

밀리미터파 MMIC의 개발 현황 및 전망

염 경 환

충남대학교 전자공학과

요 약

밀리미터파는 새로운 민간 통신 서비스에 있어 무한한 주파수 자원의 보고로 볼 수 있다. 과거 이의 활용은 빈약한 부품기술로 인해 군무기체계 이외에는 도외시되었으나, '80년대 이후 GaAs pHEMT device 개발과 공정기술의 비약적인 발전으로 이를 민간 서비스에 활용하는 것이 가능하게 되었다. 특히 GaAs pHEMT 공정기술은 회로 설계시 필요한 대다수의 수동부품을 동시에 집적할 수 있어 hybrid 설계시 발생하는 조립의 문제점을 대다수 해결하고 있다. 이보다 늦게 시작된 InP를 기반으로한 pHEMT의 경우 GaAs의 앞서 언급한 속성을 그대로 지니며 더 높은 주파수에 적용 가능하여 밀리미터파 활용 전망을 더욱 밝게 하고 있다. 본 논문에서는 이들의 개발 현황 및 이들을 이용한 집적회로의 현황을 살펴보고 향후 발전 방향을 예측하고자 한다.

Abstract

Millimeter wave is expected as the unlimited useful frequency resources for the next generation wireless communication services. In the past, its usage was limited to the military warfare due to lack of millimeter devices. The development of GaAs pHEMT in 1980 and the progress in the processing technologies made the new consumer wireless services possible utilizing millimeter waves. Specially, most of passive components necessary

for circuit design can be integrated with GaAs pHEMTs and this removes the difficulty in assembly unavoidable in hybrid design. InP based pHEMTs developed later possess all the properties of GaAs and it shows many advantages in higher frequency applications. In this paper, the status and trends of those devices and MMICs are presented and the future developing trends is also described.

I. 서 론

밀리미터 파란 파장이 mm인 전자파를 말하며, 이는 주파수 30~300 GHz의 전자파에 해당한다. 이와 같이 밀리미터파는 파장이 짧은 관계로, 이를 이용 system 구현 시 부품의 크기가 작아지게 되어, 소형 경량화를 기할 수 있게 된다. 소형 경량화 가능성은 밀리미터파 시스템을 이동체에 탑재하는 것을 용이하게 하여, 포탄의 탄두 센서, missile, 탱크에 탑재되는 소형 레이더 등에 사용됐다. 뿐만 아니라 밀리미터파를 이용할 경우 파장이 짧은 관계로 소형의 안테나로도 높은 지향성을 얻을 수 있고, 대기 중을 전파 시 감쇄가 심한 관계로 도청이 곤란하여, 이를 이용 보안을 요하는 군 통신 등의 군용 무기체계에도 활용되어 왔다.

이러한 장점에도 불구하고 과거에는 주로 군 무기체계로만 활용되었던 것은 이 주파수 대역의 능동 소자로서는 Gunn, IMPATT 등의 diode 이외에는 적절한 능동소자가 없었으며, 또한 system 구현시

필요한 각종 component들이 마이크로파에 비해 다양하지 않아, 밀리미터파를 이용한 system의 구성이 어려웠기 때문이다. 또한 앞서와 같은 diode등의 소자를 활용 system 구현할 경우 효율이 나쁘기 때문에 방열 문제를 해결하기 위해서도 guiding structure를 이용한 hybrid 설계를 피할 수 없게 된다. 그러나 소자 연결 시, 기존에 활용되던 wire bonding 등의 조립으로 발생하는 기생소자 발생을 최소화하기 위해서 마이크로파에 비해 훨씬 까다로운 조립을 요구하게 된다. 따라서 이를 저가로 대량 공급하는 것은 매우 어려운 일이었다. 이러한 면 때문에 자연스럽게 이 주파수 자원을 이용한 새로운 민간 서비스를 제시하는 것은 기피되어 왔다.

그러나 최근에는 이동통신과 위성통신의 활성화 등에 힘입어 통신량의 급격한 증가로 기존 개발된 기술로 활용 가능한 저역에서의 주파수 자원 활용은 포화되었다고 해도 과언이 아니며^[1], 이제 더 이상 저역 주파수 자원을 통한 새로운 서비스의 제시는 어렵다고 볼 수 있다. 따라서 필연적으로 더 높은 주파수 자원을 활용하기 위한 기술개발이 필요한 단계이며, 이는 자연스럽게 밀리미터파의 연구를 가속시켰다고 볼 수 있다. 최근 이러한 밀리미터파를 활용한 대표적인 새로운 서비스로 제시되는 것들로는 LMDS(Local Multi-point Distribution Service), 충돌방지 시스템(Collision Avoidance System), 밀리미터파 대역에서의 위성통신 등을 들 수 있다.

여기에 보조를 맞추어 기존 마이크로파에 사용되던 GaAs MESFET의 특성을 개선한 HEMT 소자의 발견과 이를 개선한 pHEMT(pseudomorphic High Electron Mobility Transistor) 또는 MODFET(Modulation Doped Field Effect Transistor)의 개발은 이를 이용한 밀리미터파 부품제작에 대량생산의 길을 제시 가능하게 하였다. 이들은 효율면에서 기존의 Gunn이나 IMPATT에 비해 훨씬 높을 뿐만 아니라, 절연도가 알루미늄(Al_2O_3) 세라믹 기판에

비견할 만한 semi-insulating 기판에서 성장되어, 여타의 수동소자까지도 직접 집적하는 것이 가능하기 때문이다. 이는 과거 hybrid 설계시 피할 수 없었던 기생소자의 발생을 최소화시키는 것을 가능하게 하였다.

본 논문에서는 이러한 면에서 밀리미터파 부품제작 시 핵심이 되는 GaAs pHEMT를 기반으로 한 집적회로의 현재의 기술상태를 알아보고, 이를 이용한 system 구현 시 문제점을 검토하려고 한다. 따라서 2장에서는 밀리미터파에 응용되는 GaAs pHEMT의 최근 몇 년간의 발전추세와 향후 전망 그리고 이를 이용한 집적회로 구현 시 가능한 수동소자의 기술 현황을 보고, 3장에서는 이를 이용한 밀리미터파 MMIC(Monolithic Microwave Integrated Circuit)회로를 저잡음증폭기, VCO(Voltage Controlled Oscillator), 전력증폭기, 혼합기 등의 회로로 구분해 현재의 MMIC기술을 살펴보고, 이를 이용한 system 구현 시 문제점과 해결방향을 예측해 보고자 한다.

II. 밀리미터파용 Device

Device는 system 구현 시 기본소자가 되며, 이는 크게 능동소자와 수동소자로 구분할 수 있을 것이다. 1에는 현재까지 가장 빠른 능동소자인 pHEMT의 몇 년간 개발추세를 보고, 2에는 이에 집적 용이한 수동소자들의 전기적 특성의 현황을 살펴보려 한다^[2].

