

# Metamorphic InAlAs/InGaAs HEMT 소자의 기술동향

## Technology Trend of Metamorphic InAlAs/InGaAs HEMT Devices

윤형섭(H.S. Yoon)      초고주파소자팀 책임연구원  
이진희(J.H. Lee)      초고주파소자팀 책임연구원  
이경호(K.H. Lee)      초고주파소자팀 책임연구원, 팀장

본 고에서는 MHEMT(Metamorphic InAlAs/InGaAs HEMT) 구조의 특성, MHEMT 소자특성, MHEMT MMIC 결과와 향후의 기술동향을 논의한다.

### I. 서론

InP 기판을 기본으로 한 InAlAs/InGaAs HEMT 소자는 최고의 차단주파수특성(>340GHz), 우수한 잡음특성(0.8dB/60GHz)을 보여 밀리미터파 대역의 MMIC 제작에 널리 사용되고 있다[1, 2]. 그러나 InAlAs/InGaAs InP HEMT 소자는 GaAs 기판을 기본으로 한 AlGaAs/InGaAs HEMT 소자에 비해서 기판의 가격이 4배 이상 비싸고, 상대적으로 깨어지기 쉬워서 4인치 이상의 InP wafer를 안정적으로 사용하기가 어렵다. 이러한 문제를 해결할 목적으로 제안된 것이 기존의 GaAs 기판 위에 적절한 metamorphic buffer층을 성장하여 lattice mismatch를 완화한 후 InAlAs/InGaAs HEMT 구조의 active층을 성장한 MHEMT 구조인 것이다[3]. 이러한 구조를 채택함으로써 InP HEMT 특성상의 장점을 살리면서 4인치 이상의 GaAs 기판을 사용할 수 있기 때문에 HEMT 소자의 제조 원가를 절감과 더불어 안정적으로 MMIC를 제작할 수 있는 기반을 마련할 수 있다.

본 고에서는 MHEMT 구조의 특성, MHEMT 소

자특성, MHEMT MMIC 결과와 향후의 기술동향을 논의한다.

### II. 본론

#### 1. InAlAs/InGaAs MHEMT 구조 및 특성

InAlAs/InGaAs MHEMT(Metamorphic HEMT) 구조에서 가장 중요한 요소는 GaAs 기판 위에 metamorphic buffer층을 성장하는 것이다. 이러한 metamorphic buffer층은 많은 dislocation을 형성함으로써 GaAs 기판과 HEMT active층간의 큰 lattice mismatch를 완화시키고 또한 이러한 dislocation을 trapping하여 dislocation이 active층으로 확산하지 못하도록 억제하는 역할을 한다. 지금까지 제안된 metamorphic buffer층은 InAlAs, InGaAs, InGaAlAs, AlGaAsSb층이 있으며, 이들을 사용하여 GaAs 기판과 HEMT active층간의 lattice parameter를 연속적으로 또는 step-grading 형태로 변화시킨다.

<표 1>은 대표적인 InAlAs/InGaAs MHEMT 소

<표 1> InAlAs/InGaAs MHEMT 소자의 에피구조

| Layer thickness                        | Material:<br>In content        | Doping                               |
|--|--------------------------------|--------------------------------------|
| Cap layer, 10nm                        | InGaAs: 0.53                   | $2\sim 5 \times 10^{18}/\text{cm}^3$ |
| Schottky layer,<br>20~25nm             | InAlAs: 0.52                   | undoped                              |
| Delta doping                           | -                              | $2\sim 5 \times 10^{12}/\text{cm}^2$ |
| Spacer layer, 5nm                      | InAlAs: 0.52                   | undoped                              |
| Channel, 20~25nm                       | InGaAs: 0.3~0.6                | undoped                              |
| Device buffer,<br>300~500nm            | InAlAs: 0.52                   | undoped                              |
| Metamorphic buffer,<br>1 $\mu\text{m}$ | InAlAs: from 0 to<br>1 grading | undoped                              |
| Substrate                              | GaAs                           | Semi-insulating                      |

자의 에피구조를 나타낸 것이다. LM(Lattice Match) 층에 비해서 M(metamorphic)층은 residual strain, surface roughness, threading dislocation이 비교적 많고, metamorphic buffer 구조에 따라서 크게 변화하는 것으로 알려졌다. Metamorphic층의 threading dislocation을 개선시키기 위해서 step-graded buffer가 제안되었고, surface roughness는 In의 조성비에 크게 의존하는 것으로 알려졌다. 예를 들어, In 조성비가 0.5인 InAlAs graded buffer를 채택한 경우 측정된 surface roughness는 2nm이고, InGaAlAs graded buffer에서는 surface roughness가 1nm인 것으로 보고되었다[4, 5].

