

MOVPE 단결정층 성장법

I. 화합물 반도체 재료, 전자소자 및 단결정층 성장법

정 원 국

성균관 대학교 재료 공학과

Metal-Organic Vapor Phase Epitaxy : A Review I. Compound semiconductors, devices, and epitaxies

Weon Guk Jeong

Sung Kyun Kwan University

Department of Materials Engineering

Metal-Organic Vapor Phase Epitaxy (MOVPE) 는 화합물 반도체(compound semiconductor)로 구성하는 화합물 반도체 소자(device)를 만들기 위한 단결정층 성장법(epitaxy)중 가장 성공적인 것 중의 하나이다. 화합물 반도체 소자의 대부분은 bandgap energy가 다른 반도체들을 접합시키므로써 생기는 conduction band 와 valence band 의 에너지 불연속(energy discontinuity)이 나타내는 특성을 이용하기 때문에 하나의 소자 구조에 화학적 성분이 다른 여러 종류의 반도체층을 성장시켜야 한다. 즉, 소자가 성능을 발휘할 수 있도록 각 반도체층의 화학적 성분, 두께, 전도성(conductivity) 혹은 순도(purity)등을 epitaxy 를 통하여 원하는 구조대로 성장시켜야 하며 또한, 경제적인 측면에서 수율을 높이기 위하여 가능한 한 넓은 기판 면적에 균일한 층을 성장시키고자 한다. MOVPE 는 이러한 조건을 매우 만족스럽게 충족시키는 단결정층 성장법으로 발전되어 왔다. 본 review paper 에서는 화합물 반도체 재료, 전자 소자와 현재 사용되고 있는 단결정층 성장법들을 개괄적으로 소개하며 MOVPE의 기본, 특성 및 발전 상황을 소개한다. 특히 GaAs, InP bulk crystal 의 실험 data와 InGaAs/GaAs strained multiquantum well 의 data를 실험로 소개하며 또한 MOVPE 의 변형된 형태인 Atomic Layer Epitaxy (ALE) 의 소개도 덧붙인다. ALE 의 전반과 InAs, GaAs 및 InP의

data를 소개하며 이들 data를 통하여 유추되는 ALE의 화학적 반응 경로(growth mechanism)를 설명해 보며 앞으로의 연구방향을 제시하고자 한다.

1. 서 론

화합물 반도체는 이미 우리의 생활 주변에 널리 사용되고 있는 많은 종류의 전자 소자(electronic device)를 만드는 재료로 사용되고 있다. 여러 종류의 display panel 에 사용되는 발광 다이오드(light emitting diode, LED)를 위시하여 광통신 시스템^{1,2)}의 발광원으로 사용되는 LED와 반도체 레이저(semiconductor laser 혹은 laser diode(LD)),^{3,6)} 레이저 빛을 수신하는 photodetector⁷⁾등으로 대표되는 광소자(optoelectronic or photonic device)와 supercomputer의 고속 회로에 사용되는 Metal-Semiconductor Field Effect Transistor (MESFET),^{8,9)} 마이크로파(microwave) 및 밀리미터 파(mm wave) 영역의 고속 작동을 위한 Modulation Doped Field Effect Transistor (MODFET)^{10,11)}등의 고속 전자소자(High speed electronic device)등에 화합물 반도체는 실리콘이 가지지 못한 특유의 전자광학적 특성을 발휘하여 실리콘에 비해 월등한 성능을 보이고 있다. 한편, 이들 화합물 반도체 소자의 대부분은 bandgap energy가 다른 여러 종류의 화합물 반

도체를 접합할 때 (즉 heterojunction 을 형성할 때) 생기는 conduction band와 valence band의 에너지 불연속 (energy discontinuity)이 보이는 여러 성질들을 소자의 기능을 발휘하는 데에 이용하고 있다.¹²⁻¹⁵⁾ 화합물 반도체 소자는 이러한 heterojunction들로 소자의 기본 구조를 형성하기 때문에 원하는 소자의 기능을 얻기위하여서는 화학적 성분이 다른 여러 종류의 화합물 반도체의 단결정층을 epitaxy를 통하여 형성시켜야 한다. 현재 사용 중인 여러 epitaxy중 Metal-Organic Vapor Epitaxy (MOVPE)¹⁶⁻²⁰⁾는 epitaxy에 요구되는 조건들을 매우 만족스럽게 충족시키고 있다. 특히 MOVPE는 매우 얇은 두께 (~50 Å)의 단결정층을 성장시키는 데에 뛰어난 controllability를 보이고 있고 또한 multi-wafer operation에 적합하므로 quantum well 소자의 대량 생산에 가장 적합한 epitaxial process로 선호되고 있다.

