

밀리미터파 SiP 응용을 위한 기생 공진 모드 억제

Suppression of Parasitic Resonance Modes for the Millimeter-Wave SiP Applications

이 영 철

Young-Chul Lee

요 약

본 논문에서는 저온 소성 세라믹(Low-Temperature Co-fired Ceramic: LTCC)에 기초한 밀리미터파 RF SiP(System-in-Package) 모듈 응용을 위하여, CBCPW(Conductor Backed CPW) 전송선과 스트립 라인 대역 통과 필터(BPF)에서 기생적으로 발생하는 공진 모드들과 40 GHz 전력 증폭기 모듈의 발진 현상을 분석하고 이를 제거하기 위한 방법들을 제안하였다. CBCPW 구조에서의 기생 구형 도파관(RWG) 모드는 비아의 간격을 줄여 공진 주파수를 높게 하여 동작 주파수 내에서 완전히 억제하였다. 스트립 라인 구조에서는 마주 보는 비아 중 한 쪽을 제거하여 대각선으로 비아를 배치함으로써 완전히 제거하였다. CBCPW의 마이크로스트립 패치 공진기 모드들을 제거하기 위하여, 갭을 통한 커플링을 감소시키기 위해 갭에 인접하게 비아를 배치하였다. 그 결과 기생 공진 모드들이 완전히 제거되었다. 40 GHz 대역의 능동 증폭기 모듈의 경우, 상호 연결(interconnection) 불연속 효과로 발생한 방사에 의한 인산 누설(cross talk)을 억제하기 위해, LTCC 기판 내부에 내장된 DC 전원 배선과 CPW 전송선의 고 격리 구조를 사용하여 발진 현상을 개선하였다.

Abstract

In this paper, parasitic resonance modes generated in a conductor backed coplanar wave guide(CBCPW) and stripline band pass filter(BPF) and the oscillation phenomena of a 40 GHz power amplifier module(PAM) are analyzed and several methods to suppress them are presented for low-temperature co-fired ceramic(LTCC) based millimeter-wave RF System-in-Package(SiP) applications. Parasitic rectangular wave guide(RWG) modes of the CBCPW structure are completely suppressed in the operation frequency band by decreasing the distance between its vias and by increasing the mode frequency. In the stripline structure, RWG resonance modes are clearly eliminated by removing some vias facing each other and by placing them diagonally. In the case of the 40 GHz PAM, in order to reduce a cross talk due to radiation that is generated from interconnection discontinuities, high isolation structures such as embedded DC bus lines and CPW signal lines are used and then the oscillated PAM is improved.

Key words : Unwanted Resonance, Rectangular Wave Guide, Parallel Plate Leakage(PPL), LTCC, SiP

I. 서 론

실시간 및 초고속 무선 데이터 전송에 대한 요구가 증가함에 따라 밀리미터파를 이용한 무선 랜^[1], 무선 IEEE 1394^[2], 멀티미디어 무선 시스템^[3]과 같은

광대역 무선 시스템의 실현이 가속화 되고 있다. 밀리미터파 무선 단말기의 구현을 위한 가장 중요한 문제점들 중에 하나는 RF 시스템의 초 소형화 및 저가격화이다. 이런 요구 사항에 부합하는 기술이 저온 소성 세라믹(Low-Temperature Co-fired Ceramic:

국립목포해양대학교 해양전자·통신공학부(Division of Marine Electronics and Communication, Mokpo National Maritime University)

· 논문 번호 : 20060712-077

· 수정완료일자 : 2006년 8월 29일

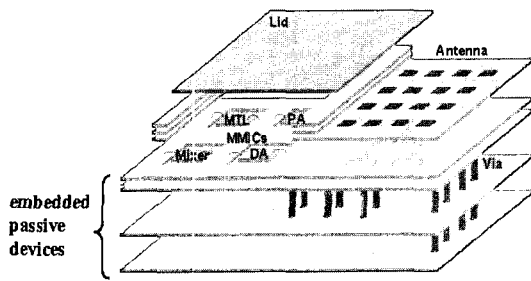


그림 1. 밀리미터파 SiP 모듈의 3차원 개념도
Fig. 1. 3D schematic view of a millimeter-wave SiP module.

