

질화물·탄화물 반도체의 응용과 연구개발 현황



노삼규

한국표준과학연구원 박막연구그룹 책임연구원



김은규

한국과학기술연구원 반도체재료연구실 책임연구원

1. 서 론

21세기 차세대 과학기술산업은 반도체기술과 유전자기술의 양대 축을 중심으로, 20세기에 축적한 다양한 과학기술이 결합, 집중됨으로서 새로운 패러다임의 기술산업으로 발전되어 갈 것으로 전망된다. 특히, 반도체기술은 정보·통신, 항공·우주 등의 핵심 기반기술로서 확고한 자리매김을 할 것으로 생각되며, 경박단소와 더불어 고속화, 대용량화, 고집적화, 저전력화, 다기능화로 특질지워지는 신개념의 소재 및 소자의 출현을 요구할 것이다. 이러한 관점에서 볼 때, 지금까지 반도체 기술산업을 주도해 왔던 실리콘 (silicon, Si) 소재의 한계를 뛰어넘는 보다 고기능의 제3세대 반도체 소재 및 관련 소자의 연구개발은 현 시점에서 우리에게 주어진 불가피한 선택일 것으로 사료된다.

메모리/비메모리 반도체산업 발전의 주역인 Si을 제1세대 반도체로 본다면, 수발광 광전소자 및 고주파 전자소자 분야를 전담해 온 (InAlGa)(AsP) 계열의 III-V족 화합물은 제2세대 반도체에 속한다. GaN로 총칭되는 질화물 (nitride) 및 SiC 등의 탄화물(carbide)은 다른 반도체가 가지지 못하는 광대역 파장범위(~100-650 nm)의 광전기능과 초고주파

수-고출력(~100 GHz) 전자기능뿐만 아니라, 내열성, 내방사성, 내부식성, 내마모성 등 특수환경에 강한 내환경성을 지니고 있는 post-silicon 제3세대 반도체 소재로 분류할 수가 있다(표 1).

표 1. 반도체 소재의 세대별 분류와 소자응용 분야

분류	반도체 물질계	소자 응용 분야
제1세대	Group-IV 원소 소재 Silicon (Si)	· 메모리/비메모리 전자소자
제2세대	III-V 화합물 소재 (InAlGa)(AsP)	· 발광/수광 광전소자(근적외선-황록색) · 고주파 전자소자(~GHz)
제3세대	I-IV 질화물/탄화물 소재 (InAlGa)N SiC-C(Diamond)	· 발광/수광 광전소자(적색-자외선) · 고출력-초고주파 전자소자(~100 GHz) · 내환경-특수기능소자(내열/내방사성/내부식/내마모)

본 논문에서는 차세대 반도체 소재로 급부상한 광역 밴드갭 (wide bandgap) 반도체 물질인 질화물·탄화물 소재의 물리전자적 특성을 간단히 소개한 후 연구개발 현황을 개관하고, 현재 알려져 있는 기술과 시장을 기초로 관련 산업을 예측, 그 전망을 알아 보고

자 한다. 본 논문의 마지막에는, 관련 분야의 연구개발을 수행하고 있는 연구자들에게 관련 정보를 제공함과 동시에 향후의 연구개발 방향 설정에 조금이나마 도움이 되고자, 과학기술부의 지원으로 수행한 “질화물·탄화물 반도체 소재개발 전략연구” 기획을 통하여 도출된 과제명과 제안서 요약을 수록하였다.

2. 질화물·탄화물 반도체의 물리 및 전자적 특성

그림 1은 주요 반도체 결정의 격자상수(lattice constant)와 대응되는 밴드갭 에너지(bandgap energy, E_g) 및 파장(wavelength, λ)과의 상관관계를 보여주는 도표로서, [Si-Ge], [GaAs-GaP-AlAs-InP], [ZnSe-ZnS-MgS/ZnTe-MgSe/CdSe] 등 주요 IV-IV, III-V, II-VI 물질계와 [GaN-AlN-InN], SiC, C(diamond) 등의 질화물·탄화물 계의 광학적 특성을 잘 나타내 주고 있다. Si 계와 GaAs 및 ZnSe 계가 각각 적외선과 근적외선-가시광 영역을 차지하고 있는 반면, 밴드갭 에너지가 2~6 eV 범위인 GaN 계 물질과 SiC, C 등의 파장 영역은 가시광에서 자외선에 넓게 걸쳐 있어서 광역

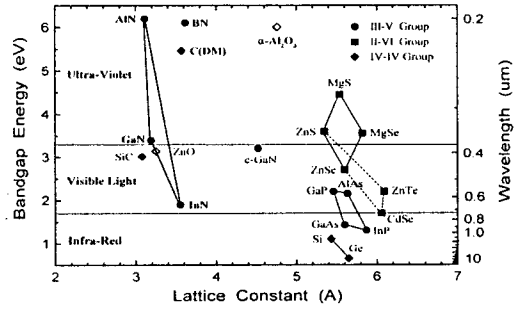


그림 1. 주요 반도체 결정의 격자상수와 대응 밴드갭 에너지 및 파장과와의 관계 도표

수발광소자에 그 응용이 적합함을 잘 알 수가 있다.

