

MBE에 의한 GaAs 에피택셜 성장(II)

(GaAs Epitaxial Layer Grown by MBE(II))

姜泰遠*, 李載珍*, 金榮威*, 金振瑱*, 金鳳烈**

(Tae Won Kang, Jae Jin Lee, Young Ham Kim, Jin Hwang Kim and Bong Ryl Kim)

要 約

MBE 장치로 GaAs epi 층을 성장할 때, 그 성장속도는 전적으로 기판에 와 닿는 Ga 분자선의 강도에 관계되며 Ga cell의 온도와 성장시간에 선형적으로 비례함을 알았다.

또한 epi 층의 표면을 RHEED, AES, SIMS 및 SEM 등으로 조사해 본 결과 기판의 온도를 590°C 이상으로 유지할 때 표면의 결정성, 평탄성, stoichiometry 등이 좋아져 양질의 GaAs epi 층이 성장됨을 알았다.

Abstract

In this paper, we show that the growth rate of MBE GaAs epitaxial layer is controlled entirely by the flux density of the Ga beam, impinging on the substrate surface, and is linearly proportional to the Ga effusion cell temperature and the growth time. According to our investigation of the epitaxial layer surface through RHEED, AES, SIMS and SEM, if the growth temperature is maintained above 590°C, the surface crystal structure, flatness and stoichiometry become significantly enhanced, and the epilayer surface has a smooth mirror-like appearance.

I. 序 論

最近에 이르러 半導體 材料開發은 natural material에서 tailored material 쪽으로 轉換되어 가고 있다. 즉 材料가 가진 性質을 利用하여 그 性質과 같은 디바이스(device)를 만들던 時代에서 디바이스가 요구하는 性質에 알맞는 材料의 開發이 注目을 받게 되었다. 따라서 半導體 材料의 研究추세는 bulk에서 薄膜 쪽으로 기울어 지게 되었고 이에 따라 薄膜의 成長技術에 큰 관심을 갖게 되었다. 薄膜 成長技術은 vapor phase epitaxy(또는 chemical vapor deposition)¹⁾와 같은 熱化學反應을 利用하여 氣相에서 結晶을 成長시키는 化學的 成長方法과 眞空中에서 蒸着

物質을 蒸氣化하여 薄膜을 成長시키는 物理的 成長方法으로 나눌 수 있으며 molecular beam epitaxy (MBE)는 物理的 成長方法^{2,3)}중 하나 이다. MBE는 結晶의 原料를 供給하는 source系와 結晶이 成長되는 基板系가 충분히 멀리 떨어져 있어서 각각 獨立的으로 制御가 가능하고 超高眞空中에서 蒸着하므로 잔류 氣로 부터의 不純物 混入이 매우 적게 될 뿐만 아니라 基板表面도 깨끗히 유지할 수 있다. 또한 넓은 面積에 걸쳐 균일하고 原子 레벨 정도의 平坦한 膜을 얻을 수 있으며 蒸着速度가 느리고(1000 Å/hr ~ 1 μm/hr) 정확하게 制御되기 때문에 '膜의 두께를 單原子層 order 정도로 얇게 成長시킬 수 있고 三成分系 뿐만 아니라 多成分系의 混晶薄膜도 蒸發源을 늘리기만 하면 용이하게 얻을 수 있다. 아울러 각종 dopant의 量을 정확하게 制御하므로 不純物의 濃度 分布와 混晶의 組成分布를 자유로이 정확하게 制御할 수 있다. 따라서 급격한 異種 接合 뿐만 아니라 成分이 서서히 변화하는 graded hetero 接合등을 再現性 있게 만들 수 있다는 등의 長點이 있다.⁴⁾

* 正會員 東國大學校 物理學科
(Dept. of Physics, Dongguk Univ.)

** 正會員 延世大學校 電子工學科
(Dept. of Elec. Eng., Yonsei Univ.)

接受日字: 1985年 11月 7日

그러나 MBE는 정밀하고 高性能의 多元化合物 에 피택설 층 成長에 유리한 반면에 여러가지 복잡한 成分條件을 잘 조절하여야 한다. 즉 MBE로 GaAs 또는 $Al_xGa_{1-x}As$ 에피택설 층을 成長시킬 때 As의 附着係數는 Ga이 表面에 어느 만큼 덮혀 있는가에 의존한다. Ga이 전체면에 없으면 附着係數는 무시할 정도로 작다.^[6]

또한 Ga과 Al분출 cell의 溫度를 900°C 와 1200°C 사이로 制御하면 에피택설 층 成長速度는 0.1~10 Å/sec로 크게 변화시킬 수 있다. 더우기 dopant의 분출셀의 溫度를 制御하면 n型, p型的의 不純物濃度도 $10^{16} \sim 10^{19} \text{cm}^{-3}$ 사이에서 크게 변화한다.^[6] 여기에 基板의 溫度에 따라서도 에피택설 층의 成長條件이 달라지며 우리가 원하는 各種素子를 製作하고자 함에 있어 이와 같은 成長條件을 완전히 신뢰성 있고 再現性 있게 다루어야 함이 선결되어야 한다.

