

# THz 대역의 무선통신시스템 기술

정태진  
한국전자통신연구원

## 요약

THz 대역의 주파수 범위는 일반적으로 100GHz ~ 10THz 사이로서, 전자파의 투과성과 광파의 직진성을 동시에 가지고 있다. THz 캐리어 주파수는 대기의 수분에 강하게 흡수되어 1THz 이상에서 1 [dB/m] 정도의 대기 전파감쇠가 발생하나 0.1 [dB/m] 정도의 비교적 낮은 주파수 윈도우가 존재하여 이 영역의 주파수 스펙트럼을 이용한 무선통신시스템의 개발이 활발히 진행되고 있다. 최근 RF MMIC의 기술 개발 동향을 고려해 볼 때 무선통신시스템 응용을 위한 가장 유력한 THz 주파수 대역은 H-밴드(220 ~ 325GHz)이다. H-밴드에서 가용한 주파수 대역폭은 약 45GHz 이상이며, 이러한 초광대역폭을 이용하여 10Gbps급 이상의 데이터 전송속도를 ASK 또는 BPSK와 같은 간단한 변조방식으로 용이하게 실현할 수 있다. 본고에서는 THz 대역에서 무선통신 응용을 위한 전파특성 및 주파수 대역, 무선링크 특성과 THz 송수신기 기술에 대하여 알아본다.

## 1. 서론

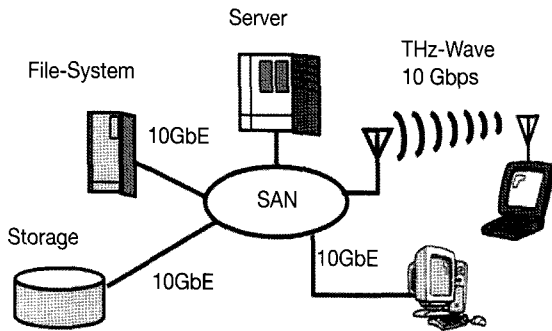
THz파는 전자파 스펙트럼에서 밀리미터파 대역과 원적외선(Far Infra-red) 대역 사이에 존재하는 100GHz에서 10THz 대역의 전자파 스펙트럼으로서, 소자 및 부품 등 관련 기술이 미개발되거나 개발 중인 미개척 주파수 대역이다. THz 대역의 전자파는 수증기(H<sub>2</sub>O) 등 대기의 수분에 강하게 흡

수되며, 플라스틱, 나무, 종이, 옷감 등 비이온화 물질은 투과하고 금속에는 반사하는 특성을 가지고 있다. 지난 30년간을 관찰해 본 결과, 무선 데이터 속도의 지수적 성장을 감안하면 무선의 전송용량은 매 1.5년마다 2배씩 증가해 왔으며, 현재 시점에서 10년 이내에 약 15Gbps의 데이터 속도가 필요할 것으로 판단되며, 초고속 통신기술의 발전으로 데이터 전송속도는 유선 통신시스템의 용량에 접근할 것이다[1].

대표적인 응용 분야로는 SAN(Storage Area Network) 응용 등을 위한 초고속 대용량 파일전송(그림 1 참조), 10Gbps Ethernet (10GbE)과 초고속 데이터 전송을 위한 광 화이버의 무선 대체, HDTV 및 미래 Ultra-HDTV의 비압축 고품질 비디오 신호의 무선전송을 들 수 있다. 일본은 Ultra-HDTV를 2015년 방송 표준으로 제정한다는 계획을 발표하였다[2]. 이 Ultra-HDTV는 33메가 픽셀(7,680 X 4,320)의 해상도를 가지며, 비압축 비디오 스트림 전송을 위하여 24Gbps의 전송속도가 요구된다. 미래 무선통신 시스템의 기가 비트급 전송속도는 대단히 넓은 주파수 대역폭(10GHz 이상)을 요구하는 다양한 분야에 응용될 것으로 기대된다.

