

LTCC를 이용한 밀리미터파 송수신기 설계 기술

송명선 · 변우진 ·
 김광선 · 김봉수 · 은기찬
 한국전자통신연구원
 디지털방송연구단

요 약

과거 밀리미터파는 군사용이나 국간 중계와 같은 제한적인 고정 통신용으로 사용되어 왔다. 이러한 제한적인 활용의 원인은 표준의 부재로 인한 장비 호환성 부족, 전파의 직진성, 고가의 시스템 가격, 새로운 활용 분야 개척 미흡에 있다고 하겠다. 고정 통신 분야에서는 IEEE 802.16에서 표준화가 완료되고, 밀리미터파 차량 충돌 방지 레이다, 밀리미터파 WPAN 등 새로운 활용 분야가 개척됨에 따라 시스템의 가격이 밀리미터파 이용 활성화의 관건이 되고 있으며, 특히 소형화에 의한 개인용 기기에의 응용을 위한 연구가 활발히 진행되고 있다. 본 논문에서는 적층 구조의 유전체 기판을 사용하는 LTCC 기술을 밀리미터파대에 적용하여 밀리미터파 송수신 시스템을 저가격화, 소형화 하는 기술의 개발 현황에 대해 기술하였다.

I. 서 론

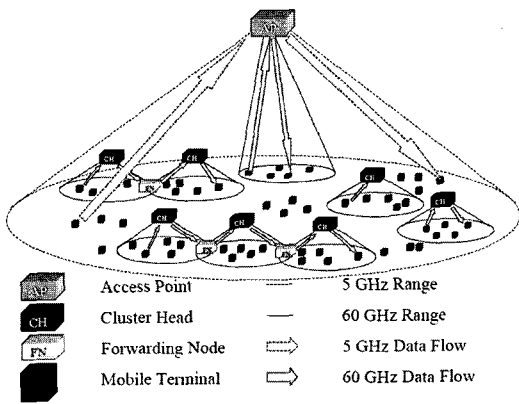
30 GHz부터 300 GHz까지를 의미하는 밀리미터파는 넓은 가용 대역폭을 가지므로, 고속 전송에 유리하며 파장이 짧아서 회로의 소형화에 유리하다. 그러나, 직진성으로 인하여 가시거리가 확보되어야 하고, 높은 동작 주파수에서 동작하기 때문에 사용 부품이 고가이며, 자유공간 손실 외에 대기 및 강우 감쇠가 심하여 장거리 전송에 불리하다. 반면, 그러한 짧은 전송 거리는 주파수 재 사용률을 높일 수 있을

뿐만 아니라 보안성 유지 측면에서는 장점도 된다.

궁극적으로, 이와 같은 물리적 특성을 가진 밀리미터파 대역의 사용을 활성화하기 위한 주요 과제는 새로운 서비스의 창출과 저렴한 가격의 시스템 개발 가능성에 달려있다고 할 수 있다.

이전에 제안된 통신 서비스로써 BWLL/LMDS/MMDS와 같은 광대역 전송 시스템 솔루션은 기술의 미성숙, 표준의 부재, 규모의 경제 미확보, 수익성 있는 비즈니스 모델 부재 등의 이유로 유선망이 도달하지 못하는 서비스 음영 지역용 틈새 시장 솔루션으로 전략하고 말았다. 하지만, 이와 같은 실패를 바탕으로 하여, 미국과 유럽 등은 양질의 새로운 응용 서비스를 제공하기 위한 광대역 무선 액세스 시스템(BWA: Broadband Wireless Access)에 관한 IEEE 802.16와 ETSI/HIPERMAN의 표준화는 계속 수정 및 보완되었으며, 밀리미터파의 주파수 할당도 정책적으로 이루어지고 있다^[1].

대표적인 시스템으로 [그림 1]에서 보여지는 유럽에서 진행되고 있는 5 GHz HiperLAN/2와 60 GHz HiperSpot을 연동해서 사용하는 IST(Information Society Technologies) Broadway 프로젝트가 있다^[2]. 5 GHz 대역을 기본으로 사용하고 근거리에서는 5 GHz 신호를 IF로 해서 60 GHz로 변환하는 방식을 사용하고 있다. 변조방식은 다중 반송파 방식인 HiperLAN/2의 OFDM을 사용하고 통신 환경에 따라서 20~240 MHz의 대역폭에 최대 720 Mbps의 전송 속도를 가지게 설계되었다. RF 부분은 5 GHz와 60 GHz 대역을 모두 수용하기 위해서 5 GHz 변환 부분은 공



[그림 1] Broadway 시스템 개념도

유하고 스위치를 이용하여 2개의 대역을 선택하는 구조로 되어 있고 60 GHz 모듈은 소자별로 MMIC와 함께 하이브리드 형태로 제작되었다. 안테나는 높은 이득을 갖는 평면형 안테나와 크기를 줄인 이중 모드 안테나 두 가지로 개발되었다.

통신 서비스와 더불어 24 GHz와 77 GHz를 사용하고 있는 차량용 충돌 방지 장치와 같은 밀리미터 파 레이다 시스템은 현재 고급 차량에 장착되어서 사용되고 있으며, 산업체와 연구소에서는 거리 측정 성능, 커버리지 향상 및 저 가격화를 위하여 연구 개발에 매진하고 있다.

이와 같은 밀리미터파를 이용하는 새로운 서비스와 더불어 저렴한 가격의 시스템을 개발하기 위한 연구 또한 활발하다. 밀리미터파 대역의 시스템 가격에 가장 많은 부분을 차지하는 분야가 초고주파 능동 소자와 패키지라고 할 수 있다. 지금까지 능동 소자는 성능은 우수하지만, 가격이 비싼 단점을 가지는 화합물 반도체 기반의 소자 중심이었다. 하지만, 집적도를 높이고 가격을 대폭적으로 낮출 수 있는 Si 또는 SiGe 기반의 CMOS 또는 BiCMOS를 이용하는 기술 개발이 TSMC와 IBM을 중심으로 활발히 진행되고 있다. 그리고, 밀리미터파 대역에서는 전체 부품 가격에서 패키지 가격이 매우 큰 부분을

차지하고 있기 때문에 저 가격화를 위해서는 기존 금속 패키지와는 다른 패키지 기술 확보가 중요하다고 할 수 있다.

이러한 추세에 발 맞추어 ETRI를 포함한 관련 기관에서는 대량 생산이 용이하면서 저 가격화와 소형화가 가능한 밀리미터파 송수신 모듈의 개발에 초점을 맞추고 있다. 대표적인 예가, 이제까지 5 GHz 이하에 주로 이용되어 왔던 LTCC(Low Temperature Co-fired Ceramic) 기술을 밀리미터파에 적용하여 SiP(System in Package)를 실현하고자 하는 기술 개발이다.

