

<p style="text-align: center;">mm-wave MMIC 연구 동향</p> <p style="text-align: center;">Research Trends of mm-wave MMIC</p>	<p style="text-align: center;">장병준 · 박준석 · 이문규*</p> <p style="text-align: center;">국민대학교 전자정보통신공학부, *서울시립대학교 전자전기컴퓨터공학부</p>
--	---

밀리미터파 대역은 일부 주파수를 제외하고는 지속적인 연구 개발이 필요한 미지의 주파수 대역으로서 전파특성, 소자 및 시스템 전 분야에 걸쳐 다양한 연구가 필요한 분야이다. 본 원고에서는 이 대역의 주파수 특성을 비롯하여, 관련 소자 및 시스템 동향을 살펴보고 밀리미터파 대역이 활성화 되기 위해 선결되어야 하는 기술적인 문제점 및 앞으로의 발전 전망 등을 기술한다.

I. 서 론

현재 국내외적으로 정보의 광대역화 및 초고속화에 대한 요구가 폭발적으로 증가되고 있으며, 이러한 요구에 적합한 밀리미터파 대역에 대한 연구도 활발히 진행되고 있다. 밀리미터파란 파장이 mm 단위의 전자파를 의미하며, 이는 주파수 대역으로 보면 30 GHz부터 300 GHz까지의 주파수에 해당한다. 현재까지의 밀리미터파 주파수 대역의 동향을 살펴보면 밀리미터파 대역과 마이크로파 대역의 경계인 20 GHz~40 GHz 대역은 과거 위성통신, 군용 통신 등에서 성숙된 기술을 바탕으로 현재 고정 및 이동용으로 확장되고 있는 단계이며, 60 GHz 대역(대력 55~65 GHz)은 광대역 전송이 가능할 뿐만 아니라 산소에 의한 전파의 흡수 감쇠가 크기 때문에 근거리 무선 통신(WLAN 및 WPAN)으로 사용되고 있거나 사용 예정에 있다. 77 GHz 대역의 경우는 자동차 충돌 방지용 레이더 주파수로 일부 상용화까지 진행

〈표 1〉 밀리미터파 대역의 분류^[1]

명칭	주파수 대역
Q band	33~50 GHz
U band	40~60 GHz
V band	50~75 GHz
E band	60~90 GHz
W band	75~110 GHz
F band	90~170 GHz
D band	110~170 GHz
G band	140~220 GHz

되었으나 가격이 고가인 관계로 기대한 것만큼 활성화되어 있지는 않은 상태이다. 그 외 천문관측, 위성간 통신 및 군용 등으로 일부 밀리미터파 주파수가 배정되어 있으나, 관련 기술 개발 및 상용화는 활발하지 않고 있다.

이렇게 밀리미터파 주파수 대역이 일부 주파수 대역을 제외하고는 그 가능성에 비해 기술의 발달 및 활성화가 더딘 가장 큰 이유는 기술의 제약 때문이다. 밀리미터파는 파장이 매우 짧아 시스템 구현시 부품의 크기가 작아지므로 집중소자(lumped elements)로 구현할 수 없으며, 대부분의 회로는 MMIC (Monolithic Microwave Integrated Circuit) 등의 집적회로를 이용하여 구현하게 되는데 이는 대량생산이 되지 않는 한 시스템 가격을 올리는 요인이 된다. 집적회로 소자 측면에서도 기술의 발전이 가속화 되고는

<표 2> 밀리미터파 시스템의 가격 구성^[15]

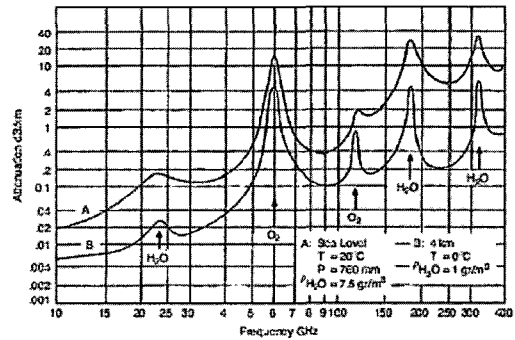
MMICs	30~35 %
Other materials	5 %
Module housing	15 %
Assembly	20 %
Testign and tuning	25~30 %

