

논문 2017-54-6-4

# 상용 PCB 공정을 이용한 RF MEMS 스위치와 DC-DC 컨버터의 이종 통합에 관한 연구

( A Study on a Hetero-Integration of RF MEMS Switch and  
DC-DC Converter Using Commercial PCB Process )

장 연 수\*, 양 우 진\*\*, 전 국 진\*\*\*

( Yeonsu Jang<sup>Ⓒ</sup>, Woo-Jin Yang, and Kukjin Chun )

## 요 약

본 논문에서는 듀로이드와 FR4를 기판으로 하는 재배선층 위에 정전 구동 방식의 RF MEMS 스위치와 승압 DC-DC 컨버터를 결합하는 연구를 진행하였다. 상용 PCB(Printed Circuit Board) 공정으로 듀로이드와 GCPW 전송 선로 조합의 재배선층과 FR4와 CPW 전송 선로 조합의 재배선층을 제작하였다. 상용 PCB 공정 특성에 의하여 전송 선로의 특성 임피던스는 56옴, 59옴이었으며 이에 대하여 비교 분석하였다. 듀로이드 기판은 유전상수가 작고 두께가 얇으며 GCPW를 적용하였기 때문에 상대적으로 유전상수가 크고 두께가 두꺼우며 CPW 전송 선로를 적용한 FR4 기판보다 6GHz 대역에서 삽입 손실은 약 2.08dB, 반사 손실은 약 3.91dB, 신호 분리도는 약 3.33dB 우수한 것을 확인하였다.

## Abstract

This paper presents a hetero-integration of electrostatically actuated RF MEMS Switch and step up DC-DC converter on a redistribution layer using commercial PCB process. RF characteristics of Duroid with 56Ω impedance GCPW transmission line and that of FR4 with 59Ω impedance CPW transmission line were analyzed. From DC to 6GHz, RF characteristics of Duroid were better than that of FR4, insertion loss was 2.08dB lower, return loss was 3.91dB higher, and isolation was 3.33dB higher.

**Keywords** : hetero-integration, redistribution layer, RF MEMS switch, DC-DC converter, flipchip bonding

## I. 서 론

RF MEMS 스위치의 우수한 고주파 특성을 휴대용 통신 기기에 적용하기 위하여 그 동안 많은 연구와 개발이 이루어졌다<sup>1~2)</sup>. 대표적인 RF MEMS 스위치 구동

방법에는 정전(electrostatic), 전자기(electromagnetic), 압전(piezoelectric), 전열(thermoelectric) 방식이 있다. 그 중에서 정전 구동 방식은 다른 구동 방식에 비하여 소형이며 제작이 용이하고 소모 전력이 작으나 구동 전압이 수십 볼트로 크다<sup>2)</sup>. 이종 칩을 통합하여 우수한 성능을 내는 칩을 개발하고자 하는 연구는 다양한 분야에서 이루어지고 있다<sup>3~4)</sup>. 휴대용 통신 기기에 적용하기 위한 RF MEMS 스위치와 승압 DC-DC 컨버터 결합에 관한 연구도 그 동안 수십 년에 걸쳐서 이루어졌다<sup>5~6)</sup>. 구동 전압이 수십 볼트인 정전 구동 방식의 RF MEMS 스위치와 승압 DC-DC 컨버터를 결합하여 사용자에게 제공한다면 사용자는 낮은 전압으로 RF MEMS 스위치를 구동하는 효과를 볼 수 있다. 따라서 본 논문에서는 이종 칩 각각의 최적화가 가능한 이종

\* 정회원, SK 하이닉스(주) DRAM설계본부  
(DRAM Design Division, SK Hynix)

\*\* 학생회원, \*\*\* 정회원, 서울대학교 전기·정보공학부 반도체공동연구소 (Dept. of Electrical and Computer Engineering, Seoul National University, Inter-university Semiconductor Research Center)

Ⓒ Corresponding Author (E-mail : ysjang02@snu.ac.kr)

※ 본 연구는 SK 하이닉스(주)의 지원으로 이루어졌습니다.

Received ; February 11, 2017 Revised ; March 15, 2017

Accepted ; May 11, 2017

통합(hetero-integration) 방식을 선정하여 재배선층(RDL, Re-Distribution Layer) 위에 6GHz 대역 휴대용 전자 통신기기에 적용 가능한 RF MEMS 스위치와 DC-DC 컨버터를 결합하는 연구를 진행하였다.