LTCC)에 기초한 SiP(System-in-Package) 기술이다. 밀리미터파 대역에서 LTCC 기술은 저 손실, 높은 3차원 집적도, 저 가격화 특성이 있다.

최근에 LTCC 기술을 이용한 다양한 초고주파 회로 및 시스템들이 SiP 모듈로 구현되고 있다^{[4]~[6]}. 이런 SiP 모듈들은 구성 회로 및 부품들이 수직적으로 배치되고, 층간에 접지면들과 접지 비아들을 이용하여 회로 사이의 격리(isolation)와 상호 연결(interconnection)이 이루어진다. 그러나, 복잡한 3차원 구조에 의해 기생 공진기가 형성되고, 이들이 만들어낸 원하지 않는 기생 공진 모드들이 전송선의 신호 전송 억제^{[7],[8]}, 회로의 동작 방해, 그리고 능동 회로 모듈의 발진^[9]을 초래하게 된다.

본 논문에서는, 3차원 SiP 구조에서 기생적으로 만들어지는 기생 공진 모드들의 분석을 통해, CBCPW 전송선, 스트립 라인 필터, 그리고 전력 증폭기 모듈에서 기생 공진 모드 및 발진을 억제하는 방법들을 제안하고, 구현된 회로 및 모듈을 이용하여 이를 증명한다.

II. 밀리미터파 SiP

무선 송수신 회로가 단일 칩으로 구현된 RF 단말기가 RF 시스템 연구에서 궁극적인 목적이 될 수 있다. 그러나, 칩 또한 여전히 패키지에 집적되어야 하고, 게다가 반도체 기술로 집적화 할 수 없는 필터나 안테나를 집적화하기 위해서는 SiP 기술이 필수적이다.

그림 1은 밀리미터파 SiP 모듈의 3차원 개념도를 나타내고 있다. 능동 회로들이 LTCC 다층 회로에 집적되고, 모든 수동 회로 및 기능 회로들이 LTCC

기판 내부에 수직적으로 배치되어 모두 모듈 내에 집적되어진다. 신호선으로 마이크로 스트립 라인(microstrip line), 스트립 라인(stripline), 그리고 코플라나 도파관(CoPlanar Wave guide: CPW)과 같은 전송선들이 회로와 신호선의 사이의 천이(transition) 용이성, 차폐 정도 등에 따라 다양하게 이용된다. 각 층의 회로와 접지면들은 비아(via)를 이용하여 연결이 된다. 따라서 무선 단말기 내부에 집적될 수 있을 정도로 밀리미터 RF 시스템의 초 소형화가 가능하다.

제한된 공간에서 다양한 회로들과 이들의 상호 연결과 격리를 위한 접지면이나 비아에 의하여 다양한 기생 공진기가 형성된다. 격리를 위해 비교적 넓게 설계되는 접지면과 이와 연결된 비아가 SiP 내에서 구형 도파관이나 평행판 도파관을 형성하거나 넓은 접지면이 마이크로 스트립 패치 안테나와 같이 동작하는 기생 공진기를 형성하기도 한다^{[7],[8]}. 기생 공진기에서 발생하는 강한 공진 모드 신호들이 방사하여 자체 회로나 주위 회로의 동작에 치명적인 영향을 미친다. 능동회로의 경우, wire-bonding이나 상호 연결 불연속 효과로 인한 방사가 전원 배선이나 신호선으로 누설(cross talk)되어 발진을 일으키기도 한다^[9]. 그러나, 이런 공진이나 발진의 경우, 일반적인 3차원 simulator로 예측이 쉽지 않아 설계 단계에서 간과할 수 있다. 따라서, 이러한 여러 가지 기생공진모드나 발진의 억제를 위한 대책이 요구된다.

III. 기생 공진 모드 및 발진 억제

3-1 CBCPW 전송선

밀리미터파 응용에서 표면파나 기타 잡음으로부터 격리 특성이 우수하고 능동 회로와의 연결이 용이한 CBCPW(Conductor-Backed CPW)가 전송선으로 주로 사용된다. CBCPW는 그림 2와 같이 중앙의 신호선(W)을 사이에 슬롯 갭(G)을 두고 양쪽과 기판 밑면에 접지면을 가지고 있다. 상하부의 접지면들의 전위를 같게 하기 위하여 비아를 이용하여 상호 연결이 되어 있다.

