# 밀리미터파 능동 소자 및 MMIC 개발과 제작 공정

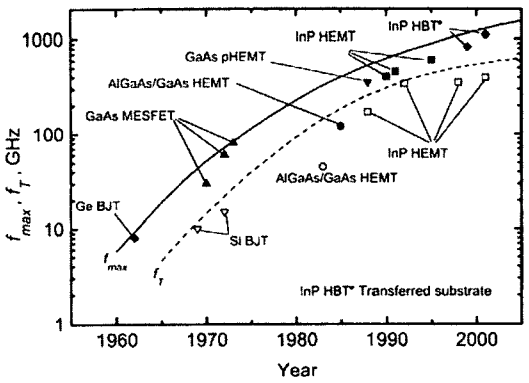
김삼동 · 박현창 · 이진구 · 오정훈
동국대학교 전자공학과

## Ⅰ. 서 론

무선 통신 기술이 발전함에 따라 밀리미터파 대역 이하의 주파수는 이동 통신 및 위성 통신용으로 할당이 완료되고, 새로운 무선 통신 서비스 및 차량 충돌 방지 시스템 · 이미징 시스템 등의 응용을 위한 주파수 대역은 점차로 고주파화 하여 30 GHz 이상의 밀리미터파 대역으로 확장됨으로써, 밀리미터파 이상의 고주파에서 사용 가능한 부품 기술의 확보는 새로운 무선 통신 및 여러 유용한 응용을 위한 주파수 자원의 선점이라는 자원 확보 차원에서 국가간 경쟁이 되고 있다. 또한, 고화질 · 고음향에 대한 인간의 욕망이 무한함에 따라 문자 및 음성에 제한되던 기존의 통신환경을 뛰어넘어 대용량의 데이터 및 동화상의 실시간 송수신이 요구되고 있는 실정이다. 이러한 초고속 · 광대역 · 고선명 데이터를 송수신하기 위해서 점차 사용 주파수 대역이 한계에 이르고 있는 마이크로파 대역을 대신하여 매우 넓은 대역폭을 제공할 수 있는 밀리미터파 대역에 대한 제반 기술 개발의 중요성이 증대되고 있다. 밀리미터파 대역의 시스템을 구현을 위한 기술로는 밀리미터파 대역에서 동작 특성이 우수한 초고속의 소자 및 이를 이용한 부품 개발이 필요하다. 즉, 저가격화 · 소형화 및 신뢰성 있는 밀리미터파 응용 시스템 개발을 위해 시스템의 핵심 부품인 초고속으로 동작하는 반도체 능동 소자와 이를 집적한 MIMIC(MIllimeter-wave Monolithic Integrated Circuits)의 개발이 필수적이다. 따라서, 밀리미터파 대역에서 사용 가능한 초고속 능동 소자와 MIMIC의 개발 및 제작에 대하여 논의하고자 한다.

## Ⅱ. 밀리미터파 능동 소자의 종류

현재 가장 널리 쓰이고 있는 MIMIC 능동 소자의 반도체 물성 재료는 InP · Si · SiGe · GaAs가 대표적이다. 이들 물성 재료에 기반한 대표적 능동 소자로는 HBT(Heterojunction Bipolar Transistor)와 HEMT(High Electron Mobility Transistor)를 들 수 있다. 물성 재료 및 능동 소자 종류에 따른 고속 동작 능력의 지표인 $f_T$(cut-off frequency)와 $f_{amx}$(maximum frequency of oscillation)를 [그림 1]에 도시하였다. [그림 1]에 보이는 바와 같이 1990년대 후반에 이르러서는 $f_T$와 $f_{max}$가 500 GHz 이상에 이르는 우수한 특성들이 보고되고 있다. $f_T$와 $f_{max}$ 이외에도 능동 소자의 중요한 성능 지표인 노이즈 · 항복 전압 등의 특성을 HBT 및 HEMT 이외의 관련된 능동 소자들과 함께 <표 1>에 요약하




[그림 1] 능동 소자에 따른 $f_T$와 $f_{max}$의 발전 추세

였다. <표 1> 및 [그림 1]에서 보이는 바와 같이 HEMT 및 HBT에서 우수한 주파수 특성 및 노이즈 특성이 보고됨을 알 수 있다. 이러한 이유로 인하여, 현재 밀리미터파 대역의 능동 소자로써 HEMT와 HBT가 가장 널리 사용되고 있다. 또한, HBT와 비교하여 HEMT의 우수한 고주파수 및 노이즈 특성 때문에 현재 국내외적으로 HEMT에 관한 많은 연구가 진행되고 있으며, 많은 응용 분야에서 사용되고 있다. HEMT의 설계 및 제작에 관하여 동국대학교 밀리미터파신기술연구센터(MINT)의 보유 기술을 중심으로 논의 하고자 한다.

## Ⅲ. HEMT의 구조 및 설계

HEMT는 밀리미터파 대역에서 우수한 주파수 및 노이즈 특성으로 다양한 밀리미터파 응용 시스템에 가장 널리 사용되는 능동 소자 중 하나이다. HEMT

<표 1> 능동 소자의 특성 비교

| Transistor type | $f_{op}$ | BV | $P_D$ | LF noise | HF noise | Cost |
|---|---|---|---|---|---|---|
| Si CMOS | − | − | − | ○ | − | ○/+ |
| Si LDMOS | − | + | ○ | − | − | + |
| Si BJT | − | − | + | + | − | + |
| SiGe HBT | ○ | − | ○ | + | ○ | + |
| GaAs MESFET | ○ | ○ | ○ | − | ○ | ○ |
| GaAs HEMT | ○/+ | ○ | ○ | − | + | ○ |
| GaAs HBT | ○ | + | + | + | − | ○ |
| InP HEMT | + | − | − | − | + | − |
| InP HBT | + | ○ | + | + | − | − |
| AlGaN HEMT | ○ | + | + | − | ○ | − |
| SiC MESFET | − | + | + | − | − | − |

