

<연구논문>

Ultrahigh Vacuum Chemical Vapor Deposition (UHVCVD)법에 의한 GaAs와 InGaAs 박막의 선택 에피택시

김성복 · 박성주* · 노정래 · 이일항

한국전자통신연구소 기초기술연구부, *광주과학기술원 신소재공학과
(1995년 6월 15일 접수)

Selective Area Epitaxy of GaAs and InGaAs by Ultrahigh Vacuum Chemical Vapor Deposition (UHVCVD)

Sung-Bock Kim, Seong-Ju Park*, Jeong-Rae Ro and El-Hang Lee

Research Department, Electronics and Telecommunications Research Institute,
Taejon 305-600, Korea

*Department of Materials Science and Engineering,
Kwangju Institute of Science and Technology, Kwangju, 506-303, Korea
(Received June 15, 1995)

요 약 - III족 원료 가스로 triethylgallium(TEGa)과 trimethylindium(TMIn)을 사용하고 V족 원료 가스로 사전 열 분해하지 않은 arsine(AsH_3)과 monoethylarsine(MEAs)을 사용하여 ultrahigh vacuum chemical vapor deposition(UHVCVD)법으로 Si_3N_4 로 패터닝된 GaAs(100) 기판 위에 GaAs와 InGaAs 박막을 선택적으로 에피택시 성장을 하였다. V족 원료 가스를 사전 열 분해하지 않으므로 넓은 성장 온도 구간과 V/III 비율에서도 선택적으로 박막이 성장되었다. 또한 선택 에피택시의 성장 메커니즘을 규명하기 위하여 다양한 filling factor(전체 면적중 opening된 면적의 비율)를 가지는 기판을 제작하여 성장에 사용하였다. UHVCVD법에서는 마스크에 입사된 분자 상태의 원료 기체가 탈착된 후 표면 이동이나 가스 상태의 확산과정 없이 마스크로부터 제거되므로 패터닝의 크기와 모양에 따른 성장 속도의 변화나 조성의 변화가 없을 뿐만 아니라 chemical beam epitaxy(CBE)/metalorganic molecular beam epitaxy(MOMBE)법에서 알려진 한계 성장온도 이하에서 선택 에피택시 성장이 이루어졌다.

Abstract - We have selectively grown GaAs and InGaAs epilayers on patterned GaAs(100) substrates by ultrahigh vacuum chemical vapor deposition (UHVCVD) method. We have used triethylgallium (TEGa) and trimethylindium (TMIn) as group III source materials and unprecacked arsine (AsH_3) and monoethylarsine (MEAs) as group V source materials. Unprecacked group V source gases give rise to selective area growth in a wide range of V/III ratio and growth temperatures. Growth mechanism was also examined on the GaAs(100) substrate patterned with various filling factors (the ratio of the opening area to the total area). The results of the present study show that the molecular reactants impinged on the mask are efficiently removed from the mask area without surface migration or gas phase diffusion, thereby suppressing growth enhancement and compositional variation. We have observed also that our growth method offers selectivity and lower growth temperature than those attained by conventional chemical beam epitaxy (CBE) or metalorganic molecular beam epitaxy (MOMBE).

1. 서 론

화합물반도체의 선택에피택시 성장은 전계효과 트랜

지스터(field effect transistor : FET)나 광전 집적소자(optoelectronic integrated circuits : OEICs)[1,2]의 제작 등 다양하게 응용할 수 있기 때문에 매우 중요한 박막

성장기술 중의 하나이다. Molecular beam epitaxy (MBE), metalorganic vapor phase epitaxy(MOVPE)나 chemical beam epitaxy(CBE)/metalorganic molecular beam epitaxy(MOMBE)의 방법으로 Si_3N_4 나 SiO_2 의 유전체 마스크를 가지는 기판 위에 GaAs[3-5], AlGaAs[6], InP[7], InGaAs[8] 등의 III-V족 화합물 반도체의 선택 에피택시에 관한 연구들이 최근에 활발히 진행되고 있다.

선택 에피택시법을 소자제작에 응용하기 위해서는 이와 관련된 메카니즘을 이해하는 것이 필수적이다. 따라서 많은 그룹들이 여러 가지 성장법들과 관련된 선택 에피택시의 메카니즘을 제안하였다. Hiruma 등[4]은 MOVPE법에서 선택 에피택시의 주요 원인이 마스크표면에서 원료가스의 표면이동(surface migration)이라 밝혔고, Colas 등[9]은 표면확산보다는 가스 상태에서의 확산(gas phase diffusion)이 MOVPE 성장법에서 선택적으로 박막이 성장하는데 주요한 원인이라 설명하였다. CBE/MOMBE의 경우에는 선택 에피택시가 기판표면에서의 원료가스의 흡착-탈착 과정과 표면 반응에 기인한다고 Davies 등[10]과 Kayser[7]가 보고하였다.

