

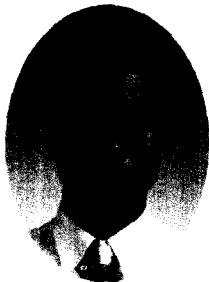
단파장 광전소자용 Wide Bandgap 화합물반도체의 연구현황



심규한
한국전자통신연구원 회로
소자기술연구소 선임연구원
주관심분야: Wide bandgap
화합물반도체, 고온/고전력
내환경 전자소자



조경익
한국전자통신연구원 회로
소자기술연구소 책임연구원
주관심분야: 평판디스플레이,
2차전지, 강유전체소자



백문철
한국전자통신연구원 회로
소자기술연구소 책임연구원
주관심분야: Wide bandgap
화합물반도체, 전자현미경학

1. 서 론

Si와 Ge을 1세대 반도체로 하고, GaAs, GaP, InP등의 화합물 반도체를 2세대로 하면, GaN를 중심으로 하는 III-V족의 WB (Wide Bandgap) 화합물반도체는 3세대로 분류될 정도로 중요한 위

치를 차지한다. WB화합물반도체는 에너지밴드갭이 Si 나 GaAs의 1.1 eV, 1.4 eV보다 높아 약 2 eV 이상의 넓은 값을 갖는 반도체 재료를 뜻하며, 이 중에는 BN, AlN, GaN, InN 등이 있다. 이러한 WB 화합물반도체는 녹색-청색-자외선 광전소자에 이용될 수 있고, 또한 물리화학적으로 안정하므로 고온/고전력의 내환경소자로써 활용할 수 있으며 응용영역은 표1과 같이 매우 방대하다. 현재에는 청색발광다이오드, 청색레이저다이오드, 자외선 수광다이오드, 고전력 고주파증폭기 등의 소자가 이미 상용화되고 있다.

GaN계 화합물반도체의 발견은 오래전에 이루어졌으나 그 응용성에 대해서는 최근에 연구되기 시작했으며, 초고속 발전은 최근 8년 사이에 일본 Nichia사의 S. Nakamura팀에 의해 주도적으로 이루어졌다. 그들은 1994년에 최초로 청색발광소자를 상용화하였

고, 1998년초에는 10000 시간동안 상온에서 연속발전하는 청색레이저를 성공적으로 발표하였다.

그밖에 미국의 APA optics사와 Hewlett-Packard사, 일리노이주립대, Santa Barbara의 캘리포니아주립대, NASA Lewis연구소의 연구팀들이 GaN계 화합물반도체의 기술우위를 확보하기 위해 전략적 연구를 수행하고 있으며 유럽의

표 1. WBG 화합물반도체의 응용분야.[1]

	소자	응용분야
광 소 자	발광 다이오드	옥외용 천연색 디스플레이, LED TV, 백색광원, 교통신호기, 자동차표시등
	레이저 다이오드	광디스크 (CD-ROM, DVD), 복사기, 프린터, 바코드 인식기
	수광 다이오드	가시광선과 적외선에 무감한 자외선센서, 미사일추적센서, 플라즈마분석기기, 수중통신기기
전 자 소 자	MES FET	마이크로파 및 밀리미터 파 전력증폭기, 고전력/고주파 스위치, 자원 탐사용 기기, 예진모니터/조정회로, 배기장치회로
	SIT	칩, 전자제동 제어회로 칩, 화염 모니터
진 공 소 자	Cold cathode	전계방출 디스플레이,

독일, 스웨덴, 영국에 있는 다수의 연구기관 또한 연구개발에 경쟁적인 노력을 기울이고 있다.

국내에서는 삼성과 LG 등의 연구소에서 청색발광소자를 개발해 오고 있으나 선진국들과는 4년 이상의 기술적 격차를 보이고 있다. 본 고찰에서는 WB화합물반도체를 이용한 단파장 발광소자의 기술현황과 향후 연구방향을 전반적으로 살펴보았다.

