

연성 인쇄 회로 기판을 이용한 초고주파 MEMS 송신기 연구

A RF MEMS Transmitter Based on Flexible Printed Circuit Boards

명성식 · 김선일 · 정주용 · 육종관

Seong-Sik Myoung · Seon-Il Kim · Joo-Yong Jung · Jong-Gwan Yook

요 약

본 논문에서는 멤스 기술의 하나인 연성 인쇄 회로 기판을 이용하여 임의의 형태로 변형이 가능한 초고주파 멤스 송신기를 제안하였다. 연성 인쇄 회로 기판은 그 무게가 가볍고 두께가 얇아 경량 소형화 모듈을 만드는데 유리한 장점이 있다. 또한, 연성 인쇄 회로 기판은 종이와 같이 유연한 특성을 가지고 있어 평면이 아닌 임의의 곡면 등에 실장할 수 있는 장점을 가지고 있다. 본 논문에서는 근거리 센서 네트워크 구성을 위한 직교 주파수 분할 다중 전송 방식을 위한 선형 무선 송신기를 설계 제작하였다. 송신 모듈의 능동 회로는 전력효율이 높고 선형성이 우수하여 전력 증폭기에 많이 사용되고 있는 InGaP/GaAs HBT 공정을 사용하여 설계 및 제작하였으며, 매칭 회로 및 필터 등의 수동 회로는 연성 인쇄 회로 기판에 직접 집적화하여 제작하였다. 제작된 멤스 송신기는 EVM 특성을 통하여 시스템 성능을 분석하였다.

Abstract

This paper presents the flexible MEMS transmitter based on flexible printed circuit board or FPCB, which can be transformed to arbitrary shape. The FPCB is suitable to fabricate light weight and small size modules with the help of its thin thickness. Moreover a module based on FPCB can be attached on the arbitrary curved surface due to its flexible enough to be rolled up like paper. In this paper, the flexible MEMS transmitter integrated on FPCB for a short-distance sensor network which is based on orthogonal frequency division multiplexing(OFDM) communication system is proposed. The active device of the proposed flexible MEMS transmitter is fabricated on InGaP/GaAs HBT process which has been used for power amplifier design to take advantages of high linear and high efficient characteristics. Moreover, the passive devices such as the filter and signal lines are integrated and fabricated on the FPCB board. The performance of the fabricated flexible MEMS transmitter is analyzed with EVM characteristics of the output signal.

Key words : Flexible Printed Circuit Board, Micro-Electro-Mechanical System, InGaP/GaAs HBT, Transmitter, Orthogonal Frequency Division Multiplexing, Integration

I. 서 론

멤스(Micro-Electro-Mechanical Systems: MEMS) 기술은 기존에 반도체 기술에 기반하여 미세한 회로나 소자를 만드는 기술로 발전하여 왔다. 이러한 미세 기술은 반도체 기술의 발달로 인하여 최근 90 nm 선

폭이나 60 nm 선폭의 극단적으로 미세한 가공 기술로 발전하여, 오늘날 어떠한 소자나 시스템을 가능한 한 작게 구현하고자 하는 것은 매우 자연스러운 일이 되었다. 이러한 소형화는 단순한 물리적 크기의 축소뿐만 아니라 단일 소자에 대해 보다 많은 기능을 포함시키고자 하는 노력으로 이어졌다. 멤스

연세대학교 전기전자공학과(Dept. of Electrical and Electronic Engineering, Yonsei University)

· 논문 번호 : 20071205-139

· 수정완료일자 : 2008년 1월 2일

기술 또한 미세한 소자 가공 기술을 기반으로 한 다양한 기능을 갖는 기술로 발전하였으며, 최근 관심을 받고 있는 멤스 기술 중의 하나가 기계적 유연성 (mechanical flexibility)을 갖는 회로 가공 기술이다^[1]. 연성 회로 가공 기술은 착용 시스템(wearable systems) 등을 구현함에 있어 필수적인 기술로 기존의 실리콘 기판을 이용한 일반적인 반도체 가공 기술로는 구현할 수 없는 기술이다. 연성 인쇄 회로 기판 (Flexible Printed Circuit Boards: FPCB)은 기존의 일반적인 인쇄 회로 기판에 비하여, 그 무게가 가볍고 두께가 얇아 경량 소형화 모듈을 만드는데 유리한 장점이 있다. 또한, 연성 인쇄 회로 기판은 종이와 같이 유연한 특성을 가지고 있어 평면이 아닌 임의의 곡면 등에 실장할 수 있는 장점을 가지고 있어 다양한 형태로 응용이 가능하다는 장점이 있다. 이러한 연성 회로 가공 기술은 주로 압력 센서 연구에 많이 응용되어 왔으며^{[2][3]}, 최근의 착용 시스템(wearable system) 구현을 위한 필수 기술로 주목을 받고 있다^[4].

하지만 FPCB는 얇은 두께와 유연성으로 인해 제작이 어렵고, 특히 고주파 대역에서 안정적인 손실이 적은 FPCB 기판 소재의 개발이 어렵다는 단점이 있다. 이러한 문제로 인해 기존의 연구된 연성 소자들은 대부분 수 MHz 또는, 수 십 MHz 대에서 동작하는 단일 회로 차원에서 개발되었다. 본 논문에서는 미세 가공 기술인 MEMS 기술을 이용하여 고주파 특성이 우수한 polyimide(PI)와 teflon을 유전체로 이용하여 기판을 구성한 다음, 5 GHz 대에서 동작하는 초고주파 송신 모듈을 개발하였으며, 연성 소자를 이용하여 초고주파 대역에서 모듈 형태로 제작된 바는 처음이다. 본 논문에서는 능동 회로는 선형성이 우수한 InGaP/GaAs HBT 소자를 이용하여 MMIC(Monolithic Microwave Integrated Circuit)로 제작하였으며, 필터 및 신호 전송을 위한 전송 선로는 FPCB에 집적화된 형태로 제작하였다. 이러한 수동 소자 등이 미세 멤스 공정으로 기판에 집적화된 형태로 제작됨으로 인하여, 칩 스케일 패키징(Chip Scale Packaging: CSP)을 구현하였다.