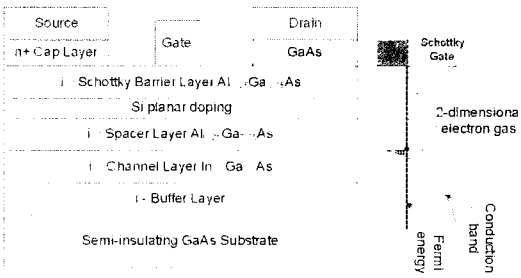
$f_{op}$: operating frequency, BV: breakdown voltage, $P_D$: output power density, LF noise: low-frequency noise, HF noise: high-frequency noise

+good, ○ average, −poor

는 epitaxial 구조상 conventional HEMT · PHEMT(Pseudomorphic HEMT) · MHEMT(Metamorphic HEMT) 및 GaN HEMT로 구분되어질 수 있다. Conventional HEMT는 그 이름에서 알 수 있는 바와 같이 HEMT 소자 중 처음으로 제작 및 발표된 소자이며, 주로 격자 정합 상태의 AlGaAs/GaAs 이종 접합을 이용한다. 이후에 개발된 HEMT 소자들과 비교하여 열등한 특성을 보이는 이유로 연구 및 개발이 더 이상 이루어지지 않고 있다.

[그림 2]에는 PHEMT의 전형적인 InGaAs/AlGaAs 이종 접합 epitaxial 구조와 상응한 에너지 다이어그램을 도시하였다. [그림 2]에서 보이는 바와 같이, GaAs 기판에 제작된 InGaAs/AlGaAs PHEMT는 conventional HEMT의 GaAs 채널에 InAs를 첨가하여 InGaAs를 형성하게 되면 밴드갭이 작아져 2차원 전자가스의 채널 구속 속도가 증가하여 소자 특성을 크게 향상시키는 구조를 취하고 있다. InGaAs의 두께가 임계 두께보다 작으면 두 이종 접합간의 부정합이 전적으로 탄성 변형의 형태로 수용되어 전위를 발생시키지 않음이 알려져 있는데, 이러한 상태를 pseudomorphic이라 하며, 이를 이용한 구조이기 때문에 PHEMT라 하는 것이다.

GaAs 기판 대신 InP 기판을 사용하여 InAlAs/InGaAs 격자 정합을 유지하는 구조의 HEMT를 주로 InP HEMT라 한다. InAlAs/InGaAs 구조가 AlGaAs/InGaAs PHEMT의 구조보다 더 높은 2차원 전자 가스




[그림 2] InGaAs/AlGaAs PHEMT 에피 구조의 예 및 밴드 다이어그램

의 구속력을 가지며, 보다 우수한 전자 이동도를 가지게 된다. 따라서, 우수한 고주파수 동작성을 보이게 된다. 하지만, InP 기판의 경우 가격이 비싸고, 큰 구경의 기판을 구현하기 어려우며, 공정이 매우 어려운 단점을 가지고 있다. 이러한 문제를 해결하기 위하여 GaAs 기판에 metamorphic 버퍼를 성장시키고 InP HEMT와 동일한 InAlAs/InGaAs 이종 접합 구조를 취함으로써 InP HEMT와 거의 동일한 성능을 구현하는 HEMT를 MHEMT라 한다. 이 MHEMT의 전형적인 epitaxial 구조를 [그림 3]에 도시하였다. 그림과 동일한 MHEMT 에피 구조에서 50 nm 게이트 길이를 가지는 MHEMT를 밀리미터파신기술연구센터에서 구현하여 490 GHz의 $f_T$와 0.7 dB의 노이즈 특성을 보고한 바 있다.

GaN HEMT는 사파이어/SiC/GaN 등의 기판상에 GaN/AlGaN의 이종 접합 구조를 취하는 HEMT를 말한다. GaN HEMT는 낮은 전자 이동도로 인하여 PHEMT 및 MHEMT 보다 낮은 주파수 특성(100 GHz 미만의 $f_T$ 및 $f_{max}$)을 보인다. 하지만 매우 높은 항복 전압을 가지기 때문에 우수한 파워 특성이 보고되고 있으며, 현재 전세계적으로 많은 연구가 진행되고 있다.

이러한 HEMT를 설계함에 있어, epitaxial 구조에서 각 층의 두께 및 조성에 따라 소자의 전체 성능이 크게 좌우되므로 각 층의 조성 및 두께를 최적화 하는 것이 매우 중요하다. 현재까지 많은 연구에서 각

| | | |
|---|---|---|
| $n^+$ Cap Layer ($6 \times 10^{18}$ cm$^3$) | $In_{0.53}Ga_{0.47}As$ | 15 nm |
| 1 - Schottky Barrier Layer | $In_{0.52}Al_{0.48}As$ | 15 nm |
| Si delta doping ($4.5 \times 10^{12}$ cm$^2$) | | |
| 1 - Spacer Layer | $In_{0.52}Al_{0.48}As$ | 3 nm |
| 1 - Channel Layer | $In_{0.53}Ga_{0.47}As$ | 23 nm |
| 1 - Spacer Layer | $In_{0.52}Al_{0.48}As$ | 4 nm |
| Si delta doping ($1.3 \times 10^{12}$ cm$^2$) | | |
| 1 - Buffer Layer | $In_{0.52}Al_{0.48}As$ | 300 nm |
| 1 - Graded buffer Layer | $In_XAl_{1-X}As$ ( $X = 0 \cdots 0.5$ ) | 1000 nm |
| Semi - insulating GaAs Substrate | | |

