

논문 2008-45SD-4-2

Comb drive를 이용한 RF MEMS 스위치에 관한 연구

(A Study on RF MEMS Switch with Comb Drive)

강 성 찬*, 김 현 철**, 전 국 진***

(Sungchan Kang, Hyeon Cheol Kim, and Kukjin Chun)

요 약

본 논문에서는 comb drive를 이용하여 수평 방향 저항 접촉 방식의 RF MEMS 스위치 개발을 소개한다. 무선통신 트랜시버에서 사용되는 FEM에서 사용될 수 있는 높은 안전성과 좋은 RF 특성을 가지는 스위치의 개발을 목표로 한다. 따라서 작은 삽입손실 특성을 가지기 위해 comb drive를 이용하여 큰 접촉 힘을 발생시키고, 큰 격리도 특성을 가지기 위해 스위치 off 상태에서 작은 정전용량을 갖도록 한다. 그리고 단결정 실리콘을 스위치의 구조물로 사용함으로써 기계적인 안전성을 갖도록 한다. 개발된 RF MEMS 스위치는 26 V의 동작 전압을 가지며, 2 GHz에서 0.44 dB 이하의 삽입손실과 60 dB 이상의 격리도 특성을 가진다.

Abstract

This paper presents a lateral resistive contact RF MEMS switch using comb drive. Our goal was to fabricate the RF MEMS switch with high reliability and good RF characteristics for front end module in wireless transceiver system. Therefore, comb drive is used for large contact force in order to achieve low insertion loss and small off-state capacitance in order to achieve high isolation. The single crystalline silicon is used for mechanical reliability. As a result, the developed switch showed insertion loss less than 0.44 dB at 2 GHz, isolation greater than 60 dB, and low actuation voltage at 26 V.

Keywords : comb drive, lateral resistive contact, RF MEMS switch, single crystalline silicon

I. 서 론

다양한 멀티미디어 서비스를 위한 무선 통신 시스템의 개발이 활발히 이루어지고 있다. 이를 위해 RF 부품에 대한 많은 연구가 이루어지고 있으며, 특히 MEMS 기술을 이용한 개발이 활발히 진행되고 있다. 1990년 Hughes Research Lab's에서 마이크로파 스위치가 개

발된 이래, MEMS 스위치에 대한 많은 연구가 진행됨과 동시에 상업화를 위한 노력이 기울여지고 있다^[1]. RF MEMS 스위치는 reconfigurable networks, mobile switch plexer, phase shifter 등과 같이 많은 분야에 응용되고 있다^[2]. 기존에 스위치로 많이 이용되던 GaAs FET나 p-i-n diode 스위치보다 MEMS 스위치는 더 좋은 RF 특성과 선형성을 가진다. 이러한 장점으로 인해 MEMS 스위치에 대한 연구와 상업화가 가속화되고 있다^[3]. 그러나 그동안 개발된 MEMS 스위치는 몇 가지 문제점을 지니고 있다. 좋은 RF 특성을 가지기 위해 높은 동작 전압을 필요로 하며, 또한 기계적인 안전성이 떨어진다^[4]. 따라서 comb drive를 이용하여 좋은 RF 특성을 가짐과 동시에 낮은 동작 전압으로 구동시키고자 한다. 그리고 단결정 실리콘을 사용하여 스위치의 기계적인 안전성을 향상시키고자 한다.

* 학생회원, *** 정회원, 서울대학교 전기컴퓨터공학부, 반도체공동연구소

(School of Electrical Engineering and Computer Science, Seoul National University, Inter-university Semiconductor Research Center)

** 정회원, 울산대학교 전기전자정보시스템공학부 (School of Electrical Engineering, Ulsan University)

※ 본 연구는 산업자원부의 차세대 무선통신용 트랜시버시스템 개발 사업으로 수행되었음.

접수일자: 2007년12월12일, 수정완료일: 2008년3월31일

II. 디자인 및 공정

1. 스위치 디자인

저항 접촉 방식의 스위치가 좋은 RF 특성을 가지기 위해서는 두 가지를 만족하여야 한다. 낮은 삽입 손실 특성을 얻기 위해 큰 접촉 힘을 발생시켜야 하며, 높은 격리도 특성을 얻기 위해 스위치 off 상태에서 작은 정전 용량을 가져야 한다^[5]. 하지만 그동안 개발된 평행한 두 평판 사이에 발생하는 정전력을 이용한 스위치의 경우 RF 특성과 동작 전압 사이에 이율배반 관계를 가진다. 초기 두 평판 사이에 간격이 큰 경우 높은 격리도 특성을 얻을 수 있으나 동작 전압이 커진다. 반대로 동작 전압을 낮추기 위해 두 평판 사이에 초기 간격을 작게 하면 격리도 특성이 저하된다^[6]. 이러한 문제점을 해결하기 위해 comb drive를 이용하여 스위치를 구동하고자 한다. Comb drive의 경우 초기 발생하는 힘과 움직이는 방향으로의 초기 간격이 상관이 없으므로, 격리도 특성과 동작 전압 사이에 이율배반 관계가 없다. 그리고 comb drive 사이의 간격을 줄인다면 상대적으로 낮은 동작 전압으로 큰 동작 힘을 발생시킬 수 있고 낮은 삽입 손실 특성도 얻을 수 있다.

그리고 스위치 구조물로 단결정 실리콘을 사용함으로써 기계적인 안전성을 확보할 수 있다. 왜냐하면 그동안 스위치 구조물로 많이 사용되던 얇은 금속 박막에 비해 잔류 응력이 매우 작기 때문이다^[7]. 그리고 표면 미세 가공 대신 기판 미세 가공을 사용할 수 있고, 수평 방향 동작을 구현할 수 있다^[8].