II. 회로 설계

본 논문에서 제안한 멤스 송신기는 InGaP/GaAs

표 1. OFDM 시스템 파라미터

Table 1. The parameters of the OFDM system.

| FFT size | Subcarrier | Null subcarrier | Guard interval duration |
|-----------------|---------------|------------------|-------------------------|
| 64 | 52 | 12 | 4.8 μ sec |
| IFFT/FFT period | Symbol period | Subcarrier space | Channel bandwidth |
| 19.2 μ sec | 24 μ sec | 52.083 kHz | 3.333 MHz |

HBT MMIC 공정에 기반한 능동 회로와 멤스 FPCB 가공 기술을 이용한 기판과 기판에 집적화된 수동 회로로 구성되어 있다. 본 논문에서 제안한 능동 회로는 근거리 센서 네트워크를 구성하기 위한 목적으로 설계되었으며, OFDM 통신 시스템에 기반하고 있다. OFDM 통신 시스템은 침투 대 평균 전력비 (Peak to Average Power Ratio: PAPR)가 커 높은 선형 특성을 요구한다. 본 연구에서는 근거리 센서 네트워크에 응용 가능한 멤스 송신기를 목표로 설계되었으며, 시스템의 데이터율은 2 Mbps, QPSK 변조에 1/2 길쌈 부호를 사용한다. 자세한 OFDM 파라미터는 표 1에 정리되어 있다.

본 연구에서 제안한 FPCB MEMS 송신기는 상향 변환 주파수 변환기, 대역 통과 여파기, 그리고 전력 증폭기로 구성되어 있다. 주파수 변환기와 전력 증폭기는 MMIC는 (주)나리지온사의 상용 InGaP/GaAs HBT 공정을 이용하여 제작하였다. InGaP/GaAs HBT 소자는 수직 구조를 이용하여 기생 캐패시턴스가 적고, 이로 인하여 기생 캐패시턴스에서 발생하는 비선형 특성의 감소로 선형성이 우수하다는 장점이 있다^{[5][6]}. FPCB 기판은 두 가지 재질을 이용하여 구현하였다. 첫 번째는 PI 재질의 웨이퍼를 이용하여 FPCB 기판을 제작하였다. PI는 기존의 Kapton 등의 저주파용 재질에 비하여 고주파 손실 특성이 우수하며, 우수한 유연성을 갖는다는 장점이 있다. 두 번째는 상용 Teflon 유전체 위에 멤스 공정을 이용하여 그 위에 필터 및 매칭 회로 등의 수동 회로를 제작하였다. 제안된 송신기의 블록도는 그림 1과 같으며, 각 소자의 주요 요구 규격은 표 2에 정리되어 있다.

2-1 전력 증폭기

표 2. 회로 설계 규격

Table 2. The specifications of each circuis.

| Up Conversion Mixer | | | |
|------------------------|--------------------|------------------------|-------------------------|
| IF frequency [MHz] | RF frequency [GHz] | Conversion gain [dB] | P1dB [dBm] |
| 520 | 5.2 | 5 | -5 |
| RF Band Pass Filter | | | |
| Center frequency [GHz] | Bandwidth [MHz] | Order | Return loss [dB] |
| 5.2 | 520 | 3 | -15 |
| Power Amplifier | | | |
| Gain [dB] | P1dB [dBm] | Input return loss [dB] | Output return loss [dB] |
| 30 | 20 | -15 | -10 |

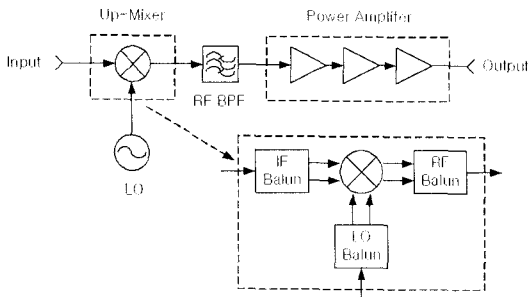


그림 1. 시스템 블록도

Fig. 1. The block diagram of the proposed FPCB transmitter.

전력 증폭기는 상용 2 마이크로미터 길이를 갖는 InGaP/GaAs HBT 공정을 이용하여 설계되었다. 본 연구에서는 충분한 출력 전력을 얻기 위해 2 마이크로미터 길이에 폭이 20 마이크로미터의 핑거 개수가 2개인 HL_F2x2x20 모델을 다수를 연결하여 파워 셀을 설계하여 사용하였으며, 파워 셀은 HL_F2x2x20 소자를 32개로 병렬로 연결하여 설계하였다. 셀을 설계 시 베이스 입력 라인과 콜렉터 출력 라인을 멀리 하여 피드백을 줄였으며, 에미터에 약간의 도체 라인을 삽입하여 소자의 trans-conductance g_m 을 de-generation하여 선형 특성을 개선할 수 있게 설계하였다. 또한, HBT 소자는 일반적인 BJT 계열의 트랜지스터에서 발생하는 열 발산(thermal runaway) 현상이 발생하기 쉬우므로, 열 안정도를 개선하기 위하여 발라스트 저항을 베이스 입력단에 250 옴의 저항을 병렬로 연결하여 설계하였다. 또한, 충분한 이득을 얻기 위해 전력 증폭기를 3단으로 구현



그림 2. 제작된 전력 증폭기 사진

Fig. 2. The photograph of the fabricated power amplifier.

