

저압 유기금속 화학증착법을 이용한 InP 기판에 격자 일치된 In_{0.53}Ga_{0.47}As 에피층의 성장

박형수^{a)} · 문영부 · 윤의준 · 조학동* · 강태원*

서울대학교 재료공학부 및 반도체 공동연구소 *동국대학교 물리학과
(1996년 5월 23일 접수)

Growth of In_{0.53}Ga_{0.47}As lattice matched to InP substrate by low pressure metalorganic chemical vapor deposition

Hyung-soo Park^{a)}, Young-boo Moon, Euijoon Yoon, Hak-dong Cho*
and Tae-won Kang*

School of Materials Science and Engineering & Inter-university
Semiconductor Research Center, Seoul National University

*Dept. of Physics, Dongguk University

(Received May 23, 1996)

요 약 - 저압 MOCVD 방법을 이용하여 76 Torr에서 In_xGa_xAs 에피층을 성장하였다. 성장온도에 따른 성장속도의 변화는 크지 않았으며, 격자불일치와 성장온도, AsH₃/(TMIn+TMGa)비에 따라 표면형상이 변화하는 경향성을 관찰하였다. 깨끗한 표면을 가지는 In_xGa_xAs 에피층의 5K PL 측정을 통하여 2.8 meV의 반가폭을 가지는 결정성이 좋은 에피가 성장되었음을 확인하였다. 성장온도에 따른 조성의 변화는 크지 않았으며, 고체상에서의 In_xGa_xAs 조성은 기체상에서의 원료가스의 확산단계에 의해 결정되었다. 격자불일치와 성장온도가 In_xGa_xAs 에피층의 전기적 특성을 결정하는 가장 중요한 변수로 확인되었고, 최적조건에서 성장한 에피층에 대해 상온에서 8×10¹⁴/cm³의 전자농도와 11,000 cm²/V·sec의 전자이동도를 얻었다.

Abstract - In_xGa_xAs epitaxial layers were grown at 76 Torr by low pressure metalorganic chemical vapor deposition (LP-MOCVD). Growth rate did not change much with growth temperature. Surface morphology of In_xGa_xAs epitaxial layer was affected by lattice mismatch, growth temperature and AsH₃/(TMIn+TMGa) ratio. A high quality epilayer showed a full width at half maximum of 2.8 meV by photoluminescence measurement at 5K. The composition of the In_xGa_xAs was determined by the relative gas phase diffusion of TMIn and TMGa. Lattice mismatch and growth temperature were the most important variables that determine the electrical properties of In_xGa_xAs epitaxial layers. At optimized growth condition, it was possible to obtain a high quality In_xGa_xAs epilayers with a electron concentration as low as 8×10¹⁴/cm³ and an electron mobility as high as 11,000 cm²/Vsec at room temperature.

1. 서 론

In_xGa_xAs는 높은 전자이동도를 가지고 있으며, 전 조성범위에 걸쳐 direct bandgap 특성을 나타내므로 고주파 field effect transistor (FET), high electron mobility

transistor (HEMT) 등의 초고속 전자소자와 장파장 avalanche photodiode (APD)나 PIN photodiode 등의 광소자 제작에 널리 사용되는 물질이다[1]. In_xGa_xAs는 일반적으로 GaAs나 InP기판 위에 단결정박막으로 성장되고, InP 기판 위에 성장된 In_{0.53}Ga_{0.47}As를 제외하면 기판과 격자일치를 이루지 않는 물질이다. InP 기판 위에 In_xGa_xAs를 성장시키는 경우에는 In의 조성에 따라 최대

^{a)} 현주소: 삼성종합기술원 광반도체 연구실

3.2%의 격자 불일치를 가지므로 격자일치가 되지 않는 경우, $\text{In}_{1-x}\text{Ga}_x\text{As}$ 에피층 내에 부정합 전위 (misfit dislocation)가 발생하여 전기적, 광학적 특성을 저하시키는 원인이 된다.

