

THz 통신 RF 송수신기 집적화 기술개발 동향

Integrated RF Transceiver Technologies for Terahertz
Communication System Applications

정태진 (T.J. Chung) 밀리미터파기술연구팀 책임연구원
이원희 (W.H. Lee) 밀리미터파기술연구팀 선임연구원

목 차

-
- I . 서론
 - II . THz 통신 RF Front-end 집적화
요소 기술
 - III . Integrated THz 송수신기 시스템
개발 사례
 - IV . 결론

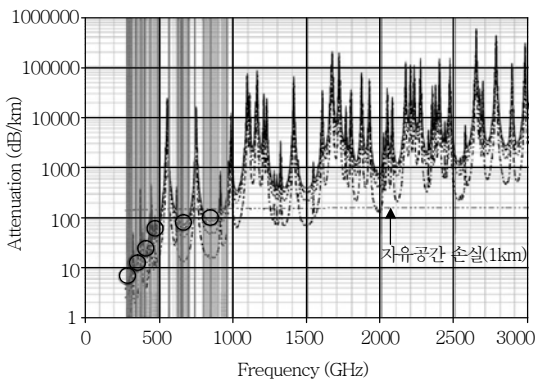
* 본 연구는 지식경제부, 방송통신위원회 및 한국산업기술평가관리원의 산업원천기술개발사업(정보통신)의 일환으로 수행하였음. [KI002056, 테라헤르츠 대역 전파 환경 및 무선전송 플랫폼 기술연구]

최근 테라헤르츠 대역의 주파수를 이용하여 데이터 전송속도 10Gbps 이상의 초고속 통신 시스템에 대한 관심이 높아지고 있다. 테라헤르츠 대역의 주파수 범위는 100GHz~10THz로서 종래의 밀리미터파 대역에서 사용하고 있는 대역폭에 비하여 월등히 넓은 주파수 대역폭을 제공하여 주기 때문에 미래의 초고속 통신시스템 응용에 무한한 잠재적 가치를 가지고 있다. 테라헤르츠 전파는 전자파와 광파의 특성을 모두 가지고 있어 공간으로 전파하며 광의 특성에 따라 광학 렌즈를 이용하여 방사 빔을 집중할 수 있다. 또한 테라헤르츠파는 전파 감쇠가 대단히 커서 현재의 기술수준을 고려해 볼 때 10m 정도의 단거리 통신에 적합하다. 미국, 유럽, 일본 등 테라헤르츠 선도국에서는 핵심 부품 및 MMIC 등의 연구 개발에 많은 투자를 하고 있다. 본 고에서는 테라헤르츠 통신을 위한 집적화 RF 송수신기 기술개발 동향에 대하여 소개하고자 한다.

I. 서론

테라헤르츠 대역의 주파수를 이용하여 통신시스템 응용을 위해서는 100GHz~10THz 사이의 적절한 주파수 대역을 선정하여야 한다. 현재 ITU에서는 테라헤르츠 응용 서비스에 사용될 주파수 대역에 대한 연구를 추진하고 있으며, WRC2011에서 테라헤르츠 주파수 분배 권고안을 논의할 예정으로 있다.

(그림 1)은 ITU-R USWPs 7D 연구반에서 제공한 해발 고도에 따른 대기 전파감쇠 특성을 나타낸다. 흐린 회색의 스펙트럼은 radio astronomy, 진한 회색 선은 earth exploration, 6개의 검은색 원형은 통신을 위한 스펙트럼으로 제안되고 있다. 여기서, 대기 감쇠량은 1km horizontal path에 대하여 계산된 것이다. 통신 응용을 위한 관심 주파수 대역은 275~300GHz, 355~400GHz, 490~510GHz, 690~710GHz, 800~850GHz, 900~950GHz이다[1].



(그림 1) THz 대역의 대기 전파감쇠 특성 및 관심 주파수 대역[1] (실선표시: 해발 고도 0km, 점선표시: 해발 고도 0.3, 1, 3km) (해발고도가 높아질수록 대기 감쇠량이 낮아짐)

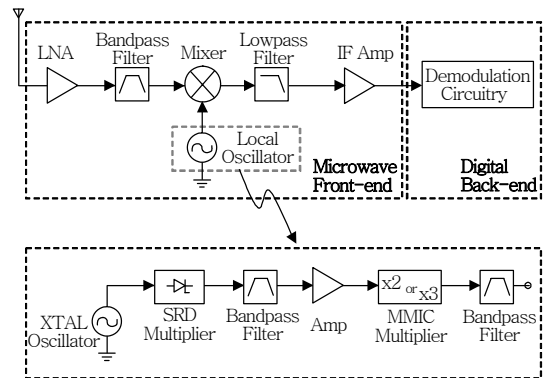
IEEE 802.15 WPAN THz-IG[2]에서는 2007년부터 테라헤르츠 통신을 위한 표준 제정의 사전 단계로써 연구반을 결성하여 300~600GHz 대역의 다양한 통신 응용에 대한 기술적 회의를 정기적으로 개최하고 있다.

