

연성회로기판에 실장된 실리콘 기반의 유연 촉각센서 어레이 제작 및 평가

김건년^{*,**†} · 김용국^{**} · 이강열^{*} · 조우성^{**} · 이대성^{*} · 조남규^{*}
김원호^{*} · 박정호^{***} · 김수원^{**} · 주병권^{***}

Development of silicon based flexible tactile sensor array mounted on flexible PCB

K-Kim^{*,**†}, Y-K Kim^{**}, K-R Lee^{*}, W-S Cho^{**}, D-S Lee^{*}, N-K Cho^{*},
W-H Kim^{*}, J-H Park^{***}, S-W Kim^{**}, and B-K Ju^{***}

Abstract

We presented that fabrication process and characteristics of 3 axes flexible tactile sensor available for normal and shear force fabricated using Si micromachining and packaging technologies. The fabrication processes for 3 axes flexible tactile sensor were classified in the fabrication of sensor chips and their packaging on the flexible PCB. The variation rate of resistance was about 2.1 %/N and 0.5 %/N in applying normal and shear force, respectively. The flexibility of fabricated 3 axes flexible tactile sensor array was good enough to place on the finger-tip.

Key Words : flexible tactile sensor, FPCB, normal and shear force, package

1. 서 론

인간을 대신할 수 있는 원격 매니퓰레이터(manipulator), 지능형 로봇, 인간친화형 haptic interface 그리고 원격 의료 및 시술 분야의 연구에 있어서 소형이면서 초정밀의 미세 촉각 센서는 매우 중요한 요소이다^{1,2}. 앞으로 인간형 로봇이 좀 더 발전하게 되면 사람 및 주변 환경과의 원활한 상호작용을 위해 촉각의 감각이 필요하게 될 것이며, 또한 로봇의 손가락처럼 굴곡의 표면에 센서를 장착하기 위해서는 유연한 소자의 개발이 필요하다.

로봇이 물체의 질감을 감지하기 위해서는 수직력 및 미끄러지는 정도 즉 전단력을 감지할 수 있는 미세한 3축 힘센서 기능이 중요하며 이와 동시에 넓은 면적을

측정할 수 있는 고성능의 미세 촉각센서의 개발이 요구되고 있다. 따라서 최근 몇몇 연구자들은 미세소자 제작이 가능한 마이크로머시닝 기술을 이용하여 실리콘 기반 촉각센서를 개발하고 있다³⁻⁵. 그러나 아직까진 접촉력에 대한 정보만을 감지할 수 있도록 제작되었기 때문에 외부물질에 대한 정보획득에 제한적이다. 또한 이들은 실리콘 기판을 이용하기 때문에 유연하지 않고 넓은 면적의 센서를 제작하기 힘든 단점을 가지고 있다.

따라서 본 연구에서는 단축 및 3축 힘을 모두 측정할 수 있으며 또한 유연성을 가지고 있어서 굴곡이 있는 면이나 인간형 로봇의 손가락에 장착 할 수 있는 실리콘 기반의 웨이퍼 레벨 촉각 센서 모듈 어레이를 MEMS 기술을 이용하여 제작하였다. 또한 촉각센서 어레이 신호처리를 위하여 다채널 어레이 신호처리 시스템을 제작하고 센서와 연동하여 테스트를 하였다.

2. 본 론

2.1. 촉각센서 디자인

그림 1은 본 연구에서 제안한 촉각센서의 개념도를

^{*}전자부품연구원 나노메카트로닉스 연구센터 (Nano Mechatronics Research Center, Korea Electronics Technology Institute)

^{**}고려대학교 전자공학과 (Dept. of Electronics and Computer Engineering, Korea University)

^{***}고려대학교 전기전자전파공학부 (School of Electrical Engineering, Korea University)

[†]Corresponding author: kimkn@keti.re.kr

(Received : January 26, 2006, Accepted : March 29, 2006)

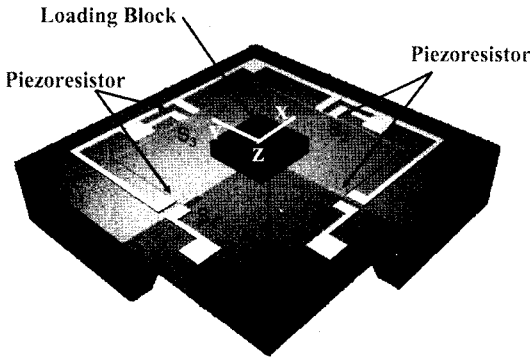


그림 1. 촉각센서 시스템 개념도
Fig. 1. Schematic of tactile sensor system.

