

MOCVD (有機金屬 化學 蒸着法)

金 武 性

(正 會 員)

韓國科學技術院 半導體 材料研究室

I. 서 론

MOCVD (metalorganic chemical vapor deposition; 유기금속 화학 증착법)이란 유기금속 화합물 또는 유기금속 화합물과 수소 화합물을 원료로 하고, 수소등을 이송기체 (carrier gas)로 사용하여 가열된 기판 (substrate) 위에서 비가역적 열분해 반응이 일어나도록 함으로써 고체 상태의 결정을 성장시키는 방법을 말한다.^[1] MOCVD에 대한 최초의 연구는 GaAs epi층 성장에 관한 것으로서, Rockwell사의 Manasevit에 의해 1968년 처음 보고되었다.^[2] 1975년 Bass에 의해 GaAs FET가 MOCVD법으로 제조되었고,^[3] 1977년 Dupuis와 Dapkus에 의해 GaAs를 active 층으로 한 double heterostructure laser diode가 개발되었으며,^[4] 1980년 Sony사의 Mori와 Watanabe에 의해 AlGaAs 단파장 laser diode가 MOCVD에 의해 제조되면서^[5] 이 방법에 대한 연구가 매우 활발하게 진행되기 시작하였다. 그후 MOCVD는 원료 정제 기술 및 reactor design 등 장비의 발전에 의해 다층 초박막 및 abrupt interface를 요하는 초격자 소자의 제조에도 이용되어 MBE (molecular beam epitaxy)법과 경합을 벌일 수 있는 수준까지 꾸준히 발전하고 있다. MOCVD는 III - V 족 뿐 아니라 II - VI 족, IV - VI 족 및 I - III - VI 족 화합물 반도체등 매우 다양한 종류의 2 원계 및 다원계 화합물 반도체 제조에 응용되고 있다.

본 논문에서는 GaAs 및 AlGaAs epi층 성장을 중심으로 MOCVD의 원리 및 장치, 결정 성장, 성장된 epi층의 특성 및 소자 제조의 응용에 대해 간략하게 기술하고자 한다.

II. MOCVD의 원리 및 특징

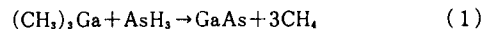
MOCVD는 유기금속 화합물 및 수소 화합물을 열분해시켜 고체의 결정을 성장시키는 방법이므로 사용되

는 원료는 다음과 같은 조건을 만족시켜야 한다.^[6]

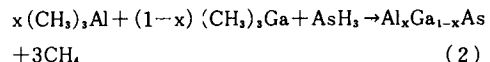
- ① 유기금속 화합물은 상온 근처에서 적당한 증기압 (1 torr 이상) 을 가지고, 가급적 액체일 것
- ② 가열하면 쉽게 분해될 것
- ③ 반응하여 생긴 부 생성물 (by product) 이 결정 성장을 방해하거나 성장된 결정을 오염시키지 않을 것
- ④ 고순도로 정제할 수 있을 것
- ⑤ 취급하기 쉬운 것

표 1에 MOCVD에 사용되는 유기금속 또는 수소 화합물의 기본 성질을 나타내었다.^[22] 예를 들어 GaAs epi층 성장에 쓰이는 TMG (trimethylgallium; $(CH_3)_3Ga$)은 상온에서 액체이고 0°C에서 65.4mmHg의 증기압을 가지고 있으며 상당한 고순도 (6N)로 정제할 수 있다. AsH_3 은 As의 원료로서 상온에서 기체이고 gas cylinder에 고압으로 충전하여 사용할 수 있다.

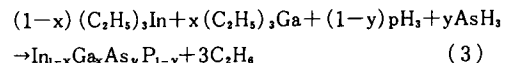
수소를 이송 기체로 하여 TMG와 AsH_3 을 반응로로 보내고 기판을 700°C 정도로 가열하면 다음과 같은 반응식에 의해 GaAs가 생성된다.



AlGaAs를 성장시키고자 하는 경우에는 TMA (trimethylaluminum; $(CH_3)_3Al$)을 첨가하면 되고 그 반응식은 다음과 같다.



또한 InGaAsP를 성장시키기 위해 TEI (triethylindium; $(C_2H_5)_3In$), TEG (triethylgallium), AsH_3 및 PH_3 를 원료로 사용하면 그 반응식은 다음과 같다.