$\text{In}_{1-x}\text{Ga}_x\text{As}$ 에피층을 성장시키는 방법으로는 liquid phase epitaxy (LPE), vapor phase epitaxy (VPE), molecular beam epitaxy (MBE)와 상압 및 저압 metalorganic chemical vapor deposition (MOCVD) 등의 방법이 있으나, 본 연구에서는 인(P)을 포함한 반도체의 성장이 용이하고, 급준한 계면의 형성과 넓은 면적에 대해 균일한 성장이 가능하며 대량생산에 용이한 저압 MOCVD 방법을 사용하였다. 저압 MOCVD 방법으로 InP 기판 위에 $\text{In}_{1-x}\text{Ga}_x\text{As}$ 에피층을 성장하여 성장조건에 따른 조성의 변화를 관찰하고, MOCVD 성장에서 가장 중요한 성장 변수로 알려진 성장온도와 5족 대 3족 원소 비가 $\text{In}_{1-x}\text{Ga}_x\text{As}$ 에피층의 전기적 특성에 끼치는 영향을 알아보고자 하였다.

2. 실험 방법

$\text{In}_{1-x}\text{Ga}_x\text{As}$ 성장에 사용된 MOCVD 장치는 저압 성장이 가능한, 유도가열방식의 수평형 반응기로 이루어져 있다[2]. 성장에 사용된 원료로는 In의 경우, trimethylindium (TMIn, $(\text{CH}_3)_3\text{In}$), Ga은 trimethylgallium (TMGa, $(\text{CH}_3)_3\text{Ga}$), As과 P의 원료로는 99.9997% AsH_3 과 99.9997% PH_3 을 각각 사용하였다. 3족 원료의 기화 가스 및 이송 가스로는 Pd 수소정제기로 정제된 수소(99.9999%)를 사용하였다.

기판으로는 (110) 방향으로 2° 기울어진 (100) 반절연 InP 기판을 사용하였다. 기판은 적당한 크기로 절단하여 trichloroethane (TCA), 아세톤, 메탄올의 유기물 제거 과정을 거친 후, 황산식각용액 ($\text{H}_2\text{SO}_4 : \text{H}_2\text{O}_2 : \text{H}_2\text{O} = 5 : 1 : 1$)으로 2분 30초간 식각하였다. 다시 탈이온수로 세척을 마친 InP 웨이퍼는 N_2 로 건조시킨 후, 반응기에 투입하였다.

성장된 $\text{In}_{1-x}\text{Ga}_x\text{As}$ 에피층은 먼저 Nomarski 광학현미경을 이용하여 표면형상을 관찰 하였고, $\text{HF} : \text{H}_2\text{O}_2 : \text{H}_2\text{O} = 1 : 1 : 10$ 에칭 용액으로 벽계면을 stain 에칭 후, 주사전자현미경 (SEM)으로 두께를 측정하여 성장속도를 결정하였다. 전기적 특성의 분석을 위해 성장을 마친 기판을 적당한 크기 ($6\text{ mm} \times 6\text{ mm}$)로 절단하고 고순도의 In으로 접촉을 만들어 450°C 에서 1분간 어닐링을 한 후,

van der Pauw 방법에 의한 Hall 측정을 실시하여 $\text{In}_{1-x}\text{Ga}_x\text{As}$ 에피층내의 불순물의 농도와 전자의 이동도를 구하였다. $\text{In}_{1-x}\text{Ga}_x\text{As}$ 에피층의 조성을 정확히 분석하기 위하여 이중결정회절법 (Double Crystal Diffractometry, DCD)을 사용하였다. 성장된 $\text{In}_{1-x}\text{Ga}_x\text{As}$ 에피층의 광학적 특성과 결정성을 확인하기 위하여 5K에서의 photoluminescence (PL) 측정을 실시하였으며 이때 사용된 레이저는 514.5 nm 파장의 Ar 레이저이고, 100 mW/cm²의 레이저강도에서 0.1 nm의 해상도로 측정하였다.

3. 실험 결과

3.1 $\text{In}_{1-x}\text{Ga}_x\text{As}$ 에피층의 성장

기판의 온도는 MOCVD 성장의 가장 중요한 성장 변수의 하나로, 성장속도에 따라 세부적으로 나누어지는 것으로 알려져 있다[3]. 저온영역에서는 온도가 증가함에 따라 성장속도가 급격히 증가하며 표면반응이 성장속도를 결정한다. 중간온도영역에서는 성장속도가 온도에 둔감하며, 반응물질의 기상확산이 성장속도를 결정하고, 온도가 더 올라가면 성장속도가 감소하는 영역이 나타난다. 일반적으로 MOCVD 성장은 성장속도가 온도에 크게 영향을 받지 않는 확산속도 결정영역에서 이루어진다. 본 연구에서는 $540\sim 720^\circ\text{C}$ 의 온도범위에서 $\text{In}_{1-x}\text{Ga}_x\text{As}$ 에피층을 성장한 결과, Fig. 1에서 보듯이 성장속도는 기판의 온도에 따라 크게 변화하지 않았다.