GaN로 대표되는 질화물과 SiC 및 C 등과 같은 탄화물의 물리적 특성을 Si, GaAs, InP 등의 물질계와 비교해 보면, 그 전자적 특성의 우수성을 쉽게 파악할 수가 있다. 표 2와 표 3은 각각 Si, GaAs, InP, GaN, 6H/3C-SiC, C(diamond) 등의 물리 및 전자적 특성을 상호 비교한 도표이다. 용융온도(melting

표 2. 주요 반도체 재료의 물리적 특성

Property	Si	GaAs	InP	GaN	6H-SiC	3C-SiC	C(DM)
Crystal Structure	DM	ZB	ZB	WZ	WZ	ZB	DM
Melting Temperature(°C)	1415	1238	1070	1227	1800	1800	707/3577
Transition Type	I	D	D	D	I	I	I
Bandgap Energy(eV)	1.12	1.43	1.35	3.4	2.9	2.2	5.5
Electron Mobility(cm ² /V.s)	1400	8500	4700	900	600	1000	2200
Maximum Operating Temperature(K)	300	460	400	600	1240	870	1100

*DM(Diamond)/ZB(Zinblend)/WZ(Wurzite)/D(Direct)/I(Indirect)

표 3. 주요 반도체 재료의 JFOM 및 KFOM 값과 Si에 대한 비교 지수

Material	E_{BD} (V/cm)	V_s (cm/s)	σ_r (W/cm.K)	K (ϵ_0)	JFOM		KFOM	
					(WQ/s^3)	Ratio to Si	($W/[cm.s]^{1/2}$)	Ratio to Si
Si	3×10^5	1.0×10^7	1.5	11.8	9×10^{23}	1	13.8×10^2	1.0
GaAs	4×10^5	2.0×10^7	0.5	12.8	63×10^{23}	7	6.2×10^2	0.5
InP	6×10^5	2.0×10^7	0.7	14.0	144×10^{23}	16	8.4×10^2	0.6
GaN	20×10^5	2.5×10^7	1.5	9.5	2534×10^{23}	282	24.3×10^2	1.8
6H-SiC	40×10^5	2.0×10^7	5.0	10.0	6250×10^{23}	695	70.7×10^2	5.1
3C-SiC	40×10^5	2.5×10^7	5.0	9.7	10240×10^{23}	1138	80.3×10^2	5.8
D(DM)	100×10^5	2.7×10^7	20.0	5.5	73856×10^{23}	8206	444.0×10^2	32.2

* JFOM(Johnson's Figure of Merit)/KFOM(Keyes' Figure of Merit)

temperature), 포화전자속도(saturated electron velocity), 파괴전기장(breakdown electric field), 유전상수(dielectric constant), 열전도도(thermal conductivity), 최대동작온도(maximum operating temperature) 등이 Si이나 다른 III-V 화합물에 비하여 그 특성이 탁월함을 알 수가 있다.

전자소자의 성능은 동작주파수, 동작속도, 출력, 열 방출률 등에 의하여 결정되는데, figure of merit (FOM)은 소자에 적용된 반도체 재료의 우수성의 판단 기준으로 흔히 사용된다. $[E_B V_S / \pi]^2$ 로 정의되는 Johnson's FOM(JFOM)은 소자의 동작주파수 및 출력의 우월성을 표현해 주는 하나의 기준이며, $\sigma_T [V_S / K]^{1/2}$ 로 정의되는 Keyes' FOM(KFOM)은 소자의 동작속도와 열방출 성능에 초점을 둔 지수이다. 여기서, E_B 와 V_S 는 각각 파괴전기장과 포화전자속도이며, σ_T 와 K 는 각각 열전도도와 유전상수를 나타낸다. 표 3에는 대표적인 반도체의 관련 특성값과 함께 JFOM과 KFOM의 이론값이 수록되어 있다. GaN와 6H-SiC의 JFOM/KFOM 값은 각각 Si에 비하여 282/1.8과 695/5.1배 정도로 월등히 큼을 알 수가 있다.