테라헤르츠 주파수를 이용하는 기술은 1970년대

부터 우주분야에 응용을 위하여 오랫동안 연구되어 왔으며, Schottky 다이오드를 기반으로 하는 수동 소자 기술이 주류를 이루어왔다. 미국의 NRAO는 1990년부터 현재까지 ISSTT를 매년 개최하고 있으며[3], 여기서 발표되는 논문의 대다수는 Schottky 다이오드를 기반으로 하는 주파수변환기(mixer), THz detector, 주파수채배기(frequency multiplier) 등의 기술이다. 현재는 Schottky 다이오드 기술은 성숙 단계에 있으며 1THz 정도까지 동작하는 부품도 개발되어 있다. 그러나, Schottky 다이오드 수동 부품은 신호의 증폭 기능이 없고 높은 테라헤르츠 주파수에서 손실도 크고 효율도 낮은 단점이 있다. 따라서 트랜지스터를 기반으로 하는 능동부품의 개발이 절실한 실정이다.

유럽은 산·학·연 컨소시엄을 결성하여 SiGe HBT 기술을 기반으로 최대 주파수(f_{max}) 500GHz를 2010년까지 달성한다는 목표로 설정하였다[4]. 독일의 Fraunhofer IAF는 200GHz 이상에서 동작하는 저잡음증폭기(LNA), 주파수변환기 등 핵심 MMIC를 개발하였으며[5], 이들 MMIC는 테라헤르츠 레이더 및 이미징 시스템을 비롯하여 통신시스템의 RF front-end에 공통적으로 이용된다.

일반적으로 무선통신을 위한 RF front-end는 (그림 2)에 나타낸 superheterodyne 수신기의 예와 같이 안테나, 저잡음증폭기(LNA), 대역통과필터(BPF), 주파수변환기, 국부발진기(LO), 저역통과필터(LPF), 중간주파 증폭기(IF Amp)로 구성된다. 여



(그림 2) Superheterodyne Receiver Front-end

기서 국부발진기는 주파수변환기의 LO 포트에 전력을 공급하는 역할을 하며 주파수가 낮은 기준 발진기의 주파수를 증폭기와 체배기를 이용하여 높은 주파수의 LO 신호를 발생시킨다.

그러나, 테라헤르츠 주파수 대역에서는 현재 단계에서 안테나 후단에 연결된 저잡음증폭기와 대역통과 필터는 가용하지 않다. 따라서, 안테나와 주파수변환기가 직접 연결된 구조가 대부분이며, Schottky 다이오드를 기반으로 한 주파수변환기와 주파수체배기 기술이 현재까지 사용되고 있다.

밀리미터파 이상의 시스템은 도파관(waveguide)을 기반으로 주로 설계되어 서로 독립된 주요 구성부품을 결합하여 사용하여 왔다. 이러한 시스템은 성능이 아주 우수하지만 매우 고가이며 부피도 크다. 최근 밀리미터파 이상의 대역에서 평면 직접회로(planar integrated circuit) 기술의 발전으로 적은 제조비용으로 소형 경량의 서브시스템 구현이 가능해졌으며, 성능도 도파관을 기반으로 하는 시스템에 필적할 수준에 이르렀다.

테라헤르츠 주파수의 이용은 우주과학, 천문 및 보안 분야에서 중요한 응용 추세가 되고 있다. 테라헤르츠 수신기 응용에서 평면 집적 quasi-optical 기술은 도파관을 기반으로 하는 front-end의 대안으로써 기대되고 있다. 주파수가 점점 높아짐에 따라 도파관을 이용하는 안테나 등은 제조 비용이 상승하고 misalignment의 문제가 더욱 심각해지고 있

다. 최근의 나노 기술과 마이크로 머시닝 기술의 발전에 따라 테라헤르츠 영역에서도 충분한 정밀도로 유전체 상의 평면 안테나 구조를 신뢰성 있게 정렬할 수 있는 단계에 이르렀다.

(그림 3)은 반구(hemispherical) 형태의 Si 렌즈 위에 집적화된 RF front-end 시스템의 좋은 예이다[6].

본 고에서는 테라헤르츠 대역 통신시스템에 응용되는 RF front-end 집적화 기술에 대하여 소개하고자 한다.

II. THz 통신 RF Front-end 집적화 요소 기술

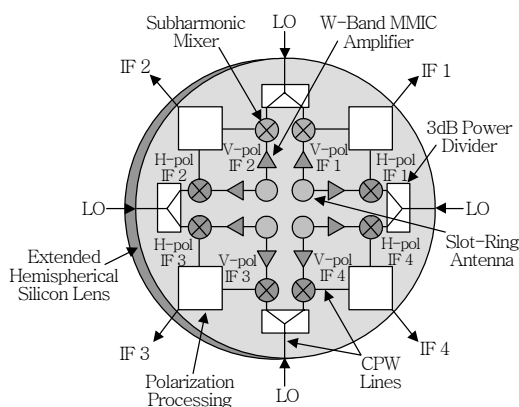
1. 평면 안테나 집적화 기술

Quartz 또는 Si 렌즈에 집적화된 log-periodic, log-spiral, double-slot, double-dipole 안테나들은 30GHz~5.2THz 주파수 범위에서 응용되어 왔으며 많은 문헌에 발표되었다. 그러나, 집적화된 quasi-optical front-end를 설계하기 위해서는 급전 안테나 성능의 신뢰성 있는 모델링을 필요로 한다.

