

60 GHz Radio의 CMOS SoC 및 SoP 집적

박철순 · 정동윤 · 은기찬

한국정보통신대학교

요 약

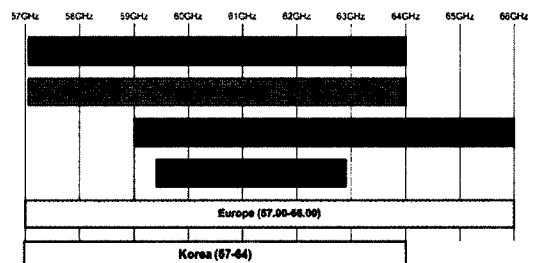
Gbps급의 대용량 데이터를 무선으로 전송하기 위해 60 GHz 대역의 연구가 활발히 진행되고 있다. 60 GHz 대역은 공기 중에서 약 16 dB/km의 손실 특성을 가지므로 10미터 이내의 단거리 무선 대용량 데이터 전송용에 적합하다. 따라서 Kiosk 및 이동 단말기 간 대용량 무선 데이터 통신을 위한 저전력 CMOS chip 기술 및 실내용 고화질 비디오 전송을 위한 액세스 포인트와 HDTV에 장착되기 위한 단일 집적 모듈에 관한 연구가 크게 대두되고 있다. 본 원고에서는 저전력 소모 V-band 신호 발생기를 비롯한 CMOS SoC에 대한 세계적인 추세와 동향을 살펴보고, LTCC를 이용한 단일 집적 송수신 모듈에 대해 기술하고자 한다.

I. 서 론

현재 이용되고 있는 캠코더, 디지털 카메라, portable media player(PMP), 외장형 하드 드라이브의 경우 PC와의 데이터 전송을 위해서 다양한 유선 전송 규격들이 사용되고 있다(캠코더·PMP(USB 2.0~480 Mbps, IEEE 1,394~400 Mbps), 디지털 카메라(USB 2.0~480 Mbps), 외장형 하드 드라이브(EIDE(1.0 Gbps), SATA-I(1.5 Gbps), SATA-II(3 Gbps)). 즉, 이러한 기기들에 현재 이용되고 있는 인터페이스는 유선 케이블이 전송을 위해 사용되고 있으나, 사용자 편의성

을 위해서는 무선화가 필수적이다. 하지만 현재 가장 광대역인 UWB 대역의 certified wireless USB 기술의 경우 최대 전송 속도는 480 Mbps이며, 전력 소모가 250 mW 이상이므로 1 Gbps 이상의 대용량 데이터를 이동 단말 장치를 통해 전송하는데 한계가 있다. 이러한 기술적 제약과 한정된 주파수 자원 문제를 해결하는 방안으로 밀리미터파 대역에 대한 관심이 증가하고 있다. 밀리미터파는 파장이 10~1 mm 인 30~300 GHz의 주파수를 의미하며, 광대역 무선 통신, 비 가시광선 영상 촬영, 자동차 충돌 방지 센서 등 다양한 응용이 연구되고 있다. 그 중에서도 [그림 1]과 같이 전 세계 공통적으로 용도 미 지정 대역으로 할당된 60 GHz 대역에 관심이 집중되고 있다<sup>[1]~[20]</sup>.

60 GHz 대역의 특징은 7 GHz 이상의 넓은 가용 대역폭을 갖고 있어 ASK와 같이 간단한 변조 방식을 통하여도 수 Gbps급의 대용량 초고속 무선 통신이 가능하며, 데이터를 압축없이도 무선 전송 가능하다. 60 GHz 대역 주파수는 [그림 2]에서 보여주듯이 산소에



[그림 1] 전 세계 60 GHz 대역의 용도 미 지정 대역<sup>[1]</sup>

이 논문은 2008년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국과학재단의 지원을 받아 수행된 연구임(No. R11-2005-029-02001-0).

의한 전파의 흡수 감쇄가 크기 때문에(16 dB/km), 공간적인 주파수 재활용이 가능하며, 대용량 단거리 (10 m 이내) 무선 통신을 가능하게 하고, 데이터 보안 문제에서도 매우 유용하기 때문에 WPAN 구성에 매우 적합한 특징을 가지고 있다.

또한, 과장이 기판상에서 3 mm 이하로 짧기 때문에 RF 송수신기의 소형, 경량화가 가능하며 이를 통해 저 가격의 모듈을 구현할 수 있으며, 이러한 소형, 경량화는 이동 단말 장치에 60 GHz 송수신기 장착을 용이하게 하여 [그림 3]에서 보여주듯이 여러 응용에 가능하여 새로운 초고속 무선 통신 기술로 주목받고 있다.

이러한 60 GHz 대역의 여러 장점에도 불구하고, 미 성숙된 고성능 부품, 소재, 패키지 기술의 한계로 인해 소형화 집적이 어렵고, 모듈의 양산 공급이 불

가능하여 대중화 서비스 활용에 제약이 있어 왔다. 하지만, CMOS의 성능 향상과 LTCC 전송 구조의 밀리미터파 손실 특성 개선이 이루어져, 60 GHz 무선 모듈의 초소형화 및 상용화 가능성이 확인되고 있다.

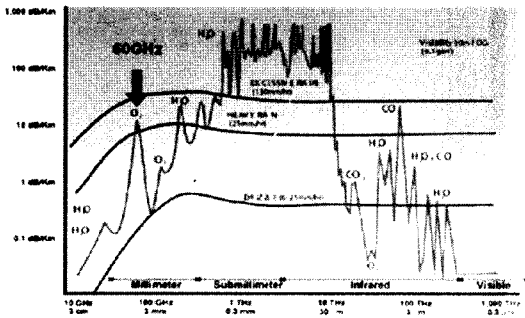
이에 본 원고에서는 ICU에서 연구한 저전력 능동 회로를 소개하고 UC Berkeley, SiBEAM, Georgia Tech.의 연구 결과를 통해 CMOS SoC에 관한 세계적 동향을 소개한다. 또한, LTCC를 이용하여 ICU에서 개발한 여러 밀리미터파 대역 수동 부품 및 60 GHz 송수신 단일 집적 모듈(SoP, System-On-Package)을 기술하고자 한다.

## II. CMOS 공정을 이용한 능동 회로 기술

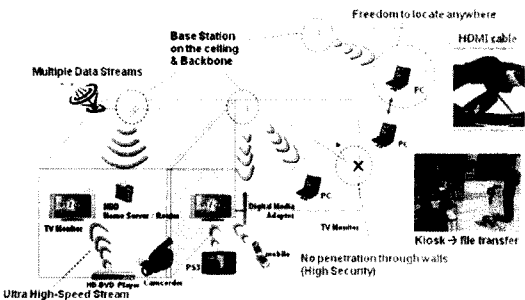
### 2-1 CMOS Technology

눈부신 발전을 거듭해온 CMOS 기술이 최근에는 [그림 4]에서처럼 300 GHz 이상의 차단 주파수(cut-off frequency,  $f_T$ ) 및 최대 발진 주파수(maximum oscillation frequency,  $f_{max}$ ) 특성을 보이고 있다<sup>[3]</sup>. 60 GHz 대용량 무선 전송 시스템을 이동 단말기에 응용하기 위해서는 무엇보다 저전력 소모가 중요하므로 이 같은 CMOS의 발전은 밀리미터파 대역 능동 회로 연구에 한층 더 속도를 낼 수 있게 하였다.

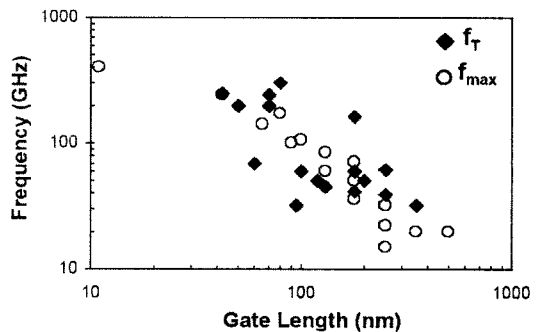
2005년 UC. Berkeley에서 0.13  $\mu\text{m}$  CMOS 공정을



[그림 2] 대기 상태에서 주파수에 따른 손실 특성<sup>[1]</sup>



[그림 3] 60 GHz 대역 WPAN 응용 예<sup>[2]</sup>



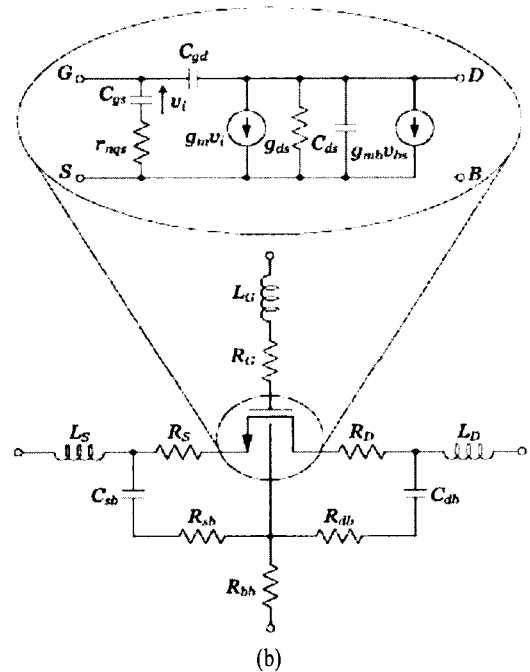
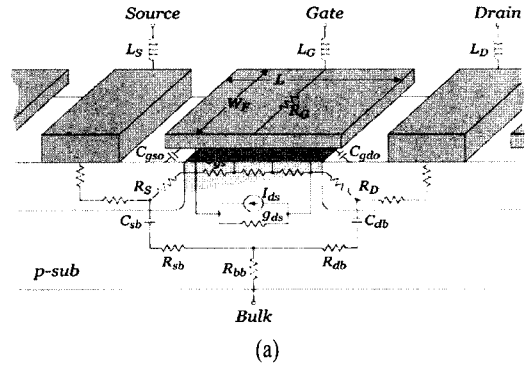
[그림 4] CMOS technology roadmap<sup>[3]</sup>

이용하여 트랜지스터, 수동 소자, 전송 선로 등의 모델링과 더불어 회로 설계에 관한 연구결과를 발표한 이후<sup>[4]</sup>, 전세계 많은 연구 그룹에서 60 GHz 대역에 저전력, 저가 및 소형화를 위해 CMOS를 이용한 연구가 활발히 진행되어 왔다.

동일한 소자라 하더라도 소자의 레이아웃 및 소자 간 연결에 따라  $f_{max}$ 가 변하므로 최적의 구조를 찾아야 한다. Multi-finger device는 one-finger device가 다수 연결되어 있는 소자이므로 이론적으로 multi-finger device와 one-finger device의  $f_{max}$ 는 차이가 없다. 따라서 UC. Berkeley에서는 130 nm/90 nm NMOS one-finger 소자를 [그림 5]와 같이 BSIM3로 각각 모델링하고 밀리미터파 대역의 높은 주파수에서 발생하는 기생 성분들을 고려하여 65 GHz/100 GHz까지 각 소자의 소신호 트랜지스터 모델을 추출하였다<sup>[4],[5]</sup>. 최대의  $f_{max}$  특성을 얻기 위해 게이트 저항이 가장 작도록 finger width가 최소인 1  $\mu\text{m}$  소자를 선택하였고, 그 결과 0.13  $\mu\text{m}$  NMOS는 각각 70 GHz와 130 GHz의  $f_T/f_{max}$  결과를 얻었고<sup>[4]</sup>, 90 nm NMOS는 각각 100 GHz/300 GHz의 특성을 얻었다<sup>[5]</sup>.