이들 접지면과 비아들에 의하여 여러 가지 공진기가 기생적으로 형성된다. 상하부 접지면과 비아가

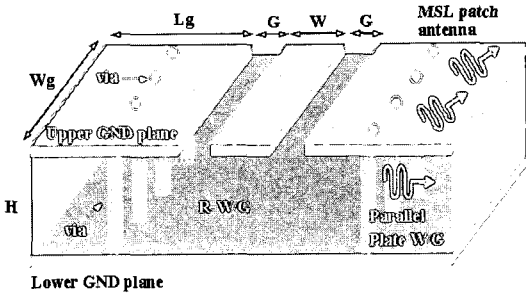


그림 2. Conductor-backed CPW(CBCPW)의 구조 및 기생 공진기
 Fig. 2. Structure of a conductor-backed CPW(CBCPW) and parasitic resonators.

기생 구형 도파관을 형성하고, 이에 따른 공진 주파수는 다음의 식 (1)과 같다^[10].

$$f_{cr} = \frac{1}{2D\sqrt{\mu_0 \epsilon_0 \epsilon_r}} \text{ [GHz]} \quad (1)$$

여기서, D 는 비아 사이의 간격, ϵ_0 과 μ_0 는 공기중의 유전율 및 투자율을 각각 나타내고, ϵ_r 은 기판의 비유전율을 나타낸다.

상하부 접지면을 연결한 비아는 주파수가 높아짐에 따라서, 비아의 자체 인덕턴스와 저항 성분에 의해 임피던스의 변화가 발생하고, 이로 인한 상하 접지면의 전위차가 존재한다. 따라서 상하부 접지면이 기생적으로 평행판 도파관과 마이크로 스트립 패치 안테나로 동작하게 된다. CBCPW에 입사된 신호는 진행 도중에 슬롯 갭(G)을 용량성 커플링 방법으로 평행판 도파관을 통해 진행하고, 기생 마이크로 스트립 패치 공진기를 통해 방사하게 된다. 이때의 방사 신호의 주파수는 다음의 식 (2)에 나타나 있다^[11].

$$f_r = \frac{c}{2 \cdot W_g} \left(\frac{\epsilon_r + 1}{2} \right)^{-1/2} \text{ [GHz]} \quad (2)$$

여기서, W_g 는 CBCPW의 길이를, c 는 광속을 나타낸다.

그림 3은 50 Ω의 특성 임피던스를 갖는 일반적인 LTCC CBCPW 전송선의 평면 구조를 나타낸다. 전송선의 길이는 3,260 μm, W 는 300 μm, G 는 150 μm이다. 기판의 높이는 400 μm, 비아 사이의 간격(D)은 1,620 μm이다.

LTCC 공정을 이용하여 그림 3의 CBCPW를 제작하였다. 기판의 비유전율은 7.8이며, 내부 및 외부 도

체는 Ag paste를 이용하여 제작되었다. 도체의 두께는 10 μm이다. 그림 4는 제작된 CBCPW의 전송 특성을 측정된 결과를 보여주고 있다. 19.5, 34, 그리고 39 GHz에서 신호의 손실이 매우 큰 것을 알 수 있다. 이러한 손실은 CBCPW 내에 기생적으로 만들어진 기생 공진기에 의한 것으로, 34 GHz에서의 공진은 비아와 상하부 접지면에 의한 구형 도파관에서 발생한 TE₁₀ 공진 모드이다. 19.5 GHz에서의 공진은 기생 마이크로 스트립 패치 공진기에 의한 공진이고, 39 GHz는 이의 고조파 성분이다. 따라서 이러한 강한 기생 공진 모드들에 의하여 신호의 전송이 억제됨을 알 수 있다. 따라서 사용하고자 하는 주파수 대역에서 이들 공진 모드들이 완전히 제거되어야 한다. 구형 도파관에 의한 공진은 비아 사이의 간격(D)을 줄여 공진 모드를 사용하고자 하는 주파수보다

