

## 저압 유기금속 화학증착법을 이용한 InP 에피성장 에 대한 기판의 온도와 PH<sub>3</sub>/TMIn 비의 영향

문영부 · 박형수\* · 윤의준

서울대학교 무기재료공학과 및 반도체공동연구소  
\*삼성종합기술원 광반도체연구실  
(1995년 7월 21일 접수)

## Effects of Substrate Temperature and PH<sub>3</sub>/TMIn Ratio on the Properties of InP Epitaxial Layers Grown by Low Pressure Metalorganic Chemical Vapor Deposition

Young-boo Moon, Hyung-soo Park\* and Euijoon Yoon

Department of Inorganic Materials Engineering & Inter-university Semiconductor Research Center,  
Seoul National University, Seoul 151-742, Korea

\*Samsung Advanced Institute of Technology, Photonics Semiconductor Laboratory  
(Received July 21, 1995)

**요 약** - 저압 유기금속 화학증착법(LP-MOCVD)을 이용하여 76 Torr에서 InP 에피층을 성장하였다. 본 연구에서의 최적성장조건은 성장온도 600~620°C, PH<sub>3</sub>/TMIn 비 200 부근이며, 이때 깨끗한 표면을 가지고 전자기동도가 최대값을 가지는 에피층이 성장되었다. 최적 성장 조건에서 성장시킨 가장 우수한 에피층의 경우, 77 K에서  $1.7 \times 10^{14}/\text{cm}^3$ 의 낮은 전자농도와 MOCVD 방법으로 보고된 값들 중 매우 높은 전자기동도인  $138,000 \text{ cm}^2/\text{Vsec}$ 의 값을 얻을 수 있었다. 성장온도, TMIn 유량, PH<sub>3</sub> 유량에 따른 성장속도의 변화로부터 본 연구에서 성장이 이루어진 520~720°C의 온도범위는 경계층을 지나는 TMIn의 확산속도에 의해 성장속도가 결정되는 영역임을 확인하였다. 성장온도와 PH<sub>3</sub>/TMIn 비를 성장변수로 하여 InP 에피층의 표면형상과 전기적 특성의 변화를 관찰하였고, 그 결과 전기적 특성의 변화는 표면형상의 변화와 그 경향성이 대부분 일치하였고, 이로부터 표면열화와 관련된 불순물의 유입을 가능한 불순물 유입의 경로로 제시하였다.

**Abstract** - Growth of InP epitaxial layers has been studied by LP-MOCVD at 76 Torr. Optimum growth conditions are growth temperature of 600~620°C and PH<sub>3</sub>/TMIn ratio of about 200. For the best sample grown at the optimized condition, electron concentration of  $1.7 \times 10^{14}/\text{cm}^3$  and electronic mobility of  $138,000 \text{ cm}^2/\text{Vsec}$  at 77 K were obtained. From the results of growth rate change with growth temperature, TMIn flow rate and PH<sub>3</sub> flow rate, growth rate was controlled by TMIn diffusion rate through boundary layer in the growth temperature range of 520~720°C. The effects of growth temperature and PH<sub>3</sub>/TMIn ratio on the properties of InP show that electrical properties have similar behavior with the surface morphology change, and impurity incorporation related with surface degradation is believed as the main reason of electrical properties changes.

### 1. 서 론

InP계 화합물 반도체는 고속, 대용량 광통신을 위해 광섬유가 최소 손실을 보이는 영역에서의 발광 및 수광 광소자의 제작에 널리 사용되어 왔고, 앞으로 정보통신

산업의 중요성이 커짐에 따라 그 사용범위가 더욱 증가할 중요한 물질이다. 이중 InP는 기판 및 cladding 층으로 사용되며 전자의 높은 포화속도를 이용하여 마이크로파 소자의 제작 등에 유망한 물질이다[1, 2]. 이러한 InP계 화합물 반도체를 성장시키는 방법 가운데 유기금

속 화학증착법(MOCVD)은 화합물 반도체의 성장에 가장 널리 사용되는 방법중의 하나로 기타 액상 에피탁시법(LPE)이나 분자선 에피탁시방법(MBE)과 비교해 볼 때, 양자우물구조나 초격자구조 등의 성장과 대량 생산이 용이하고 물질의 물성도 우수하다[3, 4]. 또한 저압 성장법을 이용하여 물성의 균일성을 증가시키고, In을 포함한 물질을 성장시키는 경우 문제가 되었던 반응기 전반부에서의 반응기체 소모 현상을 해결함으로써 InP 계 화합물 반도체의 성장에도 널리 사용되게 되었다.

저압 유기금속 화학증착법을 이용한 화합물 반도체 성장의 경우, 물성에 영향을 주는 중요한 성장 변수는 기판의 온도와 PH<sub>3</sub>/TMIn의 유량비로 알려져 있다[2-6]. 본 연구에서는 저압 유기금속 화학증착법을 이용한 InP 에피층 성장에 있어서의 성장속도 결정단계들, 성장 온도와 TMIn의 유량 및 PH<sub>3</sub> 유량을 성장변수로 하여 결정하고, 기판의 온도와 성장 속도 및 PH<sub>3</sub>/TMIn의 유량비에 따른 전기적 성질의 변화를 표면형상과의 관계를 통하여 설명하고자 한다.