### 2-2 저 전력 CMOS 능동 회로

GaAs나 InP 등의 III-V족 화합물은 밀리미터파 대역에서도 우수한 잡음 특성과 높은 출력 전력 및 높은 이득을 보이는 장점이 있으나, 매우 고가이며 큰 DC 전력을 필요로 하는 단점이 있다. 2-1절에서 언급한 Si-based CMOS 회로는 가격적인 측면뿐만 아니라, 저 전력 회로 구현이 가능하다는 큰 장점을 지니고 있다. 저 전력 소모의 CMOS 능동 회로는 60 GHz 대역을 이용하여 Kiosk로부터 대용량 데이터를 다운로드하거나 이동 단말기용 무선 전송에 응용이 가능하다. 이를 위해 ICU에서는 [그림 6]과 같이 5.8 GHz를 IF로 사용하는 heterodyne 구조의 저전력 60 GHz radio를 연구해 오고 있다. 본 절에서는 ICU에서 발표한 low power, low phase noise의 cross-coupled VCO<sup>[6]</sup>와

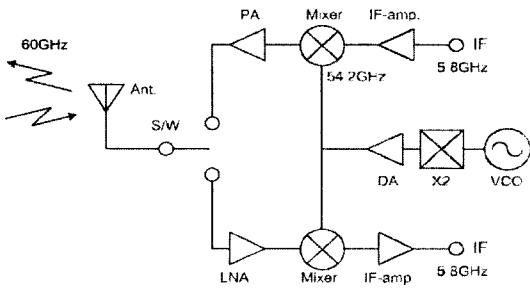


[그림 5] NMOS device의 개략도(a)와 소신호 모델(b)<sup>[4]</sup>

low power, high-suppression frequency doubler<sup>[7]</sup> 및 두 회로를 집적한 저전력 V-band 신호 발생기에 대해 소개하고자 한다.

#### 2-2-1 Low Phase Noise VCO

Si-based 공정에서 varactor capacitor와 인덕터의 낮은 Q값에 의해 밀리미터 대역 VCO는 phase noise 특성 저하가 불가피하다. 따라서 LO block은 중심 주

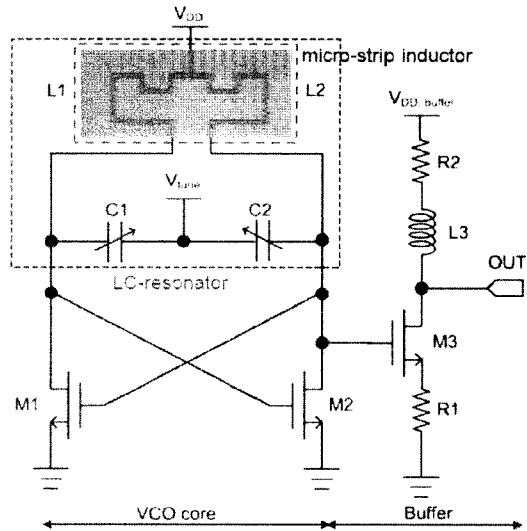


[그림 6] 이동 단말기용 저전력 60 GHz radio 구조

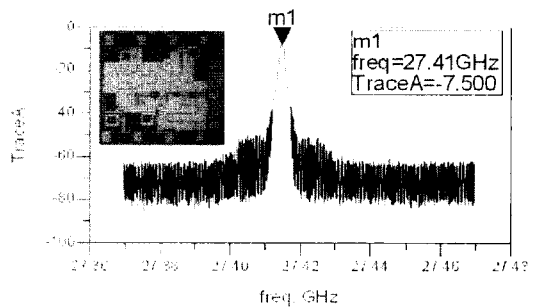
파수 27.1 GHz VCO와 54.2 GHz 출력을 갖는 주파수 더블러로 구성한다. VCO의 인덕터는 좋은 phase noise 특성을 위해 표준 공정에서 제공하는 인덕터에 비해 더 높은 Q값과 SRF 특성을 갖도록 top metal과 bottom metal을 이용한 마이크로스트립 인덕터를 이용하여 구현하고 높은 출력을 위해 common source를 버퍼로 사용한다. [그림 7]은 varactor diode와 마이크로스트립 인덕터를 사용한 cross-coupled VCO의 회로도를 보여주며, [그림 8]은 0.13 um CMOS 공정을 이용하여 구현된 칩 사진과 측정된 출력 전력을 보여준다. 0.58x0.55 mm<sup>2</sup>의 크기를 갖는 VCO는 27 GHz에서 케이블 손실 4.5 dB를 감안하면 -3 dBm의 높은 출력 특성을 보여주며, [그림 9]와 같이 -113 dBc/Hz의 매우 우수한 phase noise 특성을 보여주었다. 4.99 mW의 전력을 소모하는 VCO는 -194.6 dBc/Hz의 FoM을 가지며, CMOS를 사용한 밀리미터파 대역 VCO 중에서 가장 낮은 phase noise와 FoM 특성을 보여주었다<sup>[6]</sup>.

### 2-2-2 Low Power, High-Suppression Frequency Doubler

Low power, high-suppression을 위한 주파수 더블러는 [그림 10]과 같이 주파수 체배단과 높은 출력 특성을 위한 버퍼 증폭단으로 구성되어 있다<sup>[7]</sup>. 27.1 GHz의 신호가 입력되어 54.2 GHz의 신호가 출력되게 하기 위해 주파수 체배단의 트랜지스터 M1은 pinch-off 근처에서 동작시킨다. 27.1 GHz에서 λ/4를 갖는 open

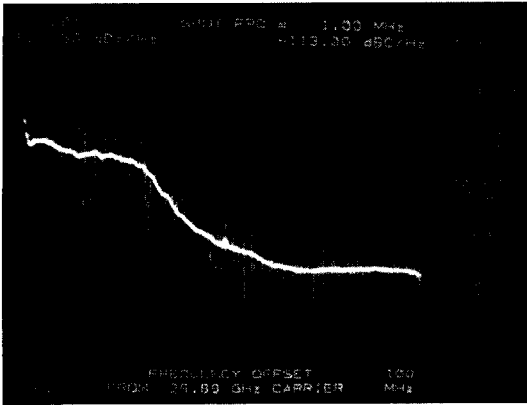


[그림 7] 마이크로스트립 인덕터를 사용한 Ka-band 대역 cross-coupled VCO의 회로도<sup>[6]</sup>

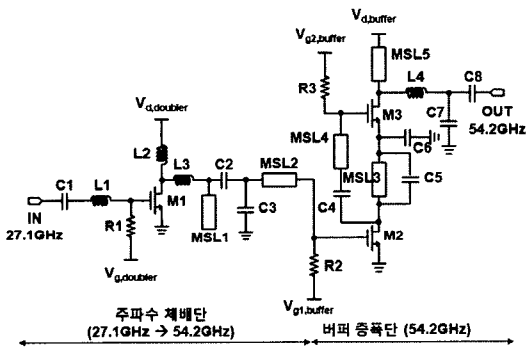


[그림 8] VCO의 칩 사진과 측정된 출력 특성(27 GHz에서의 케이블 손실 4.5 dB가 포함된 결과)<sup>[6]</sup>

stub(MSL1)을 이용하여 27.1 GHz의 입력 주파수 신호를 억제시킨다. 버퍼 증폭단에서는 저전력 소모를 위해 두 개의 common-source에 하나의 전류 path를 만들어 줌으로써, 전류를 재사용할 수 있도록 한다. 즉, M2의 게이트로 입력된 54.2 GHz의 신호는 드레인으로 증폭/출력되고, 이 신호는 다시 M3의 게이트로 입력되는 2-stage cascade common source 증폭기 구조를 갖는다. 이 때, M3와 M2에 흐르는 전류는 같은



[그림 9] VCO의 측정된 phase noise 특성<sup>[6]</sup>



[그림 10] 저전력 소모를 위해 current re-use 구조의 증폭단을 집적한 V-band 주파수 더블러의 회로도<sup>[7]</sup>

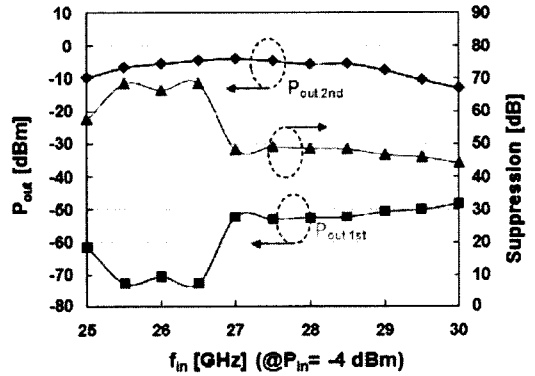
path를 가진다. 이 두 증폭기 사이에는 MSL3와 C5로 이루어진 공진 회로를 삽입함으로써, M3의 소스쪽으로 가는 신호의 흐름을 막고 동시에 M2의 드레인 임피던스를 증가시킴으로써 더 높은 이득을 얻을 수 있다.

제안된 회로는 0.13 um CMOS 공정을 이용하여 1.24x0.75 mm<sup>2</sup>의 크기로 제작되었고, 9 mW의 전력을 사용하여 측정된 결과를 [그림 11]과 [그림 12]에서 보여준다. [그림 11]은 앞서 설명한 VCO의 출력 전력을 고려하여 -4 dBm의 전력을 입력하고 측정한

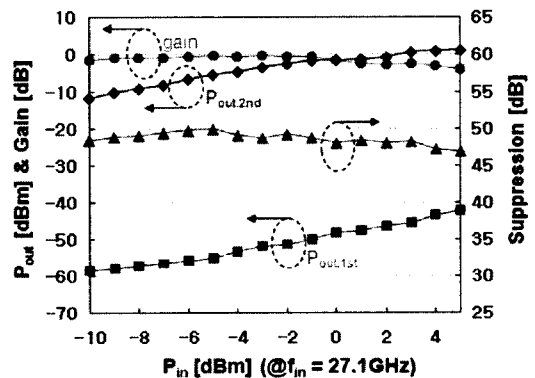
결과를 보여주며, [그림 12]는 27.1 GHz에서 입력 전력에 따른 출력 특성 그래프를 보여준다. 이 결과는 V-band 주파수 더블러 중에서 가장 우수한 fundamental signal suppression 특성을 보여주었다<sup>[7]</sup>.

### 2-2-3 저전력 V-band 신호 발생기

[그림 6]에서 보여주는 것과 같이 이동 단말기 용 60 GHz radio를 구현하기 위해서는 저 전력 소모가 무엇보다 중요하다. [그림 13]은 앞서 언급한 VCO와 frequency doubler를 집적한 저전력 V-band 신호 발생



[그림 11] -4 dBm의 전력을 입력했을 때 입력 주파수에 따른 출력 특성<sup>[7]</sup>



[그림 12] 27.1 GHz의 입력 주파수에서 입력 전력에 따른 출력 특성<sup>[7]</sup>

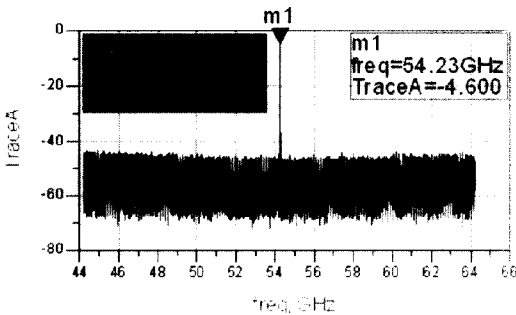
기의 구현된 사진과 측정된 출력 전력을 보여준다.  $1.59 \times 0.75$  mm의 크기로 구현된 신호 발생기는 54.2 GHz에서 케이블 손실 3.15 dB를 감안하여 -1.45 dBm의 높은 출력 전력 특성을 보여준다. 또한, [그림 14]는 VCO의 varactor diode에 -1.4~0.2 V의 전압을 변화시켜 53.7 GHz부터 54.6 GHz까지 0.9 GHz의 tuning range를 보여주며, 이 대역에서 -2.3 dBm 이상의 높은 출력 전력을 보여준다. 이 때 소모된 DC 전력은 22 mW로 현재까지 보고된 V-band 신호 발생기

(VCO 포함) 중에서 가장 좋은 DC-to- RF conversion efficiency를 보여준다.