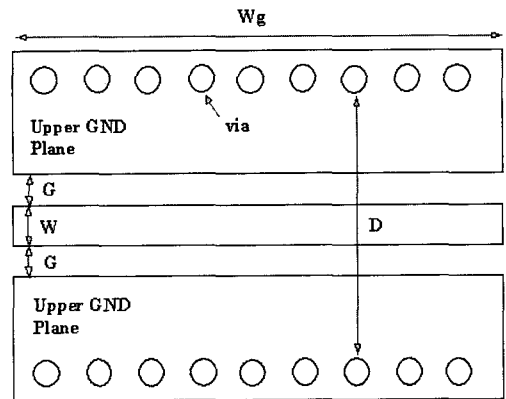


그림 3. CBCPW의 평면 구조
 Fig. 3. Planar structure of the CBCPW.

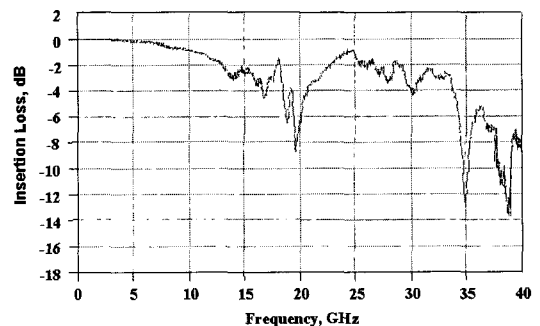


그림 4. LTCC CBCPW의 삽입 손실 특성 측정 결과
 Fig. 4. Measured insertion loss characteristics of the LTCC CBCPW.

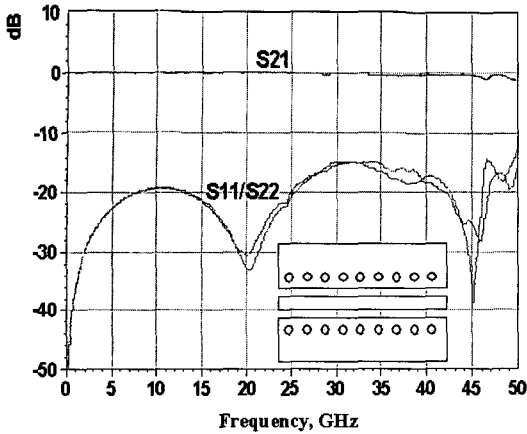


그림 5. 개선된 LTCC CBCPW 특성 측정 결과(삽입 그림: 개선된 LTCC CBCPW의 평면 구조)
 Fig. 5. Measured characteristics of the improved LTCC CBCPW(Inset: the planar structure of the improved LTCC CBCPW).

높게 함으로써 원하는 주파수 대역에서 억제할 수 있다. 마이크로 스트립 패치 공진기에 의한 방사는 CBCPW의 슬롯 갭(G)을 통한 용량성 커플링으로 누설된 신호가 평행판 도파관을 통하여 진행되는 것을 방지해야 하기 때문에, CBCPW의 슬롯 갭(G) 가까이 비아를 배치해서 용량성 커플링을 억제하여 개선할 수 있다.

그림 5는 개선된 LTCC CBCPW 전송선의 평면 구조와 이의 측정 결과를 나타내고 있다. 전송선 특성

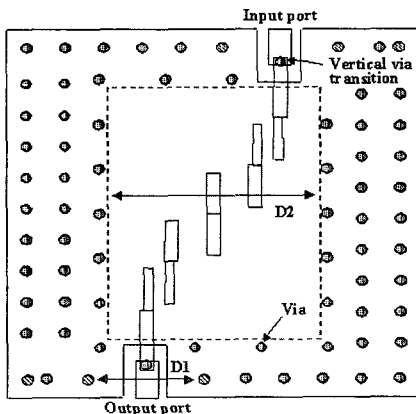


그림 6. 40 GHz 스트립 라인 대역 통과 필터의 평면 구조
 Fig. 6. Planar structure of the 40 GHz stripline BPF.