## 2. 실험방법

본 연구에서 InP 성장에 사용된 장치는, 하나의 2" 기판을 장착할 수 있는 수평형 반응기를 가진 유기금속 화학증착장치로서 저압에서의 성장이 가능하고, 기판의 가열은 SiC 코팅된 graphite susceptor를 유도가열하는

방식을 취하고 있으며 반응기체를 반응기내로 안정적으로 공급하기 위해 Fig. 1에서와 같이 vent-run manifold 방식을 사용하고 있다. 에피 성장시 기판의 온도는 susceptor에 놓여진 열전대로 측정하고, 양면이 연마된 GaAs 기판의 온도에 따른 굴절률의 변화를 적외선 간섭 현상을 이용하여 측정하여 온도를 보정하였다[7]. 이 장치는 InP 성장을 위하여 In의 원료로는 Trimethylindium (TMIn, (CH<sub>3</sub>)<sub>3</sub>In)을, P의 원료로는 99.9997% PH<sub>3</sub>을 사용하고 In<sub>1-x</sub>Ga<sub>x</sub>As 및 In<sub>1-x</sub>Ga<sub>x</sub>As<sub>1-y</sub>P<sub>y</sub> 성장을 위해 Trimethylgallium (TMGa, (CH<sub>3</sub>)<sub>3</sub>Ga), AsH<sub>3</sub>을 공급할 수 있고, 도핑을 위해 SiH<sub>4</sub>과 Diethylzinc (DEZn, (C<sub>2</sub>H<sub>5</sub>)<sub>2</sub>Zn)를 공급할 수 있다. 3족 원소의 반응원료로 사용되는 TMIn과 TMGa, 도핑 원료인 DEZn의 기화기(bubbler)는 일정한 증기압을 유지하기 위해 항온조에서 일정한 온도로 유지되고 있고 기화기의 압력은 자동 압력조절장치에 의해 조절된다. InP 성장의 경우, TMIn 기화기는 모든 성장에서 15°C, 304 Torr로 유지하였고, 이때의 TMIn 증기압은 1.15 Torr이다. 실제로 유입되는 TMIn의 유량은 기화기에 넣어준 기화가스의 유량에 비례하여 기화기내의 전체 압력과 TMIn의 증기압의 함수로 결정된다. 3족 원료의 기화가스 및 이송 가스로는 Pd 수소정제기로 정제된 수소(99.9999%)를 사용하였다.

기판으로는 (110) 방향으로 2° 기울어진 (100) 반절연 InP 기판을 사용하였다. 기판은 적당한 크기로 절단한 후, 초음파 세척기 안에서 Trichloroethane(TCA), 아

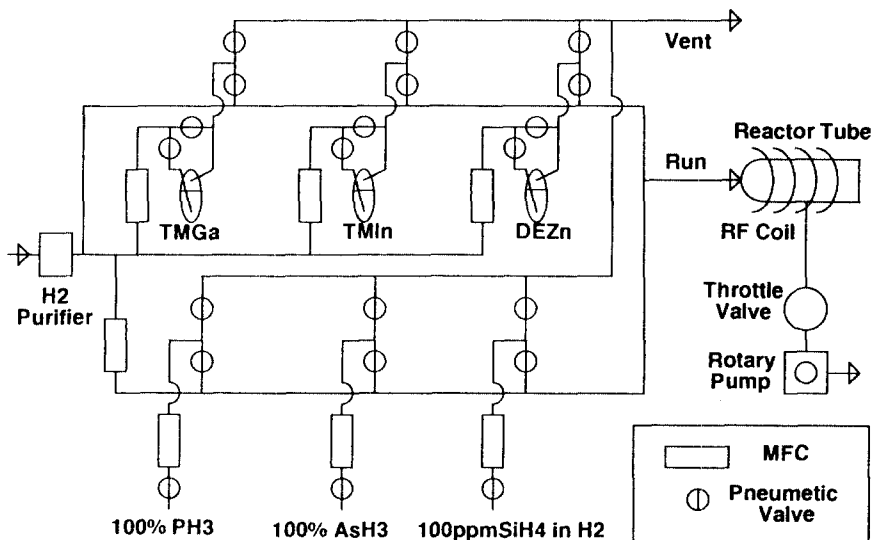


Fig. 1. Schematic diagram of LP-MOCVD system.

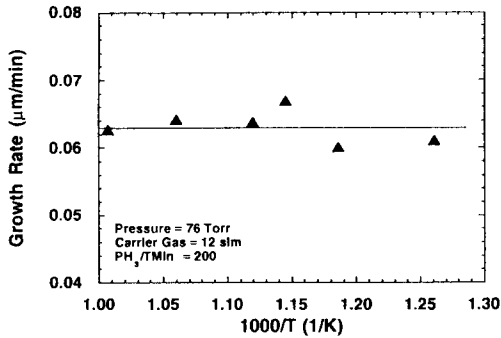


Fig. 2. Effect of growth temperature on growth rate of InP at PH<sub>3</sub>/TMIn ratio of 200.

