

무선 밀리미터파와 테라헤르츠 시스템

1895년 마르코니가 검파기와 안테나를 결합한 최초의 무선통신에 성공한 이래 근 100년 동안 무선통신 기술은 비약적으로 발전하여 왔다. 특히 근래 10여년 동안 휴대폰 시장의 급성장 등을 보면 우리가 무선통신과 떼려야 뗄 수 없는 가까운 위치에 있음을 알 수 있다. 그렇다면 이러한 무선통신을 하기 위해서 필요한 회로는 어떠한 것들이 있을까?

글: 김남형, 윤종원, 서효기, 김경민, 정신우, 함대진, 이재성, 주병권
고려대학교 전기전자전파공학과 / <http://ee.korea.ac.kr/>

무선통신 시스템의 구성 및 동작 원리

무선통신을 위해 필요한 회로는 기본적으로 고주파로 변조된 신호를 송/수신할 수 있는 안테나, 신호의 증폭을 담당하는 LNA/PA, 주파수 변조를 가능하게 해주는 Mixer/VCO/PLL 등으로 구성된다. 아래 그림 1은 무선통신 시스템에서 송신단에 해당하는 부분을 블록 다이어그램으로 표시한 내용으로 변조된 신호가 어떠한 과정을 거쳐서 우리가 직접 보고 들을 수 있는 신호로 변환이 되는지를 보여준다.

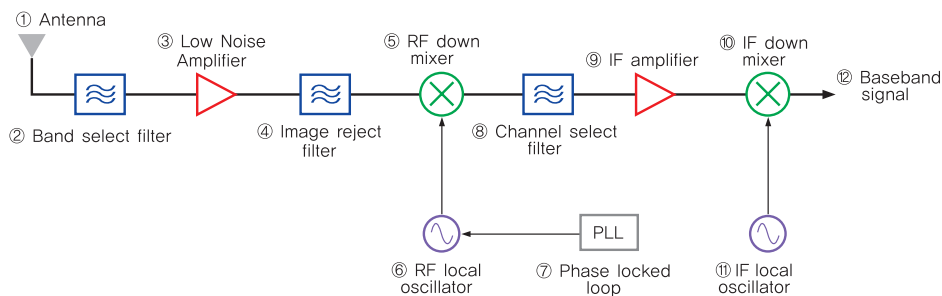


그림 1

RF 수신단 블록 다이어그램

각 회로들이 동작하는 주파수는 어떤 어플리케이션에서 사용이 되느냐에 따라 구분이 되지만 기본적으로는 변조된 신호의 주파수와 유사한 영역에서 동작을 하게 된다. 아래 표 1은 현재 많이 사용되고 있는 국내 주요 무선통신 시스템들의 동작 대역을 보여준다.

mm-wave / THz 의 중요성 및 문제점

연구의 배경

현재 이동 통신은 단순한 음성 통신 서비스만의 제공이 아니라 영상, 데이터 등의 필요한 모든 서비스를 폭넓게 처리할 수 있도록 발전해 가고 있다. 이처럼 초고속 무선 통신을 지원하기 위한 기법에는 다음과 같이 크게 두 가지로 구분 될 수 있다.

우선 기저대역의 협대역 주파수에서 다중 안테나 사용을 통한 다중 접속 이득 방법이다. 즉, MIMO(Multiple Input and Multiple Output) 기술을 이용하거나 MAC 프로토콜, PHY의 코딩 기법 등을 개선하여 전송률을 높이는 방법이다. 또 다른 방법은 이미 사용하고 있는 기저대역이 아닌, 새로운 광대역 주파수 대역을 직접 활용하는 무선 통신 시스템을 개발하는 방법이 있다. 하지만 MIMO를 이용하거나 PHY/MAC 계층을 개선하는 방법의 경우, 이미 제공되고 있는 다양한 통신 서비스로 인하여 더 이상 새로운 서비스를 동일 대역에 할당하기에 어려운 실정이며, 기존 통신 시스템과의 호환성 문제가 발생할 수도 있는 문제점이 있다.

따라서 점점 큰 주파수 대역폭이 요구되고 있으며 mm-wave 대역(57~64 GHz)와 THz 대역(100GHz 이상의 주파수 대역)은 이러한 초고속 무선 통신에 대한 요구를 충족시킬 수 있는 가능성으로 인해 현재 연구의 대상이 되고 있다.