표면형상은 박막의 물성에 영향을 주는 기본적인 특성으로 성장조건에 따라 민감하게 변화한다. $\text{In}_{1-x}\text{Ga}_x\text{As}$ 와 같이 기판과 격자상수가 다른 에피를 성장할 때에는 격자불일치 정도가 주요한 변수가 되며 격자불일치가 커지면 에피층 표면에 Fig. 2(b)와 같은 cross-hatch가 관찰된다. Fig. 2(a)와 (b)의 에피층은 620°C 의 온도에서 성장하였고, 기체상에서의 In의 몰비는 (a)의 경우 0.65, (b)의 경우 0.53 이다. 또한, 성장온도, 5족 원소 대 3족원고의 유량비 (이하 $\text{AsH}_3/(\text{TMIn}+\text{TMGa})$ 비) 등도 MOCVD 성장에서 표면형상을 결정하는 성장 변수로 알려져 있다[4, 5]. 기체상에서의 Ga의 조성을 일정하게 유지하며 $540\sim 720^\circ\text{C}$ 의 온도에서 $\text{In}_{1-x}\text{Ga}_x\text{As}$ 에피층을 성장한 결과, 580°C 이하의 성장온도에서 표면이 급격히 나빠짐을 발견하였다. Fig. 3의 (a)와 (b)는 각각 540°C 와 580°C 에서 성장한 $\text{In}_{1-x}\text{Ga}_x\text{As}$ 에피층의 표면형상으로, 매우 거친 표면을 보이고 있다. 이렇게 표면이 거칠어지는 원인으로서는 첫째, 저온에서 AsH_3 의

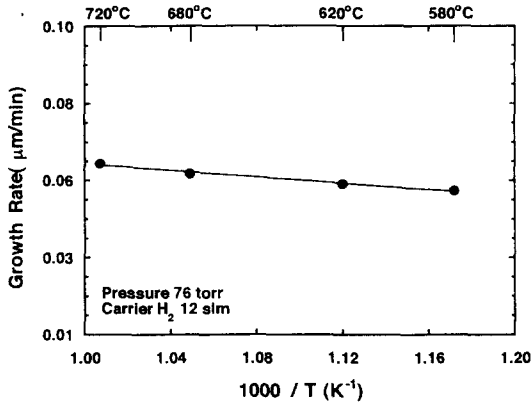


Fig. 1. Effects of growth temperature on the growth rate of In_{1-x}Ga_xAs.

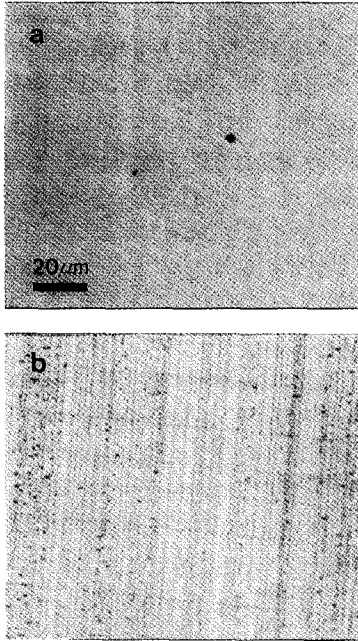


Fig. 2. Degradation of surface morphology with lattice mismatch at the same growth temperature of 620°C with AsH₃/(TMIn+TMGa) ratio of 30, (a) lattice matched with X_{In} in the gas phase of 0.65, (b) lattice mismatched with X_{In} in the gas phase of 0.53.