있으나 Si 계열의 반도체를 사용하기가 아직은 어려워 가격이 비싼 GaAs나 InP 계열의 반도체를 사용하고 있는 단점이 있다. 또한 MMIC를 interconnection 하거나 packaging 하는데도 상당한 고비용과 기술적 어려움이 산재되어 있으므로 상용화에 애로점으로 작용한다.

이러한 어려움에 따라 밀리미터파 대역 시스템의 상용화에는 아직도 많은 시간이 필요한 단계이며 본고에서는 밀리미터파 대역의 전파 특성, 소자 및 회로 동향, 시스템 동향 등을 살펴보아 향후 밀리미터파 대역이 상용화되기 위하여 선결되어야 하는 기술적인 문제점 및 이 주파수 대역의 앞으로의 발전 방향 등을 기술하고자 한다.

II. 밀리미터파의 전파 특성

마이크로파 대역의 무선 신호에 비해 밀리미터파 대역의 전파 특성은 감쇄가 심하고 건물벽 등에 대한 투과율이 낮다는 특성이 있다. 또한 마이크로파 시스템에서 전송 손실은 주로 자유공간 손실(free space loss)에 의해 결정되는데 반하여 밀리미터파의 경우 산소 등에 의한 손실 및 강우 감쇠 등의 영향이 크다. [그림 1]은 주파수에 따른 대기 흡수율을 나타내는 그림으로서 A는 해수면에서, B 곡선은 고도 4 km에서 건조한 날씨의 경우를 나타낸다. 그림에서 알 수 있듯이 수증기에 의해 24 GHz 근방에서, 산소 분자에 의해 60 GHz 대역에서 손실이 큼을 알 수 있다.



[그림 1] 밀리미터파 대역의 전파 특성

이러한 밀리미터파 대역의 전파 특성에 따라 밀리미터파 대역은 20 km 이하의 근거리 통신에 적합하며, 60 GHz와 같이 흡수율이 큰 대역의 경우 주파수 재사용율이 높은 고속 근거리 통신에 적합함을 알 수 있다.

III. 밀리미터파 회로 및 시스템 동향

밀리미터파 대역의 회로 및 시스템은 기술의 특성상 고성능의 반도체 공정 및 패키징 공정을 필요로 하며, 현재 대량생산 단계가 아니므로 GaAs 계열의 공정을 가지고 있는 반도체 회사 및 학교, 연구소 등을 중심으로 연구개발이 이루어지고 있다.

밀리미터파 대역의 MMIC를 공급하는 주요 국외 회사로는 TRW, Agilent Technologies, TriQuint Semiconductor, Eudyna Devices, Mimix Broadband, UMS (United Monolithic Semiconductor), Velocium Products 등이 있으며, 국내에서는 일부 벤처 기업과, ETRI 등의 정부출연연구소 및 동국대학교 밀리미터파 신기술연구센터(MINT), 서울대학교, KAIST 등을 중심으로 관련 연구가 활발히 진행되고 있다.

3-1 MMIC 프로세스 동향

밀리미터파 대역은 마이크로파 주파수 대역에서

일반적으로 사용되는 하이브리드 MIC(Microwave Integrated Circuit) 공정으로는 제작 과정의 오차 및 기생 성분, 하우징 공진 등의 영향으로 신뢰성 있는 회로를 만들기 어렵기 때문에 MMIC를 사용하여 회로를 설계하여야 한다. 하지만 MMIC 공정은 그 응용분야가 MIC(Monolithic Integrated Circuit)와 경쟁하면서 발전되어 왔기 때문에 현재까지도 주로 30 GHz 이하에서 연구가 집중되어 왔다. 따라서 밀리미터파 대역에서 MMIC를 설계하는 것은 공정이나 회로 설계 측면에서 아직도 많은 기술적인 문제가 산재되어 있다. 다행히 최근 밀리미터파 대역 MMIC의 설계 기술 및 설계 tool의 발전으로 밀리미터파 대역의 MMIC 소자 및 회로에 대한 연구가 국내외 연구기관에서 활발히 진행되고 있어 많은 문제들이 해결되고 있는 단계이다.