그림 1에 제안된 RF MEMS 스위치의 모식도를 나타내었다. 한 개의 RF input과 한 개의 RF output이 있으며, 직류 전압을 가하고 접지를 할 수 있는 패드가 있다. 직류 전압을 가하면 comb 사이에 정전력이 발생하여 동작 comb 부분이 움직이고 접촉이 일어난다. 따

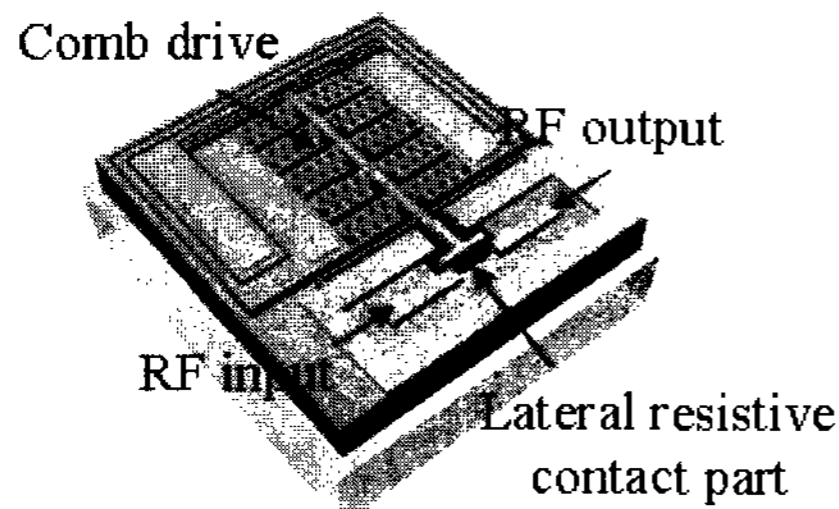


그림 1. 제안된 comb drive를 이용한 RF MEMS 스위치의 모식도

Fig. 1. Schematic of the RF MEMS switch with comb drive.

라서 스위치는 on 상태가 된다. 반대로 직류 전압이 제거되면 동작 comb이 제자리로 돌아오고, 스위치는 off 상태가 된다.

ANSYS를 이용하여 기계적인 시뮬레이션을 수행하였다^[9]. 10.8 KHz의 공진 주파수를 가지며, 스프링 계수는 30 N/m이다. 그리고 Ansoft HFSS를 이용하여 전자기장 시뮬레이션을 수행하였다. 2 GHz에서 0.1 dB 이하의 삽입손실 특성과 51 dB 이상의 격리도 특성을 가졌다.

2. Comb drive

제안된 스위치는 동작(movable) comb과 정지(stationary) comb 사이에 발생하는 정전력을 이용한다. 그림 2는 제안된 comb drive를 나타낸다. 동작 comb과 정지 comb 사이에 전압차가 발생하면 정전력이 발생하게 되고 서로를 끌어당긴다. 동작 comb과 정지 comb 사이의 전압차(V)가 증가할수록 정전력은 증가하며, 또한 comb의 개수(N)와 comb의 높이(h)가 증가할수록 정전력이 증가한다. 반대로 comb 사이의 간격(g)이 감소할수록 정전력은 증가한다.

Comb drive에 의해 유도된 초기 정전력은 움직이는 방향으로의 초기 간격과 상관이 없다. 왜냐하면 유도되는 정전력은 comb 사이의 간격에 의한 힘이 대부분이기 때문이다. 하지만 동작 comb이 움직여서 comb의 끝부분과 반대편 벽면 사이의 간격이 줄어들면, 그 사이에 발생하는 정전력을 무시할 수 없으며 고려해야 한다. 이러한 효과는 동작 거리가 커질수록 힘의 증가를 가져오고 접촉 힘을 증가시킬 수 있다.

Comb의 너비(w)와 동작 거리(d)를 고려하여 발생하는 정전력을 유도해 보면 다음과 같다.

$$F_e = \frac{1}{2} \frac{\epsilon_0 h}{g} (2N)V^2 + \frac{1}{2} \frac{\epsilon_0 w h}{(d_i - d)^2} (2N)V^2 \quad (1)$$

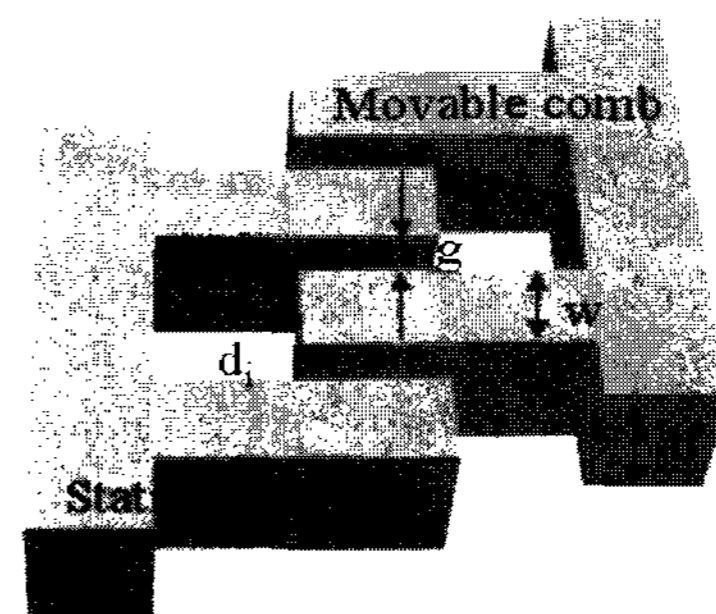


그림 2. 제안된 comb drive의 모식도

Fig. 2. Schematic of the comb drive.

초기에 발생하는 정전력은 $1/g$ 값이 $w/(d_i - d)^2$ 값에 비해 상대적으로 많이 크므로 식 (1)의 두 번째 항은 무시할 수 있다. 따라서 초기 발생하는 정전력은 d_i 값과 상관이 없음을 알 수 있고, 격리도 특성을 좋게 하기 위한 초기 간격 d_i 값을 얻을 수 있다. 하지만 d 값이 커지면 두 번째 항을 무시할 수 없으며, 정전력은 증가하게 된다. 평행한 두 평판 사이에 발생하는 정전력을 이용하는 스위치의 경우는 식 (1)에서 두 번째 항만이 존재한다. Comb drive의 경우는 첫 번째 항이 추가되어, 동일한 격리도를 유지하는데 있어 상대적으로 작은 동작 전압이 필요함을 알 수 있다.