기존의 WLAN, WPAN 및 UWB 시스템은 수 MHz에서 수 GHz 사이의 주파수 대역폭을 사용한다. 따라서, 이들은 미래의 요구사항을 만족하는 충분히 높은 데이터 속도를 제공할 수 없으며, 향후 무선 근거리 통신네트워크는 조만간 THz대역으로 이동할 것으로 예측된다. THz 대역은 기존의 밀리미터파에서 가용한 통신 대역폭 보다 훨씬 넓은 대역폭을 제공해 줄 수 있어 아주 매력적이다. 300GHz 이상의 주파수는 현재 비면허 대역으로 남아있다. 본고에서는 THz 대역에서 무선통신 응용을 위한 전파특성 및 주파수 대역, 무

선링크 특성과 THz 송수신기 기술에 대하여 알아본다.



(그림 1) SAN(Storage Area Network) 응용 예

## II. THz 전파 특성 및 무선통신 주파수대역

THz 대역의 전파는 대기에 존재하는 산소(O<sub>2</sub>)와 수증기(H<sub>2</sub>O)에 의해 주로 흡수되어 특정 주파수에서 감쇠량이 대단히 크게 나타난다. (그림 2)는 해발 고도(Sea Level)의 대기압 1,013hPa, 대기 온도 20℃, 수증기 밀도 7.5g/m<sup>3</sup> 대기상태에서 100 GHz ~ 2THz 주파수 범위에서 대기가스(산소, 수분)에 의한 전파 감쇠특성을 나타낸다[3]. THz 대역에서 무선통신을 위한 주파수 범위는 감쇠량이 큰 피크 사이의 낮은 감쇠량을 갖는 영역의 주파수를 선정하는 것이 바람직하다. 220GHz, 300GHz, 350GHz의 중심주파수에서 각각 68GHz, 48GHz, 45GHz의 통신 대역폭이 가용하며[4], 이는 FCC가 기존의 E-대역(60/70/80/90GHz)에서 지정한 총 대역폭 20GHz 보다 2배 이상의 대역폭에 해당한다.

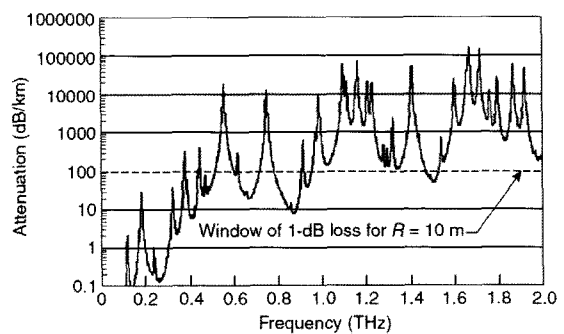
강우에 의한 감쇠는 시간당 강우율[mm/hr]의 함수로 표현되며, 전파의 편파 특성에 따라 감쇠량에 약간의 차이가 있다. 한국의 시간당 평균 강우율 42[mm/hr]에서는 100GHz 이상의 주파수에서 약 15 ~ 18[dB/km]의 전파감쇠가 발생한다. 구름 및 안개에 의한 전파 감쇠는 수증기 밀도와 같이 [g/m<sup>3</sup>]의 단위로 표현되는 액체 수분밀도의 함수로만 표현되고, 수분밀도 0.05[g/m<sup>3</sup>]는 가시거리가 300m에 해당하고, 0.5[g/m<sup>3</sup>]는 50m에 해당한다[5]. 300GHz에서 가시거리

300m와 50m에서의 감쇠량은 각각 0.8, 7.8[dB/km]이다.

강우와 구름 및 안개에 의한 전파 감쇠는 옥외 무선통신시스템인 경우에만 추가적인 감쇠량을 고려해야 하고 WPAN과 같은 옥내 응용에서는 고려하지 않아도 된다. 전자파는 자유공간을 전파하면서 전파 경로의 거리에 따라 손실이 발생하며, 잘 알려진 Friis 공식에 의하여 전파손실을 계산할 수 있다. 자유공간의 거리에 따른 감쇠량은 대기가스 감쇠 및 강우 감쇠 보다 대단히 커서 근거리 통신인 경우 자유공간 손실로만 감쇠량을 예측해도 무방하다. 300GHz에서 10m 거리의 자유공간 전파손실은 102dB이다.