60GHz 대역은 수 GHz의 넓은 대역폭을 라이선스 없이 사용할 수 있으므로 이 대역에 대한 응용성은 전 세계적으로 확대되고 있다. 이 대역의 기본적인 특성은 10~15dB/Km의 높은 전송 손실을 갖고, 높은 방향성을 갖는데, 이러한 특성을 이용하여 WPAN(Wireless personal area network)의 홈 네트워크 구축 및 2.4GHz, 5GHz WLAN과 연동하여 광대역 전송이 가능한 시스템 개발 등

Bluetooth	2.4 GHz
핸드폰	0.8~0.9 GHz / 1.8~2.1 GHz
방송 · 통신 중계망	36~40 GHz
WPAN	57~64 GHz
차량충돌 방지 레이더	77~81 GHz
우주선(자동비행 시스템)	94 GHz

표 1 국내 주요 무선통신 시스템 동작 영역

	56	57	58	59	60	61	62	63	64	65	66GHz	
Australia					56.4			62.9				Max power, 10mW EIRP:51.8dBm
Canada												Max power, 500mW/100MHz EIRP:43dBm
Japan												Max power, 10mW EIRP:57dBm
Europe							61.5					EIRP:100mW
USA												Max: 500mW/100MHz EIRP:43dBm

그림 2 60 GHz 대역 비허가 할당 국제 동향

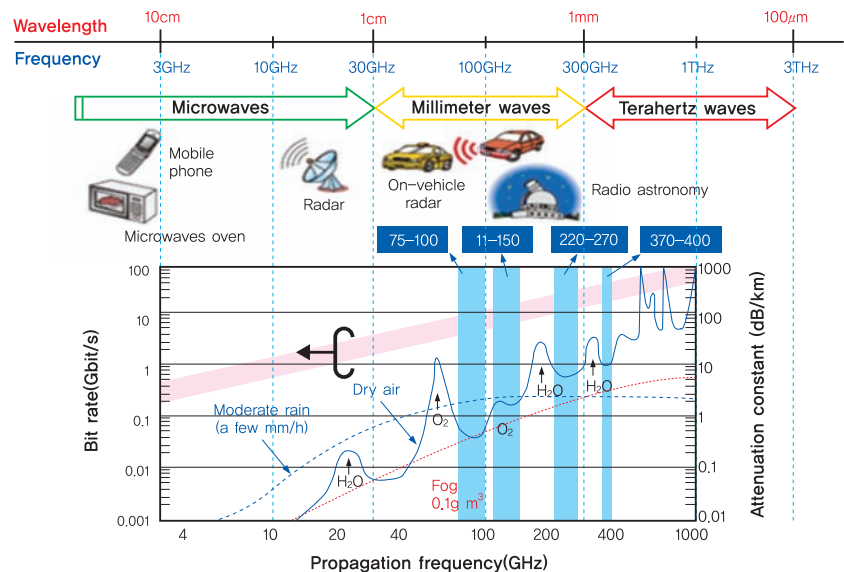


그림 3 주파수 대역의 특성 및 응용 분야

의 응용 시스템에 사용된다.

더불어, 향후 5년 후의 미래에는 Ultra HD(UHD), 3D 영상 전송, 차량 간의 고속 통신, 초고속 무선랜 등의 서비스를 위해서는 10Gbps~40Gbps 급의 무선 전송 서비스에 대한 요구가 크게 증가할 것으로 기대된다. 그렇기 때문에 10Gbps~40Gbps 급의 무선 통신 시스템에 대한 연구 개발이 절실하며 이러한 연구는 기존의 대역이 아닌 새로운 주파수 대역을 이용하게 될 것으로 예측된다. 즉, 테라 헤르츠 대역의 주파수를 이용한 10Gbps~40Gbps급 Super Ultra Wideband(SUWB) 근거리 무선 통신 시스템을 개발하는 것은 미래의 시장성을 고려해볼 때 큰 의의를 지니고 있다.

사회/문화/경제적 중요성

1) 사회, 문화적 중요성

근거리 무선 통신 시스템의 대표적인 응용 분야인 초고화질 3D 영상 전송 시스템의 경우 가정 내에서 다양한 공연을 즐길 수 있도록 하여 보다 많은 문화 활동을 영위하도록 할 수 있다. 특히, 직접적인 문화 활동을 즐길 수 없는 소외 계층에게도 폭넓은 사회, 문화적 혜택을 제공할 수 있을 것으로 기대된다.

뿐만 아니라 이런 시스템을 이용해 원격 의료 시스템을 상용화 함으로서 사회적 복지 수준을 크게 향상 시킬 것으로 기대되고, 미래의 유비쿼터스 통신 환경 구축을 위한 촉매제 역할을 할 것으로 예상된다.

2) 경제, 기술적 중요성

시장성의 관점에 따라, 밀리미터 대역과 테라 헤르츠 통신 기술에 사용하는 WLAN, WPAN 시장은 향후 20~40%의 지속적인 성장이 예상된다. 뿐만 아니라 유비쿼터스 네트워크, 의료 및 감시, 보안 분야, U-헬스 등의 다양한 분야에 활용 될 경우, 그 시장의 규모는 2010년 이후 수조원대로 성장할 것으로 예상된다. 특히 UWB(Ultra Wide Band), WPAN 등의 기술은 현재는 과도기적 기술 이지만 5~10년 후에는 이 기술로 홈 네트워크 시스템이 구현 될 것으로 예상된다.