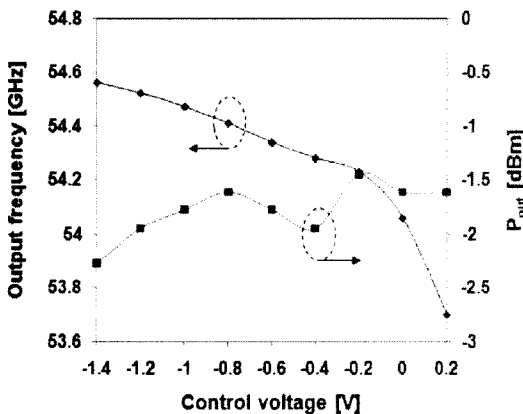
### 2-3 CMOS SoC 기술 동향

UC. Berkeley내 Berkeley Wireless Research Center(BWRC)의 교수와 졸업생들 주축으로 설립된 Si-BEAM과 UC. Berkeley에서는 0.13  $\mu$ m 및 90 nm CMOS 공정을 이용한 60 GHz 대역 송수신 chip에 대해 연구해왔고, 최근 90 nm CMOS 공정을 이용하여 front-end 수신기<sup>[8]</sup> 및 beam former를 포함한 60 GHz radio를 단일 칩화하여 발표한 바 있다<sup>[9]</sup>. Georgia Institute of Technology에서는 90 nm CMOS 공정을 이용하여 signal processor를 집적한 60 GHz CMOS radio를 발표한 바 있다<sup>[10]</sup>. 본 절에서는 60 GHz 대역 CMOS chip 기술의 동향을 살펴보기 위해 이 분야의 세계 선두 그룹인 두 기관에서 발표한 연구 내용을 소개하고자 한다.

먼저, UC. Berkeley에서는 ST Microelectronic의 90 nm CMOS를 이용하여 100 GHz까지 BSIM3 모델을 추출하였고<sup>[5]</sup>, 분포 정수 회로의 높은 inductive quality factor를 위해 Co-Planar Waveguide(CPW)를 회로 설계에 반영하였다<sup>[5],[8],[9]</sup>. 2008년 2월에는 ISSCC에서 90 nm CMOS를 이용하여 저잡음 증폭기(LNA), 주파수 혼합기(mixer) 및 가변 이득 증폭기(VGA)로 구성된 front-end receiver를 발표하였다<sup>[8]</sup>. 이 수신기는 RF와 LO 주파수가 같은 direct conversion 구조를 가지며, 2-stage cascade 형태의 LNA는 14.5 mW의 DC 전력을 사용하여 12 dB의 이득을 갖도록 설계되었다. 높은 변환 이득(conversion gain)과 낮은 잡음 지수(Noise Figure, NF) 특성을 위해 switching stage와 gm-stage 사이에 series transmission line filter를 삽입한 single-balanced mixer는 6.5 dB의 이득을 갖도록 설계되었다. Mixer의 입력되는 두 개의 LO 신호를 위한 별론은 1 dB 손실을 갖도록 설계되었다. DC부터 2.2 GHz까지 60 dB의 이득을 갖도록 설계된 baseband



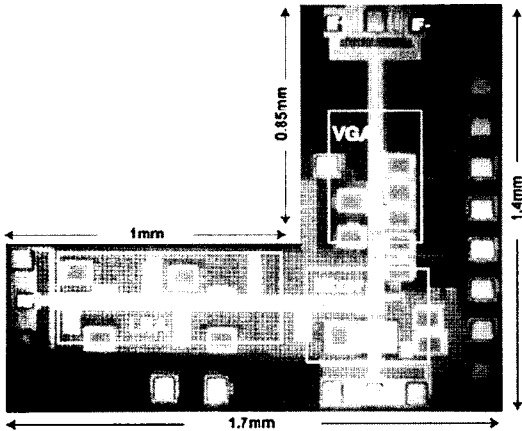
[그림 13] 구현된 신호 발생기의 칩 사진과 출력 전력 (54.2 GHz에서의 케이블 손실 3.15 dB가 포함된 결과)



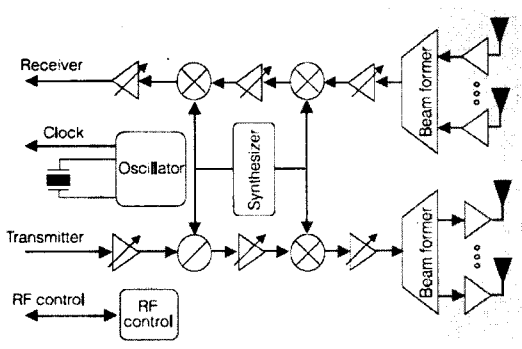
[그림 14] VCO의 조절 전압에 따라 측정된 tuning range와 출력 전력

Cherry-Hooper VGA는 3 mW의 전력을 소비한다. 이렇게 설계된 front-end receiver는 24 mW의 DC 전력을 사용하여 -8.5~55.5 dB의 총 변환 이득 및 6.1~6.35 dB의 NF 특성을 보여주었고, [그림 15]에서와 같이 칩의 면적은 1.55 mm<sup>2</sup>이다.

SiBEAM에서는 NLOS(Non Line-Of-Sight) 환경에서도 대용량 무선 통신이 가능하도록 하기 위해 smart antenna 기능을 위한 beam former를 포함한 구조를 [그림 16]과 같이 제안하였고, 90 nm CMOS 공정을 이용하여 [그림 17]과 같이 60 GHz CMOS 단일 칩을 개발하였다<sup>[9]</sup>. 아직까지는 각 회로에 대해 발표된 바



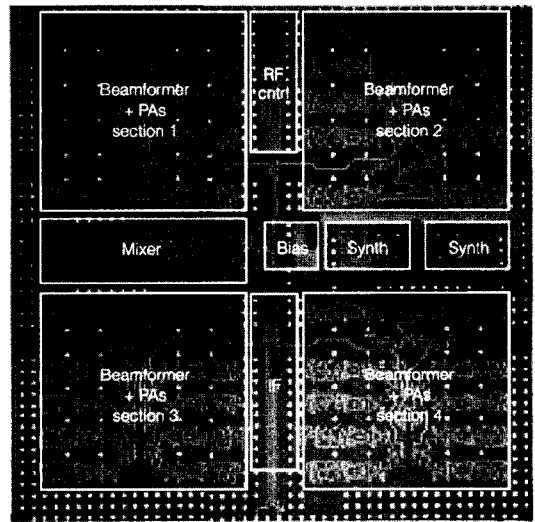
[그림 15] 60 GHz front-end receiver의 제작된 칩 사진<sup>[8]</sup>



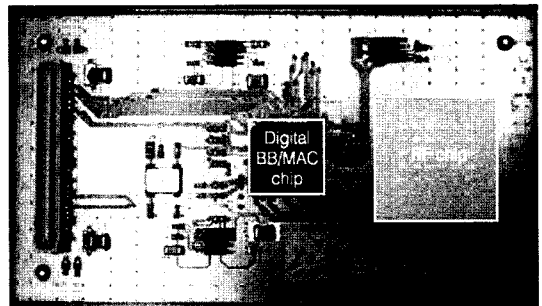
[그림 16] 60 GHz 단일 칩 radio architecture<sup>[9]</sup>

는 없으나, 이 칩을 이용하여 [그림 18]과 같이 digital baseband/MAC과 LTCC phase array patch antenna가 내장된 form factor를 구현하여 10미터 거리에서 10<sup>-10</sup>의 BER을 가지고 NLOS 환경에서 4 Gbps 급의 데이터 전송 시연에 성공하였다고 발표하였다<sup>[9]</sup>.

Georgia Institute of Technology에서는 2008년 2월 ISSCC에서 90 nm CMOS를 이용하여 single-chip Tx와 Rx를 발표하였고<sup>[10]</sup>, 2008년 6월 MTT-S IMS에서



[그림 17] Beam former를 포함한 60 GHz CMOS 단일 칩<sup>[9]</sup>



[그림 18] NLOS 환경에서 가능한 60 GHz 대용량 무선 통신 시스템 form factor<sup>[9]</sup>

는 signal processor가 포함된 60 GHz single-chip radio를 발표하였다<sup>[11]</sup>. Georgia Tech.에서는 UC. Berkeley와 SiBEAM에서 설계에 이용하는 CPW에 비해 손실이 적고 설계가 용이하며, 작은 크기로 구현이 가능한 마이크로스트립 라인을 설계에 이용하였다.

[그림 19]에서 보여주는 것처럼 super-heterodyne 구조를 갖는 송수신기에서 송신기는 double-balanced Gilbert cell mixer를 이용한 I/Q modulator, active differential-to-single-ended converter 및 VGA, PLL을 포함한 QVCO, 좋은 선형성과 안정도를 위한 resistive RF mixer 그리고 cascade와 2단의 common source로 17 dB의 이득과 8.4 dBm의 saturation output power 특성을 갖는 전력 증폭기로 구성되어 있다. 단일 칩 송신기는 173 mW의 전력 소모로 60 GHz에서 5 dBm의 P1 dB 특성을 보여주었다.

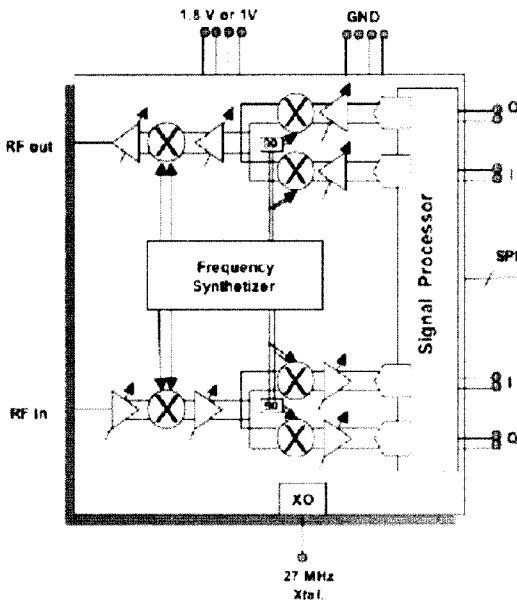
수신기는 LNA, cross-coupled VCO, single-balanced Gilbert cell mixer, IF 증폭기, VGA, I/Q demodulator, PLL을 포함한 QVCO 및 differential baseband 증폭기

로 구성되어 있다. 여기에서 LNA는 두 단으로 구성된 single-ended cascade 구조로 29 mW의 전력 소모로 16 dB의 gain, 7 GHz의 대역폭, 6 dB의 NF의 특성을 얻었다. 20 mW의 전력 소모로 6 GHz의 tuning range를 갖는 cross-coupled VCO는 1 MHz offset 주파수에서 -95 dBc/Hz의 phase noise 특성을 보여주었다. 단일 칩 수신기는 총 189 mW의 전력 소모로 50 dB의 총 수신 변환 이득 및 9 dB의 NF를 보여주었다.