먼저, 공정 분야의 기술 개발 상태를 살펴보면 밀리미터파 대역의 MMIC 공정은 주로 GaAs HEMT, InP HEMT 및 InP HBT 공정을 주로 사용한다. 기타 SiGe 등 다른 종류의 화합물 반도체 및 RF-CMOS 반도체 등 Si 계열의 밀리미터파 대역 적용에 관한 연구도 활발하나 아직까지 밀리미터 대역의 특성상 실제 적용 예는 많지 않다.

GaAs HEMT의 경우, 화합물 공정 중에서는 기술의 성숙도가 높아 양산성이 뛰어난 프로세스이긴 하지만 밀리미터파 대역의 MMIC를 설계하기 위해서는 기존의 공정과는 차이가 있다. 기본적으로 pseudomorphic InGaAs 채널을 이용하는 pHEMT가 주로 사용되며, 반도체 wafer의 두께도 통상 사용되는 4 mil보다는 2 mil 정도의 두께를 사용하는 것이 유리하다. 2 mil을 사용하게 되면 전력증폭기의 경우 열적으로 안정될 뿐만 아니라 동일 구조의 경우 4 mil로 설계하는 것보다 우수한 전력밀도 특성을 얻을 수 있다. pHEMT의 gate length 역시 보통 사용되는 0.25 um보다 가는 0.15 um나 0.1 um 정도로 개선되어야 한다. 또한 gate recess etching이나 passivation 등

에서도 개선이 이루어져야 한다.

InP HEMT의 경우 다른 공정보다도 높은 f_{max} (600 GHz까지 보고됨)를 가지고 있으므로 밀리미터파 주파수에서도 우수한 성능의 저잡음 증폭기(low noise amplifier)나 높은 전력 효율을 갖는 고출력 증폭기의 설계에 사용될 수 있지만 프로세스의 안정도는 GaAs HEMT에 비해 낮은 편이다. 또한 InP 웨이퍼는 GaAs 웨이퍼가 6-inch까지도 만들어지는데 비해 2-inch나 3-inch 정도로 크기가 작으며, 가격 역시 5 배 이상 비싸다. 하지만 성능의 우수성으로 인해 생산성 및 신뢰성 있는 InP HEMT MMIC의 개발에 대한 많은 연구가 진행되고는 있으나 상용화에는 많은 시간이 소요될 예정이다.

GaAs나 InP 웨이퍼 기판을 이용한 HBT의 경우 밀리미터파 대역에서 사용할 수 있으며 최근에는 일본 NEC에 의해 250 GHz 이상의 f_{max} 성능도 보고되고 있다. 하지만 최대 동작 주파수는 HEMT보다는 낮다. 하지만 HBT의 경우, 저주파 잡음이 작기 때문에 위상잡음 특성이 좋은 VCO 등을 설계하는데 사용할 수 있다.

각각의 application 및 현재 적용 가능한 주파수 대역은 다음 <표 3>에 나타내었다.

3-2 밀리미터파 회로 설계 기술

<표 3> 밀리미터파용 MMIC 공정

Process	사용 주파수 대역	주요 구현 가능 회로
GaAs HEMT (0.15 um)	1~65 GHz	저잡음, 고출력 MMIC
GaAs HEMT (0.1 um)	44~100 GHz	저잡음, 고출력 MMIC
1 um InP HBT	DC~65 GHz	VCO, 고출력 선형 증폭기
0.1 um InP HEMT	44~160 GHz	LNA, Mixer, 고출력 증폭기

밀리미터파 대역 시스템은 낮은 주파수 대역의 시스템과는 회로 측면에서 많은 다른 특성이 있으므로 성공적인 회로 설계를 위해서는 회로 설계 기술 측면에서 이슈가 되는 문제점과 현재의 기술 수준(state-of-the arts) 등을 정확히 인식하여야 한다.