기술성의 관점에서 무선 통신 시스템의 경우 밀리미터, 테라 헤르츠 대역의 초고주파를 이용하므로 이를 지원 할 수 있는 통신 회로 및 안테나 개발이 절실히 요구된다. 또한 테라 헤르츠 대역의 높은 직진성과 공기 중에서의 높은 감쇄 현상 등을 고려한 새로운 통신 시스템을 개발하는 것이 필요로 된다. 그리고 이러한 통신 회로/안테나 개발과 송수신 기법/통신 프로토콜 개발은 상호 유기적인 형태로 기술 개발이 진행될 것으로 예상된다. 따라서 무선 통신 시스템 개발 연구로 한 분야에 치우친 연구/개발이 아닌 무선 통신 시스템을 위한 전 분야를 아우르는 종합적인 연구 분야를 체계적으로 설립할 수 있는 계기가 될 것으로 기대하고 있다.

특히, 이동통신, 와이브로 시스템의 경우 정부의 적극적인 연구개발 지원으로 현재에는 세계적인 경쟁력을 갖추었으나 상대적으로 WLAN/WPAN 시스템 개발에 대한 투자는 부족했던 현실이었다. WLAN/WPAN 기술은 향후 유비쿼터스 네트워크 및 홈 네트워크를 구축하기 위한 핵심적인 기술이며, 그 시장 규모 역시 급격히 증가할 것으로 예상되므로 원천 기술을 확보하기 위해 적극적인 연구 및 개발 투자가 절실히 요구된다.

기술/사회적 제약 요인

mm-wave와 THz 대역의 기술 개발은 미래 통신 기술의 발전에 있어서 매우 중요시 되고 있으며 매우 유망한 분야로 고려되고 있다. 하지만 여러 가지 제약 요인들로 인해 풀어야 할 숙제들이 많이 남아 있다. 우선 mm-wave/THz 대역 전파는 높은 직진성을 지니고 있는 관계로 통신하는 경로에 장애물이 있으면 NLOS(Non-Line-

of-Sight)에 의한 통신 두절 현상이 나타난다. 따라서 물리 및 MAC 계층에서의 기술적 해결 방안의 마련이 시급하다. 또한 mm-wave/THz 대역에서의 통신이 개인 휴대용 단말기에 적용이 되려면 부품 및 모듈 가격이 저렴해야 하는데 현 기술에서 mm-wave/THz 대역 신호를 처리할 수 있는 초고속 반도체 기술의 단가가 높으므로 지속적인 연구 개발로 이 문제를 해결해야 한다.

기술적 제약 요인들 이외에도 산업, 인프라, 정책적 제약 요인들이 존재한다. 무선 통신 기기의 제품화 및 산업화 경험이 풍부한 국내 기업의 환경을 미루어 볼 때, 최종 제품의 제조 및 경영 능력은 상대적으로 큰 강점으로 작용할 것으로 전망되나, 아직까지 원천 기술 확보에는 미흡한 점이 많다. 더 나아가, 이러한 원천 기술 개발에 필요한 mm-wave/THz 대역 회로/안테나 설계의 고급 인력이 한정적이며 이를 위한 공정 및 설계 환경이 제대로 갖춰져 있지 않다. 또한 가파른 성공에 동반하여 빠르게 정비된 관련 제도와 지나친 규제 일변도의 정책들은 관련 제품 산업화의 노력에 장애 요인으로 작용할 가능성이 있다.

따라서, 성공적인 기술 개발과 제품 산업화를 위해서 다음과 같은 노력들이 필요하다. 첫째, 무선 통신 시스템의 핵심 IPR 획득을 위해 국제 표준화에 기여할 수 있는 경험과 능력이 요구되고 mm-wave/THz 관련 표준화 초기 단계부터 주도적인 역할을 수행할 수 있어야 한다. 또한 물리 및 MAC 계층과 초고속 반도체 소자 및 회로의 선도 기술을 공유할 수 있는 세계 유수 연구 단체와의 공동 연구가 활발히 이루어져야 한다. 특정 기술에 치우쳐서는 안 되고 mm-wave/THz 대역 무선 통신 시스템을 위한 PHY/MAC 계층의 기술 및 반도체 소자/초고속주파 회로/안테나 기술의 연구 개발을 전반적으로 아우를 수 있는 연구 기관이 구성되어야 한다. 뿐만 아니라 연구 기관 내에서 활발한 연구 교류를 통한 유기적인 연구 개발이 수행되어야 한다. 마지막으로 연구 기관의 지나친 규제와 간섭을 최소화 하여 관련 정책들이 기술 개발에 해가 되지 않도록 정비되어야 한다.