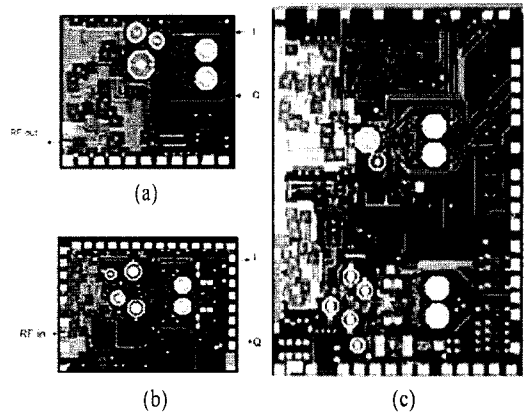
[그림 20]은 단일 송신기와 수신기 및 단일 집적된 60 GHz radio의 구현된 칩 사진을 보여준다. 송신기와 수신기는 각각  $1.75 \times 1.5 \text{ mm}^2$ 와  $2.25 \times 1.7 \text{ mm}^2$ 의 크기를 가지며, 각각 173 mW와 189 mW의 전력 소모로 7 Gbps QPSK 및 15 Gbps 16QAM 신호 전송이 가능함을 보여주었다.

### III. LTCC를 이용한 단일 집적 송수신 모듈

60 GHz 무선 통신의 상용화를 위해서는 작은 크기, 빔 형성 시스템(Beam-forming system), 적은 전력 손실의 MMIC들과 더불어 저 가격의 시스템 집적이 필요하다. 특히, 60 GHz 대역을 포함한 밀리미터파



[그림 19] 60 GHz 단일 칩 radio architecture<sup>[11]</sup>



[그림 20] 90 nm CMOS 공정을 이용하여 구현된 60 GHz (a)송신기<sup>[10]</sup>, (b)수신기<sup>[10]</sup> 및 (c)단일 칩 radio<sup>[11]</sup>



대역에서의 시스템 집적을 위한 패키지 가격이 매우 큰 부분을 차지하고 있기 때문에 기존 고가의 금속 기구물을 이용한 시스템 집적 패키지와 차별된 시스템 집적 기술이 필요하다. 3차원 시스템 집적화 기술에는 일반적으로 MCM-D, MCM-L, MCM-C와 같은 대표적인 기술이 응용되고 있다. 그러나, MCM-D 기술은 소형화와 전기적인 특성이 우수하나 가격이 비싸다는 단점이 있고, FR4로 대표되는 MCM-L 기술은 시스템 집적의 신뢰성과 값싼 범용 공정을 사용하는 장점이 있으나, 밀리미터파 대역에서의 전기적인 특성의 열화로 인해 사용이 제한된다. LTCC로 대표되는 MCM-C 기술은 유전체의 적은 손실과 사용하는 도체인 금, 은, 구리의 우수한 전기적인 특성으로 밀리미터파 대역의 시스템 집적에 우수한 특성을 나타내고 있다. 최근 밀리미터파 대역의 시스템 집적을 위한 다층 기판용 소재로 열 가소성 재료인 Liquid Crystal Polymer(LCP)가 많이 연구되고 있고, 고성능의 회로를 저가로 제조할 수 있어 대량 공정용 저가 유전체 재료로 사용 가능하다. [그림 21]에는 FR4, LTCC와 LCP의 유전체 특성 및 물질 성분에 대한 비교를 보여주고 있다<sup>[12],[13]</sup>. 저가 공정이 가능한 LCP의 경우, 밀리미터파에서 우수한 전기적 특성, 낮은 유전율 및 유전 손실, 낮은 열팽창 계수로 세라믹과 매우 유사하다. 이러한 재료적, 전기적, 비용적인 측

면을 고려할 때, LTCC와 버금가는 특성을 보여주고 있으나 낮은 유전율로 인한 집적 크기의 증가와 LTCC와 비교하여 상대적으로 복잡한 다층 집적 공정이 단점이라 할 수 있다.

따라서, LTCC 기술을 이용한 단일 집적 모듈은 다층 집적 능력, 적은 손실 성능, GaAs 또는 CMOS MMIC들과 유사한 온도 팽창 계수(TCE, Temperature Coefficient of Expansion)와 저가격의 측면에서 하나의 해법으로 제시되고 있다.

이 절에서는 LTCC를 이용한 밀리미터파 대역 연구 동향과 공기 공동(Air Cavity)을 이용한 적은 손실의 전송선 및 전송선 천이(transmission line, transition), 공진기(resonator), 필터(filter)와 안테나(antenna) 등의 수동 소자뿐만 아니라 LTCC 송수신기의 단일 집적 패키지(SoP, system-on-package) 및 시연을 포함한 ICU의 60 GHz 대역 연구 활동에 대해 기술하고자 한다.

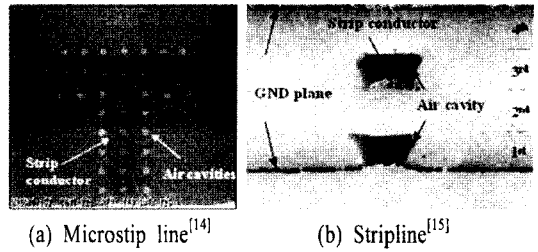
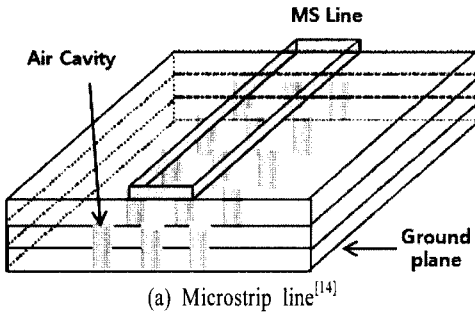
### 3-1 밀리미터파 SoP Sub-Circuits

#### 3-1-1 저 손실 전송선 및 전송선 천이

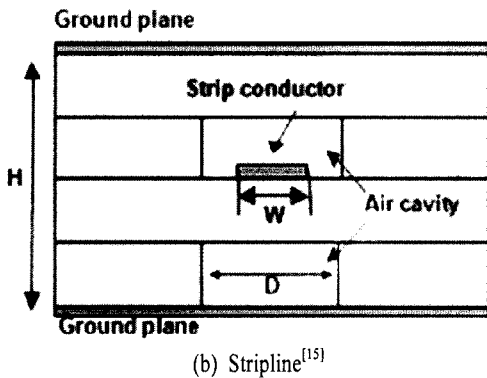
저 손실 전송선 및 전송선 천이는 신호의 원활한 전달과 전체 시스템의 크기에 영향을 미치기 때문에 밀리미터파 시스템 집적에 있어 매우 중요한 이슈이다. 따라서 손실을 최소화 하기 위해 LTCC 다층 회로 내에 이상적인 유전체인 공기 공동을 집적한 구

<표 1> 유전체 특성 비교<sup>[12]</sup>

	FR4	LTCC	LCP
Dielectric constant	4.5@1 MHz	5.6@20 GHz	2.9~3.0@20 GHz
Loss tangent	0.02	0.0012	0.002@20 GHz
CTE	15~20×10 <sup>-6</sup> /K	5.9×10 <sup>-6</sup> /K	3~17×10 <sup>-6</sup> /K engineered
Cost	Very low	Medium	Low
	$\epsilon_r$	$\tan \delta$	$f_{meas}$ [GHz]
* FR4	4	0.025	< 10
** LTCC	5.7~9.1	0.0012~0.0063	< 12
*** LCP	2.9~3.2	0.002~0.0045	< 105



[그림 22] 제작된 T-resonator의 X-ray



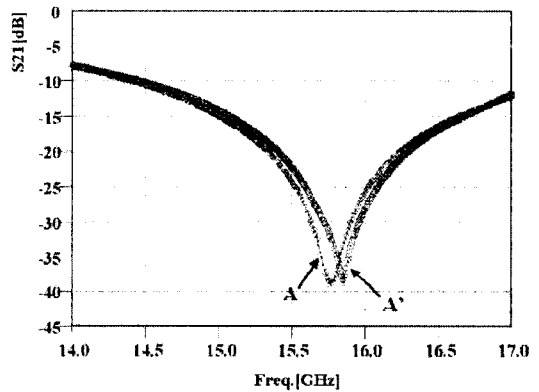
[그림 21] 공기 공동 구조를 갖는 저 손실 구조

조를 살펴보기로 하겠다.

### 3-1-1-1 저 손실 전송선 설계 및 구현

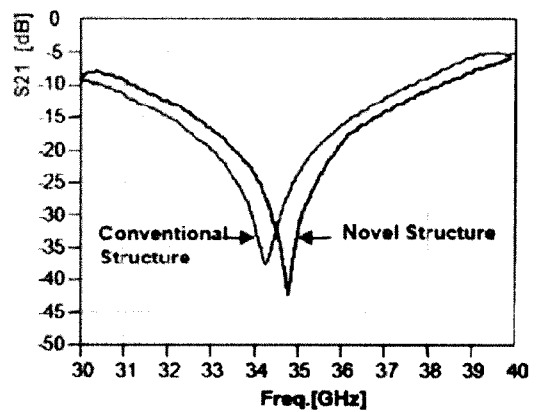
[그림 21] (a)와 (b)는 새로운 저 손실 전송선 구현을 위해 다층 기판 내에 conductor와 접지면 사이에 다수의 공기 공동 구조를 삽입한 개념도를 보여주고 있다. 또한, 일반적인 전송선 구조와 비교하기 위해 [그림 22]에서 보여주듯이  $\lambda/4$  T-resonator를 구현하여 검증하였다<sup>[14],[15]</sup>.

[그림 23]과 [그림 24]는 공기 공동이 없는 경우와 있는 경우의 공진기 주파수 응답 특성을 보여주고 있다. 공기 공동이 없는 경우와 있는 경우의 공진 주파수의 변화는 공기 공동에 의한 유효 유전율의 감소로 인한 것이다. [그림 23]은 electromagnetic 시뮬레이션을 통해 낮은 유전율을 가진 유전체인 공기 공동을 가지는 conductor 밑에 electromagnetic 에너



(A: 공기 공동이 없는 경우, A': 공기 공동이 있는 경우)<sup>[14]</sup>

[그림 23] Microstrip 공진기의 주파수 응답 특성



[그림 24] Stripline 공진기의 주파수 응답 특성<sup>[15]</sup>

지가 집중되어 있는 시뮬레이션 결과를 보여주고 있다. <표 2>과 <표 3>에 일반적인 microstrip(MS) 및

stripline(SL) 공진기와 공기 공동을 가진 MS 및 SL공진기를 비교하였다. 유전체의 한 부분으로 공기 공동을 사용함으로써 MS 공진기의 경우, 41 %의 감쇄 특성과 67 %의 Q-factor를, SL 공진기의 경우, 58 %의 감쇄 특성과 138 %의 Q-factor를 향상시키는 결과를 얻었다.