하였다. 각 단의 매칭 회로는 로드풀 시뮬레이션을 통해 결정된 임피던스 값으로 매칭하여 최대 전력이 출력될 수 있게 디자인하였다. 매칭 회로는 입출력 단 및 중간 정합 회로(inter-stage matching circuit) 모두 온칩 상에 구현하였다. 제작된 MMIC 칩의 크기는 $0.9 \times 2.5 \text{ mm}^2$ 의 크기를 가지며, 칩의 사진은 그림 2와 같다.

2-2 주파수 변환기

상향 변환 주파수 변환기는 높은 선형성과 우수한 LO-RF 격리도를 얻기 위하여 이중 평형 구조를 이용하였다. 주파수 혼합기의 코어 회로는 Gilbert-cell 구조이며, 이중 평형 구조를 위한 별론의 구현은 선형성을 고려하여 IF와 LO 별론은 차동 증폭기를 이용 능동 형태로, RF 별론은 수동 형태의 별론인 LC 진류 결합기가 사용되었다. LC 진류 결합기는 두 개의 인덕터와 하나의 캐패시터가 부하로 구성되어 있

다. LC current combiner 기법은 A. K. Wong 등에 의해 제안된 방법으로, 그것의 공진 주파수에서 출력 전류가 두 배가 되는 원리를 이용한 것이다⁷⁾. 그러나 이 원리는 이상적인 소자를 사용했을 때를 가정한 것으로 인덕터의 Q값에 낮으면 이상적인 current doubling이 되지 않는 단점이 있다. 일반적으로 높은 주파수에서 on-chip 인덕터의 Q값은 매우 낮아 전체 회로의 성능을 감소시키는 주요 요소이며, 때문에 current combiner는 지금까지 주파수 하향 혼합기에서만 주로 사용되어왔다⁸⁾. 본 논문에서는 RF 주파수에서 17 이상의 Q값을 갖는 on-chip 인덕터를 사용하였다. 사용된 인덕터는 air bridge 형태로 공중에 떠 있으며, air bridge post 아래에는 기판에 의한 손실을 최소화하기 위해 절연 물질이 삽입되었다. 이는 기존 Si 공정에서 보다 매우 높은 값으로 매우 효율적인 current doubling을 가능하게 한다. LC current combiner는 그 선형적인 동작 원리로 인하여 전체 회로의 선형성 향상에 유리하며, 동시에 추가적인 전류를 소모하지 않는다. 제작된 주파수 변환기의 사진은 그림 3과 같으며, 전체 chip의 사이즈는 $1 \times 1.17 \text{ mm}^2$ 이다.

2-3 MEMS 필터와 기판

멤스 필터는 PI 기반의 필터와 Teflon 기반의 두 가지 형태로 제작하였다. PI 기반의 필터는 일반적인 평행 결합 선로 필터의 크기를 소형화 및 효율적

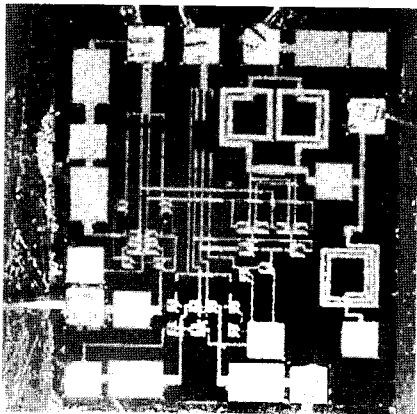


그림 3. 제작된 주파수 상향 혼합기
Fig. 3. The photograph of the fabricated frequency mixer.

인 공간 활용을 위하여 다층 구조를 이용하여 설계하였다. 기존의 공진기를 다층 구조로 배열하는 필터⁹⁾에서와 달리 공진기의 구부러 면적을 효율적으로 사용하였으며, 구부러짐으로 발생하는 기생 효과를 적절하게 상쇄시켰다.

설계된 필터는 PI를 유전체로 하는 기판에 멤스 공정을 이용하여 제작되었다. 본 연구에서는 실리콘 기판 또한 연성을 갖게 하는 연구를 진행하였다. 따라서 필요한 경우, 제작된 필터는 실리콘 웨이퍼에서 떼어내어 단독으로 사용될 수 있으며, 다른 경우에는 실리콘 웨이퍼와 함께 부착된 상태에서도 연성을 갖는 특성을 갖는다. 이러한 패키징 기술의 핵심의 하나는 실리콘 칩 자체를 유연하게 만드는 데에 있다. 일반적인 경우, 실리콘 칩은 $300 \mu\text{m}$ 정도의 두께를 갖는데, 이러한 상태에서 실리콘은 재료 자체의 취성 때문에 기계적 변형을 가하는 것이 불가능하다. 그러나 실리콘의 두께가 $30 \mu\text{m}$ 이하로 얇아지면 유연성을 확보하게 되어 많은 기계적 변형을 탄성 영역에서 극복할 수 있다. 이에 본 연구에서는 표면 손상의 가능성을 배제한 상태에서 $30 \mu\text{m}$ 이하의 실리콘 칩을 구현하기 위해 화학적 thinning 방법을 이용하여 그림 4와 같이 충분히 굽힘이 가능한 얇은 실리콘 웨이퍼/칩을 구현하였다.