그림 3에 시뮬레이션 결과와 식 (1)과 같이 모델링한 결과를 나타내었다. Ansoft Maxwell을 이용하여 시뮬레이션을 수행하였다. Comb 사이의 간격(g)은 $1.5 \mu\text{m}$ 이고, comb 의 높이(h)는 $50 \mu\text{m}$, comb의 너비(w)는 $2 \mu\text{m}$ 로 디자인 되었다. Comb의 총 개수(N)는 1200개이며, 동작전압은 15 V로 디자인 되었다. 동작 comb의 동작 거리가 $3 \mu\text{m}$ 일 때, 발생하는 정전력은 $250 \mu\text{N}$ 이며, 스프링에 의한 복원력은 $90 \mu\text{N}$ 이다. 따라서 접촉힘은 약 $160 \mu\text{N}$ 이며, 이것은 Au와 Au 접촉 되었을 때 작은 삽입소실 특성을 얻는데 충분하다^[10].

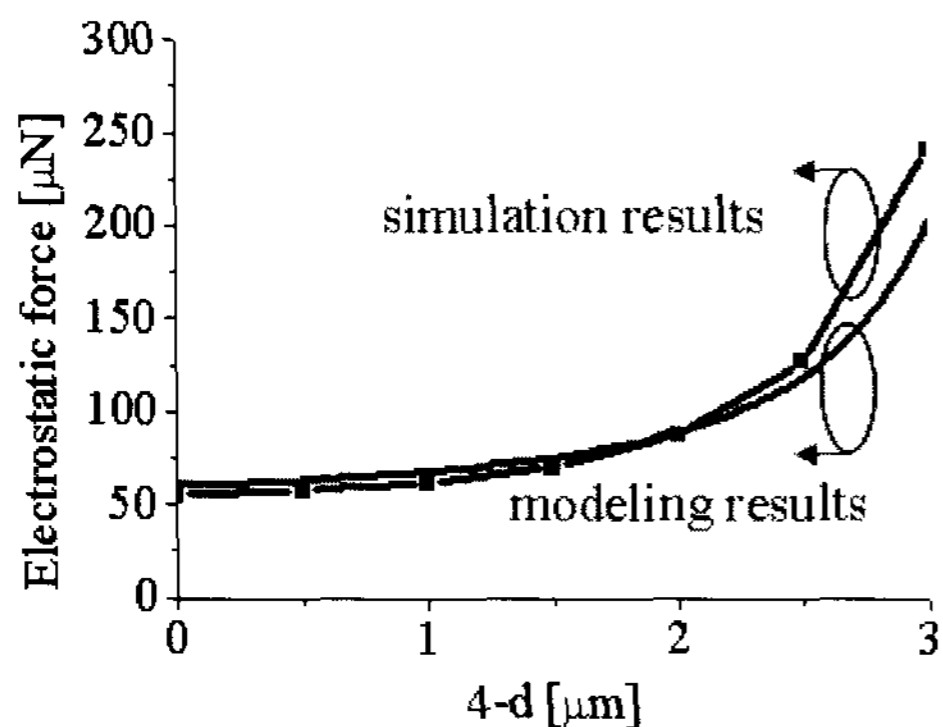


그림 3. Comb drive에서 발생하는 정전력의 시뮬레이션과 모델링 결과

Fig. 3. Simulation and modeling results of electrostatic force.

3. 공정

정 순서를 그림 4에 나타내었다. 총 4장의 포토 마스크가 사용되었다. 스위치 구조물의 동작을 위해 실리콘과 유리 기판 사이에 간격을 형성해야 하므로 실리콘 웨이퍼를 $10 \mu\text{m}$ 식각한다. 그리고 실리콘 웨이퍼와 유리 기판을 anodic 본딩을 이용하여 접합한다. 스위치 구조물의 높이가 $50 \mu\text{m}$ 이고 구조물과 유리 기판 사이

의 간격이 $10 \mu\text{m}$ 이므로 실리콘 웨이퍼를 $60 \mu\text{m}$ 만 남기고 CMP(Chemical Mechanical Polishing)를 통해 얇게 만든다. 실리콘 웨이퍼 위에 TEOS(Tetraethyl orthosilicate)를 증착하고 건식식각으로 패터닝한다. TEOS 막은 두 가지 역할을 하는데, 신호선과 실리콘 웨이퍼 사이에 절연체 역할과 deep Si etch시 마스크 물질로 사용된다. 다음으로 Cr/Au seed 막을 증착한 뒤 Au 도금 과정을 통해 신호선과 전압인가 패드를 형성한다. Cr/Au seed 막을 제거한 후 TEOS를 습식식각을 이용해 다시 한 번 패터닝한다. 그 이유는 신호선과 접촉하는 금속 부분 사이에 발생하는 정렬 오차를 없애기 위함이다. 이미 생성되어 있는 신호선과 접촉 금속 부분을 마스크 물질로 사용하여 TEOS를 습식식각하면