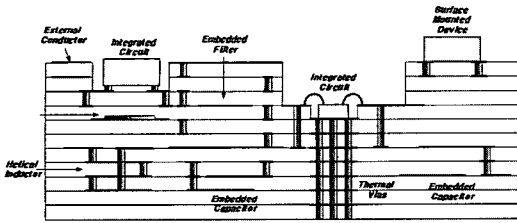
이러한 기술 외에도 3차원 집적화 기술에는 HTCC, MCM-D, MCM-L, MCM-D 기술이 있다. MCM-D 기술은 소형화에 유리한 장점이 있는 반면 LTCC에 비해 가격이 비싸다는 단점이 있다. 그리고, MCM-L은 모듈의 신뢰성이 우수하고 범용 공정을 사용하는 장점이 있으나 전기적인 특성이 좋지 않기 때문에 밀리미터파에서는 사용하는 것이 매우 어렵다. 그리고, 같은 세라믹 재료를 사용하는 HTCC(High Temperature Co-fired Ceramic)의 경우 1,200도 정도의 소성 공정이 이루어지므로 전송 선로로 사용할 수 있는 금속이 망간이나 텅스텐으로 한정된다. 이들 금속은 LTCC에 사용하는 도체인 금, 은, 구리에 비해 도체 손실이 커서 밀리미터파 대역에서는 사용하기에 불리하다.

본 고에서는 LTCC 기술을 이용하여 밀리미터파 대역에서 동작하는 SiP를 구현하기 위한 기술 및 응용 예에 대하여 살펴보고, 세부적으로 LTCC를 이용한 송수신 구성 부품의 설계 기술 동향에 대하여 살펴보고자 한다.

II. LTCC 기술의 개요 및 SiP의 기술 동향

2-1 LTCC 기술 개요

LTCC 기술은 약 850 °C의 낮은 온도에서 금, 은 등 손실이 작은 금속 성분들을 유리 원료(glass frit)

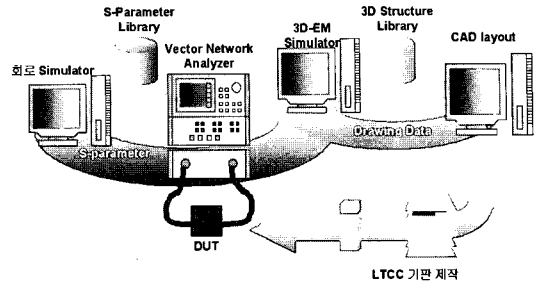


[그림 2] 단일 기판 내 다양한 기능을 가지는 LTCC 모듈 단면도

와 알루미나(alumina)의 합성 재료와 함께 처리하는 다층 세라믹 공정 기술이다. 높은 전기 전도성을 가지는 금, 은 또는 구리를 사용하기 때문에 고주파에서도 손실이 작고, glass ceramic의 낮은 유전 상수는 모듈 설계에 유리하며, 기판이 가지는 열 팽창계수(CTE)가 GaAs 또는 silicon 성분인 MMIC와 유사하므로 모듈 설계 시 사용자로 하여금 좋은 환경을 제공한다. 또한 [그림 2]에서 보여지는 것처럼 3차원 적층이 가능한 구조이기 때문에 단일 패키지 내에 캐패시터(capacitor), 저항(resistor) 및 인덕터(inductor) 등 수동 소자 형성, 디지털(digital) 및 아날로그(analog) 회로 구현, RF 및 초고주파와 밀리미터파 대역의 회로 구현 등 다양한 기능들을 집적시킬 수 있어서 소형화, 저 가격화가 가능한 다층 기술이다.

LTCC 공정 기술은 일반적으로 스크린 프린팅을 사용하여 각 층의 컨덕터와 비어를 형성한 후 소성을 통해 모듈 및 소자를 구현한다^[3]. 자세히 살펴보면 LTCC tape 제조 및 준비 → 비어 hole 형성 및 filling 공정 → conductor 프린팅 공정 → lamination 공정 → co-firing 또는 sintering 공정 → dicing 또는 cutting 공정 후 측정 및 평가를 하게 된다. 하지만, 공정 기술은 재료 특성에 매우 의존적이며, 각 회사의 고유한 know-how이기 때문에 대량 생산 기술 확보는 회사마다 큰 차이를 보인다.

LTCC를 이용한 회로 설계 기술은 공정과 재료에 매우 의존적이다. 먼저, 공정의 조건과 재료의 성능



[그림 3] 3차원 LTCC 모듈을 설계하기 위한 흐름도

을 평가하기 위하여 test-coupon을 이용하여 회로 설계 library를 확보한다. [그림 3]에서 보여지는 것처럼 회로 simulator를 이용하여 능동 소자를 simulation하고, 3차원 EM simulator를 이용하여 수동 소자를 simulation한 뒤 제작 후 평가하고, 측정 데이터를 simulation 결과와 비교하고, 재료 및 공정의 조건에 대하여 검토하는 순환적인 구조로 이루어진다.

따라서, LTCC 기술은 기본적으로 재료 기술, 공정 기술 그리고 회로 설계 기술의 3가지 핵심 기술로 구분될 수 있다. LTCC 기술을 이용하여 생산된 모듈 또는 소자들은 다음과 같은 장점을 가지고 있다.

2-1-1 Advanced Volumetric Efficiency

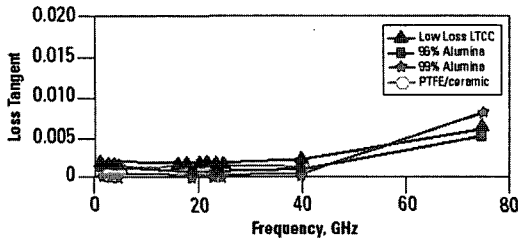
LTCC 모듈이나 캐패시터, 저항, 인덕터 또는 필터 등과 같은 수동 소자들을 기판 내에 실장시킬 수 있기 때문에 개별 소자들을 PCB 위에 직접 집적하는 모듈과 비교하여 전체 모듈 체적의 사용 효율이 향상된다.

2-1-2 Short Turn-around Time, High Yield

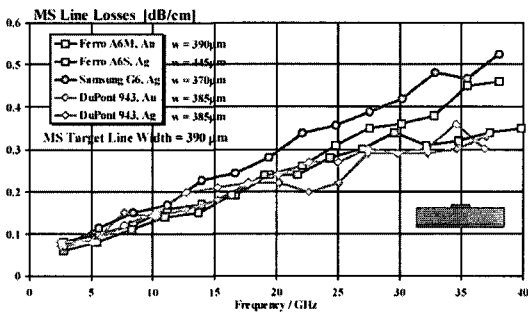
전체 모듈을 구성하는 각각의 층들을 독립적인 병렬 공정으로 진행시킬 수 있으므로 공정 시간 축소와 생산성 증가가 가능하다.