II. 물리적 특성

III-V족 WG화합물반도체는 직접천이형 에너지밴드구조를 가지며 표2와 같이 에너지갭이 1.9 eV (InN), 3.4 eV(GaN), 6.2 eV(AIN)로 넓어 주황색으로부터 자외선의 영역에 해당되는 광전소자의 제작에 가장 적절하다. 또한 고온/고전압에 안정한 물리적, 전기적 특성 및 압전특성을 지니고 있다. 특히 AIN박막은 광자기디스크의 자기충간 분리용 박막, X-band 급의 고주파음향소자 등에 사용되어 왔다. 최근 GaN/AIN/SiC 이나 AIN/SiC과 같은 헤테로구조에 관한 연구는 WB반도체의 실용화를 밝게 전망하고 있다.

질화물반도체인 AIN, GaN, InN는 원자결합에너지가 각각 2.88 eV, 2.2 eV, 1.93 eV으로 크기 때문에 융해온도가 높다. 또한 GaAs의 6배 정도 되는 높은 열전도도 및 낮은 유전상수 등은 고온용 소자에 활용될 최적의 물성을 제공한다. 거기에서 화학적으로 매우 안정하여 HCl 이나 HNO₃과 같은 강산에서도 거의 반응하지 않으므로 화학물질이 많은 극한 환경에서 안정성을 확보할 수 있다. GaN계 화합물반도체의 직접천이형 에너지밴드구조는 발광효율을 간접천이형인 SiC보다 100-1000 배 높게 하고, 원자결합에너

지는 전위밀도가 10¹⁰ cm⁻²로 높아도 발광소자의 수명이 길어 ZnS, ZnSe와 같은 II-VI족 화합물반도체소자에 비해 안정하다. 굴절계수는 물분류과 빛의 파장에 따라 2.3에서 2.8 까지 변화하여

되기 시작하였다. 그리하여 성공적인 결과가 MOCVD 장비로부터 90년대 초부터 얻어지기 시작하였다. 한편, 플라즈마 소스의 발전에 힘입어 질소분자를 분해하여 단원자 상태의 래디칼이나 이온의 상

표 2. 반도체재료의 대표적 특성

	AIN	GaN	InN	4H-SiC	GaAs	Si
E _g (eV)	6.2	3.4	1.9	3.2	1.43	1.12
T _m (K)	3500	2800	2150	>2100	1510	1690
E _{bond} (eV/bond)	2.88	2.2	1.93	3.1	1.63	2.1
κ (W/cm K)	3.2	1.3	-	4	0.54	1.5
E _c (V/cm)	-	~3.5x10 ⁶	-	(1-5)x10 ⁶	4x10 ⁵	3x10 ⁵

레이저소자의 광 도파로를 이중접합구조로 구성하는데 적절하다. 따라서 GaAs계의 화합물반도체 레이저의 설계기술을 그대로 활용할 수 있는데 단지 시뮬레이션에 필요한 데이터가 정립하기 위하여 고품질의 결정성장을 통해 물리상수들의 정확한 측정이 이루어져야 한다.

III. 에피성장기술

GaN계 반도체재료의 연구가 1960년도 말에 시작되었음에 불구하고 1990년도까지 발전이 미미했던 근본적 원인은 고품질의 에피층을 성장할 수 없었기 때문이었다. 질소분자는 화학적으로 안정하여 AIN 이나 GaN과 같은 결정성장에 그대로 이용될 수 없었다. 따라서 70년대부터 NH₃ 가스 와 (Ga+ HCl)을 반응시키는 VPE (Vapor Phase Epitaxy) 가 주를 이루었고, 유기화학증착법 MOCVD (Metal Organic Chemical Vapor Deposition) 이 80년대 말에 본격적으로 WB반도체의 성장에 이용

태로 공급하는 방식인 PAMBE (Plasma Assisted Molecular Beam Epitaxy) 성장이 90년대에는 연구되었으며 청색 LED, 고전력/고온MODFET, 광편평 등이 발표된 바 있다.[2]