이에 本 研究에서는 MBE法으로 GaAs 에피택설 층을 成長할 때 成長率을 決定하고 成長된 GaAs 에피택설 층의 表面을 reflection high energy electron diffraction(RHEED), Auger electron spectroscopy(AES), secondary ion mass spectrometry(SIMS) 및 scanning electron microscope(SEM) 등으로 조사하였다.

II. 實 驗

1. GaAs 에피택설 층의 成長

本 實驗에서 사용한 基板은 Sumitomo Electric Co.의 Cr doped GaAs(100)이었으며 이것을 화학적 에칭한 후 In을 녹여 물리브덴 기관 홀더에 附着시키고 成長室에 裝入한다. 그후 sorption 펌프, 이온펌프 및 Ti 승화 펌프 등을 사용하여 $\sim 10^{-10}$ torr 정도의 眞空度가 유지되면 분출 cell과 이온 펌프 주위의 액체 질소 shroud에 액체 질소를 흘려 주어서 $\sim 10^{-11}$ torr 정도의 超高眞空을 만들었다. 蒸着코자 하는 蒸發源은 不純物이 混入되어 있을 우려가 있으므로 분출 cell의 셔터를 닫은 채로 成長에 이용하는 溫度(Ga: 980°C, As: 235°C)보다 약간 높은 溫度로 하여 pre-baking하여 不純物을 제거하고 각 蒸發源의 分子線強度를 Q. M. A. 또는 이온 게이지를 이용하여 정한다.

한편 基板의 prebaking이 끝나면 基板을 다시 成長溫度로 낮추고 Ga 셔터를 열어주면 이때 부터 GaAs 에피택설 층이 成長된다. 이때 As과 Ga 分子線の 強度比 As/Ga를 20으로 하였으며 Ga 셔터만 닫으면 成長이 끝나게 된다. 成長中과 成長後에 成長膜의 結晶性을 RHEED로 확인하고 基板의 溫度를 常溫까지

낮춘 후 As 셔터를 닫으면 成長實驗은 모두 끝난다. 그후 in situ에서 AES와 SIMS 등으로 成長膜의 化學組成과 成長膜 內的 微量의 不純物을 측정한다. 이상의 成長過程을 도표로 나타낸 것이 그림 1이다.

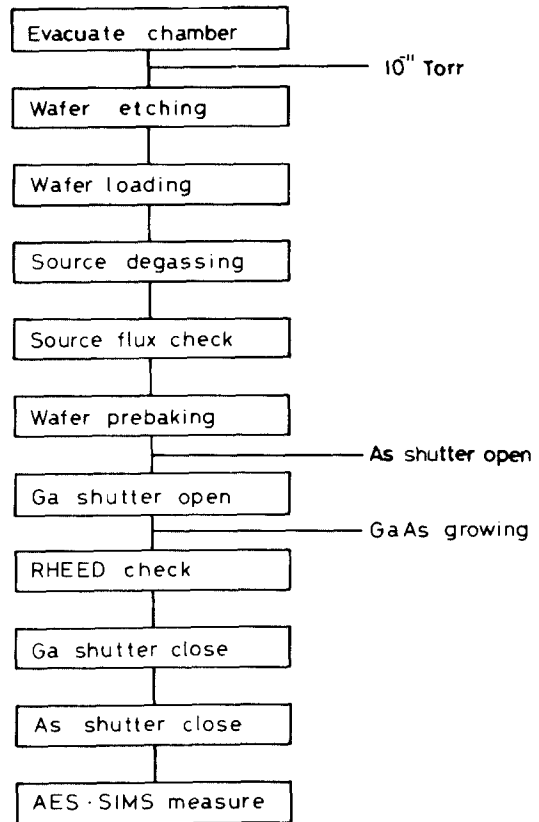


그림 1. MBE 成長의 순서도
Fig. 1. Flow chart of MBE growth procedure.

2. RHEED 測定

에피택설 층 成長前 基板表面의 不純物 汚染狀態와 열처리에 의한 基板表面의 reconstruction의 확인뿐만 아니라 成長中과 成長後 成長膜의 結晶性 등을 RHEED로 測定할 수 있다.^[7,8,9]

RHEED 測定은 그림 2에서 보는 바와 같이 40keV의 電子 빔을 試料에 1~3° 정도의 작은 角度로 入射시켜 電子의 波動性에 의하여 結晶格子에서 廻折된 電子線을 反射則의 螢光面上에 투영하여 表面의 結晶性등을 調査하는 것이다.