2-1-3 Low Cost

다수의 개별 소자들을 기판 내에 집적할 수 있기



(a) 유전체 손실 특성



(b) 전송선 손실 특성

[그림 4] LTCC 기술의 전기적인 특성

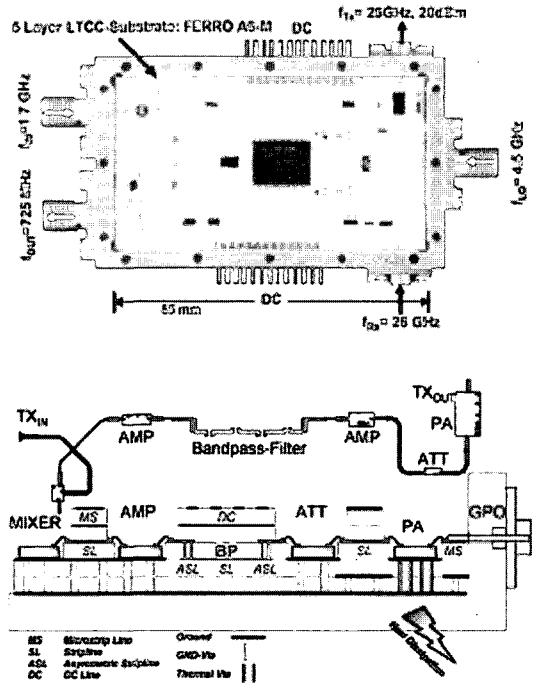
때문에 개별적인 수동 소자수가 줄어들어 전체 모듈 가격을 낮출 수 있다.

2-1-4 Higher Frequency Operation

[그림 4]에서 보여지듯이 재료적인 측면과 전기적인 측면에서 LTCC 기술은 적은 유전체 손실을 가진 세라믹 재료와 높은 도전율을 가진 금속 물질을 사용하기 때문에 이를 이용하여 만든 모듈이나 개별 소자들은 고주파 환경에서도 적은 손실과 안정된 성능을 보인다. 이러한 밀리미터파 대역의 요구 조건에 부합하기 위해 Dupont을 비롯하여 Ferro 및 Heraeus 등에서는 공정 및 성능을 향상시킨 재료를 개발하고 있다.

2-2 LTCC를 이용한 SiP의 기술 동향

SiP에서 고려되어야 할 요소들은 안테나, IF 및 기



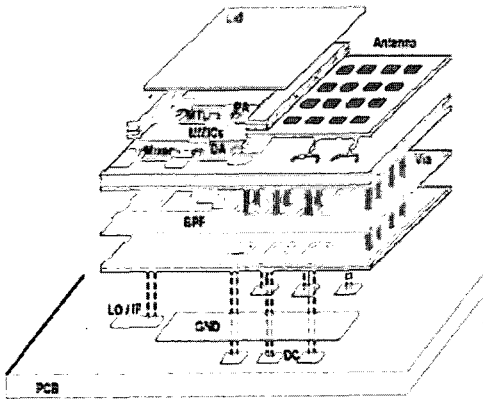
[그림 5] IMST에서 개발한 26 GHz LTCC 송수신기

저 대역 모듈과의 결합의 용이성, SiP화에 따른 경제성, 크기, 성능 및 신뢰성 등이다. 또한 세라믹 기판의 전기적 성능과 공정의 안정성 및 재현성 등도 동시에 확보되어야 한다.

밀리미터파 송수신 시스템을 위한 LTCC SiP의 개발은 전 세계적으로 많이 시도되었다. [그림 5]는 독일 IMST에서 유럽의 RAMP(Rapid Manufacture of Microwave and Power modules) 프로젝트의 일환으로 개발된 점 대 다점 통신을 위한 24.5~26.5 GHz 송수신기이다. 총 12개의 GaAs MMIC가 5층의 LTCC 기판을 사용해 캐비티 내에 집적되었다.

송수신기는 송신기, 수신기, LO 모듈로 구성되어 있으며 이들 사이의 차폐는 유전체내에 비어 벽을 사용했다. 전체 모듈의 크기는 $61 \times 37 \text{ mm}^2$ 이다^[4].

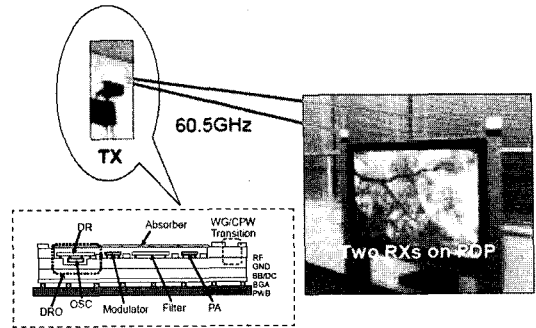
[그림 6]은 한국정보통신대학교에서 개발한 60 GHz 대역 무선통신 터미널용 소형 LTCC 송수신기(LO



[그림 6] 60 GHz LTCC SiP 송신기

은 제외)이며, 전체 크기는 $36 \times 12 \times 0.9 \text{ mm}^3$ 이다^[5]. 총 5개의 GaAs MMIC가 사용되었으며 다층기판 내부에 실장된 스트립 선로 대역 통과 필터와 외부에 마이크로스트립 패치 안테나를 가지고 있다. 손실을 줄이기 위한 air-캐비티를 가지는 새로운 CPW-to-stripline transition을 사용하였다. 제작된 송신기는 60.4 GHz에서 9 dBm의 출력을 나타내며 상향 변환 이득은 11.2 dB, LO 누설 신호 제거는 33.4 dBc이다. 이것은 LTCC SiP 송신기 내에 대역 통과 필터와 안테나를 집적화 시켰다.

NEC, Sony, Sharp 등의 일본 업체는 HDTV 신호 무선 전송 시스템을 개발하고 있으며, IEEE 802.11a의 수정 version 및 MIMO antenna를 이용한 송수신 시스템 구현과 밀리미터파 또는 광 전송 시스템을 이용한 구현 방법 등을 꾸준히 제안해 왔다. 특히, 밀리미터파 대역의 시스템은 데이터 압축 없이 신호를 전송함으로써 데이터 손실이 적다는 장점이 있다. [그림 7]은 NEC에서 개발한 LTCC를 이용한 HD-TV 신호 전송용 송수신 시스템인데, 밀리미터파의 단점인 사람이나 물건의 방해에 의한 신호 끊김 현상을 보완하기 위해 공간 다이버시티를 사용하는 방법을 제안하였다^[6].



[그림 7] NEC의 HDTV 전송 시스템과 LTCC Tx 모듈

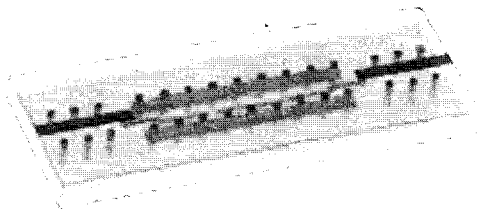
Ⅲ. 밀리미터파 대역에서의 세부 응용 회로

3-1 필터

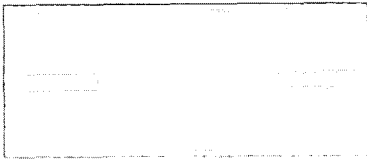
밀리미터파 대역에서 동작하는 필터는 금속 도파관으로 형성된 도파관 필터와 PTFE나 알루미늄 기판으로 형성된 평면형 필터의 2가지 형태가 주를 이루었다. 금속 도파관 필터의 경우 성능은 우수하나, 크기가 크고, 가격이 비싸지고, 평면형 필터는 복사 손실이 증가하는 단점이 있었다. 하지만, SiP를 구성하기 위한 LTCC를 이용한 다층 기술이 도입되면서 많은 새로운 구조들이 제안되었다.