3-2-1 능동소자 및 수동소자의 모델링

밀리미터파 대역에서 동작하는 MMIC를 설계하기 위해서는 정확한 능동소자와 수동소자의 모델이 필수적이다. 최근에 on-wafer 측정 및 측정장비의 교정(calibration) 기술에 있어 많은 새로운 기술이 개발되었으며 주파수 대역은 120 GHz까지도 확장되는 추세이다. 하지만 여전히 밀리미터파 대역에서 정확한 능동소자 모델링을 하는 것은 고도의 기술적 지식과 경험을 필요로 하므로 대부분 반도체 파운드리(foundry) 회사들도 밀리미터파 대역에서 신뢰성 있는 모델을 만들지 못하고 있다. 사용하는 소자의 모델이 부정확하다면 제작된 회로의 특성이 나쁘게 되며 설계 사이클이 여러 번 반복되게 되므로 생산성이 떨어지게 된다.

또한 밀리미터파 대역에서는 전송선로의 불연속, 결합 효과, 패키징 효과 등이 MMIC의 설계에 큰 영향을 미치게 된다. 이러한 문제를 해결하기 위해서는 정확한 전자기(EM: ElectroMagnetic) 시뮬레이션을 사용하여야 회로 소자들간의 결합 효과 및 기생 성분 등이 정확히 계산될 수 있어 MMIC 설계가 가능하다. 다행히 이러한 전자기 시뮬레이션에 대한 연구 및 상용화는 활발히 이루어져 현재 많은 상용 simulator가 있다. 이런 상용 simulator를 이용하면 결합효과 등 많은 기생 성분들의 효과를 이해할 수 있다.

3-2-2 회로 설계 기술

밀리미터파 대역의 회로 설계 기술은 저주파 대

역과는 다른 접근법이 필요하다. 가장 큰 차이점은 이 주파수 대역에서 안정된 국부 발진기(local oscillator)를 만드는 것이 어렵기 때문에 국부 발진기는 낮은 주파수 대역에서 설계하고 이를 주파수 체배기 등의 회로로 밀리미터파 대역까지 주파수를 올리는 방식이나 sub-harmonic 주파수 혼합기(mixer)를 사용하여 낮은 주파수의 국부 발진기를 그대로 사용하는 방식 등이 사용된다. 이러한 회로의 설계 기법 자체가 무선 통신에서 보편적으로 사용되는 방식이 아니므로 앞으로도 많은 관련 연구가 필요하다.

시스템 설계 시 전체 시스템의 잡음 특성을 결정하는 수신단의 저잡음 증폭기의 경우는 잡음 지수가 낮은 주파수 대역에 비해 상당히 높다. 예를 들어 10 GHz 대역에서는 1 dB 이하의 잡음 지수를 갖는 저잡음 증폭기를 설계하는 것이 가능하지만 밀리미터파 대역에서는 수 dB 이상의 잡음 지수를 갖는다. 따라서 수신단 설계시 이를 고려하여 전체 시스템을 설계하여야 한다.

송신단의 고출력 증폭기의 경우는 수 W 이상의 고주파 출력을 만드는 것이 어렵기 때문에 수십 mW 단위의 고출력 증폭기를 만들거나 이를 결합하여 수백 mW 단위의 고출력 증폭기를 만들 수 있다. 결합하는 방식도 공간 전력 결합(spatial power combining) 방식 등의 새로운 방식이 요구된다. 시스템 설계 시 이러한 밀리미터파 대역의 회로 특성 등을 모두 고려하여 적절한 시스템을 구성하여야 한다.