A. MOCVD

발광소자에서 보여준 탁월한 성과에 의하여 WB반도체의 성장에 MOCVD는 가장 우수한 성장기술로 인식되고 있다.[3] 그림1과 같이 MOCVD는 유기금속의 액체인 Trimethylgallium (TMGa) 과 trimethylaluminium (TMAI),

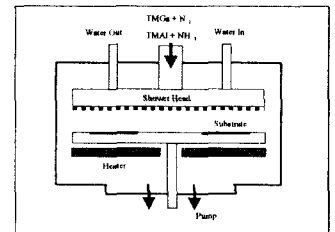


그림 1. MOCVD 챔버의 개략도.

trimethylindium(TMIn)은 수소 운 전 기전자재료 제1권 제8호(1998년 8월)/33

반가스로 공급되어 암모니아 및 질소와 가스상태로 기판의 표면에서 반응한다. 기판은 rf 유도가열이나 전열기 또는 복사열로 가열되어 사용된다.

Nakamura에 의해 고안된 top-flow방식은 기판의 측면에서 공급되는 NH_3+N_2+TMG 와 위에서 공급되는 N_2+H_2 의 가압식 가스흐름을 조절한다. 이러한 챔버구조는 고온의 성장온도에 기인하는 사전반응에 의해 발생하는 비휘발성의 흡착물이 형성되는 문제를 해결함으로써 결정박막의 균일한 성장을 얻을 수 있도록 하였다.

챔버의 구조 다음으로 중요한 요소로는 반응용 소스가스의 선택과 순도가 높은 상태에서의 공급라인 구성을 들 수 있다. 가장 많이 사용되는 소스는 역시 $TMGa$, $TMAI$, $TMIn$, NH_3 이다. 현재 $TMAI$ 이나 $TMIn$ 의 경우 산소가스의 양을 최소로 줄인 고순도의 소스가 개발되어 공급된다. 운반가스로는 Palladium으로 정제한 수소가스가 사용된다. NH_3 가스도 역시 고순도로 정제하기 위하여 zeolite getter 형의 정제기를 사용함으로써 특히 수분이나 산소를 제거한다.

B. MBE

MBE를 이용한 성장은 암모니아 가스를 사용하는 Reactive MBE(RMBE), 유기금속가스소스를 이용하는 Metalorganic MBE(MOMBE), 질소가스의 플라즈마를 사용하는 PAMBE로 대별된다. 암모니아를 이용하는 RMBE 성장은 $1 \mu m/h$ 의 비교적 높은 성장률과 우수한 물성을 보였으나 암모니아가스를 열분해하는 온도가 높아 저온의 완충층을 성장하기 어렵고, In segregation 을 일으키는 문제로 고품질의 InGaN을 성장이 어렵고, 또한, 불순물 농도

가 높은 p-형 성장이 어려운 단점이 남아 있다.

그림2는 기본적인 PAMBE 시스템의 개략도로 주입되는 가스의 종류에 따라 RMBE, MOMBE이 복합된 활용이 점차 가능함을 보여준다. PAMBE의 장점은 MOCVD에 비하여 저온성장이 가능하다는 점으로서 냉각시의 열팽창계수의 차이에 의한 열응력과 확산에 의한 혼정, alloy segregation 등을 감소시킬 수 있으며, 수소가 없어 성장과 동시에 p-형의 에피층을 쉽게 얻을 수 있는 장점이 있다. 그러나 질소플라즈마를 사용하는 성장법은 공통적으로 이온의 충돌에 의한 결함의 생성과 절연층의 성장이 어려운 문제가 있으며, 플라즈마에서 공급되는 저에너지 질소원자의 양이 적어 성장률이 50 nm/hr 로 낮은 공통적 한계에 막혀 있다.

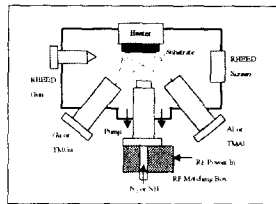


그림 2. PA(MO)MBE의 개략도.