본 연구에 사용된 ultrahigh vacuum chemical vapor deposition(UHVCVD)법은 III족 원료가스로 유기금속화합물(metalorganic compound)을 사용하고 V족 가스로 수소화합물(hydride)을 사용하는 MOVPE와 같으며, 성장실은 MBE와 마찬가지로 초고진공 환경을 유지한다. 일반적인 CBE의 경우에는 V족 원료인 수소화합물은 성장실로 인입되기 전에 고온의 열분해 장치를 통하여 원료가스를 사전 열분해하여 사용되지만 UHVCVD의 경우에는 V족 원료 가스를 사전 열분해 하지 않고 사용하는 점이 가장 큰 차이점이다. 원료로 수소화합물 가스를 사용하므로 MBE에서 도입하기 곤란한 P를 함유한 반도체 박막성장이 가능하며, 매우 낮은 압력에서 성장이 이루어지므로 선택 에피택시성장에 이점이 있으리라 예측된다. 또한 MOVPE에서 나타나는 flow pattern의 문제점을 해결할 수 있고, 급준한 계면과 매우 얇은 활성층을 성장할 수 있다는 장점도 기대할 수 있다.

본 실험에서는 GaAs 성장을 위한 원료 가스로서 triethylgallium(TEGa)과 사전 열분해하지 않은 arsine(AsH_3)을 사용하였고, InGaAs 원료로 TEGa, trimethylindium(TMIn) 그리고 사전 열분해하지 않은 monoethylarsine(MEAs)을 사용하였다. 선택 에피택시성장을 위하여 Si_3N_4 박막이 부분적으로 증착된 GaAs 기

판을 사용하여 V/III 비율과 성장온도를 변화시켜가며 GaAs와 InGaAs 박막을 성장하였다. 특히, UHVCVD법에서의 선택 에피택시 메카니즘을 고찰하기 위하여 Si_3N_4 마스크의 폭을 변화시켜 다양한 filling factor(전체 면적중 opening된 면적의 비율)를 가지는 GaAs(100) 기판을 제작하여 성장에 사용하였다. 선택적으로 성장된 박막은 filling factor에 관계없이 모든 opening된 부분에서 일정한 두께로 성장하였고, InGaAs 박막의 경우 마스크의 크기에 무관하게 일정한 In 조성을 보였다. 이로 부터 UHVCVD법에 의한 선택 에피택시 메카니즘을 논의하고자 한다.

2. 실험방법

본 실험에 사용한 성장장치는 자체 제작한 UHVCVD 장비로 자세한 내용은 참고문헌[11]에 자세히 기술되어 있다. 성장장치는 그림 1의 성장 장치의 개략도에 나타난 바와 같이 가스공급장치, 성장실, 준비실로 구성되어 있다. 시편은 물리브렌 블럭에 부착되어 준비실에 장착된 후, sorption 펌프, titanium sublimation 펌프와 이온펌프를 이용하여 10^{-8} Torr까지 진공 배기한 후 이동장치를 이용하여 turbo-molecular 펌프로 3×10^{-10} Torr 이하의 진공도를 유지하는 성장실로 옮겨진다. 이동된 기판은 열전쌍에 의하여 온도가 자동으로 조절되는 가열장치에 고정되어 성장에 사용하였다. 성장에 사용한 원료가스는 운반가스를 사용하지 않고 자동 압력 조절기(automatic absolute pressure controller)에 의하여 일정한 압력으로 조절되어 성장실에 인입되며, 가스공급장치의 모든 가스라인은 turbo-molecular 펌프에 의하여 10^{-8} Torr 정도로 기본 진공도가 유지된다.

선택 에피택시 성장에 사용하기 위한 패턴된 기판을 제작하기 위하여 Si_3N_4 박막을 GaAs 기판위에 plasma enhanced chemical vapor deposition(PECVD)법으로 증착한 후, 광 리소그라피와 습식식각을 통하여 마스크를 제작하였다. 선택 에피택시 메카니즘을 알아보기 위해 제작된 띠 모양의 마스크는 opening의 폭이 $5 \mu\text{m}$ 로 일정한 부분과 마스크의 폭이 $3 \mu\text{m}$ 로 일정한 부분으로 크게 구분된다. Opening의 폭이 일정한 부분은 마스크의 폭을 $1\sim 30 \mu\text{m}$ 로 변화시켰으며, 마스크의 폭이 일정한 부분은 opening을 $1\sim 27 \mu\text{m}$ 로 변화시켜서 다양한 filling factor를 가지게 제작하였다. 패턴된 기판은 유기세척이 끝난 후 성장실로 이동하여 성장전에 150°C 에서