## III. THz 무선링크 특성 및 안테나 이득

THz 대역에서의 무선통신은 통신을 위한 주파수 대역폭이 기존의 밀리미터파 대역 보다 월등히 넓은 반면 현재의 기술수준에서 볼 때 출력 전력이 1mW 이하로 매우 낮기 때문에 옥외 통신 응용 보다는 10m 이내의 옥내 단거리 통신에 적합하다. 본고에서는 옥내 응용을 위한 무선링크에 대해서만 고려한다. THz 대역의 통신채널은 기존 밀리미터파 대역의 다중경로 NLOS(Non-Line-Of-Sight) 환경과는 달리 고지향성 안테나를 사용하는 LOS 환경이다. 다중경로에 의한 전파는 실내 공간의 벽면, 천정, 바닥 및 가구 등에 의한 반사로 인해 LOS 신호에 비해 크기가 아주 작아서 채널 모델링에서 의미있는 다중경로(Significant Multipath)로 작용하지 못할 것이다. 따라서 LOS에 의한 경로손실만이 존재하는

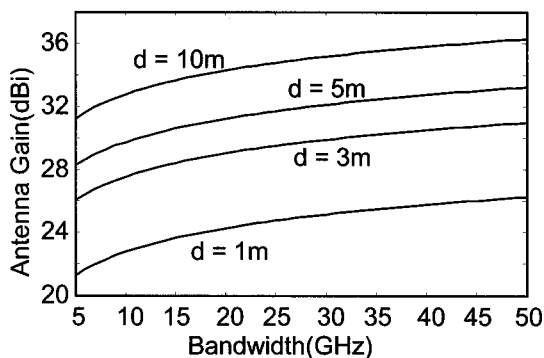


(그림 2) THz 대역의 대기 가스에 의한 감쇠 특성

AWGN(Added White Gaussian Noise) 환경으로 생각할 수 있다. 고지향성 안테나의 3dB 빔 폭이 15° 이하이면 다중경로 성분은 송신기의 전파 방향과 같은 방향으로부터 수신기에 도달한다[6]. 이 경우 다중경로는 송신기와 수신기의 빔 폭 내에서 LOS와 평행한 오프셋 위치의 물체에 의해 한번 반사된 파(Single Reflection) 와 LOS 경로와 수직인 옥내의 두 벽면 중 적어도 하나의 벽면이 도체인 경우 두 번 반사된 파(Double Reflection)에 의한 것 뿐이다. 그러므로 THz 대역의 통신 채널은 고지향성 안테나를 사용하는 LOS 환경이어야 하므로 다중경로에 의한 지연확산이 미미해서 ISI(Inter-Symbol Interference) 문제도 발생하지 않는다.

안테나 이득은 링크 버짓 관계식  $P_{in} = P_{out} + G_t + G_r - L_r - L_m$  으로부터 계산할 수 있다. 여기서,  $P_{in}$ 은 수신기 입력전력(dBm),  $P_{out}$ 은 송신기 출력전력(dBm),  $G_t$  및  $G_r$ 은 송신 및 수신 안테나 이득(dBi),  $L_r$ 는 캐리어 주파수( $f_c$ )에서 링크 거리에 따른 경로손실과 대기가스에 의한 감쇠의 총합(dB) 이고,  $L_m$ 은 링크마진(dB)으로 전파가 자유공간을 전송될 때 신호의 페이딩 영향 및 시스템에서 고려하지 못한 기타 손실을 고려하기 위한 것이다.  $G_t = G_r$  라 가정하였으며, 안테나 이득 계산에 사용된 파라미터는  $f_c = 220\text{GHz}$ ,  $P_{out} = 0\text{ dBm}$ ,  $L_m = 10\text{dB}$ ,  $\text{BER} = 10^{-12}$ 에서 ASK 변조방식의  $\text{SNR} = 20, 2\text{dB}$  이다. 수신기의 잡음지수(NF)는 10dB로 가정하였으며, 대기 가스에 의한 감쇠는 2.4(dB/km)를 고려하였다. (그림 3)은 무선링크의 거리에 따라 통신 대역폭이 5 ~ 50GHz 일때 안테나 이득을 나타낸다[4].