기대 효과

mm-wave/THz 대역의 무선 통신 기술에 대한 연구는 전 세계적으로 활발히 진행되고 있으며 60GHz 대역을 이용하는 Wireless Personal Area Network는 이미 표준화 단계에 이르렀고 광대역 Wireless Access Service, Wireless Community Networking Service를 위한 Wireless Mesh Networking 기술에

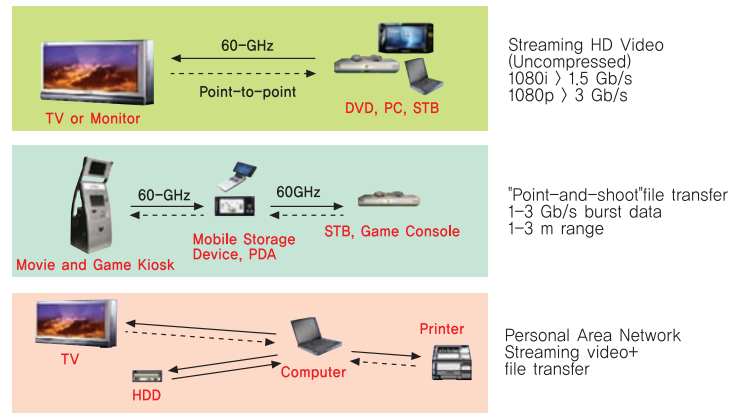


그림 4

Wireless Personal Area Network

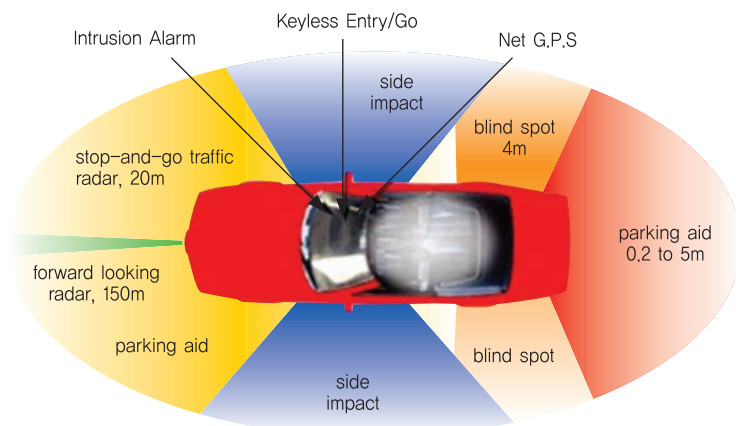


그림 5

자동차 충돌 방지 레이더

도 적용이 가능하다. 또한 개인 휴대 장치의 초고속/초정밀 이미지/데이터 통신 시스템, 거리와 동작을 탐지하여 자동차 및 우주 통신에 응용 가능한 레이더 시스템, 이미징/센싱을 통한 보안 및 의료 장비, macro 지역의 무선 랜 확장, 와이브로와 같은 4세대 통신 시스템의 무선 backbone 시스템으로 활용 가능하다.

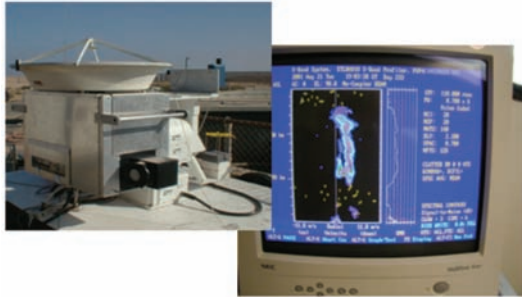


그림 6

94 GHz 레이더 시스템

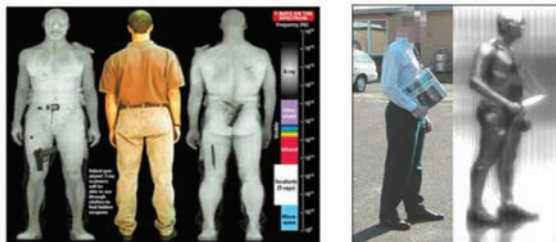


그림 7

이미징/센싱을 통한 보안

기술적인 기대 효과뿐만 아니라 긍정적인 경제적 효과도 기대할 수 있다. mm-wave/THz 통신 시장은 크게 현재 사용 중인 무선모바일 단말기, 유비쿼터스 네트워크 분야, 의료/감시 분야, U-헬스, 새로운 응용 분야 등으로 분류될 것이고 근거리 통신 기술의 개발로 이러한 시장의 상당 부분을 차지할 수 있을 것으로 전망된다. 무선모바일 단말기의 시장규모는 2011년 연평균 14.7%의 성장을 나타내며 약 1,960억 유로로 성장할 것으로 기대된다. 유비쿼터스 네트워크 분야의 경우 2007년 세계 시장이 100조원에 이르며 국내 시장도 2005년에 7조원, 2006년에 9조원이었으며, 2007년에는 약 12조원으로 지속적으로 증가가 예상된다. 의료/감시 분야에서는 2010년 이후에 약 60억 유로(1조 6천억 원)의 시장이 형성될 것으로 전망된다. 2010년부터 2015년까지 또는 그 이후에 계속하여 응용분야가 확대되고 다양화될 것으로 예상되어 연평균 시장성장률은 약 10%에 이를 것이다. 삼성경제연구소의 2004년 자료에 따르면 U-헬스 기기, U-헬스 서비스, 바이오칩, 센서 등을 포함해서 2014년 미국 U-헬스 시장에 340억 달러 규모로 성장할 것으로 예상된다. 한국보건산업진흥원의 자료에 따르면 전자의료기기 시장에서 절반을 차지하고 있는 미국 시장의 연평균 3.2%의 성장률