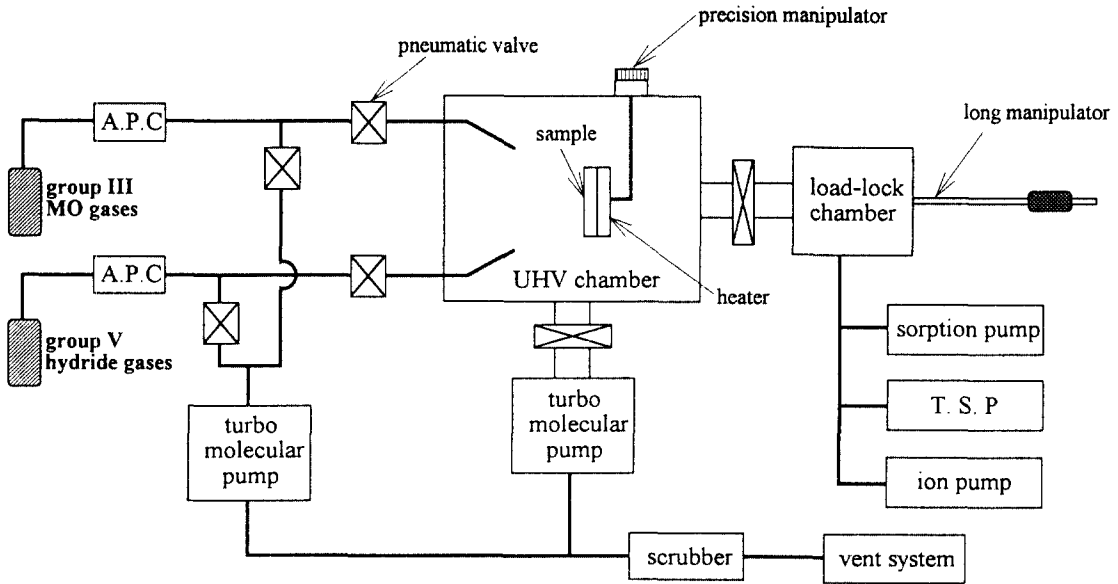


그림 1. UHVCVD 성장 장치의 개략도.

10분간 가열하여 수분을 제거하였으며 기판표면의 산화막을 제거하기 위하여 600℃에서 15분간 AsH₃이나 MEAs의 분위기의 4×10⁻⁴ Torr 압력에서 thermal cleaning을 실시하였다.

GaAs 박막을 성장하기 위하여 III족 원료가스로 TEGa를 사용하고 V족 원료가스로 사전 열분해하지 않은 AsH₃을 사용하였다. 성장온도를 540~600℃로 변화시켰고, V족 원료가스인 AsH₃을 일정하게 유지하고 III족 원료가스인 TEGa의 양을 조절하므로 V/III 비율을 10과 40 사이에서 변화시켰으며, 이때 성장실의 압력은 4×10⁻⁴ Torr 정도였다. InGaAs 박막을 성장하기 위하여 원료가스로 TEGa, TMIn과 MEAs를 사용하였고 성장온도는 540~640℃로 변화시켰으며 V/III 비율은 10으로 고정하였다. 이때 III족 원료인 TEGa와 TMIn의 부분압을 7:3으로 일정하게 유지하였다. 동일한 성장조건에서 패턴이 되지 않은 planar한 기판을 이용하여 성장한 시편의 In 조성비는 X선 회절실험(double crystal X-ray diffraction)과 저온 photoluminescence(PL) 실험으로부터 약 15% 정도임을 알 수 있었다. 성장된 시편의 선택성, 표면형상, 두께 및 In 조성의 상대적 변화량을 측정하기 위하여 Auger electron spectroscopy(AES)와 Nomarski 현미경과 주사전자현미경(SEM)을 사용하여 관찰하였다.

3. 실험결과

그림 2는 성장온도를 540~600℃로 변화시키고 V/III 비율을 10과 40 사이에서 변화시켜가며 사전 열분해하지 않은 AsH₃과 TEGa를 사용하여 성장한 GaAs 시편의 Nomarski 표면 형상 사진이다. 그림 2(a)는 성장온도가 540℃이고 V/III 비율이 20일 때 성장된 GaAs 시편으로, GaAs 박막은 선택적으로 성장하지 못하고 유전체 마스크 위로도 GaAs가 증착됨을 알 수 있다. 그러나 성장온도가 570℃ 이상에서는 그림 2(b), (c)와 (d)에서 보는 바와 같이 V/III 비율을 변화시켜도 GaAs 박막은 노출된 GaAs 기관 영역에서만 선택적으로 성장함을 확인할 수 있다.