안테나 이득은 ASK 변조방식을 사용하는 경우, 10m 링크에서 대역폭에 따라 31.3 ~ 36.3 dBi, BPSK 변조방식의 경우



(그림 3) 대역폭에 따른 안테나 이득(ASK 변조)

는 26.6 ~ 31.6 dBi 범위이다. 대역폭 BW = 20GHz에서 ASK 변조방식인 경우 10m 링크에서 안테나 이득은 34.3dB, BPSK의 경우 안테나 이득은 29.6dB이다. 따라서, 옥내의 10m 무선링크에 사용하기 위해서는 35dBi 정도의 안테나 이득이면 충분하다. 그러나 현재의 기술수준으로 볼 때 송신기의 출력전력 0 dBm은 얻기 힘들며 H-밴드(220 ~ 325GHz)에서 혼 안테나의 이득은 25dBi 수준이므로 혼 안테나에 광학 렌즈를 부착하여 무선링크의 이득을 증대시킬 필요가 있다.

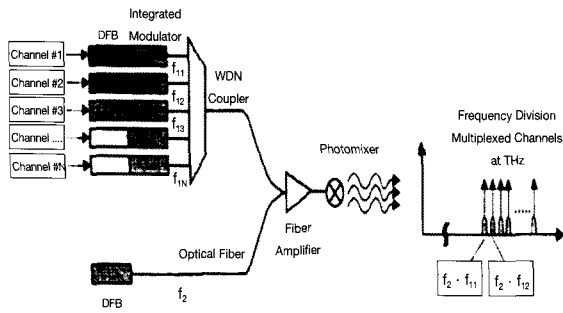
참고문헌 [7]의 경우 직경 5cm, 초점거리 12cm의 폴리에틸렌 렌즈를 이용하여 안테나의 이득을 각각 14dB 정도 증대시키는 효과를 가져왔다.

## IV . THz 무선통신 송수신기 기술

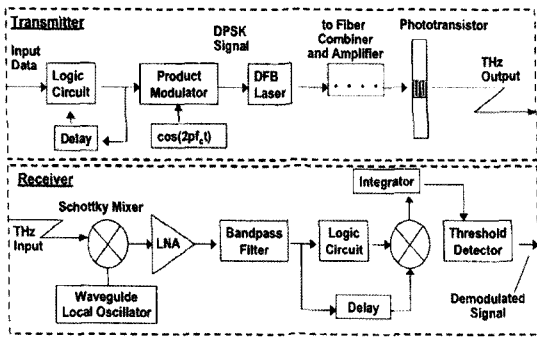
### 1. THz 송수신기

초기의 THz 송수신기는 참고문헌 [8]에서 인용한 미국 캘리포니아 대학의 E. R. Brown이 1999년 광믹싱(Photo Mixing)에 의하여 수십 Gbps의 데이터를 전송하는 개념을 제안하였다. 초광대역폭을 이용하는 송수신기의 개념은 오랫동안 연구되지 않고 정체되어 왔으며 THz 송수신기를 소형화하거나 헤테로다인 시스템을 구동하기 위한 LO 신호발생기에서 내재적인 문제로 상용 시스템개발이 이루어지지 않았지만 그 이후 새로운 광 소자들이 개발되어 이를 이용한 THz 송수신기가 개발되기 시작하였다. (그림 4)는 E. R. Brown이 제안한 THz 송수신기의 구성도이다.

THz 대역에서 최초의 무선전송 실험은 2004년 독일의 Braunschweig 대학에서 수행되었다[9]. 적외선광의 펄스 레이저 펄스를 이용하여 최대 1m 거리까지 오디오 신호를 전송하였고, 본 실험을 확장하여 동 대학의 통신실험실(TCL)에서는 300GHz의 캐리어 주파수에서 RF 부품을 이용하여 송수신기를 구성하고 6MHz의 대역폭을 갖는 아나로그 비디오표현을 10m 거리까지 전송하였다[7]. (그림 5)는 간단한 서브하모닉 믹서와 혼 안테나로 구성된 THz 송신기와 수신기의 구성도이며, LO신호는 16GHz를 9배 주파수를 체배하여 발생시켰다. 또한 무선링크의 이득을 보상하기 위



(a) 1.5 μm 광회이버 기술기반 광믹싱 송신 신호현

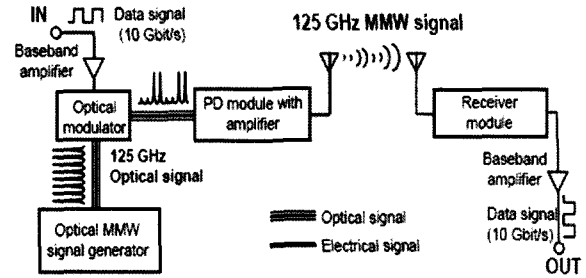


(b) 광기술 기반 Gbps 데이터 전송 송수신기

(그림 4) 초기에 제안된 THz 송수신기 구성[8]