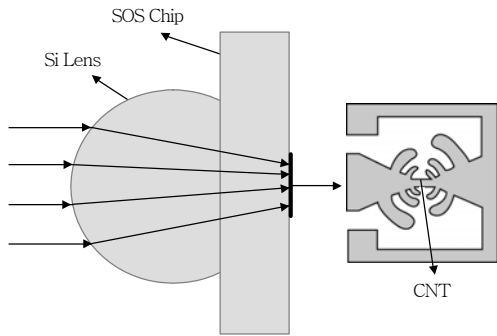
테라헤르츠 대역에서도 수신부의 front-end부를 구성하는 (렌즈)/안테나와 믹서 또는 검출기 등을 하나의 평면회로로 구성하여 각각의 독립적인 부품의 결합에 따른 접속 손실을 줄이고 성능을 향상시킬 필요가 있다.

평면형 안테나와 RF MMIC 회로를 직접 집적화 하는 경우에 잠재적인 문제는 기판 모드(substrate mode)인데 이에 의한 손실을 줄이기 위하여 0.1λ 이하의 매우 얇은 기판이 일반적으로 요구된다.

이러한 substrate 모드를 제거하는 손쉬운 방법은 안테나 웨이퍼와 유전율이 거의 같은 유전체 렌즈 위에 CPW로 급전되는 슬롯 형태의 안테나를 위치시키는 것이다. 렌즈는 유전체 반평면(dielectric half-space)처럼 보여서 표면파(surface wave)를 지원하지 않고 또한, 안테나는 유전체 쪽으로 빔을 방사하여 고지향성 패턴을 형성한다.



(그림 3) Si 렌즈 상에 집적된 RF 수신기 Front-end 개념도[6]



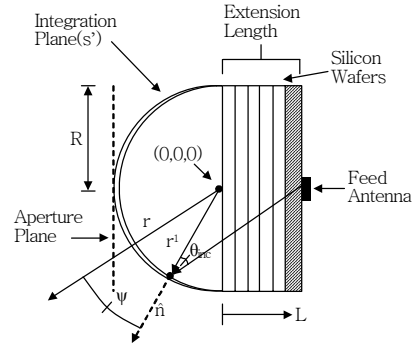
(그림 4) Lens-Antenna Quasi-Optical Coupling Configuration[7]

평면형 안테나와 정합회로, 믹서로 구성되는 집적회로 단일 평면(uniplanar) 수신기는 종종 CPW 기술을 이용하며, 도파관을 기반으로 하는 시스템에 비하여 많은 장점이 있고, 밀리미터파 이상의 주파수에서 설계와 제작이 아주 용이하다. (그림 4)는 Si 렌즈 상에 log-periodic 안테나를 집적하여 quasi-optical coupling 구조의 예를 나타낸다[7].

두꺼운 유전체 기판 위에 집적된 안테나는 기판 모드로 전력 손실이 대단히 크다. 보통 다이폴 안테나는 0.02λ , 슬롯 안테나는 0.04λ 정도이다. 그러나, 밀리미터파 및 서브 밀리미터파에서는 기판이 매우 얇아지고 깨어지기 쉽다. 얇은 기판을 만드는 하나의 방법은 안테나를 보통 $1\sim 3\mu\text{m}$ 두께의 아주 얇은 유전체 멤브레인(membrane) 위에 장착하며, 멤브레인은 Si이나 GaAs 웨이퍼 위에 집적된다.

유전체 렌즈는 평면 안테나 웨이퍼와 같은 유전율을 가지며, 유전체 렌즈 위에 위치한 안테나는 대부분의 전력을 유전체 쪽으로 방사하는 경향이 있어 빔 패턴을 고유전율 렌즈 상에서 단일 방향으로 만들어 준다. 유전체와 공기(air) 간 전력 비는 기본적인 슬롯 안테나의 경우 $\epsilon_r^{3/2}$, 기본적인 다이폴 안테나는 ϵ_r 이다. 여기서, ϵ_r 은 렌즈의 상대 유전율이다.

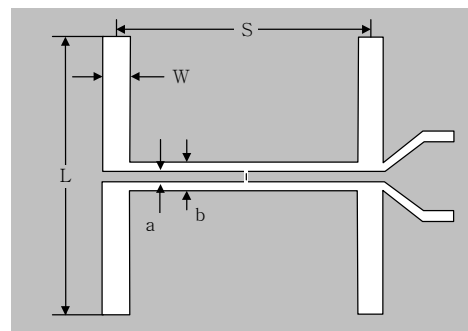
유전체 렌즈는 반구형(hemispherical), 타원형(hyperhemispherical 또는 ellipsoidal) 형태이며, 수신기 응용을 위하여 다양한 형태의 안테나를 이러한 렌즈 위에 집적할 수가 있다. (그림 5)와 같이 hyper-hemispherical 렌즈는 hemispherical 렌즈에 길이