이상과 같이 MOCVD는 2 원계뿐 아니라 3 원계, 4 원계의 화합물 반도체의 성장이 가능하며 조성도 거의 마음대로 조절할 수 있다. MOCVD의 장점을 들면

표 1. MOCVD에 많이 사용되는 화합물의 기본 성질

원 소	화 합 물	실온상태	용점(°C)	증기압 식*	
II족 Zn	(CH ₃) ₂ Zn	액체	-42.2	7.802-1560/T	
	(C ₂ H ₅) ₂ Zn	"	-30	8.280-2190/T	
	Cd	(CH ₃) ₂ Cd	"	-4.2	7.764-1850/T
	Hg	(CH ₃) ₂ Hg	"		7.575-1750/T
III족 Al	(CH ₃) ₃ Al	"	15	7.315-1534/(T-53)	
	(C ₂ H ₅) ₃ Al	"	-52.5	10.784-3625/T	
	Ga	(CH ₃) ₃ Ga	"	-15.8	8.07-1703/T
	(C ₂ H ₅) ₃ Ga	"	-82.3	8.224-2222/T	
In	(CH ₃) ₃ In	고체	88.4	10.520-3014/T	
	(C ₂ H ₅) ₃ In	액체	-32	1.2mmHg at 44°C	
IV족 Si	SiH ₄	기체	-185		
	Sn	(CH ₃) ₄ Sn	액체	-54.9	1mmHg at 33°C
	(C ₂ H ₅) ₄ Sn	"	-136~-125	7.495-1620/T	
	Pb	AsH ₃ , Pb	"	-27.5	
V족 P	PH ₃	기체	-133		
	(CH ₃) ₃ P	액체	-85	7.733-1512/T	
	(C ₂ H ₅) ₃ P	"	-88	7.86-2000/T	
	As	AsbH ₃	기체	-117	
	(CH ₃) ₃ As	액체	-87.3	7.712-1563/T	
	(C ₂ H ₅) ₃ Sb	"	-91	15.5mmHg at 37°C	
Sb	SbH ₃	기체	-88		
	(CH ₃) ₃ Sb	액체	-62	7.728-1709/T	
	(C ₂ H ₅) ₃ Sb	"	-98	17mmHg at 75°C	
VI족 S	H ₂ S	기체			
	Se	H ₂ Se	"	-64	
	(C ₂ H ₅) ₂ Se	액체		7.905-1924/T	
Te	H ₂ Te	기체			

* log P(mmHg) = A - B/T (T는 kelvin)

다음과 같다.⁽⁶⁾

① 원료가 모두 기체 상태로 공급되므로 공급되는 원료의 양을 비교적 쉽고 정확하게 조절할 수 있고, 다원계 및 다층 epi성장애 적당하다.

② 기관만 일정 온도로 가열하면 되므로 하나의 온도 영역만이 필요하게 되어 장치가 간단해지고 대량 생산이 가능하다.

③ Gaseous etchant가 없으므로 장치를 부식시키지 않는다.

④ 많은 양의 이송 기체를 사용하므로 autodoping이 적고, abrupt한 interface를 형성시킬 수 있다.

⑤ Epi층 성장 반응이 열분해 또는 kinetics에 의해 이루어지므로 heterostructure 성장이 용이하다.

⑥ Epi층 성장 속도를 광범위하게 변화시킬 수 있다. 한편, MOCVD의 단점을 들면 다음과 같다.

① 유기금속 화합물이 매우 산화되기 쉬우며, 특히 수소 화합물은 맹독성이므로 취급에 주의를 요하고 안전설비에 경비가 많이 소요된다.

② 유기금속 화합물내의 탄소가 epi층에 유입되기 쉽다.

③ 원료의 정제 기술이 아직 완전한 단계에 있지 않다.

최근에는 HEMT(high electron mobility transistor)나 MQW(multiple quantum well) laser diode 등 수백 Å 이하의 초박막 다원계 다층 구조 및 고균일성, 대면적의 epi wafer 제조에 초점이 맞추어지고 있으므로 MOCVD는 MBE와 함께 큰 관심을 끌고 있다. 표 2에 MOCVD와 MBE의 기술적 측면을 비교하여 나타내었다.^(1,7) MBE는 성장 온도가 낮고 epi층 사이의 급준성이 좋으나 V족 원소가 2 가지 이상 들어가는 다원계 epi층 성장이 어렵고, 고진공을 유지해야 하는 등의 단점이 있고, MOCVD는 In을 포함하는 epi층 성장을 위해서는 저압(lpw pressure)하에서 결정 성장을 해야 하는 어려움이 있다. 현재에는 가능한 한 저온에서 epi층을 성장시키고 selective epi층 성장등을 위해 자외선이나 excimer laser 또는 Ar ion laser 등을 이용한 photo MOCVD가 제안되고 있으며,⁽⁸⁾ MOCVD와 MBE를 조합한 MOMBE나 photo MOMBE 등의 새로운 방법도 시도되고 있다.⁽⁹⁾