을 바탕으로 2015년에는 200억 달러에 이를 전망이다.

mm-wave/THz 대역은 파장이 짧아진 만큼 모든 디바이스가 작아지는 효과가 있으며 대량생산이 가능하고 이로 인해 생산단가가 저렴해진다. 또한 mm-wave/THz 통신, 대규모 원격탐사 및 정보보호 시장, 의료(암진단, 치아진단 등)용 이미지 센싱 기술 및 센싱 장비시장, THz 전자부품, 정밀계측기기, THz 분광기 시

High-speed Communication	Radar Applications	mm-wave, THz Imaging and Sensing
<ul style="list-style-type: none"> Wireless <ul style="list-style-type: none"> Personal and local area networks (PANs/LANs) Consumer electronic devices Inter-building communication Secure links and surveillance Space and inter-satellite communication Digital <ul style="list-style-type: none"> High-speed interconnects Data switches(Mux/DeMux) Analog to digital conversion (ADC/DAC) 	<ul style="list-style-type: none"> Automotive <ul style="list-style-type: none"> Long range radar(LRR) Collision avoidance, automated cruise control(77GHz) Short range radar(SRR) Pre-crash detection, stop and go, lane change assistant (77~81 GHz) Road condition detection Space <ul style="list-style-type: none"> Aviation safety in extremely poor visibility(94GHz) Airport ground control(94GHz) Industrial <ul style="list-style-type: none"> Distance measurement Alarm systems and motion detection 	<ul style="list-style-type: none"> Security <ul style="list-style-type: none"> Non-invasion imaging Drug and explosive detection Sensing <ul style="list-style-type: none"> Earth sensing and climate control Industrial process control Astronomy, microwave background Biotechnology <ul style="list-style-type: none"> Medical imaging, tumor recognition Genetic screening