열분해가 충분하지 않아 표면이 열화되었을 가능성과, 둘째 성장온도에 따른 조성의 변화로 인해 격자불일치가 증가하여 3차원 성장모드로 성장하였을 가능성, 셋째 격자불일치는 크지 않지만 성장온도가 낮아 기판 표면에서의 원자 이동도가 떨어져 3차원 성장모드로

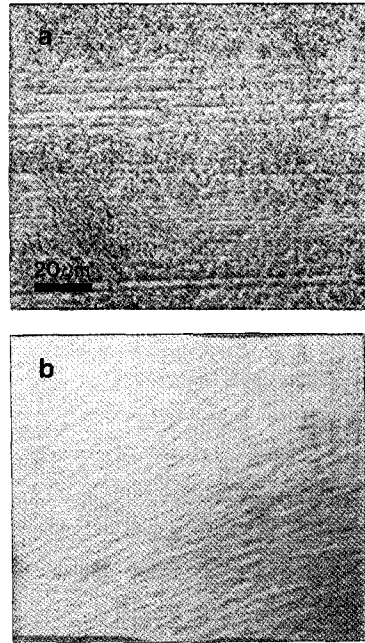


Fig. 3. Effects of growth temperature on the surface morphology, (a) 540°C, (b) 580°C. The samples have AsH₃/(TMIn+TMGa) ratio of 30.

성장하였을 가능성을 생각해 볼 수 있다. AsH₃ 열분해는 550°C 부근에서 급격히 줄어드는 것으로 보고되어 있다[6]. 540°C 성장의 경우에는 Fig. 3의 (a)와 같이 격자불일치에 따른 전형적인 cross-hatch 현상이 관찰되며, 성장온도의 감소에 따른 격자불일치가 표면열화를 일으킬 만큼 증가하였음을 알 수 있다. 이와 달리 Fig. 3(b)에 보이는 580°C에서 성장한 시편은 DCD로 측정된 In_{1-x}Ga_xAs의 조성이 0.442이었으며, 이때의 격자불일치는 약 0.17%의 작은 값으로 Fig. 3(a)에서와 같이 거친 표면을 보이지는 않는다. 따라서 580°C 성장의 경우는 조성의 차이보다는 AsH₃ 열분해의 부족과 기판 표면에서의 낮은 원자이동도가 표면열화의 주된 원인으로 생각된다. Fig. 4는 AsH₃/(TMIn+TMGa)비에 따라 나타나는 In_{1-x}Ga_xAs 표면형상이다. AsH₃/(TMIn+TMGa) 비가 감소함에 따라 As 탈착과 관련된 것으로 생각되는 일정한 모양의 pit들이 증가하는 것을 볼 수 있다. AsH₃/(TMIn+TMGa)비를 변화시키기 위하여 620°C의 성장온도에서 TMIn과 TMGas의 유량은 각각 0.464 sccm과 0.250 sccm으로 일정하게 유지하고 AsH₃의 유량만을 변화시켰다.

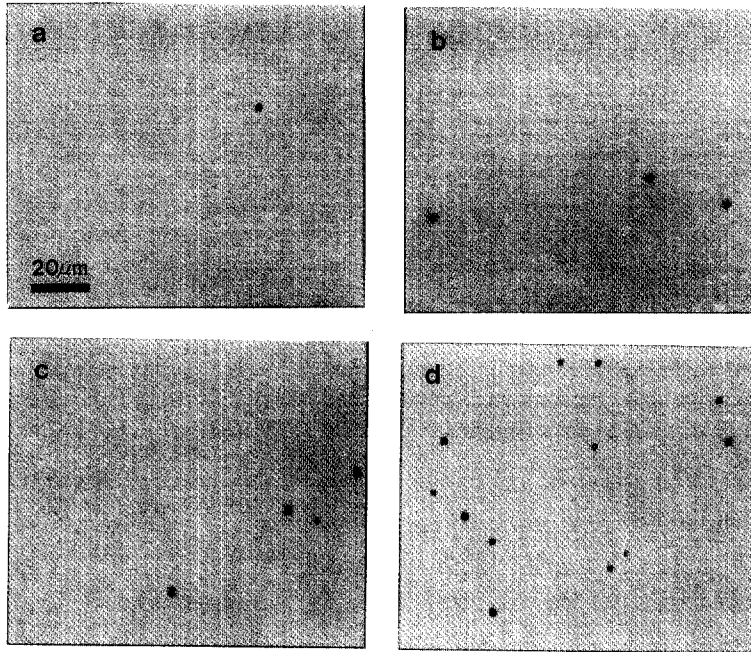


Fig. 4. Effects of $\text{AsH}_3/(\text{TMIn}+\text{TMGa})$ ratios on the surface morphology of $\text{In}_x\text{Ga}_x\text{As}$ layers grown at 620°C with TMIn flow rate of 0.464 sccm and TMGa flow rate of 0.250 sccm. Ratios are (a) 120, (b) 60, (c) 30, (d) 7.5.