두께 $30 \mu\text{m}$ 이하의 초박형 실리콘을 구현하는데 있어 가장 중요한 문제는 집적 회로가 형성된 웨이퍼의 전면(front side)에 대한 보호에 있다. 일반적으로 웨이퍼의 전면에 대한 보호는 왁스를 사용하여

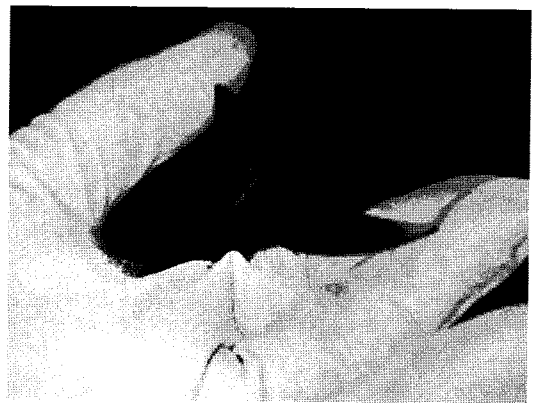


그림 4. 유연성을 갖는 실리콘 기판
Fig. 4. The fabricated flexible silicon wafer.

다른 웨이퍼에 붙임으로써 이루어진다. 그러나 이러한 방법은 왁스에 의해 전면에 있는 집적 회로가 오염될 수 있기 때문에 별도의 세정 작업(cleaning)을 거쳐야 한다. 최근 이러한 문제들을 극복하기 위하여 특정 온도에서 접착력이 없어지는 열 박리 테이프(thermal release tape)를 사용한 방법이 개발되었다. 이러한 방식은 웨이퍼의 전면을 식각액을 비롯한 오염 물질로부터 완전히 보호할 수 있을 뿐만 아니라 이후 이어지는 공정에 있어서 취급 역시 매우 용이하다는 장점을 가지고 있다.

웨이퍼 전면에 대한 보호와 함께 또 다른 문제는 웨이퍼의 다이싱(dicing)에 있다. 실리콘의 파단 강도는 표면 상태에 매우 의존적이기 때문에 일반적인 다이아몬드 톱을 이용한 다이싱의 경우, 소자의 강도를 저하시킬 우려가 있다. 이러한 문제를 극복하기 위하여 thinning을 진행하기 전에 웨이퍼의 전면에 미리 다이싱을 위한 홈(groove)을 형성하는 방법을 이용하였다. 실리콘의 식각은 20% 농도의 TMAH 용액을 통해 100~110 °C 사이의 온도에서 진행되었으며, 80 μm/hr 정도의 식각률을 얻을 수 있었다. 이렇게 제작된 웨이퍼 위에 PI를 spin coating하여 필터에 사용되는 유전체를 생성한다. 유전체로 사용되는 PI는 HD Microsystems사의 PI2611을 사용했다. PI는 종류에 따라서 한 번 spin coating시에 올라가는 최대 최소 두께가 다르다. PI2611은 한 번 spin coating시 spin speed에 따라서 최대 11 μm, 최소 3 μm의 두께로 coating이 된다. 따라서 유전체를 27 μm 두께로 만들기 위해서는 여러 번 spin coating을 해야 한다. 가장 두께가 두꺼우면서도 PI film의 균일한 분포를 위하여 첫 번째 단계는 800 rpm/25 sec, 두 번째 단계는 1,500 rpm/70 sec로 spin coating하였다. 본 연구에서는 총 3번의 spin coating을 통해서 27 μm 두께의 PI 필름을 얻을 수 있었다. 이후 PI를 오븐에 가열하여 최종적으로 유전체를 생성한 후 Ti/Cu를 증착하여 금속면을 만들고, 감광과 식각 과정을 거쳐 최종적인 필터를 제작하였다. 제작된 필터는 실리콘 기판에서 그림 5와 같이 핀셋을 이용하여 떼어낸 후, 적절한 크기로 잘라 사용이 가능하다. 제작된 필터는 그림 5에 보이는 바와 같이 뛰어난 유연성을 가지고 있다.



그림 5. 제작된 PI 필터의 분리
Fig. 5. Release of the fabricated PI filter.

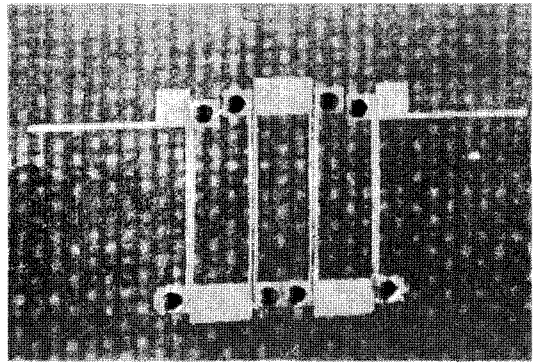


그림 6. 제작된 Teflon 기반의 필터
Fig. 6. The photograph of the fabricated Teflon filter.

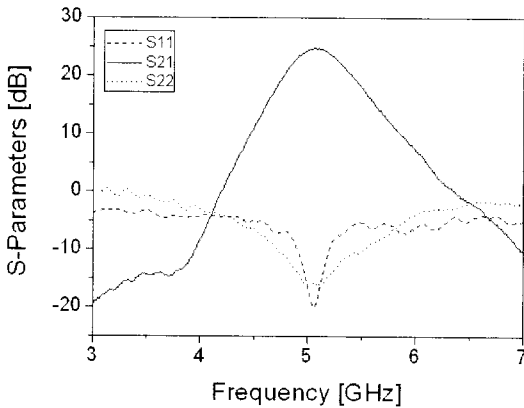
Teflon 기판에 제작된 필터는 평행 결합 선로 필터를 기반으로 집중 소자를 이용한 소형화 기법을 이용하여 설계하였다^[10]. 기존에 제안된 소형화 식은 대역폭이 감소하는 문제점이 있어 대역폭 개선 기법을 함께 적용한 설계식을 이용하여 설계하였다^[11]. 제작된 필터는 일반적인 평행 결합 선로 필터의 1/2 수준으로 소형화되었으며, 제작된 필터의 사진은 그림 6과 같이 임피던스가 높은 결합 선로 부분과 임피던스가 낮은 전송 선로로 구성되어 있다.