보여주고 있다. 압저항체는 이온 주입 공정을 통해 제작되었으며 압저항체가 받는 응력이 최대가 되도록 다이아프램 변에 위치하게 하였다. 또한 외부의 힘을 압저항체에 전달하기 위해 접촉력 전달 기둥인 로딩 블록(loadung block)을 SU-8 포토레지스터로 제작하였다. 촉각 센서의 저항 변화를 측정하기 위하여 측정 시스템을 구성하였으며 시스템은 크게 촉각센서 어레이, 저항 크기 변화를 감지하는 아날로그 신호처리 부분, 촉각 감지소자의 전기적 신호를 외부로 연결시켜 주는 회로 보드로 구성되어 있다. 하나의 3축 센서 모듈은 16(4×4)개의 단위센서 배열로 이루어져 있고, 공간 분해능은 2 mm로 설계되었다. 3축 단위 셀의 크기는 1.7 mm×1.7 mm이며 하나의 센서 모듈의 크기는 7.7 mm×7.7 mm이다.

P-Si (100)면 위에 <110>방향으로 n형 압저항을 형성할 때, 다이아프램 변위의 응력분포는 다이아프램 변의 중심에서 최대가 되므로 압저항체가 받는 응력이 최대가 되려면 압저항체를 다이아프램 변의 중심, 즉 <110> 방향으로 놓이도록 하여야 한다. 다이아프램 변에 수직 한 두 개의 저항체는 인가하는 응력에 대해 저항값이 증가하는 방향으로 변하게 되고, 수평한 두 개의 저항체는 응력에 대해 감소하는 방향으로 변하게 되므로 출력 신호를 가장 크게 할 수 있다. 즉 z축으로 인가하는 응력의 경우 네 개 저항체들의 저항변화량을 합하면 구할 수 있다. 또한 x축으로 인가하는 응력의 경우는 S1과 S3의 저항은 변화가 없다고 가정하고 S2와 S4의 저항변화량 차이로 그리고 y축으로 인가하는 응력의 경우는 마찬가지로 S1과 S3의 저항변화량 차이로 구할 수 있다.

2.2. 촉각센서 제작

촉각센서는 접촉력 전달매체가 외부와의 1차 접촉

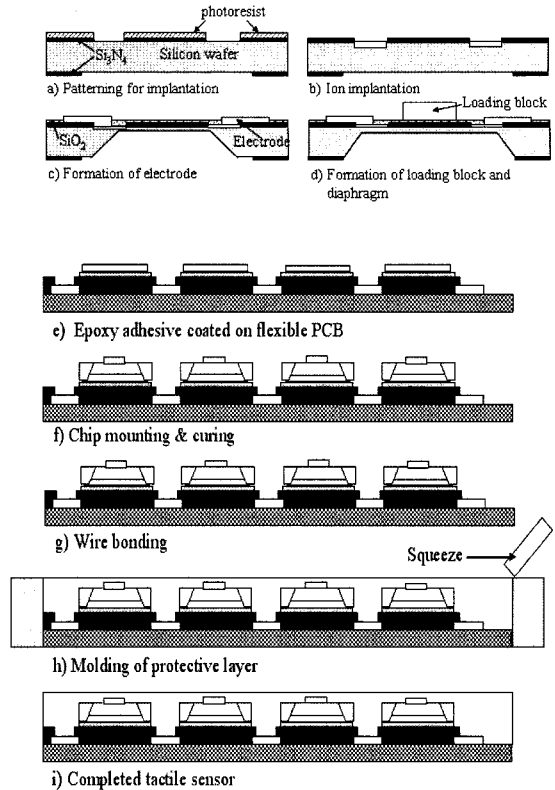


그림 2. 제안된 촉각센서의 공정도
Fig. 2. Fabrication process of tactile sensor.

