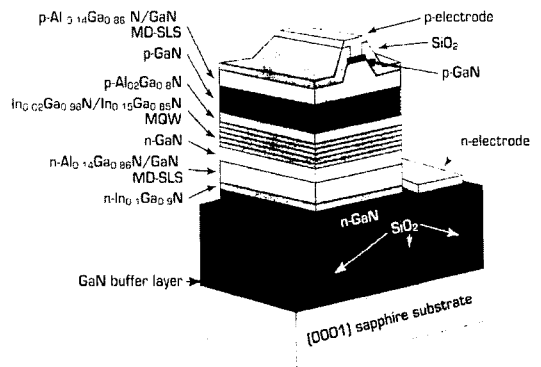
Dates	Structure	Color (Wavelength)	Extrnal Quantum Efficiency	Luminous Efficiency Lumens/Watt	Output Power @20mA	Luminous Intensity (Candela)	Doping	Indium Percent	Active Layer Thickness
11/93	DH	Blue (450nm)	2%~5%	2	2mW	1cd	Co-doped Zn, Si	5-7	500Å
4/94	DH	Blue-green (500nm) (traffic light)	5%	4	1mW	2cd	Co-doped Zn, Si	15	1,000Å
10/94	DH	Blue (450nm)	5%	4	3mW	2cd	Co-doped Zn, Si	5-7	1,000Å
9/95	SQW	Blue (450nm)	9%	27	5mW	2cd	None	30	30Å
9/95	SQW	Green (525nm)	6%	18	3mW	6~10cd	None	30	30Å



〈그림 6〉 니치아 화학의 청색 LD 발전의 milestone

이러한 결과는 박막 성장에서 중요한 두가지의 기술이 도입되었다. 첫번째로는 p-clad층에 AlGaIn대신에 MS-SLS(modulation-doped strained-layer superlattice)을 사용함으로써 크랙 방지와 optical confinement의 개선, modulation doping에 의한 동작 전압의 감소를 이루었다. 또한 박막의 결정 결함을 줄이기 위한 방법으로 ELOG(Epitaxial Laterally Overgrown GaN) 기판 사용이다. 위 기판은 사파이어 위에 0.1 $\mu$ m의 두께 SiO<sub>2</sub>로 주기가 12 $\mu$ m, 폭이 4 $\mu$ m인 stripe window를 만들어 그 위에 두께 20 $\mu$ m이상의

GaN를 성장 시키면 lateral overgrowth가 일어나 기판 전면에 평탄한 GaN가 만들어 진다. 이때 ELOG기판의 EPD(etch pit density)가 약 2×10<sup>7</sup>/cm<sup>2</sup>정도로 종래의 사파이어 위에 기른 박막 결정 결함 수보다 약 2 order가 낮아졌다. 그림7은 니치아 화학의 ELOG기판과 MD-SLS 크래드층을 사용한 새로운 LD구조이다.



〈그림 7〉 MD-SLS 구조와 ELOG 기판을 사용한 새로운 청색 LD 구조

거울면은 건식 식각으로 만들었고, 공진기 길이는 약 550 $\mu$ m, 문턱 전류는 90mA, 동작 전압은 4.6 V로 GaAs LD에 접근하는 우수한 특성을 나타내었다.

## IV. 向後의 技術 課題

## V. 맺음말

고휘도 청/녹색 LED 실현, 상온 연속 발진의 LD 구현에도 불구하고 좀더 GaN계 물질의 고유 특성을 잘 이용하기 위해서는 해결해야 할 과제가 아직 많이 남아 있다. 좀더 고품위 GaN 결정의 구현이다. Nakamura 등이 ELOG기판 사용 혹은 buffer층의 최적화로 GaN결정 결함 밀도가 약  $10^6 \sim 10^7/\text{cm}^2$  까지 줄였으나 아직 많이 개선할 필요가 있다. 사실상 defect-free GaN를 구현 하기 위해서는 GaN 기판 위에 homoepitaxy를 하는 것이 해결책이다. 그러나 종래의 화합물 반도체처럼 GaN boules을 seed로 이용 결정 성장 하는 것이 불가능 하기 때문에 GaN 기판 만드는 것이 매우 어렵다. 현재 S. Porowski 등이 고온( $1,400 \sim 1,600^\circ\text{C}$ ), 고압( $\sim 20\text{Kbar}$ )에서 solution method로 판형 GaN 기판 제작에 성공하였으나 크기가 9mm에 지나지 않는다. 또한 HVPE방법으로 bulk GaN를  $350\mu\text{m}$  이상 성장 시켜 기판 상용화를 시도하고 있으나 crack, 결정 품질 및 전도성 등을 보다 더 향상시켜야 한다.