3-1-1-2 저 손실 전송선 천이

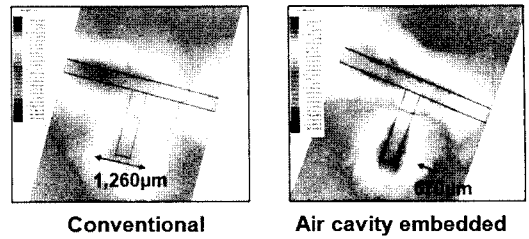
밀리미터파 시스템 집적에 있어서 coplanar waveguide(CPW) 패드를 갖는 능동 소자와 다층 회로 내에 내장된 소자의 연결을 위해서 CPW-SL-CPW의 전송선 천이가 빈번히 발생한다. [그림 26]과 [그림 27]은

<표 2> Microstrip 공진기의 특성<sup>[14]</sup>

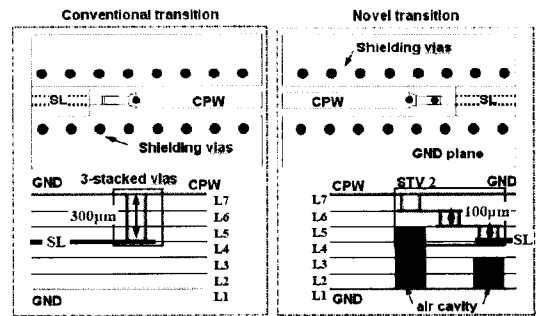
Items	(A) without void cavities	(A') with void cavities
$f_0$ [GHz]	15.76	15.85
$Q_u$	160	267(67 % ▲)
$\epsilon_{eff}$	5.55	5.48
$Z_0$ [ $\Omega$ ]	48	54
Total loss[dB/mm]	0.0212	0.012(41 % ▼)
Con. loss[dB/mm]	0.0122	0.0121
Dielec. loss[dB/mm]	0.009	0.0005(94 % ▼)
$\tan \delta$	0.0028	0.0002

<표 3> Stripline 공진기의 특성<sup>[15]</sup>

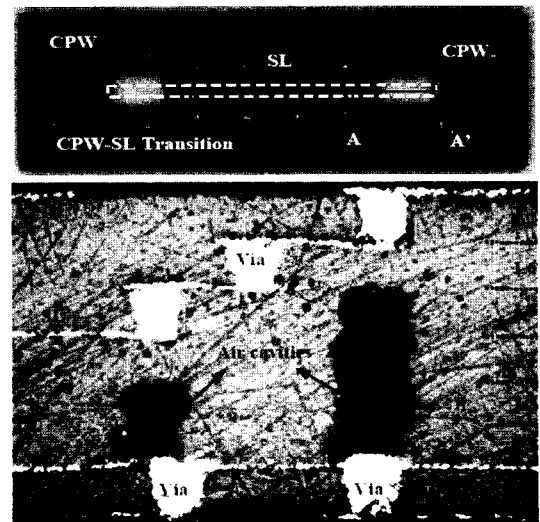
Items	Conventional	Novel
$f_0$ [GHz]	34.3	34.8
$Q_u$	122	290
$\epsilon_r$	7.74	7.52
$Z_0$ [ $\Omega$ ]	47.6	48.3
Total loss[dB/mm]	0.071	0.030
Con. loss[dB/mm]	0.035	0.0297
Dielec. loss[dB/mm]	0.036	0.0003
Loss tangnet( $\tan \delta$ )	$4.2 \times 10^{-3}$	$0.3 \times 10^{-4}$



[그림 25] T-resonator 밑의 electromagnetic 에너지의 분포를 보여주는 시뮬레이션 결과



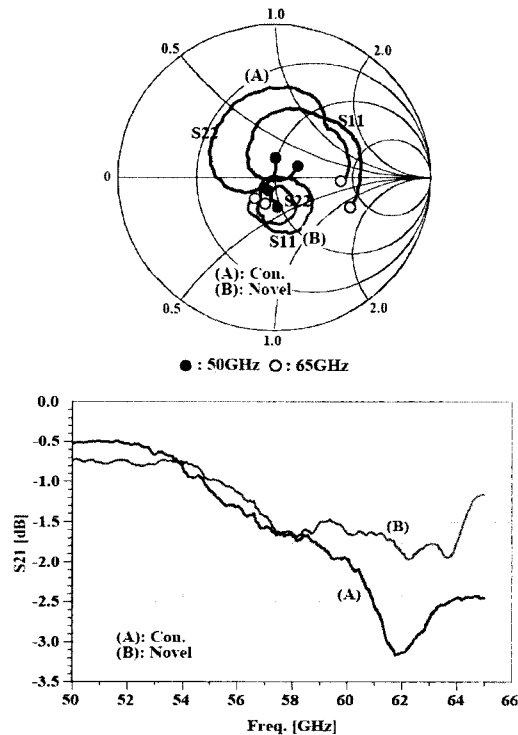
[그림 26] 일반적인 CPW-to-SL vertical 비아 천이와 제안된 구조<sup>[16]</sup>



[그림 27] 제작된 공기 공동을 갖는 CPW-SL-CPW 천이 구조의 사진<sup>[16]</sup>

비아의 비연속성으로 인한 radiation을 최소화, electric field의 집중도 향상과 임피던스 정합을 위해 공기 공동을 사용한 CPW-to-SL vertical 비아 천이 구조의 개념도와 제작품을 보여주고 있다<sup>[16]</sup>.

전송선 천이의 반사 특성을 최소화 하기 위해 공기 공동을 이용하여 전송 비아의 특성 임피던스를 최적화 하였고, 또한 임피던스 정합을 위해 공기 공동 구조를 삽입하여 비아와 접지면 사이에 발생하는 기생 캐패시터 성분을 줄였다. [그림 28]은 제작된 CPW-SL-CPW천이의 일반적인 구조와 제안된 구조의 비교를 나타내는 결과이다. 삽입 손실은 일반적인 구조는 -2 dB를, 제안된 구조는 -1.6 dB의 개선 효과가 있고 반사 손실의 경우 일반적인 구조보다 5 dB 이상 개선되는 특성을 보인다.



[그림 28] 제작된 일반적인 CPW-to-SL vertical 비아 천이와 제안된 구조의 비교<sup>[16]</sup>

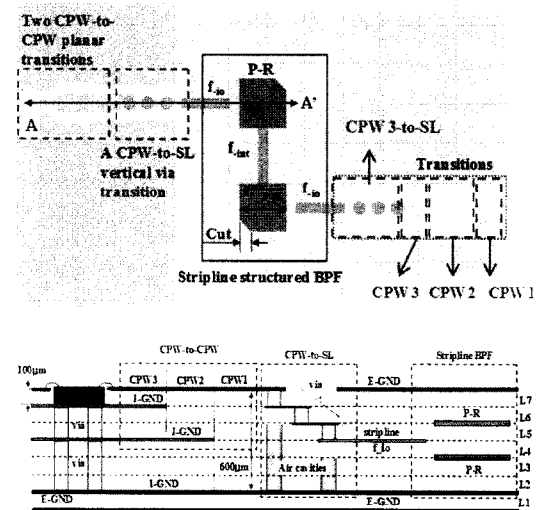
### 3-1-2 필터, 안테나 및 공진기

밀리미터파 시스템의 monolithic 집적을 위해서는 필터, 안테나 및 공진기의 용이한 조립과 작은 form factor가 요구된다.

#### 3-1-2-1 LTCC Stripline Band-pass Filter(BPF)

[그림 29]는 LTCC SoP 모듈 내에 전체적으로 집적 가능한 적은 radiation SL BPF의 구조를 보여준다. LTCC SoP내에 전체적으로 집적하기 위해서 CPW-to-SL vertical 천이와 CPW-to-CPW planar 천이가 공기 공동 구조, stagger 비아 구조 및 내부 접지를 이용하여 새롭게 설계되었다. 크기를 줄이기 위해, 공정의 민감도를 감소시키기 위해, 또한 적은 손실을 가지는 BPF를 설계하기 위해 LTCC 유전체내에 dual-mode patch 공진기를 사용하여 설계하였다<sup>[17]</sup>.

능동 소자와 적은 손실의 연결을 위해 내장된 공기 공동 구조와 stagger 비아를 이용한 전송선 천이



[그림 29] 공기 공동 구조를 이용한 CPW-to-SL vertical 비아 천이와 CPW-to-CPW planar 천이 구조를 포함한 60 GHz SL LTCC BPF의 개념도와 단면도<sup>[17]</sup>

구조를 갖는 LTCC SL BPF의 제작물과 측정 결과를 [그림 30]에서 보여주고 있다. 6개의 CPW-to-CPW 천이와 2개의 CPW-to-SL 천이 구조와 연관된 비연속성 손실을 포함한 LTCC SL BPF는 3.2×6.5 mm<sup>2</sup>의 크기로 60.4 GHz의 중심 주파수를 갖고 3.5 %의 대역폭과 5.27 dB의 삽입 손실을 보인다.

### 3-1-2-2 LTCC Waveguide Filter

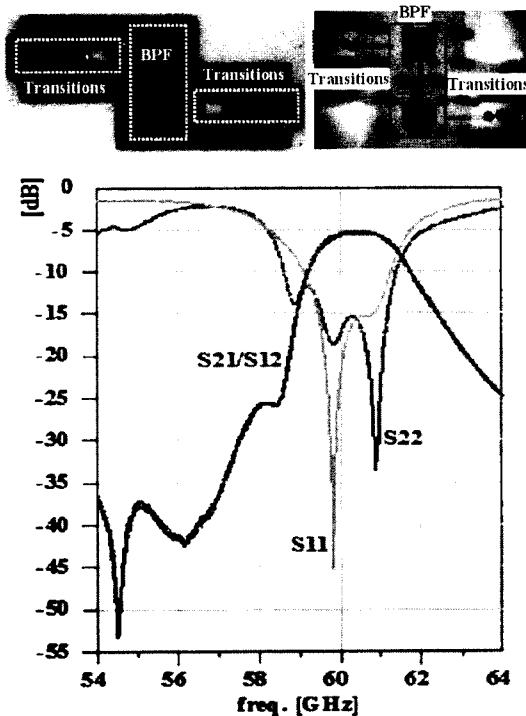
와이어 본딩 및 플립 칩 본딩 등의 별도의 조립이 불필요한 LTCC 유전체 내에 초저 손실 및 compact 한 크기의 유전체 다층 구조 waveguide(WG) 필터를 [그림 31]에서 보여준다<sup>[18]</sup>. 제안된 다층 구조의 유전체 waveguide 필터는 두 개의 공진기로 구성되어 있으며, 능동 소자와의 연결을 위해 conductor backed CPW-

to-embedded MS-to-WG 천이 구조를 가지고 있다. 누설 field를 방지하기 위해 비아 side wall은 병렬로 지그재그로 구성되어 있다.

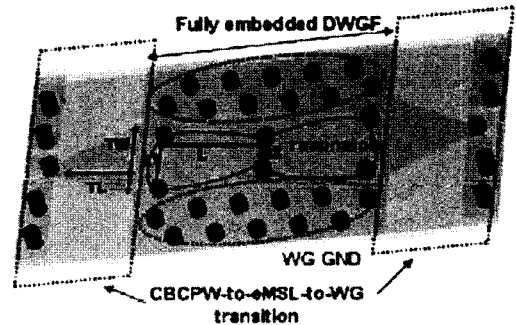
[그림 32]는 제작된 유전체 WG 필터의 사진과 측정 결과를 보여준다. 4.5×2.65 mm<sup>2</sup>의 크기를 가지며 62.17 GHz의 중심 주파수에서 1.69 GHz의 대역폭, 2.95 dB의 삽입 손실과 15 dB 이하의 반사 특성을 나타내고 있다.

### 3-1-2-3 LTCC 배열 패치 안테나

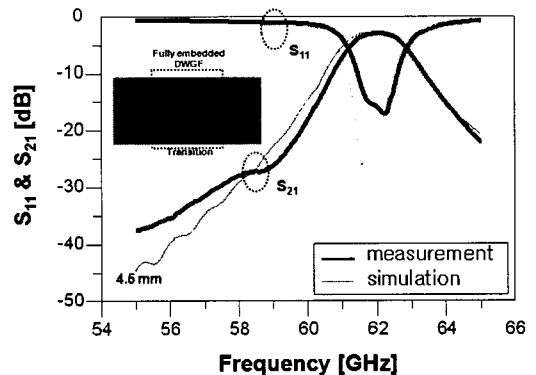
안테나를 포함한 단일 시스템 집적을 위한 LTCC 배열 patch 안테나를 60 GHz 대역에서 설계 및 제작



[그림 30] 제작 및 측정된 60 GHz LTCC SL BPF의 주파수 특성<sup>[17]</sup>



[그림 31] 초저 손실 유전체 WG 필터의 개념도<sup>[18]</sup>



[그림 32] 제작 및 유전체 WG 필터의 주파수 특성<sup>[18]</sup>

하였다. 대역폭을 향상시키기 위해 feeding 라인은 2층 layer에 기생 패치는 3층 layer에 위치하였다. [그림 33]에서 보여주는 2x2 LTCC 배열 패치 안테나는 약 7 dBi의 이득과 36°의 3-dB 대역폭을 가지고 10x10 mm<sup>2</sup>의 크기를 갖는다<sup>[19]</sup>. 높은 이득의 안테나를 위해 동일 구조의 4x4 LTCC 배열 패치 안테나는 14 dBi의 이득과 19°의 3-dB 대역폭을 가지고 20x20 mm<sup>2</sup>의 크기를 갖는다<sup>[20]</sup>.