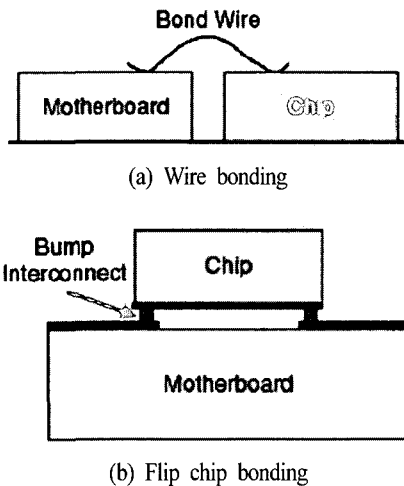
3-3 밀리미터파 어셈블리 및 패키징

밀리미터파 대역의 회로가 상업적으로 경제성을 갖기 위해서는 어셈블리와 패키징이 중요한 문제가 된다. 어셈블리와 패키징은 높은 신뢰성과 생산성을 요구함과 동시에 경제성까지 가져야 한다. 종래에는 MMIC를 입출력에 도파관을 갖는 금속 모듈안에 thin film 기법을 이용하여 장착하고 wire-bonding

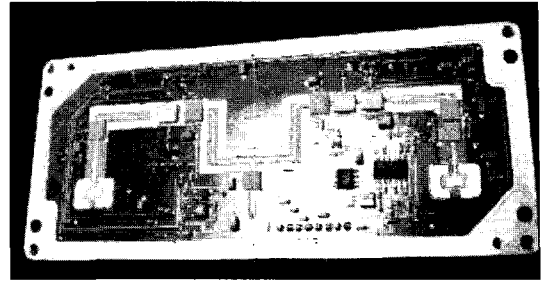
을 이용하여 회로를 연결하는 방식이 주로 사용되어 왔다. 이러한 방식은 고정밀도의 소량 생산에 사용하는 방식으로 숙련된 작업자가 필요하며 대량 생산은 불가능하다. 이러한 문제점을 해결하기 위하여 세라믹 패키징이나 플립 칩(flip-chip) 본딩, LTCC 기판을 이용한 멀티칩 모듈(MCM: Multi-Chip Module) 등의 기술이 활발히 연구되고 있으며 30 GHz 대역부터 서서히 상용화된 기술이 개발되고 있다. 특히, 밀리미터파 대역 LTCC 모듈의 경우 ICU, ETRI 등은 중심으로 연구 개발이 활발히 진행되고 있으며, 저가의 제품을 만들 수 있어 밀리미터파의 활성화에 크게 기여할 수 있을 것으로 기대되는 분야이다.

3-3-1 플립 칩(Flip Chip) 기술

플립 칩 본딩은 MMIC의 뒷면의 접지면을 없앨 수 있는 CPW(CoPlanar Waveguide) 기술과 함께 사용하면 패키징 문제를 상당 부분 해결할 수 있어 많은 연구가 진행되고 있다. 하지만 기존의 보편화된 back-side metal 공정을 갖는 마이크로스트립 구조의 GaAs 구조와는 다른 CPW 공정의 MMIC를 이용해야 하므로 아직까지는 일반적으로 사용되고 있지는 못하다.



[그림 2] 플립 칩 패키징 기술



[그림 3] UMS사의 밀리미터파 송수신 모듈 예

하지만 저주파 대역에서부터 플립칩 공정의 사용이 늘고 있으며, 밀리미터파 대역에서 특성의 우수성 등을 고려하면 향후 유망한 기술임에 틀림없다.

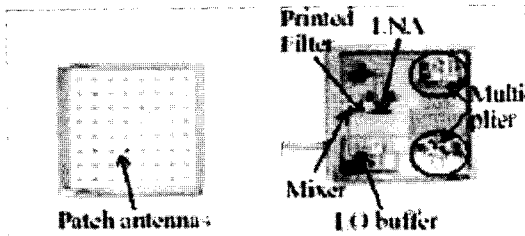
3-3-2 패키징 MMIC

최근 UMS사에서는 MMIC를 저가격에 패키징할 수 있는 기술을 발표하였으며, 26 GHz 대역의 점대점 링크에 적용하였다. [그림 3]에 패키징된 MMIC를 이용한 송수신 모듈의 예가 있으며, MMIC의 패키징이 밀리미터파 대역까지 확장된다면 저가로 밀리미터파 시스템을 구현할 수 있는 장점이 있어 기대되는 기술 분야이다.