3. AES測定

AES는 成長前 基板表面의 汚染狀態 관찰과 成長膜의 化學組成 分析을 할 수 있는 장치이며^[10,11] 그림 3

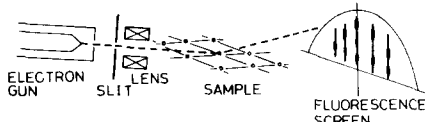


그림 2. RHEED의 概念圖
Fig. 2. Schematic diagram of RHEED.

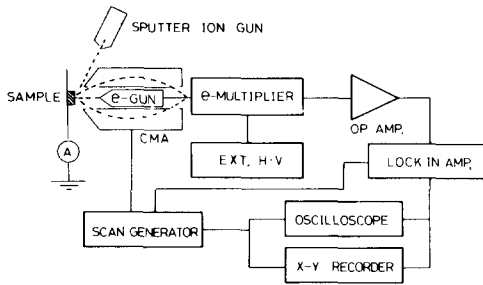


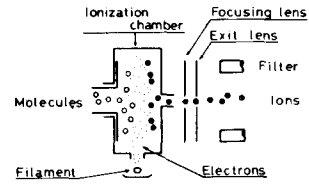
그림 3. AES 시스템의 構成圖
Fig. 3. Block diagram of AES system.

과 같다.

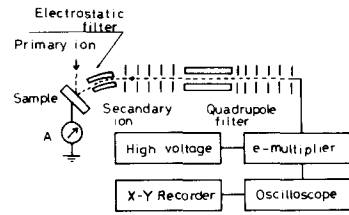
電子銃으로부터 나온 3keV의 입사 전자를 試料表面에 入射시키면 試料表面으로부터 Auger 電子가 發生하고 이 Auger 電子는 cylindrical mirror analyzer(CMA)에 걸린 電壓에 의하여 CMA 뒷편의 한점에 모여 이것이 전자 증배관에 入射하게 된다. 전자 증배관에 의해 증폭된 신호는 다시 lock-in amplifier로 증폭하여 오실로스코프 및 X-Y기록계에 X軸을 에너지, Y軸을 dN/dE로 그릴 수 있게 되어있다.

4. SIMS測定

SIMS는 成長된 에피택셀 층 중에 포함되는 微量의 不純物 分析을 할 수 있는 裝置로서^[13] 그림 4에서 보는 바와 같이 1차 이온을 發生시키는 이온 源 [그림4(a)]과 이 primary 이온이 試料에 충돌하여 生成되는 2차 이온을 分析하는 quadrupole mass analyzer(QMA) [그림4(b)]의 두 部分으로 나누어져 있다. 이온 源은 그림4(a)와 같이 中性分子(Ar)들이 ionization chamber 속에 들어가면 필라멘트에서 나온 電子들이 中性分子들을 이온화 시키고 이온화 된 分子들은 加速段을 통과하여 試料에 入射하게 된다. 이들 加速된 分子들이 試料에 충돌하게 되면 試料에서 2차 이온이 生成되고 이들 2차 이온들은 그림4(b)의 四重極 필터를 통과하며 이때 四重極 필터에 걸려준 AC와 DC 電壓에 의해 質量的 크기에 따라서 나누어져 전자 증배관에 도착하게 된다. 전자 증배관에 의해 증폭된 신호는 오실로스코프 및 X-Y 기록계



(a)



(b)

그림 4. SIMS 裝置의 概略圖
(a) Ar⁺ 이온源 (b) QMA
Fig. 4. Schematic diagram of SIMS *system.
(a) Ar⁺ ion source (b) QMA.

에 X軸을 m/e로, Y軸을 상대적 強度로 그리게 되어 있다.

5. 成長膜의 두께 測定

에피택셀 층의 成長率을 決定하기 위하여 成長된 薄膜의 두께를 分解能이 10Å인 Taylor Hobson Co.의 薄膜 測定 시스템 (stylus method)과 5461Å의 單色 光源을 사용한 Gaetner Co.의 마이크로 간섭계 (model 307)를 써서 ±10Å의 오차 범위에서 측정하였다.

III. 實驗結果 및 考察

에피택셀 층의 成長時 成長室內의 잔류가스로 부터 不純物의 出入을 막으려면 基板 바로 위의 分子線壓力이 10⁻⁴ torr로 가정하여 K因자가 10⁻⁶ torr이어야 하고^[14] 따라서 이 條件을 만족하기 위하여는 성장실 內的 壓力은 ~10⁻¹⁰ torr 정도가 되어야 한다.

그림 5는 4×10⁻¹⁰ torr일 때 成長室內의 잔류가스 스펙트럼 이다. 각 잔류가스의 強度를 相對的인 比로 나타내었으며 에피택셀 층 成長前에 이온 펌프주위와 분출 셀 주위에 있는 액체질소 shroud에 액체질소를 흘려주면 H₂O와 CO 등은 급격한 감소를 나타낸다.

