

## 광기술용 반도체의 개발현황 및 전망



**박 성 관**  
(유한대학 전자과 교수)



**강 기 성**  
(강원도립대학 정보통신과 교수)



**강 창 수**  
(유한대학 전자과 교수)

### 1. 서론

20세기 과학기술이 이룩한 수많은 업적 중에서, 우리와 가장 친근하면서 우리 일상생활을 가장 많이 바꾸어 놓은 발명품은 트랜지스터 (transistor), 즉 반도체 소자 (semiconductor device)이다. 반도체 트랜지스터의 발명은 IC(집적회로, integrated circuit) 및 광전소자 (optoelectronic device)의 실용화로 이어졌고, 고집적 (high integration) IC와 고속 (high speed) 전자소자 및 반도체 레이저다이오드 (laser diode, LD)의 상용화는 정보통신기술의 급속한 발달을 가져다 주었다. 또한, 정보의 세계화를 주도한 인터넷 (internet)은 고속 전자소자 및 LD에 기초한 초고속 광통신 시스템의 구축 없이는 불가능한 것으로서, 이제는 반도체를 뺀 현대사회는 상상할 수 없을 만큼 컴퓨터와 광통신은 이미 우리 일상생활 깊숙이 자리잡고 있다.

본고에서는 트랜지스터의 발명을 기폭제로 시작된 지난 반세기동안 현대 과학기술을 주도해 온 반도체의 역사를 회고하고 21세기에 벌어질 광기술용 반도체의 앞날에 대하여 전망해 보기로 하겠다.

### 2. 광기술 산업의 정의

광기술 산업은 빛의 성질을 이용하는 즉, 빛을 만들고, 제어하고, 빛을 활용하는 소재, 부품, 기기 및 시스템의 산업을 총칭한다. 빛의 실체인 photon의 성질을 이용하므로 광기술 산업을 기술적인 용어로 광자 기술 (Photonics) 산업이라 부르기도 한다. 빛은 에너지를 갖고 있을 뿐 아니라 파동성·입자성이 있어 이를 통해 정보를 전송하여 광통신이 구현되고 있으며, 정보의 저장 및 변환, 재료의 가공·측정 등의 용도로 사용할 수 있다. 광산업은 20세기 중반까지 주로 자연광을 제어하는 분야인 렌즈, 망원경, 현미경, 사진기 등 광학기기류 중심으로 전개되다가 1960년대 미국에서 레이저가 발명되면서 본격적으로 발전하기 시작하였다. 그 이후 반도체 레이저, 발광소자 (LED) 등 세기와 파장대가 조절되는 광원이 개발되고 이러한 광원의 특성에 맞는 응용분야의 개척이 이루어지면서 광산업이 비약적으로 발전되었다. 최근에 들어와서는 급증하는 인터넷 통신의 수요로 인해 대용량의 정보를 초고속으로 송수신하고자 광통신 기술이 접목되어 비약적으로 발전하고 있다. 이에 따라 광통신 및 광 정보기기의 사용이 급증하고 있

으며 광산업이 90년대 이후 활성화되고 있다.

광기술 산업은 빛의 기능에 따른 분류로 LED, 레이저 다이오드 등 자연광 이외의 특정 파장이나 에너지를 갖는 광원을 만드는 분야, 이러한 광원을 목적에 맞게 반사, 굴절, 회절 등 빛을 제어하여 응용하는 카메라, 현미경, 복사기 등의 결상 광학기기 분야, 광을 이용한 레이저 가공, 광통신, 광 정보처리 등에 응용하는 분야로 대별할 수 있다. 최근 광기술의 응용범위가 확대됨에 따라 기존의 결상 광학기기의 성장은 둔화되고 정보통신 관련 다양한 광 응용기기 제품들의 제품화 및 성장이 빠르게 전개되고 있다. 따라서 광산업의 구조도 순수 광학기기분야에서 광 응용기기로 점차 변화되고 있다.

산업적으로는 광기술의 응용 분야로 나누어 분류하고 있다. 한국의 경우는 선진국과는 달리 아직 광산업에 대한 개념과 분류가 불분명하고, 따라서 산업체에서는 광산업이 별도의 산업으로 인식되고 있지 않다. 실제 광산업을 타 산업의 연장선에서 이해하고 있어 실제 산업의 구분이나 범위가 불명확한 상황이다. 그러나 한국 광학기기협회와 산업연구원에서는 표 1 에서 나타낸 것과 같이 전분야를 총괄한 광의 개념으로 광산업을 분류하고 있다. 미국과 일본에서는 광전자 (Optoelectronics) 분야를 중심으로 광산업을 분류하고 있으며 광원과 광학기기 부문은 제외하고 있다. 특히 미국은 레이저 등 광 정밀기기 부문을 광산업에서 제외시켜 순수한 광전자 부문만을 광산업으로 구분하고 있다. 표 1 에 광산업에 대한 분류를 요약하였다. 우리나라의 산업분류의 경우 6개 세부 광산업에 모두 해당되지만 광공업통계조사 결과에 의하면 극히 제한된 품목이 실제 적용이 되고 있다. 표 1 에는 광산업의 기술별 분류에 따른 기술의 범위와 주요 제품을 나타내었다.