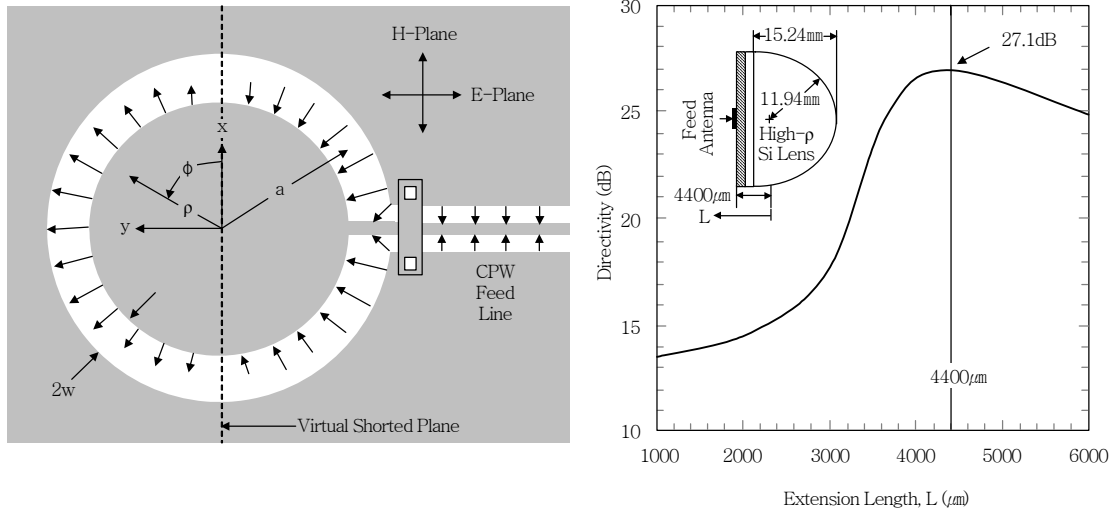
(그림 5) Extended Hemispherical Lens[8]

를 R/n 만큼 확장한(extended) 것이다. 여기서, n 은 렌즈의 굴절 지수(refractive index)이며, R 은 렌즈의 반경이다. 안테나 용어에서, hemispherical 모양의 유전체 렌즈는 집적된 안테나가 방사한 빔을 넓은 쪽 방향으로 휘게 하여 패턴을 sharp하게 만들어 줌으로써 집적된 안테나의 이득을 효율적으로 n^2 만큼 증가시킨다. 타원형 안테나의 초점에 놓여진 어떠한 안테나도 타원형 렌즈의 개구면(aperture)에 의해 diffraction limited된 메인 빔을 갖는 far-field 패턴을 발생시킨다[8].

30~600GHz 대역에서 log-periodic, spiral, double-slot, double-dipole 안테나들을 quartz 및 Si 유전체 렌즈 위에 집적한 연구결과는 문헌에 많이 발표되어 있다. 반구의 위치 뒤에 확장 길이만을 변경시키므로써 광범위한 quasi-optic 시스템에 결합하는 안테나/렌즈 시스템을 구축할 수 있기 때문에 extended hemispherical 시스템은 아주 실용적이다. Hyperhemispherical 렌즈는 extended hemi-



(그림 6) Double-Slot Antenna Layout[9]



(그림 7) CPW-fed Slot-Ring Antenna and Directivity vs Extended Hemispherical Lens[10]

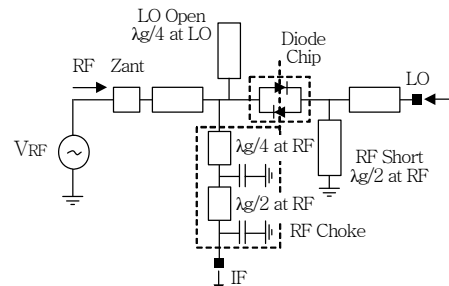
spherical 렌즈의 특수한 경우이다.

(그림 6)은 1.5~3THz 대역에서 사용하기 위한 double-slot 급전 안테나의 기하학적 구조의 예를 나타낸다. 그림에서 회색 부분은 gold layer, 흰색 부분은 유전체(dielectric)를 나타낸다[9].

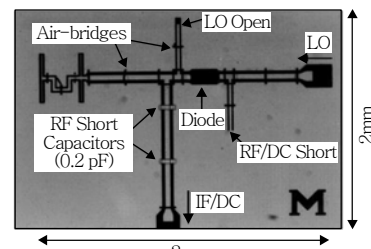
(그림 7)은 단일 및 이중 편파 링 슬롯 안테나를 유전체 렌즈 위에 집적한 구조를 나타낸다[10]. 안테나는 그림과 같이 CPW 라인으로 급전되고 uniplanar 믹서 및 LNA와 집적화가 용이하도록 되어 있다. 안테나 패턴 측정 결과 지향성은 27dB, cross polarization은 -20dB 이하, 부엽 레벨은 -15dB이었다[10]. 유전체 렌즈 기반의 슬롯 링 안테나는 밀리미터파 및 테라헤르츠 시스템을 소형 경량 및 저비용으로 구축할 수 있는 유력한 기술 중의 하나로 생각된다.

2. 주파수변환(믹서) 부품 집적화 기술

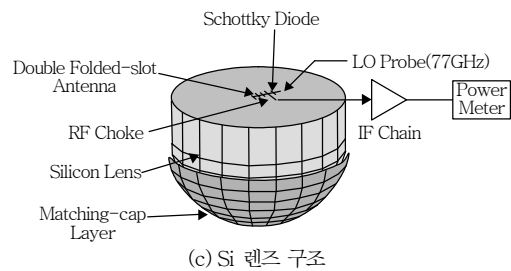
밀리미터파 및 서브 밀리미터파 응용을 위한 핵심 부품 중의 하나는 믹서이며, 이는 테라헤르츠 신호를 정확히 측정하는 데 적합한 IF 주파수 영역으로 하향 변환을 하는 데 사용된다. RF front-end 수신기의 대표적인 회로는 CPW로 급전되는 평면형 안테나와 쇼트키 다이오드 믹서로 구성된다. (그림 8)



(a) SHM 회로구성도



(b) 직접회로 배치도



(c) Si 렌즈 구조

(그림 8) 렌즈/안테나와 서브하모닉 믹서 수신기[11]

은 double folded-slot 안테나와 서브하모닉 믹서가 집적된 회로 구조를 나타낸다[11].