그림 3은 선택 에피택시에 대한 보다 정확한 측정을 위하여 성장온도가 600℃ 이고 V/III 비율이 20인 조건에서 성장된 GaAs 시편에 대하여 AES line scan을 실시한 결과이다. 그림에서 보는 바와 같이 GaAs 에피택시를 구성하는 Ga LMM과 As LMM의 Auger 신호는 마스크 물질인 Si KLL의 Auger 신호와 교대로 관찰되고 있다. 이로부터 Si₃N₄ 마스크 위에서는 GaAs 박막이 전혀 증착되지 않고 노출된 GaAs 기관 위에만 선택적으로 GaAs 박막이 성장됨을 알 수 있다. 그림 2와 3에서 보는 바와 같이, 원료 가스를 TEGa와 AsH₃을 사용하여

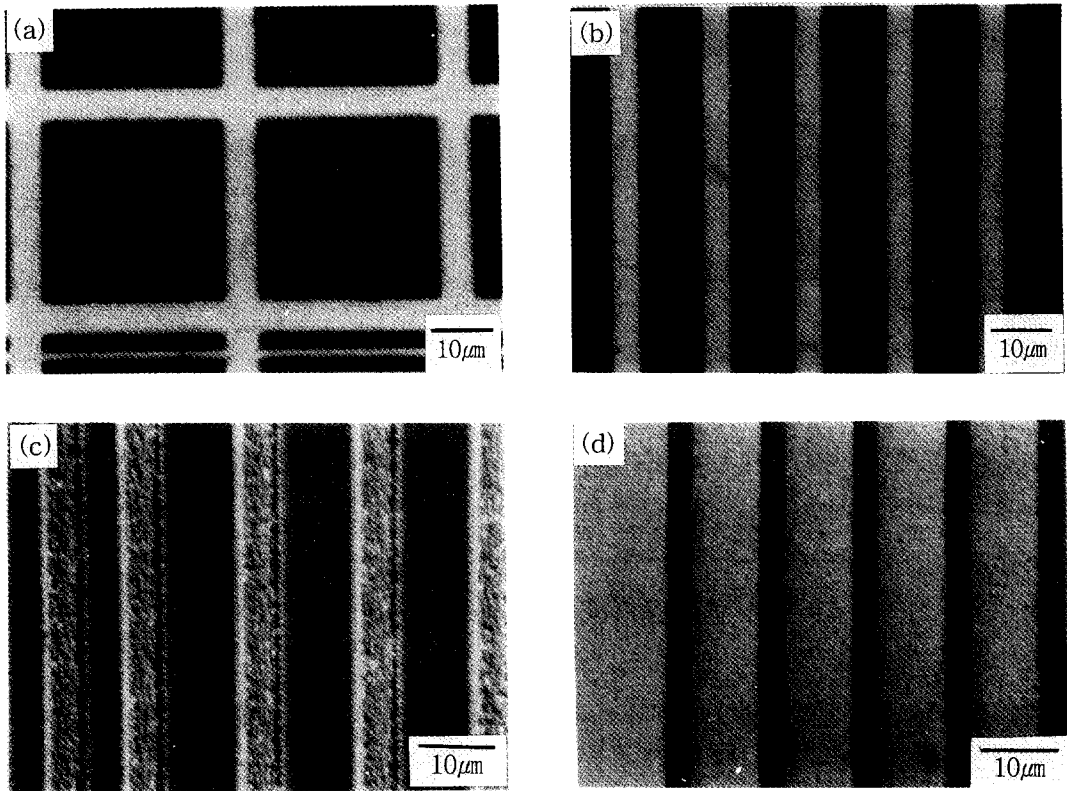


그림 2. 성장 온도와 V/III 비율 변화에 따라 성장된 GaAs 박막의 Nomarski 표면 형상 사진(어두운 부분 : 마스크). (a) T=540°C, V/III=20, (b) T=570°C, V/III=20, (c) T=600°C, V/III=20, (d) T=600°C, V/III=40.

UHVCVD법으로 GaAs 박막을 선택적으로 성장하기 위해서는 성장온도가 570°C 이상임을 알 수 있다. 일반적으로 선택 에피택시 성장의 경우 특정한 한계온도 이하에서는 선택 에피택시가 이루어지지 않는다는 것이 잘 알려져 있다. 본 실험에서 사용한 UHVCVD법과 가장 유사한 성장법인 CBE/MOMBE의 경우 본 실험과 동일한 원료가스인 TEGa와 AsH₃를 사용하여 GaAs 박막을 성장할 때 620°C 이상의 성장온도에서 선택 에피택시가 가능하다고 알려져 있다[12]. 그러나 UHVCVD법을 사용하면 그림 2와 3에서 나타나듯이 이보다 낮은 570°C에서도 선택적으로 GaAs 박막이 성장되는 것을 알 수 있다. 이와 같은 현상은 UHVCVD 성장법에서 박막의 성장은 원료가스가 기판의 표면에서 분해하는 표면화학 반응에 크게 의존하기 때문으로 여겨진다. 즉, 인입된 III족 원료가스는 유전체 마스크 위에서 열분해된 후 마스크 위에서 쉽게 탈착되어 제거되는 것으로 믿어진다. 또한 AsH₃를 사전 열분해하지 않고 사용하므로, 마스크