## II. 설 계

### 1. 듀로이드와 GCPW, FR4와 CPW조합 특성 연구

기판과 전송 선로에 따른 이종 통합 시 고주파 특성 변화를 확인하기 위하여 듀로이드 기판 위에 GCPW 전송 선로, FR4 기판 위에 CPW 전송 선로를 형성하고 스위치와의 이종 통합 특성을 HFSS와 ADS 프로그램을 이용하여 비교하였다. 표 1의 파라미터로 재배선층 시뮬레이션 진행하였다. 공정을 반영하여 듀로이드 기판의 전송 선로의 임피던스는 약 56옴인 경우와 FR4 기판의 전송 선로의 임피던스는 약 59옴인 경우의 신호선과 접지 사이의 간격을 선정하였다.

표 1. 듀로이드 기판과 GCPW 조합, FR4 기판과 CPW 조합의 이종 통합 HFSS 시뮬레이션 파라미터  
Table1. HFSS simulation parameters for hetero-integration by Duroid and GCPW, and FR4 and CPW.

|                                    | Duroid+GCPW | FR4+CPW |
|------------------------------------|-------------|---------|
| Substrate area (mm <sup>2</sup> )  | 40 × 25     |         |
| Line metal thickness (μm)          | 35 (Cu)     | 65 (Cu) |
| Substrate dielectric constant      | 2.2         | 4.4     |
| Substrate thickness (μm)           | 240         | 1530    |
| Type of transmission line          | GCPW        | CPW     |
| Switch signal width (μm)           | 565         | 960     |
| Switch signal to ground width (μm) | 370         | 215     |

재배선층의 HFSS 시뮬레이션 결과와 OMRON RF MEMS 스위치 RLC 집중 소자 모델을 결합하여 시뮬레이션 진행한 결과는 그림 1와 같다.

듀로이드 기판은 유전상수가 작고 두께가 얇으며 GCPW를 적용하였기 때문에 상대적으로 유전상수가 크고 두께가 두꺼우며 CPW 전송 선로를 적용한 FR4 기판보다 신호 분리도 특성이 우수한 것을 확인하였다. 공진이 발생하는 경우는 전송 선로의 휘는 부분에서 또

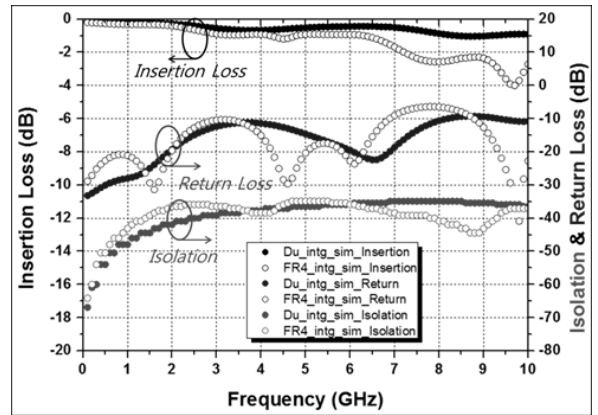


그림 1. 재배선층에 OMRON RF MEMS 스위치를 플립칩 결합한 구조를 시뮬레이션 한 결과  
Fig. 1. Simulation results of OMRON RF MEMS switch which is flipchip bonded on redistribution layer.

는 공정 상의 이유로 신호선 폭이나 간격 변화하는 부분에서 임피던스 부정합이 발생하는 경우이며 이는 대역 내에서 고주파 특성 그래프의 파형에서 피크(peak)가 형성됨으로써 확인할 수 있었다.

### 2. DC-DC 컨버터

RF MEMS 스위치의 구동 전압은 34±1.7V로 3.3V 신호로 구동하기 위해서는 승압 DC-DC 컨버터를 제작하였다. CMOS 공정 가능한 전하 펌프 방식의 DC-DC 컨버터로 RF MEMS 스위치를 구동하였다. 열두 단의 Dickson 전하 펌프를 직렬로 구성하였다. 설계한 컨버터의 시뮬레이션 상의 평균 전압의 10%에서 90%로의 출력 증가 시간(rise time)은 약 200μs, 정상 상태(steady state)에서 출력 전압의 평균은 35.7V이며 리플(ripple)은 피크 투 피크(peak to peak) 74.3mV이며 평균 리플은 13.6mV<sup>2</sup>이었다. 컨버터는 정상 상태에서 0.5μs 주기로 리플이 발생하였으며 이는 1MHz 클럭에 의한 리플이 컨버터 출력에 반영되었기 때문으로 볼 수 있다.