[그림 8]은 end-coupled 필터를 보여준다. 동작 주파수가 높아짐에 따라서, 제작 가능한 선 폭 및 end-coupled 선로 사이의 최소 거리에 한계가 있기 때문에 이를 극복할 수 있는 방안으로 LTCC 기술을 이용하였다^[7]. 기존의 경우 end-coupled type을 만들기 위하여 동일 기판 면을 사용하던 방법이었지만, 위 논문에서는 서로 다른 층에 존재하는 공진기 간의 결합을 이용하여 필터를 제작하였다. 그러나, 결합 간격의 작은 오차에도 불구하고, 성능상에 큰 변화가 발생하는 단점을 가지고 있다.

[그림 9]는 이중 모드 BPF를 보여준다^[8]. 일반적으로 링이나 사각형 패치에 서로 직교되는 모드를 여기시키므로써 발생하는 이중 공진 특성을 이용하여

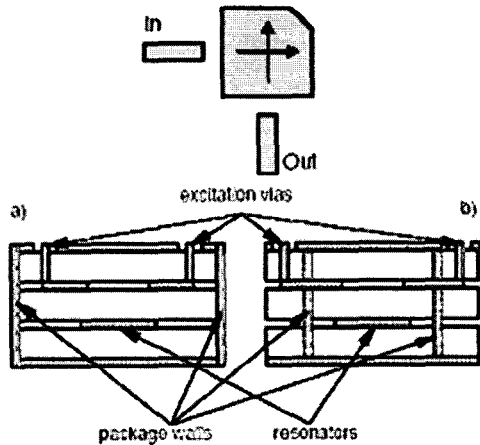


(a) The structure of end coupled stripline BPF



(b) The photograph of real BPF

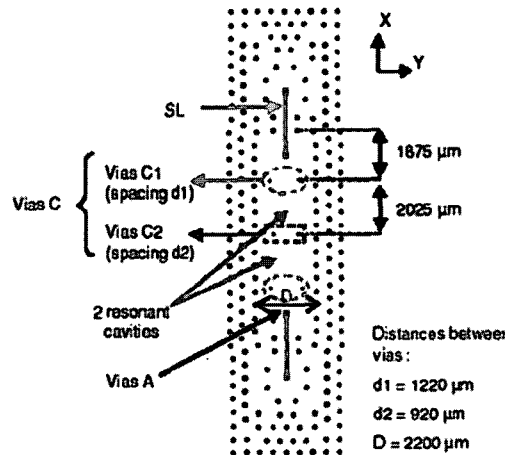
[그림 8] LTCC로 구현된 end-coupled type 스트립 선로 BPF



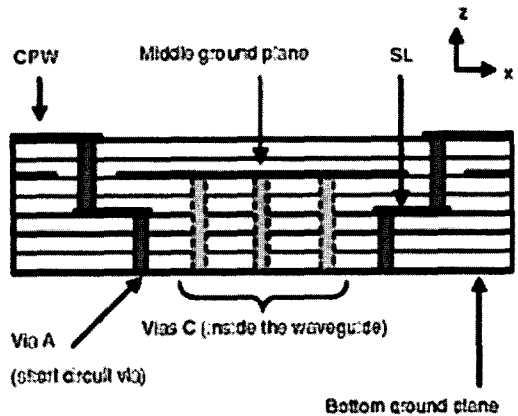
[그림 9] 이중 모드 공진기의 구조 및 이를 이용한 LTCC BPF의 단면도

대역 통과 특성을 나타내는 필터를 형성하게 된다. 이와 같은 구조의 필터는 주파수가 높아짐에 따라서 복사 손실이 커지므로, 단일 기판에서 구현하는 것은 적합하지 않지만, 다층 기판인 LTCC 기판을 사용함으로써 복사 손실을 많이 개선시킬 수 있는 장점이 있다.

[그림 10]은 유럽의 LOTTO 프로젝트 중 RF LTCC 모듈 설계 및 패키징을 위한 연구 결과물이다^[11]. 일반적인 금속 도파관은 비어 배열을 이용한 laminated 도파관으로 구성할 수 있으며, TE 모드 전송이 가능하다. 이렇게 형성된 laminated 도파관에 비어를 사용해 두 개의 공진기를 형성하고, 도파관 transition을 위해 short circuited 스트립 선로를 형성하여 성능이 우수한 필터가 구현될 수 있다. 측정된 결과 중심 주파수가 41.5 GHz이며 3 dB 대역폭이

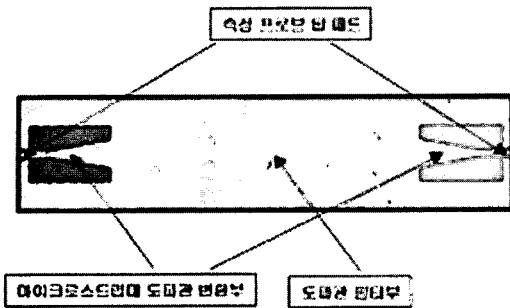


(a) 도파관 필터의 평면도



(b) 도파관 필터의 단면도

[그림 10] LTCC를 이용하여 구현한 도파관 필터의 구조



[그림 11] 40 GHz LTCC 도파관 필터

3 GHz, 삽입 손실이 1.6 dB였다.

[그림 11]은 ETRI에서 2004년도에 개발한 40 GHz LTCC 4-pole 도파관 필터이다. 이 도파관 필터는 TDD 방식을 사용하는 시스템의 front-end 부에 사용되고 있으며 안테나와 스위치 사이에 존재하여 출력단의 LO 신호 제거와 입력단의 이미지 제거를 담당한다. 총 4차를 사용하는 필터로 유전율 7.1, 두께 100 um인 LTCC 기판 6층이 사용되었다. 필터의 크기는 10×4×0.7 mm(전체 16×4×0.7 mm)이며 transition을 제외한 필터만의 반사 손실 -10 dB 이하, 삽입 손실 2.4 dB 이하이다. LO 누설 신호 억압비는 -48 dB@38.975 GHz이다.

3-2 Transition

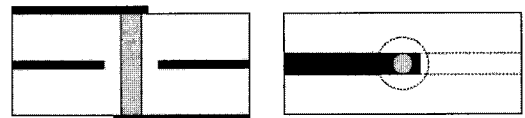
서로 다른 모드를 가지는 전송선을 통하여 밀리미터파 신호를 전달하기 위한 transition 기술은 다중 기판 회로를 구현할 때 가장 중요한 회로 구성 요소이다. 층간 수직 transition 설계시 주의해야 할 문제점은 다음과 같다.

첫째, 부정합된 transition으로부터 발생하는 반사이다. 반사된 신호는 특히 고주파에서 전력의 전체적인 손실을 일으키며, 필터 및 증폭기와 같은 개별 소자의 손실을 줄이거나 변경시킨다.