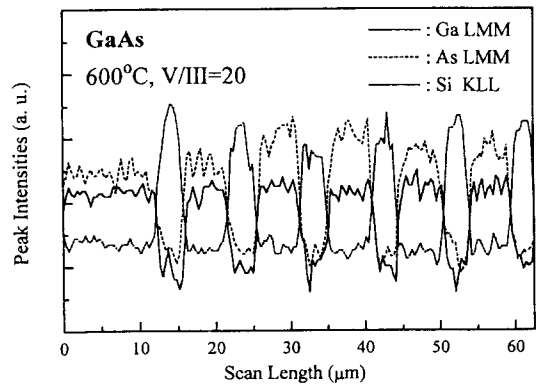


그림 3. GaAs 박막의 AES line scan 그래프(T=600°C, V/III=20).

표면과 GaAs 기판표면에서의 AsH₃의 분해정도가 크게 달라서 선택 에피택시 성장효과가 크게 나타나는 것으로 믿어진다. 따라서 UHVCVD의 경우에는 비소원자가

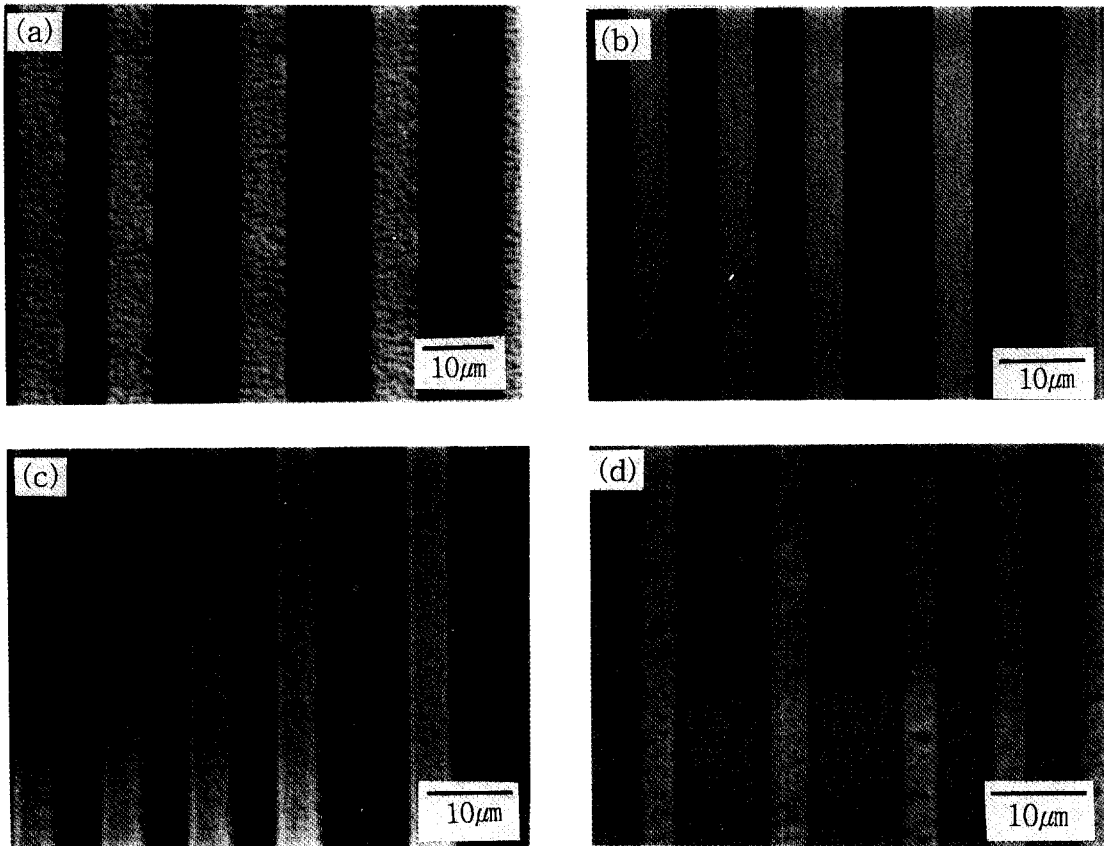


그림 4. 성장 온도 변화에 따라 성장된 InGaAs 박막의 Nomarski 표면 형상 사진($V/III=10$) (어두운 부분 : 마스크). (a) $T=540^{\circ}\text{C}$, (b) $T=555^{\circ}\text{C}$, (c) $T=570^{\circ}\text{C}$, (d) $T=640^{\circ}\text{C}$.

기관전체에 균일하게 공급되는 CBE/MOMBE 경우보다 낮은 온도에서도 선택 에피택시가 가능하다고 판단된다.