화합물 반도체 소자의 단결정층 성장은 그 최종 제품이 전자 소자이기 때문에 그동안 주로 전자 공학과 물리학 분야에서 연구되어 왔다. 이제 반도체 재료라는 새로운 분야의 출현이 실현된 현실점에서 화합물 반

도체 소자와 단결정층 성장법들의 개략적 소개를 본편에, MOVPE의 전반과 ALE에 대하여 다음 편에 재료 공학적 측면에서 소개하고자 한다.

2. Heterojunction의 특성

Bandgap energy가 다른 반도체를 서로 접합시키면 이들의 energy band구조에 따라 특유의 conduction band 및 valence band의 밴드배열 (line-up) 이 형성된다. 소자의 기능을 발휘하는 데에 많이 사용되는 대표적인 밴드배열을 그림 1에 도시하였다. Bandgap energy가 작은 반도체를 A, 큰 반도체를 B라고 표시한다.

그림 1(a)와 같은 heterojunction의 경우 B에 있는 전자들은 energy가 낮은 A로 이동하고자 한다. 전자들이 이동하면 A에는 양전기를 띠, 격자에 고정되어 있는 원자들을 남기게되므로 A로 이동하는 전자의 수는 양전기를 띤 원자와 이들 전자와의 전기적 (electrostatic) 균형에 의해 결정된다. A로 이동한 전자들은 A와 B와의 계면 (interface)에 놓여있게 되고 따라서

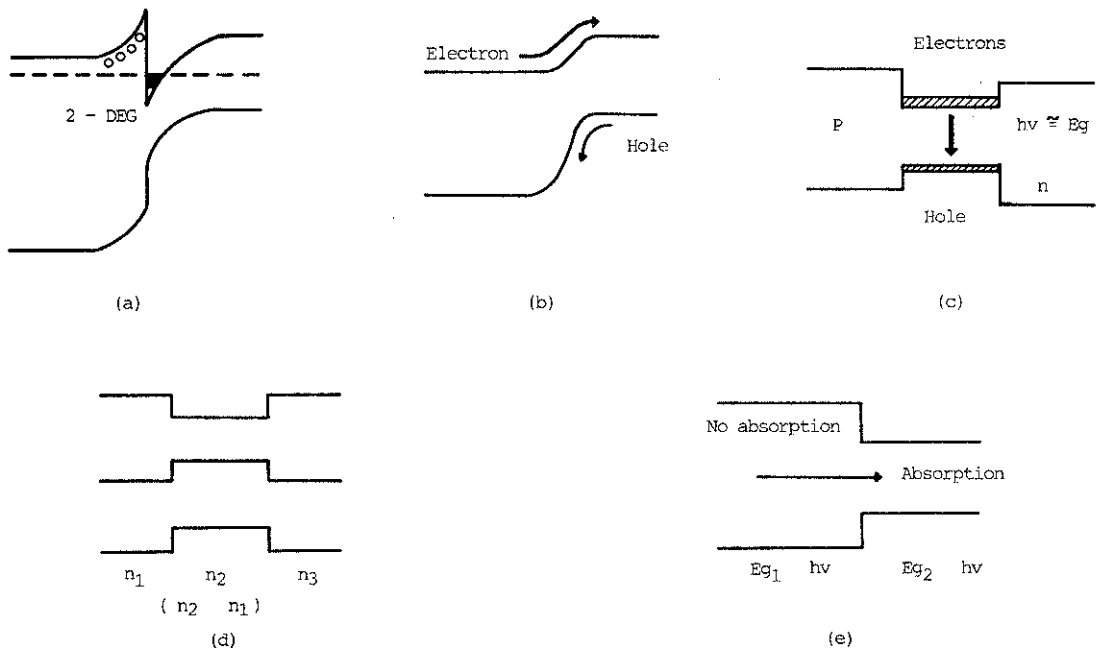


그림 1. 화합물 반도체 소자에 응용되는 대표적인 heterojunction 의 성질

A의 conduction band energy를 낮추게 된다. 이 결과 A의 conduction band에는 semi-triangular potential well이 형성되고 계면과 수직한 방향으로의 전자의 움직임은 양자화(quantized) 된다. 이러한 potential well에 있는 전자를 이차원적 전자가스(2-dimensional electron gas, 2-DEG)라고 한다. 이 구조는 MODFET (혹은 High Electron Mobility Transistor(HEMT), Two-Dimensional Electron Gas FET(TEGFET), Selectively Doped Heterostructure Transistor(SDHT) 등으로 불리움)의 가장 기본적인 구조로 MODFET에서는 B를 높은 농도로 doping하여 A로 이동하는 전자의 수를 많게 하며 전자를 계면과 평행한 방향으로 움직이게 한다. 이 때 고농도의 2-DEG는 B에 남아 있는 양전자와 거리적으로 멀리 떨어져 있어 이들에 의한 scattering을 적게 받기 때문에 높은 mobility를 갖게 된다. 높은 mobility와 높은 전자농도는 높은 transconductance를 가져와 고속의 switching을 가능하게 한다.