내의 삽입 그림은 개선된 LTCC CBCPW 전송선으로 via와의 간격(D)을 LTCC 공정과 설계 규칙을 고려하여 최대한으로 $1,620 \mu\text{m}$ 에서 $800 \mu\text{m}$ 로 감소시켰다. 이로 인한 공진 주파수는 34 GHz 에서 67 GHz 로 증가될 수 있다. 또한 원하는 동작 주파수 대역보다 높은 공진 주파수를 얻기 위해 기판의 높이나 CBCPW의 W 와 G 를 조정하여 간격을 더 줄일 수 있다. LTCC 공정 설계 규칙이 허용하는 최대 비아 사이 간격은 $350 \mu\text{m}$ 이다. CBCPW의 슬롯 갭을 통해 커플링된 신호가 접지 비아를 통해 다시 반환됨으로써 평행판 도파관을 통해 진행하지 못하기 때문에 마이크로 스트립 패치 공진기에 의한 19.5 GHz 와 39 GHz 에서의 공진은 완전히 제거되었다.

3-2 LTCC 스트립 라인 대역 통과 필터

스트립 라인은 일반적으로 기판의 내부에 전송선이 존재하고 그 위와 아래에 존재하는 접지면으로 구성되며, 접지면으로 차폐된 구조이기 때문에 외부 잡음이나 누설에 강한 고 격리 특성을 가지고 있다. 따라서 3D 구조의 SiP 내에 집적된 고 격리 회로를 설계하기에 적합하다.

그림 6은 40 GHz SiP 응용을 위해 설계된 41.8 GHz 의 중심 주파수를 갖는 3차 체비세프 LTCC 스트립 라인 대역 통과 필터의 평면 구조를 나타낸다. LTCC 기판의 두께는 $600 \mu\text{m}$ 이다. 기판의 $300 \mu\text{m}$ 위에 있는 필터 회로가 수직 비아 천이를 이용하여 $600 \mu\text{m}$ 위에 있는 CBCPW 입출력 단자와 연결되어 있다. 상하부 접지면의 연결을 위해 접지 비아들을 사용하였다. D_1 과 D_2 는 입출력 단자를 위한 CBCPW와 스트립 라인 필터 부분의 접지 비아 사이의 길이를 각각 나타내며, 기생적으로 만들어진 구형 도파관의 길이를 의미한다. D_1 에 의해 18 GHz 와 36 GHz 의 TE₁₀과 TE₂₀ 모드가 각각 발생할 수 있고, D_2 에 의해 48 GHz 의 TE₂₀ 공진 모드가 발생할 수 있다.

동일 LTCC 기판에 제작된 3개의 필터를 측정하였으며, 측정된 LTCC 스트립 라인 필터의 삽입 손실 특성을 그림 7에 나타내었다. 필터의 통과 대역과 주위에 기생 공진 모드들로 인해, 필터 특성이 열화되는 것을 알 수 있다. 식 (1)과 (2)에 의해 계산된

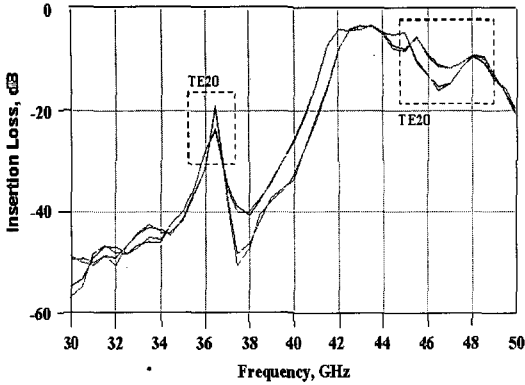


그림 7. 40 GHz 스트립 라인 대역 통과 필터의 열화 측정 결과
 Fig. 7. Measured degradation characteristics of the 40 GHz stripline BPF.

공진 모드 결과와 거의 근접한 주파수에서 공진이 발생하였다.

그림 8은 LTCC 스트립 라인 필터의 기생 공진 모드들에 의한 열화 특성을 개선하기 위해, 제안되고 제작된 필터의 x-ray 사진을 나타내고 있다. D_1 도파관에 의한 공진을 필터의 통과 대역 내에서 제거하기 위해, D_1 을 1.15 mm에서 700 μ m로 감소시켜, 이로 인한 TE₁₀ 모드가 73 GHz로 필터의 동작 주파수보다 높아지게 설계하였다. D_2 의 경우, 필터 양단의 비아들 중 한 쪽의 비아를 제거함으로써 원천적으로 구형 도파관 공진기가 기생적으로 발생하지 않게 하여 48 GHz의 공진 모드를 완전히 제거하였다. 그림 9는 제작된 필터의 특성을 측정한 결과를 나타내고 있다. 이전에 나타났던 여러 가지 기생 공진 모드들이 완전히 제거되어 필터가 성공적으로 동작하고 있음을 알 수 있다. 측정된 필터의 삽입 손실은 41.8 GHz에서 1.7 dB이고 통과 대역에서의 반사 손실은 -10.2 dB이다.