[그림 3] MHEMT의 epitaxial 구조

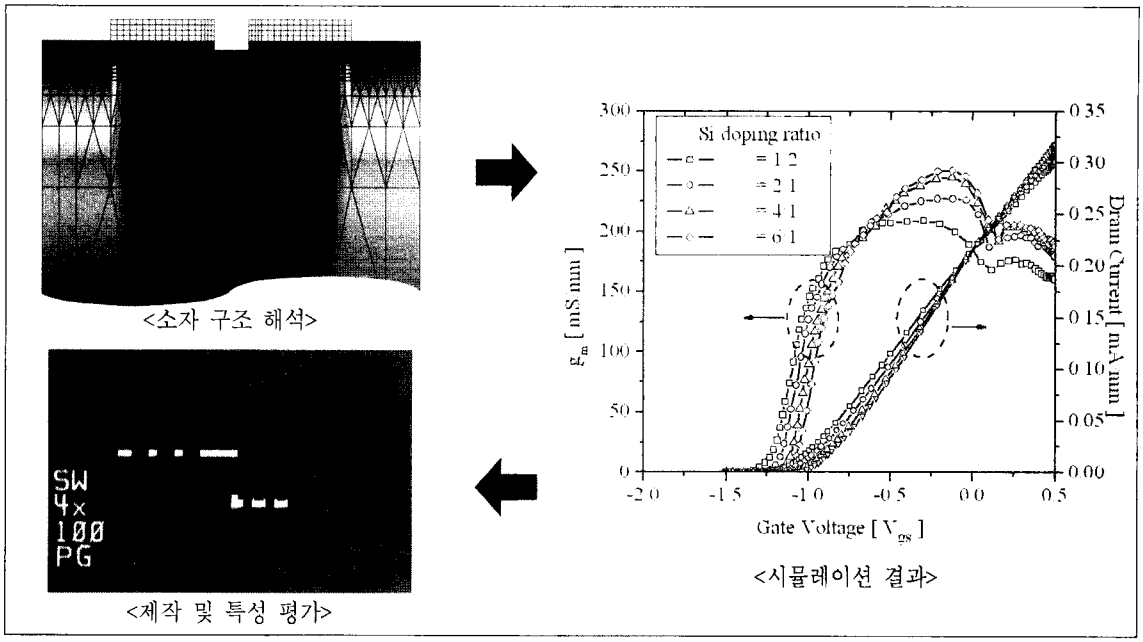
에피층의 두께, 조성 및 유무에 따른 에너지 밴드 다이어그램, 2차 전자가스의 농도, 전자 이동도, DC 및 RF 등의 특성과의 상관관계가 보고되고 있다. 또한, 여러 소자 시뮬레이터를 이용하여 epitaxial 구조 변화가 소자의 특성에 미치는 영향을 예측할 수 있다. 이러한 기존의 연구 성과와 소자 시뮬레이터를 이용하여 시간 및 비용을 절감시키며 효과적으로 소자를 설계할 수 있다. 소자 시뮬레이터를 이용하여 소자를 설계한 한가지 예로서 [그림 3]의 epitaxial 구조에서 위쪽과 아래쪽의 Si 델타 도핑의 농도의 비에 따른 소자 특성 변화를 시놉시스사의 ISE-TCAD 시뮬레이터를 이용하여 예측하고, 이 결과를 바탕으로 성공적으로 MHEMT를 계발한 예가 있다. 이 시뮬레이션을 이용하여 MHEMT를 개발한 과정을 [그림 4]에 나타내었다. Epitaxial 구조와 함께 소자의 레이아웃 역시 소자의 전체적 특성에 영향을 미치며, 소자 설계시 레이아웃 역시 중요히 고려되어야 할 사항이다. 소자의 레이아웃이 소자의 특성에 미치는 영향은 실제 개발 예와 함께 5-1 절에서 설명하도록 한다.

## Ⅳ. HEMT 및 MIMIC 제작

HEMT 및 MIMIC 제작에 있어서, 주요 단위 공정으로는 마스크 제작, 패터닝, Alloy, 에칭, 금속 증착이 있으며, 공정 순서 및 자세한 공정 조건을 [그림 5]에 나타내었다. [그림 5]의 공정 순서 및 조건은 동국대학교 밀리미터파 신기술연구센터(MINT)의 MHEMT 및 MIMIC 제작을 기준으로 한 것이다. 이중 중요하고 구현하기 어려운 공정으로 나노 스케일의 게이트 패터닝 기술과 Air-bridge 형성 기술이 있으며, 다음에 이를 자세히 설명한다.

### 4-1 나노 스케일 게이트 패터닝 공정

소자의 성능을 향상시키는 많은 방법 가운데, 많은 노력이 기울여지고 있으며, 가장 효과적인 방법 중




<소자 구조 해석>

<제작 및 특성 평가>

<시뮬레이션 결과>

[그림 4] 소자 시뮬레이터를 이용한 소자 개발 과정

의 하나가 게이트 선폭을 줄이는 것이다. 현재 국내외적으로 많은 연구가 진행되고 있으며, 50 nm 급 이하의 게이트 패터닝 기술이 보고되고 있다. 이러한 나노 스케일의 게이트 패터닝에는 주로 전자 빔 묘화 방법이 사용되고 있다. 또한, 게이트 선폭을 줄이면 게이트 저항이 증가하기 때문에 게이트 저항을 줄이기 위하여 T 혹은 Γ 형상의 게이트를 구현하여야 한다. 이러한 T 혹은 Γ 모양의 게이트를 구현하며, 수월한 리프트 오프 및 재현성 있는 패터닝을 위해 많은 경우에 3층 포토 리지스트를 이용하며, 2번에 걸친 다중 묘화 방식을 사용한다. 이에 대한 자세한 사항을 [그림 6]에 나타내었다.

