

## PAE법에 의한 GaAs/Ge/Si 異種接合 成長과 그 特性

## (GaAs/Ge/Si Heteroepitaxy by PAE and Its Characteristics)

金聖洙\*, 朴相俊\*, 李聖弼\*\*, 李德東\*, 崔時永\*

(Sung Soo Kim, Sang Jun Park, Sung Pil Lee, Duk Dong Lee, and Sie Young Choi)

## 要 約

수소 플라즈마를 이용하여 GaAs/Si구조와 Ge완충층을 가지는 GaAs/Ge/Si 구조를 제조하고, 그 특성을 조사하였다. Ge 완충층때문에 GaAs/Ge/Si구조가 GaAs/Si구조 보다 결정질이 우수함을 PL, Nomarski사진, 그리고  $\alpha$ -step 등으로 확인하였다. 성장된 GaAs의 화학양론적 여부는 AES depth profile로 조사하였다. 화학양론적으로 성장될때 Ga와 As의 boat온도는 각각 1010°C, 380°C였다. 플라즈마에 의한 자연산화막(SiO<sub>2</sub>)의 제거 여부도 AES분석으로 확인하였다. GaAs/Ge/Si구조에서 Ge 완충층의 두께 1 $\mu$ m, GaAs성장율 160 Å/min 일때 상온PL의 peak파장은 8700 Å이고 FWHM은 12 Å 나타났다.

## Abstract

Hydrogen plasma-assisted epitaxial(PAE) growth of GaAs/Si and GaAs/Ge/Si with Ge buffer layer has been investigated. By means of photoluminescence, Nomarski microscopy, and  $\alpha$ -step, it could be known that GaAs on Si with Ge buffer layer has better crystalline quality than GaAs on Si without Ge buffer layer. The stoichiometry of GaAs layer on Si was confirmed by the depth profile of Auger electron spectroscopy (AES). Also the native oxide (SiO<sub>2</sub>) layer on Si substrate was plasma-etched and the removal of the oxide layer was confirmed by AES. Photoluminescence peak wavelength of GaAs/Ge/Si with Ge buffer of 1 $\mu$ m thickness and GaAs growth rate of 160 Å/min was 8700 Å and FWHM was 12 Å

## I. 서 론

Si 기판위에 GaAs를 성장시키면 Si의 대구경 기판, 높은 기계적강도, 높은 열전도도, 저렴한 가격,

그리고 잘 발달된 공정기술을 이용할 수 있다. 또한 GaAs의 높은 전자 이동도, 광소자에의 응용, 초고주파소자에의 응용, 그리고 높은 에너지 밴드 갭 등의 특성을 Si의 특성과 결합할 수 있기 때문에 많이 연구되고 있다.<sup>1-5)</sup>

그러나 Si 기판위에 GaAs를 성장시키면 두물질간의 약 4%의 격자상수 차이에 의한 결정결함,<sup>6)</sup> 무극성 Si반도체위에 극성 반도체 GaAs를 성장시키므로 생기는 APD(anti-phase domain),<sup>11)</sup> 두물질 사이에 2.6배의 열팽창 계수 차에 의한 휨 및 균열,<sup>7)</sup> 그리고 Si 기판 표면 위에 생기는 자연 산화막(SiO<sub>2</sub>)<sup>8)</sup> 등의 문제점이 발생한다.

Si 기판위에 GaAs를 성장시키는 방법에는 MBE

\* 正會員, 慶北大學校 電子工學科  
(Dept. of Elec. Eng., Kyungpook Nat'l Univ.)

\*\* 正會員, 慶南大學校 電子工學科  
(Dept. of Elec. Eng., Kyungnam Univ.)

接受日字: 1991년 2월 20일

(※ 본 研究는 1989年度 韓國學術振興財團 支援 研究費로 수행한 것임.)