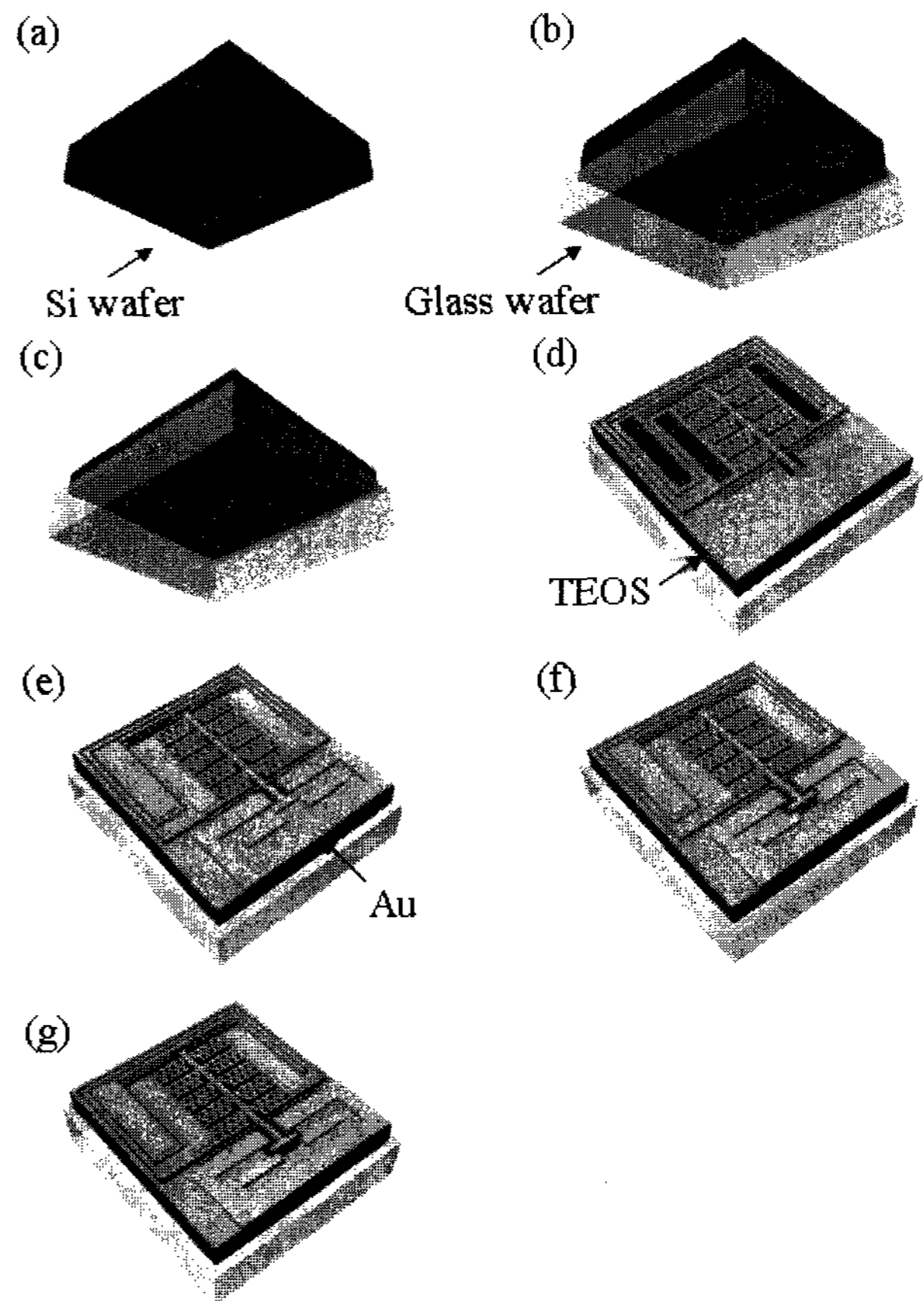


그림 4. 공정 순서: (a) 실리콘 웨이퍼 식각을 통한 간격 형성 (b) 실리콘/유리 기판 anodic 본딩 (c) 실리콘 웨이퍼 얇게 가공 (d) TEOS 박막 증착 및 패터닝 (e) 신호선 및 전압 패드 형성 (f) TEOS 박막 패터닝 (g) Deep Si etch

Fig. 4. Process flow: (a) Air gap formation on the silicon wafer (b) Silicon/glass wafer anodic bonding (c) Silicon wafer thinning (d) Oxide layer deposition and patterning (e) CPW & contact metal formation (f) Oxide patterning (g) Deep silicon etch and cleaning.