표 2. MOCVD와 MBE의 기술비교

	MOCVD	MBE
Growth rate and/or composition	Source temp. (±0.25°C)	Source temp. (±0.4°C)
	Flow rates (±1%)	Substrate temp. (±5°C)
	Substrate temp. (±5°C)	
Doping	Flow rates	Source temp.
	Substrate temp.	Substrate temp.
Purity	Source purity	Vacuum
	Growth temp.	Materials
		Source purity
Interface abruptness	Reactor design	Shutter speed
	Flow rates	Rotation speed
	Substrate temp.	Substrate temp.
Production	≤900cm ³ /run	≤20cm ³ /run
Safety	Poisonous materials	Toxic wastes
	Pyrophoric materials	
	Toxic wastes	
System cost	\$ 200K~400K	\$ 700K~1000K

III. MOCVD 장치

그림 1에 대표적인 AlGaAs용 MOCVD 장치의 개략도를 나타내었다.¹¹⁾ MOCVD 장치는 feed system, reactor system, exhaust system의 3부분으로 크게 나눌 수 있으며, 이들을 간단히 설명하면 다음과 같다.

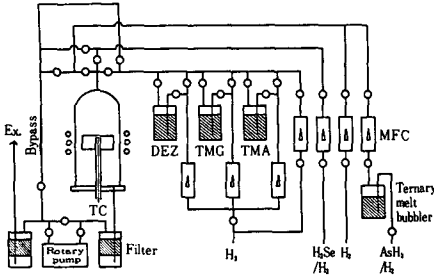


그림 1. MOCVD 장치의 개략도

1. Feed System

이 부분은 각종 반응 원료 및 수소 기체를 공급해주는 역할을 하며 수소 정제 장치, AsH₃, H₂Se, SiH₄ 등의 수소 화합물의 gas line과 TMG, TMA, DEZ (diethylzinc; (C₂H₅)₂Zn) 등의 유기금속 화합물의 bubbler 및 항온조가 있고, 유량 제어를 위한 MFC (mass flow controller) 및 valve들로 이루어져 있다. AsH₃은 100% 농도의 것을 쓰는 경우는 드물고 2~20%로 수소에 희석하여 사용하며, H₂Se나 SiH₄ 등의 dopant도 5~300ppm으로 수소에 희석하여 사용하고 있다. 유기금속 화합물은 teflon lined stainless steel cylinder (bubbler)에 담겨 있으며 이들의 유량 제어는 항온조의 온도와 bubbler로 유입되는 수소의 유량 변화로 이루어진다. 반응 기체들의 유량 안정화와 interface abruptness를 높이기 위해 reactor bypass line이 설치되어 있다.

2. Reactor System

MOCVD reactor는 주로 석영 유리로 제작되며 결정 성장시 AsH₃이 분해되어 생긴 As powder가 reactor 벽에 deposit되는 것을 방지하기 위해 water jacket을 설치하는 경우가 많다. Photo MOCVD reactor에서는 빛을 효율적으로 통과시키기 위해 특별한 reactor design이 필요하게 된다.

Susceptor는 graphite 또는 graphite에 SiC를 coating한 것을 주로 사용하며, susceptor의 가열은 주로 RF (radio frequency) 유도 가열을 이용하고 그의 halogen lamp, 백금 heater 등을 사용하기도 한다.

3. Exhaust System

여기에는 system을 진공으로 하거나 저압하에서 epi층을 성장시키기 위한 진공 pump와, As powder filter, AsH₃, H₂Se 등을 제거하기 위한 filter trap 및 수소 기체를 태우기 위한 연소장치 등이 있다.