(molecular beam epitaxy),<sup>11,2,9)</sup> MOCVD (metalorganic chemical vapor deposition),<sup>13,6,10)</sup> LCVD (laser chemical deposition) 그리고 PAE (plasma-assisted epitaxy)<sup>15,11)</sup> 등이 있다. 이 중에서 PAE 는 일반적 진공증착장치에 플라즈마를 이용하여 결정을 성장시키는 방법이다. 박막형성시 플라즈마를 이용하면 박막의 表面層에서 원자이동을 활성화시켜 보다 낮은 온도에서도 결정성장이 가능하게 되면<sup>15,8)</sup> 또한 GaAs/Si 이종접합 성장시 문제가 되는 자연산화막을 in-situ로 제거할 수 있다는 장점이 있다.<sup>11,12)</sup>

PAE는 1974년 Muruyama 등<sup>11,13)</sup>에 의해 고안되었으며 1983년 Matsushita 등<sup>15)</sup>에 의해 Si 기판위에 GaAs, InP 등의 화합물반도체를 성장시키는데 이용되었다. 특히 이 방법은 화합물결정이 形成될때 플라즈마에 의해 반응이 촉진되고 고농도의 도핑 (doping)이 가능하므로 저항성 접촉을 만드는데도 이용될 수 있다.<sup>17)</sup>

본 연구에서는 격자부정합문제 해결을 위해 GaAs 와 거의 같은 격자 상수를 가지는 Ge을 완충층으로 하였으며, 열팽창 계수차이를 극복하기 위해 저온으로 공정하였다. 또한 APD문제점은 GaAs결정 성장前 As prelayer의 형성으로 해결을 시도하였다.

먼저 고순도 수소 (H<sub>2</sub>) 플라즈마 분위기에서 p형 Si (100) 위에 GaAs를 성장하여 그 물리적특성을 조사하였으며, 또한 완충층 (buffer layer) 물질로서 Ge을 증착시켜 GaAs결정성장에 미치는 영향을 조사하였다. 이때 기판온도는 450°C로 고정하였다.<sup>11,14)</sup> Ga과 As source 각각의 온도가 GaAs결정성장에 미치는 영향 즉, GaAs결정이 化學量論的 (stoichiometry) 으로 성장되었는가를 AES (auger electron spectroscopy) depth profile로 알아 보았다. 제조조건에 따른 GaAs결정의 상태를 PL (photoluminescence)로, 표면 상태를 SEM (scanning electron microscopy), Nomarski 사진 및 α-step으로 조사하였다.

II. 실험 및 측정

그림 1은 직접 제작된 PAE장비의 概略圖를 나타낸 것이다. 플라즈마를 발생시키기 위한 고주파전력 발생기의 주파수는 13.56 MHz이고, 부하는 誘導형으로 설계하였다.<sup>8)</sup>

1. GaAs/Si 이종접합

p형 Si(100) 웨이퍼를 표준공정에 따라 洗滌하였다. 洗滌된 기판을 히터에 장착하여 이를 반응실에 넣고 1.5×10<sup>-5</sup> Torr이하로 배기한 다음 반응실 내부의 청결을 위하여 6N의 고순도 수소기체를 200m

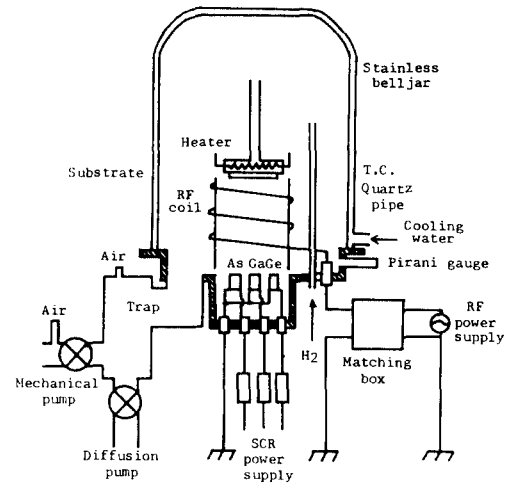


그림 1. PAE장비 개략도  
Fig. 1. Schematic diagram of PAE apparatus.

Torr이상 주입시켜 5분간 유지하였다. 다시 반응실 압력을 1.5×10<sup>-5</sup>Torr이하로 배기하고 기판온도를 450°C까지 올린 다음 수소기체를 주입하여 반응실 내부의 압력을 50mTorr 되게 하였다. 50mTorr의 수소분위기압을 유지하면서 고주파전력 발생기로 플라즈마를 형성시켜 기판표면에 있는 자연산화막을 식각하였다. 반응실압력 및 고주파 전력을 원하는 조건으로 조정할 후, APD를 없애기 위해 먼저 As source만을 가열하여 As prelayer를 형성시킨후, Ga source를 가열하여 60분간 증착하였다. 증착후 처음 10분간은 플라즈마 상태에서 As source를 계속 가열하여 As분위기를 만들어 주었다. 그리고 진공중에서 기판을 자연 냉각하였다.