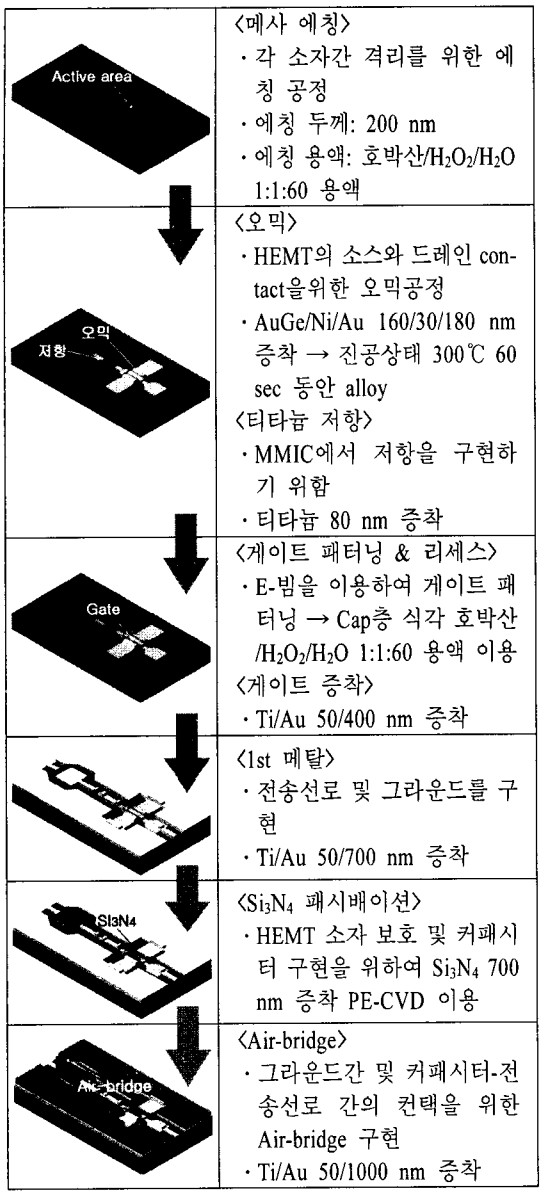
게이트 선폭이 작아지면 T 혹은 Γ 형상의 게이트는 그 헤드 부분의 무게로 인하여 구조를 유지하지 못하고 무너지는 문제가 발생하게 된다. 이러한 문제를 해결하고자 구조적으로 버팀목이 되는 게이트 포스트의 제작이 필수적이다. [그림 7]에 게이트 포스트 구조를 이용한 50 nm 게이트 구조 및 전자현미경 사진을 도시하였다.

### 4-2 Air-bridge 공정

MIMIC 공정에서 그라운드간의 연결, 커패시터와 전송 선로간의 연결, 멀티게이트 구조의 HEMT에서 소트 패드간의 연결 등에 Air-bridge는 매우 유용하게 사용된다. 유기물을 절연 막으로 사용하는 것보다 air-bridge를 사용함으로써 절연물로 공기를 사용할 수 있다. 공기를 사용하면 공기의 낮은 유전율로 인하여 HEMT 및 MMIC의 전체적인 성능을 향상시킬 수 있다. 따라서 안정적인 air-bridge를 구현하는 것은 매우 중요한 공정이다. 이 air-bridge를 구현하는 공정을 [그림 8]에 자세히 설명하였으며, 완성된 air-bridge의 전자현미경 사진을 [그림 9]에 도시하였다.

### 4-3 제작된 HEMT 및 MIMIC 특성

4-1 및 4-2 절에서 설명된 HEMT 및 MIMIC 공정




〈메사 에칭〉
· 각 소자간 격리를 위한 에칭 공정
· 에칭 두께: 200 nm
· 에칭 용액: 호박산/$H_2O_2$/$H_2O$ 1:1:60 용액

〈오믹〉
· HEMT의 소스와 드레인 contact을위한 오믹공정
· AuGe/Ni/Au 160/30/180 nm 증착 → 진공상태 300℃ 60 sec 동안 alloy

〈티타늄 저항〉
· MMIC에서 저항을 구현하기 위함
· 티타늄 80 nm 증착

〈게이트 패터닝 & 리세스〉
· E-빔을 이용하여 게이트 패터닝 → Cap층 식각 호박산/$H_2O_2$/$H_2O$ 1:1:60 용액 이용

〈게이트 증착〉
· Ti/Au 50/400 nm 증착

〈1st 메탈〉
· 전송선로 및 그라운드를 구현
· Ti/Au 50/700 nm 증착

〈$Si_3N_4$ 패시베이션〉
· HEMT 소자 보호 및 커패시터 구현을 위하여 $Si_3N_4$ 700 nm 증착 PE-CVD 이용

〈Air-bridge〉
· 그라운드간 및 커패시터-전송선로 간의 컨택을 위한 Air-bridge 구현
· Ti/Au 50/1000 nm 증착

[그림 5] HEMT 및 MIMIC 제작 공정

을 이용하여 밀리미터파 신기술연구센터에서는 50 nm MHEMT 및 MMIC 타입의 저잡음 증폭기(low-noise amplifier) 및 혼합기(mixer) 등 다양한 부품 들을 제작하였다.

[그림 10]에 본 연구 센터에서 제작된 50 nm MHEMT의 전자현미경 사진 및 주파수 특성을 나타내었다. 제작된 50 nm MHEMT는 1,270 mS/mm의 최대 전달 컨덕턴스($g_m$), 489 GHz의 $f_T$, 422 GHz의 $f_{max}$, 0.7 dB의 노이트 특성을 보여주었다. 이는 세계적인 결과와 비교하여도 손색이 없는 우수한 결과이다.

100 nm MHEMT를 이용하여 제작된 저잡음 증폭기 · 혼합기의 전자현미경 사진과 측정 결과를 [그림 11]과 [그림 12]에 나타내었다. [그림 11]에서 보여지는 바와 같이 75~100 GHz의 W-band 대역에서 동작 가능한 저잡음 증폭기를 제작하였으며, 10 dB 이상의 우수한 $S_{21}$ 이득 특성을 보여주었다. [그림 12]에 보여지는 94 GHz 능동 혼합기는 6.7 dB의 변환 손실 및 21 dB의 격리 특성을 보여주었다. 이들 저잡음 증폭기 및 혼합기의 이러한 우수한 특성은 세계적인 결과와 수준을 같이하는 하는 결과라 할 수 있다.