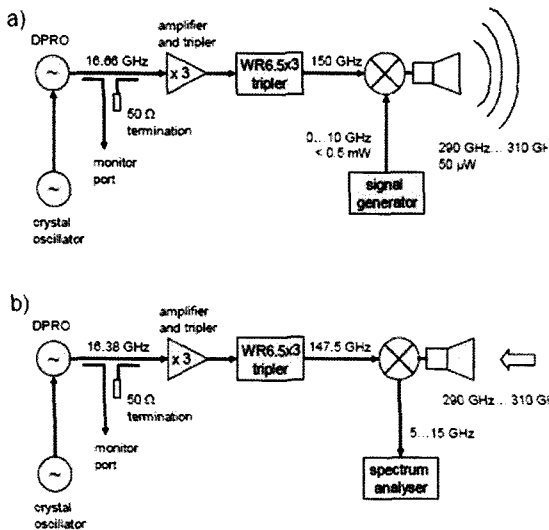
10Gbps HDTV 비디오 신호전송 시연을 하였고, 전송거리는 200m 였다[10]. 초기에 개발된 시스템은 송신기에 광학기술을 적용하였다(그림 6 참조). 포토 믹싱 방법으로 낮은 THz 캐리어 신호를 발생시키고, 10Gbps의 데이터 신호를 ASK 변조방식에 의해 광의 강도(Intensity)를 변조한 후 광 증폭기로 증폭하고 광전변환(O/E)을 통해 안테나로 전송된다.

수신기는 모두 전자방식(All Electronic)으로 구성되고 Envelop 검출방식으로 복조기능을 한다. 최근, 광전방식의 송신기는 모두 전자소자로 구성된 MMIC칩을 개발하였다.



(그림 6) 125GHz 송수신기 구성[10]

하여 혼 안테나에 폴리에틸렌 렌즈를 부착하였다. 일본의 NTT는 2005년 125GHz 대역을 이용하여 옥외에서



(그림 5) 300GHz 송신기(a)와 수신기(b)[7]

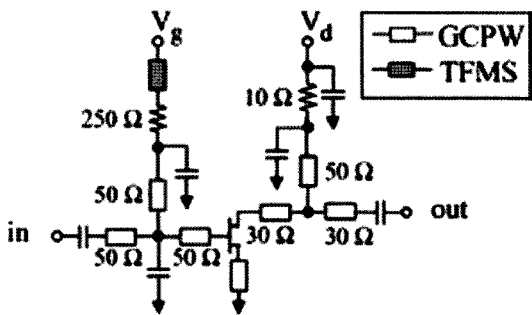
THz대역의 단거리(~10m) 무선통신시스템에 대한 연구는 현재 Braunschweig 대학을 중심으로 독일이 가장 활발한 연구결과를 보이고 있다. 이들이 저널에 발표한 논문의 대다수는 옥내 통신시스템에 적용하기 위한 채널모델 및 시스템 레벨의 무선링크 시뮬레이션 연구가 주류를 이루고 있다. 이들의 주 관심 주파수는 300GHz 및 350GHz 대역이며, 이 대역에서 가용한 대역폭은 47GHz로 계산하였다. 특히, 실내 다중경로 환경에서 NLOS(Non-Line-Of-Sight)를 극복하기 위하여 THz 미러(Mirror)를 이용하여 실내의 벽면으로부터 반사되는 "Directed NLOS" 개념을 제안하였다[11].