### 3. 광기술 산업의 특징과 중요성

광기술 산업은 아이디어 및 기술력의 비중이 크며, 원자재 및 인건비 부담이 적은 지식 기반형 산업화 사회에 가장 적합한 산업이다. 이와 함께 년 13% 이상의 고성장률의 고부가가치 산업이다. 또한 공해 발생의 최소 지향으로 환경 친화형 산업이며, 타 산업에 비해 기술변화가 빠르며 따라서 기술인력의 질과 수준이 산업경쟁력을 좌우하는 전형적인 기술집약적 산업이다. 따라서 원재료나 인건비 등의 비중이 낮고 기술정도에 따라 부가가치의 극대화가 가능한 업이다. 광기술 산업은 물리학, 광학, 화학 등 다양한 자연과학 분야와 전자공학, 기계공학, 재료공학, 화학공학 등의 응용기술 분야에 원천적으로 기반을 두고 있기 때문에 관련 기술이 함께 발전해야 성공할 수 있는 종합기술 성격이 강하다. 그 동안 광기술 산업은 연구실이나 실험실, 혹은 군사용 등 제한적인 용도에서 시장이 형성되었으나, 1990년대 이후 본격적인 산업화 단계로 진입 중이다. 광기술 산업은 그 기술적 속성상 그 산업적 역할과 중요성은 지대하다. 전자산업, 기계 및 자본재 산업, 소재산업, 에너지 및 환경산업, 화학산업, 의료산업 등에 골고루 영향을 미치며 발전하고 있다. 빛을 에너지원으로 이용할 수 있는 고출력 레이저의 경우 용접 및 가공에도 사용되며, 광신호를 이용한 계측기기의 경우 초정밀 실시간 계측의 기능으로 관련 기계 및 자본재 산업의 발전에도 큰 영향을 미치고 있다.

광기술 산업은 광화학 반응을 이용한 신물질의 합성 등 화학산업과 신소재 산업과 자연광을 광섬유 다발로 인도하여 지하에 자연광 조명을 통한 식물의 재배, 자연광 공금 등 조명 및 에너지 산업에도 많은 관련을 갖고 있다. 또한 21세기 정보화

표 1. 광산업의 기술별 분류와 주요 품목.

기술분야 및 범위		주요제품
광통신 분야	광통신용 재료 광통신부품 광통신 시스템	광섬유, 광섬유케이블 광커넥터, 광섬유소자, 광커플러, 광증폭기, 평면광회로소자, ONU 광전송시스템, 광교환기
광 정보기기 분야	광기록 부품 광기록 매체 광입출력 장치	광픽업, 광디스크 DVD, CD-ROM 스캐너, 레이저 프린터
광정밀기기 분야	레이저발생장치 정밀 가공기 광계측 기기 의료광학기기	산업용 레이저, 통신용 레이저 레이저(절단, 용접, 마킹), 반도체 가공기 광센서, 분광 분석기, 굴절을 측정기 내시경, 레이저 치료기, 영상 진단기
광원 응용 분야	광원 광변환 기기 디스플레이 소자	LED, LD, 산업용 광원, 고효율 광원 태양전지, CCD LCD, FED, PDP
광 소재 분야	광소재	광학유리, 단결정, 광축매 소재
광학 결상기기 분야	화상기록재생 관측검사기기 광학부품	카메라, 복사기, 팩시밀리 쌍안경, 현미경, 망원경, 야시경 렌즈, 프리즘, 반사경, 박막코팅 소재

시대는 광산업의 존재로 가능하다고 말할 수 있다. 전기적 신호를 통한 전자 병목현상이 빛을 이용한 광신호를 통한 광통신으로 해소되면서 고속, 대용량 정보통신 시대가 열렸다고 볼 수 있다. 광신호의 손실이 최소화된 석영 유리계 광섬유, 광섬유 신호의 저하를 해소한 광증폭기, 고�출력 반도체 레이저 등이 광통신의 핵심 부품 기술이다. 최근에는 가입자에게까지 광통신을 통한 인터넷을 위해 근거리 광통신용 플라스틱 광섬유의 개발에 전세계적으로 전력투구하고 있다. 현재는 전자산업 분야를 광기술이 응용된 제품이 부분적으로 대체하고 있으나, 계속하여 광이 전자의 상당부분을 대체해 가면서 발전할 것으로 예상하고 있다.

#### 4. 반도체 소재와 소자 응용

컴퓨터와 이동통신 단말기의 보편화와 광케이블과 통신위성을 통한 인터넷의 개통은 전세계를 동일한 공간간에 놓이게 하였다. 이러한 현대사회의 정보통신 시스템은 시간적으로는 빨라야 하고 공간적으로는 작아야 하는 기본 요구를 충족시켜야 하는 특징을 지니고 있다. 즉, 막대한 양의 정보를 짧은 시간 내에 빠르게 주고받기 위하여서는 초고속의 소자가 요구되는 한편, 공간이 협소한 가정이나 사무실에서도 사용이 가능하고 휴대가 손쉽게 이루어지기 위하여서는 작고 가벼워야 한다. 이 두 가지 요구를 완벽하게 만족시킴으로써 현대 정보통신 시스템의 실현을 가능하게 해 준 것이 바로 반도체이다. 소형의 고성능 PC를 가능하게 한 고집적 마이크로프로세서 및 메모리 소자의 비약적 발전에는 실리콘(Si) 반도체를 이용한 집적회로 기술이 있었으며, 초고속 광통신 시스템의 핵심 부품인 고속 소자와 LD 광원의 실현에는 화합물반도체(Compound Semiconductor)에 기초한 이질구조 소자의 끊임없는 연구개발이 있었다.