2-1 능동 소자

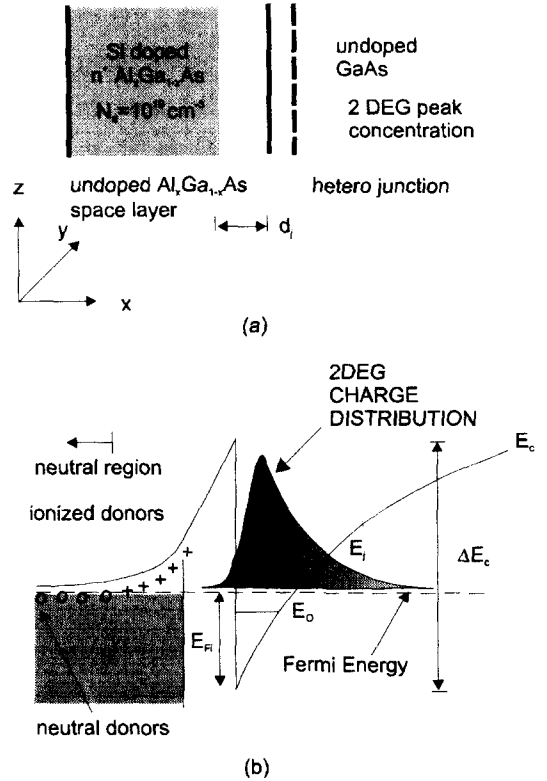
능동소자로서 pHEMT는 현재까지 인류가 고안한 가장 빠른 transistor이며 향후 몇 년 후에도 아마 가장 빠른 transistor로 자리 매김 할 것으로 예상된다.

GaAs에서는 Si보다 전자의 mobility는 6배 정도

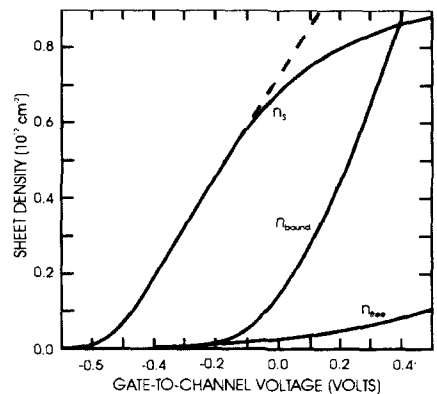
빠르며, 이로 인해, 같은 정도의 lithography 기술로 FET를 제작할 경우 GaAs는 차단주파수(cutoff frequency: f_T)와 이득에서 개선을 보이게 된다. 그러나 근본적으로 mobility는 doping한 impurity에 의해 제한되며, carrier 농도를 높이기 위해서 impurity를 더욱 doping할 경우 전자의 mobility는 더욱 떨어지게 된다. 이의 개선의 일환으로 Dingle과 다른 공동 연구자들은^[3] MBE(Molecular Beam Epitaxy)기법을 활용 AlGaAs와 GaAs의 2개의 층을 semi-insulating GaAs wafer위에 성장시키고, 이 중 AlGaAs층에만 doping을 시켰다. 이와 같이 형성된 hetero-structure에서 AlGaAs는 GaAs에 비해 wide-bandgap을 갖기 때문에, 2개가 접합된 부분에 conduction band energy 분포는 [그림 1]과 같이 우물이 생기게 되고, 이 우물에는 다량으로 doping된 AlGaAs 층의 전자들이 확산하여 이 우물에 모이게 된다. 이들을 매우 좁은 영역에 모여 전류에 기여하기 때문에 2DEG(2-Dimensional Electron Gas)라고 부른다. 이 때 이 전자들의 mobility는 channel이 형성되는 GaAs layer에는 impurity가 존재하지 않기 때문에 impurity scattering으로 제한되던 전자의 mobility는 급격히 증가하게 되어 차단주파수와 이득의 상승을 얻을 수 있게 되었다.

그러나 이러한 mobility의 개선 예상에도 불구하고 1980년도 중반까지 이러한 MODFET의 성능 개선을 볼 수 없었다. 이것은 전류를 구성하고 있는 외부 전계에 의한 전자들의 이동이 2DEG 뿐만 아니라 AlGaAs 층의 자유전자들(그림 2의 n_{free})과 AlGaAs 층의 donor 들에 의한 전자들의 기여로(그림 2의 n_{bound}) 후자의 두 가지 성분이 성능개선을 전류가 높은 영역에서 제한하기 때문이다^[4]. 즉 [그림 2]와 같이 고 전류 영역에서는 AlGaAs 영역의 donor에 속박된 전자들의 density가 급격히 증가하여 2DEG 성분보다 높아지기 때문이다.

기술적인 진전은 MODFET에 사용되던 GaAs



[그림 1] HEMT band-gap 구조



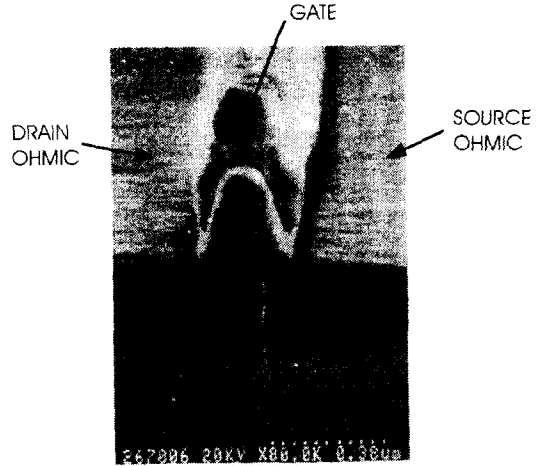
[그림 2] 인가 전압에 따른 전자들의 density 변화

channel 대신 GaInAs를 사용함으로써 얻어졌다. GaInAs는 결정 크기가 AlGaAs나 GaAs에 비해 커

서 pseudomorphic 기법에 의해 성장시킬 수 있었다^[5]. 물론 이들의 두께를 임계치 이하로 할 경우 결정 배열에 따른 dislocation에도 불구하고 성공적으로 성장시킬 수 있었다. 이로써 AlGaAs와 GaInAs사이에는 conduction band에 2배 가량 더 깊은 우물을 형성할 수 있고 이로 인해 AlGaAs 영역의 대다수 전자는 GaInAs channel에 모이게 되어, 2DEG 성분이 커져서 modulation efficiency를 개선할 수 있었기 때문이다.

뿐만 아니라 이와 함께 공정기술의 개발로 이 GaAs pHEMT의 특성 개선을 가져올 수 있었다. 1984년에는 공정기술의 개선으로 0.33 um gate length를 갖는 pHEMT를 제작했으며 1988년에는 0.1 um의 gate length를 갖는 pHEMT를 제작 가능함을 보였다. 이렇게 하여 줄어든 폭으로 인해 gate 단자의 저항은 급증하게 되는데, 이는 개선된 본질적인 transistor의 성능을 열화시키게 된다. 이를 개선하기 위해 mushroom 또는 T-gate라고 불리는 process가 성공적으로 개발되었으며^[6] 이는 contact를 형성하는 면에서는 여전히 작은 gate length를 유지하면서 단면적의 증가로 gate 저항을 0.1 um 폭에서도 2,000~200 ohm/mm로 줄일 수 있어 이득과 잡음지수의 개선을 유지하도록 하였다^[8].