그림 1(b)의 경우에는 B에서 A로 움직이는 전자가 넘어야 할 potential barrier가 A에서 B로 움직이는 홀이 넘어야 할 potential barrier보다 작게 되어 있다. 따라서 이 heterojunction은 A에서 B로 움직이는 홀의 이동에 비하여 어렵게 한다. 즉 이 heterojunction은 minority carrier움직임에 대하여 선택성(selectivity)를 갖는다. 이러한 밴드배열은 heterojunction bipolar transistor(HBT)의 emitter-base junction에 사용되어 base에서 emitter로 넘어가는 minority carrier에 의한 재결합을 줄여 injection 효율을 높인다.

그림 1(c)에는 A가 n-type과 p-type으로 doping되어 있는 B에 의해 sandwich되어 있고 이 p-n junction이 forward bias되어 있는 경우를 나타내었다. Forward bias에 의해 A에 inject된 전자와 홀은 A와 B사이의 에너지 불연속에 의하여 bandgap이 작은 A에 모여있게 되고(confined) 서로 가까이 있는 전자와 홀이 쉽게 재결합할 수 있게 되어 광자 생성율(radiative recombination efficiency)을 높인다. 이 구조는 LED 및 반도체 레이저에서 광자를 생성하는 기본 구조로 사용되며 또한 bandgap energy가 작은 반도체는 bandgap energy가 큰 반도체에 비하여 굴절률이 작은 성질은 그림 1(d)와 같이 생성된 광자를 반도체 A에 머물도록

waveguiding역할을 하고 이 waveguiding은 A에 모여 있는 minority carrier의 재결합을 광자에 의하여 촉진하는 stimulated emission의 효율을 높여 레이저의 작동을 가능케 한다.

그림 1(d)와 같이 B에 비추어진 빛의 에너지가 B의 bandgap energy보다 작을 때 빛은 B에 흡수되지 않고 A에 도달하게 된다. 이때 A의 bandgap energy가 빛의 energy 보다 작으면 빛은 A에 흡수된다. 이 구조는 photodetector에 사용되는 구조로서 빛의 흡수가 소자의 표면이 아닌 내부에서 일어나기 때문에 빛의 흡수에 의하여 생성된 minority carrier의 surface states에 의한 손실을 줄일 수 있다.

3. Heterojunction 반도체쌍의 선택

이상에서 본 바와 같이 heterojunction 전자 소자는 소자의 기능을 극대화할 수 있는 밴드배열을 갖도록 설계되어야 한다. 그러나 heterojunction을 구성하는 반도체쌍의 선택에는, 즉, 우리가 이용할 수 있는 밴드배열의 선택에는 제한이 있다. 화학적 성분이 서로 다른 반도체들의 단결정층을 전위(dislocation)의 생성없이 성장시키기 위하여서는 반도체들이 서로 거의 같은 격자상수를 가져야 한다. 격자상수가 서로 같아야 각 층간의 원자들이 coherency를 유지할 수 있다. 격자상수가 다른 경우는 성장층의 두께를 coherency (혹은 lattice matching)를 유지할 수 있는 두께, 즉, 임계두께(critical thickness)보다 얇게 유지시키지 않으면 전위를 생성하는 것이 strain을 유지하는 것보다 에너지적으로 안정하기 때문에 계면에 전위가 형성된다.^{21,22)} 전위는 minority carrier의 손실을 유발하기 때문에 (minority carrier capture) 소자의 기능을 저하시킨다. 한편, 화합물 반도체 소자의 epitaxy에 사용되는 기판은 현재 binary반도체로 국한되어 있다. 소자층을 성장시키기에 적합한 적은 수의 결정결함, 즉, 낮은 전위밀도는 GaAs나 InP등의 binary기판에서만 얻어지고 있다. 따라서, 선택할 수 있는 반도체쌍은 이들 binary반도체와 격자상수가 같은 것으로 제한된다. III-V족 화합물 반도체의 bandgap energy는 그림 2에 도시한 것과 같이 대략적으로 zinc blende구조의 격자상수가 커짐에 따라 작아진다. 따라서 binary기판과

격자상수는 같고 bandgap energy가 다른 반도체는 ternary나 quarternary화합물이 되는 경우가 대부분이다. 이 결과, GaAs와는 bandgap energy가 큰 반도체가 쌍을 이루고 InP와는 bandgap energy가 작은 반도체가 쌍을 이룬다. 따라서 HEMT, LED, LD, photodetector등 active layer가 bandgap energy가 작은 반도체를 사용하는 소자일 경우 GaAs-base소자에는 GaAs가, InP-base 소자에는 InGaAs나 InGaAsP등의 ternary, quarternary반도체가 active layer를 형성한다. 단 GaAs와 AlAs의 경우에는 격자상수가 각각 5.6533Å과 5.6605Å으로 유사하므로 ternary $Al_{1-x}Ga_xAs$ 의 모든 x성분에 걸쳐 전위의 생성없이 heterolayer를 성장시킬 수 있다. $Al_{1-x}Ga_xAs$ 의 경우 이와 같은 특성, 즉, bandgap과 격자상수의 선택의 자유스러움이 AlGaAs/GaAs의 단결정층 성장의 빠른 발전과 소자의 실현을 가능케한 하나의 중요한 요소이었다.