PAMBE의 단점을 보완하는 의미에서 MO-MBE가 연구되고 있으며 AlGaIn과 InGaIn의 경우 Al이나 In의 물분율을 높게 할 수 있는 결정성장 특성을 보인 바 있다. 결정의 XRD에 의한 특성이 우수하고 표면이 매우 평탄한 결과를 나타내었다. 그러나, InGaIn의 경우 좋은 결정성이 유지되는 성장을 하기 위해서는 성장률을 줄여야하는 점이 있다. MOMBE는 연구가 많이 되지 않은 상태이므로 여러종류의 유기금속가스와 성장방법에 있어서 다양한 시도가 이루어진다면 좋은 결정성장을 할

수 있는 가능성을 많이 내포하고 있다.

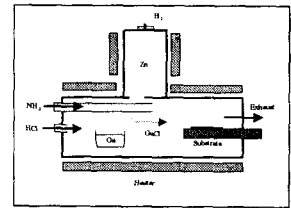


그림 3. VPE 시스템의 개략도

C. VPE

넓은 시편의 표면에 높은 성장률로 GaN 박막을 성장할 수 있는 VPE 성장법은 최근 크게 주목받고 있다.[5] 사파이어기판 보다 높은 열전도도인 1.3 W/cmK 의 GaN 를 $100 \mu m$ 으로 두껍게 성장하여 이용하고자 하는 용도에 VPE의 $40 \mu m/hr$ 되는 높은 성장률이 가장 적합하다. 그림3과 같이 VPE 기술은 CI을 이용하여 3족의 소스를 공급하는 방식을 이용한다.

MOCVD가 cold-wall reactor로 구성된 비평형 성장법임에 비해 VPE는 hot-wall 평형성장법으로 성장률이 $40 \mu m/hr$ 의 매우 높은 장점이 있다. VPE 기술로 GaN, ZnAs, GaP, InGaAsP, GaAsSb, InGaIn 등의 III-V족 화합물의 성장이 가능하지만 $AlCl_3$ 이 hot-quartz wall에 반응하여 불순물을 내는 문제점으로 AlGaIn나 AlGaAs는 성장이 불가능하여 소자구조용 에피의 성장에는 적합하지 않다.

Ga가 있는 반응로의 부분을 $800^\circ C$ 로 유지하면서 $HCl+H_2$ 의 혼합가스를 주입하여 $GaCl_3$ 을 형성하고 이를 $1100^\circ C$ 로 유지되는 반응영역에서 암모니아가스를 열분해시키고 $750^\circ C$ 인 기판에 과포화되어 증착이 일어나도록 한다. HVPE에 의해 성장된 GaN의 박

막에서 상온 전자이동도가 $880\text{cm}^2/\text{Vs}$, 전위의 밀도가 $5 \times 10^7 \text{cm}^{-2}$ 가

표 3. 상용화된 화합물반도체 발광 다이오드의 특성.[5]

재료	색상	피크 파장 (nm)	발광 효율 (lm/W)	양자 효율 (%)
AlGaInP	적황	640	41.5	11.5
InGaN	청	470	6.0	10
AlGaInP	적	629	29.4	17.6
InGaN	초록	550	25.0	5.0
InGaN	황	590	4.0	1.2
SiC	청	470	-	0.02
GaP	초록	555	1.4	0.2

얻어졌다. VPE로 성장된 두꺼운 GaN를 중간기판으로 하여 MOCVD, MBE에서 소자구조를 성장하는데 사용할 가능성이 매우 높다.

IV. 단파장 광전소자

A. 발광다이오드

그림4는 이중접합 발광다이오드의 개략적 구조이고, 표3은 상용화된 발광다이오드의 예이다. 청색 발광소자는 ZnSe, ZnS, 6H-SiC, GaN 의 여러가지 화합물반도체로 시도되어 왔다.

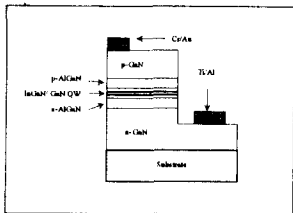


그림4. AlGaIn/GaN/InGaIn LED의 대표적 구조.