트랜지스터의 발명으로 촉발된 반도체에 관한 연구개발은 지난 반세기동안 기하급수적 도약을 거듭하였으며, 아무도 그 끝을 예상할 수 없는 급속한 발전을 현재도 계속하고 있다. 1947년 초기에 도입되었던 게르마늄(germanium, Ge) 반도체는 1954년 이후부터는 Si에게 반도체 소재의 주인 자리

를 물려줌으로써, "최초로 트랜지스터에 적용"이라는 영예만을 남긴 채 반도체산업의 열매를 맺지 못한 전세대(pre-generation) 반도체 소재로 역사에 기록되게 되었다. 1960년 전후부터 성장 가도를 달리는 메모리, 비메모리(마이크로프로세서) 반도체산업의 주역인 Si을 제 1세대 반도체라 부른다면, 1970년도 이후 본격적인 연구개발이 이루어지면서 고속-고주파 전자소자 및 발광, 수광 광전소자 분야를 전담해 온(InAlGa)(AsP) 계열의 III-V족 화합물은 제 2세대 반도체 소재에 속한다. 아주 최근인 1990년경 청색 발광소자(light emitting diode, LED)를 시작으로 가시광 광전소자의 실용화에 성공한 GaN 계열의 질화물(nitride) 및 SiC-C 탄화물(carbide) 소재는 다른 반도체가 가지지 못하는 광대역 파장범위(~100-650 nm)의 광전기능과 고�출력-초고주파(~100 GHz) 전자기능 뿐만 아니라, 내열성, 내방사성, 내부식성, 내마모성 등 특수환경에 강한 내환경성을 지니고 있어서 향후 다양한 응용이 예상되는 제 3세대 반도체 소재로 분류할 수가 있다. 표 2 는 반도체 소재의 세대별 분류에 따르는 물질계와 기초 특성과 관련된 소자응용 분야를 요약한 분류표이다.

그림 1 은 현재 연구개발에 활용되고 있는 주요 반도체 소재의 격자상수(lattice constant,  $a_0$ )와 밴드갭 에너지(band gap energy,  $E_g$ ) 또는 대응되는 파장(wavelength,  $\lambda$ )과의 상관관계를 보여주는  $[E_g/\lambda \cdot a_0]$  그래프로서, 반도체 소재의 기본 특성과 응용 범위를 개략적으로 나타낸 그림이다. 제 1세대 반도체 소재인 II족 원소인 [Si, Ge]은 그 특유의 안정한 역학 및 구조적 특성 때문에 마이크로프로세서와 RAM/ROM(Random-Access Memory/Read-Only Memory) 등의 메모리소자에 독점적으로 사용되고 있으며, 제 2세대 반도체 소재인 [GaAs, GaP, AlAs, InP] 등의 III-V 물질계는 특유의 고속 및 광전 특성에 힘입어 고속-고주파 전자소자와 적외선-가시광 영역의 발광/수광소자에 주로 활용되고 있다. 최근 반도체 분야의 연구개발을 주도하고 있는 [GaN, AlN, InN] III-V 질화물 및 [SiC-C] IV-IV 탄화물은 2-6 eV 범위의 광역 밴드갭 에너지 소재로서, Si이나 GaAs 계열 반도체가 지니지 못한 특유의 구조 및 광학적 특성 때문에 초고속 전자소자 및 단파장 광전소자에 그 실용성이 입증된 무궁무진한 잠

표 2. 반도체 소재의 세대별 분류와 소자응용 분야.

분류	반도체 물질계	소자 응용 분야
제 1세대	Group-IV 원소 Si	메모리/비메모리 전자소자 수광소자(근적외선)
제 2세대	III-V 화합물 (InAlGa)(AsP)	발광/수광 광전소자(근적외선-황록색) 고주파 전자소자(~10 GHz)
제 3세대	III-V 질화물/IV-IV 탄화물 (InAlGa)N/SiC-C(Diamond)	발광/수광 광전소자(적외선-자외선) □ 고�출력-초고주파 소자(~100 GHz) □ 내환경-특수기능소자(내열/내방사성/내부식/내마모)

재료의 차세대 반도체 소재로 평가되고 있다.

표 3 과 표 4 는 각 세대별 반도체의 대표 소재인 Si, GaAs, InP, GaN, 6H/3C-SiC, C(diamond) 등의 물리 전자적 기초 특성을 상호 비교해 놓은 도표이다. 밴드갭 에너지, 전자이동도 (electron mobility) 등 기본 성질과 소자 성능과

밀접하게 관련되는 파괴전계장 (breakdown electric field,  $E_{bd}$ ), 포화전자속도 (saturated electron velocity,  $V_s$ ), 열전도도 (thermal conductivity,  $\sigma_T$ ), 유전상수 (dielectric constant, K) 등의 값이 서로 비교되어 있다. 전자소자의 성능은 동작주파수, 동작속도, 출력, 열방출률 등에 의하여 결정되는

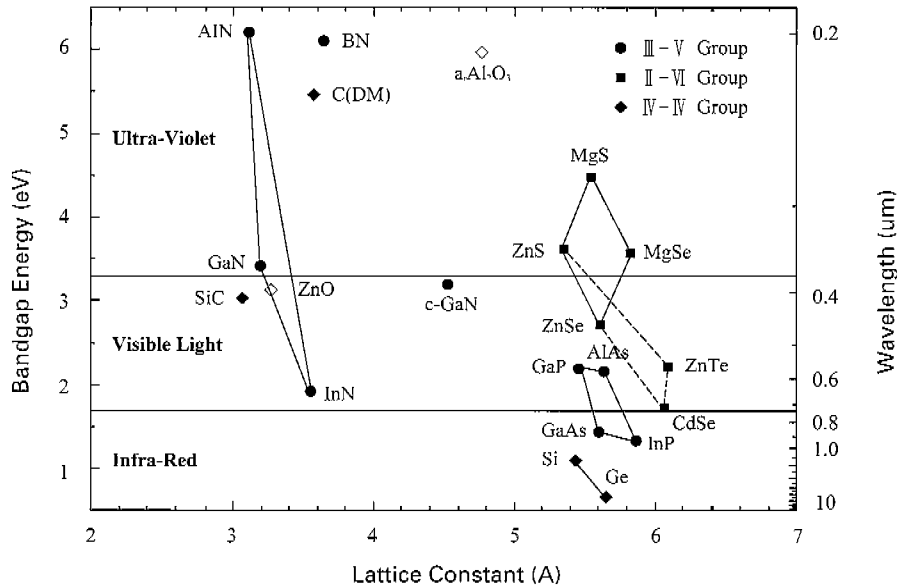


그림 1. 주요 반도체 소재의 격자상수와 밴드갭 에너지 상관도.