## 2. 송수신기 Front-end RF MMIC

독일의 Fraunhofer IAF에서는 200GHz 이상에서 동작하는 LNA, Mixer등 RF핵심 MMIC를 개발하고 있다. 이 RF MMIC 들은 THz 대역에서 레이더, 이미징, 통신 등에 응용된다. 현재의 기술수준을 고려해 볼 때 G-대역(140 ~ 220 GHz) 및 H-대역(220 ~ 325GHz)의 RF MMIC 핵심부품은 5년 이내에 상용화될 것으로 기대되며, 이를 이용한 초고속(10Gbps급

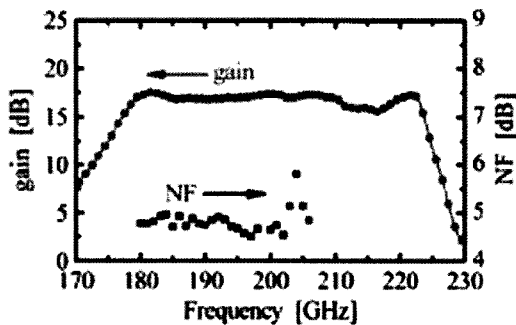
이상) 무선전송 시스템이 개발될 것으로 생각된다. RF 송수신기를 구성하는 핵심부품으로는 국부발진기(LO), 믹서(Mixer), 전력증폭기(PA), 저잡음증폭기(LNA), 필터, 안테나 등이다. 현재 선진 각국에서는 HEMT(High Electron Mobility Transistor), HBT(Hetero-junction Bipolar Transistor) 등 능동소자를 이용한 RF 송수신 MMIC를 개발하고 있다. RF MMIC 제작을 위한 능동소자의 중요한 파라미터는 차단주파수  $f_T$ 와 최대 공진주파수  $f_{max}$  이다. (그림 7)은 게이트 길이 50nm의 Metamorphic HEMT 기술을 이용한 210GHz 1단 공통 소스(Common Source) 증폭기 회로 구성이며, 이를 이용한 4단 증폭 LNA MMIC의 이득 및 잡음 성능을 나타낸다[12]. 180 ~ 220GHz에서 이득은 16 dB, 잡음지수(NF)는 4.8 dB의 성능을 보였다. 여기서,  $f_T$ 와  $f_{max}$ 는 각각 400 GHz와 420 GHz이다.

(그림 8)은 100nm mHEMT 기술을 이용한 이중 게이트 구조의 능동형 믹서 MMIC 회로구성과 믹서의 성능을 나타내



GCPW : Grounded Coplanar Waveguide  
TFMS : Thin Film Microstrip line

(a) Single-stage LNA 회로구성

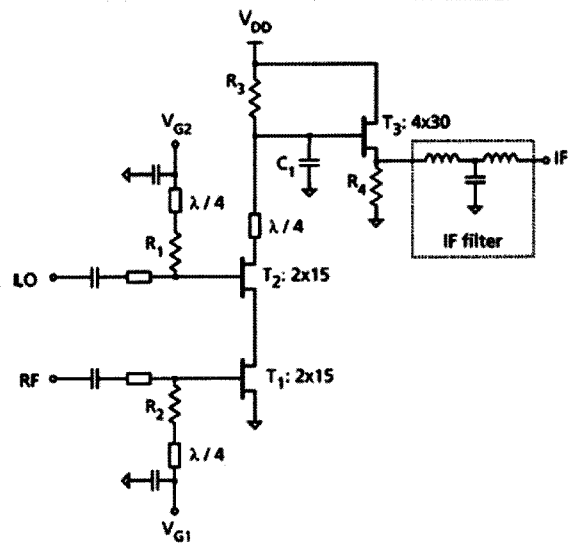


(b) 4 Stage LNA Gain, NF 특성

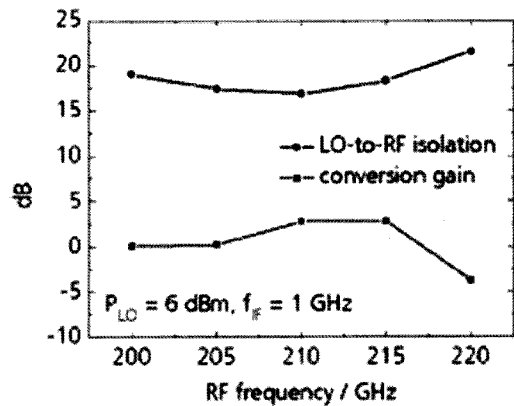
(그림 7) 210GHz 대역 LNA MMIC[12]

며, 믹서의 성능은 210GHz에서 전치 및 후단 증폭기를 사용하지 않고서 주파수 하향 변환시 변환 이득은 2dB 이상, LO-RF Isolation은 16dB 이상이다[13].