3-3 전력 증폭기 LTCC 모듈

RF 시스템의 능동 회로를 SiP 모듈에 집적화하기 위해 wire-bonding, 천이^[12], 손실, 그리고 발진(oscillation) 등 여러 가지 해결할 문제점들이 있다. 이 중에서도 발진은 모듈의 성공적인 동작 측면에서 매우 중요한 문제이며, 연결 불연속 효과, 피드백(feed-

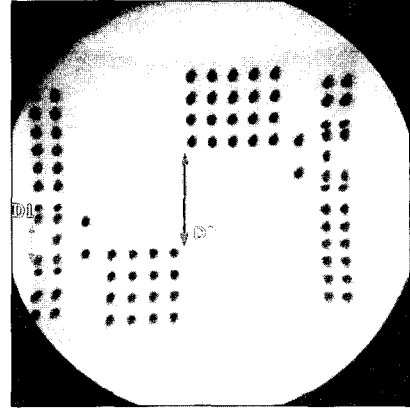


그림 8. 기생 공진 모드들이 없는 제작된 40 GHz LTCC stripline BPF의 x-ray 사진
 Fig. 8. X-ray photography of the fabricated 40 GHz LTCC stripline BPF, which has no parasitic resonance modes.

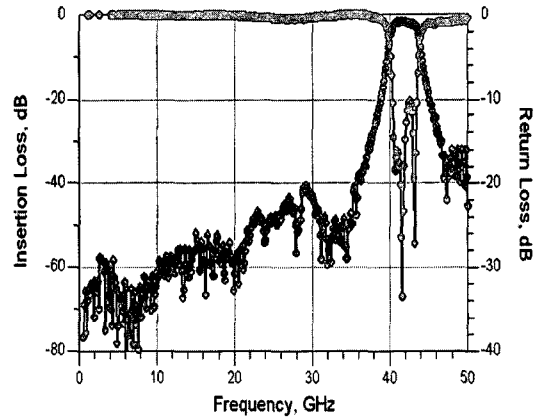


그림 9. 40 GHz LTCC 스트립 라인 필터의 측정 결과
 Fig. 9. Measured results of the 40 GHz stripline BPF.

back), 누설(cross talk) 등 다양한 원인에서 발생하지만 정확하게 정량적으로 분석하기는 매우 어려운 일이다^[9]. 밀리미터파 모듈의 경우, 일반적으로 wire-bonding 이나 연결 불연속 효과, 또는 기판에서의 기생 공진 모드들에 의해 발생한 방사 신호가 누설이나 어떤 경로를 통해 피드백 되어 능동회로의 안정도를 열화시켜 발생한다^[9]. 따라서, 이러한 발진 특성은 누설 경로 역할을 하는 전원이나 신호선을 차폐시키고 고 격리 신호선을 사용하고 격리 3차원 모듈 구조를 이용하여 개선할 수 있다.

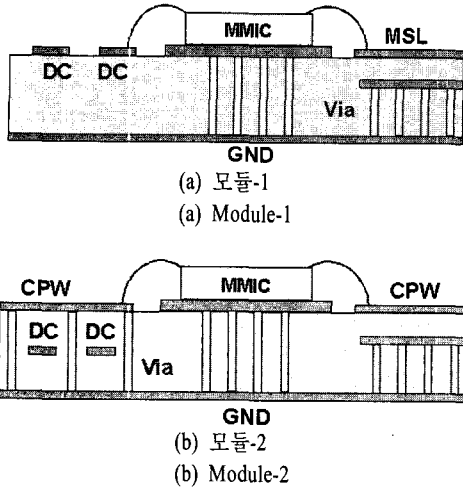


그림 10. 40 GHz LTCC 전력 증폭기 모듈의 단면 구조
Fig. 10. Cross sectional structure of the 40 GHz LTCC power amplifier module.