그림 4의 (a)~(d)는 성장온도를 540~640°C로 변화시키며 GaAs 기관 위에 성장한 InGaAs 박막의 Nomarski 표면형상사진이다. InGaAs 선택 에피택시 성장에는 TEGa, TMIIn과 사전 열분해하지 않은 MEAs을 원료가스로 사용하였고, V/III 비율은 10으로 고정하였으며 TEGa와 TMIIn의 부분압은 7:3으로 일정하게 유지하였다. V 족 원료가스로 사용한 MEAs은 상온에서 액체이고 독성이 AsH_3 에 비하여 상대적으로 매우 적으며, 열분해 온도가 낮다는 장점을 가지고 있고, 또한 낮은 성장 온도에서 탄소 불순물을 줄일 수 있는 장점을 가지고 있으므로 GaAs나 InGaAs 성장시 AsH_3 가스의 대체가스로 사용할 수 있다고 보고되었다[13, 14]. 그림

4에서 보는 바와 같이 InGaAs 박막이 넓은 성장온도구간에서 선택적으로 잘 성장된 것을 알 수 있다. 따라서 그림 2, 3과 4로부터 GaAs와 InGaAs 박막을 UHVCVD 방법으로 성장하면 넓은 성장온도구간과 V/III 비율에서도 선택 에피택시를 수행할 수 있음을 알 수 있다.

UHVCVD법에 의한 선택 에피택시의 메카니즘을 규명하기 위하여 다양한 filling factor를 가지는 패턴된 기관을 제작하여 박막성장에 이용하였다. 성장온도가 555°C이고 V/III 비율이 10인 InGaAs 박막의 filling factor에 따른 박막의 성장속도를 그림 5에 도시하였다. 이때 박막의 두께는 성장된 박막의 중심부분의 단면을 주사전자현미경으로 측정하였다. 그림 5에서 보는 바와 같이, 마스크폭이 일정한 부분이나 opening 폭이 일정한 부분에서 filling factor와 무관하게 성장속도가 대략 $0.22 \mu\text{m/hr}$ 로 일정한 값을 가진다. 이러한 결과는

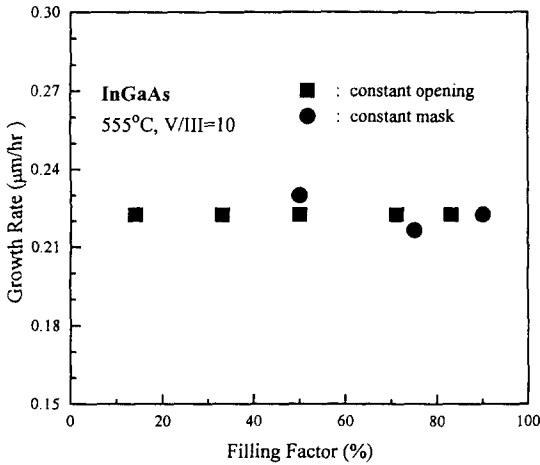


그림 5. Filling factor의 변화에 따른 InGaAs 박막의 성장속도(T=555°C, V/III=10).

MOVPE법으로 선택 에피택시 성장을 하였을 때 패턴의 모양이나 크기에 따라 성장속도의 차이가 크게 나타나는 것[15]과 매우 상이하다.

MOVPE 법에서 선택 에피택시의 성장메카니즘을 지배하는 요인으로 마스크표면에서의 원료가스의 표면이동(surface migration)[4, 16]과 탈착된 원료가스들의 기체상태에서의 확산(gas phase diffusion)[9] 등이 알려져 있다. 그림 6의 (a)는 MOVPE에서 선택 에피택시가 일어나는 성장메카니즘을 도식적으로 보이고 있다. 원료가스의 표면이동이나 마스크로 입사된 원료 가스의 탈착과 기체상태의 확산으로 인하여 마스크 위로 공급된 원료가스는 노출된 GaAs 기판으로 추가로 공급되어 성장에 참여하게 된다. 따라서 마스크의 전체면적에 비하여 opening된 부분이 적으면 적을 수록 공급되는 원료가스의 양이 많아져 성장속도가 커지게 되므로 마스크 패턴의 모양이나 크기에 따라 박막의 성장속도의 차이를 초래한다. 뿐만 아니라 삼원 화합물 반도체나 사원 화합물반도체의 경우에는 원료가스의 표면에서의 이동거리나 기체상태의 확산계수의 차이에 의하여 패턴의 형태나 크기에 따라 박막의 조성이 변화한다. 이와 같은 성장 속도의 차이나 조성의 변화는 선택 에피택시를 이용하여 소자를 제작할 때 문제점으로 제기되고 있다.