이와 병행하여 개발된 InP substrate를 이용한 pHEMT의 경우 더욱 큰 성능의 개선을 보이고 있다. 여기서는 AlInAs/GaInAs의 hetero-structure를 InP 기판 위에 키우게 되는데, 이들의 conduction band에서의 우물의 깊이는 GaAs에 사용되었던 AlGaAs/GaAs의 두 배에 가까우며 따라서 GaAs pHEMT에 비해 더 많은 2DEG를 얻을 수 있게 된다. 결과적으로 더 높은 modulation efficiency를 얻을 수 있고 이는 차단주파수와 이득에 있어 개선을 가져오게 된다^{[13],[14]}. 아직은 공정기술이 GaAs에 비해 성숙된 편이 아니어서 GaAs보다는 널리 사용되지는 않지만 차후 공정기술개발과 더불어 GaAs보다 보편화된 밀



[그림 3] 0.1um pHEMT SEM

리미터와 소자로 사용될 것으로 기대된다.

2-1-1 저잡음 MODFET

MODFET의 고주파특성은 이를 저 잡음 증폭기 이용에 충분한 가능성을 제시하고 있다. 이 device의 잡음을 평가하는데는 GaAs MESFET에 대해서 Fukui에 의해 아래와 같이 제시된 준 경험 식이 있다.

$$F_{\min} = 1 + K_f \frac{f}{f_T} \sqrt{g_m(R_g + R_s)} \quad (1)$$

여기서 F_{\min} 은 최소 잡음지수를 나타내며, R_g , R_s 는 각각 gate 및 source 단자에서 발생하는 parasitic 저항들이다. 그리고 K_f 는 device에 따라 결정되는 주파수에 무관한 상수이다.

또한 MESFET에 대한 잡음의 이론적인 처리로서는 Pucel 등에 의해 다음과 같이 표시되기도 한다.

$$F_{\min} = 1 + 2K_f \frac{f}{f_T} \sqrt{K_g g_m(R_g + R_s)} + 2K_g \frac{f}{f_T} g_m(R_g + R_s + K_c R_i) \quad (2)$$

최근 Pospieszalski는 intrinsic FET의 경우 gate 와 drain에서 발생하는 잡음이 순수한 독립된 열 잡음이라고 가정하고 다음과 같은 결론을 내렸다.

$$F_{\min} = 1 + 2K_f \frac{f}{f_T} \sqrt{4g_{ds}r_{gs}} \quad (3)$$

이들에 대한 실험적인 뒷받침은 좀더 연구를 통해 밝혀져야 하나, 공통적인 것은 cutoff frequency 가 높을수록 최소잡음지수는 작아지며, parasitic 저항이 작을수록 역시 잡음지수는 개선되는 것을 알 수 있다. 그리고 식상으로는 분명치 않지만 이득이 높을수록 잡음지수가 개선되는 것으로 결론 내릴 수 있다. 이러한 면에서 MODFET은 다른 device보다 낮은 잡음지수를 보여줄 것이 분명하다.

MODFET의 저 잡음 특성에 대한 처음 보고는 Joshin 등^[9]과 Berenez 등에^[10] 의해 보고되었다. 그 이후 지속적인 진전으로 최저잡음지수가 18 GHz에서 1.3 dB를 갖는 0.25 um gate length의 AlGaAs/GaAs MODFET가 보고됐으며, 0.1 um gate length의 경우 18 GHz에서 0.5 dB 60 GHz에서 2.1 dB의 잡음지수를 갖는 소자들이 나타났다^{[11],[12]}. 그 이후 TRW와 GEC Marconi사에서는 이들의 특성을 꾸준히 개선하여 pseudomorphic Ga_{1-x}In_xAs channel을 이용한 GaAs를 기반으로한 MODFET의 경우 60 GHz

에서 1.4 dB 잡음지수를 가능하게 했으며, 94 GHz에서는 2.1 dB 잡음지수를 갖는 것이 보고되었다. [그림 4]에는 이러한 device의 상황을 요약해서 보여주고 있다.

2-1-2 Power MODFET

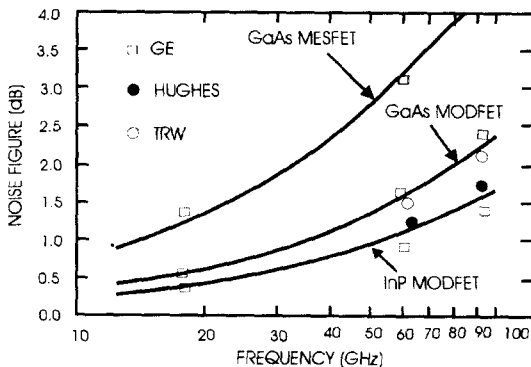
MODFET는 또한 current density가 높고 높은 차단주파수를 가지므로 전력증폭기로도 응용되는 것이 가능하다. 전력증폭기로 사용될 때 중요한 것은 출력과 효율이 될 것이다.

출력은 [그림 5]와 같은 I-V 특성에서 A급으로 DC bias될 경우 최대출력 P_o는

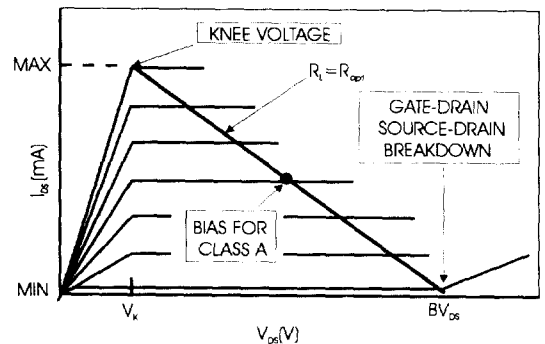
$$P_o = \frac{1}{8}(I_{\max} - I_{\min})(BV_{gd} - V_{po} - V_k) \\ = \frac{1}{8}(I_{\max} - I_{\min})(BV_{ds} - V_k) \quad (5)$$

로 표시될 수 있다.

따라서 높은 출력을 위해서는 gate와 drain사이에서 형성된 break down 전압이 높을 필요가 있다. 이러한 면에서 AlInAs/GaInAs MODFET의 경우는 Schottky junction의 낮은 항복전압 때문에 power FET로 잘 검토되지 않는다.