3. 질화물·탄화물 반도체의 응용과 연구개발 현황

3.1. 연구개발 현황

GaN로 대표되는 질화물 반도체 연구개발은 1993년 12월 Nichia Chemical(일본)의 1 cd 급 고휘도 청색 발광소자(light-emitting diode, LED)의 상용화를 기점으로 본격화되었으며, 질화물 및 탄화물 반도체를 이용한 소재 및 소자는 광전소자 분야뿐만 아니라 수광소자, 고출력-초고주파 전자소자, 내환경 특수기능소자 등에도 급속히 그 응용범위를 넓혀가고 있다. 청색 LED 개발에 따르는 표시소자의 총천연색화는 전광판, 자동차등, 조명기구 분야의 기존 패턴을 바꾸어 놓았으며, LCD의 후광등이나 일반 조명등에 GaN 계 백색 LED의 채용이 보편화되면 소모전력의 획기적 감소에 따르는 경제적 이득과 함께 전기, 전자 제품에 많은 변화를 초래할 것으로 전망하고 있다. 청색 LED의 상용화에 성공한 Nichia는 1997년 상온에서 수명 10,000 시간을 보장하는 404 nm의 청자색 단파장 레이저다이오드(laser diode, LD)를 발표함으로써 또한번 세계적인 화제로 부상된 바 있다.

현재 광전소자 분야에 남아 있는 숙제는 one-chip 총천연색 LED 및 형광물질 없이 직접 자연광을 발광하는 고효율-고휘도 백색 LED 개발과 기존의 LED를 대체하는 GaN 계 적색 LED의 개발을 들 수 있으

며, 청자색 LD의 상용화와 함께 고출력의 녹색, 적색 LED 개발도 해결하여야 할 과제이다. 또한 차세대 고출력-초고주파 전자소자 및 수광소자에의 GaN의 응용도 또하나의 획기적인 업적으로 평가되겠지만, 현시점에서 가장 시급히 해결하여야 하는 숙제는 환경친화적 MOCVD의 선구물질(precursor) 개발, GaN 기판의 고급화 및 대면적화 등을 비롯한 핵심소재 및 응용소자 관련 기반기술의 확립일 것으로 사료된다.

한편, 1990년대 초 Cree Research(미국)에 의하여 개발된 SiC 청색 LED 및 결정기판의 상용화는 탄화물 반도체의 유용성을 잘 보여 주었다. 현재 SiC 계 반도체는 광전소자 분야에서는 GaN 물질계에 그 자리를 넘겨준 상태로 판단되지만, 고출력-초고주파 전자소자와 특수기능 소자 분야에서는 오히려 그 위치를 더욱 확고히 하고 있다. 또한, [SiC-C-Si] 계에 속하는 C(DM) 관련 연구개발은 현재 초기 단계로서 가시적인 성과는 없지만, 기초기술이 확보되는 2005년 경에는 새로운 개념의 소재 및 소자를 선보일 것으로 추정된다.

3.2. 응용분야 및 관련 산업

질화물·탄화물 반도체는 기존의 소재로 해결하지 못하였던 청색/녹색 LED, 단파장 LD 등에 채용됨으로서, 표시장치 분야의 총천연색화 및 단파장 LD 광원 구현에 결정적인 공헌을 하였다. 가시광 LED는 실내외용 총천연색 대형 스크린/광고판, LCD의 후면등, 신호등, 자동차 표시등, 총천연색/백색 조명등, 복사기/scanner용 칼라 image sensor 등의 핵심소자로서, 정보표시, 정보통신, 정보처리, 조명기구 등 산업 전분야에 파급효과가 확산되고 있다. 단파장 LD는 10 Gb급 초고밀도 차세대 DVDR(digital video disk recorder), 의료기기 등 단파장 레이저광을 필요로 하는 모든 분야에 활용될 전망이며, 항공·우주 및 해저 통신용 광원과 군사적 목적으로도 그 응용이 예측되고 있다. 또한, 질화물·탄화물은 200~400 nm 영역에서 Si를 능가하는 탁월한 수광기능이 입증되어 자외선 광검출기(photodetector, PD)에 응용되고 있고, 고유한 초고주파 특성 및 결정성으로 인하여 Si이 접근할 수 없는 수십~수백 GHz 영역 차세대 통신소자와 FED(field emission display)의 emitter tip으로 활용될 전망이다. 자외선 광검출기는 고온계측기나 화재감지시스템, 의료진단용 방사능 추적장치(tracer) 및 영상재현장치(imager) 등에 응용될 수가 있으며, 단파장 LD-PD는 화학·생화학물질의 검출장치에도 적용될