현재 화합물 반도체중에는 AlGaAs/GaAs를 이용한 소자가 가장 많이 쓰이고 있다. AlGaAs/GaAs레이저가 compact disc player의 픽업, computer hard disc reader 및 파장 약 $0.85\mu m$ 의 빛을 이용하는 중단거리용

광통신 시스템등의 발광원으로, 또 레이저 프린터에 사용되고 있으며, MODFET과 HBT등에 AlGaAs/GaAs를 사용되고 있다. 한편 active layer를 GaAs대신 bandgap energy가 작은 InGaAs가 사용하고자 하는 연구가 최근 활발히 진행되고 있다. InGaAs는 In의 성분이 증가함에 따라 GaAs와 다른 격자상수를 갖게 된다. 따라서 coherency를 유지하며 heterolayer를 성장시키기 위하여서는 In의 성분과 InGaAs층의 두께에 제한이 있다. 그러나 InGaAs내의 큰 전자 mobility와 큰 AlGaAs/InGaAs conduction band discontinuity는 AlGaAs/GaAs MODFET에 비하여 더 큰 transconductance를 가능하게 하며 또한 InGaAs층에 존재하는 strain은 InGaAs의 에너지 밴드 구조를 변화시켜 레이저 구조에서는 작은 전류밀도에서 레이저 작동을 가능하게 한다. 아울러 산화하기 쉬운 Al을 포함한 AlGaAs를 InGaP로 대체하려는 연구도 진행되고 있다. 반도체 레이저 분야에서는 AlGaAs/GaAs 레이저의 파장에 비하여 짧은 파장을 위하여 Al_xInGaP/Al_yInGaP 가, 긴 파장을 위하여는 InGaAsP/InP가 실용화 되어있다. 고밀도의 정보를 읽기 위한 Al_xInGaP/Al_yInGaP 레이저의 실용이 예상되며 InGaAsP/InP레이저는 $1.3\sim 1.55\mu m$ 의 빛을 발생시키기 위하여 현재 사용중인 실리카 화이버를 통과하면서 흡수 손실(absorption loss)과 chromatic dispersion을 최소화 할 수 있어 InGaAs/InP photodetector와 함께 장거리 통신에 사용되고 있다. InGaAsP/InP는 이들 광소자의 중요성이 커짐과 함께 고속소자에의 이용도 많이 연구되고 있다.

위의 GaAs/AlGaAs와 InGaAsP/InP외에 GaAsP/GaAs가 가시광선을 내는 LED에 많이 사용되고 있으며 Infrared detector용으로 InAsSb/InSb이 연구되고 있다. 아울러 광소자와 고속소자를 하나의 기판에 만들어 직접회로(optoelectronic integrated circuit, OEIC)를 만들고자 하는 시도로 GaAs-on-InP, InP-on-GaAs등의 heteroepitaxy와 값싸고 강하고 큰 직경의 기판을 이용하기 위한 GaAs-on-Si 및 InP-on-Si의 heteroepitaxy가 활발히 연구되고 있다.

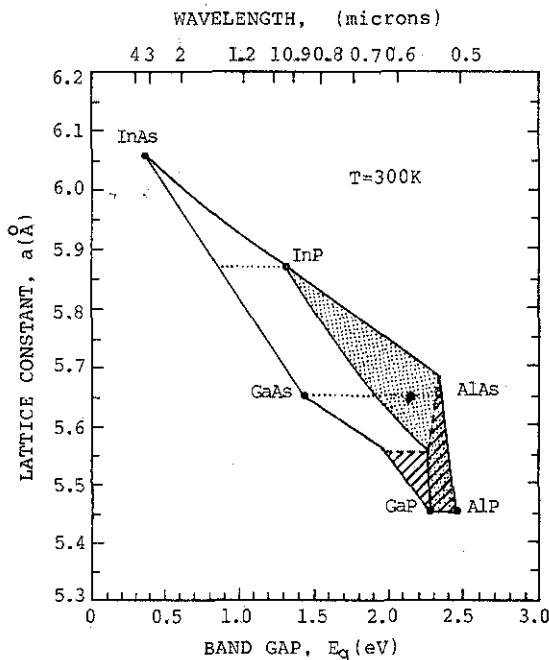


그림2. III-V족 화합물 반도체의 bandgap energy와 격자상수

4. 단결정층 성장법(Epitaxy)