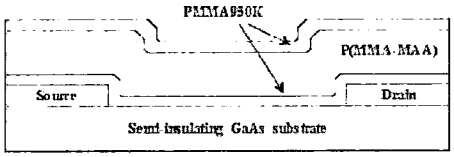
## V. 소자 특성 향상을 위한 연구

소자성능을 향상시키는 방법에는 위에서 언급한 에피 구조를 최적화하거나 게이트 선폭을 줄이는 방법 외에도 레이아웃을 목적에 부합하도록 조작하거나, 게이트 리세스 구조를 최적화 하는 방법 등이 있다. 아래에서 설명될 HEMT 소자를 이용하여 MMIC 시스템을 구현하고자 연구가 진행되고 있으며, 우수한 결과가 기대되고 있다.

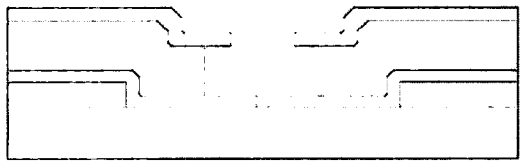
### 5-1 다수의 게이트 접속 라인을 가지는 HEMT 구조

많은 밀리미터파 시스템에서 능동 소자의 우수한 주파수 특성뿐 아니라 높은 출력을 요구한다. 이러한 높은 출력을 만족시키기 위해서는 게이트 폭을 늘리는 것이 실제로 응용 가능한 방법이다. 하지만 게이트 폭을 늘리면 게이트 저항이 증가하여 소자의 동작 특성을 저하시키는 문제가 발생하며, 이는 특히 $f_{max}$의 저하를 야기한다. 이러한 게이트 저항 증가의 문제점을 해결하고자 [그림 13]에서 보이는 바와 같

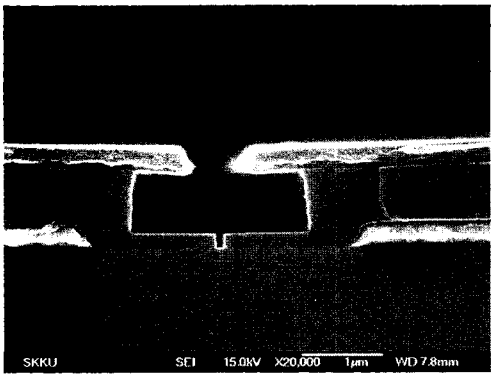
이 다수의 게이트 접속 라인(multi gate-feeding 구조)을 가지는 HEMT를 설계 및 제작하여 성공적인 결과를 얻었다. 단일 게이트 접속 라인을 가지는 기존의 구조와 비교하였을 때, 다수의 게이트 접속 라인을 가지는 소자의 경우 전체 게이트 폭의 증가에 따른 게이트 저항의 증가율이 현저히 감소되는 것을 확인하였다. 이러한 이유로 400 $\mu$m의 전체 게이트 폭을 갖는 HEMT에서 기존 구조보다 $f_{max}$가 약 60 % 향