본 연구에서는 최근에 개발된 Taconic사의 HyRellex 재질을 이용한 고주파용 FPCB TF-290을 사용하여 flexible filter를 제작하였다. Teflon을 실리콘 기판에 부착한 후 패턴 제작을 위하여 2 μm 두께의 구리 박막을 증착하였다. 이후 동일한 감광과 식각의 과정을 거쳐 필터를 완성하였다. Cutter를 이용하여

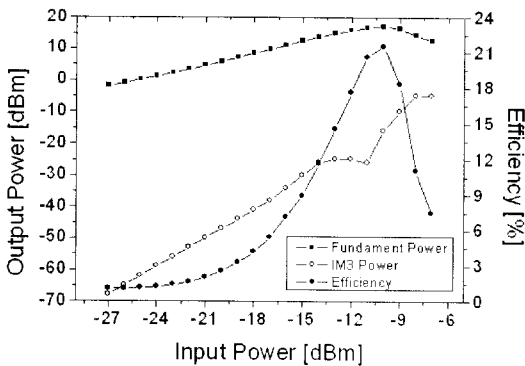
적절한 크기로 필터를 잘랐다.

III. 실험 결과

제작된 전력 증폭기는 Teflon 기반의 FPCB를 이용하여 테스트 보드를 만들어 측정하였다. 전력 증폭기의 전원 전압(V_{CC})은 3 V를 사용하여 신호가 가해지지 않은 상태에서의 콜렉터의 전류(quiescent operating point collector current, I_{CQ})는 20 mA이다. 그림 7(a)는 전력 증폭기의 소신호 특성을 측정한 것이다. 설계 목표인 5.2 GHz에서 잘 매칭이 되어 반사 손실 특성이 약 -20 dB 정도로 우수한 것을 알 수 있다. 제작된 전력 증폭기의 소신호 이득은 27 dB이다. 그림 7(b)은 입력 전력을 변화시키며 전력 증폭



(a) 이득 및 매칭
(a) Small signal gain and impedance matching



(b) 출력 전력 및 효율 특성
(b) The output power and efficiency measurement result

그림 7. 전력 증폭기의 측정 결과
Fig. 7. The measured results of the fabricated amplifier.

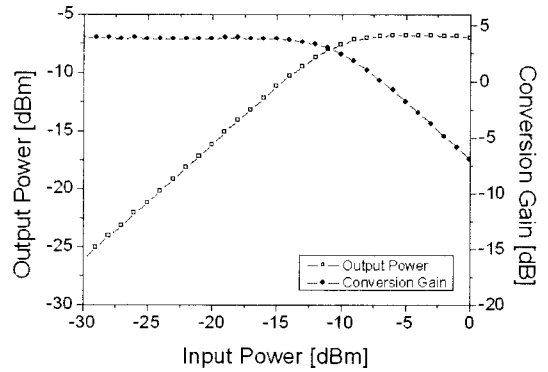
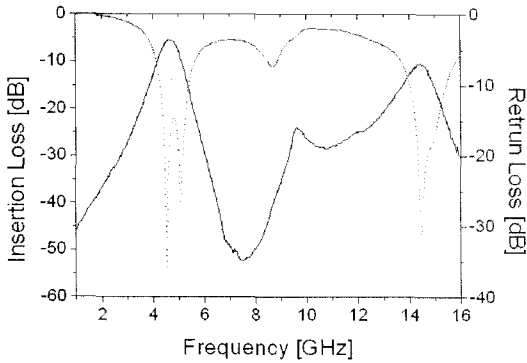


그림 8. 주파수 변환기의 P1dB 측정 결과
Fig. 8. The output power characteristics of the fabricated frequency mixer.

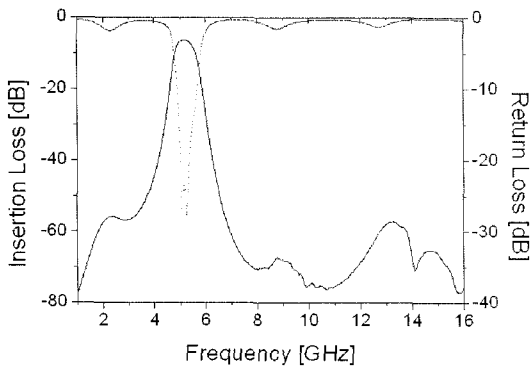
기의 포화 특성을 측정한 것이다. 측정 결과, 제작된 전력 증폭기의 출력 P1dB는 18 dBm을 보였으며, 최대 효율은 약 20%가 측정되었다. 이는 최근 연구된 전력 증폭기에 비해 약간 낮은 효율로 온칩으로 매칭하는 과정에서 온칩의 나선형 인덕터에서 발생하는 DC 저항에 큰 전류가 흐름으로 매우 큰 전압 강하가 발생하기 때문으로 판단된다.