이상에서 살펴본 바와 같이 화합물 반도체 소자는

소자의 기능을 최대로 발휘할 수 있는 구조대로 성분이 다른 여러 반도체를 층층이 성장시켜야 한다. 이러한 결정층은 epitaxy를 통하여 성장되는데 epitaxy에 요구되는 사항은 소자의 구조에 따라 달라지겠으나 총괄적으로 다음과 같이 요약될 수 있다. 먼저 순수한 반도체를 성장시켜야 한다. 불순물은 반도체내 carrier의 움직임을 방해하므로 mobility를 저하시킨다. 따라서 특별한 기능을 얻고자 channel layer를 doping하는 경우를 제외하고는 대부분의 MODFET내의 carrier가 움직이는 channel layer에는 고순도층을 원한다. 또한 순수한 반도체는 특히 넓은 depletion region을 필요로 하는 p-i-n photodetector의 i-층을 위하여 필요하다. 불순물은 도체의 전도성을 변화시키기 위하여 doping에 의하여 인위적으로 첨가시키고자 하며 보통 $10^{15} \sim 10^{20} \text{cm}^{-3}$ 정도의 doping이 소자에 많이 쓰이고 있다. 따라서 결정 성장시 원하는 농도의 인위적인 doping을 성취할 수 있게 하는 것이 또 다른 요구사항이다. 아울러 point defect, dislocation, deep trap 등의 결함이 없고 compensation ratio가 낮은 반도체층을 원한다. 각 성장층의 전도성은 intentional doping에 의하여 조정하기를 원하며 doping 농도를 $10^{15} \sim 10^{20} \text{cm}^{-3}$ 정도의 범위로 얻고자 한다. 또한 매우 얇은 두께의 층을 성장하기를 원한다. 화합물 반도체 소자의 연구와 이해가 진전됨에 따라 quantum well을 이용한 소자의 중요성이 강조되어왔다. Quantum well은 레이저에 사용되어 상품화되어 있으며 MODFET 및 photodetector 등의 활용이 활발히 연구되고 있다. AlGaAs/GaAs quantum well의 경우 GaAs well의 넓이가 200\AA 정도가 되어야 전자의 움직임은 양자화 된다. 실제 레이저에는 $50 \sim 100\text{\AA}$ 의 quantum well이 사용되고 있고 이 두께는 원자층으로 약 35내지 70개의 층에 해당된다. 따라서 이러한 몇 십개의 원자층을 성장시킬 수 있는 세밀한 controllability가 요구된다. 한편 quantum well의 에너지 level은 well의 넓이에 민감하게 변하고 레이저에서 발생되는 빛의 파장은 이들에너지 level에 의하여 주로 결정되므로 두께와 각 층의 성분을 소자 전 부위에 걸쳐 균일하게 유지하는 것이 중요하며 아울러 성분이 다른 층간의 경계에서 grading이 없이 급격한 성분변화를 이루어야 한다. 이러한 abrupt interface는 carrier가 경계면에 평행하게 움직이는 MODFET에 특히 중요

하다. 또한 ternary나 quaternary 반도체를 필요로 하는 경우 이들의 성분을 균일하게 성장시켜야 균일한 band-gap energy를 얻을 수 있으므로 중요하다. 마지막으로 경제적인 측면에서 가능한 넓은 부위에 균일한 결정층을 쌓을 수 있어야 한다. 한번의 결정 성장시 여러 장의 기판위에 동일한 소자 구조를 성장시킬 수 있다는 것은 대량 생산의 측면에서 매우 중요하다.

이러한 요구조건을 만족시키는 결정성장법으로 현재 많이 사용되고 있는 것은 Liquid Phase Epitaxy(LPE)²³⁾, Vapor Phase Epitaxy(VPE)^{24,25)} Molecular Beam Epitaxy(MBE)^{26,27)} Metal-Organic Vapor Phase Epitaxy(MOVPE), Chemical Beam Epitaxy(CBE)²⁸⁾ 등이다. 화합물 반도체를 성장시키기 위하여는 화합물의 구성원소들을 기판위에 공급해야 한다. 이를 성취하는 방법으로 화합물을 구성원소비대로 녹여놓고 액체상태로 기판에 공급하는 방법이 있다. 이 방법을 사용하는 것이 LPE로서 그림 3과 같이 성장시키고자 하는 각 층의 반도체를 알맞은 성분으로 녹여 폭연 수조(bin) 들에 액체 상태로 넣어 놓고 기판을 이들 액체와 순차적으로 접촉시켜 결정층을 성장시킨다. 각 결정층의 두께는 접촉시간 및 기판과 액체와의 온도 구배에 따라 결정된다. LPE는 현재 상품으로 나오는 소자를 가장 많이 생산해내는 성장법이며 이 방법은 매우 발달되어 한번에 약 100장의 기판위에 결정성장을 하는 높은 생산성을 보이며 또한 매우 순수한 반도체를 만들어 내어 LED, Double heterostructure 레이저, p-i-n photodetector 등을 생산하는데 많이 사용되고 있다. 그러나