사용된 Ga 및 As소오스 가열용 boat는 각각 BN (boron nitride) boat와 텅스텐 boat였으며 이때 온도는 Minolta社 IR-630 optical thermometer 및 CA 열전대로 측정하였다. 표 1은 PAE로 만든 Ge 및 GaAs 막의 제조조건을 나타낸 것이다.

2. GaAs/Ge/Si 이종접합

p형 Si(100) 기판의 준비과정은 GaAs/Si 이종접합 성장때와 같으나 플라즈마식각시 고주파전력 및 시간을 각각 70W 및 60분으로 고정하였다. 그 다음 반응실 수소분위기압을 10mTorr 그리고 고주파전력을 10W로 유지시키면서 텅스텐 boat로 Ge source를 가열하여 60분간 증착시켰다. 증착된 Ge막의 두께측정을 위하여 shutter로 기판의 일부를 가린 후, Ga 및 As source를 가열하여 60분간 증착하였다.

표 1. PAE로 만든 Ge 및 GaAs막의 제조조건  
Table 1. Ge and GaAs growth conditions of PAE.

H <sub>2</sub> pressure		10~30 mTorr
RF power		10~30W
Substrate temperature		450°C
Source temperature	Ge	1140~1200°C
	Ga	960~1020°C
	As	350~410°C
Growth rate	Ge	40~200 Å/min
	GaAs	20~250 Å/min

3. 측 정

이종접합성장된 Ge 및 GaAs막의 두께는 TENCOR  $\alpha$ -step 100으로 측정하였으며, 막의 성장율은 두께를 성장시간으로 나눈 평균값이다. 성장율 및 고주파전력의 변화에 따른 GaAs/Si막의 표면상태를  $\alpha$ -step 및 Nomarski 사진으로 조사하였다. 또한 Ge완충층을 이용한 Si 기판위에 성장된 GaAs결정의 표면을 Akashi DS-130C SEM 및 Nomarski 현미경으로 관찰하였다. GaAs막이 化學量論的으로 성장되었는가를 AES depth profile로서 알아보았으며, 성장조건에 따른 GaAs결정의 상태를 PL로 조사하였다.

III. 결과 및 고찰

그림 2는 As source 온도를 390°C로 고정하고 Ga source 온도를 980~1010°C로 각각 10°C씩 변화시키면서 증착시켰을때 GaAs의 성장율을 나타낸 것이다. 그림 3은 Ga source 온도를 1000°C로 고정하고 As source 온도를 375~420°C로 각각 15°C씩 변화시키면서 증착시켰을때의 성장율을 나타낸 것이다. 두 그림에서 Ga의 온도가 증가함에 따라 성장율은 선형적으로 증가하였으나 As 온도의 증가에 따른 그것의 변화는 거의 없음을 알 수 있다. 즉, GaAs 결정이 성장될때의 성장율은 주로 Ga의 온도에 의존하며 As의 온도증가에는 거의 영향이 없음을 알 수 있었다. 기판온도가 450°C인 반면 As의 source 온도는 450°C 이하 이므로 As만의 증착은 기판에서의 재증발(reevaporation)때문에 불가능하다. 그래서 화학양론적 GaAs막을 얻기위해서는 분위기가 As과잉 상태를 유지하여야 한다.

그림 4는 異種接合成長된 GaAs/Si의 AES depth profile을 나타낸 것이다. 시편은 각각 고주파전력 40W, 수소 窒圈氣壓 50mTorr에서 (a)는 5분, (b)는 30분간 플라즈마 식각을 행한 경우이다. 시간이 증가

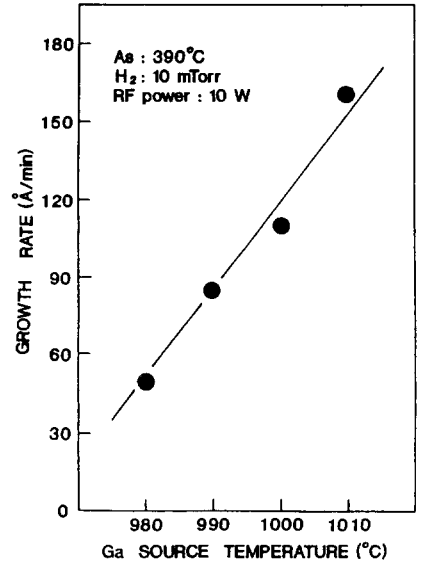


그림 2. Ga source 온도에 대한 GaAs 막의 성장율  
Fig. 2. GaAs growth rates for Ga source temperatures.