두번째로 해결 할 중요한 과제는 low activation energy를 갖는 p형 dopant를 찾는 일이다. 현재까지 알려져 있는 shallowest acceptor로서는 Mg인데 activation energy가 160meV이다. 따라서 원하는 hole농도를 조절하기 위해서는 Mg를 약 2 order 이상을 doping 해야 하기 때문에 heavy doping에 의한 carrier scattering로 인해 low mobility와 high resistivity를 나타내게 된다. 앞으로 Mg이외 molecular compound 즉, Be-O와 같은 donor-acceptor pair의 이용도 고려해 볼만 하다.

그밖에 결정결함 밀도가 약  $10^9 \sim 10^{11}/\text{cm}^2$  되는 상용 LED에서의 광학적 거동과 결정 결함과의 관계, LD에서 유도 방출 기구와 결정 결함과의 관계 등 여러가지 물리적 현상의 이해가 확실히 이루어져야 하며 공정 기술상 앞서 있는 과제와 물성의 제어 및 규명에 좀 더 많은 기초 연구가 이루어져야 한다.

차세대 반도체로서 기대되고 있는 GaN계 질화물 반도체를 중심으로 GaN 광원의 다양한 응용을 소개하고 향후의 시장 전망과 파급효과, 기술상의 문제점에 대해서 서술 하였다. 불과 몇 년전 까지 만 해도 꿈이라고 생각하였던 청색 LD 상용화가 현실로 다가오고 있다. 작년 10월 말 니치아 화학의 Nakamura의 실온에서 연속 발진 수명이 10000시간을 돌파한 GaN청색 LD의 결과는 우리에게 가까운 장래에 가시영역은 물론 자외선영역에서 동작하는 반도체 LD의 실용화가 이루어 질 수 있게 하였고, 나아가서 적외,가시, 자외에 걸쳐 임의의 파장영역에서 간섭성이 우수한 반도체 광원을 이용할 수 있음을 보여주고 있다. 현재 GaN 고휘도 청색 LED가 몇몇 회사의 상용화에 따라 GaN광원 연구가 일본, 미국의 각 대학, 연구소, 회사를 중심으로 전력을 기울이고 있다. 또한 올해 안으로 니치아 화학에서는 DVD용 청색 LD 시제품을 출시하겠다고 공언하고 있다. 여하튼 우리나라도 LG, 삼성등의 회사와 KRISS, KIST등의 연구소를 중심으로 어느 정도 GaN에 관한 선행 근간 기술이 확보되어 있는 상태이므로 GaN 연구에 좀 더 집중적인 투자가 이루어 진다면 GaN 광원의 연구에 우리도 선두 대열에 참여할 수 있으리라 기대를 한다.

## 참 고 문 헌

- [1] S. Strite et. al., "GaN, AlN, and InN: A review", J. Vac. Sci. Technol. B, Vol. 10, No. 4, pp1237~1266, 1992.
- [2] S. Nakamura et. al., "Present status of InGaN/GaN/AlGaIn-based Laser Diodes", Proc. 2nd ICNS, paper s-1, pp444~445, Oct. 1997.
- [3] M.G. Craford, "LEDs challenge the

- Incandescents”, IEEE Circuits & Devices Magazine, pp 24~29, Sep. 1992.
- [4] Strategies Unlimited, Gallium Nitride-1997, -Technology status and application analysis, Market forecast, 3월, 1997.
- [5] J. I. Pankove et. al., “GaN blue lighting-emitting diodes”, J. luminescence, 5, pp 84~86, 1972.
- [6] S. Nakamura et. al., “GaN growth using GaN buffer layer”, Jpn. J. Appl. Phys., Vol. 30, No. 10A, pp L 1705 ~ L1707, 1991.
- [7] S. Nakamura et. al., “Highly P-typed Mg-doped GaN films grown with GaN buffer layers”, Jpn. J. Appl. Phys., Vol. 30, No. 10A, pp L 1708 ~ L1711, 1991.
- [8] S. Porowski et. al., “GaN crystals grown in the increased volume high pressure reactors”, Mat. Res. Soc. Symp. Proc. Vol. 449, pp35~40, 1997.
- [9] S. Nakamura et. al., The Blue Laser Diode, Springer, chapter 14, 1997.
- [10] Compound semiconductor, Vol. 3 No. 6, Nov./Dec. 1997.

## 저 자 소 개



### 洪 昶 憲

1956년 12월 10일생, 1984년 2월 고려대학교 전자공학과 졸업(공학사), 1986년 2월 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 졸업(공학석사), 1991년 2월 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 졸업(공학박사), 1986년 3월~1991년 2월 한국과학 기술원 조교, 1991년 5월~1994년 7월 미국 미시간 대학교 전기 전산 공학과 Research fellow 1994년 8월~1998년 2월 LG 종합기술원 책임연구원, 1998년 3월~현재 전북대학교 반도체 물성연구소, 반도체 과학기술학과 교수, <주관심 분야 : 1. III-V족 MOCVD 에피 성장 및 광전소자, 2. GaN 에피성장 기술 및 소자 응용, 3. Blue/UV 광소자 개발 등>