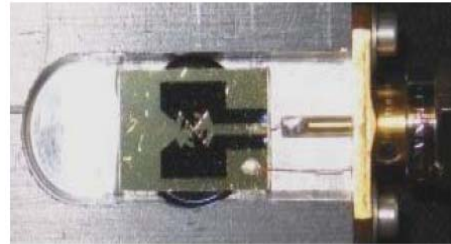
서브하모닉 믹서(SHM)는 대략 LO 주파수의 n 차 고조파인 RF 신호를 IF 신호로 하향 변환하는 기능을 한다. LO 주파수의 짝수차 고조파에서 신호 믹싱을 하기 위하여 SHM는 역병렬(anti-parallel) 쇼트키 다이오드 쌍과 같은 anti-symmetric 전류-전압 특성을 갖는 비선형 소자를 사용한다. 이러한 종류의 믹서들은 주로 밀리미터파 및 서브 밀리미터파 대역에서 도파관 및 quasi-optical 구조로 사용되어 왔고 잡음과 변환 손실은 기본파 믹서에 필적할 수준에 도달해 있다. 밀리미터파 및 서브 밀리미터파 대역에서 도파관 부품에 대한 대안으로써 평면회로(planar circuit)의 개발이 주요 관심의 대상으로 부각되고 있다.

밀리미터파 및 서브 밀리미터파 대역에서 SHM를 사용하는 주요 이유는 기본파 주파수에서 충분한 LO 전력을 발생시키는 데 기술적인 한계가 있기 때문이다.

CPW 기술은 마이크로 스트립에 비하여 많은 장점이 있다. CPW는 단일 평면 구조로서 회로 소자의 shunt 및 series 접속이 가능하고 via-hole을 통하여 뒷면과 연결할 필요 없이 간단하게 접지 평면(ground plane)에 연결할 수 있다. CPW 라인은 홀수차 모드에서 낮은 방사 손실을 보인다.

3. THz Quasi-Optical Detector

쇼트키 다이오드 검출기(detector)는 Golay cell, Pyroelectric detector 또는 Bolometer와 같은 실온 동작 detector에 비하여 감도가 높고 실온 또는 초저온에서 동작하며 응답시간이 빨라서 밀리미터파 및 서브 밀리미터파 대역에서 오랫동안 사용되어 왔다. 도파관 기반 쇼트키 다이오드 검출기는 보통 100GHz~1THz 범위에서 responsivity가 4000~1000(V/W)이다. 그러나, 도파관 기반 detector의 주파수 대역폭은 기본적인 도파관 동작에 의해서 약 50% BW로 제한된다. 다양한 응용을 위하여 동작 주



(그림 9) THz Detector with Log-periodic Antenna Mounted on Si Substrate Lens[12]

파수 대역폭을 보다 넓게 하는 것이 바람직하다[12].

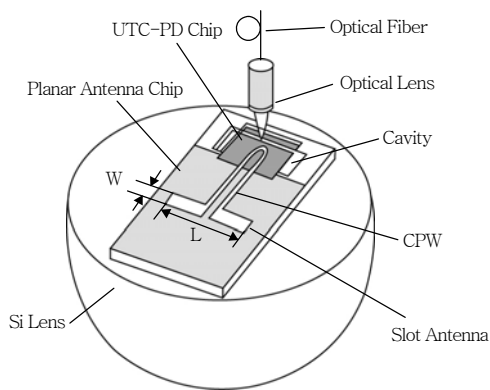
Si 렌즈에 장착된 광대역 안테나를 이용한 quasi-optical detector는 많은 문헌에 보고되어 있다. 이러한 안테나는 넓은 대역폭을 갖는 빔 패턴을 적절히 제어한다. (그림 9)는 미국의 VDI가 개발한 광대역 quasi-optical 테라헤르츠 쇼트키 다이오드 detector의 외형을 나타낸 것이다. 150~400GHz 주파수 대역에서 responsivity는 1000~300(V/W)이다. 집적화된 안테나는 log-periodic이다.

Ⅲ. Integrated THz 송수신기 시스템 개발 사례

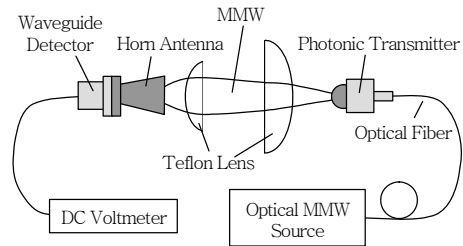
1. Integrated Photonic Transmitter

일본의 NTT는 125GHz 대역에서 10Gbps 데이터 전송을 목표로 photonic 기술을 기반으로 소형 경량의 송신기를 개발하였다[13]. 즉, ROF 방식의 송신기 기술이다. 전자방식(all electronic)을 사용하지 않은 이유는 현재의 기술 수준에서 테라헤르츠 대역의 신호발생이 어렵기 때문이었다. 광 영역에서 광 강도(intensity)를 ASK 변조하여 UTC-PD를 통하여 광신호가 전기신호로 변환되어 안테나를 통하여 전송된다. (그림 10)은 집적화 송신기의 개념도를 나타낸다. 출력 전력은 200 μ W 이상이다.