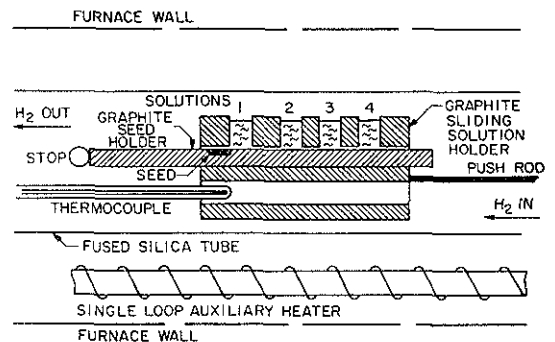


그림 3. Multibin-boat Liquid Phase Epitaxy 반응로의 개략

LPE는 quantum well과 같은 얇은 층을 손쉽게 만들어 내지 못하므로 quantum well소자를 생산하는 데에는 적당한 성장법으로 인정되지 못하고 있다. 또 다른 방법으로는 구성원소 각각을 원자상태(혹은 원소의 분자상태)로 기판에 공급하고 이들이 기판위에서 결합하여 화합물을 만들게 하는 방법이 있다. 이때 구성원소를 원자 상태로 공급하기 위하여는 원자가 다른 입자 및 성장용기(growth chamber)와 충돌되지 않게 하여야 하고, 즉 원자들의 mean free path를 길게 하여야 하고, 이를 위하여 고진공을 사용해야 한다. 이러한 원리를 이용하는 성장법이 MBE이다. MBE에서는 성장이 시작되기 전에 성장 용기를 10^{-11} torr 정도로 유지하여야 한다. MBE에서는 그림4와 같이 고체상태의 원소를 effusion cell에 넣어놓고 고진공속에서 cell을 가열시켜 증발된(evaporated) 원자들이 같은 고진공 용기에 있는 기판에 도달후 화합물을 형성하게 하는 성장법이다. 이 때 증발된 원자들이 손실되지 않고 기판으로만 향하게 하기 위하여 effusion cell은 긴 원통 형태를 하여 원자들이 beam의 상태로 기판을 향하게 한다. Effusion cell은 원하는 flux를 제공하도록 적당한 온도로 가열되고 있고 effusion cell앞에 놓여있는 shutter를 열고 닫음으로 기판에 도달하는 원자 종류를 조절하여 결정의 성분과 성장속도를 조절한다. 여러 개의 effusion cell을 사용할 때 각 effusion cell로부터

기판까지의 거리와 기판에 대한 원자 beam의 각도가 다르기 때문에 균일한 성장층을 만들기 위하여 기판을 회전시킨다. MBE는 위에서 열거한 성장법에 요구되는 여러조건을 성공적으로 만족시키는 방법이다. 특히 abrupt heterojunction과 quantum well을 만드는 데에 탁월한 능력을 증명하였으며 AlGaAs/GaAs 성장에 매우 성공적이다. 아울러 고진공의 사용은 Reflection High Energy Electron Diffraction(RHEED), X-ray Photoelectron Spectroscopy(XPS), Auger Electron Spectroscopy(AES), Mass Spectrometry 등의 여러가지 분석 장치를 성장 용기 내에 혹은 성장용기와 인접하여 설치할 수 있어 결정성장이 진행되는 동안에 여러 현상들을 분석할 수 있게 한다. 특히 RHEED는 specular beam의 intensity oscillation에 의하여 성장속도를 측정할 수 있도록 하여주며 아울러 회절상을 통하여 최상층의 격자구조를 분석할 수 있게 하여주어 MBE에는 필수적인 것이다. 그러나, 고진공을 사용해야 하는 제약은 때로는 번거로운 것으로 이를 피할 수 있는 방법으로 원자대신 상온에서 안정한 화합물들을 기판에 공급시켜 이들이 기판주위에서 화학적 반응을 통하여 원하는 화합물 반도체 결정을 형성하게 하는 방법이 있다. 이 때 화합물을 기체 상태로 기판에 공급하기 때문에 이 성장법을 VPE라고 한다. VPE 성장법중에는 그림 5와 같이 V족 원소를 chloride 형태로($AsCl_3$, PCl_3 등) 공급하여 액체 상태의 III족 원소 위를 통과시켜 III-chloride($GaCl_3$, $InCl_3$ 등)를 형성시키는 Chloride VPE, 그림6과 같이 HCl을 액체 상태의 III족 원소 위를 통과시켜 III-chloride를 형성시키고 V족 원소는 hydride(AsH_3 , PH_3)의 형태로 공급하는 Hydride VPE, III족 원소를 Organometallic의 형태로 공급하는 MOVPE 등이 있다. 이 중 Chloride 및 Hydride VPE는 매우 순수한 반도체를 성장시키며 매우 빠른 성장 속도를 가지고 있어 InGaAsP/InP photodetector를 생산하는데에 성공적이거나 quantum well구조를 성장하는 데는 MBE나 MOVPE에 미치지 못한다고 평가되고 있다. 또한 aluminum chloride는 반응성이 매우 커서 불안정하여 Chloride 및 Hydride VPE로는 aluminum 화합물을 만들 수 없다는 결점을 가지고 있다. 그러나 MESFET구조를 위한 GaAs를 성장시키는 데에는 높은 생산성을 보이고 있다. 이들에 비하여 MOVPE는 결