그림 10은 40 GHz 전력 증폭기 MMIC(Microwave Monolithic Integrated Circuit)를 LTCC 기판 위에 실장하여 모듈화 하기 위한 LTCC 전력 증폭기 모듈의 단면을 나타내고 있다.

모듈-1은 신호선으로 마이크로 스트립 라인(MSL)을 사용하였고, DC 전원을 위한 배선이 기판 위에 노출되어 있다. 전체 LTCC 기판의 높이는 $600\ \mu\text{m}$ 이고 마이크로 스트립 라인의 기판 높이와 넓이는 각각 $200\ \mu\text{m}$ 과 $240\ \mu\text{m}$ 이다. 모듈-2는 신호선으로 격리 특성이 우수한 CBCPW 전송선을 사용하였고, 전원 공급을 위한 배선을 모두 LTCC 기판 내부에 내장 시키고 접지 비아로 차폐시켰다. 기판의 높이는 모듈-1과 동일하고, CBCPW의 폭(W)과 갭(G)은 각각 $200, 177\ \mu\text{m}$ 이다. 설계된 모듈을 LTCC 공정을 이용하여 제작하여 그 특성을 측정하였다.

그림 11은 제작된 모듈-2(삽입 그림)의 사진과 전력 증폭기 MMIC, 모듈-1, 그리고 모듈-2의 삽입 손실을 측정하여 나타내었다. 모듈-1의 경우 발진으로 증폭기로 동작하지 못하는 것을 알 수가 있다. 이는 wire-bonding이나 연결 천이의 불연속에서 발생한 방사 신호가 DC 전원 배선이나, 표면파 형태로 기판 위 마이크로 스트립 라인으로 전파되어 증폭기 모듈의 안정도를 낮추어 발생한 것으로 판단된다. 이를 개선하기 위한 모듈-2는 그림에서처럼 정상적으로 동작하여 18 dB의 이득을 나타내고 있다. 이것은 LT-

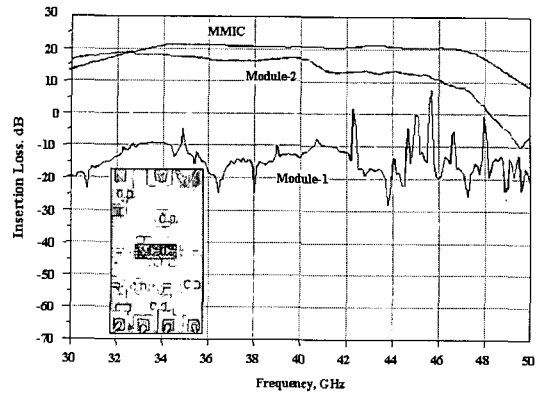


그림 11. 전력 증폭기 MMIC와 제작된 모듈의 측정 결과(삽입 그림: 제작된 전력 증폭기 모듈)
Fig. 11. Measured results of the power amplifier MMIC and fabricated modules(Inset: the fabricated power amplifier module).

CC 기판 내부에 내장된 DC 전원 배선과 CBCPW가 방사된 신호로부터 완전히 격리되었기 때문이다. Wire-bonding이나 상호 연결에서 발생한 손실로 인해 MMIC에서 보다 손실이 2~3 dB 발생하였다.

IV. 결 론

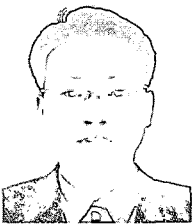
본 논문에서는 저온 소성 세라믹(Low-Temperature Co-fired Ceramic: LTCC)에 기초한 밀리미터파 RF System-in-Package(SiP) 응용을 위하여, 3차원 구조에서 기생적으로 만들어지는 구형 도파관 및 마이크로 스트립 패치 안테나 모드와 전력 증폭기 모듈의 발진현상을 분석하고 이의 억제 방법들을 제안하였다. 구형 도파관 모드들은 CBCPW와 스트립 라인 구조에서 접지 비아와 상하 접지면에 의해 기생적으로 발생하며, CBCPW 구조의 경우 접지 비아 사이의 간격을 줄임으로써 공진 주파수를 소자의 동작 주파수보다 높게 하여 제거할 수 있고, 스트립 라인 필터의 경우 필터 양단의 비아들 중 한 쪽의 비아를 제거함으로써 기생 구형 도파관이 형성을 차단하였다. 마이크로 스트립 패치 안테나 모드들은 CBCPW의 슬롯 갭 가까이에 접지 비아를 배치하여 용량성 커플링을 감소시킴으로써 제거하였다. 40 GHz 전력 증폭기 모듈의 경우, 불연속으로 인한 방사 신호가 누설이나 표면파 형태의 진행을 억제하기 위해, DC 전원 공급을 위한 전원 배선을 모듈 기판 내부에 완