으로 접촉력을 받아 접촉력 전달 기둥(SU-8, loading block)으로 전달하게 되고, 그 다음 실리콘 다이아프램이 접촉력을 전달받게 되면, 다이아프램이 변형되어 응력이 발생된다. 응력이 가장 크게 나타나는 부분에 이온주입 공정으로 압저항을 형성하게 되면 응력변화에 비례하여 저항의 크기가 변하게 된다. 이러한 저항 크기의 변화를 아날로그 신호처리부가 감지하여 접촉력의 크기를 감지하게 된다.

촉각센서의 제작 공정은 그림 2와 같다. P-type의 4인치 실리콘 웨이퍼(t=500 μm, double side polished, ρ=1-2 Ω·cm)위에 질화막(2000 Å)을 LPCVD 공정을 이용하여 증착하였다. 다이아프램 제작을 위한 식각창을 형성한 후, 웨이퍼 앞면에 이온 주입을 위한 압저항 패턴을 형성하였다(그림 2(a)). 압저항 형성은 이온 주입을 통해 이루어졌으며 목표 면저항은 200 Ω/□이다. Phosphorus 도핑은 40 KeV의 에너지로 phosphorus를 주입한 후 질소 분위기 하에서 1100 °C 온도에서 50분간 어닐링을 통해 수행되었다(그림 2(b)). PECVD를 이용하여 저온 산화막을 증착 패터닝 후 전극용으로

Cr(300 Å)/Au(3000 Å) 박막을 증착하였다(그림 2(c)). 하중불러인 범프층을 생성하기 위하여 negative SU-8 포토레지스트를 원하는 두께(50 μm) 만큼 스펀코팅하고 굳혀서 제작하였다. 다이아프램을 제작하기 위해 KOH 용액에서 실리콘을 식각하였으며 실리콘 웨이퍼 위의 소자가 손상이 가지 않도록 테프론으로 제작된 웨이퍼 레벨용 지그를 사용하였다(그림 2(d)). 웨이퍼 레벨로 제작된 촉각센서를 어레이별로 다이싱을 하고 연성회로기판에 집적화시키기 위하여 회로기판위에 에폭시를 코팅한 후(그림 2(e)), 어레이 칩을 붙인 후 일정 온도에서 어닐링을 하여 칩이 기판에서 분리되지 않도록 하였다(그림 2(f)). 이후에 촉각 센서에 유연성을 주기 위하여 어레이별로 부착된 소자를 단위 칩으로 다이싱을 하였으며 와이어 본딩 공정을 통해 회로기판과 전기적 연결을 하였다(그림 2(e)). 마지막으로 제작된 센서를 외부 환경으로부터 보호하기 위하여 실리콘 러버를 코팅하여 보호막으로 사용하였다(그림 2(f)).

그림 3은 웨이퍼 레벨로 제작된 단축 및 3축의 촉각센서와 센서 어레이를 보여주는 그림이다. 하나의 센서

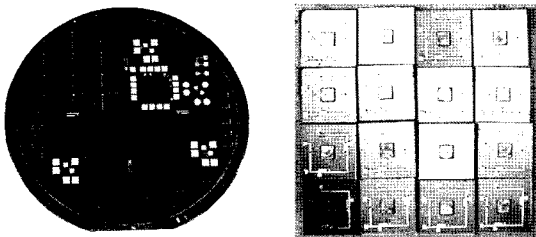


그림 3. 제작된 촉각센서 및 단위 칩
Fig. 3. Photograph of wafer-level tactile sensor and tactile sensor chips fabricated through dicing process.

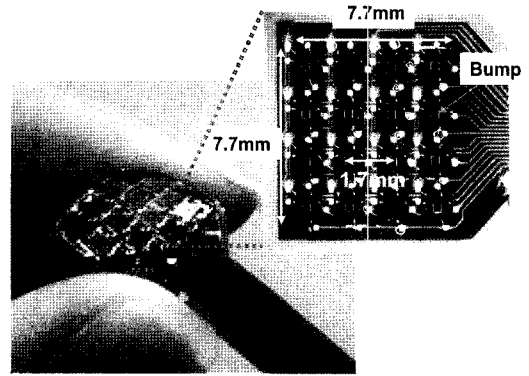


그림 4. 연성회로기판에 집적된 촉각센서
Fig. 4. Photograph of flexible tactile sensor array mounted and wired on the flexible PCB.