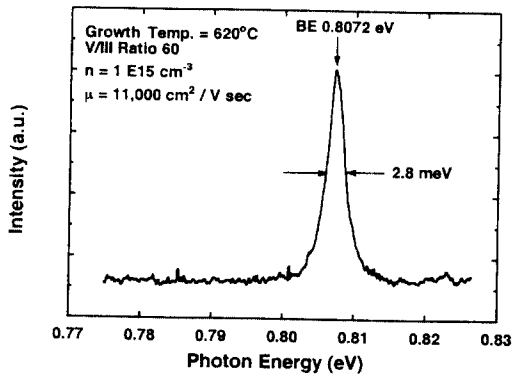


Fig. 5. 5K PL spectrum of $\text{In}_x\text{Ga}_x\text{As}$ epitaxial layer.

최적조건에서 성장된 $\text{In}_x\text{Ga}_x\text{As}$ 에피층의 경우, 10^4 이하의 격자불일치가 측정되었으며, Fig. 5에 보이는 바와 같이 5K에서 PL 측정결과를 통하여 0.872 eV에서 2.8 meV의 반폭을 가지는 bound exciton(BE) 피크가 나오는 것을 관찰하였다. 또한, 기타의 불순물이나 defect와 관련된 피크는 관찰되지 않았다. 이상의 결과들로부터 고순도의 결정성이 우수한 에피층이 성장됨을 알 수 있다.

3.2 성장조건에 따른 $\text{In}_x\text{Ga}_x\text{As}$ 에피층 조성의 변화

MOCVD 방법으로 $\text{In}_x\text{Ga}_x\text{As}$ 를 성장시키면, 기체상에서의 In의 조성과 고체상에서의 조성에 차이가 생기고, 일반적으로 In이 적게 들어가는 경향을 보인다. 특히, In source로 TEIn을 사용한 경우에는 기상에서 TEIn이 AsH_3 과 반응 고분자 물질을 형성하여 In 손실을 가져온다. 이러한 고분자 물질의 형성은 고온에서 더욱 쉽게 일어나므로 고온에서 $\text{In}_x\text{Ga}_x\text{As}$ 의 조성이 0.1이상 변화하는 결과 등이 보고되었다[7, 8]. 고분자 물질의 형성을 억제하기 위하여 빠른 유속을 이용하여 부반응이 일어날 반응시간을 줄이고 저압성장방법과 In source로 AsH_3 과의 반응성이 적은 TMIn을 사용하는 방법이 제시되었으며, 기체상에서의 In 손실을 줄인 결과들이 보고되었다[3, 9]. TMIn을 사용하여 저압에서 성장한 본 연구결과도 Fig. 6에서와 같이 성장온도를 580°C 에서 720°C 까지 변화시키면서 실험한 결과 In의 조성은 0.558에서 0.547로 약간의 감소만을 보인다. 따라서 기체상에서의 TMIn과 AsH_3 의 부반응이 우리의 성장조건에서는 조성에 큰 영향을 미칠 정도로 일어나지 않음을 알 수 있다.

부반응에 의해 In의 소모가 크지 않은 경우, 기체상에

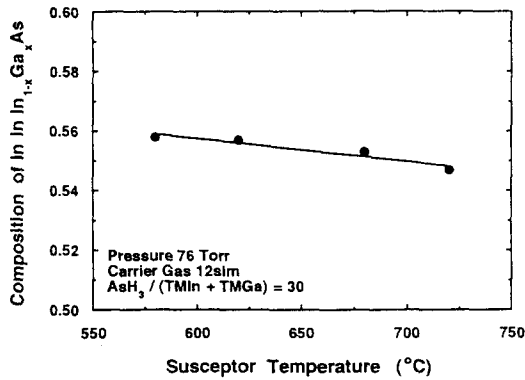


Fig. 6. Effects of growth temperatures on the solid phase composition of In in $In_{1-x}Ga_xAs$ epitaxial layers at constant gas phase composition.

