

CMOS 공정과 호환되는 마이크로머시닝 기술을 이용한 마이크로파 전력센서

이대성, 이경일, 황학인, *이원오, **전형우, **김왕섭
전자부품연구원 MEMS연구센터, *(주)모빌일렉트론, **(주)세라스택
전화 : 031-610-4066, E-mail : leeds@keti.re.kr

A CMOS Compatible Micromachined Microwave Power Sensor

Dae-Sung Lee, Kyung-Il Lee, Hak-In Hwang, *Won-Oh Lee,
**Hyung-Woo Jun, **Wang-Sup Kim
KETI MEMS research center, *Mobile electron, **Cerastack
E-mail : leeds@keti.re.kr

Abstract

We present in this paper a microwave power sensor fabricated by a standard CMOS process and a bulk micromachining process. The sensor consists of a CPW transmission line, a resistor as a heater, and thermocouple arrays. An input microwave heats the resistor so that the temperature rises proportionally to the microwave power and the thermocouple arrays convert it to an electrical signal. The sensor uses air bridged ground of CPW realized by wire bonding to reduce the device size and cost and to improve the thermal impedance. Al/poly-Si junctions are used for the thermocouples. Poly-Si is used for the resistor and Aluminium is for transmission line. The resistor and hot junctions of the thermocouples are placed on a low stress silicon nitride diaphragm to minimize a thermal loss. The fabricated device operates properly from 1 μ W to 100 mW of input power. The sensitivity was measured to be 3.2~4.7 V/W.

I. 서론

무선통신에 있어 정확한 신호전력의 측정 정보는 송수신에 있어 가장 기초적이고 필수적인 요소이다.

마이크로머시닝 기술을 적용한 열감지 방식의 평균전력 센서는 비교적 높은 선형성을 가지며 modulation weighting error로부터 자유롭다. 또한 50dB 이상의 넓은 dynamic range와 광대역 주파수특성의 구현이 가능하며 안정도, 낮은 내부저항 등의 장점을 갖고 있어 마이크로파 분야의 RMS 전력 측정센서로 유망하다.[1-3] 최근 RF 부품의 집적화되는 추세에 맞춰 MMIC나 CMOS RF-IC에 호환되는 센서개발이 중요하며 이에 대한 NIST의 연구[4]에서는 CMOS 표준공정의 박막과 XeF₂ 건식식각에 의한 다이어프램을 적용한 센서를 발표하였고 H.L. Hartnagel은 CPW의 접지 금속을 Air Bridge 형태로 도금에 의해 제작한 센서를 발표하였다.[5] 이 센서특성은 20GHz의 광대역 특성과 우수한 선형성을 보였으나 비교적 낮은 입력전력과 높은 제조단가의 단점을 갖는다.

본 연구에서는 이동통신 대역의 CMOS RF-IC에 적용이 가능하고 저가격인 마이크로파 전력센서를 구현하였다. 센서는 CMOS공정의 Al과 poly-Si 박막을 사용하여 소자를 형성하고 실리콘 습식식각에 의한 다이어프램을 적용하였다. 또한 CPW의 접지면의 구현에 있어 와이어본딩(Wire Bonding)을 적용하여 평가하였다. 또한 마이크로파 전력센서의 감도, 입력범위, 선형성 및 RF 특성을 최적화하기 위해 센서의 열적구조와 RF매칭의 설계를 최적화하고 제작 및 평가를 통해 검증하였다.

II. 센서의 원리 및 설계

2.1 원리

열감지 방식의 마이크로파 전력센서는 마이크로파의 전력을 열로 바꾸고 이를 온도센서로 측정하는 것으로 구성은 그림 1과 같다. 전송선 끝단에 임피던스매칭된 저항(R_h)으로 종단시켜 입력된 마이크로파의 전력(P_s)이 모두 열로 소모되도록 하며 저항의 인접한 위치에 열전쌍(thermocouple) 어레이의 온접점을 두어 소모된 전력(P_h)에 의한 온도변화를 측정한다. 식(1)과 같이 열전쌍의 출력전압(V_{tp})은 입력된 전력(P_s)에 비례한다.

$$V_{tp} = \frac{\alpha N}{G_{th}} \frac{V_h^2}{R_h} = \frac{\alpha N}{G_{th}} P_h = \frac{\alpha N}{G_{th}} P_s (1 - |\Gamma|^2) \quad (1)$$