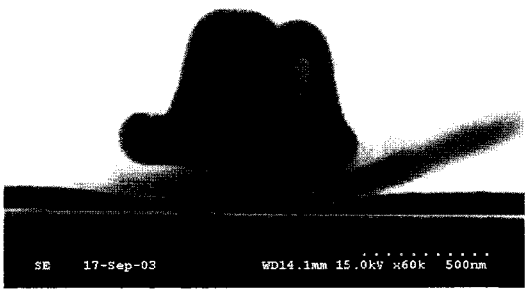

· PMMA/P(Maa-MAA)/PMMA의 3층 포토리지스터 코팅



· 게이트 해드 부분 패터닝을 위한 1차 전자 빔 → 1차 현상 → 게이트 풋 형성을 위한 2차 전자 빔 묘화 → 2차 현상

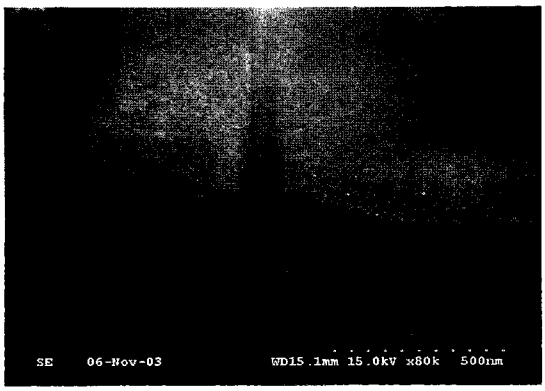



〈게이트 패터닝후 전자현미경 사진〉

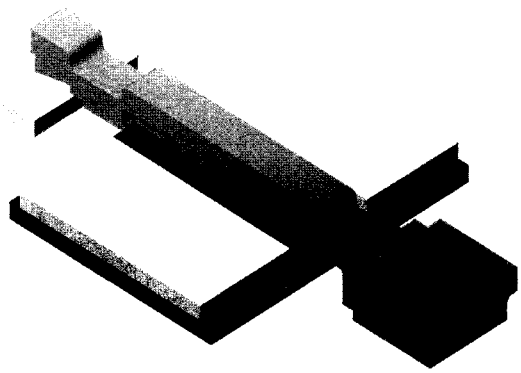



〈메탈 증착후 전자현미경 사진〉

[그림 6] 나노-스케일(100 nm)의 게이트 제작 공정

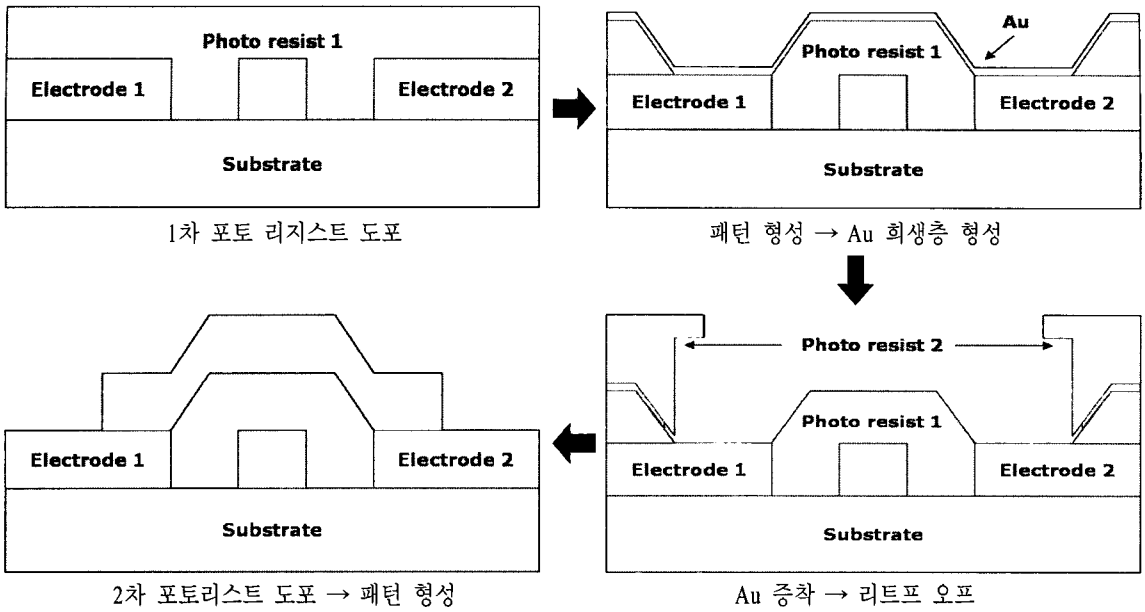



〈게이트 post 형성을 위한 패턴〉



〈게이트 post 구조〉

[그림 7] 50 nm 게이트 구현을 위한 게이트 포스트 구조



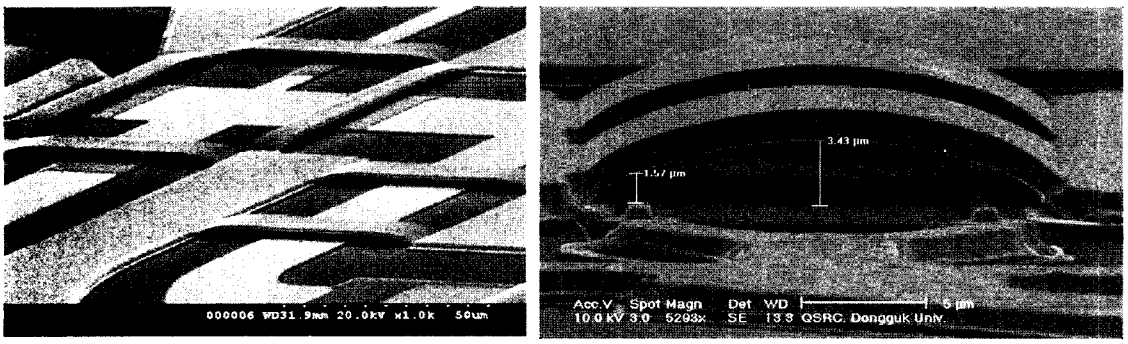

1차 포토 리지스트 도포

패턴 형성 → Au 희생층 형성

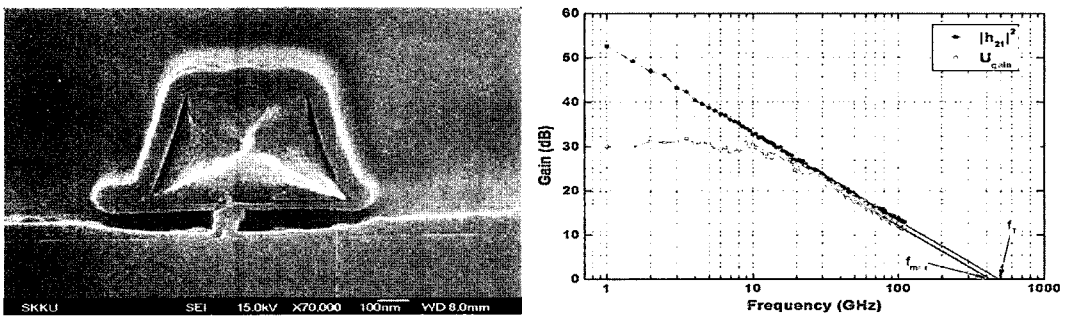
2차 포토리스트 도포 → 패턴 형성

Au 증착 → 리프트 오프

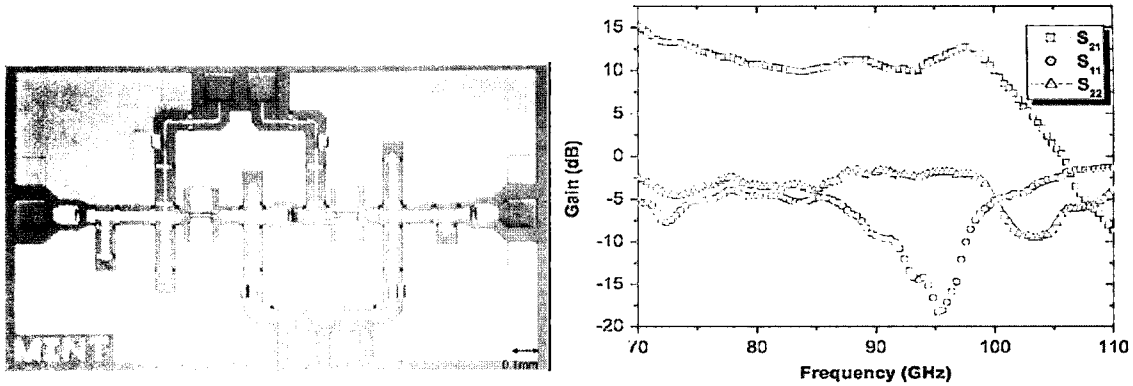
[그림 8] Air-bridge 제작 공정



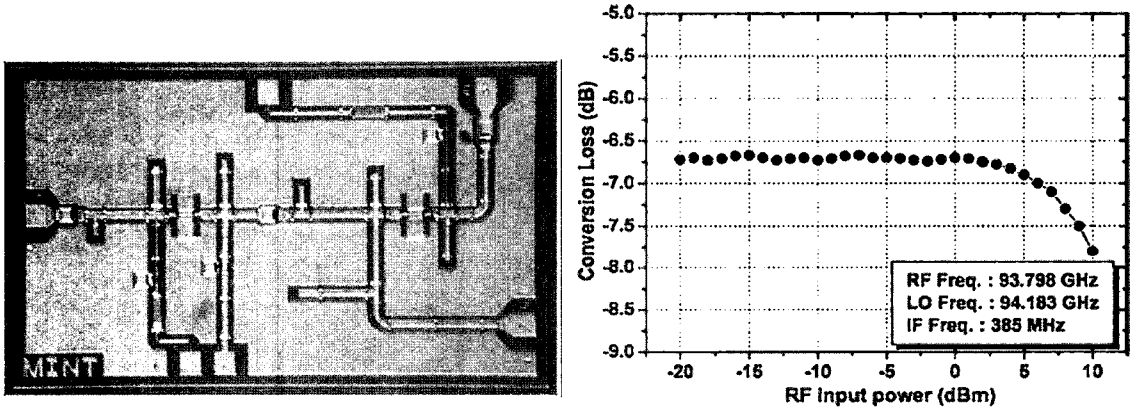

[그림 9] 완성된 air-bridge의 전자현미경 사진




[그림 10] 제작된 50 nm MHEMT 전자현미경 사진 및 주파수 특성