CBE/MOMBE에서 선택 에피택시의 메카니즘은 입사된 원료물질이 흡착과 탈착을 통하여 마스크로부터 재증발되어 고진공의 성장분위기에서 기판으로부터 제거되기 때문에 마스크에 입사된 원료들이 박막성장에 기

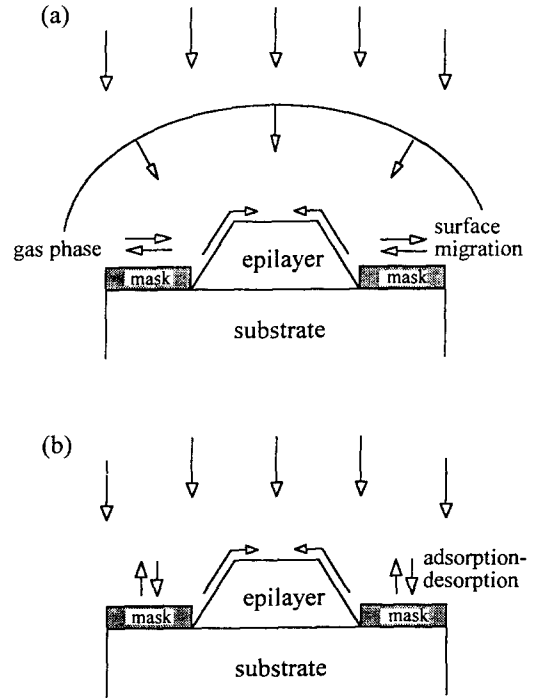


그림 6. 성장법에 따른 선택 에피택시 성장 메카니즘의 개략도. (a) MOVPE법에서의 표면 이동과 가스 상태의 확산에 의한 선택 에피택시 메카니즘으로 패턴의 크기와 모양에 따라 박막의 두께와 조성이 변화한다. (b) CBE/MOMBE나 UHVCVD와 같이 고진공의 성장 분위기에서 흡착과 탈착에 의한 메카니즘으로 패턴에 무관하게 두께와 조성이 일정.

여를 하지 못하여 패턴의 크기에 상관없이 성장속도가 일정하다고 보고되고 있다[5]. 본 실험에서도 CBE/MOMBE에서와 유사하게 고진공하에서 박막성장이 이루어지므로 마스크에서 탈착된 원료가스가 기판에서의 박막성장에 참여하지 못하므로 패턴의 형태에 무관하게 일정한 성장속도를 보인다고 사료된다. 그림 6의 (b)는 고진공분위기에서 성장하는 CBE/MOMBE법이나 본 성장법인 UHVCVD법에서의 선택 에피택시 메카니즘을 도식적으로 나타냈다. 그러나 비소원자가 기판전체에 공급되는 CBE/MOMBE의 경우 원료가스의 탈착을 위하여 높은 성장온도가 필요하지만, UHVCVD의 경우에는 기판에 도달한 AsH₃ 분자의 분해정도가 마스크와 노출된 GaAs 기판표면에서 매우 다르기 때문에 선택 에피택시효과가 크게 나타나므로 CBE/MOMBE 경우 보다 낮은 온도에서 선택 에피택시가 가능한 것으로 믿어진다.

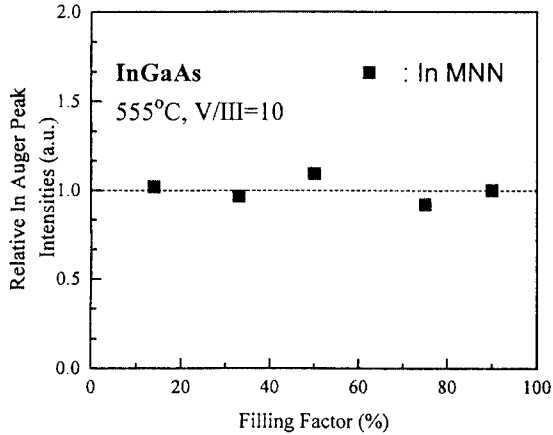


그림 7. Filling factor의 변화에 따른 InGaAs 박막의 In 조성의 상대적 변화량(기준 : 마스크가 3 μm 이고 opening이 27 μm 로 filling factor가 90인 영역).

그림 7은 555°C에서 선택적으로 성장된 InGaAs 박막의 filling factor에 따른 In 조성의 상대적 변화량의 AES 측정결과이다. 이때 opening의 크기가 27 μm 이고 마스크의 크기가 3 μm 로 filling factor가 90인 영역을 기준으로 하여 In의 상대적 조성의 변화량을 측정하였다. 그림 7에서 보는 바와 같이 In 조성은 마스크 패턴의 크기에 무관하게 거의 일정하게 나타났다. 이는 앞서 언급한 바와 같이 고진공의 성장분위기하에서 성장되는 UHVCVD 성장법의 경우 마스크로부터 탈착된 원료gas는 그들의 평균자유이동거리가 길어 기판으로부터 제거되므로 opening 된 기판으로 입사한 원료gas들에 의해 성장이 이루어진다. 따라서 마스크의 모양이나 크기에 무관하게 조성이 일정하다고 여겨진다.