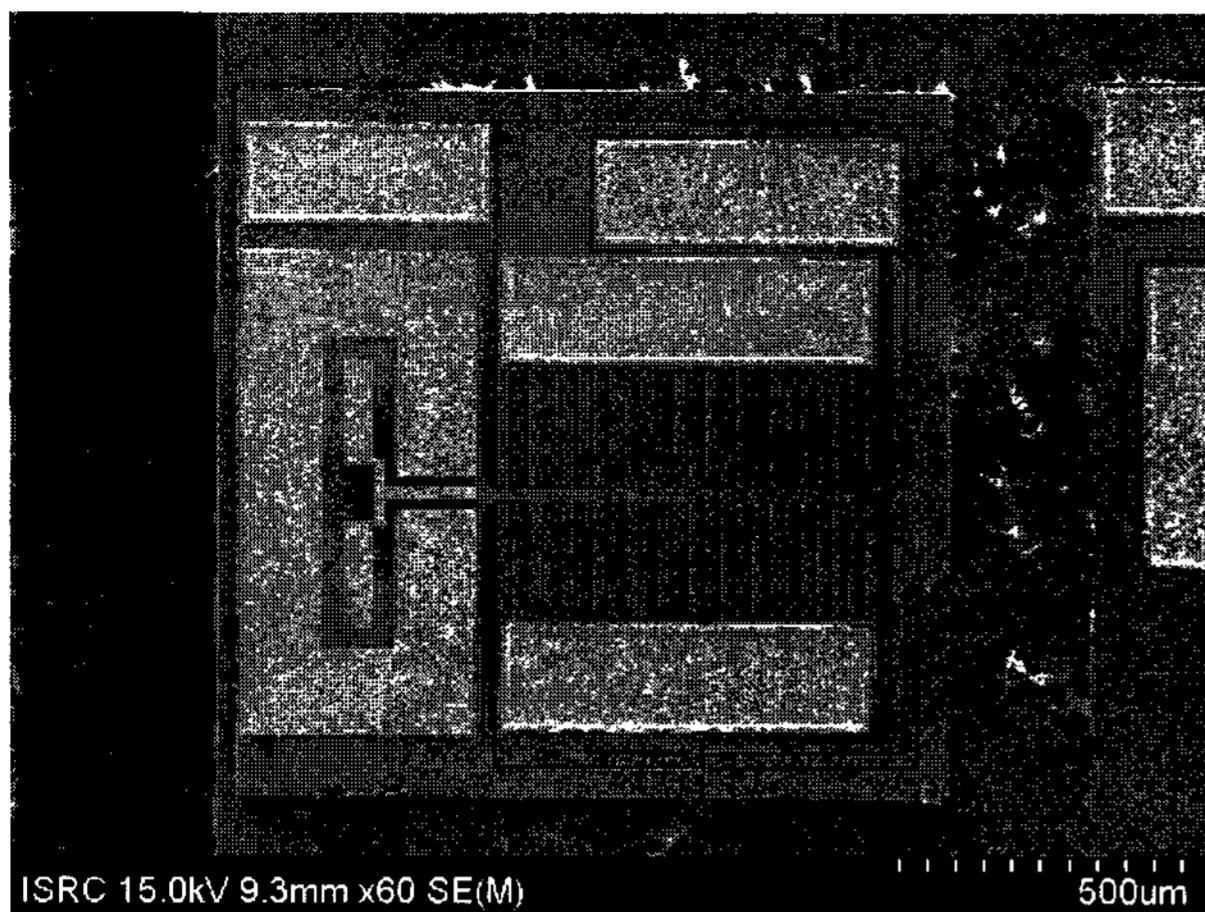
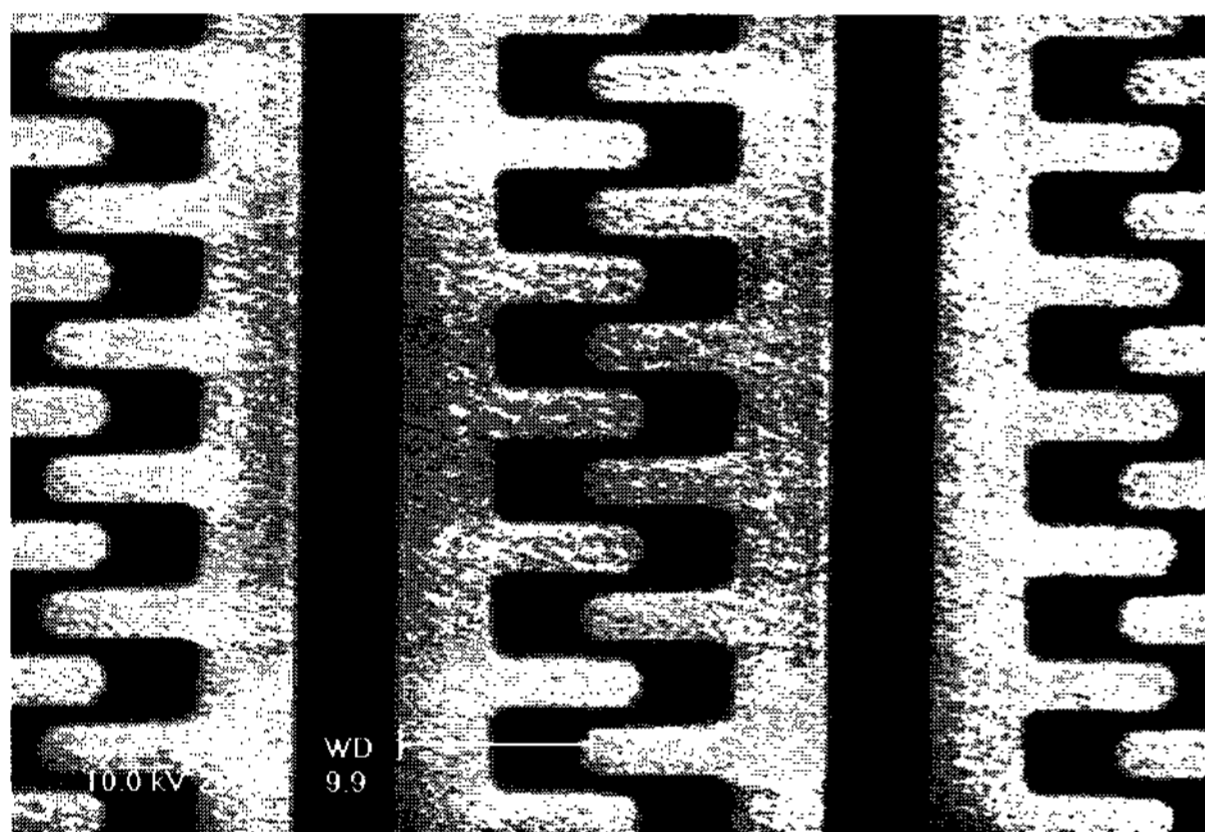
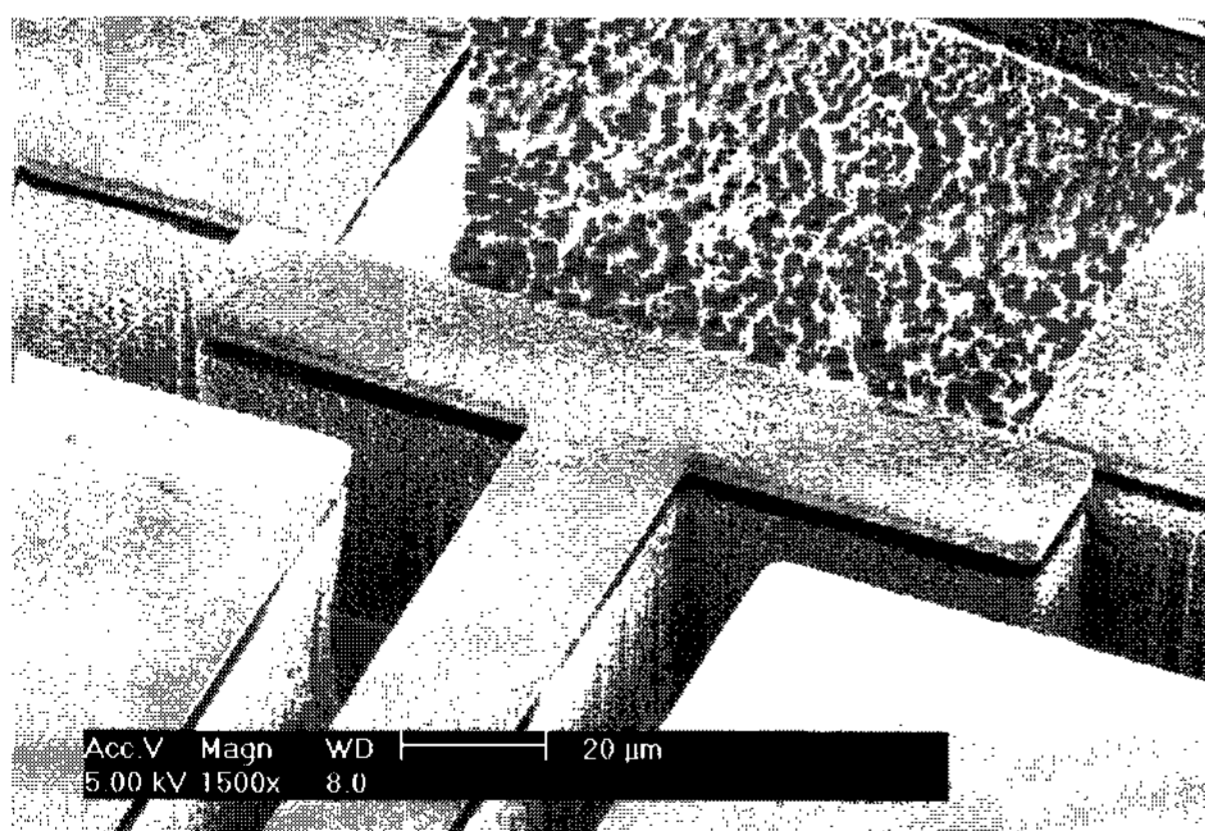