표 4. 질화물·탄화물 반도체 소재의 응용 제품/장치 및 관련 산업

물질계	소자구조	응용 소자	응용 제품/장치	관련 산업
(InGa)N SiC	DH p-n MQW	- 청/녹/황색 LED - 백색 LED	- 초대형 스크린/광고판 - 후면등/신호등/자동차 표시등 - 총천연색/백색 조명기구 - 칼라 Image Sensor	정보표시 표시장치 정보처리
(InAlGa)N	MQW	- 단파장 LD - 자외선 LD	- DVDR 10 Gb Pick-Up용 광원 - 항공우주/해저 광원장치	정보처리 정보통신
(AlGa)N	p-i-n HBT	- 자외선 PD	- 의료진단 방사능 추적장치 - 항공우주/해저 검출장치 - 고온/화재감지 검출장치	정보통신 센서기술 의료기술
(AlGa)N SiC	MESFET MODFET	- 초고주파 FET	- 초고주파 통신시스템 - 내환경용 전자소자	정보통신 이동통신 위성통신
GaN C(DM)	Emitter	- FED	- 중소형 표시장치	정보표시 표시장치

수가 있다. 표 4는 질화물·탄화물에 기초한 소자에 채용되고 있는 물질계와 소자구조 및 응용제품/장치와 관련 산업과의 상관관계를 요약한 도표이다.

3.3. 관련 기술산업 및 시장 예측

질화물·탄화물 관련 소재/소자는 1997년 시점에서는 정보표시산업 중심의 LED 시장만이 형성되어 있는데, 청색/녹색 LED 세계시장은 Nichia, Cree, Toyota Gosei, HP 등 4개사가 각각 59%, 21%, 14%, 6% 비율로 독점하고 있다. 단파장 LD는 현

재 Nichia Chemical만이 시제품을 출하하고 있는 상태이기때문에 아직 시장이 성숙되지 않았고, 자외선 PD, 전자소자, GaN, SiC 기판 등의 시장규모도 아직은 미미한 상태이다. 현재까지 발표된 여러가지 분야별 기술산업 및 시장예측을 종합해 볼 때, 아직 시장이 형성되지 않은 다이아몬드 계를 제외한 질화물·탄화물 반도체 소재/소자 기술산업은 청색/녹색/황색/백색 등의 가시광 LED, 단파장 LD, 초고주파-고출력 전자소자 등의 핵심부품을 중심으로 급속도로 팽창될 것으로 전망된다.

표 5에서 볼 수 있는 바와 같이, 세계시장과 내수시

표 5. 질화물·탄화물 반도체 소재/소자 및 관련 시스템 산업 시장규모

소자/시스템	세계 시장(Million \$)			내수 시장(억원)		
	1996년	2000년	2006년	1996년	2000년	2006년
청색/녹색/백색 LED	62	188	444	300	500	1,000
단파장 LD	-	15	2,090	-	2	2,000
자외선 검출소자	-	1	11	-	5	10
초고주파-고출력 전자소자	-	2	200	-	10	500
GaN, SiC 기판	-	10	30	-	8	100
소 계	62	216	2,775	300	525	3,610
관련 시스템 산업 (Display, DVDR, PCS 등)	100	500	25,000	500	1,000	15,000
합 계	162	716	27,775	1,100	1,525	18,610

장 규모는 1996년에는 각각 6,200만\$과 300억원 정도이나, 2006년경에는 각각 약 28억\$과 3,600억원에 육박할 것으로 예상된다. 특히, display, DVDR, PCS 등 관련 모듈/시스템산업을 포함한 세계시장과 내수시장은 각각 1996년의 1억6,000만\$과 1,100억원 규모에서 2006년에는 약 278억\$과 1조 8,600억원 수준으로 급성장할 것으로 추정된다. 단파장 LD와 초고주파-고출력 전자소자가 상용화되는 약 3~5년 후에는 DVDR, PCS, 위성송수신기 등 가전 제품을 중심으로 그 수요는 폭발적으로 증가할 것으로 예상되므로, 현재의 기술예측보다 약 2~3배 상회할 것으로 추정하고 있다. 현재 국내의 삼성종합기술원, LG종합기술원, 광전자반도체(주) 등은 청색 LED 상용화기술을 확보한 상태이나 제품 출하는 못하고 있는 실정이다. 국내에 설치되어 있는 총천연색 전광판에 사용하고 있는 청색 LED는 전광 수입에 의존하고 있으며, 표 5의 내수시장은 전광판 모듈/시스템의 국내 제작에 의하여 형성된 것으로 파악되고 있다.