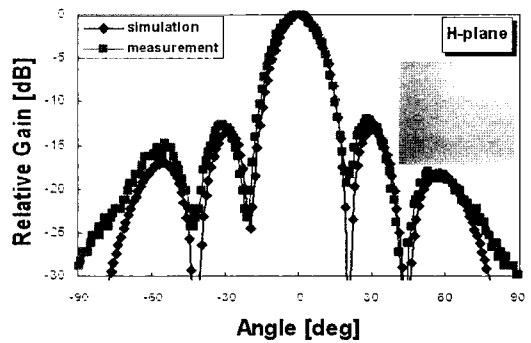
### 3-1-2-4 높은 Q를 갖는 LTCC 공진기

[그림 35]는 off-Chip 의 다른 어떤 공진기도 요구되지 않는 VCO 집적을 위한 2.84 mm의 지름을 갖는 원형 공진기를 다층 LTCC구조를 이용한 설계를 보여준다<sup>[21]</sup>. Electro-magnetic 전력의 최대한 집중시키기 위해 지그재그 dual-row 비아 포스트를 이용하였고, 또한 원형 공진기에 전력을 인가하는 feeding 비

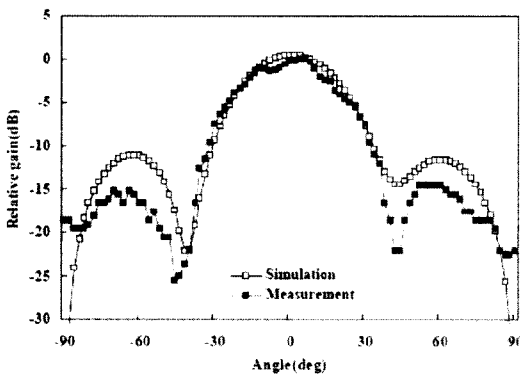
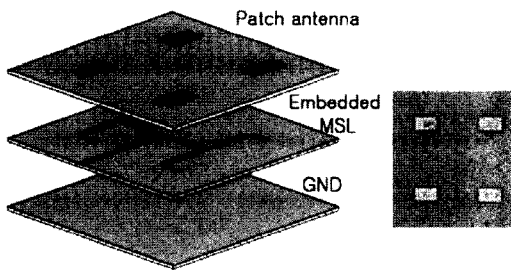
아 포스트에  $\lambda/4$  short stub를 위치시킴으로써 효과적인 전력 전달을 도모했다.

[그림 36]은 제작된 원형 LTCC 공진기와 측정 결과를 보여준다. 제안된 원형 LTCC 공진기의 unloaded-Q는 일반적인 구조의 공진기에 비해 45.1 % 개선되었다.

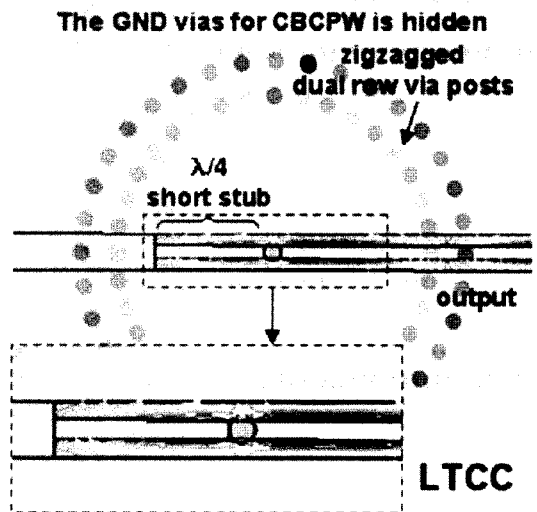
제안된 원형 LTCC 공진기와 MMIC를 이용한 발진



[그림 34] 4x4 LTCC 배열 패치 안테나의 구조, 제작물, radiation 패턴 및 대역폭<sup>[20]</sup>



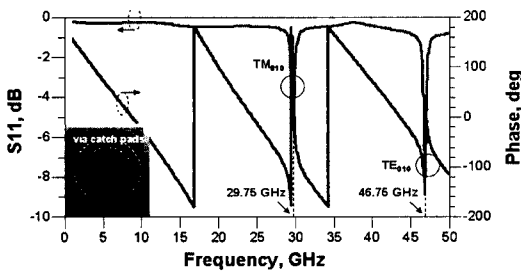
[그림 33] 2x2 LTCC 배열 패치 안테나의 구조, 제작물 및 60.4 GHz에서의 radiation 패턴<sup>[19]</sup>



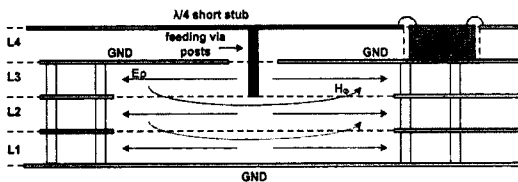
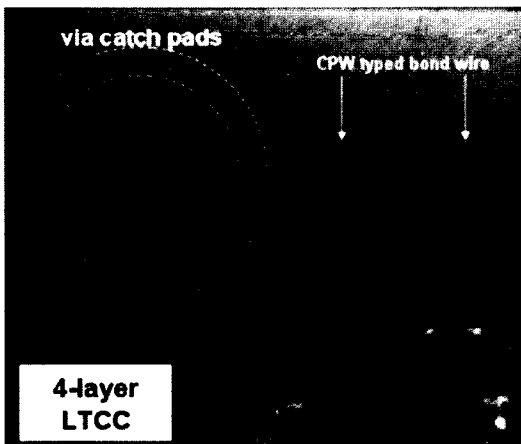
[그림 35] 원형 LTCC 공진기 구조 및 EM 시뮬레이션 결과<sup>[21]</sup>

기의 구조 및 제작물을 [그림 37]에서 보여주고 있다.

제안된 지그재그 dual-row 비아 포스트와  $\lambda/4$  short stub를 갖는 원형 LTCC 공진기와 능동 회로를 집적한 발진기는 [그림 38]에서 보여지듯이 19.34 dBm의 출력 전력, 18.28 %의 DC-to-RF conversion 효율과



[그림 36] 지그재그 dual-row 비아 포스트와  $\lambda/4$  short stub를 갖는 제안된 원형 LTCC 공진기의 제작물과 측정 결과<sup>[21]</sup>



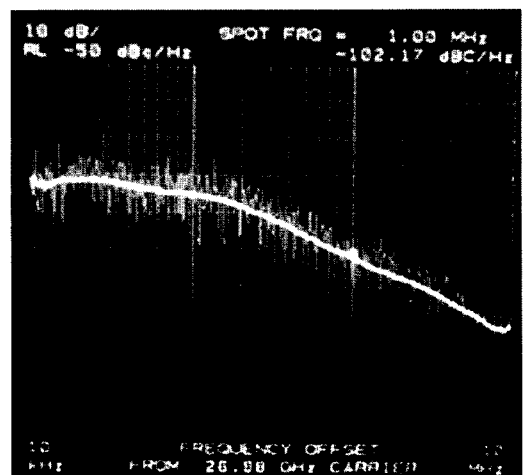
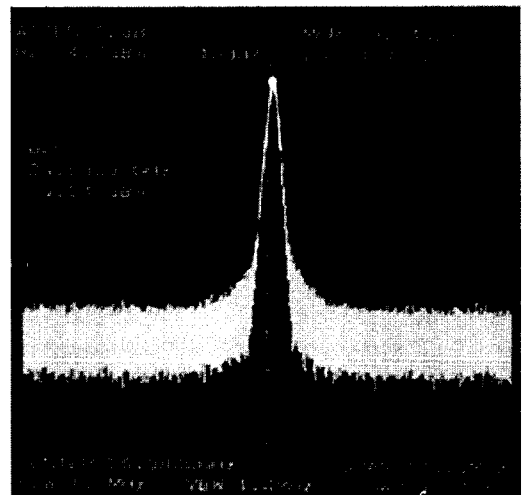
[그림 37] 제안된 원형 LTCC 공진기와 pHEMT(-)R MMIC와의 집적 발진기의 구조 및 제작물<sup>[21]</sup>

1 MHz offset에서  $-102.17$  dBc/Hz의 phase noise를 갖는다<sup>[21]</sup>.

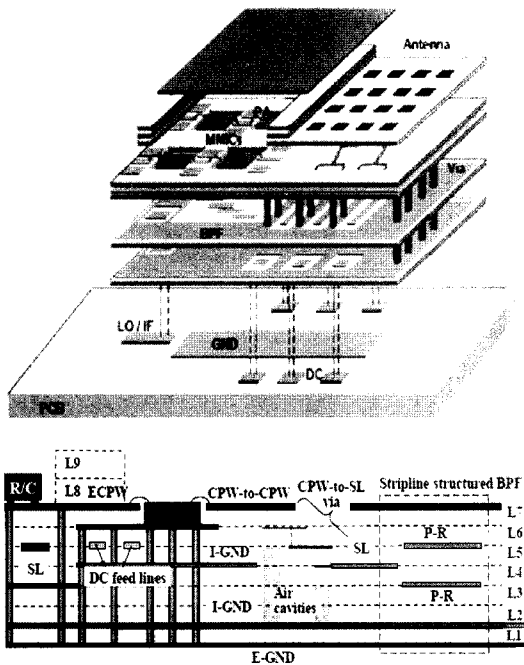
### 3-2 60 GHz Radio SoP 집적 및 통신 테스트

#### 3-2-1 초소형 60 GHz LTCC 송신기 모듈

[그림 39]는 60 GHz 대역 무선 통신 터미널 응용을 위해 소형 LTCC 송신기를 보여주고 있으며, 전체 크기는  $36 \times 12 \times 0.9$  mm<sup>3</sup>이다<sup>[19]</sup>. [그림 40]에서 보여지



[그림 38] 측정된 발진기의 출력 전력 및 phase noise 특성<sup>[21]</sup>



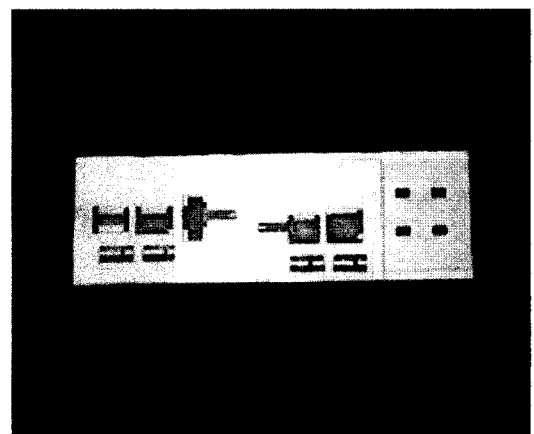
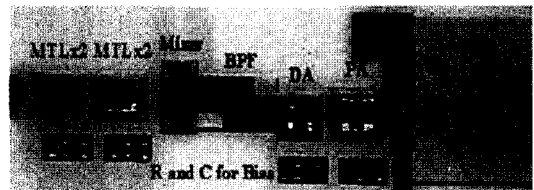
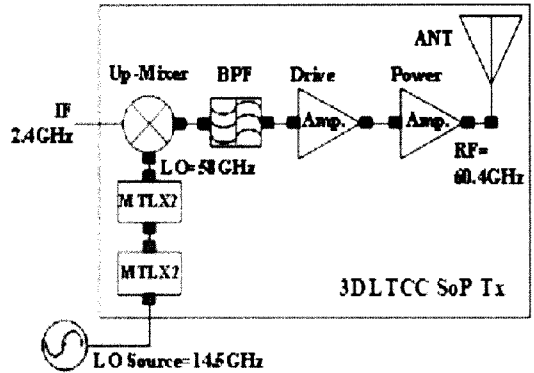
[그림 39] 60 GHz LTCC SoP 송신기 개념도 및 단면도<sup>[19]</sup>

듯이 총 5개의 GaAs MMIC가 사용되었으며, 다층 기판 내부에 실장된 스트립 선로 대역 통과 필터<sup>[17]</sup>와 외부에 마이크로스트립 패치 안테나를 가지고 있다. 손실을 줄이기 위한 공기 공동 구조를 가지는 새로운 CPW-to-SL 천이<sup>[16]</sup>를 사용한다.