[그림 4] pHEMT의 최저잡음지수 F_{min}



[그림 5] I-V_{ds} 특성

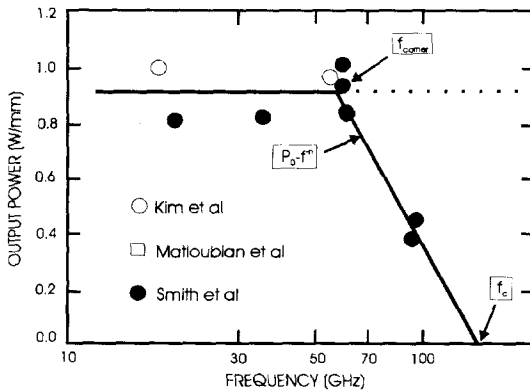
효율, PAE(Power Added efficiency)의 경우

$$PAE = \frac{(P_o - P_i)}{P_{dc}} = \frac{(1 - 1/G_a)}{2} \quad (6)$$

로 표시되므로 이득이 높을수록 효율은 개선이 됨을 알 수 있다.

AlGaAs/GaAs MODFET의 power 특성이 처음 보고된 것은 1985년 Smith등에 의해서 였다. 이 MODFET의 경우 PAE 및 이득은 기존 MESFET에 비해 개선됐으나 2DEG sheet density가 낮은 관계로 최대출력은 0.33 W/mm로 제한되었다. 따라서 이것을 개선하기 위해 (1) MODFET structure개선 (2) GaAs channel에 doping (3) pseudomorphic기법에 의해 성장된 GaInAs channel의 사용으로 이것을 개선하였다. 현재의 power MODFET의 상태는 [그림 6]에 나타내었으며 60 GHz까지 단위 gate width당 1.0 W/mm의 power capability를 보여주고 있으며 60 GHz 이후는 급격히 감소하는 것을 알 수 있다.

이것은 60 GHz를 넘어서는 기생소자들의 기여로 이득을 얻기 위해서 [그림 6]에서 지정된 최적 impedance를 갖지 못하고, 소 신호 이득이 최대로 되



[그림 6] 단위 gate width당 1.0 W/mm의 power capability

는 impedance에 가까워지기 때문이다. 분명히 이것들의 개선은 MODFET의 고주파 특성 개선으로 더 개선될 것으로 사료된다.

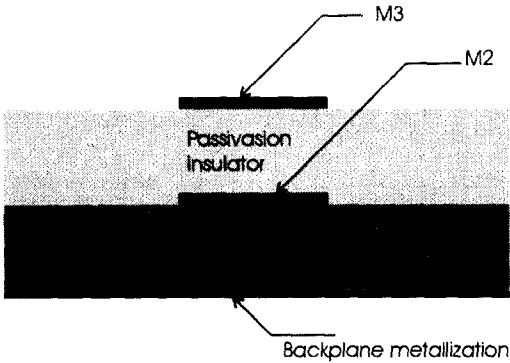
2-2 수동소자

System 구축 시 사용되는 수동소자로서는 저항, capacitor, inductor, 그리고 전송선들이 있다. 이들은 대부분 능동소자와 함께 부품 구성 시 정합회로, bias 회로 등으로 사용되며 능동소자 제조 시 semi-insulating substrate 위에 용이하게 제작될 수 있는 소자들이 된다. 반면 여파기, 공진기의 경우 마이크로스트립 형태로 제작될 수는 있으나 이들의 Q는 높지 않고 또한 면적사용을 볼 때 비경제적인 면이 있다. 최근 MEMS(Micro-ElectroMechanical System)를 이용 여파기 및 공진기 등이 제안되고 있어 이들의 현재 상황을 간단히 살펴보고자 한다.

2-2-1 집적이 용이한 수동 소자^{[15],[16]}

우선 고주파 회로 구현 시 근본이 되는 전송선의 경우 대부분 2가지 전송선 형태를 제시하고 있다. [그림 7]에서 보는 바와 같이 1차적으로 semi-insulating substrate에 직접 pattern으로 나타나는 M2 전송선과 박막인 passivation layer 위에 최종 metalization 되어 나타나는 M3 전송선으로 볼 수 있다. 이들의 특성 임피던스는 통상적으로 40~120 ohm 범위에서 용이하게 구현되며 두께에 따라 다르지만 약 10 mA/um의 전류 전송능력을 가지고 있다.

Inductor의 경우, 작은 inductance의 경우(<0.1 nH) 전송선으로 구현되는 것이 일반적이지만 일반적으로 이보다 큰 inductor의 경우 [그림 8](a)와 같은 spiral 형태를 사용한다. 이들의 공진 주파수는 그림 8(b)에 나타내었으며, turn수가 증가하면 공진주파수가 10 GHz이하 됨을 알 수 있다. 따라서 일반적으로 이 주파수를 넘어서는 잘 사용되지 않는다. 그



[그림 7] 전송선의 구성

리고 이들의 전류 전송능력 역시 전송선의 경우와 같게 된다.

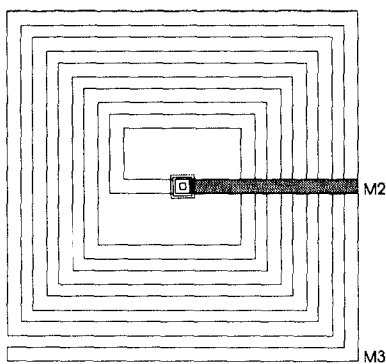
Capacitor의 경우는 semi-insulating substrate 위에 나타나는 절연 층을 이용한 것으로서 이들의 구성에 따라 대개 두 가지 또는 한 가지 capacitor를 제공하게 된다. 이들의 값의 범위는 0.01~10 pF order의 capacitor를 구현하는데 사용되며 일반적으로 직렬 공진 등의 현상이 밀리미터 파에서는 자주 나타나게 되므로 이들의 사용에는 세심한 주의를 요하게 된다. 그림에는 이들의 구성 방법을 간단히 나타내

었다.

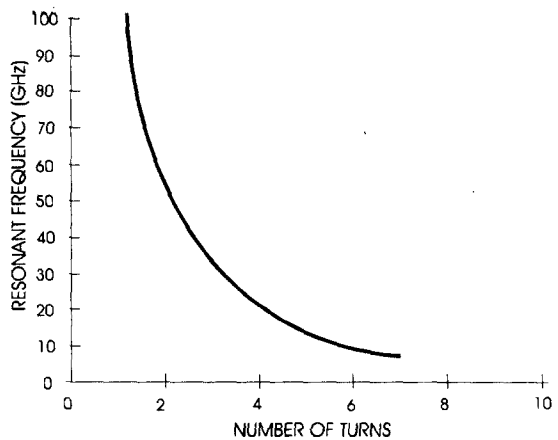
저항으로서는 GaAs mesa 영역을 사용하는 방법과 저항체 재료를 사용하는 방법이 있다. 일반적으로 정교한 값을 요구하는 밀리미터파 회로 부분에는 저항체로서 NiCr 등의 재료가 사용되며 이들의 sheet resistivity는 일반적으로 50 ohm/square의 값을 보인다. 그리고 이들의 전류 전송능력은 약 0.5 mA/um 정도이다. 그리고 mesa 저항의 경우 정확한 값의 구현은 곤란하며 이들은 큰 값의 저항을 구현할 때 사용되며 밀리미터 파 회로에는 좀처럼 사용되지 않는다.