세톤, 메탄올에서 각 10분간 세척하고, 황산식각용액 (H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> : H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> : H<sub>2</sub>O = 5 : 1 : 1)으로 상온에서 2분 30초간 식각하였다. 다시 탈이온수로 세척을 마친 InP 웨이퍼는 N<sub>2</sub>로 건조시킨 후, 반응기에 주입하여 정제된 수소를 1시간 동안 흘려 반응기내의 불순물을 제거한 후 성장을 시작하였다. 모든 경우, 성장에 앞서 기판의 열분해에 의한 표면 열화를 방지하기 위해 PH<sub>3</sub> 분위기로, 600℃에서 5분간 표면산화물 제거단계를 거쳤고 성장시의 반응기 압력은 76 Torr로 일정하게 유지하였다.

성장을 마친 InP 층은 먼저 Nomarski 광학현미경을 이용하여 표면형상을 관찰하였고, KOH : K<sub>3</sub>Fe(CN)<sub>6</sub> : H<sub>2</sub>O = 18 g : 1.8 g : 10 ml 에칭 용액으로 벽개면을 stain 에칭 후, 주사전자현미경(SEM)으로 두께를 측정하여 성장속도를 결정하였다. 전기적 특성의 분석을 위해 성장을 마친 기판을 적당한 크기(6 mm × 6 mm)로 절단하고 고순도의 In으로 접착을 만들어 450℃에서 1분간 어닐링을 한 후, van der Pauw법에 의한 상온 및 77 K Hall 측정을 실시하여 InP 층내의 불순물의 농도와 전자의 이동도를 구하였다.

### 3. 결과 및 고찰

#### 3.1. 성장속도의 변화

성장속도의 변화는 CVD에서 성장 기구를 결정하는 가장 중요한 실험 결과이다. 본 연구에서는 성장 온도, TMIn의 유량, PH<sub>3</sub>의 유량을 변수로 하여 성장속도의 변화를 관찰하였다. Fig. 2는 성장온도에 따른 성장속도의 변화이다. 본 실험에서 성장시킨 520~670℃의 온도 범위에서는 성장속도의 현저한 변화를 관찰할 수 없었다. 570℃ 이하의 온도에서는 표면형상이 급격히 나빠짐에

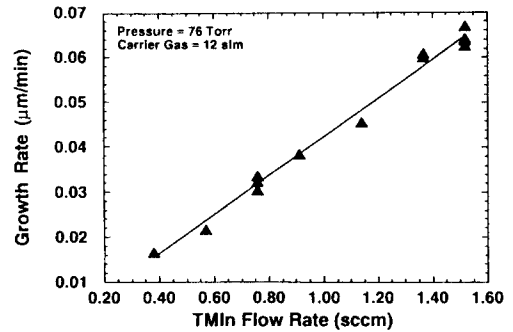


Fig. 3. Changes in InP growth rate with TMIn flow rate.

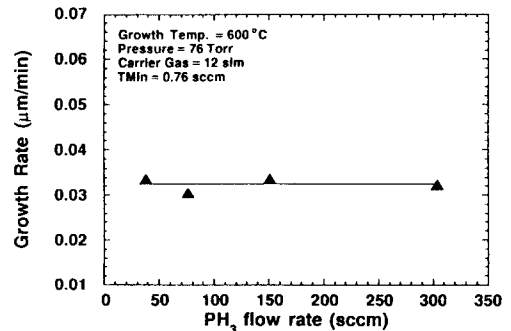
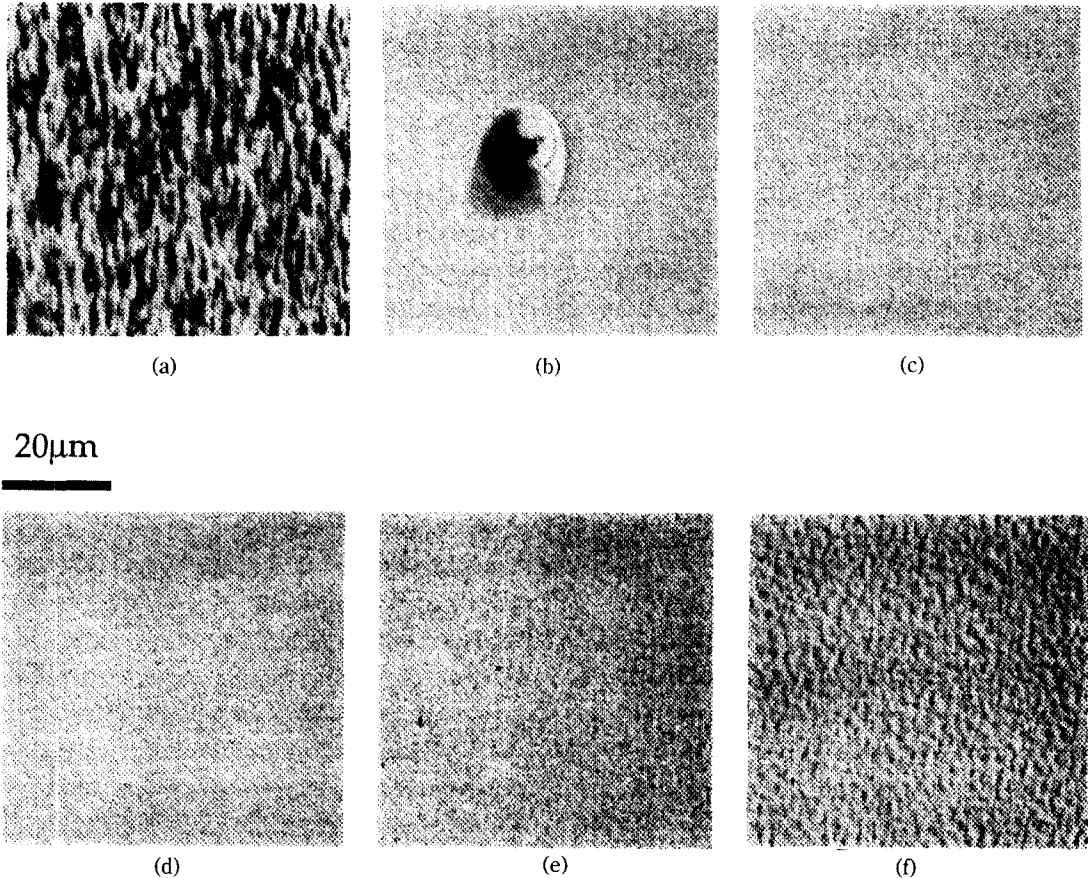


