

In<sub>0.53</sub>Ga<sub>0.47</sub>As/In<sub>0.52</sub>Al<sub>0.48</sub>As/InP HEMT 구조 에피택셜 층; 성장 및 특성

노동완, 이해권, 이재진, 박형무, 김경수

한국전자통신연구소 반도체연구단

격자 정합 (Lattice-matched) 과 스트레인 (Strained, Pseudomorphic) InGaAs/InAlAs HEMT (High Electron Mobility Transistor) 구조 에피택셜 층은 InAlAs/InGaAs의 큰  $\Delta E_c$  에 기인한 높은  $n_s$  값, GaAs에 비해 작은 전자유효질량과 큰  $\Gamma$ -L valley 분리에 기인한 높은 peak velocity, 고전자이동도, InAlAs 층의 적은 trapping 과 DX 관련 문제등 우수한 재료 자체의 특성때문에 고주파, 저잡음 응용분야에서 기대되는 소자이다.

본 논문에서는 변조 도핑과 델타 도핑으로 격자정합 고전자이동도 트랜지스터 구조를 분자선 에피택셜 성장방법으로 성장하고, 에피택셜 기판 성장에 대한 성장 조건, 성장된 에피택셜 층의 전기적, 구조적, 광학적 특성에 대한 연구 결과를 기술하고자 한다.

InGaAs/InAlAs 격자 정합 이중접합 에피택셜 층을 S. I. (001) InP 기판위에 성장하였고, 기판 온도는 540~550 °C, 성장 속도는 약 1  $\mu\text{m/hr}$ , 분자선속비는  $F_{\text{In}}/(F_{\text{In}}+F_{\text{Ga}})=0.822$ ,  $F_{\text{In}}/(F_{\text{In}}+F_{\text{Al}})=0.671$  이었다. 성장중의 Background 압력은  $3\text{-}4 \times 10^{-7}$  torr 를 유지하도록 As cell 온도를 조절하였으며 이때의 V/III 분자선속비는 10 이다. 에피 성장시 *In-situ* RHEED pattern 관찰 결과 고품위 결정 층의 성장을 나타내는 Kikuchi line 을 포함한 1/4 order 의 streaky pattern 을 관찰할 수 있었다. 다음에 델타도핑 및 변조도핑 격자 정합 HEMT 에피택셜 층의 구조를 나타내었다.

50 Å n-In <sub>0.53</sub> Ga <sub>0.47</sub> As cap	50 Å n-In <sub>0.53</sub> Ga <sub>0.47</sub> As cap
400 Å i-In <sub>0.52</sub> Al <sub>0.48</sub> As spacer	400 Å n-In <sub>0.52</sub> Al <sub>0.48</sub> As donor
Si-APD doped layer	30-300 Å i-In <sub>0.52</sub> Al <sub>0.48</sub> As spacer
200 Å i-In <sub>0.52</sub> Al <sub>0.48</sub> As spacer	400 Å i-In <sub>0.53</sub> Ga <sub>0.47</sub> As channel
400 Å i-In <sub>0.53</sub> Ga <sub>0.47</sub> As channel	5000 Å i-In <sub>0.52</sub> Al <sub>0.48</sub> As buffer
5000 Å i-In <sub>0.52</sub> Al <sub>0.48</sub> As buffer	(001) InP (Fe) substrate
(001) InP (Fe) substrate	

델타도핑 HEMT 에피택셜구조      변조도핑 HEMT 에피택셜구조

성장후 에피택셜층의 결정성은 쌍결정 X선 회절과 주사전자현미경으로 조사하여 격자 정합성을 확인하였으며, SIMS 를 이용하여 에피구조의 Depth Profile 및 도핑 특성을 파악하였다. (004) Bragg 회절 피크의 FWHM 은 격자 정합 InAlAs/InP ( $\sim 1\mu\text{m}$ ) 의 경우 14 arcsec, 격자 정합 InGaAs/InP ( $\sim 1\mu\text{m}$ ) 의 경우 33 arcsec 였다. 에피택셜 층 계면의 급준성등을 확인하기위해서 단면을 투과전자현미경을 이용하여 관찰하였다.

성장중 i-InGaAs 채널층과 i-InAlAs 격리층사이에 성장중 Interruption 을 주어 계면의 급준성을 향상시키는 성장 방법을 개발하였으며, 성장시 기판 온도를 상승시켰을때 전자이동도가 향상하는 결과를 얻었다. 델타도핑 에피택셜 층의 경우 성장 조건 (성장 차단 여부, 기판 온도) 의 변화에도 불구하고 상온과 77K에서  $n_s$  가 각각  $2.5 \times 10^{12} / \text{cm}^2$ ,  $1.7 \times 10^{12} / \text{cm}^2$  으로 일정한 값을 나타내었다.