표 3. 주요 반도체 소재의 물리적 기초 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	J	I	J
Bandgap Energy (eV)	1.12	1.43	1.35	3.4	2.9	2.2	5.5
Electron Mobility (cm <sup>2</sup> /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 4. 주요 반도체 소재의 물리적 특성 및 소자특성.

Material	$E_{bd}$ (V/cm)	$V_s$ (cm/s)	$\sigma_T$ (W/cm.K)	K ( $\epsilon_0$ )	JFOM*		KFOM*	
					$WQ/s^2$	Ratio to Si	$W/(cm.s)^{1/2}$	Ratio to Si
Si	$3 \times 10^8$	$1.0 \times 10^7$	1.5	11.8	$9 \times 10^{23}$	1	$13.8 \times 10^2$	1.0
GaAs	$4 \times 10^8$	$2.0 \times 10^7$	0.5	12.8	$63 \times 10^{23}$	7	$6.2 \times 10^2$	0.5
InP	$6 \times 10^8$	$2.0 \times 10^7$	0.7	14.0	$144 \times 10^{23}$	16	$8.4 \times 10^2$	0.6
GaN	$20 \times 10^8$	$2.5 \times 10^7$	1.5	9.5	$2534 \times 10^{23}$	282	$24.3 \times 10^2$	1.8
6H-SiC	$40 \times 10^8$	$2.0 \times 10^7$	5.0	10.0	$6250 \times 10^{23}$	695	$70.7 \times 10^2$	5.1
3C-SiC	$40 \times 10^8$	$2.5 \times 10^7$	5.0	9.7	$10240 \times 10^{23}$	1138	$80.3 \times 10^2$	5.8
C(DM)	$100 \times 10^8$	$2.7 \times 10^7$	20.0	5.5	$73856 \times 10^{23}$	8206	$444.0 \times 10^2$	32.2

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

데, 소자특성지수 (figure of merit, FOM)는 소자에 적용된 반도체 소재의 우수성의 판단 기준으로 흔히 사용된다.  $[E_g V_s / \pi]^2$  으로 정의되는 Johnson's FOM (JFOM)은 소자의 동작주파수 및 출력의 우월성을 표현해 주는 하나의 기준이며,  $\sigma_r (V_s / K)^{1/2}$  로 표현되는 Keyes' FOM (KFOM)은 소자의 동작속도와 열방출 성능에 초점을 둔 지수이다. 표 4 에는 관련 특성값과 함께 JFOM 및 KFOM의 계산값이 수록되어 있는데, 제 3세대 반도체 소재로 급부상한 GaN와 6H-SiC의 JFOM/KFOM 값은 각각 Si에 비하여 282/1.8과 695/5.1배로서 월등하여 향후 다양한 소자에 응용이 전망된다.

표 5 는 현재 상용화되어 각종 장치에 활용되고 있는 반도체 능동소자와 관련 반도체 물질계 및 활용 분야를 정리한 도표인데, 적외선 및 방사선 검출기와 태양전지 등의 일부 수광소자에도 Si 소재가 폭 넓게 이용되고 있다. 그러나 Si 반도체는 본질적으로 광 특성이 나쁘기 때문에 전과장 영역의 발광소자와 고감도의 수광소자, 고속·고주파 전자소자 분야에는 Si의 사용은 거의 불가능하여, 각각의 특성에 적합한 각종 화합물 반도체가 다양하게 활용되고 있다.

### 5. 화합물반도체와 이질구조 소자 기술

현대의 정보사회를 구성하고 있는 3요소는 정보처리, 정보저장, 정보통신이다. Si 반도체와 IC 기술은 초고속, 대용량의 연산장치와 기억장치를 탑재한 고성능의 컴퓨터를 가능하게

함으로써 막대한 양의 정보를 빠른 속도로 처리하고 저장하게 해 주었을 뿐만 아니라, 인터넷을 통하여 빠른 속도로 전세계의 정보를 주고받을 수 있게 해 주었다. 그러면 무엇이 현대의 초고속 정보통신을 가능하게 만들었는가? 폭발적으로 늘어나고 있는 엄청난 양의 정보를 초고속으로 송수신할 수 있는 현대의 통신시스템은 광케이블을 통한 광통신 (optical communication)에 의한 것으로서, 거의 광속에 가까운 속도로 정보를 교환하고 있다. 광통신에서는 우리가 원하는 정보를 담은 전기적 신호를 광신호로 변환시켜 광케이블을 통하여 전송한 후 다시 전기신호로 바꾸는 3단계 과정을 거쳐야 하기 때문에, 광-전 신호변환에 요구되는 레이저 광원과 광검출기, 그리고 초고속 전자소자의 사용이 필수적이다. 화합물반도체의 이질구조에 기초한 반도체 레이저다이오드 (LD) 및 광검출기 (PD)와 고속 전자소자는 광통신의 3대 핵심부품으로서 현대 통신시스템을 가능하게 해 주었을 뿐만 아니라, LD, 발광소자 (LED)와 관련된 광전산업과 위성 및 이동 통신의 비약적 발전에 결정적인 공헌을 하였다.