2-2-2 공진기 및 여파기

밀리미터 대역에서의 마이크로스트립이나 Co-Planar Waveguide(CPW)등은 여러 가지 문제를 가지고 있다. 즉, 주파수가 증가함에 따라 유전체 손실, dispersion, 방사 손실 등이 증가되는데 이것은 선로를 받치고 있는 substrate의 air와 유전체와의 discontinuity 때문에 발생된다. 통상 위의 문제점을 해결하기 위해 via hole이나 혹은 substrate를 가늘

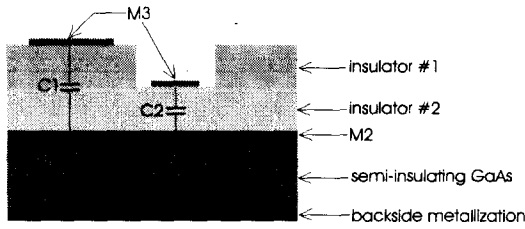


(a)



(b)

[그림 8] Spiral inductor 형상(a) 및 병렬공진 특성(b)



[그림 9] Capacitor의 구성

게 하는 등의 공정에 대한 연구를 하였지만, 또 다른 해결방법으로 micromachinery method에 의한 micro-shield 선로를 만드는 것이 있다. 이 선로는 선택적인 silicon etching 작업과 conductor를 받치는 박막에 의해 만들어지며, 박막 위에 올려진 선로는 공중에 있는 것과 비슷하기 때문에 substrate에 의한 선로보다 넓은 $50\sim 300\ \Omega$ 의 특성임피던스 범위를 갖고 있다. 이로써 필터와 다른 평면 회로 응용에 대해 보다 더 유용하게 적용할 수가 있다. 이 선로를 가지고 90 GHz의 차단 주파수를 갖는 7단의 0.5 dB Chebyshev에 의한 stepped low pass filter를 FDTD(Finite-Difference Time-Domain)방법에 의해 설계할 경우에 1 dB 이하의 통과대역 삽입손실을 가지며, 제작 결과는 FDTD의 결과와 유사함을 나타낸다^[17]. 또한 같은 사양을 가지는 GaAs substrate의 GCPW(Grounded-CPW)필터를 FDTD에 의해 비교를 할 경우에 microshield 선로 filter는 특성 면에서 GCPW 필터보다 20 dB 이상의 개선을 나타낸다. 그리고, 주파수가 증가할수록 GCPW필터의 반사손실(return loss)은 나빠지는 반면에 microshield 선로 filter는 여전히 높은 반사손실을 나타냄을 볼 수가 있다. 위의 결과를 볼 때, 밀리미터파 대역의 평판 회로에서 micromachining과 박막 기술은 효과적으로 dispersion, radiation loss, 그리고 dielectric loss등을 줄일 수 있는 방법중의 하나라고 고찰된다. 이들의 연구는 현재는 초기라고 보여지며, 계속적인 발전이 기대되고 있다.

III. MMIC(Monolithic Microwave Integrated Circuits) 현황

통신 system 구현 시 가장 많이 사용되는 부품은 저잡음 증폭기, 혼합기, 발진기 등이 될 것이다. 이들의 MMIC 제작 현황을 살펴보고 개선 방향을 점검하려고 한다.

3-1 저잡음 증폭기

저잡음 증폭기의 two port device를 이용한 회로 설계는 잘 정립되어 이미 많은 text^[40]에 기술되어 있다. 우선 device의 잡음 parameter를 이용 입력측을 최소 잡음점으로 설정하고 출력측은 최대출력을 이끌어 내기 위해 복소 정합시키는 것이다. 이 때 최소 잡음점은 일반적으로 VSWR을 최소화시키는 점이 아니어서 종종 balanced 방식으로 구성되기도 한다. 또는 balanced design을 피하기 위하여 device에 약간의 궤환을 부여하고 이를 통해 형성된 새로운 two port device에 대해 저잡음 증폭기 설계를 동일한 방식으로 처리하기도 한다. 이와 같이 RF에서 회로를 설계한 후 여기에 DC bias를 인가하기 위한 DC block과 DC feed 회로를 추가 설계를 완료할 수 있다.

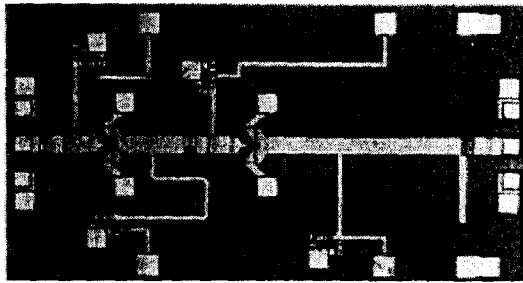
이를 구현하는데 있어 문제가 되는 것은 조정 가능성과 입력 정합회로의 손실이 문제가 되는데, 이 때 발생하는 손실은 곧장 잡음지수에 더해지게 되어 정합회로의 손실을 줄이는 것이 중요한 문제가 된다. 특히 잡음지수가 낮은 device의 경우 이 문제는 더욱 심각한 문제가 된다. 또한 저잡음 증폭기의 경우 대부분 antenna에 직접 연결되는데, 안테나의 출력은 waveguide 형식이어서 이것을 동축 모드로 변환시 사용되는 probe의 불 균일성을 보상하기 위해 조정문제가 대두되는데, 이 또한 hybrid design에 비해 문제시된다.

저잡음 증폭기의 MMIC화는 GaAs MESFET이 제시된 후 이를 이용 설계 제작된 많은 MMIC들이 보고되어 왔다^{[24]-[26]}. 이들 저잡음 증폭기는 초기에는 마이크로파 주파수에서 주로 제작되었으며, 이때 요구되는 inductor의 값은 MMIC에서 구현하기에는 너무 값이 커서 lumped element를 이용 설계되기도 하였다. 그러나 마이크로파에서는 능동소자만을 packaging한 후 이를 이용 hybrid로 설계할 경우 MMIC 때의 그것보다 훨씬 잡음지수를 작게 만드는 것이 가능하여 이들의 MMIC화는 경쟁성이 적었다.

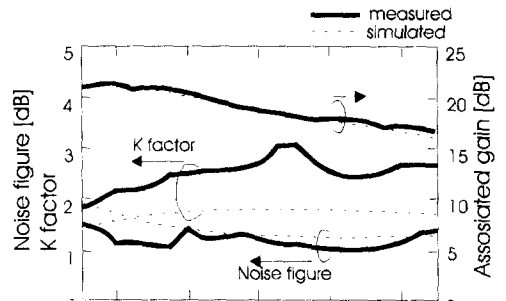
반면 밀리미터 파에서는 이와 같이 hybrid 설계를

할 경우 발생하는 기생소자 값이 작은 것이 아니라서 본질적인 어려움에 부딪히게 된다. 밀리미터 파에서의 저잡음 증폭기는 현재 약 200 GHz까지 보고되었으며^[30], 추후로도 소자의 혁신이 나타날 경우 이보다 훨씬 더 높은 주파수도 가능하리라 본다. 설계 기법에 있어서는 마이크로파 설계 기법과 크게 다르지 않으며 여기서 사용되었던 분포 정수 회로 기술을 사용 그대로 MMIC화하는 것이 가능하다.