슬롯 안테나와 CPW는 0.4mm 두께의 Si 기판($\epsilon_r=11.7$)에 집적되고 기판 손실을 줄이기 위하여 CPW의 임피던스는 50 Ω 으로 하였다. 이득(gain) 및 지향성(directionality)은 렌즈 부착시 13.5dB, 16.9dB



(그림 10) Conceptual Diagram of a MMW Photonic Transmitter[13]



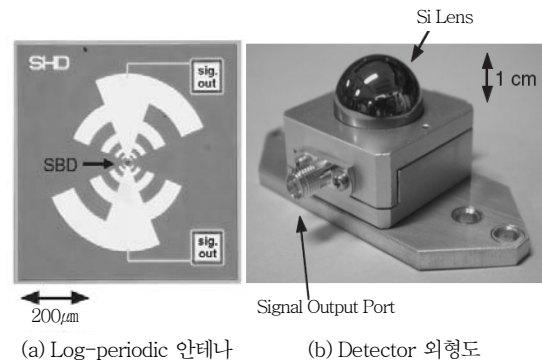
(그림 11) Photonic Transmitter and Output Power Measurement Test Setup[13]

이고, 렌즈를 부착하지 않았을 때는 4.3dB, 4.9dB 이다. (그림 11)은 제작된 송신기의 외형과 출력 전력을 측정하기 위한 실험 구성도를 나타내며, 최대 송신 전력은 $250\mu\text{W}$ 이다.

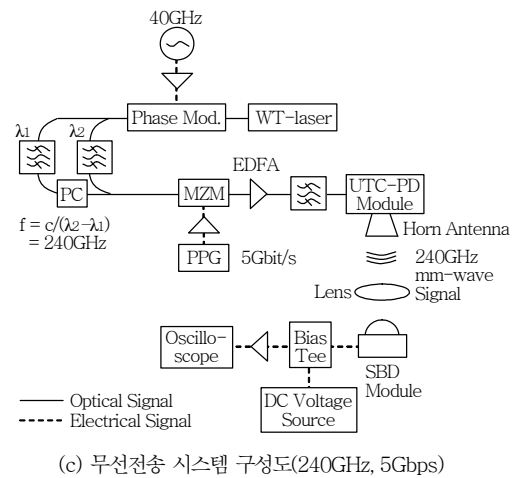
2. Integrated THz Detector

일본의 NTT는 2008년 밀리미터파 및 테라헤르츠 대역 무선통신 응용을 위하여 log-periodic 안테나와 쇼트키 다이오드를 Si 렌즈 위에 집적화한 detector를 개발하였다[14]. Detector의 sensitivity는 300GHz에서 1000(V/W), 1.2THz에서 125(V/W)이다. 240GHz의 캐리어 주파수에서 5Gbps 단거리 전송시험을 수행하였다. (그림 12)는 log-periodic 안테나의 형상과 제작된 detector 모듈, 240GHz, 5 Gbps 무선전송 시스템 구성도를 나타낸다.

본 실험에서 송신기 출력 전력은 -11dBm 이었다.



(a) Log-periodic 안테나 (b) Detector 외형도



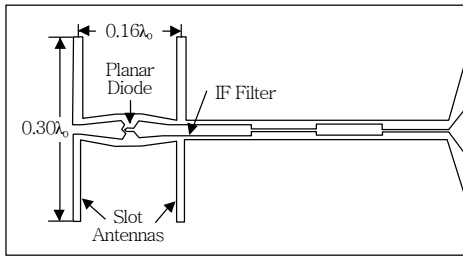
(c) 무선전송 시스템 구성도(240GHz, 5Gbps)

(그림 12) Log-periodic Antenna and Lens-integrated Detector Module and 240 GHz, 5Gbps Transmission System[14]

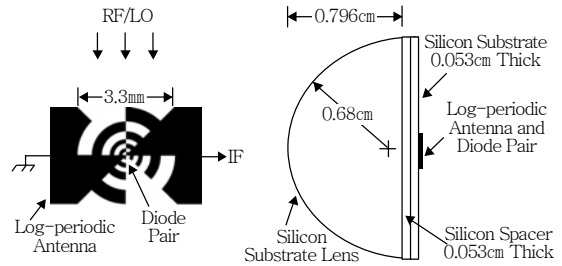
Eye-diagram에서 보면 잡음이 많이 포함되어 있으나 eye가 분명하게 open되어 있음을 알 수 있다.

3. Integrated THz Receiver

(그림 13)은 250GHz 대역에서 확장된 반구(extended hemispherical) 형태의 Si 렌즈 기판에 이중 슬롯 안테나(double-slot)와 단일 쇼트키 다이오드 믹서를 집적화하여 테라헤르츠 수신기를 구성한 사례이다[15]. 안테나-믹서의 측정된 DSB 변환 손실은 258GHz에서 $7.8 \pm 0.3\text{dB}$ 이고, 잡음온도는 $1600 \pm 100\text{K}$ 이다. 렌즈의 matching cap을 사용하면 변환 손실과 잡음온도를 1dB 정도 성능 개선을 할 수 있다. IF 필터도 평면 회로에 집적화되어 있다.