Ga의 基板에 대한 附着係數는 1이지만 As의 GaAs 基板에 대한 附着係數는 0이다. 그러나 GaAs 基板表面에 먼저 Ga이 날라와 덮혀있다면(Ga 安定化面) As의 附着係數는 0이 아닌 임의의 값을 가진다.^[15] 그러므로 GaAs 에피택셀 층의 成長率은 Ga 分子의 線束에만 의존한다는 것을 알 수 있다. 이에 本實驗에서

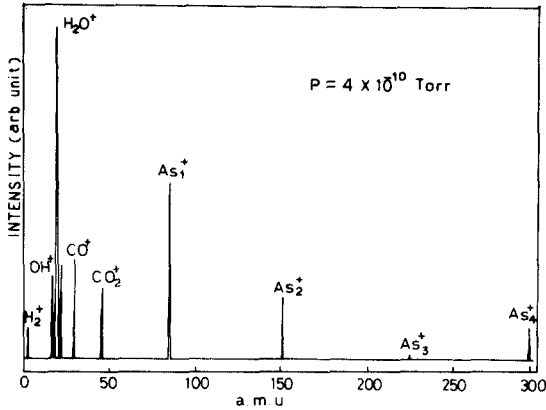


그림 5. 6×10^{-10} torr 일때 成長室內의 잔류가스 스펙트럼

Fig. 5. Residual gas spectra in growing chamber at 6×10^{-10} torr.

는 $F = 1.11 \times 10^{22} \pi r^2 / L^2 \cdot P(T) / \sqrt{MT}$ 의 식^[16]으로 부터 Ga 源의 溫度 T를 변화 시킬 때 Ga 分子의 線束 변화를 調査해 보았으며 그 結果가 그림 6 과 같다.

이때 F는 分子線束, r은 도가니 반지름, L은 분출 셀과 基板 사이의 거리, M은 分子量, P(T)는 분출 셀의 溫度가 T일 때의 蒸氣壓 이다.

한편 As을 분출 셀에 넣고 加熱하면 As₄가 生成되며 基板에 도달한 As₄는 基板溫度에 따라 附着係數가 달라지고 (基板表面에 Ga이 存在할 경우) 최대 0.5 까지 증가하게 된다.^[17] 그러나 실제의 GaAs 에피택셜

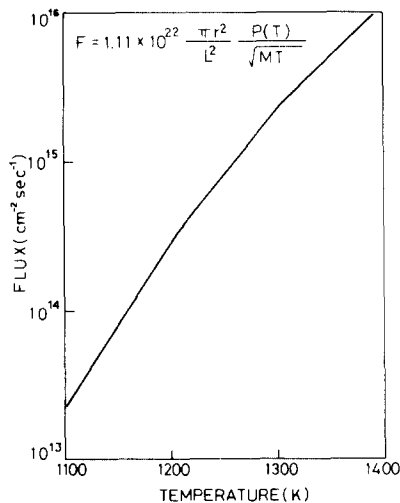


그림 6. Ga cell 溫度에 따른 線束의 變化
Fig. 6. The flux vs Ga cell temperature.

층 成長溫度 (775~875K)를 감안할 때 As₄의 附着係數는 0.05~0.1 정도로 극히 적으므로,^[17] stoichiometry 한 GaAs 에피택셜 층을 成長 시키기 위해서는 As과 Ga 分子線束의 比 As/Ga을 약 20으로 하여야 한다. Ga과 As의 比 r은^[18]

$$r = \frac{{}^{69}\text{Ga}^+ + {}^{71}\text{Ga}^+}{\text{As}^+ + 2\text{As}_2^+ + 3\text{As}_3^+ + 4\text{As}_4^+}$$

의 관계식으로 부터 구할 수 있고 r이 1/20이 될 때의 Ga과 As에 대한 RGA 스펙트럼은 그림 7에서 보는 바와 같다.

GaAs에피택셜 층 成長을 위해 基板을 화학적 에칭을 하고 成長室內에 As 분위기하 (As 압력: 1.8×10^{-6} torr)에서 成長溫度 (590°C)보다 높은 溫度 (600°C)로 preheating을 하면 基板表面에 오염되어 있던 산소가 제거되고 表面이 reconstruction된다. 이와같은 現象은 RHEED 패턴으로 확인 할 수 있으며 사진 1과 같이 spotty 패턴이 나타난다. Ga 셔터를 열면 GaAs에피택셜 층이 成長되기 시작하고 成長時間이 약 2分 경과 후 RHEED 패턴은 사진 2와 같이 변화한다. 그러나 成長時間이 약 10分쯤 경과하면 RHEED 패턴은

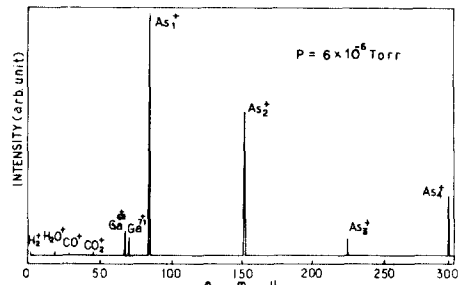


그림 7. Ga/As이 1/20일때의 RGA 스펙트럼
Fig. 7. RGA spectra at Ga/As = 1/20.