칩 크기는 1.7 mm×1.7 mm이며 한 셀당 4개의 압저항체로 구성되어 있다. 촉각센서 기판은 정렬 지그를 사용하여 에폭시 본딩 실장을 하고 다이싱 공정을 통하여 하나의 단위 셀로 분리된다.

그림 4는 연성회로기판에 실장된 촉각센서 어레이를 보여주고 있다. 연성회로기판에 센서 모듈을 와이어 본딩을 통하여 전기적 연결을 하였으며 촉각센서 어레이를 보호하기 위하여 유연한 1액형 실리콘 RTV 러버를 도포하여 보호막을 형성하였다^[6]. 그림에서 알 수 있듯이 제작된 촉각센서 어레이는 유연성을 가지고 있으므로 굴곡이 있는 시스템에도 적용할 수 있을 것이다.

그림 5는 촉각센서 평가 시스템과 센서의 파괴 강도 측정 결과를 보여주고 있다. 평가 시스템은 3축 로드셀(Fx, Fy, Fz)로 구성되어 있어서 단축 및 3축 측정이 가능하며 압력을 0.01 N~5 N까지 인가할 수 있고 가압 Force 정밀도는 ±0.002 N 수준이다. 제작된 센서

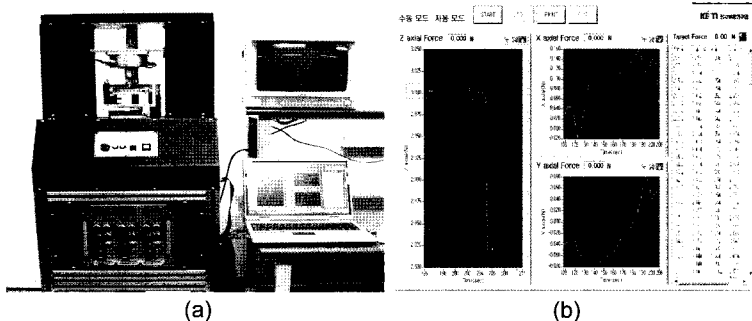


그림 5. (a) 촉각센서 측정 시스템, (b) 촉각센서의 파괴 강도 특성
Fig. 5. (a) Images of tactile sensor estimation system used for characterization of fabricated sensor, (b) Breakdown force of diaphragm showed using tactile sensor estimation system.

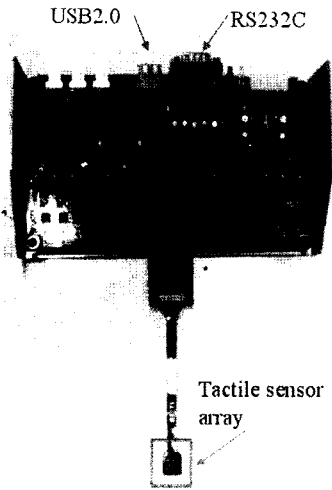


그림 6. 아날로그 신호처리 회로보드
 Fig. 6. Photograph of analog signal conditioning circuit board for measure of tactile sensor array.

칩을 로딩 스테이지 위에 올리고 팁을 범프 중앙에 위치시킨 후 단축 및 3축 모두 2N까지의 압력을 인가하여 그 결과를 측정하였다. 측정 결과는 그림 7에 나타내었다. 그림 5(b)는 촉각센서의 파괴 강도를 측정 한 결과이다. 그림에서 보듯이 실리콘 멤브레인 경우 단위 면적당 3 N의 압력을 받으면 멤브레인이 파괴되는 현상을 보여주고 있다. 이 때 멤브레인의 두께는 30 μm 이었다.

그림 6은 4×4 촉각센서 어레이의 신호처리 회로 보드를 보여주고 있다. 이 보드는 Equipotential 증폭기, 센서 단위 셀 Column selector 구동 회로, Serial I/F 회로 및 제어기 등으로 구성되어 있으며 촉각센서의 실시간 데이터 응답을 얻기 위하여 촉각센서가 실장된 연성회로기판과 연결되어 컴퓨터로 바로 데이터를 확인할 수 있는 장점이 있다. 촉각센서의 범프에 압력이 가해지게 되면 저항의 변화 데이터를 RS-232로 받아 3차원 그래프로 표시하여 확인할 수 있다. 정해진 프로