GaN 발광다이오드는 70년대내 n-i 접합구조를 시작으로 하여, p-n접합구조, GaN-InGaIn 이중접

합구조 등의 과정을 거치며 발달되어 왔다. Nakamura는 1994년도에 450nm의 청색을 GaN-InGaIn 단일양자우물층 구조로 만들어 1.2Cd의 빛강도와 5%의 높은 외부양자효율 (6 lm/W) 을 얻음으로써 다 재료의 성능을 월등히 추월하였다. 그 후 직접천이형 재결합에 의해 효율을 크게 향상시키는 동시에 황색-녹색-청색의 영역에 해당되는 발광다이오드를 실현시켰다. InGaIn을 이용하여 고휘도의 청색, 녹색, 황색에 대해 20mA의 전류로 작동할 때, 출력과 외부양자효율이 각각 5mW와 10%, 3mW와 5%, 0.5 mW와 1.2% 로 발표되었다.[5]

한편 GaPN/GaP, GaAsN/GaAs과 같은 화합물반도체의 이중접합구조는 청색-녹색-적색의 삼색광을 단일소자에 집적화 하는데 필요하다. 그리고 GaAs, Si의 전자소자와 복잡한 광전집적회로로부터 단파장 smart pixel, board 사이의 통신용으로 소자를 제작할 수 있다. 따라서 III-V WB화합물반도체를 기존의 반도체재료에 이중접합구조로 성장하는 에피기술 연구가 활발히 추진되리라 예측된다.

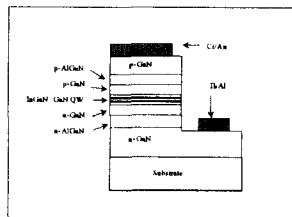


그림 5. AlGaIn/GaN/InGaIn MQW 레이저다이오드의 대표적 구조.

B. 레이저다이오드

III-V WB화합물반도체에서 전류주입에 의한 최초의 상온 유도방출은 InGaIn/GaN 다층양자우물(MQW: Multi Quantum Well) 구

조로 Akasaki에 의해 1995년도에 발표되었다. 그 후에 Nakamura에 의해 전류주입레이저는 그림5와 유사한 InGaIn 다층양자우물층구조로 구현되었다.

최초로 제작된 InGaIn 다층양자우물구조의 레이저소자는 26주기의 다층양자우물구조인데 30 Å 두께의 $\text{In}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{N}$ 양자우물과 50 Å의 $\text{In}_{0.05}\text{Ga}_{0.95}\text{N}$ 배리어로 구성되었다. 레이저 거울면은 벽개표면(cleavage surface)이 아닌 반응성이온식각으로 대부분 만들어졌다. 단면의 각각에서 13%의 양자효율과 출력 215 mW를 2.3 A의 전류에서 보였다.[6]

최근 표4와 같이 ELOG (Epitaxial Lateral Over Growth) 법을 이용하여 레이저의 활성층에의 전위밀도를 극히 낮춤으로써, Nakamura는 임계전압 5V, 전류밀도 5 kA/cm^2 으로 상온에서 연속발진 레이저의 수명을 10000 시간 이상으로 얻었다. 이러한 성능은 광디스크의 광원으로는 사용될 수 있다. 한편 100000 시간의

표 4. 대표적 레이저소자의 특성 요약

	MQW [6]
재료	AlGaIn/InGaIn/GaN
성장법	MOCVD(ELOG)
기판	Sapphire (0001)
활성층	Si-doped $\text{In}_{0.02}\text{Ga}_{0.98}\text{N}$
p형 오믹	Ni/Au
n형 오믹	Ti/Al
반사거울	$\text{TiO}_2/\text{SiO}_2$ 50% reflection
피크파장	409 nm
출력	90 mW at 200 mA
양자효율	Internal : 85 %
임계전류 밀도	5 kA/cm^2

수명이 요구되는 통신용의 성능을 만족시키기 위해서는 고반사막과 저저항 p-형 오믹금속접합을 개선하여 임계전류를 줄이고 사파이어를 SiC나 GaN으로 대체하여 열방출효율을 높여야 한다.