루비 고체 레이저가 개발된 지 2년 후인 1962년 R.N. Hall은 반도체를 이용한 LD 개발에 성공하게 된다. 같은 물질계에 의한 동질접합 (homojunction) p-n 구조를 채택한 Hall의 최초 반도체 LD는 불행히도 임계전류가 높고 발광효율이 낮아 거의 실용 가능성이 없었기 때문에, "최초의 반도체 LD"라는 과학사에 한 줄을 남긴 채 만인의 기억에서 사라지고 만다. 이듬해 미국의 H. Kroemer와 러시아의 Zh.I. Alferov는 비슷한 시기에 독립적으로 서로 다른 2종류의 반도체를 사용

표 5. 사용 반도체 소자와 관련 물질계 및 응용 시스템.

발광·수광 소자 (Light Emitter and Detector)		
■ 발광다이오드 (Light Emitting Diode / LED)		
- 적색 (Red)/620700 nm	AlGaAs, GaAsP	평판표시장치
- 황색 (Yellow)/570620 nm	GaAsP, InAlGaP, InGaN	평판표시장치
- 녹색 (Green)/500570 nm	GaP, InGaN	평판표시장치
- 청색 (Blue)/420500 nm	InGaN, SiC	평판표시장치
- 백색 (White)/~550 nm	InGaN, ZnCdSe	백색 조명용 광원
■ 레이저다이오드 (Laser Diode / LD)		
- 근적외선 (SWIR)/1.31.6 lm	InGaAsP, InNAsP	광통신 광원
- 근적외선 (SWIR)/780900 nm	AlGaAs, InAlGaP	원격조정 광원
- 적색 (Red)/630680 nm	AlGaAs	광기록 (< 5 Gb) 광원
- 청색 (Blue)/380520 nm	InGaN	광기록 (> 10 Gb) 광원
■ 광검출기 (Photo Detector / PD)		
- 원격외선 (LWIR)/814 lm	HgCdTe, AlGaAs	열영상, 열추적장치
- 중적외선 (MWIR)/15 lm	InSb, PbSe, HgCdTe	열영상, 적외선센서
- 근적외선 (SWIR)/13 lm	Si, Ge, InGaAs, PbS, PbSe	열영상, 적외선센서
- 근적외선 (SWIR)/1.31.6 lm	InGaAsP	광통신 검출기
- 근적외선 (SWIR)/780900 nm	AlGaAs, InAlGaP	원격조정 센서
- 근자외선 (NUV)/300360 nm	AlGaN	열추적장치, 고온센서
- 방사선 (X/γ-Ray)	Si, CdZnTe	방사선영상, 비파괴검사
■ 태양전지 (Solar Cell)		
	Si, CdTe, GaAs, InGaP	범용/위성용 태양전지

하는 이질접합 (heterojunction) 구조에 의한 LD의 원리를 제안하게 되는데, 7년 후인 1970년에 상온에서 연속 발진하는 반도체 LD가 Alferov 연구진에 의하여 성공을 거두게 된다. 이질접합은 서로 다른 밴드갭 에너지 (그림 1 참조)를 가지는 2종류의 화합물반도체를 원자적으로 급격한 계면을 가지도록 한층 한층 쌓은 (epitaxially grown) 구조로서, 보통 MBE (Molecular Beam Epitaxy)나 MOCVD (Metal-Organic Chemical Vapor Deposition) 성장방법으로 형성시킨다. LD 소자는 밴드갭이 큰 반도체 물질 사이에 낮은 밴드갭의 박막층 (활성층)을 삽입시킨 이중 이질구조를 가지는데, 활성층에 전하를 구속시켜 밀도만진 상태가 유도되도록 설계된다. 이때, 밴드갭이 작고 굴절률이 큰 활성층은 광자를 구속시키는 광도파관 역할을 함으로서 임계전류가 낮고 양자효율이 높은 LD를 가능하게 한다. Alferov 연구진은 초기에는 격자정합이 좋지 않은 GaAsP/GaAs 계열의 이질구조를 사용하였으나, 나중에 보다 계면특성이 우수한 AlGaAs/GaAs 이중 이질접합을 도입함으로써 성공의 돌파구를 마련하게 된다. 최초 펄스 발진에 성공한 1968년부터 2년 후인 1970년 5월에 상온에서 연속 발진하는 반도체 이질구조 LD가 처음으로 세상에 빛을 드러내게 된다. 미국의 Bell, IBM, RCA 등에서도 Kroemer의 제안에 따라 이질구조 LD에 관한 연구를 수행하게 되는데, Alferov와 거의 비슷한 시기에 Bell의 M.B. Panish 연구진에 의하여 상온 연속발진의 개가를 올린다.

LD 개발에 성공한 1970년을 기점으로 화합물반도체 이질구조 및 관련 응용소자 연구개발은 광케이블을 통한 광통신의 개통에 힘입어 본격적으로 전개되어 1980년도를 지나면서 비약적인 발전을 이루게 된다. 1980년 전후에 확립된 양자구조 (quantum structure)의 도입은 양자우물 LD, VCSEL (Vertical Cavity Surface Emitting Laser), QCL (quantum cascade laser) 등 고효율, 고효율, 신개념 LD 개발에 결정적인 공헌을 하였으며, 1980년대에 비약적인 발전이 이루어지는 MBE, MOCVD 성장기술은 보다 새로운 개념의 양자소자 연구개발을 지속시켜 주는 원동력이 된다. 한편, 500 nm 이하의 단파장 광원에 관한 연구개발은 초고밀도 DVD (Digital Video Disc) 광원의 요구와 때를 같이하여 비교적 최근에 이루어진다. GaN 계열 이질구조를 사용한 최초의 상용 청색 LED 개발에 성공한 일본의 S. Nakamura (Nichia)는 2년 후인 1996년 상온 연속발진의 청자색 LD 개발을 발표함으로써, 반도체 분야의 오랜 숙원이었던 단파장 발광소자 개발의 개가를 이루게 된다. 청색 LED의 출현은 GaN 계열 화합물반도체 연구개발을 촉발시키는 중요한 계기를 마련해 주었으며, GaN에 기초한 새로운 광전 및 전자 소자에 관한 연구개발은 현재도 끝없는 항해를 계속하고 있다.