여기서 N 은 열전쌍의 개수, α 는 열전계수(V/K), G_{th} 는 센서의 열전도도(W/K) 이고 Γ 은 마이크로파의 반사계수이다. HP사의 8487A와 같이 발열저항(R_h)과 열전쌍이 일체형으로 되어 있는 경우도 있으나 분리된 형태가 일반적이며 성능을 최적화하기에 유리하다. 감도를 높이기 위해서 열전쌍의 수를 늘릴 필요가 있으며 전력반사를 최소화하기 위해 임피던스 매칭이 중요하다. 또한 열저항(Thermal Impedance)을 높이기 위해서 열전도도(G_{th})가 작은 재료 및 구조가 필요한데 본 연구에서는 $2\mu\text{m}$ SiNx 멤브레인과 wire bonded CPW 전송선을 적용하였다.

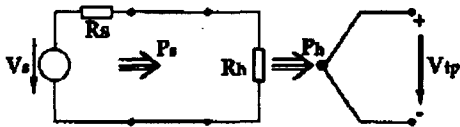


그림 3. 열감지 방식의 마이크로파 전력센서의 등가회로

2.2 설계

마이크로파 전력센서는 CPW 구조를 갖는 전송선 끝에 발열저항을 전송선이 연장된 형태로 위치시키고 그 좌우에 두 개의 직렬로 연결된 열전쌍(thermopile)을 두었다. 발열저항을 접지와 입력 측의 CPW 접지면은 Wire Bonding으로 연결하였다. 기 발표된 센서에 비해 이 구조가 갖는 장점으로는 첫 번째, 발열저항이 패턴의 모양에 있어 전송선과 불연속점이 없고 좌우 대칭이기 때문에 임피던스매칭 설계가 쉽고 기생성분

에 의한 반사손실이 적다. 두 번째는 발열저항 주위의 넓은 접지면이 떠있기 때문에 저항 주위의 열저항이 높다.

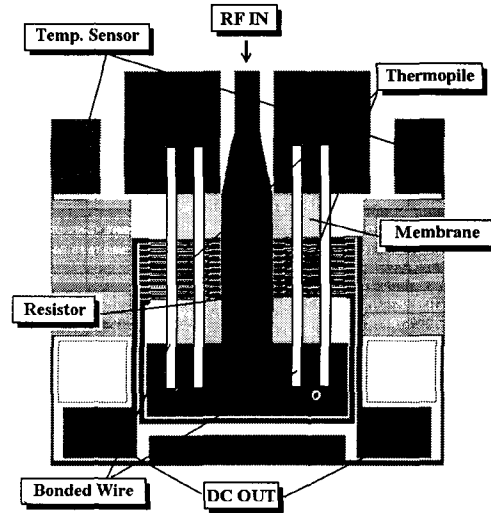


그림 4. 마이크로파 전력센서의 설계

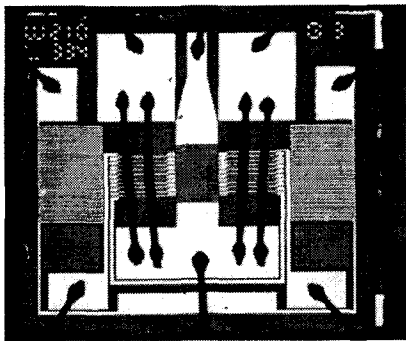
온도센서로는 N+ poly-Si/Al 열전쌍을 사용하였다. 이것은 CMOS공정에서 적용되는 재료로써 기존의 공정조건을 적용할 수 있으며 신호처리회로의 CMOS공정과 호환되기 때문에 신호처리회로와 일체형으로 구현이 가능하다. 또한 $120\mu\text{V}/\text{C}$ 의 비교적 높은 열전계수를 갖는다. poly-Si의 경우 도핑농도로 열전계수 및 비저항을 조절할 수 있는데 면저항을 $25\sim 35\Omega/\square$ 범위로 만들어 발열저항으로 사용한다. 열전쌍의 개수는 좌우 10개씩 총 20개를 직렬로 연결하였다. 그리고 열전쌍의 냉점보상을 위해 알루미늄 온도센서를 적용하였다. 실리콘 기판은 고저항 100 기판을 사용하였다. 표 1에 설계치수를 정리하였다.