그림 8

mm-wave/THz 대역의 유망 어플리케이션

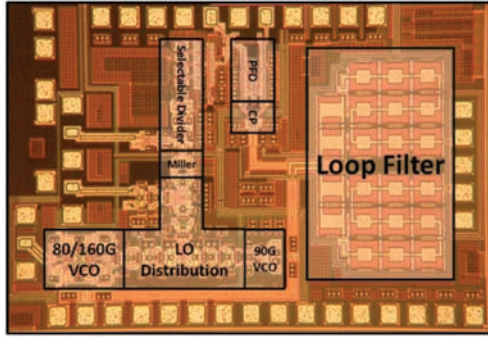


그림 11

멀티 채널 PLL 칩 사진

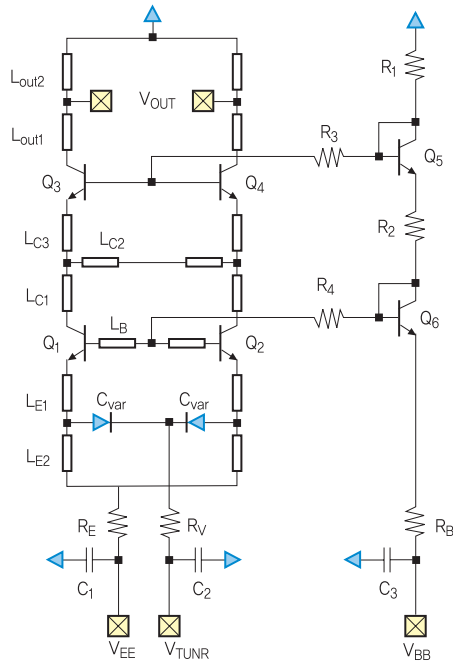


그림 12

300 GHz VCO 회로도

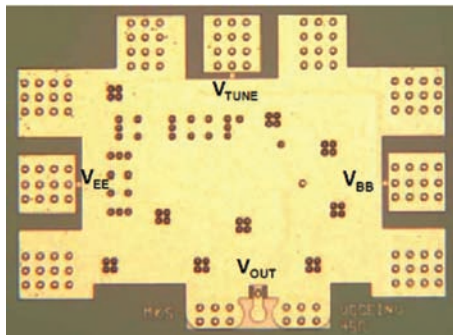


그림 13

300 GHz VCO 칩 사진

나눌 수 있다. 전자의 경우 HBT(Heterojunction Bipolar Transistor)와 HEMT(High Electron Mobility Transistor)가 있고, 후자는 SiGe HBT과 Si MOSFET(Metal-Oxide-Semiconductor Field Effect Transistor) 등이 있다. 지난 수십 년간 여러 유수단체들의 지속적인 연구 개발로 인해 이 반도체 소자들의 성능이 이제 수백 GHz에서 동작이 가능하도록 향상되었다. 아래 그림 9는 다양한 반도체 소자들의 cutoff frequency(f_T : 전류 이득이 1이 되는 주파수)의 경향을 보여주고 있다. 대체로 Si 기반의 반도체 소자들보다 III-V족 화합물 반도체 소자들이 더욱 빠른 동작 속도로 우월한 성능을 가진다는 것을 보여주며, THz 시스템에 가장 먼저 도입이 될 것으로 추측해볼 수 있다. III-V족 화합물 반도체 소자의 뛰어난 동작 속도는 III-V족 화합물질의 우수한 전자 이동도 특성으로 얻어진 결과물이다. 이들의 ballistic transport(탄도궤도적 전달) 특성은 Si 기반 반도체의 그것을 초월하며 n-타입 III-V족 반도체 소자의 높은 동작 주파수를 가능케 한다. 하지만 p-타입 III-V족 반도체 소자의 경우 전달 특성이 Si 반도체 소자보다 떨어지는 이유로 n-타입 III-V족 반도체 소자와 함께 쓰이지 못하는 단점을 지닌다. 또한 III-V족 화합물질의 높은 디펙트 밀도는 많은 트랩을 생성시켜 누설 전류를 발생시키는 등 신뢰성 문제가 Si 기반 반도체 소자보다 더 크다. 더 나아가, III-V족 반도체 소자의 제작 단가는 값비싼 epitaxial 성장과 작은 웨이퍼 그리고 잦은 E-beam lithography 공정으로 인해 매우 높다. 반면에 Si 기반 반도체 소자는 오래된 기술 개발로 신뢰성이 크고 기존의 공정 시설을 이용할 수 있으며 다른 Si 기반의 시스템과의 집적이 보다 수월한 장점을 지닌다. 뿐만 아니라 제작 단가도 더 저렴하고 지속적인 연구 개발로 인한 성능 향상으로 가까운 미래에 THz 시스템에서의 적용을 충분히 고려해볼 수 있다.

해외 유수 연구기관의 연구현황

1) 멀티 채널 PLL

다음 회로는 미국 토론토 대학의 Sorin 교수 팀에서 RFIC2010 국제 학회에 발표한 논문으로 0.13 μ m SiGe BiCMOS 공정으로 설계된 80/90/160 GHz 대역에서 동작하는 PLL로 현재까지 발표된 PLL중 가장 높은 동작 주파수를 가진다. 회로 전체적인 schematic 및 칩 사진은 아래 그림 10, 11과 같다. 본 PLL은 두 개의 VCO core가 하나의 PLL에 집적되어서 PLL이 멀티채널에서 동작한다는 특징이 있다. 80/160 GHz 및 90 GHz VCO는 각각 VCO 셀렉터를 통해서 한 가지만 선택할 수 있고 각 VCO의 출력 신호는 /2 Miller divider 및 static divider chain을 거쳐서 PFD/CP/LF로 피드백이 걸려있다. PLL의 phase noise는 90 GHz, 100 kHz offset에서 -93.8 dBc/Hz를, 163 GHz, 100 kHz offset에서 -78.9

dBc/Hz가 측정이 되었다. 전체 회로는 1.1mm x 1.7mm 사이즈로 설계가 되었고 전체 DC power consumption은 1.25 W이다.

2) 300 GHz VCO

그림 12~14는 미국 Teledyne사에서 256nm InP HBT 공정을 사용하여 설계한 300 GHz에서 동작하는 VCO로 IMS2010 국제학회에 발표된 논문이다. 지금까지 300 GHz 이상에서 동작하는 고정된 주파수의 발진기들은 발표된 적이 있었지만 주파수 튜닝이 가능한 fundamental VCO로는 이번 VCO가 최초이다. 회로의 schematic 및 칩 사진은 아래 그림 12, 13과 같다. inverted microstrip을 이용하여 설계된 회로이기 때문에 칩 사진에서는 회로의 그라운드 플레인만 확인할 수 있다. 본 VCO는 differential colpitts 구조로 parasitic 성분을 줄이기 위하여 일반적인 π -네트워크 피드백 대신 T-네트워크 피드백 구조를 선택하였다. 또한 LC2가 스텝-인덕터스로 쓰이면서 회로 동작의 안정성을 추구하였다. 그림 14는 3가지 버전의 VCO에 대한 볼티지 튜닝의 특성을 보여준다. 전체 회로는 740 μ m x 550 μ m 사이즈로 설계가 되었고 전체 DC power consumption은 35mW이다.