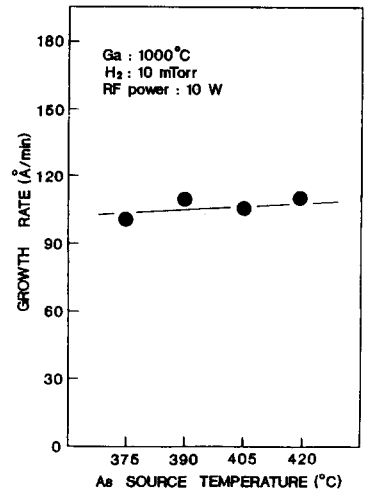
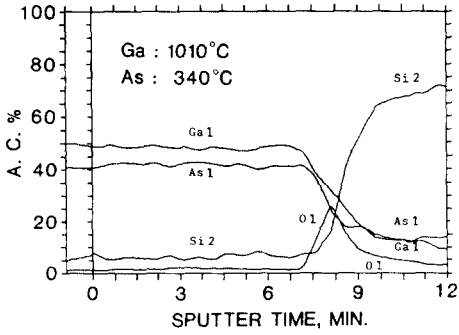
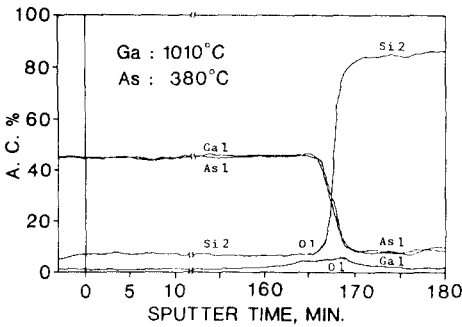


그림 3. As source 온도에 대한 GaAs 막의 성장율  
Fig. 3. GaAs growth rates for As source temperatures.

함에 따라 계면에서의 자연산화막이 더 많이 식각됨을 알 수 있다. 또한 그림 4(a)는 Ga과 As 소오스를 각각 1010°C와 340°C, (b)는 1010°C와 380°C로 성장하였을 경우이다. (a)의 경우, Ga 원자들이 As 보다 약 10%가 많이 존재하지만 (b)에서는 거의 化學量論



(a)



(b)

그림 4. AES depth profiles: 고주파전력 40W, 수소 분위기압 50mTorr에서 (a) 5분 (b) 30분간 플라즈마 식각한 경우

Fig. 4. AES depth profiles: RF power 40W, H<sub>2</sub> partial pressure. 50m torr for (a) 5 min, (b) 30min plasma etching.

의므로 결합하고 있는것을 알 수 있다.

그림 5는 성장율과 고주파전력에 따라 異種接合成長된 GaAs膜의 표면상태를 同種接合成長 (homocpitaxy)된 GaAs의 그것과 비교하여 나타낸 것이다. 성장율이 증가할수록 이종접합성장된 GaAs막의 표면은 거칠게 나타났다(a-d). 같은 성장율에서 (e)는 30W, (b)는 10W로 고주파전력이 높을때가 낮을때보다 표면이 거칠며 (f)의 동종접합성장된 GaAs표면이 (c)의 이종접합성장된 것보다 좋게 나타났다.

그림 6은 실온에서 측정한 PL spectra이며 각 시편의 제조조건은 표 2에 나타내었다. 수소분위기압이 높을수록 파장이 낮은 곳에서 피크(peak)가 나타나며, 고주파전력이 강할수록 FWHM(full width half maximum)이 넓게 나타났다. 그리고 파장이 진성 GaAs의 에너지 갭에 해당하는 파장(8700 Å)보다 낮은

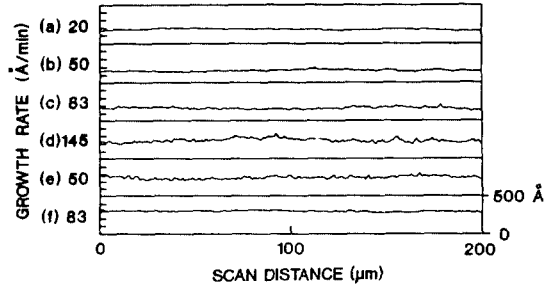


그림 5. 성장율, 고주파전력 및 기판의 종류에 따라 성장된 GaAs/Si의 표면상태

Fig. 5. GaAs/Si surface profiles as a function of growth rate, RF power and substrate.