표 1. 마이크로파 전력센서의 설계 규격

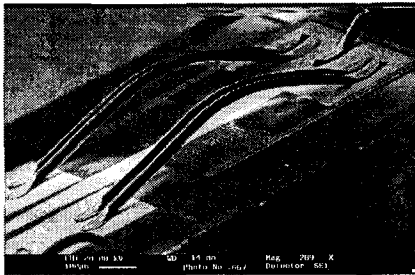
구분	항목	설계치
전기적 특성	Frequency	$\sim 10\text{GHz}$
	Load Resistance	$42\sim 45\Omega$
	Power Range	$-30 \sim 20\text{dBm}$
	Seebeck Coefficient of T/C	$\sim 120 \mu\text{V}/\text{K}$
구조적 특성	Chip Size	$2\times 2\text{mm}^2$
	Resistor size (Heater)	#1 : $100\times 160\mu\text{m}$ #2 : $150\times 240\mu\text{m}$ #3 : $210\times 334\mu\text{m}$
	No. of T/Cs	20 개
	Membrane Size	$600\times 600\mu\text{m}^2$
	Bonding Wire	Al. $50\mu\text{m}$

III. 제 작

우선 P(100) 실리콘 기판을 400Å 두께로 얇게 산화시킨 후 2 μm 두께의 저응력 SiNx를 LPCVD로 증착한다. 그 위에 poly-Si 박막을 역시 LPCVD로 3500Å 증착하고 면저항이 25-35 Ω 이 되도록 POCl₃을 도핑한다. 저항과 열전쌍의 일부를 패터닝하고 알루미늄 박막을 DC 마그네트론 스퍼터링 방법으로 증착한 후 전송선 및 열전쌍의 나머지를 패터닝한다. poly-Si와 알루미늄의 접촉저항을 낮추기 위해 열처리를 거치면 기판 전면에 전송선과 열전쌍, 저항이 형성된다. 기판 뒷면의 SiN을 건식 식각 공정으로 제거한 후 KOH용액을 사용하여 실리콘 식각을 한다. 이로써 SiNx 멤브레인을 얻는다. 이후 기판을 개별 칩으로 분리하고 패키지에 부착한 후 출력 패드와 함께 접지면의 wire bonding을 실시함으로써 센서 제작을 마친다. 그림 3은 저항의 폭이 210 μm 인 센서의 제작된 사진이다.



(a)



(b)

그림 3. 제작된 센서의 모습. (a) 위에서 본 광학사진 (b) 본딩된 와이어의 모습

IV. 실험 결과

2 μm SiNx 멤브레인 위에 구현된 poly-Si 저항의 특

성평가를 위해 저항에 DC 전압을 인가하고 전류를 측정함으로써 저항의 저항값 및 저항값의 변화, 최대 허용 전력을 측정하였다. 저항에 인가된 전압은 0V부터 약 5V까지 변화시키면서 측정한 결과 그림 4와 같이 입력전력이 상승함에 따라 저항값이 같이 상승하였고 폭이 100 μm 인 저항의 경우 45 Ω 에서 최고 68 Ω 까지 증가하였다. 제작된 poly-Si의 온도계수는 0.0357ohm/ $^{\circ}\text{C}$ 이고 온도는 입력 40mW에서 약 250 $^{\circ}\text{C}$ 의 높은 온도가 된다. 이와 같이 저항값이 증가되기 때문에 최적의 임피던스매칭을 위해서는 입력범위의 중간에 50 Ω 되도록 설계한 것과 실험결과가 일치함을 확인하였다.

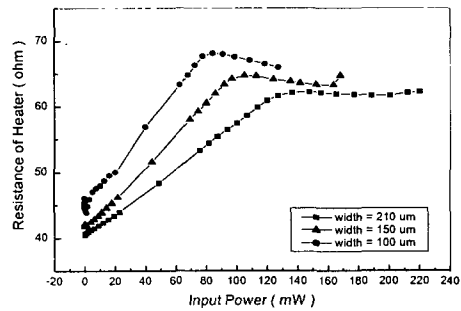


그림 4. 입력된 전력에 의한 온도상승으로 발생하는 poly-Si의 저항값 변화

센서의 감도를 높이기 위해 식(1)과 같이 열저항을 높여야 하나 저항의 온도가 지나치게 높아져 허용 전력을 낮추는 결과를 초래한다. 그림 5는 허용전력을 초과한 전력에 파괴된 센서의 모습이다. 따라서 본 연구에서 저항의 크기에 따른 센서의 열저항(thermal impedance)과 허용전력을 측정하였다. 그림 6은 그 결과로 저항의 면적이 크면 열저항이 7.9 $\times 10^4\text{K/W}$ 에서 4.2 $\times 10^4\text{K/W}$ 로 작아지고 허용전력이 증가함을 보였으며 폭 210 μm 인 저항의 경우 220 mW에서 break-down 됨을 알 수 있다.