[그림 10]에는 케환에 의하여 최소 잡음점을 변화시키는 방식의 0.15 μm T-gate pHEMT를 이용한 밀리미터파 저잡음 증폭기를 보였으며, 이때의 잡음지수는 30 GHz에서 약 1 dB의 잡음지수를 보이고

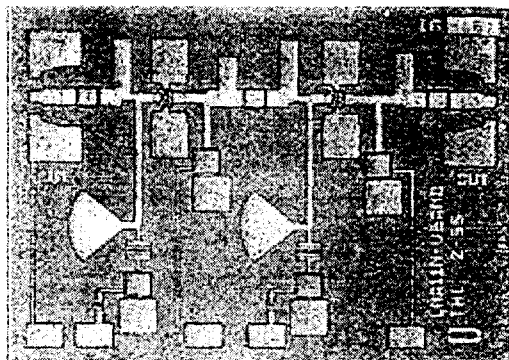


(a)

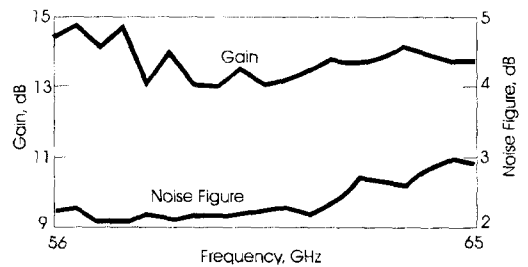


(b)

[그림 10] 0.15 μm T-gate pHEMT 저잡음 증폭기 사진(a) 및 특성(b)



(a)



(b)

[그림 11] 0.1 μm gatelength InP pHEMT를 이용한 저잡음증폭기 사진(a) 및 특성(b)

있다^[28]. 그림에서 제시된 바와 같이 이것은 과거 DBS(Direct Broadcasting Satellite)에 사용되던 마이크로파 LNA 회로 설계와 설계방식에 있어서는 크게 다르지 않음을 알 수 있다. [그림 11]에서는 최소 잡음점을 역시 케환에 의하여 조정된 설계 방식의 0.1 μm gate-length InP HEMT를 사용한 저잡음 증폭기로서 60 GHz에서 약 2~3 dB의 잡음지수를 보여주고 있다^[29].

3-2 전력증폭기

전력증폭기의 회로 설계 방법은 크게 두 가지로 분류될 수 있다. 첫 번째 방법은 on wafer 상에서 device의 최대출력을 얻어 내기 위해서 load pull 후, 이 때 얻어낸 최적출력점을 이용 설계하는 방식이며, 두 번째는 device를 대신호 modeling 한 뒤 이를 이용 harmonic balance 방법을 거쳐 설계하는 방식이다. 전자의 경우 현재로서는 on wafer 상에서 출력이 커질 경우 load pull 시험을 하는데 어려움이 있으며, 후자의 경우 B급 이하의 동작점에서 고조파가 많이 발생하는 경우는 이의 정확도가 문제시 된다. 또한 이 최적 출력점은 출력이 커질수록 민감하여 문제가 된다.

이를 구현시에는 최적출력점을 정합회로로 구성 시 발생하는데 출력 정합회로의 손실은 곧 출력의 감소를 가져와 문제가 된다. 또한 최적 출력점은 출력이 커질수록 정합회로 값에 예민하여 이를 정확히 설계하는 것은 부담이 되게 된다. 따라서 마이크로파에서는 종종 출력 정합회로만 hybrid design으로 독립시키기도 하였다. 이는 향후 기술의 발전을 통해 개선될 것으로 사료된다.

전력증폭기를 MMIC로 구현을 하였을 때, 동작 주파수가 커지게 되면, 출력 전력과 전력효율(PAEs; Power Added Efficiencies)에 제약을 갖게 되어, 현재 밀리미터파용 device의 경우 1W급 아래에서의

상용화되고 있다. GaAs를 기반으로 한 HEMT의 경우에 60 GHz까지는 특성이 좋은 반면 그 이상의 주파수에서는 특성 열화를 일으키게 된다. 이에 반하여, InP를 기반으로 한 HEMT는 GaAs를 기반으로 한 HEMT보다 높은 이득, 높은 차단 주파수, 낮은 source 저항, 높은 최대전류밀도, 그리고 높은 기판 열전도도(substrate thermal conductivity)를 갖는다^{[31],[32]}. 실제로 W-band에서의 150 m GaAs를 기반으로 한 HEMT전력 증폭기 13%의 PAE와 63 mW의 출력인 반면에, 0.15 μm , 320 μm 의 InP HEMT의 경우에는 94 GHz일 때, 23%의 PAE와 40 mW의 출력을 나타낸다^[33].

InP HEMT는 InP 기판 위에 MBE(Molecular Beam Epitaxy)방식으로 InAlAs를 성장시킨 후에, Si plane를 놓고, InGaAs를 얻힌 후에 다시 Si plane과 InAlAs를 순서대로 성장시킨 후, n+ InGaAs를 놓은 후에 silicon nitride로써 passivation을 한다. 여기서 InAlAs과 InGaAs는 2DEG의 양을 늘리기 위한 것이고, 두 개의 Si plane은 높은 채널의 면적 밀도를 얻기 위한 것이다. n+ InGaAs층과 InAlAs의 두께는 낮은 source 저항과 높은 bias에서의 높은 차단 주파수, 그리고 높은 breakdown을 얻기 위해서 동시에 최적화 된다.

InP HEMT소자의 출력 전력 능력과 최대 drain 동작 전압의 한계는 drain과 source의 낮은 breakdown 때문인데, 이것은 여러 사람들이 지적했던 것처럼 channel의 impact ionization에 의한 것으로 보여진다^{[34],[35]}. 이에 보다 발전된 소자의 구조와 공정 에 의해서 나온 breakdown과 이득을 얻을 수 있다면 94 GHz 이상의 주파수에서도 원하는 출력 전력과 출력 효율을 얻을 수 있을 것이다.