## III. 제작 및 측정 분석

### 1. 듀로이드와 GCPW, FR4와 CPW조합 특성 연구

듀로이드 기판과 GCPW 전송 선로 조합의 재배선층 위에, FR4 기판과 CPW 전송 선로 조합의 재배선층 위에 OMRON RF MEMS 스위치와 열두 단 DC-DC 컨버터를 제작한 결과는 그림 2과 같다. 재배선층 위에 칩은 무연납(Sn 96.5/Ag 3.0/Cu 0.5)으로 플립칩 결합하였다.

전체 기판 크기는 90.5×36.5mm로 동일하다. 컨버터 배

선에서 클럭 주파수와 전력 부분은 1mm 이의 부분은 0.5mm로 하였다. 듀로이드 기판과 FR4 기판은 각각 약 0.5 온스(oz)의 약 17.5 $\mu$ m 두께와 약 1온스의 약 35 $\mu$ m 두께의 구리로 덮여 있는 기판(Copper Clad Laminate)을 사용하였다. 각각의 기판에 약 10 $\mu$ m와 약 30 $\mu$ m 두께의 구리 도금 공정으로 구리 전송 선로의 두께는 각각 약 30 $\mu$ m, 약 60 $\mu$ m가 되었다. 구리 산화를 방지하기 위하여 구리 전송 선로 위에 5 $\mu$ m 두께의 니켈과 0.03 $\mu$ m 두께의 금을 도금 하였다. 제작 결과는 표 2에 정리하였다.

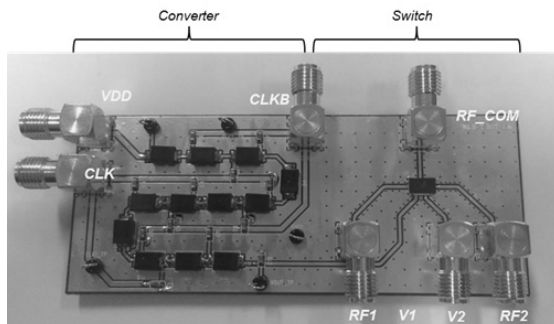


그림 2. 재배선층 기판을 이용하여 컨버터와 스위치를 이중 통합한 결과

Fig. 2. Hetero-integration of converter and switch using redistribution layer.

표 2. 듀로이드 기판과 GCPW 조합, FR4 기판과 CPW 조합의 이중 통합 제작 비교

Table2. Comparison of hetero-integration between Duroid substrate with GCPW and FR4 substrate with CPW.

|  | Duroid+GCPW                              | FR4+CPW                       |
|--|--|-------------------------------|
| Converter type                           | 12 stage Dickson charge pump, 1MHz clock |                               |
| Substrate area (mm <sup>2</sup> )        | 90.5 × 36.5                              |                               |
| Converter line width (mm)                | Clock/Power : 1, else : 0.5              |                               |
| Line metal thickness ( $\mu$ m)          | 29-4-0.03 (Cu-Ni-Au) $\pm$ 5             | 60-4-0.03 (Cu-Ni-Au) $\pm$ 11 |
| Type of converter line                   | GCPW                                     | Single                        |
| Substrate dielectric constant            | 2.2                                      | 4.4                           |
| Substrate thickness ( $\mu$ m)           | 254 $\pm$ 17.8                           | 1530 $\pm$ 153                |
| Type of transmission line                | GCPW                                     | CPW                           |
| Switch signal width ( $\mu$ m)           | 565 $\pm$ 5                              | 960 $\pm$ 5                   |
| Switch signal to ground width ( $\mu$ m) | 370 $\pm$ 15                             | 215 $\pm$ 4                   |

재배선층 제작 과정에서 발생하는 오차는 공정 오차에 기인하며 수치 변화에서의 오차와 구조 변화에서의

오차로 분류된다. 수치 변화에 따른 오차는 기판 두께, 동박 두께, 도금 두께, 전송 선로의 폭과 선 사이의 간격, 유전상수 등에서 발생한다. 구조 변화에 따른 오차는 전송 선로의 단면, 전송 선로의 측벽(sidewall), 등에서 발생할 수 있다. 그림 3과 같이 전송 선로의 공정 과정에서 사용한 감광 필름(DFR) 특성에 의하여 전송 선로 단면은 윗면이 아래면보다 짧은 사다리꼴 모양이며 전송 선로의 측벽에는 노광 파장에 의한 굴곡이 발생한다.



그림 3. 기판 위 제작된 전송 선로의 단면 사진

Fig. 3. Crosssection of the fabricated transmission line on a substrate.