그외, 안전을 위해 system 전체를 항상 배기하고 있어야 하며, 수소나 AsH₃ 등의 누출을 감지하기 위한 detector가 필요하다. 또한 최근에는 기판 교환시 공기 중의 수분이나 산소에 의해 reactor가 오염되는 것을 방지하기 위해 reactor에 load lock system을 설치하는 경우가 많으며, AsH₃ 등의 수소 화합물 내에 포함되어 있는 수분이나 산소를 제거하기 위해 gas line에 molecular sieve나 Ga-In-Al ternary melt bubbler를 설치하고 있다.¹²⁾ 그리고, epi층 성장시 여러개의 valve를 동시에 개폐해야 하므로 microprocessor나 computer를 부착하여 장비를 자동화하는 경향이 많다. MOCVD 장비는 그동안 주로 실험실에서 자체 제작되어 왔으나 최근들어 여러가지 MOCVD 장비가 시판되고 있다.

IV. MOCVD 결정 성장

GaAs 및 AlGaAs epi층 성장에 가장 많이 쓰이는 원료는 TMG, TMA 및 AsH₃이며 TEG (triethylgallium; (C₂H₅)₂Ga) 이나 TEA (triethylaluminum; (C₂H₅)₂Al)을 쓰기도 하며, As의 원료로서도 유기 화합물이 쓰이기도 한다(표1 참조). N-type dopant로는 H₂S, H₂Se, SiH₄, TMT (tetramethyltin; (CH₃)₄Sn) 및 TET (tetraethyltin; (C₂H₅)₄Sn) 등이 쓰인다. H₂S는 AlGaAs epi층 성장에는 적합치 않으며, H₂Se가 가장 많이 이용되나 memory effect가 크다. 최근에는 Si이나 Sn의 화합물을 쓰는 경향이 증가하고 있다. P-type dopant로는 DMZ (dimethylzinc; (CH₃)₂Zn) 및 DEZ (diethylzinc; (C₂H₅)₂Zn)가 가장 많이 사용되었으나 최근에는 Be, Mg, Cd 등의 유기금속 화합물의 사용이 증가하고 있다.

MOCVD epi층 성장에 영향을 미치는 변수들은 성장 온도, 반응 원료들의 종류 및 농도, 수소 이송 기체의 유량, 총압력 및 reactor geometry 등 여러가지가 있다. 그림 2에 성장 온도가 GaAs epi층의 성장 속도에 미치는 영향을 나타내었다.¹¹⁾ 600~750°C의 온도 영역에서는 성장 속도가 온도에 거의 무관하다.

그림 3에 TMG의 농도가 성장 속도가 미치는 영향을 나타내었다.¹¹⁾ 성장 속도는 TMG의 농도에 정비례한다. 그러나 성장 속도는 AsH₃의 농도에 의해서는 영

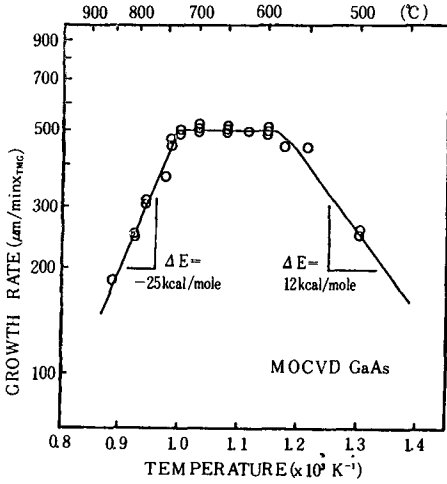


그림 2. 성장온도가 GaAs epi층의 성장 속도에 미치는 영향

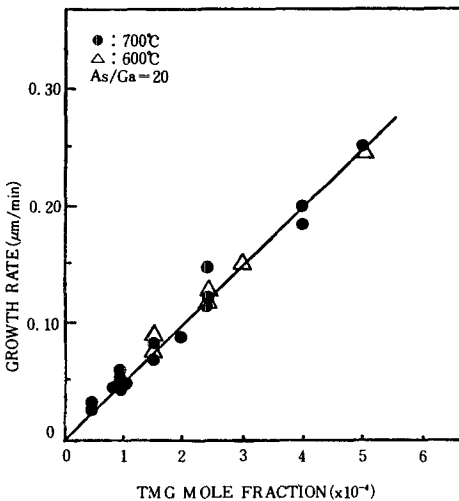


그림 3. TMG 농도가 GaAs epi층 성장 속도에 미치는 영향

향을 받지 않는다. 그러므로 epi층의 두께는 TMG의 농도와 성장 시간에 의해 조절할 수 있다. InP 등 다른 화합물 반도체의 epi층 성장에서도 이와 비슷한 현상을 볼 수 있다. Epi층의 surface morphology도 성장 조건에 따라 영향을 받는다. GaAs epi층의 경우 기판의 면방위가 (100)일 때 700°C 부근의 성장 온도에서 경면(mirror surface)을 얻을 수 있다. 그러나 면방위가 (110)이나 (111)인 경우 경면을 얻기가 곤란하다. 면방위가 (100)인 경우에도 성장 온도가 600°C 이하이거나 750°C 이상이면 hillock 등의 defect가 생기