[그림 11] 제작된 W-band 저잡음 증폭기의 현미경 사진 및 측정 결결과




[그림 12] 제작된 94 GHz 능동 혼합기의 현미경 사진 및 측정 결과

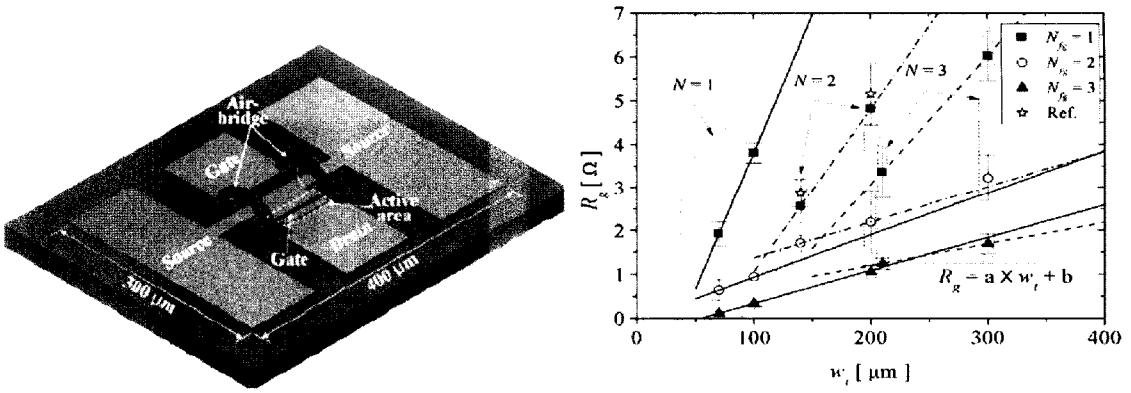
상되는 결과를 얻었다.

### 5-2 이중의 게이트 리세스 구조를 가지는 HEMT

HEMT에서 게이트 리세스 구조는 소자의 전체적인 성능에 지대한 영향을 미친다. 전통적인 리세스 방식으로 wide와 narrow 구조의 리세스 방식이 사용되고 있다. Narrow 게이트 리세스 구조의 HEMT는 소자 표면 효과가 최소로 억제되어 우수한 DC 특성을 보이나, 기생 커패시턴스의 증가로 주파수 특성이 떨어지는 단점이 있다. 이러한 문제점을 해결하고 narrow 리세스 구조의 우수한 DC 특성을 유지하면서 기생 커패시턴스를 최소화하여 주파수 특성을 향상시키고자 제안된 구조가 이중 게이트 리세스(dual gate-recess) 구조이다. 이 구조와 측정 결과를 [그림 14]에 나타내었다. [그림 14]에서 보이는 바와 같이 이중 게이트 리세스 구조에서 DC 및 기생 커패시턴스의 최적화를 통한 $f_{max}$ 특성의 향상을 구현하였다.

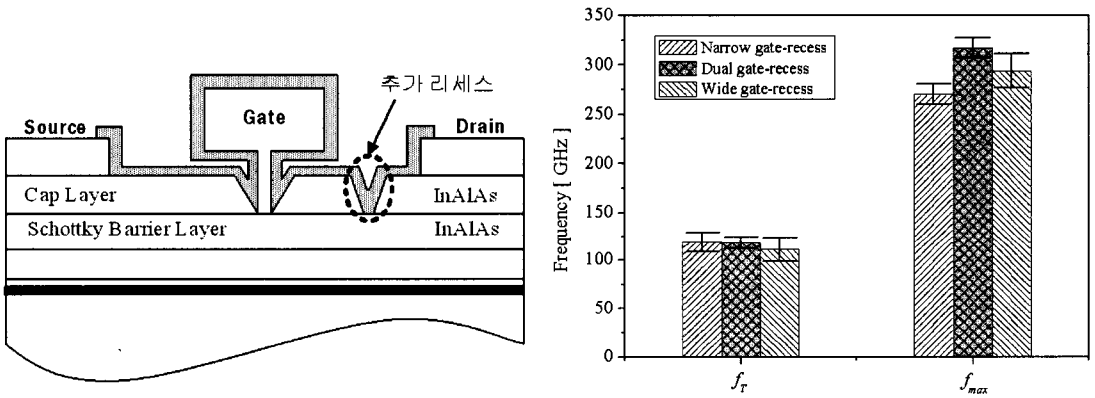
## Ⅵ. 결 론

주파수 할당과 광대역폭을 요구하는 통신 환경에 따라 밀리미터파 대역의 시스템에 대한 요구가 점차




($R_g$: 게이트 저항, $w_t$: 전체 게이트 길이, $N_{gf}$: 게이트 접속 라인 수)