반도체 LD는 광통신용 광원 뿐만 아니라 CD (Compact Disc)/DVD의 R/W (read/write)용 광원, 원격조정기

(remote controller), 바코드판독기 (bar-code reader), 광지시봉 (laser pointer) 등에 폭 넓게 활용되고 있으며, LD와 유사한 원리로 작동되는 LED는 총천연색의 대형 모니터/광고판, 자동차 지시등, 신호등, 그리고 프린터, 스캐너 등의 칼라 영상감지소자 등 다양하게 응용되고 있다. 또한, 화합물반도체에 기초한 PD는 Si이 지니지 못한 특유의 광 특성 때문에 광통신 검출소자에는 물론 열 영상, 적외선 센서, 방사선 센서, 태양전지 등 적외선에서 고 에너지 방사선에 이르기까지 탁월한 수광 능력을 과시하고 있다(표 5 참조). 특히 최근 개발에 성공한 백색 LED는 100여년 동안 우리의 안방을 밝혀왔던 Edison의 백열전구를 대체할 전망이어서, 21세기는 화합물반도체가 빛을 찬란히 발하는 시대가 될 것은 분명하다.

LD 개발에 성공으로 이끌었던 이질구조는 광전소자 뿐만 아니라 전자소자에도 적용되어 Si 트랜지스터의 한계를 초월하는 초고속 트랜지스터 시대를 열어 주었다. 이질접합 트랜지스터는 기존의 Si보다 증폭 및 잡음 특성이 탁월할 뿐만 아니라, 동작속도가 100배 정도 빨라서 수백 GHz 초고주파수 영역에서도 동작이 가능함이 실험적으로 입증된 차세대 정보통신의 핵심소자로 인정되고 있다. 이질접합 초고속 트랜지스터는 현재 GHz 영역의 고주파를 이용하는 이동통신 및 위성통신/방송용 저잡음-고주파 증폭기에 탑재되고 있는데, 보다 높은 주파수가 요구되는 차세대 이동/위성통신의 발전은 초고속-초고주파 전자소자의 한계에 크게 의존할 것으로 전망된다.

Si 소자를 대표하는 쌍극성 접합 트랜지스터 (bipolar junction transistor, BJT)는 (n-p) 및 (p-n) 다이오드 2개를 이어 놓은 (n-p-n) 구조로서 에미터 (emitter, E), 베이스 (base, B), 콜렉터 (collector, C)의 3전극을 가지고 있는데, B 전압을 조정함으로써 E-C 전류 변화를 유도하여 전류증폭을 얻도록 고안된 증폭소자이다. 정공전류에 대한 전자전류의 비로 정의되는 BJT의 증폭률을 높이기 위해서는 얇고 도핑이 낮은 B를 필요로 하는데, 이 경우에 RC 시정수 (time constant)가 커져서 동작속도가 늦어지는 원리적인 문제를 지니고 있다. 이러한 문제는 B에 밴드갭 에너지가 낮은 물질을 삽입함으로써 해결할 수가 있는데, 이질접합 트랜지스터 (heterojunction transistor, HBT)는 바로 이러한 구조를 도입한 소자이다. HBT의 B에 E-C의 밴드갭 에너지보다 낮은 반도체를 사용하면, 에너지 장벽이 낮아질 뿐만 아니라 정공전류의 변화 없이 저항이 높고 얇은 B층을 만드는 것이 가능하여 RC 시정수를 현저히 줄일 수가 있기 때문에, 기존 BJT에서는 불가능하였던 고주파 증폭을 가능하게 한다. HBT에 관한 기본 원리는 1950년 전후에 이미 W.B. Shockley에 의하여 제안되고 I. Gubanov에 의하여 이론적인 접근이 있었으나, 낮은 밴드갭 물질을 B에 도입한 현대적 개념의 HBT 구조와 정확한 해석은 1957년 미국의 H. Kroemer (RCA)에 의하여

이루어진다. 그림 2 는 H. Kroemer가 최초로 제안한 이질구조와 에너지밴드 모형으로 HBT의 동작 원리를 도식적으로 보여주고 있다.

1960년에 개발된 Si MOSFET (MOS Field-Effect Transistor)은 현대 메모리 IC를 구성하는 기본 소자일 뿐만 아니라, 반도체 물리학에 새로운 장을 여는 결정적 단서를 제공한 연구용 시료로도 그 의미가 크다. 1963년 P.J. Stiles (IBM) 연구진은 MOSFET 구조에서 최초로 2차원 전자계 (2-dimensional electron gas, 2DEG)를 발견함으로써, 기존의 3차원적 특성과는 전혀 다른 저차원 전자계에 관한 연구 개발에 불씨를 던지게 된다. 1970년 전후에 J.R. Arthur, A.Y. Cho 등이 확립한 MBE 성장법과 H. Manasevit 등에 의하여 개발된 MOCVD 기술은 화합물반도체에 기초한 초박막 구조 제작을 가능하게 하였고, 저차원계 반도체 연구에는 Si MOSFET 구조보다 화합물반도체 이질구조가 더 적합함을 입증해 보임으로써 저차원 물리학 및 양자소자에 관한 연구개발을 본격화 시키는 토대를 마련해 주게 된다.