서와 고체상에서의 조성의 차이를 설명하기 위하여 TMIn과 TMGa의 열분해 정도의 차이, TMIn과 TMGa의 기판으로의 확산속도의 차이 등을 고려하였다. TMIn의 열분해가 TMGa보다 쉽게 이루어지는 것으로 알려져 있으나, 두 물질 모두 400~500°C의 온도범위에서 분해가 충분히 이루어지므로 [10, 11] $In_{1-x}Ga_xAs$ 성장이 이루어지는 580~720°C의 온도범위에서는 두 물질의 열분해의 차이가 조성에 큰 영향을 미치지 못할 것으로 생각된다. 성장온도 620°C, 670°C에 대하여 기체상에서의 In/Ga의 비율이 고체상에의 In/Ga 비율에 어떤 영향을 미치는지에 대하여 연구하였으며 그 결과는 Fig. 7과 같이 Ga에 비해 상대적으로 In이 적게 고체상으로 함유되는 결과를 보인다. 성장이 이루어지는 온도영역이 확산속도가 결정되는 영역이고 $As/H_3/(TMIn+TMGa)$ 비가 1보다 매우 큰 일반적인 MOCVD 성장의 조건을 고려하면 Ga의 고체상에서의 조성 X_s 에 관한 다음과 같은 식을 얻을 수 있다 [3].

$$X_s = \frac{J_{TMGa}}{J_{TMIn} + J_{TMGa}} = \frac{D_{TMGa} P_{TMGa}^0}{D_{TMIn} P_{TMIn}^0 + D_{TMGa} P_{TMGa}^0} \quad (1)$$

여기서 J는 확산 flux이고, P^0 는 반응기로 넣어준 반응기체의 분압이다. 기체상에서의 TMGa과 (TMIn+TMGa)의 분압비를 X_g 라 하고 기체확산계수 D가 분자량 M의 제곱근에 반비례하는 관계를 대입하여 정리하면, $(1-X_s)/X_s$ 와 TMIn/TMGa의 관계식을 아래와 같이 얻을 수 있다.

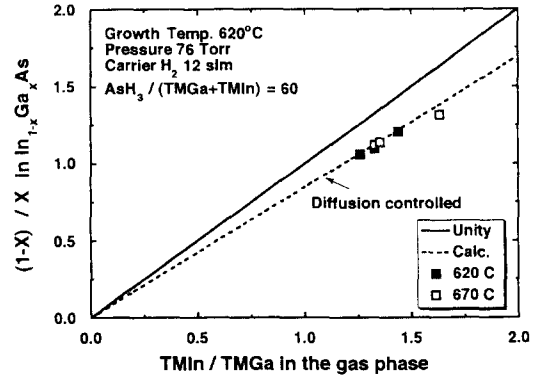


Fig. 7. In/Ga ratio in the solid phase as a function of TMIn/TMGa ratio in the gas phase. The solid line represents a unit incorporation ratio and the dotted line represents a theoretical incorporation ratio assuming that the incorporation is controlled by diffusion.

$$(1-X_s) = \frac{(D_{TMIn}/D_{TMGa})(1-X_g)}{1-(D_{TMIn}/D_{TMGa})(1-X_g)} = \frac{0.847(1-X_g)}{1-0.153(1-X_g)} \quad (2)$$

$$\frac{1-X_s}{X_s} = 0.847 \frac{P_{TMIn}^0}{P_{TMGa}^0} \quad (3)$$

실제로 본 실험에서 성장이 이루어지는 온도영역이 확산속도에 의해 성장속도가 결정되는 영역이고 $V/III >> 1$ 이므로 앞의 가정이 잘 적용될 수 있다. 식(3)을 Fig. 7에 표시하면 점선으로 나타나며 실제 실험결과와 잘 일치함을 알 수 있다.

3.3 성장조건에 따른 $In_{1-x}Ga_xAs$ 에피층의 전기적 특성 변화

$In_{1-x}Ga_xAs$ 에피층의 전자농도와 전하이동도는 다양한 성장조건에서 에피층내에 유입된 불순물의 농도, 구조적 결함 등을 민감하게 보여주는 척도이다 [12, 13]. $In_{1-x}Ga_xAs$ 의 조성에 따른 격자불일치 정도, 성장온도, $AsH_3/(TMIn+TMGa)$ 비는 전자농도와 전하이동도에 영향을 주는 주된 변수이며, 이들 변수에 따른 전자농도와 이동도의 변화를 Hall 측정을 통하여 관찰하였다. 측정 결과 도핑하지 않고 성장한 $In_{1-x}Ga_xAs$ 에피층은 모든 성장조건에서 N-type 특성을 나타내었고, 최적성장조건에서 성장한 $2 \mu m$ InGaAs 에피층의 경우, 상온에서의 전자농도가 $8 \times 10^{14}/cm^3$ 이고, 전하이동도가 $11,000 cm^2/V \cdot sec$ 인 고순도의 $In_{0.53}Ga_{0.47}As$ 에피층이 성장되었음을 확