4. 연구기획에서 도출한 과제명 및 연구개발 목표

본 장에서는 광역 밴드갭 물질인 질화물·탄화물 반도체의 국내의 연구개발 현황과 전망을 조사, 분석함과 동시에 기술예측을 통한 국가적 기술개발 전략을 수립하고자, 1998년 10월부터 9개월간 과학기술부의 지원으로 수행된 “질화물·탄화물 반도체 소재개발 전략연구” 연구기획 프로그램에서 논의된 내용을 간략하게 소개하고자 한다. 관련 분야의 국내 학연산 전문가 거의 모두가 연구기획에 참여하여, 질화물과 탄화물을 대상으로 소재의 응용성에 초점을 맞추어 2010년까지 추진되어야 할 중장기 연구개발 계획을 수립하였다. 광전기능성 소재 (A)와 전자기능성 소재 (B) 등 2개 대과제를 설정하고, 광전 및 전자 기능성 소재 각각에 대하여 아래와 같은 3개의 중과제와 각각의 중과제에 대한 3~4개의 소과제를 도출하고 해당 사업 제안요구서 (RFP)를 작성하였다. 제한된 지면때문에 본 논문에서는 도출된 과제명과 중과제별 RFP 요약만을 게재하였다. 질화물·탄화물 반도체 소재 및 관련 소자에 관한 보다 자세한 국내외 연구개발 기술 동향 및 현황분석과 도출된 각각의 중소과제에 대한 세부 RFP는 관련 보고서를 참고해 주시기 바란다.

4-1. 중과제 및 소과제 총괄표

A. 광전기능성 소재

A-100. 고효율 단파장 발광기능성 소재

A-101. 고분해능 총천연색 One-Chip LED 제조 기술

A-102. 전구대체용 차세대 백색광원 제작 기술

A-103. 수직공진형 표면발광 LD 제작 기술

A-104. 3차원 Storage System용 고출력 UV-LD 제작 기술

A-110 수광 및 변조 기능성 소재

A-111. 환경감시용 광대역 자외선 센서 기술

A-112. 고속, 고감도 가시광차단 자외선 센서용 소재 개발

A-113. 자외선 센서 Array 및 모듈 제조 기술

A-114. 도파로 구조의 GaN 초고속 광변조용 소자

A-120. 핵심소재 및 평가기술

A-121. 후막 GaN 기판 제작기술

A-122. 단결정 GaN 성장기술

A-123. 단결정 SiC 성장기술

A-124. 특성평가 기술개발 및 기술지원

B. 전자기능성 소재

B-200. 극한환경 고출력 전자기능성 소재

B-201. 고출력소자용 SiC 박막 적층 기술

B-202. 극한환경 고출력 전자소자 제작 및 공정기술

B-203. 극한환경 고출력 전자소자 모델링 및 측정기술

B-210. 고주파 전자기능성 소재

B-211. 고주파소자용 GaN 박막 적층 기술

B-212. 고주파전자소자 제작 및 공정기술

B-213. 고주파 전자소자 모델링 및 측정 기술

B-220. 응용소자 기반기술

B-221. 고품위 GaN 성장 신기술

B-222. 대면적 SiC 저온 성장 신기술

B-223. Nano-Flat 및 에피 다이아몬드 웨이퍼 제작 기술

4-2. 최종 목표 및 단계별 목표

(1) 최종 목표

A. 광전기능성 소재

분류코드/중과제명	최종 목표
A-100 고효율 단파장 발광기능성 소재	<ul style="list-style-type: none"> - 고분해능 총천연색 one-chip LED 개발 <ul style="list-style-type: none"> · 단일 칩상에서 적색(R)/녹색(G)/청색(B) 제어/칩크기 : 0.5×0.5 mm² - 전구대체용 차세대 백색 광원 개발 <ul style="list-style-type: none"> · 작동전류전압 : If=20mA, Vf=3.2-4.0V/휘도 : 0.5~3cd · 지향각 : 20~140°/좌표 : x=0.31, y=0.32 - 단파장 수직공진형 표면발광 LD 개발 <ul style="list-style-type: none"> · 파장 : 380~420 nm/입계전류 : 50 mA/광출력 : 30 mW/수명 : 10,000 시간 - 3차원 storage system용 고효율 UV-LD 개발 <ul style="list-style-type: none"> · 파장 : 250~400 nm/출력 : 200 mW/수명 : 10,000 시간 이상
A-110 수광 및 변조기능성 소재	<ul style="list-style-type: none"> - 고속, 고성능 가시광 차단형 AlGaIn/GaN 자외선 센서 시제품 개발 <ul style="list-style-type: none"> · 완벽한 가시광 차단특성 · Responsivity > 100 A/W/response time 100 ns - 환경 감시용 자외선 센서 개발 <ul style="list-style-type: none"> · 적용파장 : 250~365 nm/dark current < 10 pA - (8×8) UV image sensor array 개발(산업용 : 고효율, 군사용 : 고속) - GaN 광변조기 개발
A-120 핵심소재 및 평가기술	<ul style="list-style-type: none"> - 대규모, 고품질 질화물 기판 및 벌크 단결정 성장기술 개발 - 대규모, 고품질 탄화물 벌크 단결정 성장기술 개발 - 질화물·탄화물 반도체 특성 평가기술 개발 및 기술지원