며 성장 속도가 너무 커도 defect가 생길 우려가 있다. 그리고 AsH₃과 TMG의 농도비, As/Ga비가 1 근처로 작아도 surface morphology가 나빠진다. AlGaAs epi층의 surface morphology도 GaAs의 경우와 비슷한 양상을 보이나 경면을 얻을 수 있는 성장 조건은 더욱 제한되고 특히 산소나 수분의 영향을 많이 받는다.^{[10][12]}

AlGaAs 등 다원계 epi층의 조성도 반응 원료의 농도, 성장 온도 등 성장 조건에 의해 결정된다. 그림 4에 3원계 epi층 성장시 기상(gas phase)에서의 농도비와 epi층의 조성의 관계를 나타내었다.^[11] Epi층의 조성과 기상에서의 농도비는 거의 1:1의 관계를 보이고 있다. 그러나 이 관계는 reactor geometry, 성장 온도, 화합물 반도체의 종류, AsH₃의 순도, AsH₃과 유기금속 증기의 농도비(V/III ratio) 등에 의해서도 영향을 받는다. 그림 5에 AsH₃의 종류가 AlGaAs epi층의 조성에 미치는 영향을 나타내었다.^[12]

성장된 epi층의 전기적, 광학적 특성도 성장 조건에 따라 변화한다. 그림 6에 As/Ga비가 undoped GaAs epi층의 carrier 농도에 미치는 영향을 나타내었다.^[13] As/Ga비가 10~30정도일 때 p-type에서 n-type으로 type전환이 일어나며, type 변환이 일어나는 As/Ga비는 성장 온도, 원료의 종류 및 순도 등 성장 조건에 따라 달라진다. AlGaAs epi층의 경우도 같은 경향을 보이며 AlAs의 조성이 클수록 type conversion이 일어나는 V/III비의 값도 증가한다.^[14] 이러한 현상이 일어나는 이유는 원료에 들어있는 Si 등의 불순물의 영향이라고 알려져 있다. 그림 7에 성장온도가 GaAs

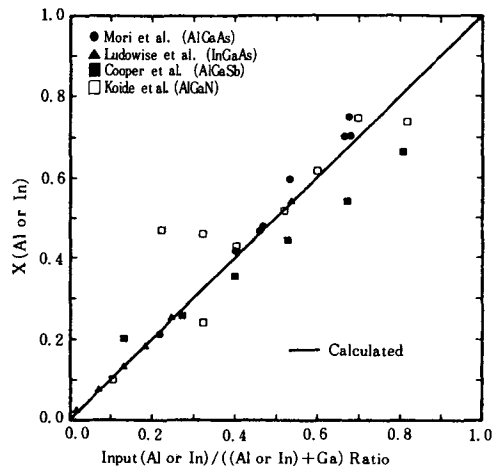


그림 4. 3원계 epi층 성장시 기상에서의 농도비와 epi층의 조성의 관계

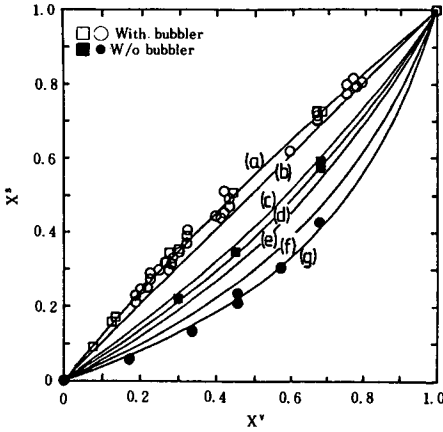


그림 5. AsH₃의 종류가 AlGaAs epi층 조성에 미치는 영향 ($x^1 = [TMA]/([TMA] + [TMG])$, $x^2 = \text{epi층의 AlAs 조성}$)
 (a) Grown with Ga-In-Al ternary melt bubbler
 (b) AsH₃ source I
 (c) AsH₃ source II
 (d)~(g) 다른 보고들의 data