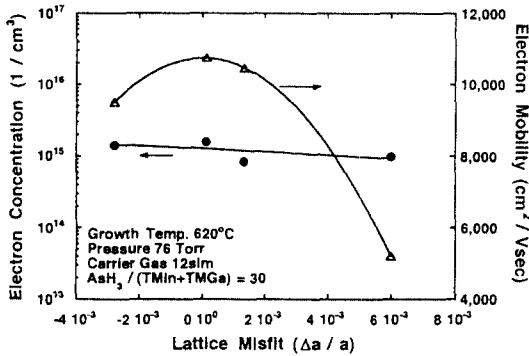


Fig. 8. Effects of lattice mismatches on the electron concentration and electron mobility of $\text{In}_{1-x}\text{Ga}_x\text{As}$ at growth temperature of 620°C.

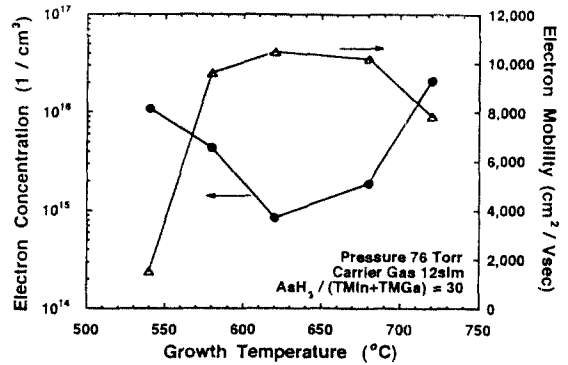


Fig. 9. Effects of growth temperatures on the electron concentration and electron mobility of $\text{In}_{1-x}\text{Ga}_x\text{As}$.

인 하였다. 격자불일치가 증가함에 따라 Fig. 8에서 알 수 있듯이 전자농도는 크게 변화하지 않았지만 전자이동도는 현저히 감소였다. 격자불일치가 증가함에 따라 에피층내에 생기기 시작한 전위 등의 결함에 의해 전자 이동도가 감소하는 것으로 생각된다.

성장온도와 $\text{AsH}_3 / (\text{TMIn} + \text{TMGa})$ 비에 따라 $\text{In}_{1-x}\text{Ga}_x\text{As}$ 에피층의 전자농도와 전자이동도가 변화하는 경향성은 연구자에 따라 다르게 보고되고 있다[12~14]. Kuo 등은 540°C의 저온에서 성장한 경우에 고온 성장에 비해 불순물의 농도가 높음을 보고하였고[14], Razeghi 등은 고온으로 갈수록 불순물의 농도가 증가하고 전자이동도가 떨어지는 결과를 보고하였다[13]. 이렇게 연구자에 따라 경향성이 다르게 나타나는 것은 $\text{In}_{1-x}\text{Ga}_x\text{As}$ 에피층의 전자농도와 전자이동도를 결정하는 주된 요인인 격자불일치 정도, 에피층내의 불순물 혼입, 결합 농도 등의 상대적 기여도가 성장장치마다 다르기 때문이다. 반응기의 압력과 사용되는 source의 종류에 따라서 온도와 AsH_3 의 유량에 따른 조성의 변화정도가 달라지고, 불순물의 종류와 유입경로도 연구자마다 다르게 나타나게 된다. 우리의 연구결과는 Fig. 9에서의 같이 620°C부근에서 가장 큰 전자이동도와 가장 적은 전자농도를 보인다.

우리의 실험결과 580°C이상의 성장온도에서는 cross-hatch가 나타나지 않았으며 Fig. 6에서와 같이 성장온도에 따른 조성에 변화도 크지 않았다. 또한 Fig. 8에서 보이는 바와 같이 격자불일치는 전자농도에 큰 영향을 주지 않았다. 그러나 Fig. 9의 결과는 성장온도에 따라 전자농도가 큰 변화를 보이고 있다. 따라서 성장온도에 따른 전기적 특성의 변화가 격자불일치에 의한 것으로는

생각되지 않는다.