B. 전자기능성 소재

분류코드/중과제명	최종 목표
B-200 극한환경 고효율 전자기능성 소재	<ul style="list-style-type: none"> - 극한용(500 ℃ 이상) 3 W/mm 급 X-band 대역 단위 SiC MESFET 제작 - 300 W급 SIT 제작 및 15 W급 microwave 대역 SiC amplifier 제작 - 원천적인 소자공정기술 확보 - 고주파용 전자소자 품위의 에피성장 - 상용 고효율, 고주파용 DC 및 large-signal RF modeling package 개발
B-210 고주파 전자기능성 소재	<ul style="list-style-type: none"> - 고주파소자용 GaN 박막 적층기술 <ul style="list-style-type: none"> · 전자이동도 ≥ 2000 cm²/Vs/sheet charge density ≥ 2×10¹³ cm⁻² · Background doping density ≤ 1×10¹⁶ cm⁻³ - 고주파 전자소자 제작 및 공정기술 <ul style="list-style-type: none"> · Contact resistance ≤ 10⁻⁶ Ωcm² · f_T = 70 GHz, f_{max} = 150 GHz 이상 · 출력 ≥ 10 W(>10 GHz)/항복전압 ≥ 200V - 고주파 전자소자 모델링 및 측정기술 개발 <ul style="list-style-type: none"> · 소자구조 simulation 및 설계 · DC, 소신호 및 대신호/출력 및 잡음 측정/온도효과 모델 기술개발, · 응용회로 설계 및 측정
B-220 응용소자 기반기술	<ul style="list-style-type: none"> - GaN 및 SiC 에피층의 고품위/대면적 성장기술 개발 - Nano-flat 및 에피 다이아몬드 웨이퍼 제작기술 개발

(2) 단계별 목표

A. 광전기능성 소재

단 계	중과제명	기술개발 목표
1단계	고효율 단파장 발광기능성 소 재	- RGB pixel형 디스플레이용 LED 개별소자 제작기술 개발 - 청색 LED에 형광성 phosphor 물질을 결합한 백색광원 램프제작 - 단파장(380~420 nm) 수직공진기 제작 - UV 저출력 LD 개발
	수 광 및 변조기능성 소 재	- 요소기술 개발 및 1차 시제품 · Responsivity : 10 A/W at 365 nm · Response time : 5 msec · Dark current : 5 μ A/ mm^2 · Cut off wavelength : 300~365 nm
	핵심소재 및 평가기술	- 1" freestanding GaN 기판 및 1/2" 벌크 GaN 단결정 성장기술 개발 - 2" 벌크 SiC 단결정 성장기술 개발 - 소재 물성 평가기술 개발 및 지원체계 구축
2단계	고효율 단파장 발광기능성 소 재	- 청색/녹색 (450nm/525nm)을 집적한 one-chip LED 제조기술 확보 - GaN계청색 및 녹색 chip과 AlGaAs계 적색의 chip을 이용한 백색광원 램프제작 - 임계전류 100mA 및 광출력 10mW급 단파장 수직공진형 표면발광 LD 제작 - UV 고출력 LD 개발
	수 광 및 변조기능성 소 재	- 새로운 소자구조설계 및 시제작 · Photoconductive type(50 A/W at 365 nm/1 msec/1 μ A/ mm^2) · Schottky/pin type (10 A/W @365 nm/100 nsec/150 V/10 pA @5 V)
	핵심소재 및 평가기술	- 2" freestanding GaN 기판 및 1" 벌크 GaN 단결정 성장기술 개발 - 3" 벌크 SiC 단결정 성장기술 개발 - 소자 특성 평가기술 개발 및 지원체계 구축
3단계	고효율 단파장 발광기능성 소 재	- 총천연색을 집적한 one-chip LED 제조기술 개발 - GaN계와 AlGaAs계 에피성장을 통한 one-chip 백색광원 램프제작 - 임계전류 50mA 및 광출력 30mW급 단파장 수직공진형 표면발광 LD 제작 - UV 고출력 LD 신뢰성 기술 개발
	수 광 및 변조기능성 소 재	- 응용별 소자구조 최적화 및 어레이 제작 - 8 \times 8 UV focal plane array 제작 - 응용 분야별 제품구조 설계 및 검증 · Photoconductive type(100 A/W at 365nm/1 msec/600 nA/ mm^2) · Schottky/pin type(10 A/W @365 nm/100 nsec/150 V/10 pA @5 V)
	핵심소재 및 평가기술	- 3" freestanding GaN 기판 및 2" 벌크 GaN 단결정 성장기술 개발 - 4" 벌크 SiC 단결정 성장기술 개발 - 물성변화의 원인 규명 및 제어기술 개발