(그림 9)는 250nm InP DHBT(Double Heterojunction Bipolar Transistor) 기술을 이용한 330GHz 대역의 1단(Single-stage) 공통 베이스 접지 전력증폭기 MMIC의 시뮬레이션 성능 특성을 나타내며, 324GHz에서 소신호 이득 4.8dB이고, 출력 포화전력은 330GHz에서 7mW(8.4dBm), 1.5V DC 바이어스와 14mA에서 DC PAE(Power Added Efficiency)는 14.5%이다. 여기서 사용한 250nm InP DHBT는  $f_T$ 는 375GHz,  $f_{max}$ 는 550GHz 이다[14].



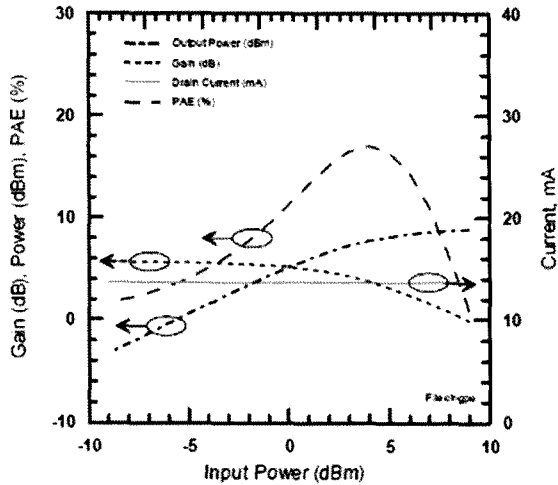
(a) 이중게이트 구조 능동형 믹서 회로구성



(b) 믹서 변환이득 및 LO-RF Isolation

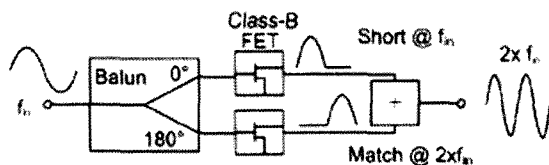
(그림 8) 100nm mHEMT 210 GHz 능동형 MMIC[13]

## V. 결 론

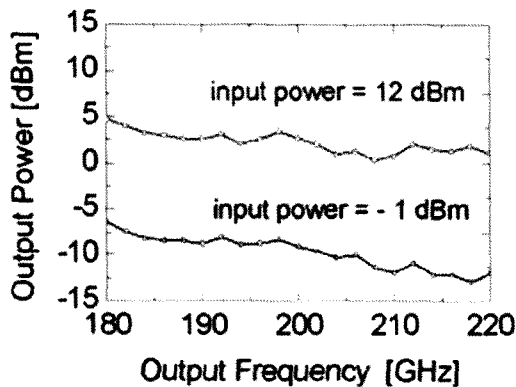


(그림 9) 250nm InP DHBT 330GHz PA 특성[14]

(그림 10)은 180 ~ 220GHz 대역에서 동작하는 주파수 2 체 배기의 회로 구성과 입출력 변환 성능을 나타낸다[15]. 입력 전력 12dBm에서 0 dBm 이상의 출력 전력을 얻었다.



(a) 주파수 2체배기 회로구성



(b) 주파수 2체배기의 출력 변환 특성

(그림 10) 180 ~ 220GHz 주파수 2체배기[15]

THz 대역의 대기 전파특성을 고려해 볼 때 무선통신 응용에 유망한 주파수 대역은 220GHz, 300GHz, 350GHz로 볼 수 있다. 이 대역에서 가용한 주파수 대역폭은 각각 68GHz, 48GHz, 45GHz이다. 이러한 넓은 대역폭을 이용하여 스펙트럼 효율이 낮은 변조방식으로도 10Gbps 이상의 데이터 속도를 용이하게 얻을 수 있다.

또한, THz 대역의 통신 응용은 옥내 근거리 무선전송에 적합하고, 옥외 점대점 통신응용은 현재의 능동소자 기술과 RF MMIC 기술의 상용화 한계로 충분한 출력 전력을 얻을 수 없어 먼 미래에 실현될 가능성을 남겨두고 있다.