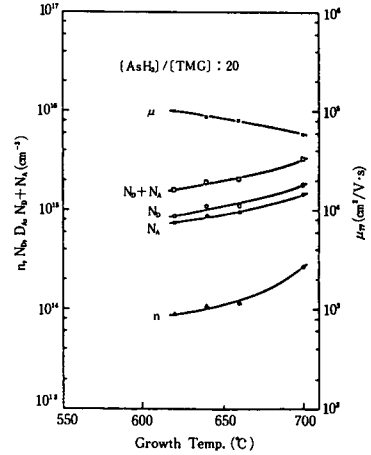


그림 7. 성장 온도가 GaAs epi층의 전기적 특성에 미치는 영향

지금까지 보고된 가장 특성이 좋은 GaAs epi층은 77K에서 $139,000 \text{ cm}^2/\text{V}\cdot\text{sec}$ (carrier 농도 = $3.7 \times 10^{14} \text{ cm}^{-3}$)의 전자 이동도 (mobility)를 가진 것이며 VPE (vapor phase epitaxy)나 LPE (liquid phase epitaxy)로 성장시킨 경우의 $200,000 \text{ cm}^2/\text{V}\cdot\text{sec}$ 보다는 작으나 MBE로 성장시킨 것보다는 다소 크다. 표 3에 MOCVD와 MBE로 성장시킨 epi층의 특성을 비교하여 나타내었다. [7, 10]

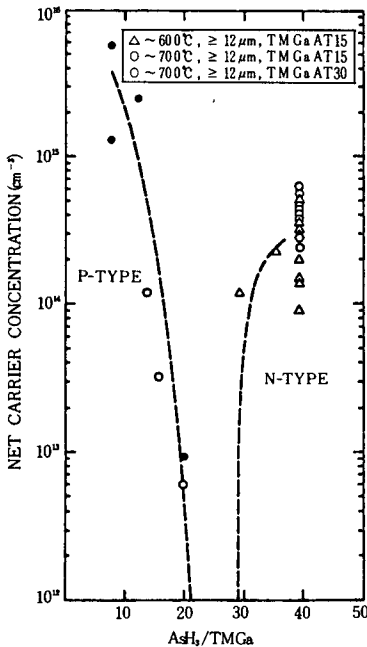


그림 6. As/Ga비가 GaAs epi층의 carrier 농도에 미치는 영향

epi층의 전기적 성질에 미치는 영향을 나타내었다. [10] 성장 온도가 낮을수록 전기적 특성이 향상된다.

표 3. MOCVD와 MBE로 성장시킨 epi층의 특성 비교

	MOCVD	MBE
Flexibility	Most compounds & alloys	Difficulty with P & alloys with two column V elements
Purity		
GaAs	$\mu_{77} = 139,000$	$\mu_{77} = 125,000$
InGaAs	$\mu_{300} = 11,800$	$\mu_{300} = 8,800$
InP	$\mu_{77} = 147,000$	$\mu_{77} = 105,000$
Photoluminescence		
AlGaAs	\approx LPE	Less than LPE
Others	\approx LPE	\approx LPE
Uniformity		
Doping	2.5%	2.5%
Thickness	2.5%	1.0%
Composition	0.005	0.005
Interfaces		
AlGaAs/GaAs	1~2 monolayer	1 monolayer
InP/InGaAs	< 50 Å	-
InAlAs/InGaAs	-	1 monolayer

광학적 성질도 원재료나 성장 조건등에 의해 영향을 받는다. 그림 8에 성장 온도에 따른 GaAs epi층의 PL 강도 (photoluminescence intensity)의 변화를 나타내었다.⁽¹⁵⁾ 성장 온도가 높을수록 carbon (1.489 eV)의 유입이 증가하는 것을 알 수 있다. 그림 9에 AsH₃의 종류에 따른 AlGaAs epi층의 EL(electroluminescence) output power의 변화를 나타내었다.⁽¹⁶⁾ AsH₃의 종류에 따라 큰 차이를 보이는 것은 AsH₃에 수분이나 산소가 포함되어 있기 때문이며, 이를 제거하기 위해 graphite baffles, molecular sieve, Ga-In-Al ternary melt bubbler 등 여러가지 방법이 제안되고 있다.⁽¹⁶⁾