주파수 변환기는 3 V 단일 전원 하에서 동작하며, 코어 회로는 5 mA, 두 개의 벌룬 및 바이어스 회로가 15 mA의 전류를 소모한다. 변환 이득은 LO 신호가 -14 dBm일 때 최대인 3.5 dB가 되며, 이 값은 다른 주파수 혼합기에서 요구하는 LO 신호의 크기에 비해 상대적으로 낮은 값이다. 그림 8은 LO 신호를 -14 dBm으로 고정시킨 상태에서 입력 IF 신호를 -30 dBm에서 10 dBm까지 증가시켜 가며 변환 이득의 변화를 나타낸 것이다. 변환 이득의 변화를 토대로 측정된 P1dB는 -8 dBm이다.

제작된 맵스 필터는 VNA를 이용하여 삽입 손실 및 반사 손실을 측정하였다. 그림 9는 측정된 결과이다. 삽입 손실은 PI 유전체의 필터와 Teflon 유전체의 필터 모두 6 dB 정도의 특성을 보이고 있다. 삽입 손실은 목표 대역에서 약 -20 dB 수준으로 우수한 매칭 특성을 보이고 있다. 고조파 대역 특성은 Teflon 기반의 필터가 매우 우수한 특성을 보이고 있다. 이는 Teflon 기반의 필터가 가지는 높은 임피던스의 결합 선로 부분과 낮은 임피던스 부분의 전송 선로 부분이 분산 소자의 주파수 주기적인 임피던스



(a) PI 기반의 필터
(a) The PI based filters



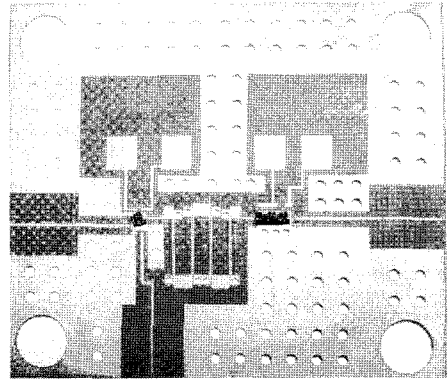
(b) Teflon 기반의 필터
(b) Teflon based filters

그림 9. 제작된 필터의 측정 결과의 삽입 손실 및 반사 손실

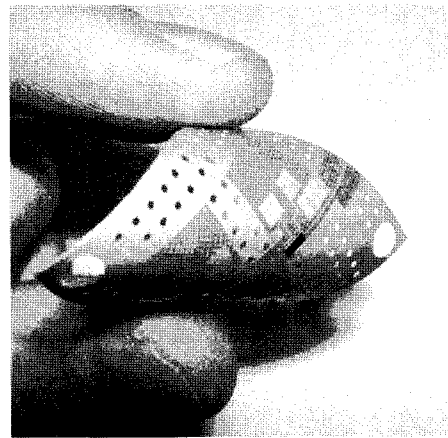
Fig. 9. The measured insertion loss and return loss of the fabricated filters.

특성을 줄여주어 고주파 특성을 개선하였기 때문이다.

최종적인 멤스 송신기는 그림 10과 같이 Teflon 기반의 FBCP에 집적화된 필터와 신호와 전원선 등이 함께 형성된 형태로 제작되었다. 전력 증폭기 및 주파수 변환기의 매칭 회로와 바이어스 회로 등은 모두 온칩으로 구현되어 아무런 오프칩 소자를 전혀 사용하지 않고 구현되었다. MMIC와 기판의 부착은 전도성 에폭시를 이용하여 부착한 후, 골드 와이어를 이용하여 와이어 본딩하여 전원 전압과 입출력 신호를 상호 연결하였다. 최종적인 멤스 송신기는 매우 얇은 유전체 기판에 2 μm 두께의 구리 박막을 증착하여 제작하였기 때문에 유연성이 그림 10(b)와 같이 매우 뛰어난 것을 알 수 있다. 기판의 전체 크기는 3.5 \times 4 cm^2 의 크기를 가지며, 전원선을 제외한 MMIC



(a)



(b)

그림 10. (a) 제작된 연성 인쇄 회로 기판을 이용한 초고주파 송신기, (b) 연성 특성

Fig. 10. (a) The photograph and (b) flexibility of the fabricated flexible MEMS transmitter.

소자들 및 멤스 필터가 차지하는 면적은 약 1 \times 2 cm^2 의 크기를 가진다.

초고주파 멤스 송신기의 변환 이득을 스펙트럼 아날라이저와 신호 발생기를 이용하여 측정하였다. 변환 이득은 IF 주파수 및 LO 전력을 각각 200 MHz와 -14 dBm으로 고정시켜 놓고, LO 전력을 변화시키며 측정하였다. 측정된 초고주파 멤스 송신기의 변환 이득은 그림 11에 정리되어 있다. 변환 이득은 출력 RF 주파수 4.8 GHz에서 27 dB의 최대치를 보이고 있다. 이는 설계 목표인 5.2 GHz에서 약 400 MHz 정도 낮은 주파수로 천이된 결과이다. 이는 전력 증폭기와 대역 통과 필터의 미세한 임피던스의 부정합으로 인한 것으로 예상된다.

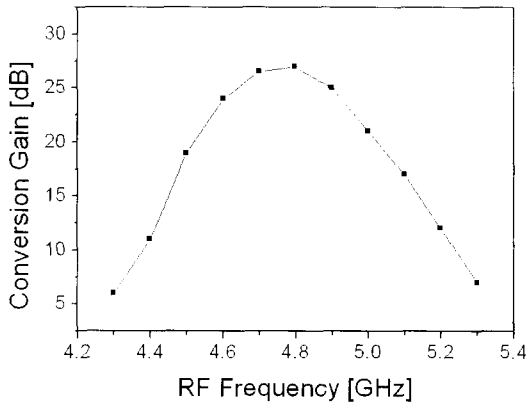


그림 11. 제작된 연성 인쇄 회로 기판을 이용한 초고주파 송신기의 변환 이득

Fig. 11. The measured conversion gain of the fabricated flexible MEMS transmitter.