3.4 밀리미터파 안테나 및 수동소자

밀리미터파 대역 안테나는 이득을 높이기 위하여 배열 구조를 갖는 평면형 안테나가 주류를 이루며, 송수신부 회로와 함께 집적화 하기 위하여 세라믹 기판 위에 구성된다. 다음 [그림 4]의 경우는 밀리미터파 대역(60 GHz) 안테나의 예로서 안테나의 복사로 인해 회로의 간섭 현상을 막기 위하여 다층 구조를 이용하여 안테나와 회로를 집적화 한 예를 보여준다.

밀리미터파 대역 시스템을 구성할 경우 전송 선로를 이용하여 공진기 및 필터 등을 구현하여야 하는데 주파수가 높아짐에 따라 전송선로의 유전체 손실(dielectric loss), 분산 특성(dispersion), 방사 손실(radiation loss) 등으로 인하여 구현 소자의 성능이 열



[그림 4] 60 GHz 대역의 안테나 예

화되는 특성이 있다. 따라서 최근에 MEMS 기술을 이용하거나, NRD 등의 유전체 전송선로^[17]를 이용하여 필터 등을 구현하는 연구가 활발히 진행되고 있다. 수동소자를 별도로 구현하여 MMIC와 연결할 경우 interconnection, transition 등도 밀리미터파 시스템 설계시 주의 깊게 고려되어야 할 부분이다.

IV. 밀리미터파 응용 시스템 동향

최근 관심이 높은 밀리미터파 대역의 응용 시스템으로는 60 GHz 대역의 무선 LAN 및 무선 PAN, 차량용 레이더를 위한 77 GHz 대역 시스템과 20~30 GHz 대역의 UWB 방식 등이 대표적이다.

4-1 60 GHz 대역 시스템

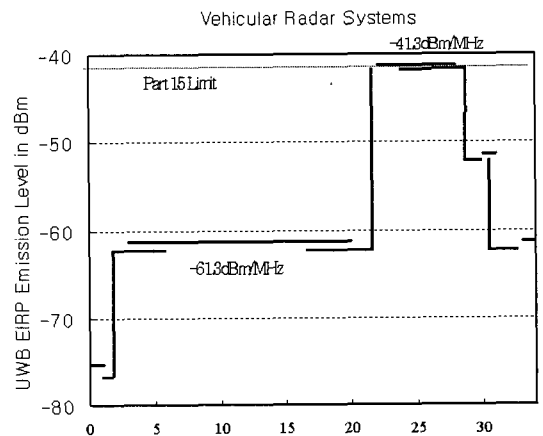
60 GHz 대역(대역 55~65 GHz)은 광대역 전송이 가능할 뿐만 아니라 산소(O₂)에 의한 전파의 흡수감쇠가 크기 때문에 여러 응용 분야에 사용될 수 있다. 대표적인 응용 예로는 위성간 통신(satellite cross link), 군사용 응용 분야 및 상업용의 대용량 무선시스템 등이 있다. 이러한 상업용 시스템의 적용 예로는 대용량의 단거리 통신 시스템, 무선 LAN, 무선 PAN, 무선 1394 등의 가정의 구내 배선의 무선화(wireless homelink) 등이 있다. 여기에 광통신과 결합되어 광대역 통신을 가능케 하는 이동통신 시스템에 대한 연구도 활발히 진행되고 있다.

미국의 경우, 1994년 FCC에서 59~64 GHz 주파

수 대역을 허가 없이 사용할 수 있는 저전력 장치에 할당하였고, 2000년 12월에는 규칙 개정과 함께 주파수 대역을 57~64 GHz로 확장하였다. 관련 표준으로는 최근 802.15.3 TG3c가 결성되어 1 Gbps의 고속 근거리 통신에 대한 표준을 정하고 있다.