이상의 실험결과를 요약하면, UHVCVD법은 넓은 V/III 비율과 넓은 성장온도 범위, 특히 낮은 성장온도에서도 선택 에피택시가 가능하다. 마스크에 입사된 원료gas가 기판으로부터 완전히 탈착되어 주변의 노출된 기판에서의 성장에 참여하지 않게 되므로 박막의 성장속도나 조성이 패턴의 크기나 모양에 무관하게 일정할 뿐만 아니라 V족 원료gas를 사전 열분해하지 않고 기판표면에서의 화학 반응에 의존하는 성장메카니즘을 가지므로 V족 원료gas를 사전 열분해 사용하는 CBE/MOMBE의 경우보다 성장온도를 낮출 수 있다. 따라서 UHVCVD 방법은 선택 에피택시를 이용하여 소자를 제작할 때 MOVPE 방법에서 문제가 되는 패턴형상에 따른 박막의 두께와 III족의 조성의 변화를 방지할 수 있

을 뿐만 아니라 저온에서 일반적인 CBE/MOMBE 성장법보다 낮은 성장온도 선택 에피택시성장이 가능하므로 소자특성을 향상시킬 수 있는 성장법이라 판단된다.

4. 결 론

UHVCVD 방법에 의해 사전 열분해하지 않은 V족 수소화합물gas를 원료gas로 사용하여 GaAs와 InGaAs 박막을 성장온도와 V/III 비율을 바꾸어 가며 선택 에피택시하였다. 이들의 선택 에피택시 메카니즘을 이해하기 위하여 다양한 filling factor를 가지는 마스크를 제작하여 성장에 사용하였다. 일반적으로 CBE에서 알려진 선택 에피택시의 한계온도보다 낮은 온도에서 선택적으로 GaAs 박막이 잘 성장되었다. Filling factor에 따른 박막의 성장속도와 조성은 일정하였다. 이는 MOVPE 방법과는 다르게 마스크에 입사된 원료gas들이 마스크에서 탈착된 후에는 인접한 부위의 노출된 기판에서의 에피택시 성장에 참여하지 못하기 때문인 것으로 여겨진다. 따라서 UHVCVD 방법에 의한 선택 에피택시법은 마스크의 크기와 모양에 상관없이 박막의 두께와 조성을 일정하게 유지하고 낮은 성장온도에서 선택 에피택시성장이 가능하기 때문에 소자제작시 매우 좋은 성장법으로 믿어진다.

감사의 글

본 연구는 정보통신부와 한국통신의 연구비 지원으로 수행되었으며 이에 감사드립니다.

참고문헌

1. K. Hiruma, M. Yazawa, H. Matsumoto, O. Kagaya, M. Miyazaki and Y. Umamoto, *J. Cryst. Growth* **124**, 255 (1992).
2. I. Hayashi, *Jpn. J. Appl. Phys.* **32**, 266 (1993).
3. A. Okamoto and K. Ohta, *Appl. Phys. Lett.* **51**, 1512 (1987).
4. K. Hiruma, T. Haga and M. Miyazaki, *J. Cryst. Growth* **102**, 717 (1990).
5. E. Tokumitsu, Y. Kudou, M. Konagai and K. Takahashi, *J. Appl. Phys.* **55**, 3163 (1984).
6. S. Ando and T. Fukui, *J. Cryst. Growth* **98**, 646 (1989).
7. O. Kayser, *J. Cryst. Growth* **107**, 989 (1991).

8. Y. Chen, J. E. Zucker, T. H. Chiu, J. L. Marshall and K. L. Jones, *Appl. Phys. Lett.* **61**, 10 (1992).
9. E. Colas, A. Shahar, J. B. D. Soole, W. J. Tomlinson, J. R. Hayes, C. Caneau and R. Bhat, *J. Cryst. Growth* **107**, 226 (1991).
10. G. J. Davies, P. J. Skevington, C. L. French and J. S. Foord, *J. Cryst. Growth* **120**, 369 (1992).
11. 박성주, 심재기, 박경호, 유병수, 이일항, *응용물리* **4**, 380 (1991).
12. L. th and P. Balk, *J. Cryst. Growth* **77**, 303 (1986).
13. S. J. Park, J. R. Ro, J. K. Sim and E. H. Lee, *J. Cryst. Growth* **136**, 138 (1994).
14. J. R. Ro, S. J. Park, S. B. Kim and E. H. Lee, *J. Cryst. Growth* **150**, 627 (1995).
15. M. S. Kim, C. Caneau, E. Colas and R. Bhat, *J. Cryst. Growth* **123**, 69 (1992).
16. Y. D. Galeuchet, P. Roemtgen and V. Graf, *J. Appl. Phys.* **68**, 560 (1990).