그림 5. 허용전력을 넘는 입력전력에 의해 poly-Si 저항과 멤브레인이 파괴된 모습

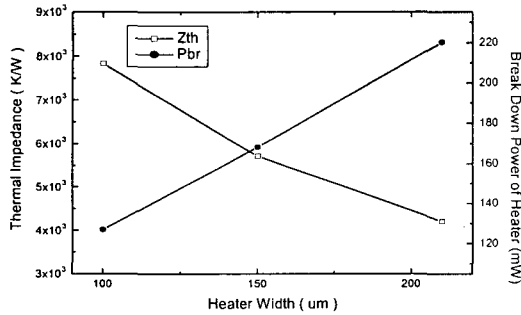


그림 6. 열저항과 최대허용전력

그림 7은 저항의 폭이 210 μ m인 센서에 1GHz의 마이크로파를 입사시켜 측정된 센서의 감도특성으로 입사 전력 1 μ W에서부터 200mW 까지 약 3.2 mV/mW의 감도를 가지며 DC 전압이 선형적으로 출력되었다. 저항의 크기가 작은 센서의 경우 4.7 mV/mW까지 측정되었다. 그림 8에 나타난 센서의 RF특성은 약 2GHz까지 반사손실이 20dB 이하임을 알 수 있다.

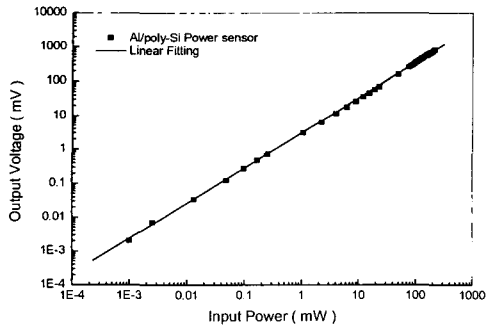


그림 7. 센서의 감도 및 선형특성

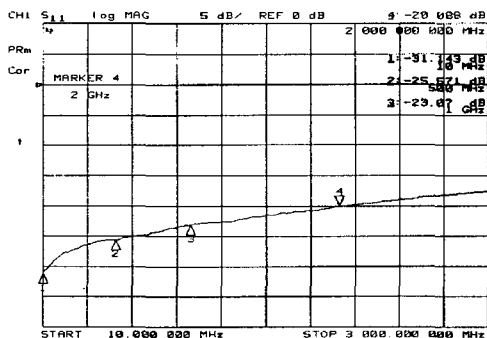


그림 8. 센서의 반사손실 (10MHz~3GHz)

V. 결론

본 연구에서 마이크로머시닝 기술과 CMOS공정을 이용하여 CMOS RF-IC에 적용이 가능한 열감지 방식의 마이크로파 전력센서를 제작하고 평가하였다. 특히 열저항을 높이고 CPW 전송선을 구성하기 위해 접지의 연결에 Wire Bonding을 적용함으로써 저가의 센서를 구현할 수 있었다. 제작된 센서는 poly-Si 저항의 크기가 210 μ m \times 334 μ m 센서의 경우 최대허용전력은 약 200mW이고 입력범위가 1 μ W에서 100mW에서 매우 우수한 선형특성을 보였으며 감도는 3.2mV/mW이었다. 주파수특성은 2GHz까지 20dB의 낮은 반사손실을 보였다. 본 연구에서 제작된 센서는 주파수특성을 개선하여 IMT2000 및 차량레이더 등에 활용될 수 있을 것으로 기대되며 선형성과 광대역 특성에 맞는 다양한 응용분야를 가질 것이다.

후기

본 논문은 산업자원부와 과학기술부가 주관하는 초소형정밀기계 선도기술개발사업의 연구비 지원에 의한 것으로 이에 감사 드립니다.

참고문헌

- [1] Agilent, Application Note 64-1B "Fundamentals of RF and Microwave Power Measurements", 1997
- [2] Miles E. Goff, Curtis A. Barratt, "DC to 40 GHz MMIC Power Sensor", IEEE GaAs IC Symposium, 1990
- [3] Lee A. Christel, Kurt Petersen, "A Miniature Microwave Detector Using Advanced Micromachining", IEEE, 1992
- [4] Veljki Milanovic, Mona E. Zaghoul, "Implementation of Thermoelectric Microwave Power Sensors in CMOS Technology", IEEE Int. Sym. on Circuit and Systems, June, 1997
- [5] Setsuo Kodato, Seiji Uchida, "New Structure for DC-60GHz Thermal Power Sensor", IEEE MTT-s Digest, 1996