V. 소자에의 응용

MOCVD는 다른 성장 방법으로는 제조가 곤란한 소

자도 비교적 용이하게 제조할 수 있다. 현재 응용되고 있는 소자는 광 검지기, 태양 전지, LED(light emitting diode), LD(laser diode), MESFET(metal-semiconductor field effect transistor), MHET 등이며 거의 모든 광전 소자에 응용되고 있다. 그림 10에 MOCVD로 성장한 GaAs MESFET의 carrier 농도의 depth profile을 나타내었다.⁽¹⁷⁾ 이것으로 gate length 0.25 μ m의 MESFET을 제작하였을 때 18GHz에서 최저 잡음 지수 1.75dB, 이득 8.5dB의 상당히 좋은 결과를 얻었다고 보고 되고 있다. 최근에는 quantum well이나 초격자(superlattice) 소자의 제작에도 이용되어 HEMT의 경우 77K에서 150,000cm²/V·sec, 5K에서 500,000cm²/V·sec의 mobility가 얻어지고 있다.⁽¹⁸⁾ 그러나 이 값은 MBE에 의해 성장한 HEMT에 비해서는 아직 낮은 값이다. Laser diode의 경우 1985년 CD(compact disc) player용 780nm 파장의 AlGaAs laser가 MOCVD 기술에 의해서도 실용화 되었고, MQW(multiple quantum well), SCQWH(separate confinement quantum well heterostructure), LOC(large optical cavity), DFB(distributed feed back) 등 여러가지 구조의 laser diode 제조와 HBT(hetero-

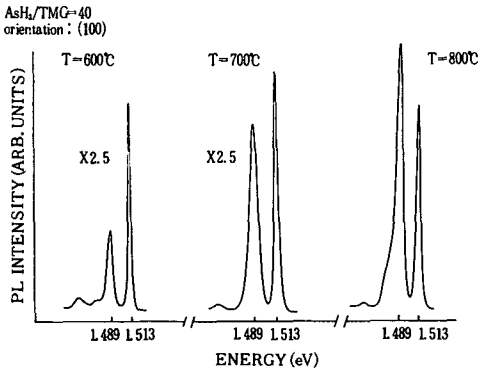


그림 8. 성장 온도에 따른 GaAs epi층의 PL 강도의 변화

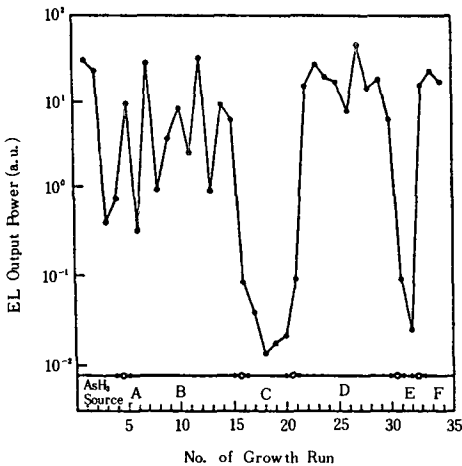


그림 9. AsH₃ 종류에 따른 AlGaAs epi층의 EL output power의 변화

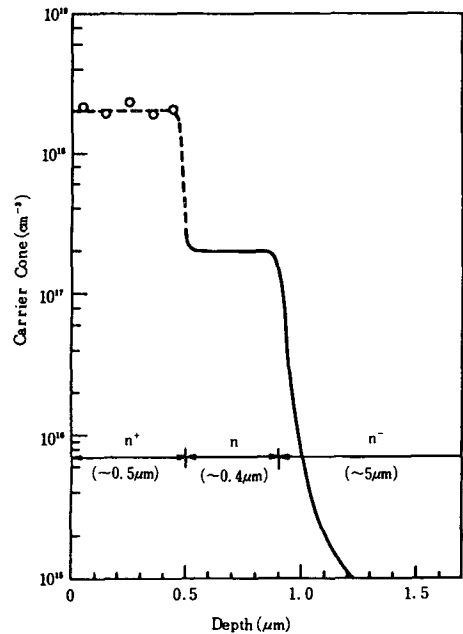


그림 10. GaAs MESFET의 carrier 농도의 depth profile

structure bipolar transistor) 등의 제조에도 매우 활발하게 응용되고 있다.^[19] 표 4에 MOCVD에 의해 성장된 소자의 특성을 MBE와 비교하여 나타내었다.^[7,18] MOCVD는 장파장 laser diode의 제작에도 이용되어 LPE와 거의 대등한 수준의 InP계 laser diode의 개발에도 성공하였다.^[20]