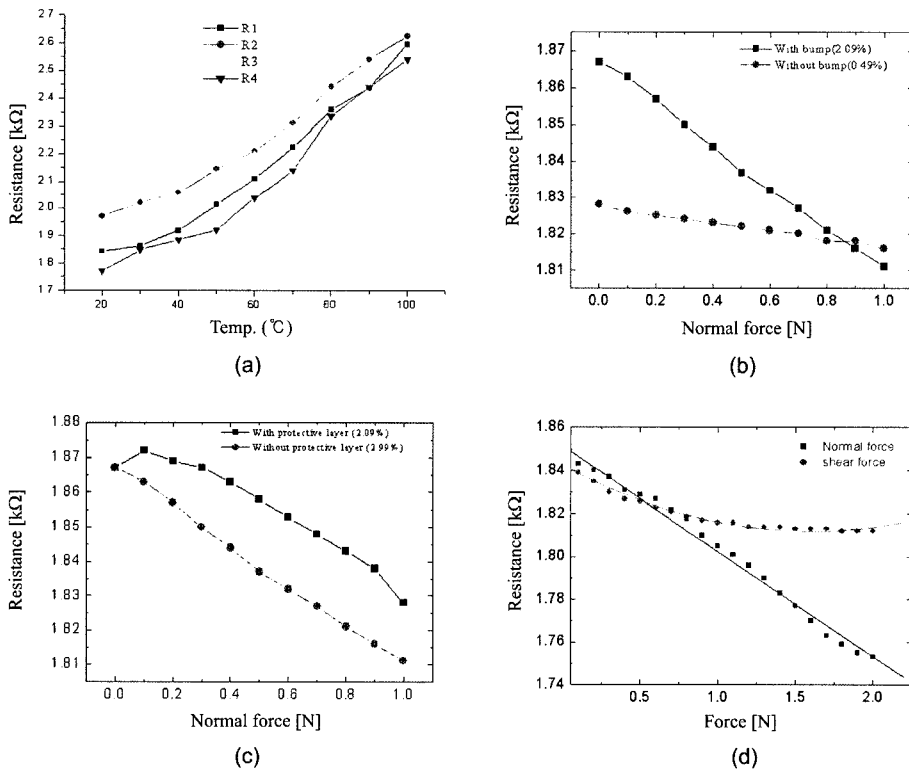


그림 7. (a) 온도 변화에 따른 센서의 저항 변화 특성, (b) 범프, (c) 보호막 유무에 따른 촉각센서의 저항 변화율 응답 특성, (d) Normal과 shear 스트레스에 따른 저항 변화율 응답 특성
 Fig. 7. (a) Resistance variation of tactile sensor for temperature variation, plot of read-out resistance with and without (b) bump, (c) protective layer to the range of 0~1 N, (d) The variations of resistance with applied normal and shear force to the range of 0~2 N.

토크를 이용하여 데이터를 받는 방식이며 calibration 기능이 있어 센서 데이터 값 보정도 가능하다. 또한 실시간 데이터 이동이 가능하므로 시간적인 데이터 확인도 가능하다.