<표 2>는 InAlAs/InGaAs MHEMT와 LMHEMT 구조의 Hall mobility( $\mu_h$ )와 sheet carrier density( $n_h$ )를 비교한 것으로, In 조성비가 0.5인 경우에 Hall mobility( $\mu_h$ )와 sheet carrier density( $n_h$ )는 거의 비슷한 값을 갖는 것으로 나타났다[4]. 지금까지 보고된 결과를 종합해보면 MHEMT 구조의 성장은 MBE

방법이 주종을 이루고 있고, M(metamorphic) buffer 층 성장과 device reliability간의 상호관계에 관한 연구가 더 필요한 것으로 생각된다.

## 2. InAlAs/InGaAs MHEMT 소자특성

InAlAs/InGaAs MHEMT 소자의 제조공정은 InP 기판을 사용한 InAlAs/InGaAs LMHEMT 공정과 동일하나 MHEMT 구조의 surface roughness 정도에 따라서 photolithography 조건이 달라질 가능성도 있다. <표 3>은 In content에 따른 0.1 $\mu\text{m}$  InAlAs/InGaAs MHEMT 소자의 DC 특성을 비교한 것이다[4, 6]. <표 3>에서 보면 낮은 In content를 갖는 MHEMT 소자는 drain 포화전류가 크고 Schottky diode의 역방향 breakdown 전압이 높기 때문에 power 소자제작에 유리한 것으로 판단된다.

<표 4>는 낮은 In content를 채택한 InAlAs/InGaAs MHEMT 소자의 power 특성을 비교한 것이다. In content가 0.3인 경우 InAlAs/InGaAs MHEMT 소자는 60GHz에서 6.4dB의 power gain과 25%의 power efficiency 특성을 보였고, In content가 0.32인 경우에는 35GHz에서 13.6dB의 associated gain과 59%의 power efficiency 특성을 보였다[7, 8].

반면에 <표 3>에서 보면 In content가 0.4 또는 0.5로 높은 경우에는 MHEMT 소자의 drain 포화전류, Schottky diode의 역방향 breakdown 전압, 그리고 transconductance 특성은 InP LMHEMT와 거의 유사한 것으로 밀리미터파 low noise LNA 제작에 유리하다.

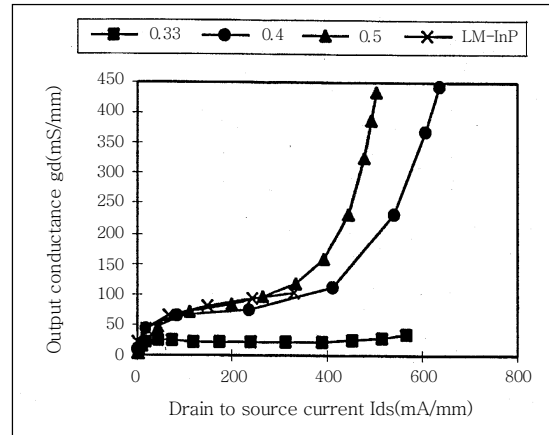
(그림 1)은 0.1 $\mu\text{m}$  게이트 길이를 갖는 InAlAs/In

<표 2> InAlAs/InGaAs MHEMT와 LMHEMT 구조의 Hall mobility( $\mu_h$ )와 sheet carrier density( $n_h$ ) 비교