Fig. 4. Effect of PH<sub>3</sub> flow rate on growth rate of InP. Growth temperature 600℃, and TMIn flow rate 0.76 sccm.

도 불구하고 성장속도에는 큰 변화가 없었다. 이러한 결과는 MOCVD 성장에서 일반적인 성장속도 결정단계가 기판 위의 경계층(boundary layer)을 통과하는 3족 원소의 확산 속도라는 기존의 보고[6, 8, 9]와 일치하는 결과이며 성장속도와 물성을 결정하는 성장기구가 서로 다를 수 있음을 보여준다. 성장온도에 따른 변화로부터 예상되는 성장속도 결정단계를 확인하기 위하여 3족 원소인 TMIn의 유량과 5족 원소인 PH<sub>3</sub>의 유량에 따른 성장속도의 변화를 확인한 결과, Fig. 3에서와 같이 성장속도는 넣어준 TMIn의 유량에 비례하여 직선적으로 증가하는 결과를 보이고 있고, 선형회귀로 구한 TMIn의 유량이 0일 때의 성장속도는 거의 0의 값을 가지고 있었다. 또한 TMIn의 유량이 큰 경우에도 성장속도의 선형성이 유지되는 것으로부터 본 실험의 유량 범위에서는 TMIn 기화기내에 항상 정상상태가 유지된다는 것을 알 수 있다. Fig. 4의 실험결과는 PH<sub>3</sub>의 유량이 성장속도에 결정적인 영향을 주지 않음을 보여준다. 이상의 결과는 모두 경계층을 확산하는 TMIn의 유량에 의해 성장속도



**Fig. 5.** Effect of growth temperature on surface morphology of InP epitaxial layers grown at various temperatures at constant  $\text{PH}_3/\text{TMIIn}$  ratio of 200 (a) 520°C, (b) 570°C, (c) 600°C, (d) 620°C, (e) 670°C, (f) 720°C.

가 결정된다는 것을 보여주며 본 실험이 행해진 온도 범위에서는 성장속도 결정단계에 변화가 없음을 알 수 있다.

### 3.2. 표면형상과 전기적 특성의 변화

#### 3.2.1. 성장온도에 따른 변화

일반적인 MOCVD 성장에서 기판의 온도는 에피층의 물성을 결정하는 가장 중요한 성장 변수의 하나이다. 본 연구에서는  $\text{PH}_3/\text{TMIIn}$  비를 200으로 일정하게 유지시키고 520°C에서 720°C까지 기판의 온도를 변화시키면서 성장된 InP 에피층의 표면형상과 전기적 특성의 변화를 관찰하였다. 먼저 성장된 InP 에피층의 표면형상을 관찰하였다. 표면형상은 그 에피층의 물성을 드러내는 일차적인 특성으로 깨끗한 표면형상을 얻는 것은 에피 성장의 기본적인 목표이다. InP 에피층의 표면형상은 기

판의 온도에 매우 민감하게 영향을 받는다고 알려져 있다[6, 8, 9]. 본 실험의 결과도 온도에 따라 크게 달라지는 표면형상을 보이고 있다. Fig. 5에서 보이는 바와 같이 성장온도에 따라 표면형상은 크게 3종류로 나눌 수 있다. 520°C와 570°C에서 성장하였을 때 보이는 것과 같은 거친 표면형상을 보이며 많은 Pit들을 관찰할 수 있는 저온 영역, 600°C와 620°C 성장에서 보이는 깨끗한 표면형상을 가지는 영역, 670°C에서 보이기 시작하는 미세한 굴곡이 720°C에서와 같이 발달하는 고온 영역이다. 이러한 표면형상의 변화는 기판 온도의 변화에 따른 P 증기압의 변화로 설명되어 왔다[3-5]. 즉, 성장온도가 낮은 경우,  $\text{PH}_3$ 의 분해가 불충분하여 필요한 만큼의 P 분압을 유지하지 못하게 되고, 성장온도가 지나치게 높은 경우에는 InP 기판의 열분해를 막기 위해 필요한 P 증기압이 너무 높기 때문에 역시 P 분압이 부족하

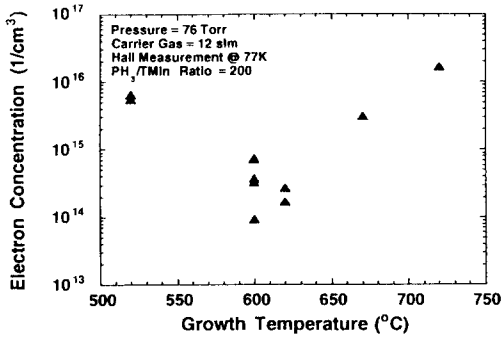


Fig. 6. Changes in electron concentration of InP measured at 77 K.