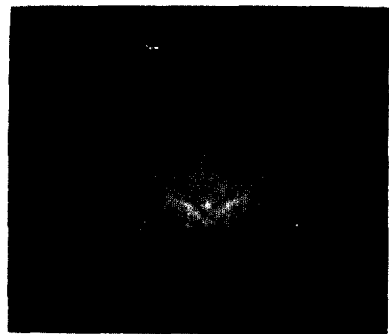
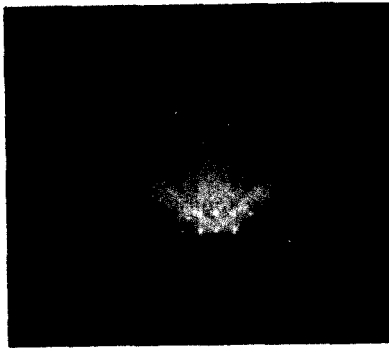
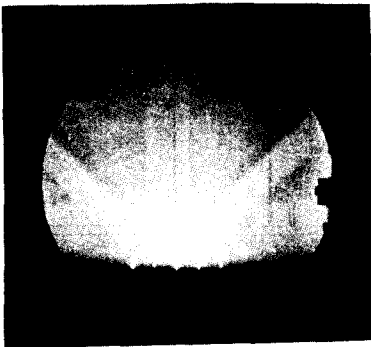


사진 1. Prebaking 後의 GaAs 基板의 RHEED 패턴
Photo 1. RHEED pattern of GaAs substrate after prebaking.

그림 3에서와 같은 streak 패턴으로 변화한다. 이것으로 보아 成長前 基板에 다소 凹凸이 있어도 (사진1) 에피택셜 층은 매끈한 平面으로 成長된다는(사진3) 것을 보여주며 이것은 GaAs 基板에 GaAs 에피택셜 층 成長이 Frank Van der Merwe 型으로 이루어진다고 생각할 수 있다.⁽¹⁷⁾



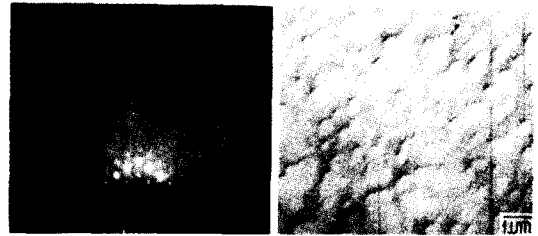
사 진 2. GaAs 에피택셜 층 成長 2分 後의 RHEED 패턴
 Photo 2. RHEED pattern of GaAs epitaxial layer after 2min growing.



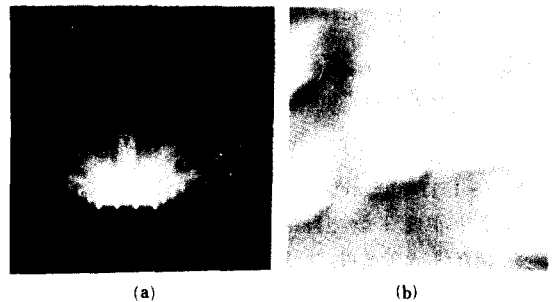
사 진 3. 成長 10分 後의 GaAs 에피택셜 층의 RHEED 패턴
 Photo 3. RHEED pattern of GaAs epi-taxial layer after 10min growing.

成長된 GaAs 에피택셜 층의 morphology는 基板의 溫度에도 밀접한 관계가 있고 基板溫度를 520℃, 540℃, 590℃로 하였을 때 1時間 成長된 GaAs 에피택셜 층의 RHEED 패턴과 SEM 사진이 사진4, 사진5, 사진6, 사진7이다. 이 結果에서 알 수 있는 바와 같이 基板의 溫度가 590℃ 이상 될 때에만 에피택셜 층의 morphology가 좋다는 것을 알 수 있다.

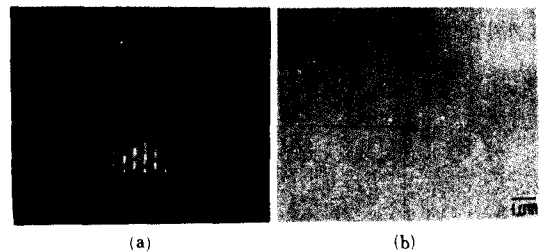
成長된 GaAs 에피택셜 층의 두께를 측정하기 위하여 탄탈륨으로 새도우 마스크를 씌운채 薄膜을 形成



(a) (b)
 사 진 4. 基板溫度가 520℃ 일때의 (a) RHEED 패턴 (b) SEM 사진
 Photo 4. (a) RHEED pattern and (b) SEM photo at substrate temperature of 520°C.