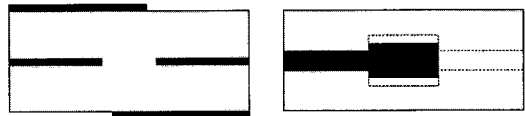
둘째, 서로 다른 기판 사이로 신호를 전달할 때 발생하는 방사(radiation)이다. Substrate mode 형태인

이러한 방식은 시스템에서 많은 개발 소자들 사이에 원하지 않는 회로 결합을 만들 수 있다. 이로 인해 격리도가 줄고, 효율이 감소하고, 기생 발진이 생긴다. 또 일반적으로 MMIC의 유전율이 높기 때문에 (silicon 유전율=11.7, GaAs 유전율=12.9) 원하지 않는 표면파가 기판 내부로 더욱 쉽게 여기된다. 그러므로, 성능이 우수한 밀리미터파 회로를 구현하기 위하여 수직 transition의 설계는 중요하다. 일반적인 수직 transition 방법은 크게 다음의 두 가지로 구분할 수 있다.

- 1) [그림 12(a)]에 보인 바와 같이 비어를 이용하여 기판의 윗면과 밑면에 있는 전송 선로 사이를 물리적으로 연결하는 방법: 기판 사이에 전도체를 따라 신호가 전달된다. 이런 형태의 transition은 기판 사이에 DC path를 제공하며, 제작에 의한 오차에 상대적으로 안정하게 동작하며, 광대역 특성을 나타낸다.
- 2) [그림 12(b)]에서 보여지는 전자파 결합 방법: 서로 다른 모드 사이에 전자파 결합에 의해 신호가 전달된다. 이 방법에서는 DC path가 존재하지 않으며, 비어 hole과 같은 추가 공정을 필요로 하지 않는다. 그러나 제작 과정에서 발생

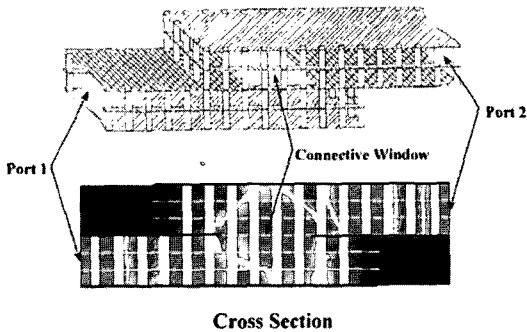


(a) 비어를 사용한 수직 transition 개념도 (측면도와 평면도)



(b) Aperture 결합을 사용한 수직 transition 개념도 (측면도와 평면도)

[그림 12] 층간 수직 transition 방법



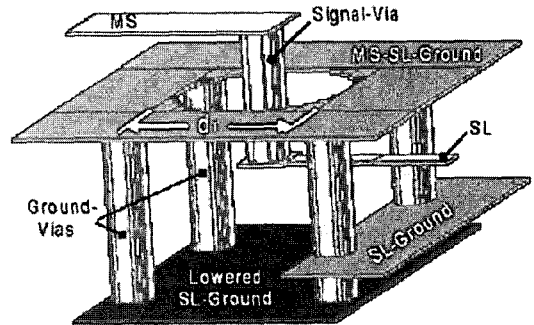
[그림 13] Laminated 도파관 간 transition 구조

할 수 있는 작은 오차에도 매우 민감하며, 물리적으로 연결된 것보다는 더 좁은 대역폭을 나타내는 경향이 있다.

이와 같은 수직 transition 구조도 단층 기판에서 다층 기판으로 변화되면서 많은 새로운 구조들이 제안되었다. [그림 13]은 laminated 도파관을 이용한 수직 transition의 구조를 보여준다^[10]. 기존 금속 도파관을 이용한 E 또는 H plane 접합 구조와 유사한 형태를 LTCC를 이용하여 구현하였다.

[그림 14]는 표면의 마이크로스트립 전송선과 다른 층에 위치한 스트립 전송선을 연결하기 위하여 5개의 비어를 사용하는 transition 구조를 보여준다^[11]. 4개의 비어는 마이크로스트립 전송선과 스트립 전송선의 접지를 형성하기 위해 사용되고 나머지 하나는 신호를 전달하기 위하여 사용된다. 신호 비어만 사용하면 인덕티브 성분이 커서 광대역의 전달 특성을 얻을 수가 없다. 따라서, 최적화를 위해 마이크로스트립 전송선과 스트립 전송선의 공통 접지면에 형성된 hole의 지름과 4개 접지 비어의 길이를 조절하여 10~30 GHz 대역에서 동작하는 광대역 신호 전달 구조를 제안하였다.

[그림 15]는 ETRI에서 2004년도에 개발한 laminated 도파관 대 WR-22 금속 도파관의 transition 구조를 보여준다. 이 구조는 front-end 부와 혼 안테나

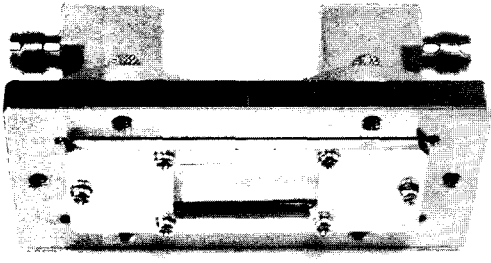
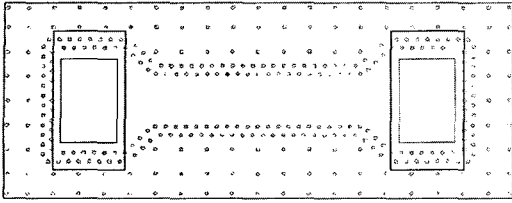


[그림 14] 마이크로스트립 전송선 대 스트립 전송선 transition 구조

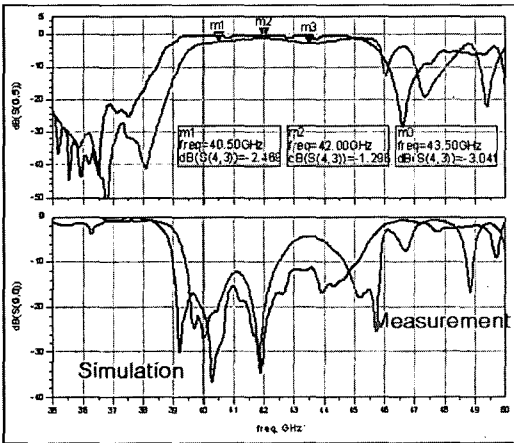
를 연결하기 위하여 개발된 변환 구조이다. 일반적으로 PCB 기판상에 설계되는 도파관 급전부의 경우 기판의 뒷면에 금속 캐비티를 형성하기 위하여 기구물 가공이 필요하지만, 본 구조는 LTCC 내의 비어 열에 의한 캐비티만을 이용하여 transition이 가능하다. 42.5 GHz 이하에서 반사 손실 -10 dB 이하, 삽입 손실이 back-to-back으로 3 dB 이하이다. 측정을 위해 사용된 소자의 전체 크기는 $20 \times 6.0.7 \text{ mm}^3$ 이다.

