

# 化合物 半導體에 대하여

## Compound Semiconductor

교수 최 병 두

〈8월호 特輯의 계속〉

서울대학교 자연과학대학 물리학과

### 1. 머리말

제 2차 대전중 실용화되었던 광석 접파기의 경험은 그후 1948년에 Bratain 등에 의해 점점 축형 트랜지스터의 발명을 가져오게 되었고 이때부터 고체 Electronic 시대가 열리게 되었다. 처음에는 Ge에 의해 트랜지스터가 만들어졌으나 1960년에 와서 Si의 단결정 성장기술이 정착되면서 Si로 바뀌어지게 되었고 이때부터 Si Electronic 시대가 시작된 셈이다. 그후 Si 트랜지스터는 집적회로 IC로 바뀌어지고 이어 LSI와 VLSI로 이어졌다.

이와같이 초고밀도의 집적화와 고속화로의 노력은 불과 20여년 동안에 급격한 발전을 이루어 소위 Sub-Micron Electronics 시대를 맞게 되었다. 이제는 공정기술상으로 거의 극한적 한계에 이르고 있다고 볼 수 있다. 이와 같은 초고밀도의 집적화 기술은 현대의 통신분야는 물론 대소형 Computer를 등장시켜 고속 대량 정보처리 능력을 제공함으로써 소위 정보화시대를 여는 원동력이 되고 있다.

그러나 Si만으로는 재료 특성상 상한이 있기 때문에 이 한계를 넘기 위해서는 보다 좋은 특성을 가진 새로운 재료가 요구되는데, 이와 같은 요구를 충족시킬 수 있는 재료가 다름아닌 신

전자소재인 화합물 반도체인 것이다.

현대의 Electronics는 소자면으로나 장래의 발전추세로 보아서 두 분야로 대별할 수 있다. 그 하나는 Microelectronics 분야이고 또 하나는 Optoelectronics 분야이다. Si에 의한 Microelectronics는 더욱 고도의 초고집적화되어 논리, 기억기능이 신장될 것이고 이에 대해서 Optoelectronics 분야는 화합물 반도체를 주축으로 LED나 Laser Diode 등의 광소자와 신호의 인식과 감지기능을 갖는 각종 Sensor의 개발 그리고 광집적회로가 실용화됨으로써 이 두 분야는 서로 상보적이고 상호 보완적으로 발전되어 경이적인 차대의 고체 Electronics 시대를 열게 될 것이다. 이와 같은 Electronics의 발전은 앞으로 사회생활의 변혁을 비롯해서 산업분야 전반에 걸친 변혁을 일으키는 주역일 것이다.

## 2. 화합물 반도체의 종류와 특성

화합물 반도체는 사실인즉 Si 보다도 먼저 반도체로서의 특성을 인정받고 있었다. 즉 1952년 V. H. Welker가 III - V족 화합물이 반도체적 성질을 갖는다는 것을 밝힌 이래 수 많은 화합물 반도체가 등장하였다. 그 중에서도 GaAs는 한때 만능재료(All Mighty Semiconductor)라 불리우기도 하였고 현재의 Si의 위치를 GaAs가 차지할 것이라고 믿어지기도 하였다. 화합물 반도체의 종류는 대단히 많고 그 특성도 다양하여 재료마다 그 특성을 살린 새로운 기능의 소자를 제작할 수 있는 소지를 갖고 있다. 여기서는 지면 관계상 여러 화합물 반도체 중에서 Optoelectronics에 관계되는 III - V족 반도체를 중심으로 기술하고자 한다.

III - V족 화합물 반도체는 원소주기율표에서 III족 원소와 V족 원소의 결합으로 이루어진 화

합물이며 모두 인공력으로 합성되는 물질들이다 (표 1 참조).

그 중에서도 초고주파소자와 광소자로서 가장 많이 연구되어 왔고 가장 실용화가 많이 이루어진 물질은 역시 GaAs이다. 여기서 GaAs를 중심으로 그의 특성과 연구현황을 알아봄으로써 화합물 반도체의 중요성과 장래를 미루어 보기로 한다.