(a) (b)
 사 진 5. 基板溫度가 540℃ 일때 (a) RHEED 패턴과 (b) SEM 사진
 Photo 5. (a) RHEED pattern and (b) SEM photo at substrate temperature of 540°C.



(a) (b)
 사 진 6. 基板溫度가 560℃ 일때의 (a) RHEED 패턴과 (b) SEM 사진
 Photo 6. (a) RHEED pattern and (b) SEM photo at substrate temperature of 560°C.

하였다. 이것을 박막 측정 시스템으로 오차 범위 ± 10 Å 내에서 두께를 측정한 結果는 그림 8에서 보는 바와 같다. 스텝은 거의 수직으로 되어 있으며 두께가 3000 Å임을 확인할 수 있었다. 한편 Ga 셀의 溫度를 上昇시키면 單位時間當 成長되는 에피택셜 층의 두께가 증가하게 되므로 Ga 셀 溫度를 변화시켜 가며 1時間 동안씩 GaAs 에피택셜 층을 成長 시킨후 두께를 測定한 結果가 그림 9와 같다. 여기에서 알 수 있



사 진 7. 基板溫度가 590°C 일때의 (a) RHEED 패턴과 (b) SEM 사진

Photo 7. (a) RHEED pattern and (b) SEM photo at substrate temperature of 590°C.

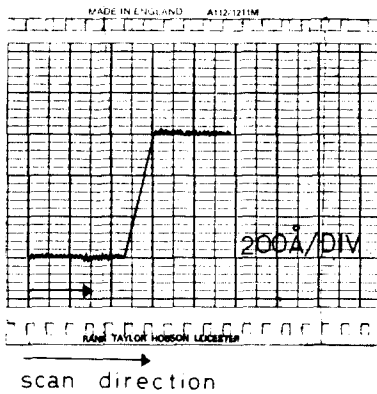


그림 8. 에피층 두께 측정의 결과
Fig. 8. Result of epi layer thickness measurement.

는 바와 같이 Ga 셀 온도에 따라 성장률은 일정하게 증가하는 것을 볼 수 있었다. 한편 Ga 셀 온도를 980°C로 일정하게 유지하고 기판의 온도를 590°C로 하여 성장 시켜가며 이때 성장되는 에피택셜 층의 두께를 측정한 결과는 그림 10과 같고 역시 성장시간과 성장된薄膜의 두께가 선형의이라는 것을 알 수 있었다. 기판을 화학적 에칭하여 성장실로 이송한 후 GaAs 기판表面을 AES로 측정하면 일반적으로 탄소와 산소로 오염되어 있는 것을 확인할 수 있다.¹⁹⁾

이 기판을 As 분위기하에서 480°C로 열처리하면 그림 11의 (a)에서 보는 바와같이 산소는 완전히 제거되지만 탄소는 그대로 남아 있게 된다. 탄소를 제거하기 위하여는 1keV의 Ar⁺으로 스퍼터링하면 되지만²⁰⁾ 이때 Ar⁺ 스퍼터링으로 인하여 표면이 손상을 받게 되므로 기판을 As 분위기하에서 480°C로 열처리하여 그위에 에피택셜 층을 그냥 성장시켜 주는 것이 보통이다.²⁰⁾ GaAs 에피택셜 층을 3000Å 정도 성장시킨 후 Auger 전자 스펙트럼을 측정한 것이 그림 11(b)

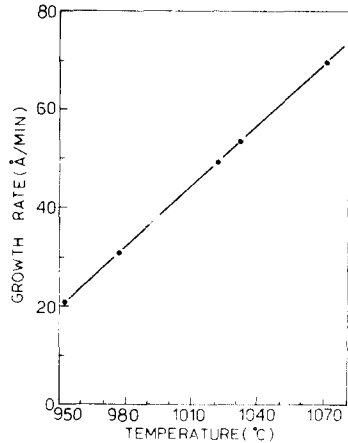


그림 9. Ga cell 온도에 따른 성장률 변화
Fig. 9. Growth rate vs Ga cell temperature.

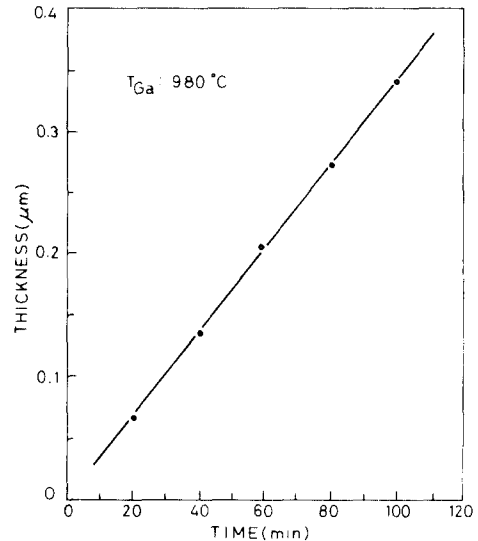


그림 10. 성장시간에 따른 에피층의 두께 변화 (기판 온도 = 590°C)
Fig. 10. Epi layer thickness vs growth time (T sub. = 590°C).