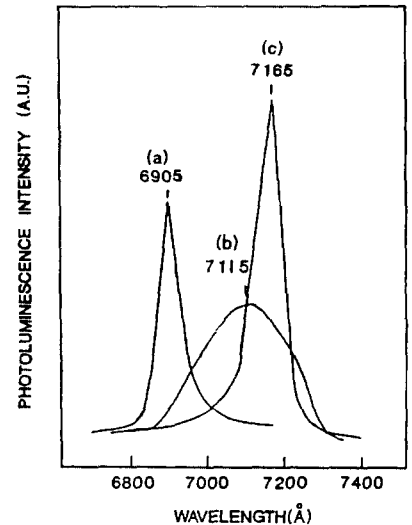


그림 6. 수소분위기압과 고주파전력 및 성장율에 따른 GaAs의 상온 PL spectra

Fig. 6. Room temperature photoluminescence spectra of GaAs/Si as a function of H<sub>2</sub> partial pressure, RF power and growth rate.

표 2. 그림 6의 GaAs 성장조건

Table 2. GaAs growth conditions of fig.6.

	Growth rate (Å/min)	RF power (W)	H <sub>2</sub> pressure (mTorr)
(a)	30	10	30
(b)	50	30	10
(c)	50	10	10

곳에서 피크가 나타나는것은 Si과 GaAs의 격자상수 부정합으로 인한 결함, 결정성장시 불순물(O<sub>2</sub>)의 영향 및 수소분위기압이 불안정했던 영향일 것으로 생각된다.

그림 7은 Ge 완충층을 이용하여 이중접합성장시킨 GaAs의 상온 PL spectra이다. 약 8700 Å의 파장에서 피크가 나타나며 FWHM값이 각각 12와 15 Å으로 아주 작은것으로 보아 우수한 GaAs결정이 성장되었으며, 이것은 Ge층이 격자상수 부정합으로 인한

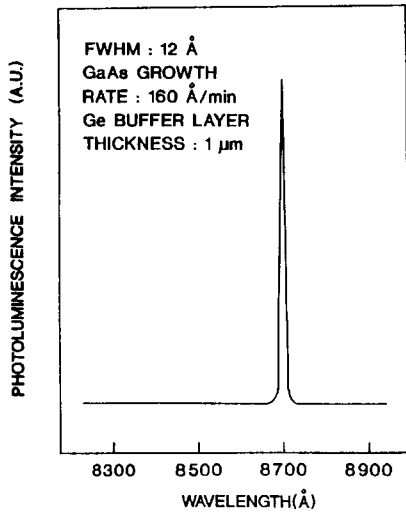
결합들을 많이 흡수한 결과라 생각된다. 또한 As prelayer의 영향으로 APD가 많이 감소되었다고 생각된다. 한편 Ge의 두께는 약 2000 Å 이상이면 완충층으로의 역할이 가능하며 GaAs의 성장율도 160 Å/min 이상까지 높일 수 있다고 생각된다.

그림 8은 그림 7(b)와 그림 6(b)의 Nomarski 사진을 나타낸 것이다. (a)는 표면의 평탄도와 결정성이 우수하다는 증거이며, 이는 그림 7(b)의 PL결과와 부합하는 결과이다. (b)는 Ga이 As과 결합되지 않고 표면에 금속으로 존재함을 알 수 있다.

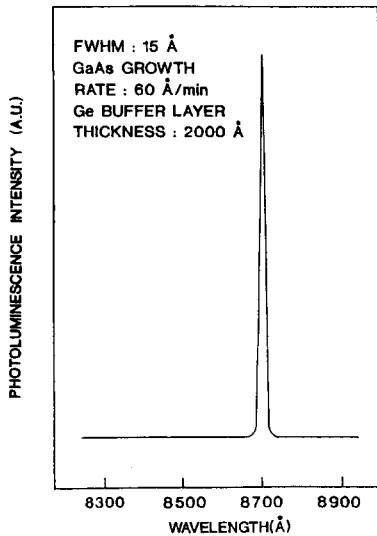
그림 9는 Ge완충층을 이용하여 이중접합 성장시킨 GaAs결정의 표면을 SEM으로 觀察한 것이다. 성장율이 높을때 表面결정 입자들이 더 커짐을 알 수 있었다.