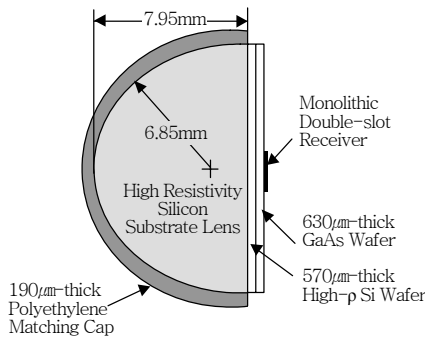


(a) 집적회로 배치도

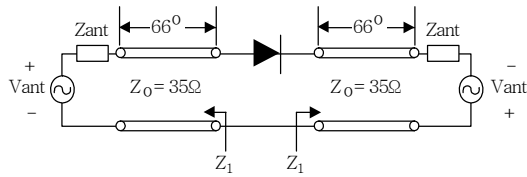


(a) Log-periodic 안테나

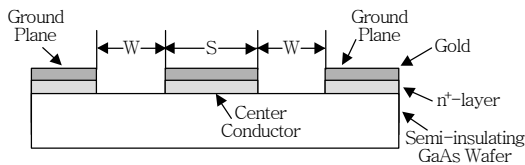
(b) Si 렌즈 구조



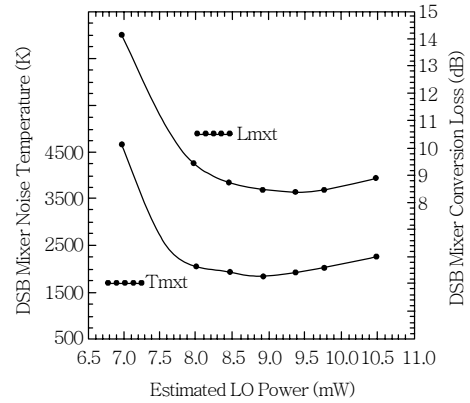
(b) Si 렌즈 구조



(c) 안테나 접속 등가회로



(d) CPW 구조

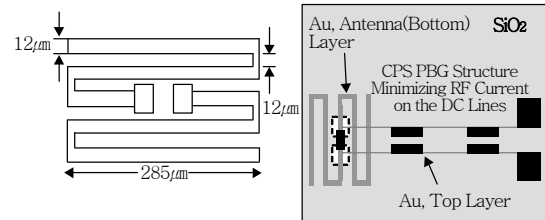


(c) 수신기 성능(변환 손실 및 잡음 온도)

(그림 14) Planar Wideband 80~200GHz Receiver[16]

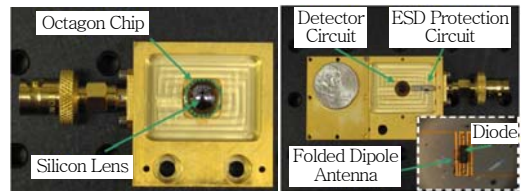
(그림 13) 250GHz Monolithic Double-Slot Antenna Receiver[15]

(그림 14)는 광대역 80~200GHz subharmonic 믹서 수신기의 구조를 나타낸다[16]. 수신기의 구성은 광대역 log-periodic 안테나와 APD가 결합되어 Si 렌즈 위에 집적화 된다. 광대역 수신기의 성능 지표인 DSB 변환손실은 90GHz(182GHz)에서 6.7dB(8.5dB)이고, 잡음 온도는 1080°K(1820°K)이다. 본 성능은 최적의 성능을 보이는 planar 다이오드 기반 도파관 subharmonic 믹서보다 약 3dB 높은 값이다.



(a) FDA 구조

(b) 직접회로 배치도



(c) Detector 외형도

(그림 15) 200GHz Folded Dipole Antenna Integrated Quasi-Optical Detector[17]

(그림 15)는 200GHz 대역에서 동작하는 folded 다이폴 안테나(FDA)를 이용한 quasi-optical 쇼트

키 다이오드 detector를 나타낸다. RF(200GHz) 전류를 차단하기 위하여 DC 출력에 CPS LPF를 설계하였다. Detector 회로는 고저항성 Si 렌즈와 결합하도록 배치되었다[17].

IV. 결론

테라헤르츠 통신시스템 응용을 위한 집적화 RF 송수신기의 기술개발 동향에 대하여 소개하였다. 현재의 기술 수준에서 보면 트랜지스터 보다는 수동소자인 쇼트키 다이오드 기술을 이용하는 추세이나 향후 5년 이내에는 능동소자가 이용될 것으로 예측된다. 테라헤르츠 통신은 옥외 밀리미터파 통신보다는 WPAN 등과 같은 옥내 단거리 통신에 주로 응용될 것으로 기대되며, 10~40Gbps의 초고속 통신에 적용될 것으로 판단된다. 이를 위해서는 RF front-end 부품을 하나의 모듈로 집적화하는 기술이 필수적이라 생각된다. 테라헤르츠 주파수에서는 부품간 연결 부위에서 접속 손실이 대단히 크고 시스템 성능에 지대한 영향을 미치기 때문이다.

● 용어해설 ●

CPW(Coplanar Waveguide): 마이크로파 집적회로에서 집적된 회로 소자간 연결수단으로 스트립라인(strip line)과 같은 전송선(transmission line)이 이용된다. CPW는 이러한 전송선의 일종으로 접지면과 도체면이 동일한 평면에 존재하여(coplanar) 평면회로의 집적화에 아주 용이한 수단을 제공하여 주기 때문에 매우 높은 주파수의 집적회로에 널리 사용된다.