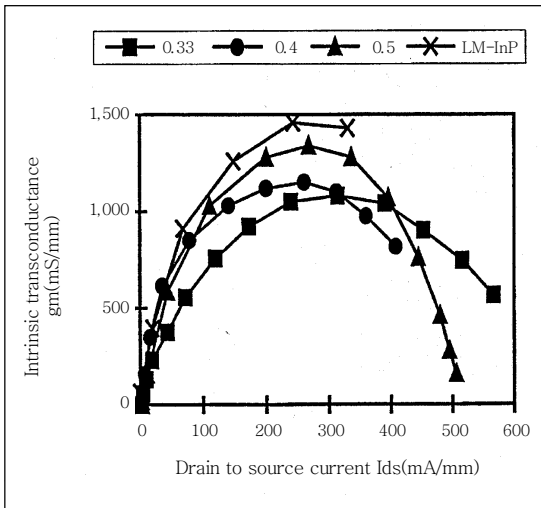
| In content(x)                     | 300k               |                       |                                | 77k                |                       |                                |
|-----------------------------------|--------------------|-----------------------|--------------------------------|--------------------|-----------------------|--------------------------------|
|                                   | $R\square[\Omega]$ | $n_h[\text{cm}^{-2}]$ | $\mu_h[\text{cm}^2/\text{Vs}]$ | $R\square[\Omega]$ | $n_h[\text{cm}^{-2}]$ | $\mu_h[\text{cm}^2/\text{Vs}]$ |
| Metamorphic buffer/GaAs x = 0.33  | 223                | $3.39 \times 10^{12}$ | 8250                           | 77                 | $3.46 \times 10^{12}$ | 23,400                         |
| Metamorphic buffer/GaAs x = 0.40  | 185                | $4.16 \times 10^{12}$ | 8,250                          | 70                 | $3.44 \times 10^{12}$ | 26,000                         |
| Metamorphic buffer/GaAs x = 0.50  | 163                | $4.18 \times 10^{12}$ | 9,180                          | 49                 | $3.62 \times 10^{12}$ | 35,000                         |
| Lattice match buffer/InP x = 0.53 | 187                | $3.48 \times 10^{12}$ | 9,570                          | 56                 | $3.45 \times 10^{12}$ | 32,200                         |

<표 3> In content에 따른 0.1 $\mu$ m InAlAs/InGaAs MHEMT 소자의 DC 특성 비교

| DC parameter                              | MHEMT /GaAs | MHEMT /GaAs | MHEMT /GaAs | LMHEMT /InP |
|---|-------------|-------------|-------------|-------------|
| In content, x                             | 0.33        | 0.40        | 0.50        | 0.53        |
| Pinch-off voltage, $V_p$ (V)              | -0.9        | -0.9        | -0.65       | -0.50       |
| Breakdown Voltage, $V_{br}$ (V) at 1mA/mm | -14.2       | -10.5       | -7          | -8          |
| $I_{d,max}$ [mA/mm]                       | 650         | 640         | 550         | 510         |
| Extrinsic $g_{m,max}$ [mS/mm]             | 750         | 780         | 860         | 940         |



(그림 2) 0.1 $\mu$ m 게이트 길이를 갖는 InAlAs/InGaAs MHEMT 소자의 drain 전류와 In content에 따른 output conductance 특성변화



(그림 1) 0.1 $\mu$ m 게이트 길이를 갖는 InAlAs/InGaAs MHEMT 소자의 drain 전류와 In content에 따른 transconductance 특성변화

GaAs MHEMT 소자의 drain 전류와 In content에 따른 transconductance 특성변화를 나타낸 것으로, In content가 높을수록 max transconductance 값은 더 커지고, In content가 0.5일때 MHEMT 소자는 1,350mS/mm의 가장 높은 transconductance 값을 보여 InP LMHEMT 소자에 근접하는 특성을 갖는

것으로 나타났다[4, 6].

(그림 2)는 0.1 $\mu$ m 게이트 길이를 갖는 InAlAs/InGaAs MHEMT 소자의 drain 전류와 In content에 따른 output conductance 특성변화를 나타낸 것으로, In content가 낮을수록 output conductance 값이 줄어드는 경향을 보였고 In content가 0.33일 때 가장 낮은 output conductance 값을 나타내었다.

<표 5>는 In content 변화에 따른 0.1 $\mu$ m InAlAs/InGaAs MHEMT 소자의 차단주파수특성을 나타낸 것으로, In content가 클수록 차단주파수 값이 높아지는 경향을 보였고 In content가 0.5일때 200 GHz의 가장 높은 output conductance 값을 나타내었다[4, 6].