제작된 송신기는 [그림 41]에서 보여지듯이 60.4 GHz에서 9 dBm의 출력을 나타내며, 상향 변환 이득은 11.2 dB, LO 신호 제거는 33.4 dBc이다. LTCC SoP 송신기내에 대역 통과 필터와 안테나를 집적화시킨 첫 번째 시도으로써의 의미를 가진다.

### 3-2-2 Sub-harmonic Frequency ASK Modulator를 갖는 60 GHz LTCC 송신기 모듈

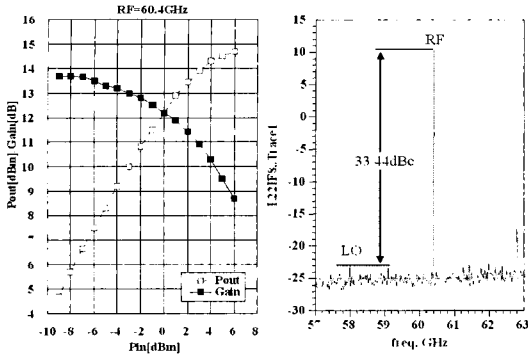
저 전력 소모와 4x4 배열 패치 안테나를 송신기 뒷면에 배치하여 compact한 집적을 위한 sub-harmonic amplitude shift-keying modulator를 이용한 60 GHz LTCC 송신기를 [그림 42]에 나타내었다<sup>[20]</sup>.



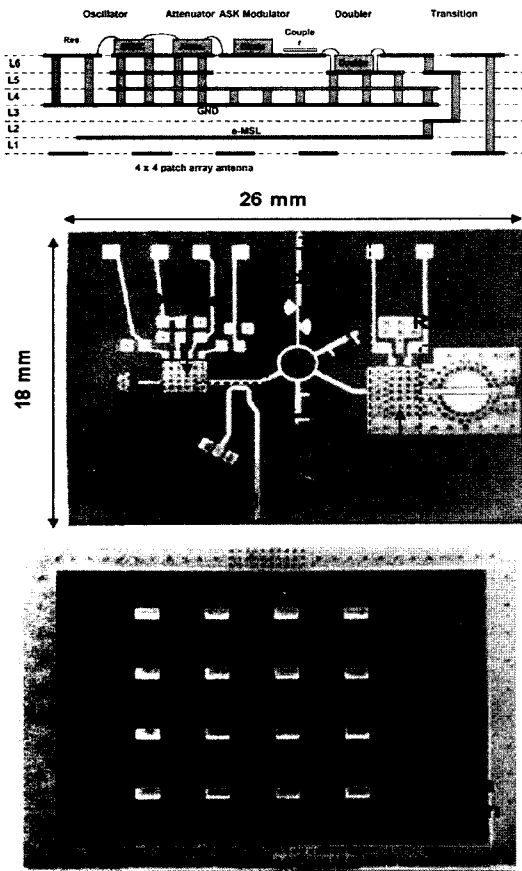
[그림 40] 60 GHz LTCC SoP 송신기의 블럭 다이어그램과 제작된 송신기 사진<sup>[19]</sup>

[그림 43]은 30 GHz LTCC ASK modulator를 보여준다. 간단한 구조의 ASK modulator는 LTCC embedded





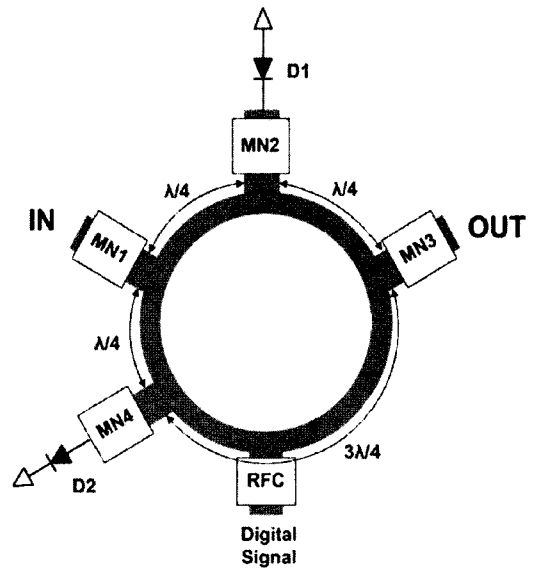
[그림 41] 60 GHz LTCC SoP 송신기의 측정된 출력 전력<sup>[19]</sup>



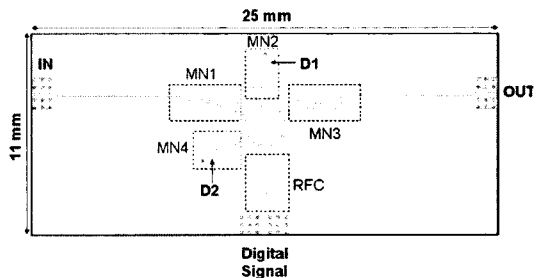
[그림 42] Sub-harmonic ASK 60 GHz LTCC SoP 송신기의 구조 및 제작물의 상층부와 하단부<sup>[20]</sup>

형태의 개선된 rat-race coupler와 접지면에 서로 다른 극성으로 연결된 두 개의 Schottky 다이오드로 구성된다. [그림 44]에는 on/off 상태의 ASK modulator의 삽입 및 반사 특성을 보여준다. On/off 상태에서의 측정 결과를 보면 32.7 dB의 우수한 isolation 특성과 -15 dB 이하의 반사 특성을 보인다.

[그림 45]는 2.5 m에서 전송 특성을 측정한 결과를 나타낸다. 800 Mbps 데이터의 전송 테스트에서  $10^{-11}$ 의 Bit error rate와 좋은 eye pattern 특성을 보여주고 있다.



(a) ASK modulator의 구성도

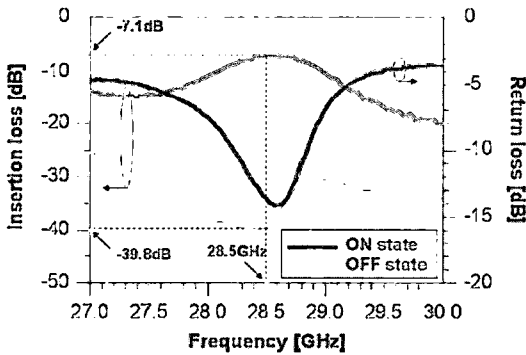


(b) 30 GHz LTCC ASK modulator의 레이아웃

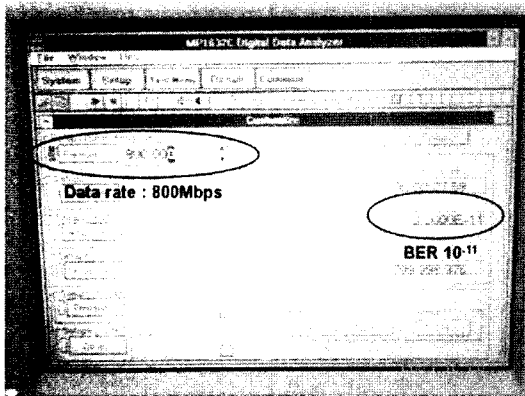
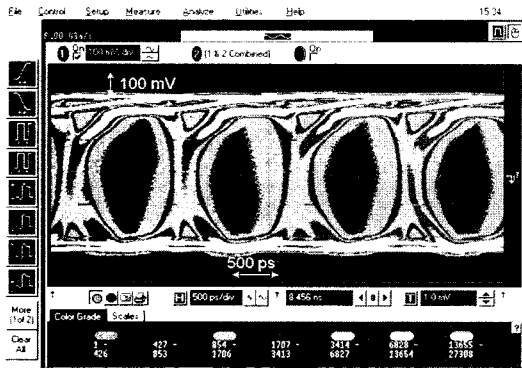
[그림 43] 30 GHz LTCC ASK modulator의 구성도<sup>[20]</sup>

3-2-3 60 GHz LTCC 송수신기 모듈

Sensitivity level 및 거리 향상을 위해 패치 안테나



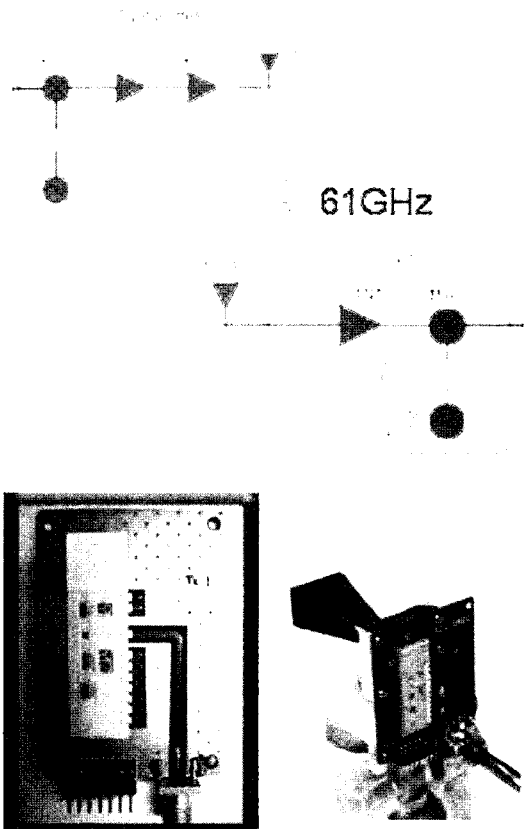
[그림 44] ASK modulator의 on/off 상태의 측정 결과<sup>[20]</sup>



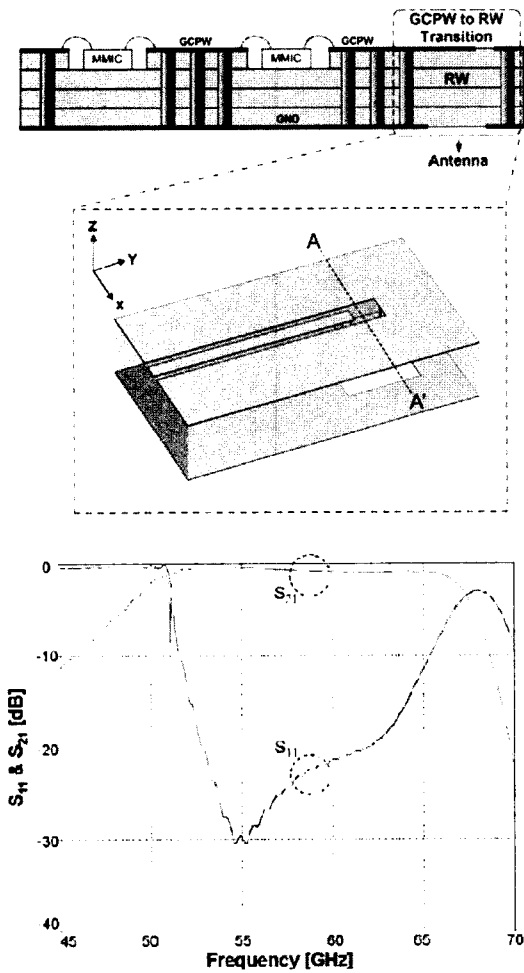
[그림 45] 2.5 m의 거리에서 800 Mbps 데이터 전송 측정 결과<sup>[20]</sup>

와 혼 안테나를 연결할 수 있는 송수신기를 [그림 46]에서 보여 주고 있다. 수신기 구조에 혼 안테나를 연결하기 위한 Grounded CPW(GCPW)-to-Rectangular Waveguide(RG) transition 구조는 bent short stub와 GCPW 와 같은 유전체 내에 집적한 RW로 구성된다. [그림 47]은 3차원 EM 시뮬레이터를 이용한 결과로써, 51.6 GHz부터 65.4 GHz의 대역에서 10 dB 이상의 반사 손실 및 0.9 dB 이하의 삽입 손실의 매우 우수한 특성을 보여준다.