SHM(Sub-Harmonic Mixer): 믹서는 RF 시스템에서 높은 주파수를 낮은 주파수로 또는 낮은 주파수에서 높은 주파수로 주파수를 하향 및 상향 변환하는 장치로서 RF, LO, IF 3개의 포트가 구성된다. 기본파(fundamental) 믹서의 LO 주파수는 IF 주파수만큼 RF 주파수와 차이가 있다. 그런데 RF 주파수가 아주 높으면 LO 주파수도 높아져 LO 신호를 발생시키기 매우 어려워진다. 그러나, SHM는 LO 주파수의 n차 고조파를 이용하기 때문에 LO 주파수는 RF 주파수의 1/n이 되어 낮은 LO 주파수를 용이하게 발생시킬 수 있다. 밀리미터파 이상의 RF 시스템은 일반적으로 n=2차인 믹서가 보편적으로 사용된다. 이를 Sub-Harmonic Mixer라고 한다.

약어 정리

APD	Anti-Parallel Diode
BPF	Band Pass Filter
CPS	Co-Planar Stripline
CPW	Co-Planar Waveguide
DSB	Double Side Band
HBT	Heterojunction Bipolar Transistor
IF	Intermediate Frequency
ISSTT	International Symposium on Space Terahertz Technology
ITU	International Telecommunication Union
ITU-R	ITU-Recommendation
LNA	Low Noise Amplifier
LO	Local Oscillator
LPF	Low Pass Filter
MMIC	Monolithic Microwave IC
NRAO	National Radio Astronomy Observatory
ROF	Radio On Fiber
SHM	Sub-Harmonic Mixer
THz	Terahertz
UTC-PD	Uni-Traveling Carrier-Photo Diode
VDI	Virginia Diode Inc.
WPAN	Wireless Personal Area Network
WRC	World Radio Council

참고 문헌

- [1] David Britz, "Evolution of Extreme Personal Bandwidth and Local Area Triple-Stack Terahertz Wireless Networks," IEEE 802.15-15-10-0150-00-0THz, Mar. 2010.
- [2] www.ieee802.org/pub/15Gthz.html
- [3] www.nrao.edu/meeting/isstt/tocs.shtml
- [4] www.dotfive.eu/uploads/media/DOTFIVE_article_M20.pdf
- [5] A. Tessmann et al., "Metamorphic MMICs for Operation Beyond 200GHz," *Proc. of the 3rd European Microwave Integrated Circuits Conf.*, Fraunhofer Institute of Applied Solid State Physics(IAF), EuMA Oct. 2008, pp.210-213.
- [6] Sanjay Raman, "A W-Band Dielectric-Lens-Based Integrated Monopulse Radar Receiver," *IEEE Transac. on Microwave Theory and Te-*

- chniques, Vol.46, No.12, Dec. 1998, pp.2308-2316.
- [7] Enrique Carrion et al., "New Results on Terahertz Detection by Carbon Nanotubes," *20th Int'l Symp. on Space Terahertz Technology*, 20-22 Apr. 2009, pp.110-119.
- [8] Daniel F. Filipovic et al., "Double-Slot Antennas on Extended Hemispherical and Elliptical Silicon Dielectric Lenses," *IEEE Transac. on Microwave Theory and Techniques*, Vol.41, No.10, Oct. 1993, pp.1738-1749.
- [9] A. Semenov et al., "Integrated Planar Antennas at Terahertz Waves," *16th Int'l Symp. on Space Terahertz Technology*, 2005, pp.324-328.
- [10] Sanjay Raman, "Single- and Dual-Polarized Millimeter-Wave Slot-Ring Antennas," *IEEE Transac. on Antennas and Propag.*, Vol.44, No. 11, Nov. 1996, pp.1438-1444.
- [11] Gildas P. Gauthier et al., "A 140-170GHz Low-Noise Uniplanar Subharmonic Schottky-Receiver," *IEEE Transac. on Microwave Theory and Techniques*, Vol.48, No.8, Oct. 1999, pp. 1416-1419.
- [12] Jeffrey L. Hesler, "The Development of Quasi-Optical THz Detectors," Virginia Diodes Inc., USA.
- [13] Akihiko Hirata et al., "Design and Characterization of a 120-GHz Millimeter-Wave Antenna for Integrated Photonic Transmitters," *IEEE Transac. on Microwave Theory and Techniques*, Vol.49, No.11, Nov. 2001, pp.2157-2162.
- [14] Hiroshi Ito et al., "InP-Based Planar-Antenna-Integrated Schottky-Barrier Diode for Millimeter- and Sub-Millimeter-Wave Detection," *Japanese Journal of Applied Physics*, Vol.47, No.8, 2008, pp.6256-6261.
- [15] Steven S. Gearhart et al., "A Monolithic 250 GHz Schottky-Diode Receiver," *IEEE Transac. on Microwave Theory and Techniques*, Vol.42, No.12, Dec. 1994, pp.2504-2511.
- [16] Brian K. Kormanyos et al., "A Planar Wide-band 80~200GHz Subharmonic Receiver," *IEEE Transac. on Microwave Theory and Techniques*, Vol.41, No.10, Oct. 1993, pp. 1730-1737.
- [17] L. Liu et al., "A 200GHz Schottky Diode Quasi-Optical Detector Based on Folded Dipole Antenna," *20th Int'l Symp. on Terahertz Technology*, 20-22 Apr. 2009, pp.145-149.