[그림 13] 제작된 다수의 게이트 접속 라인을 갖는 HEMT의 구조 및 특성




[그림 14] 제작된 이중 게이트 리세스 구조 HEMT 및 특성

증가하고 있다. 따라서 밀리미터파 시스템의 중요한 요소인 능동 소자 및 MMIC에 대한 연구가 필수적이며, 국내외적으로 많은 연구가 행하여지고 있다. 이러한 HEMT 및 MIMIC를 설계 및 구현하기 위하여는 많은 지식과 경험이 요구되며, 재현성 있는 공정을 필요로 한다. 이들 부품을 제작하는데 있어 중요한 기술은 나노 스케일의 게이트 패터닝 기술과, air-bridge 기술 및 에칭·금속 증착 기술 등이 요구된다. 이러한 설계 및 제작 기술을 바탕으로 하여 우수한 성능의 MHEMT가 제작 및 보고되고 있으며, 이러한 HEMT를 이용한 저잡음 증폭기·혼합기 등의 MIMIC 연구 사례가 보고되고 있다. 또한, 시스템 성능을 향상시키기 위하여 시스템에서 가장 중요한 부품인 능동 소자의 특성을 개선하기 위한 연구가 활발히 진행되고 있다.

## 참 고 문 헌

[1] Frank Schwierz, Juin J. Loiu, *MoDern Microwave Transistors - Theory, Design, and Performance,* Wiley.

[2] Kai Chang, Inder Bahl, and Vijay Nair, *RF and Microwave Circuit and Component Design for Wireless*

*Systems*, Wiley.

[3] B. O. Kim, M. K. Lee, T. J. Baek, M. Han, S. C. Kim, and J. K. Rhee, "50-nm T-Gate InAlAs/InGaAs metamorphic HEMT with low noise and high $f_T$ characteristics", *IEEE Electron Device Lett.*, vol. 28, no. 7, p. 546.

[4] B. H. Lee, D. An, M. K. Lee, B. O. Lim, J. H. Oh, S. D. Kim, and J. K. Rhee, "Low conversion loss and high Lo-RF isolation 94-GHz active down converter", *IEEE Trans. Microwave Theory and Tech.*, vol. 54, no. 6, p. 2422.

[5] D. An, B. H. Lee, B. O. Lim, M. K. Lee, S. C. Kim, J. H. Oh, S. D. Kim, H. M. Park, D. H. Shin, and J. K. Rhee, "High switching performance 0.1-$\mu$m metamorphic HEMTs for low conversion loss 94-GHz resistive mixer", *IEEE Electron Device Lett.*, vol. 26, no. 10, p. 707.

[6] M. K. Lee, B. O. Lim, S J. Lee, D. S. Ko, S. W. Moon, D. An, Y H. Kim, S. D. Kim, H. C. Park, and J. K. Rhee, "A novel 94-GHz MHEMET-based diode mixer using a 3-dB tandem coupler", *IEEE Microwave and Wireless Components Lett.*, vol. 18, no. 9, p. 626.

[7] B. H. Lee, D. An, M. K., B. O. Lim, S. D. Kim, and J. K. Rhee, "Two-state broadband high-gain W-Band amplifier using 0.1 $\mu$m metamorphic HEMT technology", *IEEE Electron Device Lett.*, vol. 25, no. 12, p. 766.

[8] J. H. Ohm, M. Han, S. J. Lee, B. C. Jun, S. W. Moon, J. S. Lee, J. K. Rhee, and S. D. Kim, "Effects of multi-gate-feeding structure on gate resistance and RF characteristics of 0.1 $\mu$m metamorphic high-electron-mobility transistors", *IEEE Trans. Microwave Theory and Tech.*, Submitted.

[9] J. H. Oh, M. Han, S. W. Moon, S. Lee, and I. S. Hwang, "Dual gate-recess structure of metamorphic high electron mobility transistors for enhancing $f_{max}$", *Journal of the Electrochemical Society*, Accepted.

≡ 필자소개 ≡


김 삼 동

1985년 2월: 서울대학교 전자공학과 (공학석사)
1993년 1월: 미국 스탠포드대학교 (공학박사)
1993년~2002년: 하이닉스 반도체 근무
2002년~현재: 동국대학교 전자공학과 부교수
[주 관심분야] 밀리미터파 수동 및 능동 소자, 반도체 공정, MMIC 설계 및 제작

이 진 구

1975년 2월: 서울대학교 전자공학과 (공학석사)
1982년 4월: 미국 Oregon 주립대 (공학박사)
1982년 11월~1985년 2월: 미국 Cray Research, Research Scientist
1985년 3월~1985년 8월 미국 Microwave Semiconductor Corporation, Research Scientist
1985년 9월~현재: 동국대학교 전자공학과 교수
1990년 7월~1991년 8월: 미국 University of Michigan, Visiting Research Scientist
1999년 7월~현재: 동국대학교 밀리미터파 신기술연구센터 소장
[주 관심분야] 밀리미터파용 능동 소자, MMIC 및 밀리미터파 시스템 설계 및 제작

박 현 창

1986년 2월: 서울대학교 전자공학과 (공학사)
1989년 1월: 미국 Cornell University (공학석사)
1993년 1월: 미국 Cornell University (공학박사)
1993년~1995년: 미국 University of Virginia, Research Associate
1995년~현재: 동국대학교 전자공학과 교수
[주 관심분야] MMIC, 안테나 및 전자기파 응용, 초고주파 반도체소자

오 정 훈

2003년 2월: 동국대학교 기계공학과 (공학사)
2003년 2월: 동국대학교 전자공학과 (공학사)
2005년 2월: 동국대학교 전자공학과 (공학 석사)
2005년 2월~현재: 동국대학교 전자공학과 박사과정
[주 관심분야] 밀리미터파 능동 소자, 밀리미터파 MMIC 및 시스템 설계