[그림 48]에는 패치 안테나 구조의 송신기와 혼 안테나가 연결된 수신기의 전송 테스트 결과를 보여



[그림 46] 60 GHz 송수신기 구조도 및 제작물(패치 안테나가 연결된 송신기 및 혼 안테나가 연결된 수신기)<sup>[22]</sup>

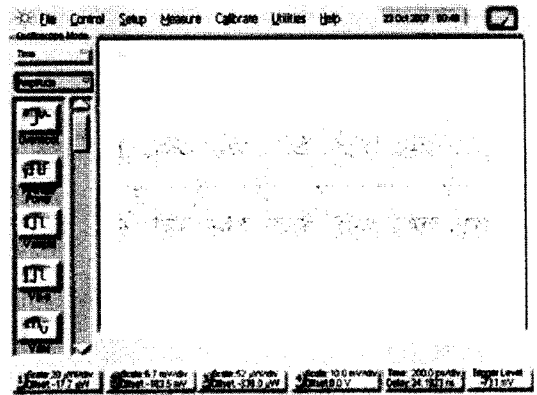


[그림 47] 60 GHz GCP-to-RG 칩의 구조도 및 시뮬레이션 결과<sup>[22]</sup>

주고 있다. 1 m 내외에서 3 Gbps의 데이터 전송 결과 우수한 eye pattern 특성을 나타낸다. 또한, sensitivity level이 개선되어 3.5 m 이상의 거리에서 650 Mbps의 비디오 전송 테스트가 가능하였다.

#### IV. 결 론

Gbps급의 대용량 무선 통신 사용에 대한 요구가 급증함에 따라 7 GHz의 ISM 대역폭을 갖는 60 GHz



[그림 48] 3 Gbps 데이터 전송 eye pattern 및 3.5 m 이상의 거리에서 650 Mbps 비디오 전송 시연

대역에 관심을 갖게 되었고, 이 주파수를 이동 단말기에 응용하기 위해 CMOS 공정을 이용한 저전력 능동 회로에 대한 연구 내용을 소개하였다. 또한, 저손실/소형화의 목적으로 LTCC를 이용하여 연구 개발한 여러 가지 수동 부품 및 SoP에 관해 소개하였다. 60 GHz 대역을 이용한 Gbps급의 대용량 무선 통신 시스템은 전 세계 선두 그룹에서도 현재 개발 진행 중인 미완성 기술이므로, 국내에서도 저 전력 소모의 능동 회로 및 SoP에 관한 연구가 활발히 이루어져야 할 것이다.

#### 참 고 문 헌

- [1] C. S. Park, "SoP integration of 60 GHz radio", 2007 IEEE RFIC Workshop, WSN3, Jun. 2007.
- [2] B. Gaucher, "Completely integrated 60 GHz ISM band

- front end chip set and test results", *IEEE 802.15-15-06-0003-00-003c*, Jan. 2006.
- [3] C. Cao, and K. O. Kenneth "CMOS millimeter-wave frequency sources", *2007 IEEE RFIC Workshop*, WSN4, Jun. 2007.
- [4] Chinh H. Doan, Sohrab Emami, Ali M. Niknejad, and Bobert W. Brodersen, "Millimeter-wave CMOS design", *IEEE J. Solid-State Circuits*, vol. 40, no. 1, pp. 144-155, Jan. 2005.
- [5] Babak Heydari, Mounir Bohsali, Ehsan Adabi, and Ali M. Niknejad, "Millimeter-wave devices and circuit blocks up to 104 GHz in 90 nm CMOS", *IEEE J. Solid-State Circuits*, vol. 42, no. 12, pp. 2893-2903, Dec. 2007.
- [6] D. Y. Jung, C. S. Park, "Power efficient Ka- band low phase noise VCO in 0.13um CMOS", *Electron. Lett.*, vol. 44, no. 10, pp. 630-631, May 2008.
- [7] D. Y. Jung, C. S. Park, "A low power, high-suppression V-band frequency doubler in 0.13um CMOS", *IEEE Microw. Wireless Compon. Lett.*, vol. 18, no. 8, pp. 551-553, Aug. 2008.
- [8] Bagher Afshar, Yanjie Wang and Ali M. Niknejad, "A robust 24 mW 60 GHz receiver in 90 nm standard CMOS", *IEEE Int. Solid-State Circuits Conf. Dig. Tech. Papers*, pp. 182-183, Feb. 2008.
- [9] Jeffrey M. Gilbert, Chinh H. Doan, and Sohab Emami, "A 4-Gbps uncompressed wireless HD A/V transceiver chipset", *IEEE Micro*, vol. 28, no. 2, pp. 56-64, Mar.-Apr. 2008.
- [10] Stephane Pinel, Saikat Sarkar, Padmanava Sen, Bevin Perumana, David Yeh, Debasis Dawn, and Joy Laskar, "A 90 nm CMOS 60 GHz radis", *IEEE Int. Solid-State Circuits Conf. Dig. Tech. Papers*, pp. 129-131, Feb. 2008.
- [11] Saikat Sarkar, Padmanava Sen, Bevin Perumana, David Yeh, Debasis Dawn, Stephane Pinel, and Joy Laskar, "60 GHz single-chip 90 nm CMOS radio with integrated signal processor", *IEEE MTT-S Int. Microwave Symp. Dig.*, pp. 1167-1170, Jun. 2008.
- [12] Manos M. Tentzeris, Joy Laskar, John Papapolymerou, Stephane Pinel, V. Palazzari, R. Li, G. De-Jean, N. Papageorgiou, D. Thomson, R. Bairavasubramanian, S. Sarkar, and J. H. Lee, "3-D-Integrated RF and millimeter-wave functions and modules using liquid crystal polymer(LCP) system-on- package technology", *IEEE Trans. Advanced Packaging*, vol. 27, no. 2, pp. 332-339, May 2004.
- [13] Dane C. Thompson, Olivier Tantot, Hubert Jallageas, George E. Ponchak, Manos M. Tentzeris, and John Papapolymerou, "Characterization of liQuid Crystal Polymer(LCP) material and transmission lines on LCP substrates from 30 to 110 GHz", *IEEE Trans. MTTs*, vol. 52, no. 4, pp. 1343-1352, Apr. 2004.
- [14] Y. C. Lee, K. C. Eun, and C. S. Park, "A new low-loss microstrip structure on LTCC substrate", *IEICE Trans. Electron.*, vol. E86-C, no. 5, pp. 867-869, May 2003.
- [15] Y. C. Lee, C. S. Park, "A novel high-Q LTCC stripline resonator for millimeter-wave applications", *IEEE Microw. Wireless Compon. Lett.*, vol. 13, no. 12, pp. 499-501, Dec. 2003.
- [16] Y. C. Lee, C. S. Park, "A novel CPW-to-stripline vertical via transition using a stagger via structure and embedded air cavities for V-band LTCC SiP applications", *APMC.*, vol. 2, pp. 4-7, Dec. 2005.
- [17] Y. C. Lee, C. S. Park, "A fully embedded 60-GHz novel BPF for LTCC system-in-package applications", *IEEE Trans. Adv. Packag.*, vol. 29, pp. 804-809, Sep. 2006.

- [18] D. Y. Jung, W. I. Chang, J. H. Kim, and C. S. Park, "A low loss multi-layer dielectric waveguide filter for 60-GHz system-on-package applications", *IEICE Trans. Fundamentals*, vol. E89-A, no. 6, pp. 1690-1691, Jun. 2006.
- [19] Y. C. Lee, W. I. Chang and C. S. Park, "Monolithic LTCC SiP transmitter for 60 GHz wireless communication terminals", *IEEE MTT-S Int. Microwave Symp. Dig.*, pp. 1015-1018, Jun. 2005.
- [20] D. Y. Jung, W. I. Chang, K. C. Eun, and C. S. Park, "60-GHz system-on-package transmitter integrating sub-harmonic frequency amplitude shift-keying modulator", *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, vol. 55, no. 8, pp. 1786-1793, Aug. 2007.
- [21] D. Y. Jung, K. C. Eun, and C. S. Park, "Ka-band oscillator integrating a high-Q low-temperature co-fired ceramic circular resonator using zigzagged via posts and a  $\lambda/4$  short stub", *IET Microwaves Antennas Propag.*, vol. 2, no. 1, pp. 88-92, Feb 2008.
- [22] J. J. Lee, K. C. Eun, D. Y. Jung, S. J. Cho, and C. S. Park, "Novel GCPW-to-embedded LTCC rectangular waveguide transition for V-band system-on-package applications," *ITC-CSCC 2007*, vol. 1, pp. 121-122, Jul. 2007.

≡ 필자소개 ≡

박 철 순



1976년~1980년: 서울대학교 금속공학과 (공학사)  
1980년~1982년: KAIST 재료공학과 (공학석사)  
1982년~1985년: KAIST 재료공학과 (공학박사)  
1985년~1999년: 한국전자통신연구원 화

합물소자연구실 (실장, 책임연구원)

1987년~1989년: AT&T Bell Lab. 방문연구원  
1999년~2004년: 한국정보통신대학교 부교수  
2001년~2006년: 국가지정연구실 책임교수  
2004년~현재: 한국정보통신대학교 교수  
2005년~현재: 지능형 RF연구센터 소장 (우수공학연구센터)  
[주 관심분야] Reconfigurable RFIC 및 power amplifier 설계, 밀리미터파 대역 SoC/SoP 집적

정 등 운



1995년~2001년: 광운대학교 전자재료공학과 (공학사)  
2001년~2003년: 한국정보통신대학교 전자공학과 (공학석사)  
2003년~2004년: 한국전자통신연구원 초고속통신회로팀 연구원  
2004년~현재: 한국정보통신대학교 전자

공학과 박사과정

[주 관심분야] CMOS/GaAs를 이용한 밀리미터파 대역 회로 설계 및 LTCC를 이용한 SoP 집적

은 기 찬



1994년~2001년: 전북대학교 전자공학과 (공학사)  
2001년~2003년: 한국정보통신대학교 전자공학과 (공학석사)  
2003년~2006년: 한국전자통신연구원 광대역 RF연구팀 연구원  
2006년~현재: 한국정보통신대학교 전

자공학과 박사과정

[주 관심분야] CMOS/GaAs를 이용한 밀리미터파 대역 회로 설계 및 LTCC를 이용한 SoP 집적