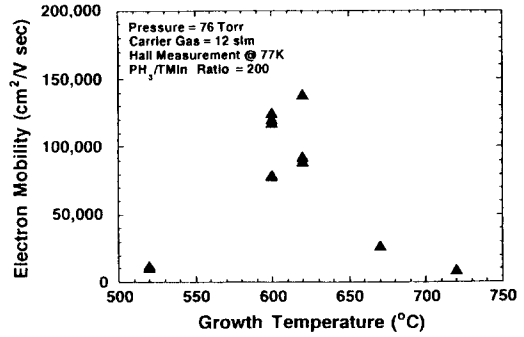


Fig. 7. Changes in electron mobility of InP measured at 77 K.

게 된다는 것이다. 그러나 본 실험 결과에서 볼 수 있는 것과 같이 저온 영역의 표면형상은 고온 영역의 표면형상과는 많은 차이점을 보이고 있다. 520°C의 표면은 많은 pit들을 가진 평탄화를 이루지 못한 형상을 가지고 있고, 570°C의 표면은 대부분의 영역에서 깨끗하게 평탄화되었지만 아직도 약간의 pit들을 가지고 있다. 저온 영역의 결과는 P 분압의 부족이 원인이라기보다는 성장 온도가 낮은 표면에서 원자들의 이동도가 충분히 빠르지 못하여 보통의 MOCVD 성장에서의 성장 모드로 알려진 2차원 성장을 하지 못하는 것으로 생각된다. 따라서 3차원 성장 모드로 성장하기 때문에 성장중에 생겨난 island들이 합쳐지는 과정에서 충분한 평탄화가 이루어지지 못하게 된다. 570°C의 표면형상은 520°C의 표면에 비해 pit의 수가 줄어들었을 뿐 다른 변화는 보이고 있지 않다. 이는 성장온도가 높아짐에 따라 증가된 원자의 이동도에 의해 표면의 평탄화가 더 많이 진행되었기 때문이다. 670°C 이상의 온도에서는 성장계면에서의 P 분압이 부족하여 평균적인 성장속도에는 큰 영향을 주지 않지만 기판의 위치에 따라 상대적인 성장속도의 차이를 유발하고 성장이 진행됨에 따라 성장된 두께의 차이가 차츰 증폭되어 그림에서와 같은 형상이 나타나는 것으로 생각된다.

성장된 InP 에피층에 대해 상온과 77 K에서 Hall 측정을 실시하여 성장온도에 따른 전자농도와 전자이동도의 변화를 관찰하였다. 본 실험에서는 성장된 모든 InP 에피층이 N형 특성을 나타내었고, 이 결과는 As/Ga 비의 증가에 따라 P형에서 N형으로 변화하는 GaAs의 경우와는 다른 InP 성장의 독특한 결과로 알려져 있다[2, 5, 8, 10]. Fig. 6은 성장온도에 따른 77 K에서의 전자농도의 변화이고, Fig. 7은 전자이동도의 변화로서 성장온도

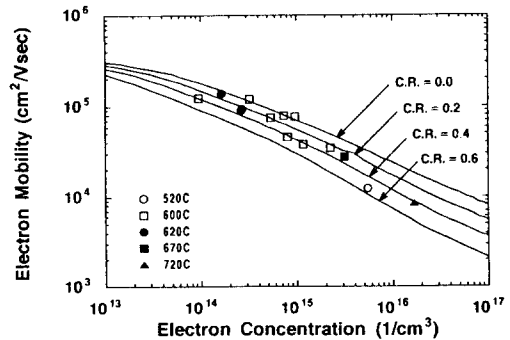


Fig. 8. Electron mobility as a function of electron concentration in InP. Solid lines are calculated data from Walukiewicz at various compensation ratios.