B. 전자기능성 소재

단 계	증과제명	기술개발 목표
1단계	극한환경 고출력 전자기능성 소 재	- 250 ℃ 이상용 1.5 W/mm 급 단위 SiC MESFET 제작 - 전자이동도 $\geq 100 \text{ cm}^2/\text{V}\cdot\text{sec}/\text{micropipe}$ 밀도 ~ 500 개/cm ² 에피 성장 - 고출력, 고주파용 DC 및 large-signal RF modeling 개발
	고주파 전자기능성 소 재	- 요소 기술 확보 및 전자소자 제작 · 전자이동도 $\geq 1000 \text{ cm}^2/\text{Vs}/\text{sheet charge density} \geq 7 \times 10^{12} \text{ cm}^{-2}$ · Background doping density $\leq 5 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ · 각종 공정기술(식각, passivation, 이온주입 등) 개발 · 접촉저항 $10^{-5} \Omega \text{ cm}^2$ 이하 · $f_T = 20 \text{ GHz}$, $f_{\text{max}} = 50 \text{ GHz}$ 이상 고주파소자 제작 · 소자 구조 simulation 및 설계 · 소자의 DC 및 고주파 소신호/대신호 모델 구현
	응용소자 기반기술	- GaN 및 SiC 선구물질 및 고품위 에피성장 신기술 개발 - 다이아몬드박막 증착공정 기술개발
2단계	극한환경 고출력 전자기능성 소 재	- 350 ℃ 이상용 2.5 W/mm 급 단위 SiC MESFET - 100 W급 SIT제작 - 전자이동도 $\geq 300 \text{ cm}^2/\text{V}\cdot\text{sec}/\text{micropipe}$ 밀도 ~ 100 개/cm ² 에피 성장 - Optimizer 포함 상용 large-signal RF modeling package
	고주파 전자기능성 소 재	- 전자소자의 성능 개선 · 전자이동도 $\geq 1500 \text{ cm}^2/\text{Vs}/\text{sheet charge density} \geq 1.5 \times 10^{13} \text{ cm}^{-2}$ · Background doping density $\leq 2.5 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ InGaN 이종접합초기연구 · 접촉저항 $5 \times 10^{-6} \Omega \text{ cm}^2$ 이하 · $f_T = 40 \text{ GHz}$, $f_{\text{max}} = 100 \text{ GHz}$ 이상 고주파소자 제작 · 소자의 출력과 잡음 측정 및 모델 · 온도효과 모델 기술 개발
	응용소자 기반기술	- AlN, InN의 선구물질 개발 및 대면적 에피기판 성장 신기술개발 - 다이아몬드 에피기판 기술개발
3단계	극한환경 고출력 전자기능성 소 재	- 500 ℃ 이상 작동 3 W/mm 급 단위 SiC MESFET 제작 - 15 W급 microwave 대역 SiC amplifier 제작 - 300 W급 SIT 제작 - 전자이동도 $\geq 500 \text{ cm}^2/\text{V}\cdot\text{sec}$ 이상/micropipes 밀도 ~ 1 개/cm ² 에피 성장
	고주파 전자기능성 소 재	- 전자소자의 응용 · 전자이동도 $\geq 2000 \text{ cm}^2/\text{Vs}/\text{sheet charge density} \geq 2 \times 10^{13} \text{ cm}^{-2}$ · Background doping density $\leq 1 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ InGaN 이종접합 구현 · 접촉저항 $10^{-6} \Omega \text{ cm}^2$ 이하 · $f_T = 70 \text{ GHz}$, $f_{\text{max}} = 150 \text{ GHz}$ 이상 고주파소자 제작 · 출력 $\geq 10 \text{ W}$ ($> 10 \text{ GHz}$)/항복전압 $\geq 200 \text{ V}$ 고출력소자 제작 · 수율 및 신뢰성 향상 · 응용회로 설계 및 측정
	응용소자 기반기술	- GaN계 및 SiC계 선구물질 및 고품위/대면적 에피기판의 양산기술 개발 - Nano-flat 및 다이아몬드-Si 에피기판 개발

5. 결 론

현재의 과학기술산업의 발전 추이로 보아, 질화물·탄화물 반도체 소재를 이용한 소자 및 응용제품은 정보전자, 의료기술, 이동/위성통신 시스템 등 산업 곳곳에 급속도로 파급되어, 머지않아 우리 주위에서 흔히 접할 수 있게 될 것으로 예상된다. 현재 미국, 일본, EU 등 기술 선진국들은 질화물·탄화물 반도체를 이용한 신기능 소재/소자 관련 연구개발을 국가 최우선 전략과제로 선정하고, 2000년대 과학기술산업을 주도하기 위한 치열한 기술전쟁을 선포하였다.