전히 내장시키고, 고 격리 신호 전송을 위해 CB-CPW 전송선을 사용하여 발진을 제거하였다.

참 고 문 헌

- [1] T. Ninomiya, T. Saito, Y. Ohashi, and H. Yatsuka, "60 GHz transceiver for high-speed wireless LAN system", *IEEE MTT-S International Microwave Symposium Digest*, pp. 1171-1174, Jun. 1996.
- [2] K. Ohata, K. Maruhashi, J. Matsuda, M. Ito, W. Domon, and S. Yamazaki, "A 500 Mbps 60 GHz-band transceiver for IEEE 1394 wireless home networks", *Proc. 2000 European Microwave Conference*, vol. 1, pp. 289-292, Oct. 2000.
- [3] Mike Goddard, "Strategy for the future use of the radio spectrum in the UK 2002", UK Spectrum Strategy, 2002.
- [4] Y. C. Lee, W. I. Chang, Y. H. Cho, and C. S. Park, "A very compact 60 GHz transmitter integrating GaAs MMICs on LTCC passive circuits for wireless terminals applications", *26th IEEE Compound Semiconductor Integrated Circuits Symposium Digest*, pp. 313-316, 2004.
- [5] Chang-Ho Lee, Albert Sutono, Sangwoo Han, and Kyutae Lim, Stephane Pinel, Emmanouil M. Tenzleris, and Joy Laskar, "A compact LTCC-based Ku-band transmitter module", *IEEE Trans. Advanced Packaging*, vol. 25, no. 3, pp. 374-381, Aug. 2002.
- [6] K. Ohata, K. Maruhashi, M. Ito, S. Kishimoto, K. Ikuina, T. Hashiguchi, K. Ikeda, and N. Takahashi, "1.25 Gbps wireless gigabit ethernet link at 60 GHz-band", *IEEE MTT-S International Microwave Symposium Digest*, vol. 1, pp. 373-376, Jun. 2003.
- [7] William H. Haydl, "Resonance phenomena and power loss in conductor-backed coplanar structures", *IEEE Microwave and Guided Wave Letter*, vol. 20, no. 12, pp. 514-516, 2000.
- [8] Nirod K. Das, "Methods of suppression or avoidance of parallel-plate power leakage from conductor-backed transmission lines", *IEEE Trans. on Microwave Theory and Techniques*, vol. 44, no. 2, pp. 169-181, 1996.
- [9] T. Krems et al., "Avoiding cross talk and feedback effects in packaging coplanar millimeter-wave circuits", *IEEE MTT-S International Microwave Symposium Digest*, pp. 1091-1094, 1998.
- [10] David M. Pozar, *Microwave Engineering*, John Wiley & Sons, 1998.
- [11] I. J. Bahl, P. Bhartia, *Microstrip Antenna*, Artech House, 1982.
- [12] F. J. Schmuckle, A. Jentzsch, W. Heinrich, J. Butz, and M. Spinnler, "LTCC as MCM substrate: design of strip-line structures and flip-chip interconnections", *IEEE MTT-S International Microwave Symposium Digest*, vol. 3, pp. 1093-1096, 2001.

이 영 철



1995년 2월: 영남대학교 전자공학과 (공학사)
 1997년 8월: 영남대학교 전자공학과 (공학석사)
 1997년~2000년: 하이닉스반도체 DRAM 연구소 주임연구원
 2005년 2월: 한국정보통신대학교 공학부 (공학박사)

2005년 3월~현재: 국립목포해양대학교 해양전자통신공학부 전임강사

[주 관심분야] 밀리미터파회로 및 시스템, LTCC SiP, reconfigurable RFICs