3.3 안테나

밀리미터파용 안테나는 참고문헌 [12]에서 언급된 것처럼 소형화, 저 가격화를 위하여 평면 안테나 개발에 초점이 맞추어져 왔다. 그런데, 안테나 이득을 높이고 대역폭을 증가시키기 위하여 PTFE와 같이 기판의 유전율은 낮아야 한다. 하지만, 송수신기와 하나의 패키지로 집적화 하기 위해 유전율이 높은 LTCC 기판을 이용한 안테나 연구가 많이 수행되고 있다. 또한, LTCC 기판을 이용하면 층의 선택과 캐비티의 형성 및 비어의 구성이 용이하여 설계의 자유도가 기존의 PTFE에 비하여 높다. 이러한 LTCC의 장점을 이용한 안테나의 연구 결과가 최근에 많이 발표되었고, 설계 관점에서 능동소자와 통합하기 위한 SiP에 적합한 새로운 급전 방법을 포함한 안



(a) 비어 열을 이용한 back-to-back laminated 도파관과 측정기구물



(b) 측정 결과(back-to-back)

[그림 15] Laminated 도파관 대 WR-22 금속 도파관의 transition 구조

테나의 구조 연구, 유전율이 높은 LTCC 기판을 안테나용 기판으로 사용하였을 때의 성능을 개선하기 위한 재료 및 새로운 안테나 구조 연구에 초점이 맞춰지고 있다.

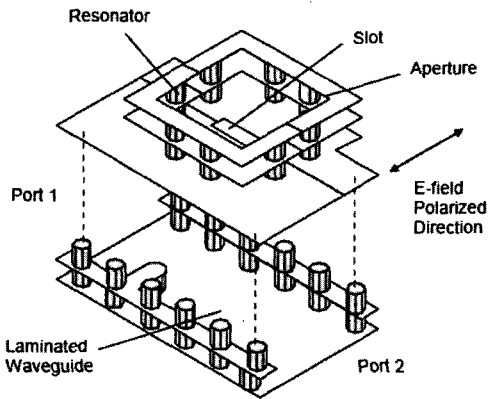
[그림 16]은 Kyocera에서 개발한 77 GHz 대역에서

동작하는 SiP용 LTCC 안테나의 구조이다^[13]. 그림에서 보여진 것처럼 안테나로 급전하기 위한 전송선은 2층으로 구성된 laminated 도파관을 사용하고, slot과 aperture로 구성된 안테나를 설계하였다. 일반적으로, 평면형 배열 안테나의 경우 안테나의 소자 개수가 많을수록 이득이 증가해야 하지만, 소자 개수가 어느 정도 이상 증가하면 급전 선로의 손실이 급격히 증가하여 안테나의 이득은 포화되게 되어 있다. 평면형 안테나의 경우 급전선은 마이크로스트립이나 CPW 전송선을 사용하였다. 하지만, 이와 같은 전송선은 기판의 유전체 및 도체에 의한 손실도 클 뿐만 아니라, 주파수가 증가하면서 복사에 의한 손실도 매우 커지기 때문에 밀리미터파 대역의 안테나 급전선으로는 적합하지 않다. LTCC를 이용하면 전도성 손실이 작으면서, 복사 손실도 작은 laminate 도파관을 구현하는 것이 가능하므로, 배열 안테나의 성능을 개선시키는데 유용하다.

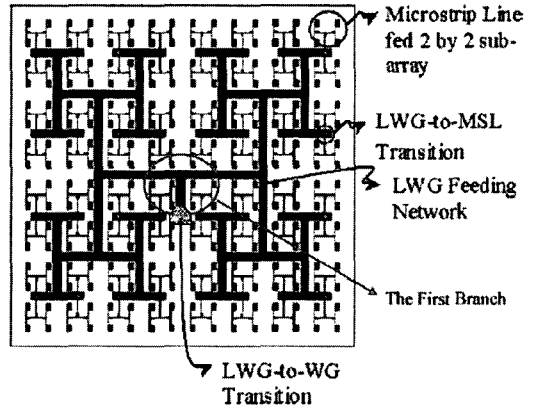
제작된 laminated 도파관은 두 층으로 구성되며, 높이는 250 um이고, 사용한 LTCC의 유전율은 4.9이다. 기존의 금속 구형 도파관을 이용하여 설계한 slotted 배열 안테나와 유사하게 laminated 도파관으로 급전선을 형성하여 배열 안테나를 제작하는 것이 용이하다.

[그림 16(b)]는 laminated 도파관으로 급전된 slotted 안테나를 4×12와 2×12 배열 안테나의 구조로 확장한 형태이다. 빔급 친 부분은 구리로 형성된 금속 p 패턴이며, 흰색 부분은 안테나의 aperture 부분을 나타낸다. 안테나의 이득은 17.9 dBi와 15.6 dBi이다.

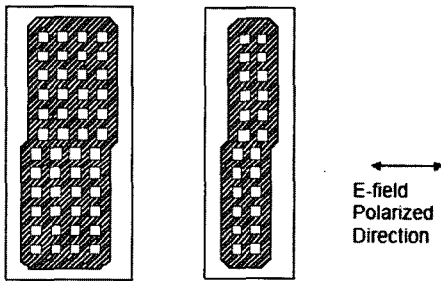
Ke Wu는 밀리미터파 대역의 응용을 위하여 LTCC를 이용한 laminated 도파관과 평면형 배열 안테나에 대한 많은 연구 결과를 발표하였다. 그 중에서도 2005년에 발표된 [그림 17]은 위에서 언급된 것처럼 급전선의 손실을 줄이기 위하여 laminated 도파관을 이용하여 급전한 16×16 배열 안테나를 보여준다



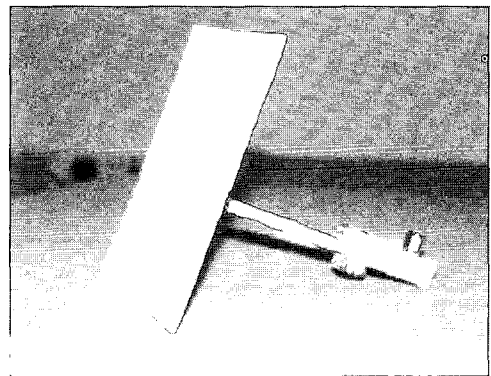
(a) 한 개의 slotted 안테나



(a) 혼합 급전 방식을 사용한 배열 안테나



(b) 4×12와 2×12 배열 안테나



(b) 실제 제작된 LTCC 배열 안테나

[그림 16] Laminated 도파관을 이용한 slot 안테나의 구성

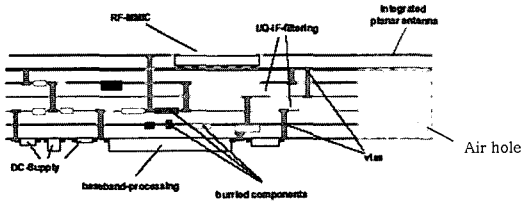
[14]. 동작 주파수는 29 GHz이며, 유전율 7.5, 전체 12 층으로 구성되며, 층당 100 um의 두께를 가지는 LTCC 기판을 사용하였다. 마지막 복사 소자에 신호를 급전하기 위하여 혼합 방식의 급전선을 사용하였는데, 굵게 표시된 부분이 laminated 도파관이며, 2×2 부 배열 안테나를 급전하기 위한 상층의 마이크로 스트립 전송선은 가는 선으로 표현되었다. 전체 12 층으로 구성된 기판에서 안테나를 위한 용도로 사용된 기판은 4층이며, 나머지 8층은 laminated 도파관을 형성하기 위하여 사용되었다.