#### IV. 결 론

PAE법으로 Si 기판위에 GaAs를 이중접합성장시켜 그 특성을 조사하였으며 Ge 완충층을 이용하여 성장한 경우와 비교하였다. GaAs결정의 성장율은

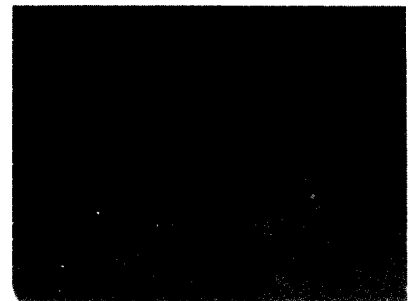


(a)

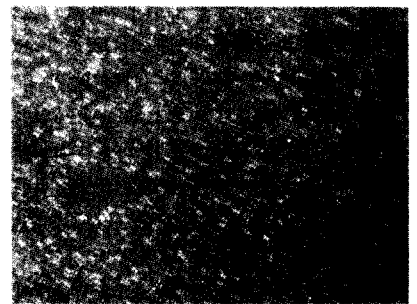


(b)

그림 7. GaAs/Ge/Si의 상온 PL spectra  
Fig. 7. Room temperature photoluminescence spectra of GaAs/Ge/Si.

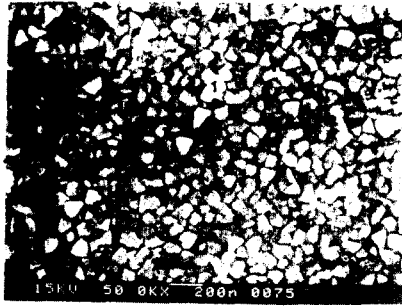


(a)

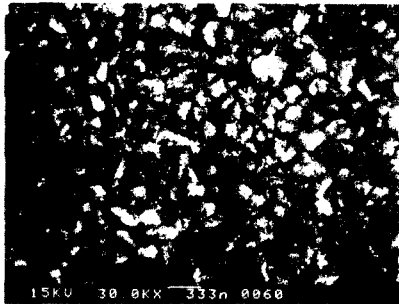


(b)

그림 8. 그림 7(b)와 6(b)시편의 Nomarski 표면 사진  
Fig. 8. Surface morphologies by Nomarski microscopy of fig. 7(b) and 6(b) sample.



(a)



(b)

그림 9. 성장율에 따른 GaAs/Ge/Si의 SEM 표면사진  
 (a) 60 Å/min, (b) 160 Å/min  
 Fig. 9. Scanning electron microscope of GaAs/  
 Ge/Si surface with growth rate.  
 (a) 60 Å/min, (b) 160 Å/min.

주로 Ga 소오스 온도에 의존하며 As의 온도증가에는 거의 영향이 없음을 알 수 있었다. Ga과 As원자가 化學量論的으로 結合하였는가를 AES depth profile로 확인하였으며, 그때의 source 온도는 Ga:1010°C, As:380°C이었다. 그리고 플라즈마에 의한 자연산화막의 식각을 확인할 수 있었다. 이중접합성장된 GaAs/Si결정의 표면상태를  $\alpha$ -step로 조사한 결과 고주파전력과 성장율이 낮을수록 평탄하게 나타났다. 또한 성장율에 따라 이중접합성장된 GaAs/Ge/Si의 표면상태를 SEM과 Nomarski 사진으로 확인하였다. 그리고 Ge완충층을 이용하여 성장한 경우가 그렇지 않은 경우보다 GaAs 결정이 훨씬 더 우수하다는 것을 상온 PL 측정을 통하여 확인할 수 있었다. PL신호의 peak 파장이 약 8700 Å, FWHM값은 Ge 완충층 두께 1 $\mu$ m, GaAs 성장율 160 Å/min일때 12 Å이고, Ge 완충층 두께 2000 Å, GaAs 성장율 60 Å/min 일때 15 Å이었다. 이것은 Ge 완충층이 Si과 GaAs 사이의 격자상수 부정합 완화시켜 주었고, As prelayer

형성으로 APD가 감소되었기 때문이라 생각된다. 한편 PAE법에서 완충층의 역할을 할 수 있는 Ge막의 두께는 2000 Å 이상이며, GaAs의 성장율을 160 Å/min 이상까지 높일 수 있다고 생각된다.