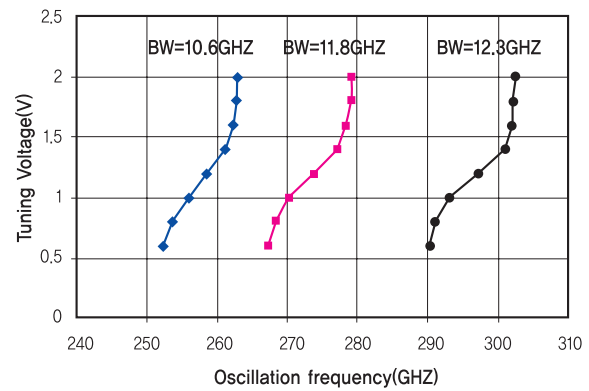


그림 14

VCO 동작 영역

3) 200 GHz Injection Locked Frequency Divider(ILFD)

그림 15, 16은 65nm 디지털 CMOS 공정을 이용한 200 GHz 대역에서 동작하는 ILFD 회로 schematic 및 칩 사진으로 미국 UCLA와 Alcatel Lucent/Bell-Labs 공동 연구 결과이다. 이 ILFD는 볼티지와 커런트 모드를 인젝션 시키는 방식으로 듀얼 인젝션 타입이라는 특징을 가지고 있다. 이와 같은 방식을 사용함으로써 인젝션 효율을 높이고 디바이더에서 가장 중요하게 여겨지는 locking range를 일반적인 구조보다 더 크게 얻을 수 있다. 측정된 locking range는 181 ~ 208 GHz로 대략 14%의 효율을 보이고 있으며 DC power consumption은 2.5 mW이다.

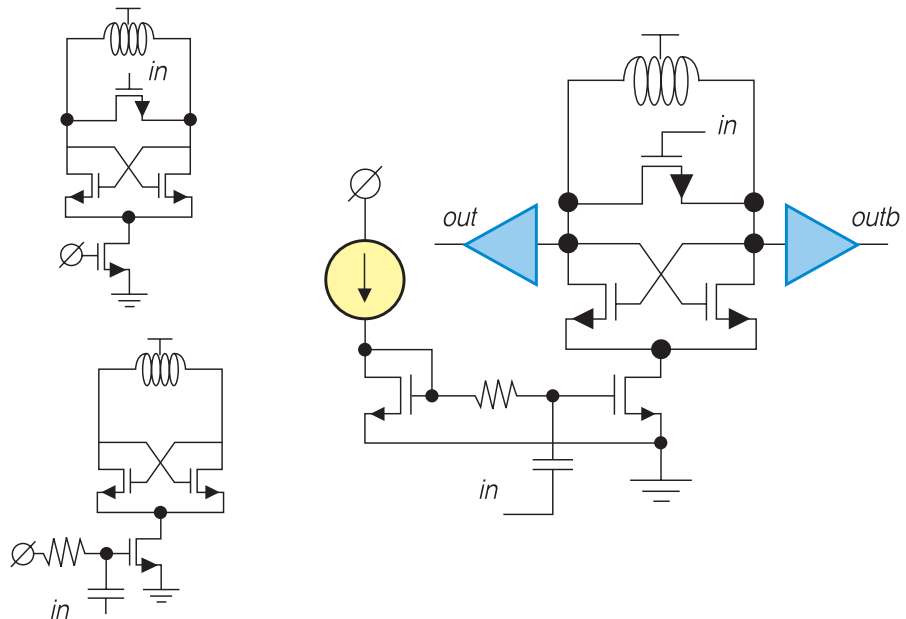


그림 15

200 GHz ILFD 회로도

4) 325 GHz frequency multiplier

회로의 동작 주파수가 높아짐에 따라 VCO 및 PLL의 동작 주파수 역시 높아져야 하지만 소자의 동작주파수 제한 등의 요인으로 높은 주파수의 VCO 및 PLL을 설계하는데 어려움이 있다. 그림 17은 이러한 문제를 해결하기 위한 frequency multiplier chain을 블록 다이어그램으로 표시한 것이다. 그림 18을 보면 전체 회로

가 54 GHz tripler, 162 GHz tripler, 325 GHz doubler 및 파워 감쇠를 보상하기 위한 PA로 구성되어 있음을 알 수 있다. 325 GHz 대역에서의 최대 파워는 -8 dBm으로 측정되었고 회로 전체에서 소모하는 DC 파워는 2.8 W이다.