參 考 文 獻

표 4. MOCVD와 MBE로 성장시킨 소자의 특성 비교

	MOCVD	MBE
DH laser, J_{th}		
AlGaAs/GaAs	700A/cm ²	700A/cm ²
AlGaAs	1KA/cm ²	-
InP/InGaAsP	1KA/cm ²	1.8KA/cm ²
SCQWH	150~250A/cm ²	250~500A/cm ²
HEMT, AlGaAs/GaAs		
μ_{sk}	500,000cm ² /V·sec	1,500,000cm ² /V·sec
Solar cell, AlGaAs		
Efficiency (AM 1.5)	22%	22%

VI. 결 론

MOCVD는 종래의 화합물 반도체 광전소자뿐 아니라 최근의 고성능, 신기능 소자가 요구하는 초박막 다층 hetero 구조의 epi층을 성장시킬 수 있는 기술로서 큰 주목을 받고 있다. 특히 MOCVD 장비 및 원료 정제 기술과 epi층 성장 기술의 꾸준한 발전에 의해 epi층 소자의 특성도 계속 향상되고 있다. 최근에는 laser등의 빛을 이용한 photo MOCVD가 제안되었고, 기관을 GaAs등 화합물 반도체에서 Si으로 대체시키는 데에도(GaAs on Si)^[21] MOCVD 기술이 이용되고 있다. MOCVD의 큰 장점은 III-V족뿐 아니라 II-VI, IV-VI, I-III-VI족등 여러가지 다원계 화합물 반도체를 비교적 용이하게 제조할 수 있고, 초박막 성장 및 대량 생산이 가능한 점 등이므로 앞으로 화합물 반도체 epi층 성장의 중심 기술이 될 수 있을 것으로 전망되고 있다. 그러나 유기금속 화합물 및 수소 화합물등 원료의 고순도화가 불충분하며, 반응기구에 대한 올바른 해석이 아직 이루어지지 않고 있다. 또한 reactor design이나 성장 조건의 최적화도 아직 미흡한 실정이다. 이러한 몇가지 문제점을 극복한다면 소자 생산 뿐 아니라 R & D 면에 있어서도 중심기술이 될 수 있을 것으로 기대된다.

[1] 김무성, "유기금속 화학증착법에 의한 GaAs와 AlGaAs의 다층 에피성장" 한국과학기술원 박사 학위 논문, 1986.

[2] H.M. Manasevit, *Appl. Phys. Lett.*, 12, 156 (1968).

[3] S.J. Bass, *J. Crystal Growth*, 31, 172 (1975).

[4] R.D. Dupius and P.D. Dapkus, *Appl. Phys. Lett.*, 31, 839 (1977).

[5] Y. Mori and N. Watanabe, *J. Appl. Phys.*, 52, 2792 (1981).

[6] 權田俊一, 薄膜の作製・評價とその應用技術ハンドブック, フジ・テクノシステム社, pp. 303, 1984.

[7] P.D. Dapkus, *J. Crystal Growth*, 68, 345 (1984).

[8] H. Kukimoto, *J. Crystal Growth*, 77, 223 (1983).

[9] K. Takahashi, *Inst. Phys. Conf. Ser.* 79, 73 (1986).

[10] T. Nakanishi, *J. Crystal Growth*, 68, 282 (1984).

[11] H. Seki and A. Koukitu, *J. Crystal Growth*, 74, 172 (1986).

[12] M.S. Kim, et al., *J. Crystal Growth*, 74, 21 (1986).

[13] P.D. Dapkus, et al., *J. Crystal Growth*, 55, 10 (1981).

[14] Y. Mori, et al., *Inst. Phys. Conf. Ser.* 63, 95 (1982).

[15] T.F. Kuech and E. Veuoff, *J. Crystal Growth*, 68, 148 (1984).

[16] M.S. Kim and S.K. Min, *Inst. Phys. Conf. Ser.* 79, 127 (1986).

[17] T. Nakanishi, et al., *J. Crystal Growth*, 55, 255 (1981).

[18] 渡部尚三, エレクトロニクス, 1985年 10月號, pp. 40.

[19] T. Ohata, et al., *J. Crystal Growth*, 77, 637 (1986).

[20] Y. Miyamoto, et al., *Trans. IECE of Jap.* E68, 796 (1985).

[21] M. Akiyama, et al., *J. Crystal Growth*, 77, 490 (1986).

[22] Alfa organometallics catalogue for literature and product review, Alfa Products Co., 1986.*