이와 같은 급전 방식을 사용함으로써, 마이크로 스트립 전송선만 사용한 경우에 비하여 약 6 dB 정도의 성능 개선을 얻었다. 그리고, laminated 도파관을 금속 도파관과 연결하기 위하여 변환 회로를 LTCC

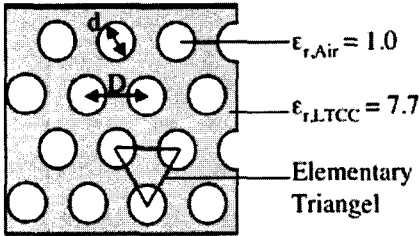
[그림 17] 혼합 급전 회로를 사용한 배열 안테나의 구조와 사진

기판에서 구현하였고, 제작된 LTCC 안테나를 [그림 17(b)]에 나타내었다. 안테나의 전체 크기는 12.7 cm × 12.7 cm이다. 이와 같은 급전 구조도 능동 소자와 하나의 패키지로 구현하기 위한 적합한 방법 중의 하나라고 할 수 있다.

앞에서도 언급했던 것처럼 LTCC는 높은 유전율 때문에 안테나의 기판으로 사용하기에는 부적합한 점이 있었다. 하지만, [그림 18]은 76.5 GHz에서 동작하는 antipodal 형태의 Vivaldi 안테나를 능동 소자들과 하나의 패키지로 구현한 내용이다^[15]. 따라서, antipodal 구조 만들 때, 위층에 있는 도체와 기판 속



(a) 76.5 GHz의 sensor의 구조



(b) Air hole을 이용한 유전율 변조를 위한 구조

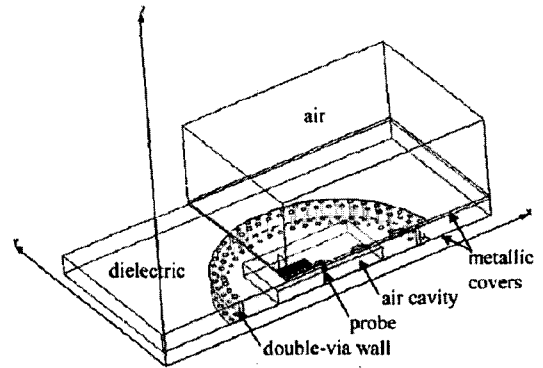
[그림 18] LTCC의 유전율 변조를 이용한 76.5 GHz sensor의 구현

에 있는 도체의 표면 전류가 유전율 차이가 커짐에 따라서 비대칭의 형태를 가지기 때문에, 안테나 복사 패턴의 왜곡이 발생한다. 이 문제를 해결하기 위하여, LTCC 기판에 air hole을 형성시킴으로써 등가적인 유효 유전율을 낮게 만들 수 있는 방법을 제안하였다. [그림 18(b)]는 LTCC에 정삼각형의 꼭지점에 위치하는 지름 d 와 중심 대 중심간 거리 D 를 가지는 원형의 air hole을 형성시킴으로써 유효 유전율을 식 (1)의 형태로 표현하였다.

$$\epsilon_{r,mod} = \epsilon_{r,LTCC} + \pi/2\sqrt{3}(1 - \epsilon_{r,LTCC})(d/D)^2 \quad (1)$$

따라서, 식 (1)로부터 $\epsilon_{r,mod}$ 는 $\epsilon_{r,LTCC}$ 보다 작은 값을 가질 수 있다. 하지만, LTCC 공정에서 air hole을 구현할 때, 기판의 구부러짐과 유전체 기판간의 접착력, 도체(paste)와의 접착력이 신뢰성을 가질 수 있는지는 면밀히 검토해 보아야 한다.

3.4 LTCC 발진기 및 주파수 합성 기술



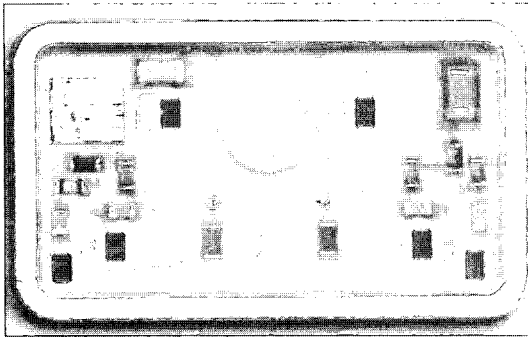
[그림 19] 타원형 공진기를 사용한 발진기 모듈 세부 구조

[그림 19]는 공진기의 크기를 줄이기 위하여 LTCC 기판 내에 비어 열을 이용해서 타원형의 캐비티형 공진기를 만들고 그 내부에 직육면체의 공기 캐비티 공간을 만들어 높은 Q 값을 가지는 공진기를 설계하고 이를 이용하여 구성한 발진기 구조를 나타낸 것으로, 24 GHz에서 $-100 \text{ dBc/Hz}@100 \text{ kHz}$ 의 저위상 잡음 특성을 얻었다고 한다^[16]. 증폭 소자는 MMIC를 사용하고 MMIC의 패키지 안에 설계된 공진기를 위치시킨 구조를 사용하고 있다. LTCC는 Ferro A6-S를 사용하였고 우수한 특성을 보이는 공진기이지만 순수 유전체 공진기보다는 크기가 크고 공진기 내부에 있는 공기 캐비티의 크기가 커서 소성 공정시 휨 현상이 발생할 가능성이 높다.

[그림 20]은 LTCC를 이용해서 설계 제작된 push-push 형태의 21.3 GHz의 DRO이다^[17]. Puck 형태의 유전체 공진기를 중간에 위치시키고 능동소자는 모두 배어 칩을 사용하였으며 LTCC를 모듈 패키지로도 사용하고 있다. LTCC는 Ferro A6를 사용하였으며, 위상 잡음 성능은 $-102 \text{ dBc/Hz}@100 \text{ kHz}$ 이다.

IV. 결 론

LTCC 기술을 이용하여 밀리미터파 대역에서 동



[그림 20] LTCC를 이용한 DRO의 제작 사진

작하는 SiP를 구현하기 위한 기술 및 응용 예에 대하여 살펴보고, 세부적으로 LTCC를 이용한 송수신 구성 부품의 구조 설계 기술 동향에 대하여 살펴보았다.

밀리미터파 대역의 응용을 위한 시스템의 구성 요소인 필터, 수직 transition, 안테나 및 발진기의 설계 동향을 살펴 보면서 LTCC 기술을 이용한 SiP 기술이 밀리미터파 대역에서도 적용될 수 있음을 확인할 수 있었다.

저 가격 패키지 구현을 위해 많은 재료들이 제안되고 있으며, 본 고에서 다루었던 세라믹 계열의 재료와 더불어 유기 재료를 이용한 연구도 함께 진행되고 있다. 따라서, 향후 신기술로서 유기 재료와 세라믹 재료를 융합시킨 새로운 재료의 출현도 기대되고 있다. 이와 같은 재료 기술과 공정 기술의 진보와 더불어 회로 설계 기술의 정확도가 높아지면, 밀리미터파 대역 응용 부품의 가격이 낮아지고 소형화가 가능한 시점이 빨라질 것으로 보여진다.