결론

지금까지 미래 통신 기술에 있어서 때

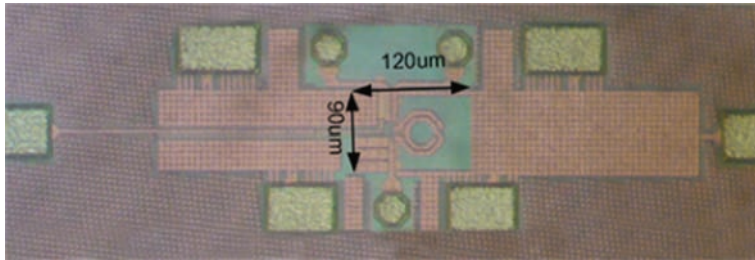


그림 16

200 GHz ILFD 칩 사진

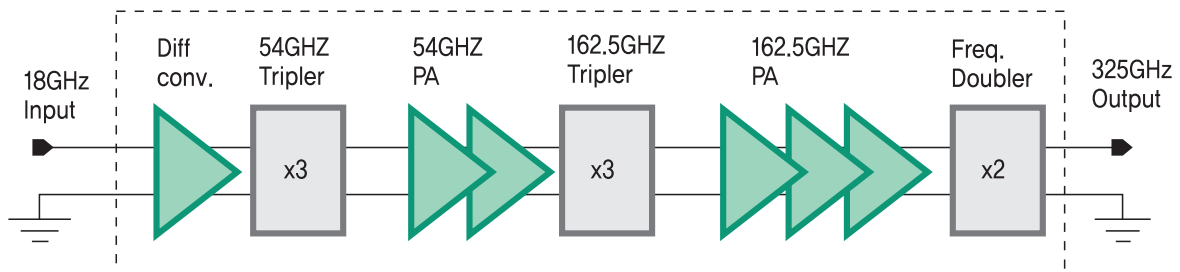


그림 17

325 GHz Multiplier chain 회로도

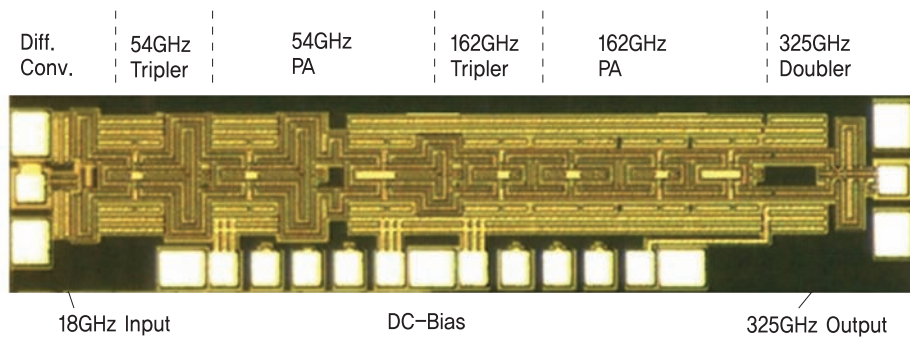


그림 18

325 GHz증가 체인 칩 사진

우 중요한 분야인 mm-wave/THz 시스템에 대해 살펴보았다. 현재 많은 연구그룹에서 mm-wave/THz 시스템을 연구, 개발하고 있고 괄목한 만한 성과를 내고 있다. 아직 풀어야 할 숙제들이 많이 남아있지만 이러한 문제점들이 해결된다면 향후 유비쿼터스 네트워크 및 홈 네트워크를 구축하기 위한 핵심 기술로서 자리 잡을 것이다. **☞**

참고문헌

- [1] 이우용, "60GHz 밀리미터파 WPAN 기술 및 표준화," "Ubiquitous" 사회에 대비한 소출력 무선기기의 전파이용 정책 및 기술 workshop, pp. 111-126, 2005
- [2] Naoya Kukutsu "Overview of Millimeter and Terahertz Wave Application Research", NTT Technical Review, 2009
- [3] Jae-Sung Rieh, "CMOS mm-wave circuits", RFIC Workshops, Sept. 2007.
- [4] Motion Capture Society (<http://www.mocapsociety.com/blog/press/243-terahertz-imaging-goes-the-distance>)
- [5] U.R. Pfeiffer, "Opportunities for Silicon at mmWave and Terahertz Frequencies", IEEE, pp. 149-156, Oct 2008.
- [6] Jae-Sung Rieh, "An Overview of Semiconductor Technologies and Circuits for Terahertz Communication Applications," IEEE GLOBECOM Workshops, pp. 1-6, Nov 2009.
- [7] Shahriar Shahrmanian, "A D-Band PLL Covering the 81-82GHz, 86-92GHz and 162GHz Bands", IEEE Radio Frequency Integrated Circuits Symposium, pp. 53-56, May 2010.
- [8] Munkyo Seo, "300GHz Fixed-Frequency and Voltage-Controlled Fundamental Oscillator in an InP DHBT Process", IEEE International Microwave Symposium, pp. 272-275, May 2010.
- [9] Qun Jane Gu, "200GHz CMOS Prescalers with Extended Dividing Range via Time-Interleaved Dual Injection Locking", IEEE Radio Frequency Integrated Circuits Symposium, pp. 69-72, May 2010.
- [10] Erik Ojefors, "A 325GHz Frequency Multiplier Chain in a SiGe HBT Technology", IEEE Radio Frequency Integrated Circuits Symposium, pp. 91-94, May 2010.

The leading edge e-Magazine

또다른 세상, 색다른 경험

시간과 장소를 초월하여 항상 최고의 서비스를 약속합니다.

www.epnc.co.kr

디지털 콘텐츠의 Innovation 엔진 (주)테크월드
e-mail: webmaster@techworld.co.kr