그림 5. 제작된 RF MEMS 스위치의 SEM 사진
Fig. 5. SEM image of the RF MEMS switch.



(a)



(b)

그림 6. (a) Comb drive의 SEM 사진,
(b) 접촉 부분의 SEM 사진
Fig. 6. SEM image of (a) the comb drive,
(b) contact part.

정렬 오차가 없기 때문이다. 마지막으로 deep Si etch를 통해 스위치를 완성한다.

그림 5 와 6에 제작된 스위치의 SEM 사진을 나타내었다. 그림 5에서 제작된 RF MEMS 스위치의 전체 모

습을 볼 수 있으며, 그림 6에서는 comb drive를 확대한 모습과 접촉이 일어나는 부분을 볼 수 있다.

III. 측정 결과 및 분석

1. 측정 결과

Hewlett Packard 8510C를 이용하여 측정을 하였다. 그림 7에 측정을 위한 장치를 나타내었다.

그림 8에 측정된 RF 특성을 나타내었다. 동작 전압은 26 V이며, 2 GHz에서 삽입손실은 0.44 dB 이하, 격리도는 60 dB이상이다.

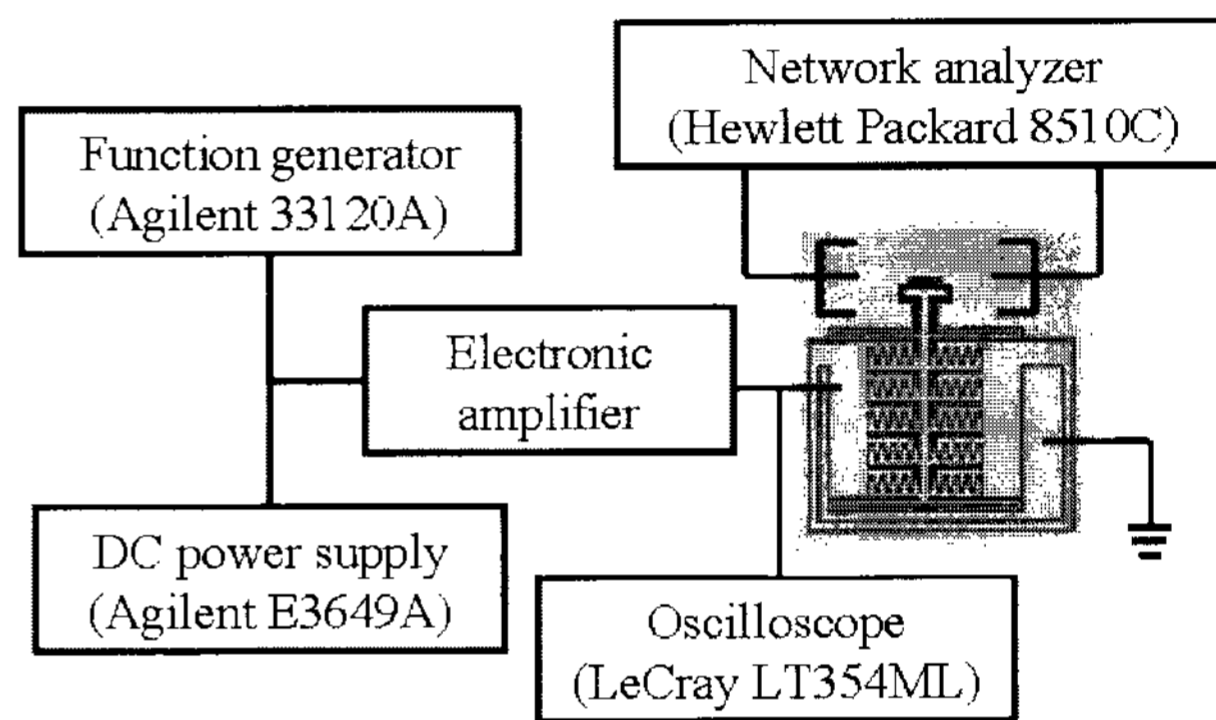


그림 7. 측정 장치 구성도
Fig. 7. Measurement equipment setup.