우선 Si와 GaAs의 중요한 특성을 비교해 보면 표 2와 같다.

여기서 주목해야 할 중요한 특성은 전자의 이동도와 대구조이다. 우선 전자의 이동도(Electron Mobility)를 비교해 보면 GaAs가 Si의 약 5배가 되고 또한 전자의 최고 Drift Velocity도 Si의 약 2배가 된다. 이와 같은 특성은 상층적으로 고주파 소자에 유리한 조건이 된다. 그렇기 때문에 1974년에는 Hulet Packer사에서 IC화에 성공하였고 Diode나 Transistor뿐 아니라 여러가지 처리기술의 발전으로 차차 고집적화가 이루어져 근년에는 수 Kb 규모의 LSI가 개발되고 있으며 주파수의 영역도 30GHz까지 확장되고 있다.

Gunn Diode는 mm파의 고체전원으로 사용되고 있는데, 이것은 GaAs의 특수한 대구조 때문에 생기는 부저항 현상을 이용하는 것으로 또 하나의 특수기능소자의 한 예이다. 화합물 반도체의 가장 큰 Merit는 역시 광소자에 있다. 이것은 표 2에서 알 수 있듯이 Si가 간접 천이형 대구조인데 반해 GaAs는 직접 천이형의 대구조이기 때문에 고효율의 발광소자를 제작할 수 있기 때문이다. 이것은 Si로서는 불가능한 것으로 화합물 반도체만이 가능한 기능이다. 그러므로 고효율의 발광 Diode(LED)나 Laser Diode(LD)는 주로 직접천이형 GaAs를 중심으로 III - V족 화합물에 의해 제작되고 있다. GaAs에 의한 적외선 LED, 3원화합물인 GaAsP나

AlGaAs 등에 의한 가시영역의 표시용 LED 등이 실용화 되고 있고 통신분야에 혁신을 가져온 광통신용 Laser Diode도 모두 III-V족 화합물 반도체에 의해 실용화되고 있다.

### 3. 결정성장기술과 혼합결정

GaAs가 Si보다 우수한 특성을 갖고 있으면서도 Si에게 그의 왕좌를 물려준 것은 GaAs가

〈표 1〉 III-V족 화합물 반도체의 종류와 특성

III족 \ V족	B	Al	Ga	In
N	BN (ZB) (W) ○3,000°C에서 승화 ○내열 세라믹	AlN (W) ○2,450°C에서 승화 ○내열 세라믹	GaN (W) ○800°C에서 승화 ○적색 LED	InN (W) ○용점 : 1,200°C
P	BP (ZB) ○용점 : 2,000°C	AlP (ZB) ○용점 : 2,000°C	GaP (ZB) ○용점 : 1,467°C ○LED (적색, 황색, 녹색)	InP (ZB) ○용점 : 1,070°C ○MISFET ○Laser용기관
As	BA <sub>s</sub> (ZB) ~	AlAs (ZB) ○용점 > 1,740°C ○혼합결정재료	GaAs (ZB) ○용점 : 1,238°C ○적외 Laser LED ○초고주파 소자	InP (ZB) ○용점 : 942°C ○Hall Sensor
Sb	BSb (ZB) ~	AlSb (ZB) ○용점 : 1,050°C ○혼합결정재료	GaSb (ZB) ○용점 : 712°C ○혼합결정재료	InSb (ZB) ○용점 : 525°C ○적외선 Sensor ○혼합결정재료

(ZB) : Zincblende 형 결정

(W) : Wurzite형 결정

〈표 2〉 GaAs와 Si의 특성비교 (300°K)

	GaAs	Si
대 폭 (Band Gap) (eV)	1.43	1.12
전자이동도 (Electron Mobility) (cm <sup>2</sup> /V. sec)	8,800	1,900
정공이동도 (Hole Mobility) ( " )	400	500
최고동작온도 (°C)	350	175
대 구조 (Band Structure)	직접천이형	간접천이형

Si와 같은 단체가 아닌 화합물이기에 그만큼 단결정성장기술에 어려움이 있기 때문이다. 소자를 만들기 위해서는 그 첫단계가 고순도의 질 좋은 단결정을 얻는 일이나 화합물 반도체의 결정성장 기술은 각종 화합물의 다양한 특성만큼이나 다양하고 성장조건도 까다롭다.