이다. 여기서 볼 수 있는 바와 같이 탄소가 없어진 것으로 보아 GaAs 에피택셜 층이 성장되었고 3eV에서 M₃N₂N₂ 천이, 1010~1250eV에서 LMM 천이의 As 이 검출 되었고, 53eV에서 M₂M₁M₁ 천이와 56eV에서 M₃M₁M₁ 천이 및 61eV에서 M₂M₁M₁ 천이 그리고 850eV~1100eV에서 LMM 천이의 Ga 피-크들이 보임을 알 수 있고 이것은 Uebbing 등의 결과와¹⁹⁾ 잘 일치하고 있다. Uebbing에 의하면 S와 Cl 피-크등이 함께 관측된다고 하였으나 본 실험에서는 볼 수 없었다.

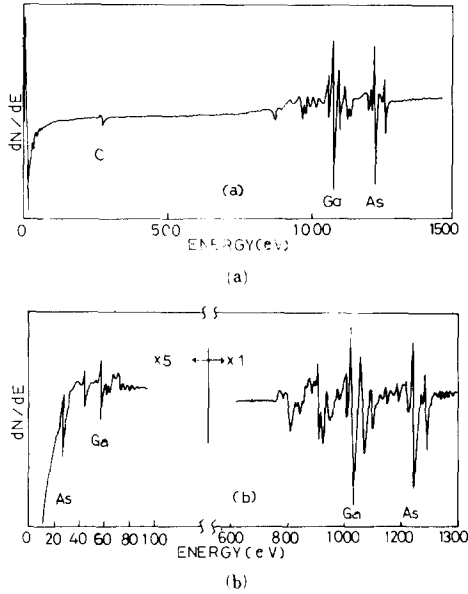


그림 11. GaAs 表面의 Auger 電子 分光
 (a) epi layer 成長前 (b) epi layer 成長後
 Fig. 11. Auger electron spectra of GaAs surface.
 (a) prior to epi layer growth.
 (b) after epi layer growth.

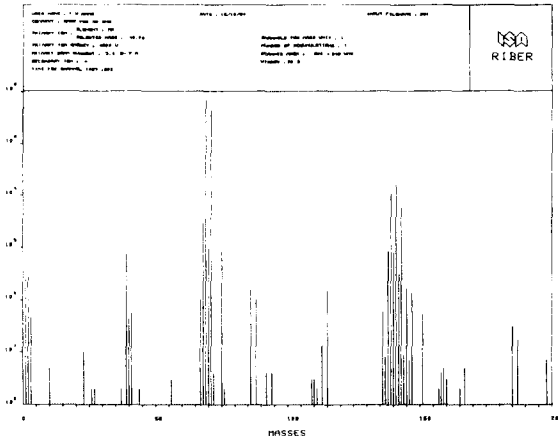


그림 12. GaAs 에피택셀 층의 SIMS 스펙트럼
 Fig. 12. SIMS spectra of GaAs epitaxial layer.

성장된 GaAs 에피층의 表面에 入射 이온을 4.5keV 의 Ar^+ 으로 하여 SIMS 를 관측한 結果를 그림 12 에 나타내었다. $^{40}Ar^+$, $^{69}Ga^+$, $^{71}Ga^+$, $^{75}As^+$, $^{144}GaAs^+$, $^{146}GaAs^+$ 및 $^{150}As^+$ 등이 檢出됨을 알 수 있었다.

IV. 結 論

이상의 實驗結果를 간추려 다음과 같은 結論을 얻

었다.

1. GaAs 에피층 成長前에 基板이 凹凸이 있어도 成長後에는 表面이 平坦해지는 것으로 보아 GaAs 에피택셀 층의 成長이 Frank Van der Merwe 型임을 알 수 있었다.

2. 基板의 溫度에 따라 成長된 GaAs 의 morphology 가 달라지며 基板의 溫度가 590°C 이상일 때 좋은 morphology 를 얻을 수 있었다.

3. Ga 셀 溫度의 증가에 따라 GaAs 에피택셀 층의 成長率은 일정하게 증가하고 있었고 成長時間 증가에 따라 成長된 薄膜의 두께가 線型的으로 증가하고 있었다.

4. GaAs 에피택셀 층 成長後 AES 로 表面을 調査해 본 結果 34eV에서 $M_3N_{2.3}N_{2.3}$ 천이와 1010~1250eV에서 LMM 천이의 As 피크가 檢出되었고 53eV에서 $M_{2.3}M_4M_4$ 천이와 56eV에서 $M_3M_4M_4$ 천이 및 61eV에서 $M_2M_4M_4$ 천이 그리고 850eV~1100eV 에서 LMM 천이의 Ga 피크가 檢出된 것을 확인 하였다.