C. 수광다이오드

자외선 수광센서는 오래전부터 PMT와 실리콘포토다이오드가 사용되어 왔다. 그러나 PMT는 이득이 높고 노이즈가 적은 장점이 있으나, 크고 복잡하며 고전압이 필요하고, 물리적으로 약하고, 비싼 단점이 있다. PMT의 약점을 보완하기 위해 개발된 것이 실리콘 수광소자인데 소형 고체반도체소자로 구동전압이 낮지만 간접천이형 에너지밴드의 구조에 의해 효율이 낮고 가시광선과 적외선을 제거하기 위한 필터가 필요한 단점이 있다. 질화물반도체 수광다이오드는 고온과 반응성이 강한 화학물질이 있는 환경에서 적외선이나 가시광선에 상관 없이 단지 자외선광을 선택적이고 효과적으로 측정할 수 있는 장점이 있다.

그림 6은 PIN형과 MSM형 수광다이오드의 다면 개략도이고, 표5에는 근래에 발표된 수광다이오드의 특성이다.

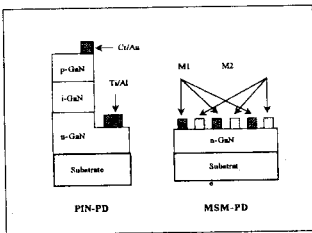


그림 6. PIN과 MSM 형 GaN 수광다이오드의 대표적 구조.

파장이 360 nm 주위에서 광감도는 0.2 A/W, 양자효율은 80 % 이상으로 얻어진다. GaN-AlN은 3.4-6.2 eV의 에너지에 해당되는

표 5. 개발된 자외선 수광다이오드의 특성.

	PIN[7]	MSM[8]
재료	AlGaIn	n-AlGaIn /i-GaN /p-GaN
성장법	MBE	MOCVD
n형 오믹	Ti/Mo/Au	Ti/Al
p형 오믹	Ni/Au	Ni/Au
피크파장 (nm)	360	352-362
Responsitivity (A/W)	0.198 (360 nm)	0.2 (352 nm) 0.003 (362 nm)
양자효율 (%)	85	>80

원자외선 파장 (365-200 nm)에서 최고의 감도를 내는 소광소자를 제작하는데 적합하다. 특히 AlGaIn의 밴드갭은 연료가 연소될 때 발생하는 hydroxyl radical (OH)로부터 방출되는 자외선의 파장영역에 해당될 뿐만 아니라 고온에서 안정되어, 화염을 측정하고 분석하는 용도에 매우 유용하다. 고온용 수광소자는 특별히 전극을 포함한 주변 패키지 재료와 구조는 고온에서 내구성이 우수하도록 설계되어야 한다.

D. 자외선 레이저다이오드

파장이 300 nm 이하의 단파장대 레이저를 얻는 방식으로 주파수변조, 레이저펌핑과 전자선펌핑을 들 수 있다. 이들 중 주파수변조와 레이저펌핑의 경우는 전력효율이 극히 낮거나 단파신호로 동작하거나 부피가 큰 단점이 있다. 원자외선 광전소자는 SiC-AlN, AlGaIn을 이용하여 4 eV 이상의 에너지갭을 갖는 양자우물의 광소자구조로 만들 수 있다. 그러나 일함수가 크기 때문에 저항이 작은 오믹금속접합을 얻기가 거의 불가능하다. 따라서 통상의 p-n접

합구조의 전류주입에 의한 발전이 아닌 다른 방식을 이용해야 발광소자를 실현할 수 있다. 가장 소형이며 저전력으로 구동할 수 있는 방식으로는 그림7과 같은 전자선 펌핑이 유리하다. WB반도체의 valence band에 생성된 정공은 유효질량이 커서 국부화 되고, 이들은 전자를 쿨롱력으로 당겨 역시 국부화된 엑시톤을 형성하게 된다. WB화합물반도체재료는 열전도가 높고 원자간의 결합력이 높아 고온과 고전압에 대단히 안정하여 실용화될 가능성이 매우 높다. 소형 전계방출 마이크로탑 기술은 원자외선 레이저다이오드의 펌핑용으로 적용할 수 있다. [9]

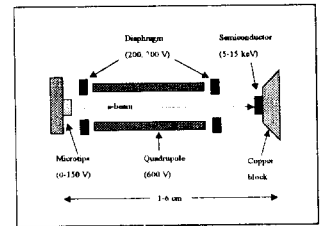


그림 7. 전자선 펌핑에 의한 단파장 광소자의 구조.