THz 대역의 전자파를 이용한 무선통신 송수신기 기술의 핵심은 RF Front-end를 구성하는 LNA, Mixer, LO, PA 등 능동소자로 이루어지는 MMIC 기술과, 안테나, 필터, 접속부품 등 수동부품 기술의 개발에 좌우된다. 따라서, 핵심 RF MMIC의 기반기술 개발이 시급하며, 아울러 송수신기의 시스템 기술에 대한 연구도 지속적으로 추진되어야 한다.

### Acknowledgement

본 연구는 지식경제부 및 방송통신위원회의 정보통신 산업원천기술개발사업의 일환으로 수행하였음. [2009-F-037-01, 테라헤르츠 대역 전파환경 및 무선전송 플랫폼 기술연구], 한국전자통신연구원(ETRI)

### 참 조 문 헌

- [1] S. Cherry, "Edholm's Law of Bandwidth", IEEE Spectrum, 41, 7, p.50, July 2004.
- [2] <http://www.engadget.com/2008/01/14/33-megapixel-super-hi-vision-ultra-hdvt-could-be-on-the-air-in/>
- [3] Michael J. Fitch and Robert Oslander, "Terahertz Waves for Communications and Sensing", Johns Hopkins APL Technical Digest, Vol. 25, No. 4, 2004, pp348-355.
- [4] 정태진, "테라헤르츠 대역 주파수에서 근거리 무선 통


신 응용을 위한 채널 모델 및 무선 링크 성능 분석”, 한국전자과학기술논문지, 제20권 제9호, pp868-882, 2000년 9월.

- [5] ITU-R.P840-3, “Attenuation due to clouds and fog”, 1999.
- [6] Peter F. Driessen, “Gigabit/s Indoor Wireless Systems with Directional Antenna”, IEEE Transactions on Communications, Vol. 44, No. 8, pp1034-1043, Aug. 1996.
- [7] C. Jastrow, et al, “300 GHz transmission system”, Electronics letters, Vol. 44 No. 3, 31st Jan. 2008.
- [8] Peter H. Siegel, “Terahertz Technology”, IEEE Transactions on microwave theory and techniques, Vol. 50, No. 3, pp910-928, Mar. 2002.
- [9] T. Kleine-Ostmann, et al, “Audio signal transmission over THz communication channel using semiconductor modulator”, Electronics letters, Vol. 40 No. 2, 22nd Jan. 2004.
- [10] Akihiko Hirata, et al, “120-GHz-Band Millimeter-Wave Photonic Wireless Link for 10-Gb/s Data Transmission”, IEEE Transactions on microwave theory and techniques, Vol. 54, No. 5, pp1937-1944, May 2006.
- [11] Radoslaw Piesiewicz, et al, “Short-Range Ultra-Broadband Terahertz Concepts and Perspective”, IEEE Antennas and Propagation Magazine, Vol. 49, No. 6, pp24-39, December 2007.
- [12] Axel Tessmann, et al, “Metamorphic HEMT MMICs and Modules for Use in a High-Bandwidth 210 GHz Radar”, IEEE Journal of Solid-state Circuits, Vol. 43, No. 10, pp2194-2205, Oct. 2008.
- [13] I. Kallfass, “A 210 GHz Dual-Gate FET Mixer MMIC With  $>2$  dB Conversion Gain, High LO-to-RF Isolation, and Low LO-Drive Requirements”, IEEE Microwave and Wireless Components Letters, Vol. 18, No. 8, pp557-559, Aug. 2008.
- [14] Jonathan Hacker, et al, “250 nm InP DHBT Monolithic Amplifiers with 4.8 dB Gain at 324 GHz”, IEEE MMT-S 2008 International Microwave Symposium, pp1-4, Jun.

2008.

- [15] Michael Schlechtweg, Axel Tessmann, “From 100 GHz to Terahertz Electronics - Activities in Europe”, IEEE Compound Semiconductor Integrated Circuit Symposium, CSIC2006, pp8-11, Nov. 2006.

약 력



1979년 충남대학교 전자공학과(공학사)

1979년 ~ 1983년 ADD 연구원

1983년 ~ 1984년 대우중공업주 대리

1990년 KAIST 전기 및 전자공학과(석사)

2004년 KAIST 전기 및 전자공학과(박사)

1984년 ~ 현재 한국전자통신연구원 책임연구원

관심분야: 마이크로파 및 밀리미터파 RF/F 시스템 설계, 통신시스템 기저대역(BB) 모델 설계

정 태 진