1967년 미국의 L. Esaki (IBM)는 초박막 반도체 이질구조로써 밴드갭을 자유 자재로 조절할 수 있는 초격자(super-lattice, SL) 구조를 형성시킬 수 있음을 이론적으로 예측하는데, 1970년에 R. Tsu와 L. Chang에 의하여 초격자의 존재가 실험적으로 증명됨으로써 "Man-made Crystals", "Band gap Engineering" 이라는 새로운 용어가 탄생하게 된다. 1980년대를 지나면서 초격자, 양자우물 (quantum well, QW) 구조는 시험소자에 적용되어 그 유용성을 인정 받게 되

며, HBT, HEMT (High Electron-Mobility Transistor) 등과 같은 고성능, 초고속 전자소자의 풍성한 결실을 거두게 된다. HEMT는 밴드갭 에너지가 서로 다른 2종류의 이질접합 계면에 발생하는 아주 얇은 삼각형 포텐셜 우물에 구속된 2차원적 전자계 (2DEG)의 특성을 이용한 것으로서, 불순물 도핑층과 2DEG 전도채널이 분리된 구조를 가지고 있어서 특히 저온에서 3차원 이동도의 수천 배에 달하는 높은 전자 이동도를 가진다. R. Dingle, T. Mimura 등 많은 사람들의 노력에 힘입어 실용화에 성공한 HEMT는 그 특유의 고속성 때문에 저잡음-고주파 증폭기에 채용되어 현재 우리가 이용하고 있는 이동/위성통신 시스템에 탑재되고 있다.

높은 전자 이동도를 가지는 HEMT는 고속 전자소자에 이용될 뿐만 아니라 새로운 물리현상의 발견에 좋은 시료를 제공하였다. 2DEG를 포함하고 있는 반도체 계의 Hall 저항은 자기장의 증가에 따라 선형적 변화 대신에 계단모양 (step-like)으로 양자화되는데, 이러한 현상을 양자 Hall 효과라 부른다. 1980년과 1981년에 각각 K. von Klitzing과 D.C Tsui에 의하여 발견된 정수 및 분수 양자 Hall 효과는 기본상수에 기초한 저항표준 확립과 분수형 기본전하의 존재를 밝힌 업적이 인정되어 1985년 (K. von Klitzing, M. Pepper, G. Dorda)과 1998년 (D.C Tsui, H.L. Stomer, R.B. Laughlin)에 각각 노벨 물리학상이 주어졌다. 2DEG에서 발견된 양자 Hall 효과의 발견은 저차원 계에 관한 관심을 자극하여 1차원의 양자선 (quantum wire, QWR), 0차원의 양자점 (quantum dot, QD) 연구개발을 촉발시키는 직접적인 동

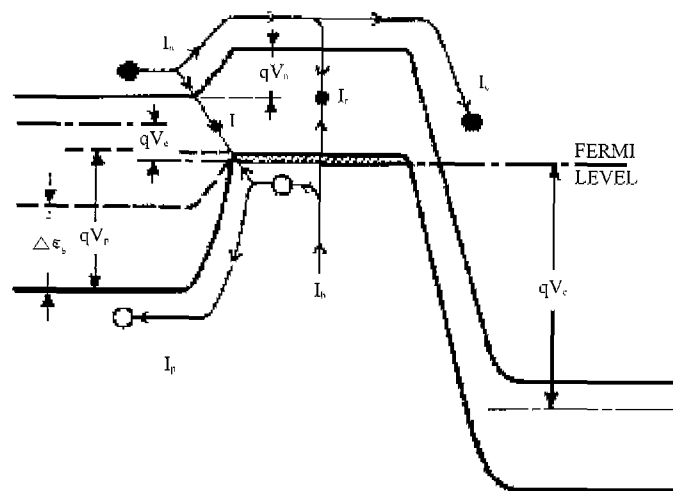


그림 2. Kroemer가 제안한 HBT 구조와 동작원리를 보여주는 에너지 밴드 모형.

표 6. International Technology Roadmap for Semiconductors 1999.

Device Parameter	1999	2002	2005	2008	2011	2014
Technology Node (nm)	180	130	100	70	50	35
Potential Lithography Solution	KrF	KrF+RET ArF	ArF+RET F2 PXL IPL	F <sub>2</sub> +RET EPL EUV IPL EBDW	EUV EPL IPL EBDW	EUV IPL EPL EBDW
MPU-ASIC 1/2 Pitch (nm)	230	160	115	80	55	40
DRAM 1/2 Pitch (nm)	180	130	100	70	50	35
ASIC Gate Length (nm)	180	130	100	70	50	35
MPU Gate Length (nm)	140	90	65	45	30	20
Gate Oxide Thickness (nm)	1.9-2.5	1.5-1.9	1.0-1.5	0.8-1.2	0.6-0.8	0.5-0.6
KrF=248 nm / ArF=193 nm / F2=157 nm RET=Reticle Enhancement Technology/EPL=Electron Projection Lithography PXL= Proximity X-ray Lithography/IPL=Ion Projection Lithography EUV=Extreme Ultra-Violet/EBDW=Electron Beam Direct Write						

기가 된다. 1990년을 전후로 시작된 QD에 관한 연구는 실용성 있는 양자점 레이저 다이오드 (QDLD)와 단전자 트랜지스터 (single electron transistor, SET)의 실현을 목표로 현재 까지도 계속되고 있다. 현재 QDLD는 상온 연속발진이 실험실에서 성공한 수준이며, SET는 저온에서 동작 가능성이 입증된 상태로서 실용화를 위한 엄청난 노력이 계속되고 있다.