관련 학계, LTCC 공정 회사와 더불어 ETRI에서는 이러한 밀리미터파 이용 동향에 부응하고, 밀리미터파 이용 활성화를 도모하고자 2003년부터 국제 규격에 부합하는 차세대 BWA 주파수인 40 GHz 송수신 모듈의 개발을 시작으로 2007년까지 60 GHz 대 송수신 모듈 개발을 완료할 예정으로 있다.

MMIC 및 LTCC 관련 기술 개발의 결과로 밀리미터

파 송수신기의 저 가격화가 달성되면 가격에 대한 부담이 적어지고, 밀리미터파의 다양한 응용 분야가 창출되어 이용이 활성화될 수 있을 것이며, 3차원 SiP의 구현으로 소형화가 달성되면 휴대 이동 통신 용으로도 사용될 수 있을 것으로 예상된다.

참 고 문 헌

- [1] 김창주, 최재익, 송명선, 손수호, "전파 기술 동향", 정보통신 기술, 정책 및 산업 주간기술동향, 통권 1173호, pp. 26-39, 2004년 11월.
- [2] Broadway Deliverable, "WP0-D20 final project report", vol. 10, Feb. 2005.
- [3] 황희용, "LTCC 적층 필터 동향", 한국전자과학회지 전자과학기술, 14(3), pp. 50-57, 2003년 7월.
- [4] R. Kulke, G. Möllenbeck, W. Simon, A. Lauer, and M. Rittweger, "Point-to-multipoint transceiver in LTCC for 26 GHz", *IMAPS-Nordic*, Stockholm, 2002.
- [5] Young Chul Lee, Won-il Chang, and Chul Soon Park, "Monolithic LTCC SiP transmitter for 60 GHz wireless communication terminals", *IEEE MTT-S International Microwave Symposium Digest*, Jun. 2005.
- [6] K. Maruhashi, S. Kishimoto, M. Ito, K. Ohata, Y. Hamada, T. Morimoto, and H. Shimawaki, "Wireless uncompressed-HDTV-signal transmission system utilizing compact 60-GHz-band transmitter and receiver", *IEEE MTT-S International Microwave Symposium Digest*, Jun. 2005.
- [7] Min-Soo Kang, Bong-Su Kim, and Myung-Sun Song, "End coupled stripline BPF using LTCC in millimeter-wave", *ICMMT*, pp. 251-254, Aug. 2004.
- [8] V. Kondratyev, M. Lahti, and T. Jaakola, "On the design of LTCC filter for millimeter-waves", *IEEE*

- MIT-S International Microwave Symposium Digest*, vol. 3, pp. 1771-1773, Jun. 2003.
- [9] Rosine Valois, Dominique Baillargeat, Serge Verdeyme, Markku Lahti, and Tuomo Jaakola, "LTCC technology for 40 GHz bandpass waveguide filter", *IEEE MTT-S International Microwave Symposium Digest*, Jun. 2005.
- [10] H. Uchimura, T. Takenoshita, and M. Fujii, "Development of a laminated waveguide", *IEEE Transactions on MTT*, vol. 46, no. 12, Dec. 1998.
- [11] F. J. Schmuckle, A. Jentsch, W. Heinrich, J. Butz, and M. Spinnler, "LTCC as MCM Substrate: design of strip-line structures and flip-chip interconnects", *IEEE MTT-S International Microwave Symposium Digest*, vol. 3, pp. 1903-1906, May 2001.
- [12] 이재욱, "밀리미터파용 소형 안테나 기술", 한국전자과학회지 전자파기술, 16(2), pp. 32-46, 2005년 4월.
- [13] N. Shino, H. Uchimura, and K. Miyazato, "77 GHz band antenna array substrate for short range car radar", *IEEE MTT-S International Microwave Symposium Digest*, Jun. 2005.
- [14] Yong Huang, Ke-Li Wu, Da-Gang Fang, and M. Ehlert, "An integrated LTCC millimeter-wave planar array antenna with low-loss feeding network", *IEEE Trans. Antennas and Propagation*, vol. 53, no. 3, pp. 1232-1234, Mar. 2005.
- [15] K. Schuler, Y. Venot, and W. Wiesback, "Innovative material modulation for multilayer LTCC antenna design at 76.5 GHz in radar and communication applications", *33rd European Microwave Conference*, vol. 2, pp. 707-710, Oct. 2003.
- [16] Ayman M. El-Tager, "Study of cylindrical multilayered ceramic resonators with rectangular air cavity for low-phase noise Ka-band oscillators", *IEEE Transactions on MTT*, vol. 53, no. 6, Jun. 2005.
- [17] Graham Pearson, "An LTCC based differential microwave DRO module", *IEE seminar on Microwave Thick Film Materials and Circuits*, Oct. 2002.

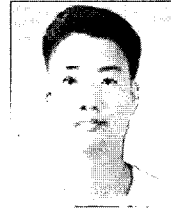
≡ 필자소개 ≡

송 명 선



1984년 2월: 충남대학교 전자공학과 (공학사)
1986년 2월: 충남대학교 전자공학과 (공학석사)
1986년 2월~현재: 한국전자통신연구원
디지털방송연구단 광대역 RF연구팀장
[주 관심분야] 초고주파 및 밀리미터파
회로 설계, 응용시스템 개발

김 봉 수



1999년 2월: 충남대학교 정보통신공학과 (공학사)
2001년 2월: 충남대학교 정보통신공학과 (공학석사)
2000년 12월~현재: 한국전자통신연구원
디지털방송연구단 연구원
[주 관심분야] 마이크로파 및 밀리미터
파 수동회로 해석 및 설계, 밀리미터파 RF/IF 시스템 분석

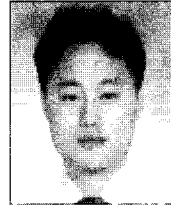
변 우 진



1992년 2월: 경북대학교 전자공학과 (공학사)
1995년 2월: KAIST 전기 및 전자공학과 (공학석사)
2000년 2월: KAIST 전기 및 전자공학과 (공학박사)
1999년 11월~2004년 8월: 삼성전기(주)

책임연구원
2004년 9월~현재: 한국전자통신연구원 디지털방송연구단 선임연구원
[주 관심분야] RF 송수신 시스템 설계, 전자파 수치해석, 밀리미터파 수동회로 및 안테나 설계

은 기 찬



2001년 2월: 전북대학교 전자공학과 (공학사)
2003년 8월: 한국정보통신대학교 전자공학과 (공학석사)
2003년 8월~현재: 한국전자통신연구원
디지털방송연구단 연구원
[주 관심분야] 마이크로파 및 밀리미터
파 수동 및 능동 회로 설계, 밀리미터파 RF 시스템 분석

김 광 선



1998년 2월: 경북대학교 전자공학과 (공학사)
2000년 2월: 경북대학교 전자공학과 (공학석사)
2000년 4월~현재: 한국전자통신연구원
디지털방송연구단 선임연구원
[주 관심분야] 마이크로파 및 밀리미터

파 발진기, PLL 설계, 밀리미터파 RF/IF 시스템 분석