제작된 촉각센서는 연성회로기판에 와이어 본딩을 통하여 실장되었으며 로드셀 측정 시스템을 이용하여 센서의 성능을 측정하였다. 로드셀 측정 시스템은 센서를 장착하는 스테이지와 응력을 인가하는 팁, 측정 데이터를 신호처리 회로 보드로 전송하는 회로로 구성되어 있다. 팁으로 범프에 압력을 가하게 되면 압저항체의 저항이 변화되고 이 값을 회로보드에서 확인할 수 있다. 그림 7은 제작된 촉각센서의 단위 센서 저항 변화율 응답 특성을 보여주고 있다. 그림 7(a)는 온도 변화에 따른 센서의 저항 변화 특성을 보여주고 있는데 센서의 저항이 온도에 비례하여 증가하는 것을 알 수 있다. 그림에서 알 수 있듯이 압저항체를 갖는 센서는 주변 온도의 변화에 영향을 받으므로 센서 칩 자체에 온도보상용 저항체를 삽입하거나 또는 신호를 처리하는 보드에 온도 보정용 회로를 추가하여 이런 문제점을 해결 할 수 있다. 그림 7(b)는 범프 유무에 따른 저항 변화율을 보이고 있는데 측정 조건은 보호막이 코팅되어 있지 않고 수직의 힘을 3 N까지 가한 경우이다. 그림에서 알 수 있듯이 범프가 있는 센서가 없는 센서보다 저항 변화율이 5배 정도 큰 것을 알 수 있다. 그 이유는 범프가 있는 센서의 경우 측정 장비 시스템에서 팁으로 누르는 단면적이 범프가 없는 센서보다 작기 때문으로 생각되어진다. 그림 7(c)는 범프가 있고 보호막 유무에 따른 저항 변화율을 보이고 있다. 그림에서 알 수 있듯이 보호막이 코팅되어 있는 센서의 저항 변화율이 보호막이 코팅되어 있지 않은 센서보다 작음을 알 수 있는데 이는 보호막으로 사용된 포토레지스터인 SU-8이 범프에 가해지는 압력을 일정 부분 흡수하기 때문인 걸로 사료된다. 실제 소자 적용 시 보호막 코팅을 하는데 있어 보호막이 센서 특성에 미치는 영향을 최소화하는 방향으로 즉 보호막 두께, 재질 등을 고려하여야 할 것이다. 그림 7(d)는 제작된 센서에 각각 2 N까지의 수직력, 수평력을 가한 결과를 보여주는데 각각 2.1 %/N, 0.5 %/N의 저항변화율을 얻을 수 있었다. 예측된 대로 수직력에 대해서는 스트레인 게이지가 모두 인장되어 그 저항값의 변화를 통해 접촉력을 측정할 수 있었으며, 수평력에 대해서는 그 신호가 수직력에 대한 신호에 비해 상당히 작는데 이는 전단력이 작용하는 방향으로 각각 압축 응력과 인장 응력이 걸리게 됨으로 두 개의 스트레스 함으로 인한 결과로 생각된다.

3. 결 론

본 연구에서는 실리콘 기반의 단축 및 3축의 유연한 촉각센서를 제안하고 이를 MEMS 공정과 PCB 기판 실장 기술을 통하여 구현하였다. 센서 모듈은 4×4개의 단위 센서 배열로 구성되어 있고 센서의 공간분해능은 2 mm 수준이다. 제작된 촉각센서는 연성회로기판에 에폭시 본딩을 통하여 실장되었으며 로드셀 측정 시스템을 이용하여 센서의 성능을 측정하였다.

제작된 센서에 각각 2 N까지의 수직력, 수평력을 가한 결과 2.1 %/N, 0.5 %/N의 저항변화율을 얻을 수 있었다. 본 연구에서 개발된 촉각센서는 유연하고 넓은 면적으로의 확장성에 유리함으로 로봇의 손이나 손가락 등의 촉각센서에 사용될 수 있을 것이다.

감사의 글

본 연구는 정보통신부의 지능형 로봇 센서 개발 사업의 연구비 지원에 의해 수행되었으며 이에 관계자 여러분께 깊이 감사드립니다.

참고 문헌

- [1] D. J. Beebe, D. D. Denton, R. G. Radwin, and J. G. Webster, "A silicon-based tactile sensor for finger-mounted applications", *IEEE Trans. Biomed. Eng.*, vol. 45, no. 2, pp. 151-159, 1998.
- [2] M. H. Lee and H. R. Nicholls, "Tactile sensing for mechatronics-a state of the art survey", *Mechatronics*, vol. 9, pp. 1-33, 1999.
- [3] L. Wang and D. J. Beebe, "A silicon-based shear force sensor: Development and characterization", *Sens. Actuat. A*, vol. 84, pp. 33-44, 2000.
- [4] T. Mei, W. J. Li, Y. Ge, Y. Chen, L. Ni, and M. H. Chan, "An integrated MEMS three-dimensional tactile sensor with large force range", *Sens. Actuat. A*, vol. 80, pp. 155-162, 2000.
- [5] L. Wang and D. J. Beebe, "Characterization of a silicon-based shear-force sensor on human subjects", *IEEE Trans. Biomed. Eng.*, vol. 49, pp. 1340-1347, 2002.
- [6] M. Leineweber, G. Pelz, M. Schmidt, H. Kappert, and G. Zimmer, "New tactile sensor chip with silicone rubber cover", *Sens. Actuat. A*, vol. 84, pp. 236-245, 2000.