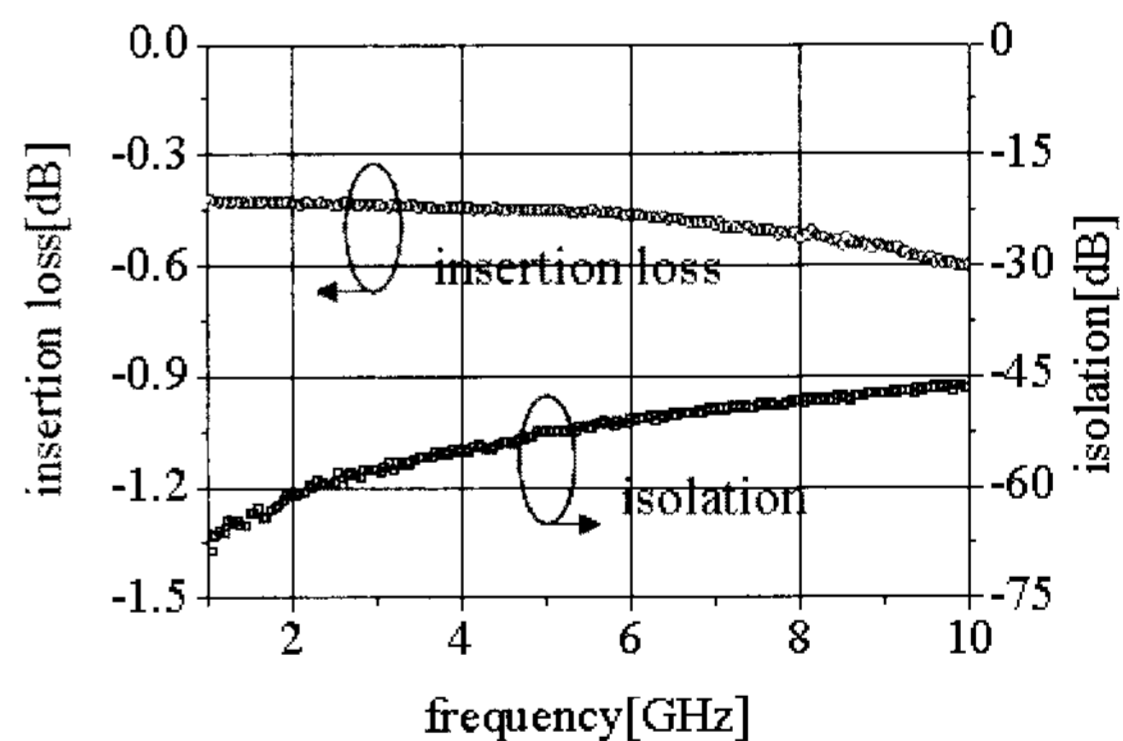


그림 8. 제작된 RF MEMS 스위치의 RF 특성 측정 결과
Fig. 8. RF characteristics of the RF MEMS switch.

2. 분석

동작 전압이 시뮬레이션 한 값보다 크게 나왔는데 그 이유는 다음과 같다. Deep Si etch 과정에서 수직 방향으로의 식각 측면도가 수직이 아니다. 즉, 식각 측면도가 기울어져 아랫방향으로 갈수록 comb 사이의 간격이 넓어진다. 그림 9에 식각 측면도에 따른 정전력을 나타내었다. 식각 측면도가 수직이 아닌 경우 초기 발생하

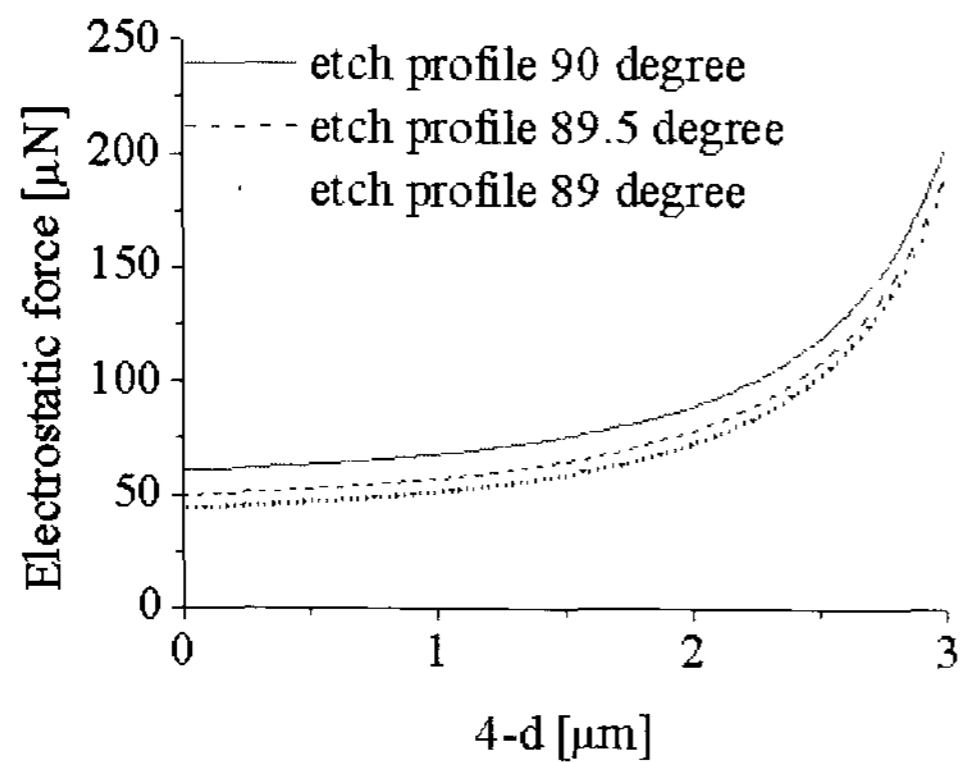


그림 9. 식각 프로파일에 따른 정전력 시뮬레이션 결과
Fig. 9. Simulation results of electrostatic force versus etch profile.