델타도핑 HEMT 구조 에피택셜층의 경우 기판온도를 500 °C 에서 540 °C 로 증가시킴에 따라 Hall 전자이동도  $\mu_H$  는 7850  $\text{cm}^2/\text{Vsec}$  (300K), 30000  $\text{cm}^2/\text{Vsec}$  (77K) 에서 9600  $\text{cm}^2/\text{Vsec}$  (300K), 47500  $\text{cm}^2/\text{Vsec}$  (77K) 으로 각각 증가하였다. 이는 기판 표면에 도달하는 원자 또는 분

자의 표면 이동도를 증가시켜 각각의 격자점으로 이동을 원활하게 함으로서 vacancy 를 발생시키지 않아 전체적인 박막의 quality를 높인 결과로 해석된다. 변조 도핑 및 델타도핑 에피택셜 층 성장시 i-InGaAs 채널층과 i-InAlAs 격리층 사이에 성장을 50 초 멈춘 경우 Hall 전하이동도가 상온에서 30%, 77K 에서 약 100% 향상됨을 관찰할 수 있었다. Adatom의 surface migration 시간을 충분히 줌으로서 결정 결함의 감소, 계면 급준성의 증가를 가져왔고, 이로 인하여 전기적 특성이 향상되었다고 사료된다.

Hall 측정 결과 격리층과 채널층사이에 성장 차단을 한 경우 델타도핑 ( $T_{Si}=1350\text{ }^{\circ}\text{C}$ )의 경우 300K 에서  $n_s=2.4\times 10^{12}\text{ cm}^{-2}$ ,  $\mu_H=9100\text{ cm}^2/\text{Vsec}$  를 77K 에서  $n_s=1.7\times 10^{12}\text{ cm}^{-2}$ ,  $\mu_H=55000\text{ cm}^2/\text{Vsec}$  의 값을 얻었다. 같은 성장 조건의 변조도핑 ( $T_{Si}=1340\text{ }^{\circ}\text{C}$ )의 경우 300K 에서  $n_s=1.5\times 10^{12}\text{ cm}^{-2}$ ,  $\mu_H=9700\text{ cm}^2/\text{Vsec}$  를 77K 에서  $n_s=1.2\times 10^{12}\text{ cm}^{-2}$ ,  $\mu_H=57500\text{ cm}^2/\text{Vsec}$  의 값을 얻었다.

격리층 두께를 30-300Å 으로 변화시키면서 300K, 77K에서 전하이동도를 측정한 결과 최적의 격리층 두께는 약 100Å 정도로 이때의 전하이동도는 300K, 77K 에서 각각 11400, 50300  $\text{cm}^2/\text{Vsec}$  이었다. 이 경우에서 격리층 두께가 30Å 에서 100Å 으로 증가함에 따라 전하이동도가 증가한 이유는 이온화된 도우너 와의 Coulombic 인력이 감소한 결과로 사료된다. 최적 두께 이상에서 전자 이동도가 감소한 이유는 2차원 전자개스의 농도가 감소하고 그에 따라 n-InAlAs 의 이온화된 도우너 원자와 i-InGaAs 의 background impurity 와의 screening 감소 때문으로 사료된다. 또한 전하이동이 감소하여 소오스층에 잔재한 전자의 parallel conduction 이 실제 전하이동도 측정시 전하이동도를 감소시키는 이유로 작용할 수도 있다고 보고된 바 있다. 상온과 액체 질소온도에서 Hall 측정 결과 2차원 전자개스 농도가 격리층 두께가 증가함에 따라 감소하는 것을 알 수 있다. 격리층의 두께가 증가할수록 Coulombic 인력이 감소하고 전하이동도는 증가한다. 또한 screening 과 Fermi energy 감소에 의한 2차원전자개스 농도도 감소되어 결국 전자 이동도도 감소시키게 된다. 이러한 두가지 상반된 이유에 의해서 최적 격리층 두께가 결정되게 된다. 최적 격리층의 두께, 즉 최고 전하이동도는 InAlAs 층의 도핑 농도가 증가하면 증가하는 것은 확실하다. 그러나 특히 300K 에서 undepleted 영역에서의 parallel conduction 에 의한 상쇄효과도 고려하여야 한다.

Shubnikov-de Haas 측정으로 양자화된 2차원 전자 개스의 존재를 확인하는 parabolic 곡선을 얻었다.

$\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}/\text{In}_{0.52}\text{Al}_{0.48}\text{As}/\text{InP}$  HEMT 구조 에피택셜 층의 Photoluminescence 를 이용하여 InAlAs 층의 band to band recombination 에 의한 peak 과 InGaAs 층의 이차원전자개스에 의한 peak 을 관찰하였다.