언급한 공정 과정에서 발생하는 오차에 의하여 임피던스 부정합이 발생하며 임피던스 부정합에 의하여 공진이 발생한다. 배선이 길어질수록 신호선의 폭이나 신호선과 접지 사이 간격을 제어할 구간이 길어지므로 공정 오차에 의하여 임피던스 부정합이 발생할 확률이 높아진다. 임피던스 부정합 부분마다 반사파가 발생하게 되고 신호 손실이 발생하며 공진 조건이 형성된다. 설계 시 임피던스 매칭을 하였으나 제작 후 측정 시 삽입 손실, 반사 손실, 신호 분리도 특성에서 공진이 발생하는 것은 공정 오차에 따른 임피던스 부정합이 주요 원인이다. 따라서 배선은 가능한 짧게 하고 공정 오차를 줄일수록 임피던스 매칭이 되어서 우수한 고주파 특성 확보에 유리하다. 그림 4에 듀로이드, FR4 기판의 재배선층과 RF MEMS 스위치 결합 후 고주파 특성 측정 결과를 나타내었다.

FR4 기판의 유전상수가 듀로이드 기판의 유전상수보다 크기 때문에 신호가 기판으로 잘 통과하므로 다양한 주파수에서 공진이 발생하는 경향이 있다. FR4 기판의 반사 손실 특성에서 약 1.5GHz, 3.2GHz, 5.5GHz, 8GHz에서 공진이 발생하는 것을 확인할 수 있었다. 각각의 공진 주파수는 시뮬레이션 결과와 0에서 1.5GHz 정도 차이가 있으나 네 부분에서 공진이 발생한 것은 일치하였다. 듀로이드 기판은 유전상수가 작고 두께가 얇으며 GCPW를 적용하였기 때문에 상대적으로 유전상수가

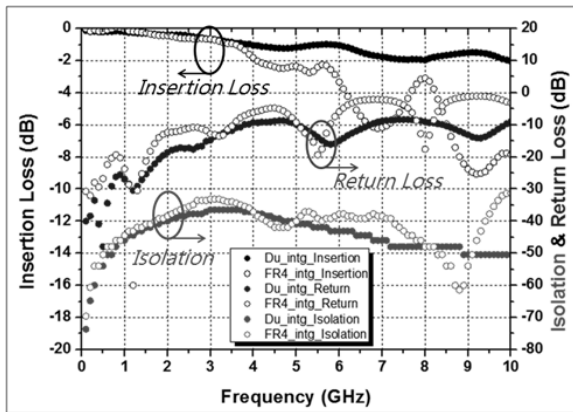


그림 4. 듀로이드 기판과 GCPW 조합, FR4 기판과 CPW 조합으로 이루어진 재배선층에 옴론 스위치와 컨버터를 이종 통합 방법으로 제작 후 측정된 결과

Fig. 4. Measured RF characteristics of hetero-integration of OMRON switch and converter using redistribution layers which are Duroid substrate and GCPW, FR4 substrate and CPW.

크고 두께가 두꺼우며 CPW 전송 선로를 적용한 FR4 기판보다 삽입 손실과 신호 분리도 특성이 우수한 것을 측정으로 확인하였다. 6GHz 대역에서 듀로이드와 GCPW 조합과 FR4와 CPW 조합의 순서로 삽입 손실은 각각 1.24dB 이하와 3.32dB 이하이고, 반사 손실은 각각 8.66dB 이상과 4.75dB 이상이며, 신호 분리도는 각각 36.48dB 이상과 33.15dB 이상으로 듀로이드가 FR4보다 우수한 경향성은 시뮬레이션과 일치하였다.

2. DC-DC 컨버터

표 3에 듀로이드, FR4 기판의 재배선층과 결합한 컨버터의 출력과 클럭 리플 특성을 정리하였다. 기판의 유전상수가 클수록 출력 전압이 작은 것을 확인하였다. 이를 통하여 기판의 유전상수가 클수록 기판으로의 손실이 큰 것을 확인할 수 있었다. 리플은 기판의 유전상수가 클수록 기판으로 전달되는 성분이 많아지고 서로 합성되어서 커지는 것을 확인할 수 있었다. 듀로이드 기판에서 리플의 크기는 시뮬레이션 결과보다 작지만 평균 노이즈 전력이 큰 이유는 듀로이드 기판의 리플은 ±20mV 영역에서 대부분 분포하고 그 수가 시뮬레이션의 경우보다 많기 때문이다. 그림 5에 정상 상태에서 듀로이드 기판과 FR4 기판에 대한 시간에 따른 리플 성분을 그래프로 나타내었다.