GaAs나 InP는 증기압이 높은 As나 P를 갖고 있어서 완벽한 화학량론적조성(Stoichiometry)을 얻는 데 어려움이 있고 이것은 재료특성을 크게 좌우하기 때문에 중요한 문제가 된다. 결정성장기술은 Bulk 성장과 Epitaxial 성장으로 대별할 수 있다. Bulk 결정은 기판 Wafer용으로 사용하기 위한 것이고 Epitaxial 성장은 박막성장법으로서 소자 제조기술과 직결된다. 따라서 Epitaxial 성장기술은 소자의 제조능력과 소자의 질을 좌우하게 된다.

이 Epitaxial 성장기술은 1960년 He-Ne 가스 Laser의 연속발전, 그리고 1962년 반도체 Laser의 발전에 성공함으로써 급격한 진전을 가져 왔다. 이 Epitaxial 성장법은 1) 액상성장법(LPE) 2) 기상성장법(VPE) 3) 유기금속 기상성장법(MOCVD) 4) 분자선성장법(MBE) 등으로 분류된다.

액상성장법은 광소자 제작기술의 주류를 이루고 있으며 이 방법으로 1967년에 처음으로 200 K에서 반도체 Laser의 연속발진에 성공을 거두었다. 이를 계기로 1970년대에는 각종 재료(GaP, AlGaAs, GaAsP 등)에 의한 LED의 개발에 큰 진전이 이루어졌고 이종접합구조(Hetero Structure)의 도입으로 Laser Diode의 실용화를 가능케 하는 돌파구를 찾게 되어 본격적인 광소자 연구에 박차가 가해지게 되었다. 따라서 이 시기에 결정성장기술도 관련 공정기술과 더불어 큰 진전을 보았다.

일반적으로 광소자 제조에 가장 많이 이용되는 방법은 LPE법인데, 이 방법은 III-족 금속

을 용매로 한 포화용액으로부터 결정을 석출시키는 일종의 용액성장법의 하나이다.

VPE법은 하로겐화합물이나 수소화합물을 이용한 기체수송법으로서 고순도 재료를 얻는 데 적용된다. 또한 MOCVD법은 VPE법과 같은 기상성장법이나 원료화합물로서 금속유기화합물을 사용하는 것이 VPE와 다르다. LPE법에 비해 성장두께의 제어와 불순물의 제어가 용이할 뿐 아니라 후술하는 혼합결정의 성장에도 유리한 장점이 있어 이 방법의 연구가 대단히 활발하게 이루어지고 있다.

마지막 방법인 MBE법은 초고진공기술과 각종 점단분석기기를 총동원한 장치를 사용하여 원소 하나하나를 제어 분석하면서 성장시키는 방법으로 결정성장기구의 연구와 초격자 등과 같은 고도의 정밀구조를 필요로 하는 특수 기능 소자의 개발에 유용한 방법이라 할 수 있다.

표 3은 소자제조와 관계되는 결정성장 방법을 대범하게 표로 만든 것이다.

이상의 Epitaxial 성장기술들은 기본화합물의 특성을 이용하는 소극적인 단계를 넘어서 어떤 소자제작에 필요한 특성을 가진 결정을 인위적으로 설계, 제작하는 경지에 와 있다. 그 한 예로 GaAs는 그 대폭이 1.43eV로서 가능한 발광 파장은 적외선 영역에 속하기 때문에 가시발광은 불가능하다.