탁월한 광전기능과 초고주파-고출력의 전자기능을 겸비하고 있는 질화물·탄화물 반도체 소재 및 관련 소자/시스템 기술은 정보전자통신의 전 분야에 광범위하게 활용될 수 있는 핵심 기반기술로서 차세대 기술산업을 주도해 갈 것임이 분명하다. 이러한 맥락에서 볼 때, 선진국과의 기술격차를 줄이고 차세대 과학기술산업을 선도하는 길은 질화물·탄화물 반도체 소재/소자의 요소·핵심기술 확립을 조속히 실현시키는 것이다. 반도체 기술을 기초로 한 원천·기반기술 및 특허 확보를 통하여 미국, 일본, EU 등의 선진국으로부터 기술 독립을 이루기 전에는 세계시장의 점유는 더욱 어려워질 것이 분명하며, 본문의 표 5에 제시한 내수시장 예측수치는 허수에 불과하다는 사실을 간과하여서는 아니된다.

본 논문을 통하여 간략하게 소개된 질화물·탄화물 반도체 연구개발 과제명과 RFP가 관련 연구자들에게 향후 연구개발의 방향 설정에 보탬이 되는 유용한 정보가 되기를 바란다.

감사의 글

본 논문에 수록한 RFP는 과학기술부의 연구기획 사업인 “차세대 기능성 신소재 기술개발 연구기획” (총괄책임자 : 이상로, 한국기계연구원)의 세부분야인 “질화물·탄화물 반도체 소재개발 전략연구” (책임자 : 노삼규, 한국표준과학연구원) 과제의 연구기획 보고서(KRISS-99-103-IR)에서 인용한 것임을 밝힙니다. 연구기획 프로그램에 참여하여 자료를 정리, 제공하여 주신 임기영(전북대), 함성호(경북대),

김선태(대전산업대), 신무환(명지대), 범진욱(서강대), 심규환(ETRI) 등 기획위원 및 협력위원, 그리고 박윤수박사님(ONR, 미국), 민석기교수님(고려대), 정중현교수님(연세대), 김치락님, 황인록님(반도체산업협회) 등 자문위원들께 이 지면을 빌어 감사의 뜻을 전합니다. 특히, 본 연구기획의 기회를 제공하고 조언과 격려를 아끼지 않으신 김중호, 배정희 사무관님(과학기술부), 여운석, 김문식 사무관님(산업자원부)께 이 자리를 빌어 사의를 표합니다.

참 고 문 헌

1. S. Nakamura and G. Fasol, *The Blue Laser Diode-GaN Based Light Emitters and Lasers*, Springer, Berlin, 1997.
2. S. Strite and H. Morkoc, *J. Vac. Sci. Technol.* **B10**, 1237 (1992).
3. M. Razeghi and A. Rogalski, *Appl. Phys.* **9**, 7433, 1996.
4. Y. S. Park, *J. Korean Phys. Soc.* **34**, S199 (1999).
5. J. H. Edgar(Ed.), *Properties of Group III Nitrides*(Electrical Materials and Information Service(EMIS) Datareviews Series No. **11**, IEE), Short Run Press, Exeter, 1994.
6. *Gallium Nitrides 1997-Technology Status and Applications Analysis*, Strategies Unlimited, Mountain View, 1997.
7. *Compound Semiconductor* **5(5)**, 1999, pp. 15-38(cover story).
8. 노삼규, 김은규, 임기영, 함성호, 김선태, 신무환, 범진욱, 심규환, *질화물·탄화물 반도체 소재개발 전략 연구*(차세대 기능성 신소재 기술개발 연구기획 별쇄본), 과학기술부 연구개발보고서, **KRISS-99-103-IR**, 한국표준과학연구원, 1999.
9. 후지카메라총연-질화갈륨시장(후지전자, 일본, 1996), 광산업동향(Rare-matal, 일본, 1997) 등 기술동향 및 시장예측 보고서.
10. Nichia Chemical, Toyota Gosei (일본), Cree Research, HP (미국) 등 기업 제품소개 자료.