가 에피층의 전기적 성질에 결정적인 영향을 미치며, 최적화된 성장온도가 존재함을 보여준다. 전자농도와 전자이동도는 모두 600~620°C 부근에서 최적의 결과를 보이며, 최적화된 성장조건에서 성장한 가장 우수한 InP 에피의 경우, 상온에서  $2.5 \times 10^{14}/\text{cm}^3$ 의 전자농도와  $4,600 \text{ cm}^2/\text{Vsec}$ 의 전자이동도를 가지고, 77 K에서는  $1.7 \times 10^{14}/\text{cm}^3$ 의 전자농도와  $138,000 \text{ cm}^2/\text{Vsec}$ 의 전자이동도를 가진다. 이 결과는 지금까지 저압 MOCVD 방법으로 성장시킨 InP 에피에 대해 보고된 결과들 중  $420,000 \text{ cm}^2/\text{Vsec}$ 의 특이하게 높은 결과[11]를 제외하고는 가장 높은 전자이동도이다. 570°C 이하의 온도 및 670°C 이상의 온도에서는 전자농도가 증가하고 전자이동도는 감소하는 결과를 보인다. 실제 불순물 농도의 변화를 확인하기 위하여 Walukiewicz 등의 compensation ratio 계산 결과로부터 donor와 acceptor의 농도를 계산하였다[12]. Fig. 8은 측정된 전자농도와 전자이동도를 compensation ratio가 0, 0.2, 0.4, 0.6일 때의 이론적 곡선과

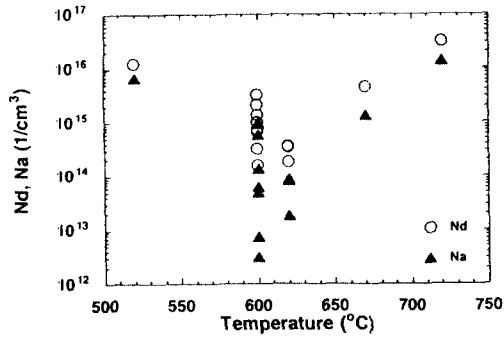


Fig. 9. Changes in donor and acceptor concentrations at various growth temperatures.

비교한 결과이고, Fig. 9에 이로부터 얻어진 donor와 acceptor의 농도를 성장온도에 대하여 표시하였다. 600~620°C의 온도에서는 donor와 acceptor의 농도가 모두 가

장 낮은 값을 가지고 570°C 이하의 온도와 670°C 이상의 온도에서는 donor와 acceptor의 농도가 모두 증가하는 결과를 보인다. 따라서 전자농도의 증가와 전자이동도의 감소는 실제 불순물 농도의 증가에 기인한다.

불순물은 성장하는 결정이 구조적 결함을 가지는 경우에 더 용이하게 유입된다. 결함이 없이 성장하는 결정 내에 유입되는 불순물은 성장되는 결정 원자와의 격자 상수차이에 의해 strain 에너지를 증가시켜 상대적으로 불안정하게 되지만, 결정 내에 많은 구조적 결함을 가지고 성장하는 경우에는 불순물들이 보다 안정적으로 쉽게 위치할 수 있기 때문이다. 저온 성장영역에서 3차원 성장모드로 island 성장이 진행됨에 따라 제공되는 많은 kink들이 불순물이 안정적으로 위치할 수 있는 자리를 제공하게 되고, 고온 성장영역에서는 P 부족으로 인한 표면의 굴곡이 역시 불순물이 안정적으로 위치할 수 있