예로써 $E_e=10$ keV, $I_{ep}=1 \mu A$, 10^4 tips/mm² 인 경우, 하나의 전자당 1100개의 전자-정공쌍을 형성시키므로, $J_{e-h} \sim 1.1$ kA/cm² 이 된다. $J_{e-h}=100$ A/cm² 조건으로 전자빔을 1 mm 직경의 형태로 주입할 때, 전자-정공쌍의 농도는 $\sim 4 \times 10^{18}$ cm⁻³ 이 된다. 이 수치의 주입농도는 임계전자농도에 상당하므로 이러한 전자선의 조건으로 유도방출이 가능하다. 전자선 펌핑을 사용하여 비교적 소형으로 제작이 가능한 원자외선 발광다이오드와 레이저다이오드를 최초로 구현하기 위해서는 전자집속, 열방출, 고진공 패키지 문제가 해결되어야 한다.

V. 맺음말

III-V WB화합물반도체는 20여 년간의 기초연구의 숙성단계를 거쳐왔으며 최근에서야 가시적인 기술개발의 결과가 나오기 시작하였고, 그 기술개발 속도가 점차 가속화되고 있다. 최근에는 청색발광다이오드, 청색레이저다이오드, 자외선 수광다이오드, 고전력 증폭기 등을 상용화하는데 성공하고 있다. 광전소자의 새로운 개발은 단파장대역으로 기록을 갱신하면서 지속적으로 진행되리라 예측된다. 고체반도체로 360 nm 대의 자외선 레이저다이오드는 조만간 구현되겠지만, 200 nm 대의 원자외선에 해당되는 광소자를 개발하기 위해서는 재료 및 공정기술의 개발이 많이 진행되어야 한다. 한편으로 GaAs나 Si 과 같은 기존 반도체의 집적회로나 광소자와 결

합한 광전집적회로의 연구가 진행되어 단일칩 삼색광소자, 광컴퓨팅용 소자, 자외선용 smart pixel, 보드간 광신호교환기 등의 복합화 기능을 갖는 칩이 개발되리라 기대된다.

참 고 문 헌

1. M.C. Paek, S.W. Choi, H.G. Lee, K.H. Shim, and Y.S. Kim, Development of new device and materials for SiC based anti-environmental semiconductors, MIC report (1997).
2. O. Gluschenkov, J.M. Myoung, K.H. Shim, K. Kim, Z.G. Figen, J. Gao, and J.G. Eden, Appl. Phys. Lett. **70** (1997) 811.
3. R.D. Dupuis, J. Crystal Groth 178, 56 (1997).
4. K.H. Shim, J. Myoung, O.

Gluschenkov, K. Kim, C. Kim, and I. Robinson, Jpn. J. Appl. Phys. 37, L313 (1998).

5. S.P. Denbarrs, Proceedings of the IEEE, 85, 1740(1997).
6. S. Nakamura, M. Senoh, S. Nagahama, N. Iwasa, T. Yamada, T. Matsushita, H. Kiyoku, Y. Sugimoto, T. Kozaki, H. Umemoto, M. Sano, and K. Chocho, Appl. Phys. Lett. 72, 2014(1998).
7. J.M. Vanhove, P.P. Chow, R. Hickman, J.J. Klaassen, A.M. Wowchak, and C.J. Polley, MRS fall meeting (1997).
8. S. Krishanankutty, W. Yang, T. Nohava, and P.P. Ruden, MRS Internet J. Nitride Semicond. Res. 3, 7 (1998).
9. K.I. Cho, Development of FED technology for information and telecommunications, MIC report (1997).

< 김남영 위원 >