표 3. 듀로이드 기판과 GCPW 조합, FR4 기판과 CPW 조합의 재배선층의 컨버터 출력 특성

Table3. Converter output characteristics of RDLs which are Duroid with GCPW, and FR4 with CPW.

|                                       | Simulation                         | Duroid +GCPW          | FR4 +CPW               |
|---------------------------------------|------------------------------------|-----------------------|------------------------|
| Converter type                        | 12 stage Dickson charge pump, 1MHz |                       |                        |
| Converter Vout <sub>avg</sub> (V)     | 35.74                              | 34.82                 | 32.61                  |
| Converter ripple <sub>p-p</sub> (mV)  | 74.28 (-55.58 ~18.70)              | 66.68 (-22.66 ~44.02) | 121.10 (-65.02 ~56.04) |
| Average noise power(mV <sup>2</sup> ) | 13.60                              | 138.09                | 295.36                 |

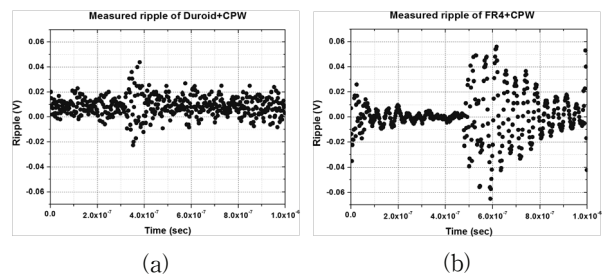


그림 5. 스위치 구동용 컨버터의 정상 상태 리플 성분 측정 결과 (a) 듀로이드와 GCPW (b) FR4와 CPW

Fig. 5. Measured ripple of converter, which is for switch operation, in steady state. (a) Duroid and GCPW (b) FR4 and CPW.

IV. 결 론

이종 통합 후 듀로이드와 GCPW 전송 선로 조합 재배선층의 고주파 특성이 FR4와 CPW 전송 선로 조합 재배선층의 고주파 특성보다 우수한 것을 제작 및 측정으로 확인하였다. 이종 통합 후 고주파 특성에서 공진이 발생하는 것을 확인하였으며 공진의 원인은 신호선 폭의 공정오차와 신호선과 접지 사이 간격의 공정 오차에 의한 임피던스 부정합이 주원인임을 확인하였다. 따라서 재배선층의 공진 현상은 전송 선로의 선폭과 간격에서의 공정 오차를 줄이는 것으로 개선 가능하다.

Dickson 전하 펌프를 열두 단으로 직렬 연결하여 DC-DC 컨버터를 제작하였으며 RF MEMS 스위치를 구동하였다. 유전 상수가 낮은 기판은 컨버터의 리플 영향을 줄이는 것을 확인하였다.

## REFERENCES

- [1] Rebeiz G M and Muldavin J B, "RF MEMS switches and switch circuits", IEEE Mircrow. Mag. 2, pp. 59-71, 2001.
- [2] Yeonsu Jang, et al., "An RF MEMS switch with a differential gap between electrodes for high isolation and low voltage operation", Journal of Micromechanics and Microengineering, Vol. 21, No. 7, pp. 075016, 2011
- [3] Nasser Kurd, et al, "Haswell: A Family of IA 22nm Processors", ISSCC 2014, pp. 112-114, 2014.
- [4] Bok Eng Cheah, et al, "Crosstalk Study of High Speed On-Package interconnects for Multi-Chip Package", Electromagnetic Compatibility(EMC), 2014 IEEE International Symposium on, pp. 381-385, 2014.
- [5] Yeonsu Jang, et al., "Four Channel Step Up DC-DC Converter for Capacitive SP4T RF MEMS Switch Application", IEEK Journals SD (Semiconductor & Device), pp. 93-100, 2009.
- [6] Raafat R. Mansour, "RF MEMS-CMOS Device Integration", IEEE Microwave Magazine, pp. 39-56, 2013.

---

## 저 자 소 개

---



장 연 수(정회원)

2006년 서울대학교 전기공학부 학사 졸업.

2017년 서울대학교 전기컴퓨터 공학부 박사 졸업.

2017년 현재 SK 하이닉스(주) DRAM설계본부 연구원.

<주관심분야: 반도체, MEMS, 집적회로 설계, Packaging>



양 우 진(학생회원)

2014년 POSTECH 전자전기공학과 학사 졸업.

2017년 현재 서울대학교 전기·정보공학부 석사 재학 중.

<주관심분야: MEMS, 반도체>



전 국 진(정회원)

1977년 서울대학교 전자공학과 학사 졸업.

1981년 University of Michigan 전자공학과 석사 졸업.

1986년 University of Michigan 전자공학과 박사 졸업.

2017년 현재 서울대학교 전기·정보공학부 교수.

<주관심분야: 반도체, MEMS, Packaging, RF>