4-2 자동차용 충돌 방지 레이더

자동차용 충돌방지 레이더용으로 밀리미터파 대역을 사용하려는 시도는 오래 전부터 있어 왔고 특히 활발히 연구되어온 주파수 대역은 76/77 GHz이다. 차량용 레이더는 [그림 5]와 같이 충돌 방지용 전방 감시 레이더 및 후방 및 측면 감시 레이더 시스템으로 나뉘어질 수 있는데 충돌 방지용 전방 감시 레이더의 경우 동작거리 30 m 이상의 차량을 검출할 수 있어야 하므로 기본적으로 고출력이 요구되어, 최근까지 76/77 GHz 대역의 밀리미터파 대역이 주로 사용되어지고 있다. 현재 국외의 우수 자동차 제조업체들이 이미 77 GHz 대역의 차량용 레이더의 장착을 옵션화 하여 제공하고 있으며, 대표적인 업체들로는 Daimler-Benz, BMW, Nissan, Toyota, Honda, Volvo, Ford 등을 들 수 있다. 이러한 차량용 레이더를 적용한 기술은 “Active cruise control(ACC)” 또



[그림 5] 차량용 UWB 주파수 사용 대역

는 "Intelligent cruise control" 등으로 불린다.

하지만 77 GHz 대역은 매우 정밀한 분해능(resolution)을 필요로 하는 측면과 후방 감시용으로 사용하기에는 그 대역폭이 너무 좁아서 사용하기에 부적절하다. 예를 들어 측면과 후방 감시용 자동차용 레이더에서 요구하는 7.5 cm의 분해능을 갖기 위해서는 적어도 4 GHz 이상의 대역폭을 갖는 레이더 시스템이 필요한 것으로 보고되고 있다. 따라서 이에 대한 요구사항을 반영하기 위하여 2002년 미국 FCC는 UWB 기기의 운용에 대한 여러 가지 기술 기준을 제정, 공시하였는데 그 주요 응용 분야 중의 하나로 고해상도 차량용 레이더를 22~29 GHz의 7 GHz 대역폭을 사용하도록 명기하였다.

국내의 경우는 현재까지 UWB 기기의 운용에 관한 별도의 기술적 조건이 아직 제정된 바가 없지만 현재 UWB 시스템에 대한 관심이 증대되고 있는 점을 감안한다면 조만간 차량용 레이더의 경우에 적용할 수 있는 기술 기준이 제정될 것으로 기대하고 있다.

V. 결 론

앞에서 살펴본 바와 같이 밀리미터파 대역 기술은 유비쿼터스 사회의 미래 핵심 기술로서 원천 소자 기술, 회로 설계 기술 및 시스템 응용기술 등에서 다양한 연구 개발이 필요한 분야이다.

특히, 밀리미터파 대역이 상용화 되기 위해 선결되어야 할 문제는 안정적이고 신뢰성 있는 반도체 공정을 유지하는 것과 경제성 있는 모듈을 만들기 위해 어셈블리 및 패키징 등에 많은 투자가 이루어져야 한다고 사료된다.

앞으로 다가올 미래 유비쿼터스 사회에 대비하여 원천 기술의 습득 및 관련 응용 기술의 축적 그리고 시스템 구축 측면에서 밀리미터파에 대한 지속적인 관심과 투자가 필요하다고 생각한다.