5. GaAs 에피택셀 층 成長後 SIMS 測定을 하여 $^{69}Ga^+$, $^{71}Ga^+$, $^{75}As^+$, $^{144}Ga^+$, $^{146}GaAs^+$ 및 $^{150}As^+$ 등이 檢出됨을 확인 하였다.

參 考 文 獻

[1] R.D. Dupuis and P.D. Dapkus, Room-Temperature Operation of $Ga_{1-x}Al_xAs/GaAs$ Double-Hetero Structure Lasers Grown by Metal Organic Chemical Vapor Deposition. Appl. Phys. Lett., 31, 466, 1977.
 [2] J.R. Arthur, Jr., Interaction of Ga and As_2 Molecular Beams With GaAs Surface. J. Appl. Phys., 39, 4032-4034, 1968.
 [3] J.E. Davey, T. Pankey, Epitaxial GaAs Films Deposited by Vacuum Evaporation. J. Appl. Phys., 39, 1941-1948, 1968.
 [4] K. Ploog, MBE of III-V compound, in Crystals pp. 85, Springer-Verlag, 1980.
 [5] B.P. Pamplin, Molecular Beam Epitaxy, Pergamon Press, 1980.
 [6] T. Murotani, T. Shimano, S. Mitsui, Growth Temperature Dependence in Molecular Beam Epitaxy of Gallium Arsenides. J. Cryst. Growth, 45, 302-308, 1978.
 [7] S. Gonda, Y. Matsushima, Y. Makita, S. Mukai, Characterization and Substrate-

- Temperature Dependence of Crystalline State of GaAs Grown by Molecular Beam Epitaxy.* Jpn. J. Appl. Phys., 14, 935-942, 1975.
- [8] L.L. Chang and R. Ludeke, *Epitaxial Growth*, J.W. Matthews, Acad. Press, PART A. p. 37, 1975.
- [9] S. Gonda, Y. Matsushima, *Effect of Substrate Temperature on Composition Ratio x in Molecular Beam Epitaxial GaAs $(1-x)P(x)$* . J. Appl. Phys., 47, 4198-4200, 1976.
- [10] A.Y. Cho, M.B. Panish, *Magnesium-Doped GaAs and $Al_xGa_{1-x}As$ by Molecular Beam Epitaxy*. J. Appl. Phys., 43, 5118-5123, 1972.
- [11] R. Ludeke, L. Esaki, *Electron Energy-Loss Spectroscopy of GaAs and Ge Surfaces*. Phys. Rev. Lett., 33, 653-656, 1974.
- [12] J.B. Clegg, C.T. Foxon, G. Weimann, *Secondary Ion Mass Spectrometry Study of Lightly Doped p-type GaAs Films Grown by Molecular Beam Epitaxy*. J. Appl. Phys., 53, 4518-4520, 1982.
- [13] Charles W. Magee and William L. Harrington, *Secondary Ion Quadrupole Mass Spectrometer for Depth Profiling-Design and Performance Evaluation*. Rev. Sci. Instrum., 49, 477, 1978.
- [14] Y. Matsushima, S. Gonda, *Molecular Beam Epitaxy of GaP and GaAs $(1-x)P(x)$* . Jpn. J. Appl. Phys., 15, 2093-2101, 1976.
- [15] G.M. Metzger, H.M. Levy, D.W. Woodard, E.C. Wood, L.F. Eastmon, *GaAs Integrated Circuits by Selected-Area Molecular Beam Epitaxy*. Appl. Phys. Lett., 37, 628-630, 1980.
- [16] A.Y. Cho, *Growth of III-V Semiconductors by Molecular Beam Epitaxy and Their Properties*. Thin Solid Films, 100, 291-317, 1983.
- [17] A.Y. Cho, *Film deposition by Molecular Beam Techniques*. J. Vac. Sci. Technol., 8, S31-S38, 1971.
- [18] N. Matsumoto, K. Kumabe, *Amorphous GaAs Films by Molecular Beam Deposition*. Jpn. J. Appl. Phys., 19, 1583-1590, 1978.
- [19] J.J. Uebbing, *Use of Auger Electron Spectroscopy in Determining the Effect of Carbon and Other Surface Contaminants on GaAs-Cs-O photocathode*. J. Appl. Phys., 41, 802, 1970.
- [20] A.Y. Cho, *Impurity Profiles of GaAs Epitaxial Layers doped with Sn, Si and Ge Grown with Molecular Beam Epitaxy*. J. Appl. Phys., 46, 1733-1735, 1975.
-