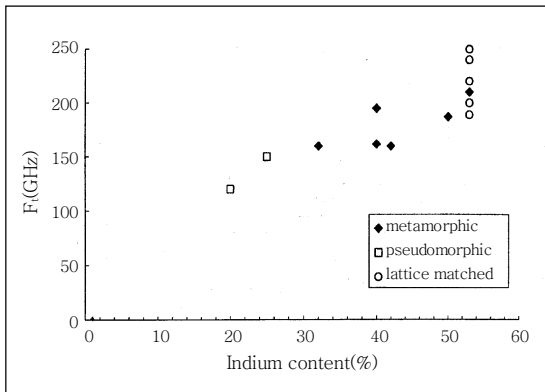
(그림 3)은 In content 변화에 따른 0.1 $\mu$ m 게이트 길이를 갖는 InAlAs/InGaAs metamorphic HEMT, AlGaAs/InGaAs pseudomorphic HEMT, InAlAs/InGaAs lattice-matched HEMT 소자의 차단주파수특성을 비교한 것으로, In content가 커질수록 차단주파수 값이 높아지는 경향을 보였다[5].

<표 4> 낮은 In content를 갖는 InAlAs/InGaAs MHEMT 소자의 power 특성

| Reference   | In content                  | Technology  | Power gain                                | Power efficiency               |
|---|-----------------------------|---|---|--------------------------------|
| M. Zaknourne <i>et al.</i> , EDL, IEEE, 1998 [7]  | 0.30/linearly graded InAlAs | 0.15 $\mu$ m T-gate/tri-level resists/ $f_T$ = 125GHz | 6.4dB at 240mW/mm and 60GHz               | 25% at 60GHz                   |
| C.S. Whelan <i>et al.</i> , MTT-S, IEEE, 1999 [8] | 0.32/linearly graded InAlAs | 0.15 $\mu$ m T-gate/ $f_T$ = 97GHz                    | 13.6dB associated gain 650mW/mm and 35GHz | 59% at 35GHz and $V_{ds}$ = 6V |

<표 5> In content 변화에 따른 0.1 $\mu$ m InAlAs/InGaAs MHEMT 소자의 차단주파수특성

| Parameter                     | MHEMT /GaAs | MHEMT /GaAs | MHEMT /GaAs | LMHEMT /InP |
|-------------------------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| Metamorphic In content, x     | 0.33        | 0.40        | 0.50        | 0.53        |
| Cutoff frequency, $f_T$ [GHz] | 150         | 195         | 200         | 210         |



(그림 3) In content 변화에 따른 0.1 $\mu$ m 게이트 길이를 갖는 InAlAs/InGaAs metamorphic HEMT, AlGaAs/InGaAs pseudomorphic HEMT, InAlAs/InGaAs lattice-matched HEMT 소자의 차단주파수특성 비교

<표 6>은 지금까지 발표된 InAlAs/InGaAs MHEMT 소자의 최소 잡음지수( $NF_{min}$ )와 associated gain( $G_{as}$ ) 특성을 정리한 것이다. 1999년에 P.F. Marsh가 발표한 잡음특성은 metamorphic buffer의 In content가 0.27이고, channel의 In content가 0.6인 MHEMT 소자에 대한 결과를 나타낸 것으로 최소 잡음지수( $NF_{min}$ )는 12GHz에서 0.24dB, 26GHz에서 0.61 dB 값을 보여 lattice-matched InP HEMT의 결과 [12GHz에서 0.21dB]에 근접하는 우수한 잡음특성을 갖는 것으로 나타났다.

### 3. InAlAs/InGaAs MHEMT MMIC 특성

<표 7>은 지금까지 InAlAs/InGaAs MHEMT 소자를 사용하여 제작한 MHEMT MMIC의 측정결과를 정리한 것으로 MHEMT 소자를 밀리미터파 대역의 MMIC 제작에 적용할 수 있을 것으로 판단된