곡률 반경에 따른 변환 이득의 특성을 측정하였다. 그러나 변환 이득은 기판을 구부리는 정도에 거의 영향을 받지 않고 동일한 특성을 유지하였다. 극단적으로 곡률 반경이 줄어들어 기판이 완전히 접히는 경우를 제외하고는 완전히 동일한 특성을 유지하였다. 그 이유는 회로의 패턴의 크기가 기판의 두께에 상대적으로 매우 크기 때문에 기판을 구부려도 그 영향이 회로에는 거의 영향을 미치지 않은 것으로 판단된다. 즉, 제안된 FPCB 멤스 송신기는 실제 임의의 곡면에 실장이 가능하며, 성능의 열화가 거의 없을 것으로 예상된다.

제안된 FPCB 멤스 송신기가 시스템에 이용되었을 때, 시스템의 성능 열화의 정도를 분석하였다. 시스템 성능 분석은 Agilent사의 ADS2004A(Advanced Design System 2004A)^[12]의 시스템 시뮬레이션 툴인 Ptolemy를 이용하여 표 1에 정리되어 있는 파라미터를 반영하여 변조된 신호를 발생한 후, Agilent사의 벡터 신호 발생기인 E4438C에 신호를 다운로드하여 신호를 발생하였다. 발생한 IF 신호는 FPCB 멤스 송신기를 통과한 후, Agilent사의 벡터 신호 분석기인 PSA 89600으로 신호를 캡처하여 벡터 분석 신호 소프트웨어인 89601A^[13]와 ADS2004A를 연동하여 EVM(Error Vector Magnitude)를 계산하였다. Back-off에 따른 측정된 RMS EVM은 그림 12와 같다. 6 dB back-off 시의 RMS EVM은 약 0.025 또는 EVM -32 dB로 양호한 특성을 보이고 있다. EVM 특성 또한

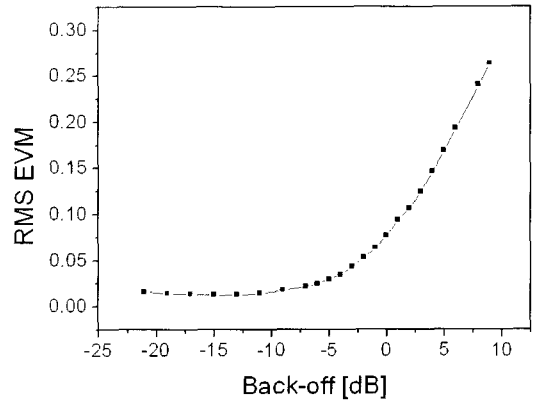


그림 12. FPCB 멤스 송신기를 통과한 신호의 RMS EVM 특성

Fig. 12. The measured RMS EVM of the fabricated flexible MEMS transmitter.

제작된 기판의 곡률 반경을 조절하며 측정하였으나 특성에 거의 영향을 주지 않았다. 이로써 제안된 FPCB 멤스 송신기의 타당성을 검증하였다.

IV. 결 론

본 논문에서는 멤스 기술의 하나인 연성 인쇄 회로 기판을 이용하여 임의의 형태로 변형이 가능한 초고주파 멤스 송신기를 개발하였다. 연성 인쇄 회로 기판은 그 무게가 가볍고 두께가 얇아 경량 소형화 모듈을 만드는데 유리한 장점이 있으며, 종이와 같이 유연한 특성을 가지고 있어 평면이 아닌 임의의 곡면 등에 실장할 수 있는 장점을 가지고 있다. 본 논문에서는 근거리 센서 네트워크 구성을 위한 직교 주파수 분할 다중 전송 방식을 위한 5 GHz 대역에서 동작하는 무선 송신기를 설계 제작하였다. 송신 모듈의 전력 증폭기와 주파수 변환기와 같은 능동 회로는 전력 효율이 높고 선형성이 우수하여 전력 증폭기에 많이 사용되고 있는 InGaP/GaAs HBT 공정을 사용하여 설계 및 제작하였으며, 매칭 회로 및 필터 등의 수동 회로는 연성 인쇄 회로 기판에 직접 집적화하여 제작하였다. 연성 회로 기판에 제작한 필터는 PI 유전체를 이용한 FPCB 기판과 Teflon 유전체를 이용한 기판을 이용하여 제작하였다. 두 기판 모두 종이와 같은 수준의 뛰어난 유연 특성을 보이며, 6 dB 정도의 삽입 손실 정도를 보였다. MM-

IC 회로는 FPCB에 오프칩 소자를 사용하지 않기 위하여 모든 매칭 회로 및 바이어스 회로를 칩 안에 온 칩으로 구현하였다. 구현된 전력 증폭기와 주파수 변환기의 이득은 각각 27 dB와 3.5 dB로 측정되었다. 최종적으로 구현된 FPCB 맴스 송신기는 동작 주파수가 약간 천이된 4.8 GHz 대역에서 최대 변환 이득인 27 dB가 측정되었다. 제작된 맴스 송신기는 EVM 특성을 통하여 시스템 성능을 분석하였다. 측정된 EVM 특성은 6 dB back-off 동작에서 -32 dB로 양호한 결과를 보였다. 또한, 곡률 반경에 따른 FPCB 맴스 송신기의 변환 이득 및 EVM 특성을 측정하였으나, 극단적으로 기판이 접하지 않는 정도에서는 특성의 변화가 전혀 없었다. 이는 FPCB 기판에 형성된 회로의 패턴에 비하여 기판의 유전체 두께가 상대적으로 매우 작기 때문에 곡률 반경의 변경에 영향을 거의 받지 않은 것으로 판단된다. 따라서 제안된 FPCB 맴스 송신기는 열화 없이 임의의 곡면에 실장이 가능하며, 이로서 제안된 FPCB 맴스 송신기의 타당성을 검증하였다.