가시영역의 발광을 위해서는 대폭이 적어도 1.8eV 이상이 되는 것이 바람직하며 고효율을 얻기 위해서는 직접천이형이 바람직하다. 그런데 AlAs는 대폭이 2.16eV로, 가시영역의 발광에는 적합하나 대구조가 간접천이형이기 때문에 고효율을 얻는 데는 부적당하다. 그래서 GaAs와 AlAs를 적당한 비율로 혼합시키면 대폭이 크면서 직접천이형인 결정을 얻을 수가 있다. 실제로 GaAs와 AlAs의 혼합결정인 AlGaAs는 3원 화합물이라고 불리우며 AlAs의 조성비가

〈표 3〉 III-V족 소자와 관계 결정성장법

결 정	중 요 소 자	Epitoxial 성 장 법
GaAs	Micro파 Diode Hall 소자 Micro파 FET 적외발광 Diode	VPE LPE MOCVD MBE VPE MOCVD LPE
GaP	발광 Diode (적색, 황색, 녹색)	LPE
GaN	발광 Diode	VPE
InP	Gunn Diode FET	MOCVD
GaAsP	발광 Diode (적색, 등색)	VPE
AlGaAs	발광 Diode Laser Diode HEMT 소자 광감지소자	LPE MOCVD MBE
InGaAsP	발광 Diode (통신용) Laser Diode (장거리통신용)	LPE MOCVD

약 0.4까지는 직접천이형으로 그때의 대폭은 약 1.9eV가 되어 요구조건을 만족시킬 수 있다. 이와 같이 화합물 반도체는 두가지 이상의 혼합결정을 만들어서 인위적으로 새로운 특성을 갖는 재료를 만들 수가 있다.

3원화합물인 AlGaAs는 0.8 $\mu$ mCH의 Laser Diode와 LED로서 이미 1981년부터 중거리용 광통신회선에 사용되고 있고 4원화합물인 InGaAsP는 1.2 $\mu$ m 파장의 Laser Diode로서 장거리용 광통신에 사용된다. 이상은 실용화되고 있는 혼합결정의 예이며, 이 외에 수 많은 혼합물 결정이 연구되고 있다.

이와 같은 혼합물결정은 수 많은 기초연구와 까다로운 성장조건을 제어할 수 있는 특정한 결

정성장기술의 축적에 의해서만 가능한 것이기 때문에 화합물 반도체의 연구에 있어서 결정성장에 대한 연구와 기술축적은 대단히 중요한 과제가 된다.

#### 4. 맺음 말

III-V족 화합물을 중심으로 화합물 반도체의 다양성과 GaAs를 중심으로 Si와 다른 화합물 반도체 특유의 특성 몇가지를 훑어 봄으로써 화합물 반도체에 대한 대략적인 윤곽을 소개하고자 하였다.

고체 Laser의 실용화에 힘입어 1960년대 부터 싹트기 시작한 Optoelectronics는 1970년에 큰 발전을 이루어 광통신이라는 통신의 혁신을 가지고 왔고 그 외에도 초고속 IC와 각종 감지소자의 개발이 급속도로 가속화되고 있다.

Si Electronics가 신호의 전달과 정보처리 분야를 주도하고 있다면 화합물 반도체는 광원으로서 그리고 각종 감지소자로서 신호의 인식과 감지기능 분야를 이끌어 가게 될 것이다. 결국 이 두 분야는 서로 경쟁적 입장에서가 아니라 서로 상보적인 유대 속에서 조화를 이루어 상승적으로 또하나의 Electronics 혁신을 가지고 오리라 생각된다.

앞으로 화합물 반도체가 차지하는 비중은 날이 갈수록 커질 것이며 시장규모도 급격히 신장되리라는 것이 전문가들의 통일된 전망이다. 그렇기 때문에 화합물 반도체에 대한 요구와 기대는 그 어느 때보다 크게 부각되어 이 방면의 기술우위를 확보하기 위한 노력이 치열해지고 있다. 이미 우리나라도 기술도입에 의존하는 시대는 지났고 특히 화합물 반도체기술은 날로 기술장벽이 높아지고 있는 현실을 감안할 때 국제경쟁력을 확보하기 위해서는 독자적인 기술개발과 기술축적이 절실히 요망된다.