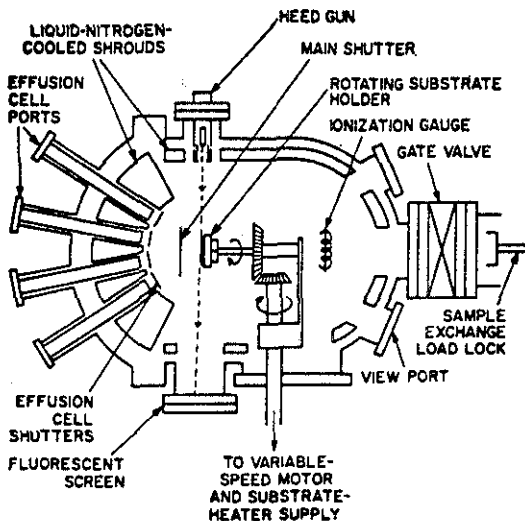


그림 4. Molecular Beam Epitaxy 반응로의 개략

정성장법에 요구되는 대부분의 조건을 만족시키며 거의 모든 종류의 화합물 반도체결정을 형성한다. MOVPE의 제반 특성과 현황에 대하여는 다음 편에서 상술하기로 한다. MBE와 MOVPE는 결정성장법으로 매우 만족스러운 여러가지 측면을 가지고 있으나 또한 해결하지 못한 단점들도 가지고 있다. MBE는 Al-GaAs/GaAs를 성장시키는 데는 매우 성공적이나 InP 등의 phosphide를 성장시키는 데는 많은 어려움을 가지고 있다. 이는 MBE에서 사용하는 phosphorus의 vapor pressure가 충분히 크지 못하고 또한 안정하지 못하기 때문이다. 낮은 vapor pressure는 충분한 overpressure를 제공하지 못하여 phosphide 결정의 질을 떨어뜨리며 고체 상태의 phosphorus에는 vapor pressure가 서로 다른 여러 동소체가 혼합되어 있는데 MBE machine의 작동과 휴식이 되풀이 됨에 따른 thermal cycle에 의하여 이들 동소체의 구성비가 변하고 따라서 vapor pressure가 변한다. 또한 모든 원소가 고체상태로 되어있어 이들의 flux가 고체의 표면적에 의하여 결정되기 때문에 사용시간의 경과에 따른 표면적의 변화에 의한 flux의 변화가 생긴다. 이러한 변화는 ternary나 quarternary결정을 성장시키고자 할 때 성분의 균일성에 많은 문제점을 유발시킨다. 이와같은 flux의 시간에 따른 불안정성을 해결하기 위하여 그림7과 같이 III족 원소는 organometallic 형태로, V족 원소는 hydride의 형태로 공급하는 성장법이 Chemical Beam Epitaxy(CBE, 혹은 MO-MBE라고도 불리운다)이다. 이때, hydride는 성장용기 내로 공급되기 전에 열분해시키어 원소를 분자 상태로 만들어 기판에 공급한다. CBE를 사용한 많은 성공적인 연구 결과가 발표되고 있으며 이방법의 사용이 급격히 증가하고 있는 상태이다. 단, MOVPE에서 사용되고 있는 $(CH_3)_3Ga$, $(CH_3)_3In$ 등의 metal-alkyl을 CBE에 사용할 경우 다량의 탄소가 성장층에 함유되는 문제점을 가지고 있으나 ethyl-alkyl을 사용하여 이 문제를 많이 해결하였다. CBE는 고진공 성장법이므로 결정성장중 RHEED와 같은 분석장치를 이용할수 있으며 또한 기체상태의 source를 사용하여 MBE가 갖는 많은 결점을 보완하고 있어 MOVPE와 MBE의 장점을 동시에 살리는 대량 생산에 적합한 새로운 성장법으로 평가되고 있다.