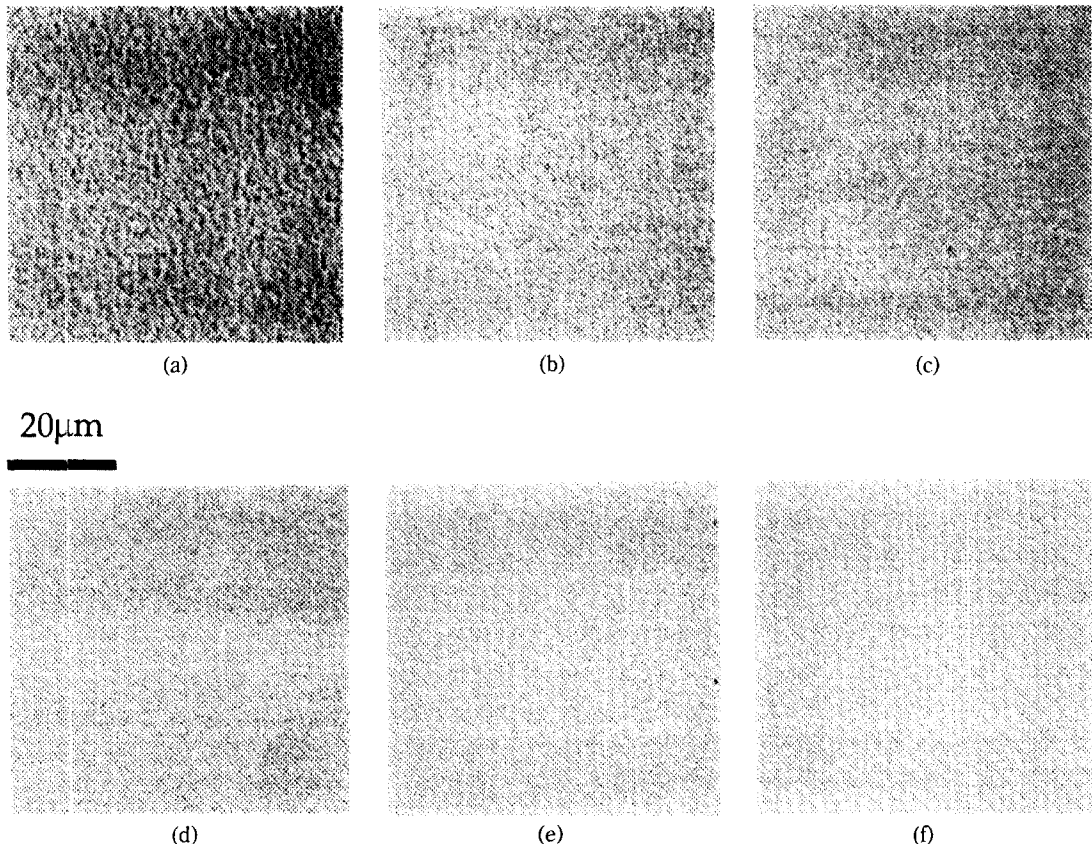


Fig. 10. Effect of  $\text{PH}_3/\text{TMIIn}$  ratio on surface morphology of InP epitaxial layers grown at various V/III ratios at growth temperature of 600°C (a) 50, (b) 100, (c) 200, (d) 300, (e) 400, (f) 800.

는 자리를 제공하게 된다. 따라서 표면의 열화는 Fig. 6, 7, 9에서와 같이 결정내로 유입되는 불순물을 증가시키게 된다. 이때 유입 가능한 불순물로는 다른 연구자들에 의해 제시된 Si[13], Zn[10], C[10, 14], S[8] 등이 있지만, MOCVD 성장에서 전기적 성질을 결정하는 불순물은 아직 명확하지 않다. 다만 많은 연구자들이 In과 P의 원료물질에 따라 불순물의 농도가 현저하게 달라지는 결과를 보고하였고 이로부터 불순물이 원료물질 자체로부터 유입될 가능성이 가장 높은 것으로 생각된다[9, 16].

### 3.2.2. $\text{PH}_3/\text{TMIIn}$ 비에 따른 변화

$\text{PH}_3/\text{TMIIn}$  비는 MOCVD를 이용한 InP 성장의 중요한 성장변수이다. MOCVD 성장에서  $\text{PH}_3/\text{TMIIn}$  비가 중요하게 다루어지는 이유는 기판으로 사용되는 InP의 P 증기압이 보통의 성장온도인 600~650°C 범위에서 매우 커서 성장 중에 일어날 수 있는 P의 탈착을 방지하기 위해 높은  $\text{PH}_3/\text{TMIIn}$  비가 요구되기 때문이다. 이러한  $\text{PH}_3/\text{TMIIn}$  비가 에피 특성에 미치는 영향을 알아보기 위해 성장온도를 600°C로 유지하고  $\text{PH}_3/\text{TMIIn}$  비를 50~800의 범위에서 변화시키면서 InP 에피 특성의 변화를 관찰하였다.  $\text{PH}_3/\text{TMIIn}$  비에 따른 InP 에피층의 표면은  $\text{PH}_3/\text{TMIIn}$  비가 100 이하에서는 Fig. 5의 720°C 성장시편에서 관찰되는 것과 같은 작고 균일하게 분포된 굴곡들을 관찰할 수 있었고,  $\text{PH}_3/\text{TMIIn}$  비가 200 이상인 경우에는 깨끗한 표면을 얻을 수 있었으며  $\text{PH}_3/\text{TMIIn}$  비를 800까지 높인 경우에도 표면이 열화되는 것은 관찰되지 않았다. 이러한 결과는 Fig. 10에 나타나 있다. 이 결과는 InP 표면이 열화되는 현상이, 성장이 일어나는 계면에서의 P 분압과 관련되어 있음을 보여주고, 계면에서의 낮은 P 분압에 의해 생기는 P의 탈착이 낮은  $\text{PH}_3/\text{TMIIn}$  비에서의 표면열화의 원인으로 생각된다[4, 8].

전자농도와 전자기동도의  $\text{PH}_3/\text{TMIIn}$  비에 따른 변화는 많은 연구자들에 의해 연구되었지만 보고되는 결과들은 연구자들에 따라 다른 경향성을 보이고 있다[4, 5, 8, 10]. 많은 경우,  $\text{PH}_3/\text{TMIIn}$  비가 증가하면 에피의 전기적 특성이 좋아지는 결과[4, 5, 10]를 보고하고 있고,  $\text{PH}_3/\text{TMIIn}$  비와는 무관한 전기적 특성을 보이는 결과도 보고되어 있다[8]. 본 연구에서는  $\text{PH}_3/\text{TMIIn}$  비를 변화시킨 경우, Fig. 11에 나타난 바와 같이 전자농도의 변화는 뚜렷한 경향성을 보이지 않고  $10^{15}/\text{cm}^3$  근처의 값을 나타내지만, Fig. 12에서 보는 바와 같이 전자기동도는  $\text{PH}_3/\text{TMIIn}$  비 200 부근에서 최대값을 뚜렷이 나타내고 있다.  $\text{PH}_3/\text{TMIIn}$  비가 낮은 영역에서의 전자기동도의 감

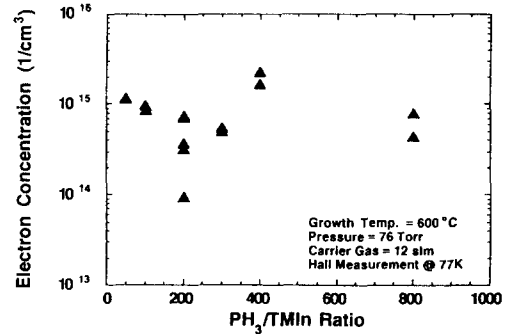


Fig. 11. Effect of  $\text{PH}_3/\text{TMIIn}$  ratio on the electron concentration of InP grown at 600°C.