이러한 유연성 있는 전자 및 MEMS 기술은 유연성 있는 시스템의 구현에 응용되며, 응용 시스템의 일례로서 3차원 센서 및 액투에이터 시스템, 스마트 카드, 인체 부착형 정보 통신기기와 컴퓨터, 지능형 의복, 전자 종이, 그리고 접을 수 있는 디스플레이 등을 들 수 있다. 제안된 FPCB 맴스 송신기 기술은 이러한 기술들과 융합되어, 모든 시스템의 집적화된 연성 시스템 구현에 도움이 될 것으로 판단된다.

참 고 문 헌

- [1] Eun-Soo Hwang, Yong-Jun Kim, "Flexible polysilicon strain gauge", *Japanese Journal of Applied Physics, PT2*, vol. 42, no. 7B, pp. 810-813, Jun. 2003.
- [2] K. Noda, K. Hoshino, K. Matsumoto, and I. Shimoyama, "Fabrication of the flexible sensor using SOI wafer by removing the thick silicon layer", *19th IEEE International Conference on Micro Electro Mechanical Systems*, pp. 122-125, 2006.
- [3] Wang Peng, Ding Tianhuai, and Xu Feng, "A novel flexible sensor for compression stress relaxation", *Proceedings of IEEE Sensors*, vol. 1, pp. 265-268, Oct. 2003.
- [4] Fabrice Axisa, P. M. Schmitt, C. Gehin, G. Delhomme, E. McAdams, and A. Dittmar, "Flexible technologies and smart clothing for citizen medicine, home healthcare, and disease prevention", *IEEE Transactions on Information Technology in Biomedicine*, vol. 9, no. 3, pp. 325-336, Sep. 2005.
- [5] Seong-Sik Myoung, Jong-Gwan Yook, "Low-phase-noise and high-efficiency MMIC VCO based on InGaP/GaAs HBT with the LC filter", *Microwave and Optical Technology Letters*, vol. 44, no. 2, pp. 123-126, Jan. 2005.
- [6] Seong-Sik Myoung, Jong-Gwan Yook, "Low noise and high linearity LNA based on InGaP/GaAs HBT for 5.3 GHz WLAN", *Microwave and Optical Technology Letters*, vol. 46, no. 6, pp. 550-553, Sep. 2005.
- [7] A. K. Wong, S. H. Lee, and M. G. Wong, "Current combiner enhances active mixer performance", *Microwave and RF*, vol. 3, pp. 156-165, Mar. 1994.
- [8] Jeff Durec, "An integrated silicon bipolar receiver subsystem for 900-MHz ISM band applications", *IEEE Journal of Solid-State Circuits*, vol. 33, no. 9, pp. 1352-1372, Sep. 1998.
- [9] Wolfgang Menzel, Hermann Schumacher, Wolfgang Schwab, and Xiangkun Zhang, "Compact multilayer filter structures for coplanar MMIC's", *IEEE Microwave and Guided Wave Letters*, vol. 2, no. 12, pp. 497-498, Dec. 1992.
- [10] Seong-Sik Myoung, Jong-Gwan Yook, "Miniaturization and harmonic suppression method of parallel coupled-line filters using lumped capacitors and grounding", *Electronics Letters*, vol. 41, no. 15, pp. 849-851, Jul. 2005.
- [11] Seong-Sik Myoung, Yongshik Lee, and Jong-Gwan Yook, "Bandwidth-compensation method for miniaturized parallel coupled-line filters", *IEEE Transactions on Microwave Theory and Technologies*, vol. 55, no. 7, pp. 1531-1538 Jul. 2007.
- [12] *Advanced Design System 2004A*, Agilent Technology Inc., 2005.

[13] 89601A Vector Signal Analysis Software, Agilent

Technology Inc., 2005.

명 성 식



2002년 2월: 숭실대학교 전자공학과 (공학사)
2004년 2월: 연세대학교 전기전자공학과 (공학석사)
2004년 3월~현재: 연세대학교 전기전자공학과 박사과정
2007년 1월~현재: Georgia Institute

of Technology 교환 연구원

[주 관심분야] 초고주파 집적 회로

정 주 용



2004년 2월: 연세대학교 전기전자공학부 (공학사)
2006년 2월: 연세대학교 전기전자공학과 (공학석사)
2006년 3월~2007년 4월: 삼성전자 무선사업부
2007년 5월~현재: LIG 넥스원 초

고주파 연구센터 연구원

[주 관심분야] 초고주파 집적회로, 레이더 시스템

김 선 일



2000년 2월: 연세대학교 전자공학과 (공학사)
2006년 2월: 연세대학교 전기전자공학과 (공학석사)
2006년 2월~현재: 삼성전자 무선사업부 연구원
[주 관심분야] 마이크로파 수동/능

동 소자 및 시스템

육 중 관



1987년 2월: 연세대학교 전자공학과 (공학사)
1989년 2월: 연세대학교 전자공학과 (공학석사)
1996년 2월: University of Michigan (공학박사)
2000년 2월~현재: 연세대학교 교

수

[주 관심분야] MEMS, 초고주파 회로, EMI/EMC, 초고주파 수치해석