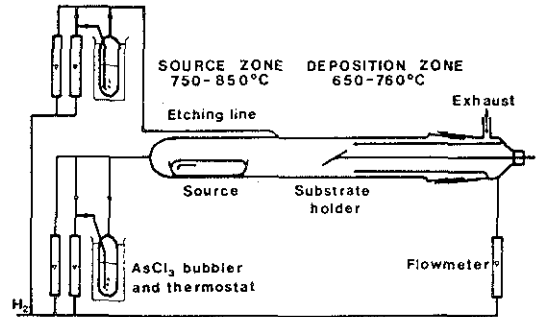


그림 5. Chloride Vapor Phase Epitaxy 반응로의 개략

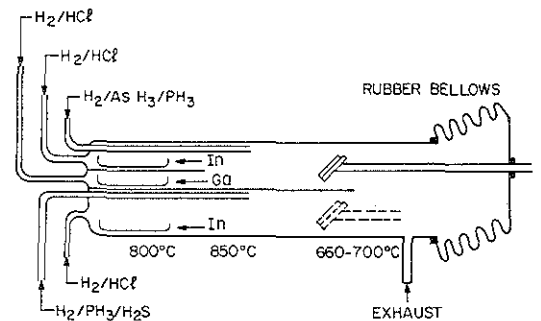


그림 6. Hydride Vapor Phase Epitaxy 반응로의 개략

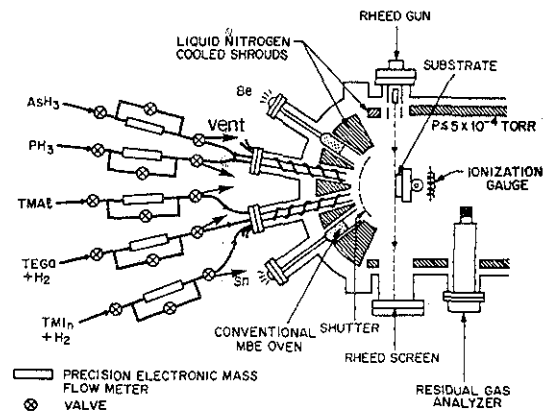


그림 7. Chemical Beam Epitaxy 반응로의 개략

참 고 문 헌

1. J. Gowar, *Optical Communication Systems*, Prentice Hall International (1984)
2. C. Lin (edited), *Optoelectronic Technology and Lightwave Communications Systems*, Van Nostrand Reinhold (1989)
3. H. Kressel and J. K. Butler, *Semiconductor Lasers and Heterojunction LEDs*, Academic Press (1977)
4. H. C. Casey and M. B. Panish, *Heterostructure Lasers*, Part A and B, Academic Press (1978)
5. G. H. B. Thompson, *Physics of Semiconductor Laser Devices*, Wiley (1980)
6. G. P. Agrawal and N. K. Dutta, *Long-wavelength Semiconductor Lasers*, Van Nostrand Reinhold (1986)
7. W. T. Tsang (edited), *Semiconductors and Semimetals* vol 22, Part D, Academic Press (1985)
8. M. Shur, *GaAs Devices and Circuits*, Plenum (1987)
9. P. H. Ladbroke (edited), *MMIC Design V GaAs FETs and HEMTs*, Artech House (1989)
10. H. Morkoc and H. Unlu, in *Semiconductors and Semimetals* (edited by R. Dingle) vol. 24. Academic Press (1987), p135
11. R. Dingle, in *Gallium Arsenide Technology* (edited by D. K. Ferry), SAMS (1985), p107
12. H. C. Casey and M. B. panish, *Heterostructure Lasers*, Part A, Academic Press (1978), p187
13. C. M. Wolfe, N. Holonyak, Jr., and G. E. Stillman, *Physical Properties of Semiconductors*, Prentice Hall (1989), p275
14. K. Hess, *Advanced Theory of Semiconductor Devices*, Prentice Hall (1988), p142
15. C. Weisbush, in *Semiconductors and Semimetals* (edited by R. Dingle) vol. 24. Academic Press (1989), p1
16. P. D. Dapkus, *Ann. Rev. Mater. Sci.* vol. 12 (1982), p243
17. M. L. Ludowise, *J. Appl. Phys.* vol. 58 (1985), R31 - R55
18. J. J. Coleman and P. D. Dapkus, in *Gallium Arsenide Technology* (edited by D. K. Ferry), SAMS (1985)
19. G. B. Stringfellow, in *Semiconductors and Semimetals* vol. 22. Part A, Academic Press (1985)
20. M. Razeghi, in *Semiconductors and Simimetals* (edited by W. T. Tsang) vol. 22. Part A, Academic Press (1985)
21. J. W. Matthews and A. E. Blakeslee, *J. Crystal Growth* 27 (1974), p118
22. R. People and J. C. Bean, *Appl. Phys. Lett.* 47 (1985), p322
23. L. Nakajima, in *Semiconductors and Semimetals* (edited by W. T. Tsang) vol. 22. Part A, Academic Press (1985), p1
24. G. Beuchet, in *Semiconductors and Semimetals* (edited by W. T. Tsang) vol. 22. Part A, Academic Press (1985), p261
25. G. H. Olsen, in *GaInAsP Alloy Semiconductors* (edited by T. P. Pearsall), John Wiley & Sons (1982), p11
26. W. T. Tsang, in *Semiconductors and Semimetals* (edited by W. T. Tsang) vol. 22. Part A, Academic Press (1985), p95
27. E. H. C. Parker, *The Technology and Physics of Molecular Beam Epitaxy*, Plenum (1985)
28. W. T. Tsang, in *VLSI Electronics V Microstructure Science* vol. 21 : Beam Processing Technology