3-3 혼합기 및 발진기

혼합기의 경우 저역에서 진보된 Gilbert cell을 이

용하는 방식과 diode mixing을 이용하는 방법이 있게 된다. 이중 Gilbert cell의 경우 밀리미터 파에서는 선로의 연결로 인해 실제적인 설계는 어려운 것으로 예상된다. 대부분의 mixer 구성은 diode회로에서 진보된 구조를 사용하고 있다. 이들은 topology에 따라 single-ended, single balanced, double-balanced 구조로 나눌 수 있는데 double balanced의 경우 mixer에서 발생하는 많은 고조파중 우수 고조파 성분을 제거 mixer가 고조파에 의해서 포화되는 것을 막는데 가장 훌륭한 구성이라고 볼 수 있다. 여기서 가장 문제가 되는 것은 저역에서는 ferrite core를 이용한 balun transformer가 있어 이를 구현하는 것은 용이한 일이었으나, 이에 적절한 것이 밀리미터파에는 없어, 밀리미터파 대역에서 이를 MMIC 공정으로 소화하는데 많은 연구가 보고되고 있다^{[36]~[39]}.

그러나 이들의 대부분은 표준 GaAs MMIC 공정과는 거리가 있으며, 차후의 연구를 통해 표준화가 될 경우 이들을 one chip화 하는 것이 가능해질 것으로 사료된다. 현재의 MMIC 공정으로 가장 용이하게 one chip으로 제작될 수 있는 것으로는, 협대역에서 branch line coupler 또는 balun을 대치한 single balanced 형식에 대한 설계가 다수 보고되고 있다.

발전기의 경우 MMIC 기법에서는 마이크로스트립 이외에는 적절한 공간기가 존재하지 않고 또한 tuning 소자로 사용되는 varactor diode가 process에 공존하기가 어려운 관계로 이를 MMIC로 제작하는 것은 어려운 것으로 예상된다. 이것이 MMIC로 제작될 경우 위상잡음 문제가 발생하며 아직도 대부분은 <표 1>과 같이 준 MMIC형태로 제작된 것이 보고되고 있다.

<표 1> 발전기 설계에 대한 몇 가지 연구 보고서 정리

Year	Active device	Types of resonators	Operating frequency (GHz)	Output power / efficiency	Phase noise level (dBc / Hz)	Remarks
1975	GaAs MESFET	Microstrip resonator	8.8	12.1 mW / 7.8 %		MIC
1977	GaAs MESFET	YIG	5.9~12.5	8~22 mW max, 8 %		MIC
1980	GaAs MESFET	Dielectric resonator	11.85	70 mW 20 %		MIC
1982	GaAs MESFET	On-chip varactors	11.1~14.4 16.0~18.7			MMIC
1984	GaAs MESFET	On-chip varactors	11.6~20.0	5.5~15.8 dBm		MMIC
1987	GaAs MESFET	Dielectric resonator	10.74	16 dBm	-80 (10 kHz)	Quasi-MMIC
1988	GaAs MESFET	On-chip varactors	5.9~12.6	14~19 dBm	-100 (1 kHz)	MMIC
1988	GaAs MESFET	External varactors	2.5~6.0	17.5 dBm 9.3 dBm	-92 (100 kHz)	Quasi-MMIC
1988	Silicon Bipolar	DR-VCO	1.69 0.5 % range	8~12 dBm / 3%		MIC
1991	HBT	GaAs varactor	2.7~6.2	3.5~10 dBm	-105 (100 kHz)	MIC
1991	HBT	Silicon varactors	6.9~15	9~12 dBm (buffered)	-75 (100 kHz)	Quasi-MMIC
1991	InGaAs MESFET	Waveguide cavity	92.3	14 mW 11 %	-70 (15 kHz)	MIC+ waveguide
1992	GaAs MESFET	HTSC resonator	6.5	4.9 dBm	-90 (10 kHz)	MIC (77K)
1993	PM-HFET	Dielectric resonator	81	1 mW 3.8 %	-90 (1 kHz)	MIC

IV. 결론 및 향후 전망

밀리미터 파는 향후 활용 가능한 무한한 주파수 자원의 보고이며, 이를 활용하기 위해서는 이 주파수 대역의 부품 설계 제작 기술의 기반이 있어야 한다. 이러한 부품 제작 시 가장 관심을 끌게 하는 것은 MMIC 기법이 될 것이며, 이에 의해서 조립 등으로 발생하는 기생소자의 발생을 최소화하면서 대량 생산이 가능하게 될 것이다. 또한 system 구현 시 one-chip화에 제약을 주는 것은 여전히 저역에서와 마찬가지로 공진기와 filter들이다. 그러나 이것의 정도는 저역보다는 더욱 심각하다. 최근 제안되고 있는 MEMS 기법은 이에 대한 돌파구가 되리라고 기대된다.

참 고 문 헌

- [1] 한국무선국관리사업단, 대한민국 주파수 분배표, 1996, 6월.
- [2] L. D. Nguyen, *et al.*, "Ultra-high speed modulation doped field effect transistors: A tutorial review", *Proc of the IEEE*, vol. 80, no. 4, pp. 494-518, April, 1992.
- [3] R. Dingle *et al.*, "Electron mobilities in modulation doped semiconductor heterojunction superlattices", *Applied Phys. Lett.*, vol. 33, no. 7, pp. 665-667, Oct., 1978.
- [4] M. C. Foisy *et al.*, "The role of inefficient charge modulation in limiting the current gain cutoff frequency of GaAs MODFET", *IEEE Trans. Electron Devices*, vol. 35, pp. 871-878, July, 1988.
- [5] A. Ketterson *et al.*, "Characterization of InGaAs/AlGaAs pseudomorphic modulation doped field effect transistors", *IEEE Trans. Electron Devices*, vol. ED-33, pp. 564-571, May, 1986.
- [6] T. Henderson *et al.*, "Microwave performance of a quarter micrometer gate low noise pseudomorphic InGaAs/AlGaAs modulation doped field effect transistor", *IEEE Electron Devices Lett.*, vol. ED-7, pp. 641-649, Dec., 1986.
- [7] R. People *et al.*, "Measurement of conduction band discontinuity of molecular beam epitaxial growth $\text{In}_{0.52}\text{Al}_{0.48}\text{As}/\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}$ heterojunction by C-V profiling", *Appl. Phys. Lett.*, vol. 43, pp. 118-120, 1983.
- [8] A. N. Lepore *et al.*, "0.1 um gatelength MODFETs with unity current gain cutoff frequency above 110 GHz", *Electron Lett.*, vol. 24, no. 6, pp. 364-366, Mar., 17, 1988.
- [9] K. Joshin *et al.*, "Noise performance of microwave HEMT", *IEEE MTT-s int. Microwave Symp. Tech. Dig.*, p. 563, 1983.
- [10] J. J. Berenez *et al.*, "Low noise high electron mobility transistors", *IEEE MTT-s int. Microwave Symp. Tech. Dig.*, p. 98, 1984.
- [11] K. L. Tan *et al.*, "94GHz 0.1 um T-gate low noise pseudomorphic InGaAs HEMT's", *IEEE Electron Devices Lett.*, vol. 11, pp. 585-587, Dec., 1990.
- [12] K. L. Tan *et al.*, "60 GHz pseudomorphic $\text{Al}_{0.28}\text{Ga}_{0.75}\text{As}/\text{In}_{0.28}\text{Ga}_{0.72}\text{As}$ low noise HEMT's", *IEEE Trans. Electron Devices*, vol. 12, pp. 23-25, Jan., 1991.
- [13] U. K. Mishra *et al.*, "Novel high performance self-aligned of 0.1 um gatelength $\text{Al}_{0.48}\text{In}_{0.52}\text{As}-\text{Ga}_{0.38}\text{In}_{0.62}\text{As}$ pseudomorphic HEMT's",