參 考 文 獻

- [1] B.Y. Tsaur and G.M. Metzger, "MBE of GaAs and AlGaAs on Si," *Appl. Phys. Lett.*, vol. 45, no. 5, pp. 535-538, 1984.
- [2] W.I. Wang, "Molecular beam epitaxial growth and material properties of GaAs and AlGaAs on Si," *Appl. Phys. Lett.*, vol. 44, no. 12, pp. 1149, 1984.
- [3] T. Soga, T. Imori, M. Dgawa, T. Jimbo and M. Umeno," MOCVD growth of GaAs on Si with strained layer superlattices," *Int. Symp. GaAs and Related Compounds* 1987.
- [4] K. Matsushita, T. Sato, Y. Sato, Y. Sugiyama, T. Hariu and Y. Shibata," Plasma-assisted epitaxial Growth of GaAs and GaSb layers in hydrogen plasma," *IEEE, ED.*, vol. ED-31, no. 8, pp. 1092-1096, 1984.
- [5] K. Matsushita, Y. Sugiyama, S. Igarashi, T. Hariu and Y. Shibata," Heavily Te-doped GaAs layers by plasma-assisted epitaxy," *Jpn. J. Appl. Phys.* vol. 22, no. 9, pp. L602-604, 1983.
- [6] N. Noto, S. Nozaki, T. Egawa, T. Soga, T. Jimbo and M. Umeno, "High quality GaAs-on-Si by MOCVD with ternary alloys, AlGaP and AlGaAs," *Int. Symp. GaAs related compounds*, Karuizawa, Japan, pp. 117-120, 1989.
- [7] J.S. Harris, Jr. S.M. Koch and S.J. Rosner, "The nucleation and growth of GaAs on Si," *Mater. Res. Soc. Symp. Proc.*, vol. 91, no. 3, 1987.
- [8] 박상준, 박명기, 최시영, "GaAs/Ge/Si구조를 위한 PAE법을 이용한 Si기판위에 Ge 결정성장," 전자공학회지, 제26권 11호, pp. 42-48, 1989.
- [9] P.N. Upal and H. Kroemer, "MBE growth of GaAs on Si(211)," *J. Appl. Phys.*, vol. 58, no. 6, pp. 15-21, 1985.
- [10] S. Sakai, T. Soga, M. Takeyasu and M. Umeno, "AlGaAs/GaAs DH laser on Si substrates grown using superlattice buffer layer by MOCVD," *Jpn. J. Appl. Phys.*, vol.

- 25, no. 8, pp. L666-668, 1985.
- [11] Edited by T. Sugano, *Application of plasma processes to VLSI Tech.*, A Wiley-Interscience Publication, New-York, pp. 279-285, 1985.
- [12] S.F. Fany, Q.Z. Gao, K. Matsushita and T. Hariu, "Low temperature surface cleaning of Si and successive plasma assisted epitaxial growth of compound," 電子通信學會技術研究報告 vol. 23, pp. SSD 86-51, 1985.
- [13] N. Nishida and F. Yokoyama, "Effect of RF power and bias voltage on formation of TiN film by RF ion plating," 金屬表面技術, vol. 38, no. 8, pp. 24, 1985.
- [14] J. Vilms and D. Kerps, "Simple stress formula for multilayered thin films on a thick substrate," *J. Appl. Phys.* vol. 53, pp. 1536, 1982.

---

 著 者 紹 介
 

---

## 金 聖 洙 (正會員)

1964年 5月 6日生. 1988年 8月 경북대학교 전자공학과 졸업. 1991年 경북대학교 대학원 전자공학과 졸업. 공학석사. 1991年 1月~ 현재 금성 일렉트론 근무. 주관심분야는 GaAs on Si 및 반도체 공정기술 등임.

## 李 聖 弼 (正會員) 第26卷 第11號 參照

현재 경남대학교 전자공학과 조교수

●

## 李 德 東 (正會員) 第26卷 第11號 參照

현재 경북대학교 전자공학과 교수

●

## 朴 相 俊 (正會員) 第26卷 第11號 參照

현재 경북대학교 전자공학과 박사과정

## 崔 時 永 (正會員) 第26卷 第11號 參照

현재 경북대학교 전자공학과 부교수