김 건 년

- 1968년 11월 22일생
- 1991년 2월 아주대학교 제어계측공학과 졸업(학사)
- 1993년 2월 아주대학교 대학원 제어계측공학과 졸업(석사)
- 2004년~2월 고려대학교 대학원 전기공학과 박사수료
- 2005년~현재 전자부품연구원(KETI) 나노메카트로닉스센터 센터장
- 주관심분야 : RF MEMS, 센서, 패키징



김 용 국

- 1975년 7월 8일생
- 2001년 2월 서울시립대학교 전자공학과 졸업(학사)
- 2003년 2월 서울시립대학교 대학원 전자공학과 졸업(석사)
- 2006년~현재 고려대학교 대학원 전자컴퓨터공학과 박사과정
- 주관심분야 : RF MEMS, 센서, 패키징



이 강 열

- 1969년 1월 3일생
- 1994년 2월 명지대학교 무기재료공학과 졸업(학사)
- 1996년 2월 명지대학교 무기재료공학과 졸업(석사)
- 2001년 2월 명지대학교 무기재료공학과 졸업(박사)
- 주관심분야 : 나노 분말 합성 및 코팅, MEMS, 패키징



조 우 성

- 1976년 4월 5일생
- 2002년 2월 청운대학교 전자공학과 졸업(학사)
- 2004년 2월 청운대학교 전자공학과 졸업(석사)
- 2004년~현재 고려대학교 대학원 전자컴퓨터공학과 박사과정
- 주관심분야 : MEMS, 화학 센서, 탄소 나노튜브, 전계방출디스플레이



이 대 성

- 1968년 1월 5일생
- 1990년 2월 한국과학기술원 전자공학과 졸업(학사)
- 2002년 2월 단국대학교 전자컴퓨터공학과 졸업(석사)
- 1998년 9월 전자부품연구원 나노메카센터 연구원
- 2004년~현재 서울대학교 전기공학과 박사과정
- 주관심분야 : MEMS, 스마트센서, RF-MEMS



조 남 규

- 1966년 8월 22일생
- 1990년 2월 한양대학교 기계공학과 졸업(학사)
- 1993년 2월 한국과학기술원 기계공학과 졸업(석사)
- 1998년 9월 전자부품연구원 나노메카센터 연구원
- 2006년 2월 전북대학교 반도체과학기술학과 박사수료
- 주관심분야 : MEMS 센서 및 액츄에이터, 나노전자소자



김 원 호

- 1974년 9월 16일생
- 2001년 2월 부산대학교 기계공학과 졸업 (학사)
- 2003년 2월 광주과학기술원 기전공학과 졸업(석사)
- 2003년~현재 전자부품연구원 나노메카트로닉스 연구센터 연구원
- 주관심분야 : MEMS, SPM, 나노 리소 그래피



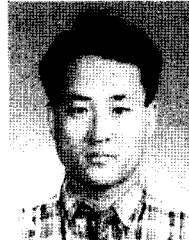
박 정 호

- 1960년 2월 5일생
- 1985년 Purdue University 전자공학과 졸업(학사)
- 1988년 Purdue University 전자공학과 졸업(석사)
- 1992년 Purdue University 전자공학과 졸업(박사)
- 1998년 3월~현재 고려대학교 전자공학과 교수
- 주관심분야 : MEMS, DNA chip, 신호 처리



김 수 원

- 1952년 1월 10일생
- 1974년 2월 고려대학교 전자공학과 졸업 (학사)
- 1983년 Texas A&M University 전자공학과 졸업(석사)
- 1987년 Texas A&M University 전자공학과 졸업(박사)
- 1989년 3월~현재 고려대학교 전자공학과 교수
- 2004년 7월~현재 고려대학교 공과대학 공학대학원 학장
- 주관심분야 : Mixed-mode IC, RF PLL, and high-speed and low-power digital systems



주 병 권

- 1962년 12월 2일생
- 1995년 고려대학교 대학원 전자공학과 졸업(공학박사)
- 1988년~2005년 KIST 마이크로시스템 연구센터, 책임연구원
- 1996년 Univ. South Australia(Australia) 방문연구원
- 2005년~현재 고려대학교 전기전자전파공학부 부교수
- 주관심분야 : Flat panel display(FED, OLED), MEMS, Nano-devices