-
- IEDM Tech Dig.*, pp. 180-183, Dec., 1988.
- [14] A. S. Brown *et al.*, "The impact of epitaxial layer design and quality on GaInAs/AlInAs high electron mobility transistor performance", *J. Vac. Sci. Tech.*, vol B6, no. 2, Mar., 1988.
- [15] P. M. Smith *et al.*, "Power performance of microwave high electron mobility transistors", *IEEE Electron Devices Lett.*, vol. EDL-6, p. 86, Feb., 1985.
- [16] K. Hokosaka *et al.*, "Microwave power double-heterojunction HEMTs", *IEEE Trans. Electron Devices*, vol. ED-33, p. 583, May, 1986.
- [17] S. V. Robertson *et al.*, "Micromachined W-band filters," *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, vol. 44, pp. 598-606, Apr., 1996.
- [18] P. Saunier *et al.*, "High efficiency millimeter wave GaAs/AlGaAs power HEMTs", *IEEE Electron Devices Lett.*, vol. EDL_7, pp. 503, Sept., 1986.
- [19] B. Kim *et al.*, "GaAs/AlGaAs heterojunction MISFETs having 1W/mm power density at 18.5 GHz", *IEEE Electron Devices Lett.*, vol. EDL-7, p. 638, Nov., 1986.
- [20] M. Maltobian *et al.*, "High power and high efficiency AlInAs/GaInAs on InP HEMTs", *IEEE MTT-S Symp. Dig.*, pp. 721-724, 1991.
- [21] The GEC-Marconi Company, *GaAs IC Foundry design manual(Process H40)*, Oct., 1997.
- [22] The GEC-Marconi Company, *GaAs IC Foundry design manual(100um substrate passive components)*, Oct., 1997.
- [23] TRW Electronic Systems Group, *GaAs Monolithic microwave integrated circuit (MMIC) foundry fabrication services*, May, 1991.
- [24] D. C. Wang *et al.*, "Cost effective high performance monolithic X-band low noise amplifiers", *IEEE Trans. Microwave Theory and Tech.*, vol. MTT-34, no. 12, pp. 1553-1558, Dec., 1986.
- [25] R. Lehmann *et al.*, "X-band monolithic series feedback LNA", *IEEE Trans. Microwave Theory and Tech.*, vol. MTT-33, no. 12, pp. 1560-1566, Dec., 1985.
- [26] J. M. Beall *et al.*, "Design and process sensitivity of a two-stage 6~18 GHz monolithic feedback amplifier", *IEEE Trans. Microwave Theory and Tech.*, vol. MTT-33, no. 12, pp. 1567-1571, Dec., 1985.
- [27] H. Wang *et al.*, "110~120 GHz monolithic low noise amplifiers", *IEEE J. Solid-State Circuits*, vol. 28 no. 10, pp. 988-993, Oct., 1993.
- [28] S. Fujimoto *et al.*, "Ka-band ultra low noise MMIC amplifier using pseudomorphic HEMTs", *IEEE MTT-S Dig.*, pp. 17-20, 1997.
- [29] L. T. Tran *et al.*, "High performance high yield millimeter-wave MMIC LNAs using InP HEMTs", *IEEE MTT-S Dig.*, pp. 133-136, 1996.
- [30] R. Lai *et al.*, "An InP HEMT MMIC LNA with 7.2 dB gain at 190 GHz", *IEEE Microwave and guide Wave Lett.*, vol. 8, no. 11, pp. 393-395, Nov., 1998.
- [31] D. C. Streit *et al.*, "High-gain w-band pseudomorphic InGaAs power HEMTs", *IEEE Electron Device Lett.*, no. 12, p. 149, 1991.
- [32] H. Wang *et al.*, "A novel w-band monolithic push-pull power amplifier", in *1994 IEEE*

- GaAs IC Symp. Dig., Philadelphia, PA*, p. 7, 1994.
- [33] R. Lai *et al.*, "A high-efficiency 94 GHz 0.15 m InGaAs/InAlAs/InP monolithic power HEMT amplifier", *IEEE Microwave and Guided wave letters*, no. 10, pp. 366-368, 1996.
- [34] S. R. Bahl *et al.*, "Elimination of mesa-sidewall gate leakage in InAlAs/InGaAs heterojunctions by selective side-wall recessing", *IEEE Electron Device Lett.*, vol. 12, no. 13, p. 195, 1992.
- [35] O. Aina *et al.*, "A 1.45 W/mm, 30 GHz InP-channel power HEMT", *IEEE Electron Device Lett.*, vol. 12, no. 13, p. 300, 1992.
- [36] S. A. Maas *et al.*, "A broad band planar doubly balanced monolithic Ka-band diode mixer", *IEEE 1993 Microwave and Millimeter Wave Monolithic Circuits Symp.*, pp. 53-54, 1993.
- [37] T. Hiraoka *et al.*, "Very small wide band MMIC magic-'s using microstrip lines on a thin film", *IEEE Trans. Microwave Theory and Tech.*, vol. MTT-37, no. 10, pp. 1569-1575, Oct., 1989.
- [38] T. Hirota *et al.*, "Uniplanar MMIC hybrids-A proposed new MMIC structure", *IEEE Trans. Microwave Theory and Tech.*, vol. MTT-35, no. 6, pp. 576-581, June, 1987.
- [39] T. Hirota *et al.*, "Reduced size branch line and rat race hybrids for uniplanar MMIC's", *IEEE Trans. Microwave Theory and Tech.*, vol. MTT-38, no. 3, pp. 270-275, Mar., 1990.
- [40] G. D. Vendelin *et al.*, *Microwave circuit design using linear and nonlinear techniques*, John Wiley & Sons Inc., 1990.

≡필자소개≡

염 경 환

1976년~1980년: 서울대학교 공과대학 전
자공학과(공학사)

1980년~1982년: 한국과학기술원 전기 및
전자과(공학석사)

1982년~1988년: 한국과학기술원 전기 및
전자과(공학박사)

1988년 3월: 금성전기(주) 소재부품연구소 선임연구원(MIC
팀 팀장)

1990년 3월: 금성전기(주) 소재부품연구소 책임연구원

1991년 5월: 금성정밀(주) 기술연구소 연구1실 책임연구원

1991년 8월: (주) LTI

1995년 10월: 충남대학교 전파공학과 조교수

1999년 10월: 충남대학교 전파공학과 부교수

[주 관심분야] 마이크로파 회로 및 시스템