는 정전력에 많은 차이가 있음을 알 수 있다. 따라서 동작 전압의 증가를 유발하였다.

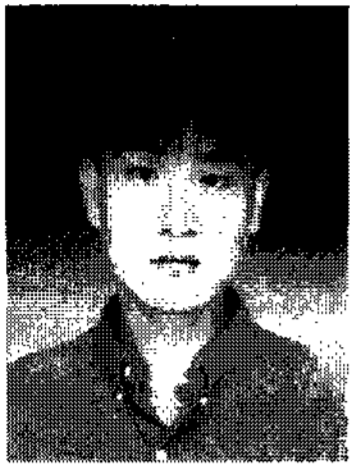
IV. 결 론

Comb drive를 이용하여 수평 방향 저항 접촉식 RF MEMS 스위치를 제작하였다. Comb drive를 이용하여 평행한 두 평판을 이용할 경우 발생하는 동작 전압과 RF 특성 사이에 발생하는 이율배반 관계를 극복하였다. 결과적으로 26 V의 동작 전압을 가지고, 2 GHz에서 0.44 dB 이하의 삽입 손실과 60 dB이상의 격리도 특성을 가졌다. 그리고 단결정 실리콘을 사용하여 기계적으로 안정한 스위치를 제작할 수 있었다.

참 고 문 헌

- [1] L. E. Larson, R. H. Hackett, M. A. Melendes, and R. F. Lohr, "Micromachined microwave actuator (MIMAC) technology—a new tuning approach for microwave integrated circuits", in *IEEE Microwave and Millimeter-Wave Monolithic Circuits Symposium Digest*, pp. 27-30, Boston, MA, USA, June 1991.
- [2] Hector J. De Los Santos, Georg Fischer, Harrie A.C. Tilmans, Joost T.M. van Beek, "RF MEMS for Ubiquitous Wireless Connectivity", *IEEE Microwave Magazine*, Vol. 4, no. 5, pp. 36-49, December 2004.
- [3] Gabriel M. Rebeiz, Jeremy B. Muldavin, "RF MEMS Switches and Switch Circuits", *IEEE Microwave Magazine*, Vol. 2, no. 4, pp. 59-71, December 2001.
- [4] Linda P. B. Katehi, James F. Harvey, and Elliott Brown, "MEMS and Si Micromachined Circuits for High-Frequency Applications", *IEEE Transaction on Microwave Theory and Techniques*, Vol. 50, no. 3, pp. 858-866, March 2002
- [5] Guan-Leng Tan and Gabriel M. Rebeiz, "A DC-Contact MEMS Shunt Switch", *IEEE Microwave and Wireless Component Letters*, Vol. 12, No. 6, pp. 212-214, June 2002.
- [6] N. Nishijima., Juo-Jung Hung, G. M. Rebeiz, "A low-voltage high contact force RF-MEMS switch", *IEEE Transaction on Microwave Theory and Techniques*, Vol. 2, No. 2, pp. 577-580, June 2004.
- [7] M. Sakata, Y. Komura, T. Seki, K. Kobayashi, K. Sano, S. Horiike, "Micromachined relay which utilized single crystal silicon electrostatic actuator", *12th IEEE International Conference on Micro Electro Mechanical Systmes, (MEMS '99)*, pp.21-24, Orlando, FL, USA, January 1999.
- [8] R. E. Mihailovich, M. Kim, J. B. Hacker, E. A. Sovero, J. Studer, J. A. Higgins, and J. F. Denatale, "MEM relay for reconfigurable RF circuits", *IEEE Microwave Wireless Component Letters*, Vol. 11, no. 2, pp. 53-55, February 2001.
- [9] Il-Joo Cho, Taeksang Song, Sang-Hyun Baek, Euisik Yoon, "A Low-Voltage and Low-Power RF MEMS Series and Shunt Switches Actuated by Combination of Electromagnetic and Electrostatic Forces", *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, Vol. 53, no. 7, pp. 2450-2457, July 2005.
- [10] Joachim Schimkat, "Contact Materials for Microrelays", *11th IEEE International Conference on Micro Electro Mechanical Systems, (MEMS '98)*, pp.190-194, Heidelberg, Germany, January 1998.

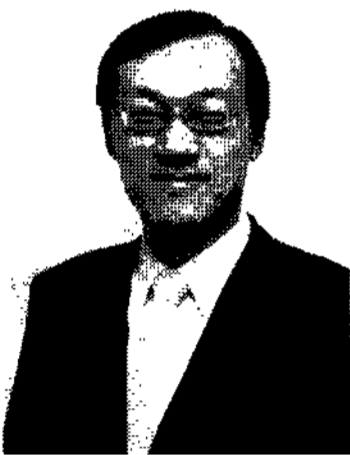
저 자 소 개



강 성 찬(학생회원)
 2004년 서울대학교 기계항공
 공학부 학사 졸업.
 2008년 현재 서울대학교
 전기컴퓨터공학부 석박사
 통합 과정.
 <주관심분야 : 반도체, MEMS,
 Packaging>



김 현 철(정회원)
 1990년 서울대학교 전자공학과
 학사 졸업.
 1992년 서울대학교 전자공학과
 석사 졸업.
 1998년 서울대학교 전자공학과
 박사 졸업.
 2008년 현재 울산대학교 전기전자정보시스템
 공학부 교수.
 <주관심분야 : 반도체, MEMS, Packaging>



전 국 진(정회원)
 1977년 서울대학교 전자공학과
 학사 졸업.
 1981년 University of Michigan
 전기공학과 석사 졸업.
 1986년 University of Michigan
 전기공학과 박사 졸업
 2008년 현재 서울대학교 전기컴퓨터공학부 교수
 <주관심분야 : 반도체, MEMS, Packaging, RF>