참 고 문 헌

- [1] Michael Marcus, Bruno Pattan, "Millimeter wave propagation : Spectrum management implications", *IEEE Microwave Magazine*, pp. 54-62, Jun. 2005.
- [2] 장병준, "60 GHz 주파수 대역의 무선통신 연구 동향", ETRI 주간기술동향 1004호, pp. 1-11.
- [3] 장병준, 윤석환, 이운덕, "UWB를 이용한 차량용 레이더 기술 동향 및 전망", ETRI 주간기술동향 1135호, pp. 20-26, 2004년 3월.
- [4] http://www.fcc.gov/Bureaus/Engineering_Technology/Orders/2000/fcc00402.doc
- [5] <http://www.fcc.gov/oet/dockets/et94-124/etiquette.pdf>
- [6] Michael J. Marcus, "Millimeter-wave spectrum policy in the USA", 2001.
- [7] K. F. Lau, et al., "Recent MMW technology development and its military and commercial applications", *1998 IEEE Radio Frequency Integrated Circuits Symposium*, pp. 87-90.
- [8] T. Yoneyama, "Millimeter-wave research activities in Japan", *IEEE Trans. MTT*, vol. 46, no. 6, pp. 727-733, Jun. 1998.
- [9] K. Ohata, "Millimeter-wave monolithic GaAs IC interconnect and packaging technology trends in Japan", *IEEE*, pp. 105-108, 1999.
- [10] R. Hadaway, "Status and application of advanced semiconductor technologies", *1999 GaAs Mantech*.
- [11] G. McCarter, J. Barr, "Key considerations and new advances in high volume production for millimeter-wave MMICs", *1999 GaAs Mantech*.
- [12] D. Pavlidis, "HBT vs. PHEMT vs. MESFET: What's best and why", *1999 GaAs Mantech*.
- [13] C. Ciotti, J. Borowski, "The AC006 MEDIAN project-overview and state-of-the-art", pp. 362-367,

ACTS Mobile Summit, Granada, Nov. 1996.

- [14] Wolfgang Heinrich, "The flip-chip approach for millimeter wave packaging", *IEEE Microwave Magazine*, pp. 36-45, Sep. 2005.
- [15] UMS, "Low cost millimeter wave packaged MM-ICs", *Microwave Journal*, Jun. 2002.
- [16] 이재욱, "밀리미터파용 소형 안테나 기술", 한국

전자과학회지 전자파기술, 16(2), 2005년.

- [17] 이정해, 김소용, "밀리미터파 대역 NRD Guide Filter 및 Duplexer", 한국전자과학회지 전자파기술, 14(3), 2003년.
- [18] 장동필, 엄만석, 염인복, "밀리미터파 대역 MM-IC 개발 현황", 전자공학회지, 29(2), pp. 70-78, 2002년 2월.

≡ 필자소개 ≡

장 병 준



1990년 2월: 연세대학교 전자공학과 (공학사)
 1992년 2월: 연세대학교 전자공학과 (공학석사)
 1997년 2월: 연세대학교 전자공학과 (공학박사)
 1995년 3월~1999년 1월: LG전자(주)

1999년 1월~2003년 9월: 한국전자통신연구원 무선방송연구소
 2003년 10월~2005년 8월: 정보통신연구진흥원
 2005년 9월~현재: 국민대학교 전자정보통신공학부 교수
 [주 관심분야] 마이크로파/밀리미터파 회로(MMIC, Hybrid), 무선통신시스템, RFID/USN

이 문 규



1992년 2월: 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 (공학사)
 1994년 2월: 서울대학교 전자공학과 (공학석사)
 1999년 2월: 서울대학교 전기공학부 (공학박사)
 1999년 2월~2002년 2월: 한국전자통신

연구원 통신위성개발센터 선임연구원
 2002년 3월~현재: 서울시립대학교 전자전기컴퓨터공학부 조교수
 [주 관심분야] 마이크로파/밀리미터파 능동(MMIC, Hybrid) 및 수동 부품회로 설계

박 준 석



1991년 2월: 국민대학교 전자공학과 (공학사)
 1993년 2월: 국민대학교 전자공학과 (공학석사)
 1996년 8월: 국민대학교 전자공학과 (공학박사)
 1997년 3월~1998년 2월: Dept. of EE,

UCLA / Post Doctoral Fellow
 1998년 3월~2003년 2월: 순천향대학교 정보기술공학부 조교수
 2003년 3월~현재: 국민대학교 전자정보통신공학부 조교수
 [주 관심분야] RF 및 초고주파 필터 기술, SAW, MCM, LTCC, DGS 응용기술