### 6. 앞으로의 전망

1970년대에 들어서면서 Si 소자 기술과 화합물반도체 이질구조 연구는 새로운 국면을 맞이하게 된다. 1960년대에 이룩한 풍부한 연구개발 결과와 성숙한 소자제작 기술을 바탕으로 Si 반도체는 본격적인 양산 IC 체제에 돌입하게 되며, 집적도 향상을 목표로 한 선폭 (feature size)과의 전쟁을 시작한다. IC 기술은 DRAM과 CPU 개발과 함께 발전해 왔다. 1970년경부터 미국 SIA (Semiconductor Industry Association)는 매년 "International Technology Roadmap for Semiconductors" 를 제시하고 있는데, 표 6 은 1999년에 발표한 SIA의 반도체 기술규격이다. 2000년 현재 256 Mb DRAM은 양산단계로서 각종 전자장치에 실장되고 있고, 1 Gb DRAM은 시험제작에 성공한 상태이다. SIA는 2014년에 35nm 선폭의 CMOS 기술에 도전하는 야심찬 장기계획을 제시하고 있으나, 현대 IC 기술은 100 nm의 선폭 (2005년)을 기점으로 엄청난 기술 장벽에 부딪힐 것으로 예상되어 그 귀추가 주목된다.

### 7. 결론

21세기 과학기술은 반도체기술과 유전자기술의 양대 축을 중심으로, 20세기에 축적한 다양한 과학기술이 결합, 집중됨

으로써 새로운 패러다임의 기술산업으로 발전되어 갈 것으로 예측된다. 특히, 반도체 기술은 정보통신, 항공, 우주 등의 핵심 기반기술로서 경박단소와 더불어 초고속화, 대용량화, 고성능화, 저전력화, 다기능화로 특징 지워지는 신개념의 소재 및 소자가 출현하여 새로운 정보통신 사회를 형성하는 결정적인 역할을 담당할 것이다. 폭발적인 증가를 보일 것으로 예상되는 21세기 정보통신 수요에 부응하기 위해서는 테라비트 (tera bit, 1 Tb=10<sup>12</sup> b) 급의 초대용량 정보저장 기술과, 테라헤르쯔 (tera herz, 1 THz=10<sup>12</sup> Hz) 급의 초고속 정보처리 및 전송 기술이 필연적으로 요구된다. Tb 급 집적도를 갖는 메모리소자를 구현하기 위해서는 수십 내지 수백 개 정도의 원자로 구성되는 원자개념의 단위소자가 실현되어야 하며, THz 통신에는 기존의 방식과는 전혀 새로운 통신 패러다임이 요구될 전망이다. 그러므로 21세기 반도체 과학기술은 원자 크기 정도의 물질을 정확하게 제어하는 수준으로 발전할 것으로 전망되는데, STM/AFM과 같은 탐침형 현미경을 통한 원자단위의 조작 및 제어, 스핀-전하 제어, CNT의 출현, 질화물·탄화물 반도체의 확산, SA-QDT, SET의 가시화 등 최근의 연구 결과들은 이러한 요구의 단편을 보여 주고 있는 것으로 평가된다.

### 참고 문헌

- [1] J. S. Kilby, IEEE Trans. Electron Dev., Vol. 23, p. 648, 1976.
- [2] Zh.I. Alferov, Physica Scripta, Vol. T68, p. 32, 1996.
- [3] H. Kroemer, Physica Scripta, Vol. T68, p. 10, 1996.



[4] P. Burggraaf, 2000 begins with a revised industry roadmap. Solid State Technology, Vol. 31, 2000.

[5] 노삼규, 김은규, 임기영, 함성호, 김선태, 신무환, 범진욱, 심 규환, 질화물·탄화물 반도체 소재개발 전략 연구 (차세대 기능성 신소재 기술개발 연구기획 별쇄본), 과학기술부 연구 개발보고서, KRISS-99-103-IR, 한국표준과학연구원 (1999).

[6] <http://www.nobel.se/annouement/2000/physics.html>

## 저 자 약 력

### 성명 :곽성관

#### ❖ 학 력

- 1991년          경희대 전자공학과 공학사
- 1995년          경희대 대학원 전자공학과 공학석사
- 2000년          경희대 대학원 전자공학과 공학박사

#### ❖ 경 력

- 1994년 3월 - 1998년 2월  
   한국과학기술연구원 학생연구원
- 1999년 3월 - 현재      경희대 전자정보학부 강사
- 2001년 9월 - 현재      유한대학 전자과 강사

#### ❖ 주 관심 분야

- metallization, LCD소자, 반도체센서

### 성명 : 강기성

#### ❖ 학 력

- 1986년          관동대 전자공학과 공학사
- 1988년          명지대 대학원 전자공학과 공학석사
- 1995년          명지대 대학원 전자공학과 공학박사

#### ❖ 경 력

- 1992년 - 1998년      가톨릭대 전자과 교수
- 1995년 - 2000년      (주)홍창 RF 연구소 기술고문
- 1998년 - 현재          강원도립대 정보통신과 교수

#### ❖ 주 관심 분야

- 광 반도체소자, 반도체박막 소자

### 성명 : 강창수

#### ❖ 학 력

- 1982년          광운대 전자공학과 공학사
- 1986년          한양대 대학원 전자공학과 공학석사
- 1992년          광운대 대학원 전자재료공학과 공학박사

#### ❖ 경 력

- 1995년 12월 - 1996년 12월  
   Clemson University Post Doc
- 1991년 3월 - 현재      유한대학 전자과 교수

#### ❖ 주 관심 분야

- 비휘발성반도체, 실리콘산화막, 광 반도체