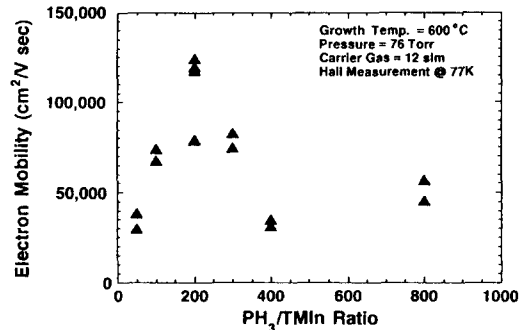


Fig. 12. Effect of  $\text{PH}_3/\text{TMIIn}$  ratio on electron mobility of InP grown at 600°C.

소는 Fig. 10에서 알 수 있는 것과 같이 P의 부족에 의해 표면굴곡이 형성되는 과정에서 생겨난 구조적 결함 때문으로 생각된다. 그러나,  $\text{PH}_3/\text{TMIIn}$  비가 높은 영역에서의 전자기동도의 감소는 표면열화나 전자농도의 변화로는 설명될 수 없으며 연구가 계속 진행되어야 할 것이다.

## 4. 결 론

76 Torr에서의 저압 유기금속 화학증착법을 이용하여, 성장온도 600~620°C,  $\text{PH}_3/\text{TMIIn}$  비 200 부근에서 최적의 성장조건을 확립하였고, 최적 조건에서 성장한 가장 우수한 에피의 경우, 77 K에서  $1.7 \times 10^{15}/\text{cm}^3$ 의 전자농도와  $138,000 \text{ cm}^2/\text{Vsec}$ 의 매우 높은 전자기동도를 얻을 수 있었다. 성장온도와 TMIIn의 유량,  $\text{PH}_3$  유량에 따른 성장속도의 변화로부터 520~720°C의 온도범위에서 성장속도는 TMIIn의 확산속도에 의해 결정됨을 확인하였다. 성장온도와  $\text{PH}_3/\text{TMIIn}$  비를 성장변수로 하여 InP 에피층의 표면형상과 전기적 특성의 변화를 관찰하여,

전기적 특성이 표면형상과 밀접하게 연관되어 있음을 확인하였고, 에너지적으로 안정한 표면의 구조적 결함을 통한 불순물의 유입을 가능한 불순물 유입의 경로로 제시하였다.

### 감사의 글

본 연구는 서울대학교 반도체공동연구소의 교육부 반도체분야 학술연구 조성비(과제번호 : ISRC 92-E-0024)와 한국과학재단 특정연구과제(과제번호 : KOSEF 93-01-00-17)의 지원에 의해 수행되었다. MOCVD 성장에 많은 조언과 도움을 준 이상래씨, 양계모씨와 서진호씨에게 감사드린다.

### 참고문헌

1. V. Swaminathan, A. T. Macrander, in *Materials Aspects of GaAs and InP Based Structures* (Prentice Hall, New Jersey, 1991), p. 1.
2. G. B. Stringfellow, in *Organometallic Vapor-Phase Epitaxy* (Academic Press, San Diego, 1989), p. 2.
3. M. R. Leys and H. Veenviet, *J. Cryst. Growth* **55**, 145 (1981).
4. L. D. Zhu, K. T. Chan and J. M. Ballantyne, *J. Cryst. Growth* **73**, 83 (1985).
5. K. Eguchi, Y. Ohba, M. Kushibe, M. Funamizu and T. Nakanisi, *J. Cryst. Growth* **93**, 88(1988).
6. C. C. Hsu, R. M. Cohen and G. B. Stringfellow, *J. Cryst. Growth* **63**, 8 (1983).
7. V. M. Donnelly and J. A. McCaulley, *J. Vac. Sci. Technol.* **A8**, 84 (1990).
8. K. Uwai, N. Susa, O. Mikami and T. Fukui, *Jpn. J. Appl. Phys.* **23**, L121 (1984).
9. M. Razeghi and J. P. Duchemin, *J. Cryst. Growth* **64**, 76 (1983).
10. D. Kasemset, K. L. Hess, K. Mohammed and J. L. Merz, *J. Electron. Mater.* **13**, 655 (1984).
11. J. L. Weyher, in *Handbook on Semiconductors*, Vol. 3a, (North-Holland, Amsterdam, 1994), p. 783.
12. W. Walukiewicz, J. Lagowski, L. Jastrzebski, P. Rava, M. Lichtensteiger, C. H. Gatos and H. C. Gatos, *J. Appl. Phys.* **51**, 2659 (1980).
13. A. T. R. Briggs and B. R. Butler, *J. Cryst. Growth* **85**, 535 (1987).
14. C. H. Chen, M. Kitamura, R. M. Cohen and G. B. Stringfellow, *Appl. Phys. Lett.* **49**, 963 (1986).
15. M. A. Di Forte-Poisson, C. Brylinski and J. P. Duchemin, *Appl. Phys. Lett.* **46**, 476 (1984).