Fig. 9에서 보이는 전자이동도의 감소는 불순물 농도의 증가에 의한 것으로 생각되나, 정확한 불순물의 종류와 유입경로는 현재로서는 명확히 설명할 수 없다. 다만, 저온영역에서의 전자농도증가와 전자이동도의 감소는 AsH_3 의 공급부족과 관련되어 있을 것으로 생각되며[14], 고온영역에서 전자농도가 증가하고 전자이동도가 감소하는 것은 AsH_3 에 포함된 미량의 Si[15], S[13] 등의 수소화합물의 성장온도가 증가할수록 열분해가 잘 되기 때문이라고 생각할 수 있다.

4. 결 론

MOCVD 방법을 이용하여 76 Torr에서 $\text{In}_{1-x}\text{Ga}_x\text{As}$ 에피층을 성장하였다. 최적조건에서 성장한 에피층에 대해 상온에서 $8 \times 10^{14}/\text{cm}^3$ 의 전자농도와 11,000 cm^2/Vsec 의 전자이동도를 얻었으며, 5K PL 측정을 통하여 BE 피크의 반가폭이 2.8 meV인 우수한 에피층이 성장됨을 확인하였다. 540~720°C의 온도범위에서 성장속도는 성장온도에 둔감하였으며 격자불일치가 증가함에 따라 cross-hatch가 발생하는 것을 관찰하였고, 580°C이하의 표면의 열화가 관찰되었다. 또한 $\text{AsH}_3 / (\text{TMIn} + \text{TMGa})$ 비가 감소함에 따라 As 공급이 부족하기 때문으로 생각되는 pit 농도의 증가를 발견하였다. 고체상의 조성은 TMIn과 TMGa의 확산에 의해 결정되었고 $\text{In}_{1-x}\text{Ga}_x\text{As}$ 에피층의 전기적 특성을 결정하는 가장 중요한 변수는 격자불일치와 성장온도로 확인되었다.

감사의 글

본 연구는 서울대학교 반도체공동연구소의 교육부 반도체분야 학술연구 조성비(과제번호: ISRC 93-E-3247)와 한국과학재단 특정연구과제 (93-01-00-17)의 지원에 의해 수행되었다.

참고문헌

1. Peter K. Cheo, in *Fiber Optics and Optoelectronics*, (Prentic-Hall, 1990).
2. Y. Moon, H. Park and E. Yoon, *J. Korean Vac. Soc.* **4**, 394 (1995).
3. G. B. Stringfellow, in *Organometallic vapor phase epitaxy*, (Academic Press, 1989) p. 7.
4. M. Razeghi, in *The MOCVD Challenge Vol. 1; A Survey of GaInAsP-InP for Photonoc and Electronic Applications*, (Adam Hilger, 1989) p. 8.
5. J. Yoshino, K. Takashi, and H. Kukimoto, *J. Cryst. Growth* **55**, 74 (1981).
6. C. A. Larsen, N. I. Buchan, and G. B. Stringfellow, *Appl. Phys. Lett.* **52**, 480 (1988).
7. P.D. Agnello, P.B. Chinoy, and S. K. Ghandhi, *J. Cryst. Growth* **102**, 775 (1990).
8. J. P. Hirtz, J. P. Larivan, J. P. Duchemin, and T. P. Pearsall, *Electron. Lett.* **16**, 415 (1980).
9. B. J. Baliga and S. K. Ghandi, *J. Electrochem. Soc.* **122**, 683 (1975).
10. N. I. Buchan, C. A. Larsen, and G. B. Stringfellow, *J. Cryst. Growth* **92**, 591 (1988).
11. M. Yoshida, H. Watanabe, and F. Uesugi, *J. Electrochem. Soc.* **132** 677 (1985).
12. K. W. Carey, *J. Appl. Phys.* **46**, 89 (1085).
13. M. Razeghi, J. P. Duchemin, *J. Vac. Sci. Technol. B* **1**, 262 (1983).
14. C. P. Kuo, J. S. Yuan, R. M. Cohen, J. Dunn, and G. B. Stringfellow, *Appl. Phys. Lett.* **44**, 550 (1984).
15. A. T. R. Briggs and B. R. Burler, *J. Cryst. Growth* **85**, 535 (1987).