<표 6> 지금까지 발표된 InAlAs/InGaAs MHEMT 소자의 최소 잡음지수( $NF_{min}$ )와 associated gain( $G_{as}$ ) 특성

| Reference  | $I_{ds}$ [mA/mm] | $V_{ds}$ [V] | Frequency [GHz] | $NF_{min}$ [dB] | $G_{as}$ [dB] |
|--|------------------|--------------|-----------------|-----------------|---------------|
| MHEMT [9] [P.F. Marsh <i>et al.</i> , GaAs Sym, IEEE, '99] | 90               | 1            | 12              | 0.24            | 16.2          |
|  | 90               | 1            | 18              | 0.45            | 13.8          |
|  | 90               | 1            | 26              | 0.61            | 11.8          |
| MHEMT [10] [H. Rohdin <i>et al.</i> , IPRM Sym, IEEE, '95] | -                | -            | 12              | 0.25            | 15            |
| MHEMT [11] [M. Kawano <i>et al.</i> , IEEE MWG Lett., '97] | 140              | 0.8          | 18              | 0.48            | 14.2          |

<표 7> 지금까지 발표된 InAlAs/InGaAs MHEMT 소자를 사용하여 제작한 MHEMT MMIC의 측정결과

| Reference                         | Technology                              | Noise Figure [dB] | Gain [dB] | Frequency [GHz] |
|-----------------------------------|---|-------------------|-----------|-----------------|
| LNA [9]                           | Graded buffer /0.15 $\mu$ m T-gate      | 1.8               | >24dB     | 27~32           |
| Single downconverter chip[12]     | metamorphic In = > 0.27                 | 6dB               | 32        | 60              |
| Three stage feedback amp [10]     | Linear graded buffer/0.1 $\mu$ m T-gate | -                 | >8        | 50              |
| Single stage distributed amp [13] | Graded buffer /0.15 $\mu$ m T-gate      | -                 | >10       | 5~22            |
| Three stage LNA [14]              | AlGaAsSb buffer/0.1 $\mu$ m T-gate      | 4.2               | 18        | 82              |

다[9, 10, 12-14].

### III. 결론

Metamorphic HEMT 소자의 특성은 metamorphic buffer의 In content에 따라 변화하고 InP lattice-matched HEMT 소자특성에 근접하는 결과를 보여 밀리미터파 대역 MMIC 제작에 활용될 수 있다.

In content가 0.3~0.4로 비교적 낮은 값을 갖는 MHEMT 소자는 drain 포화전류가 크고 Schottky diode의 역방향 breakdown 전압이 높기 때문에 전력 MMIC 제작에 유리하다. 반면에 In content가 0.4~0.5로 비교적 높은 값을 갖는 MHEMT인 경우에는 transconductance와 차단주파수가 높기 때문에 LNA MMIC를 제작하는 데 유리한 것으로 판단된다. 향후 MHEMT 소자 및 공정과 관련하여 안정적인 metamorphic buffer층 성장, power MHEMT 소자의 breakdown 전압 향상을 위한 게이트 recess 공정개선 및 신뢰성 향상을 위한 연구가 더 필요한 것으로 사료된다.

## 참고 문헌

- [1] K.H.G. Duh, IEEE MGWL, Vol. 1, 1996, pp. 114.
- [2] Y.C. Chen *et al.*, IEEE MGWL, Vol. 8, 1998, pp. 399.
- [3] T. Ueda *et al.*, J. Crystal Growth, Vol. 93, 1988, pp. 517.
- [4] Y. Cordier *et al.*, Jpn. J. Appl. Phys., Vol. 38, 1999, pp. 1164.
- [5] A.S. Wakita *et al.*, IPRM '98, 1998, pp. 223.
- [6] Y. Cordier *et al.*, IPRM '98, 1998, pp. 213.
- [7] M. Zaknourne *et al.*, EDL IEEE, Vol. 19, 1998, pp. 345.
- [8] C.S. Whelm *et al.*, MTT-S IEEE, 1999, pp. 1187.
- [9] P.F. Marsh *et al.*, GaAs Symp. '99, 1999, pp. 221.
- [10] H. Rohdin *et al.*, IPRM '95, 1995, pp. 73.
- [11] M. Kawano *et al.*, IEEE MGWL, Vol. 7, 1997, pp. 6.
- [12] R. Tuyi, APMC '98, workshop WS5, 1998.
- [13] P.F. Marsh, MTT-S IEEE, 1999, pp. 5135.
- [14] K.C. Hwang *et al.*, EDL IEEE, Vol. 20, 1999, pp. 551.