

금/주석 공융점 접합과 유리 기판의 건식 식각을 이용한 고주파 MEMS 스위치의 기판 단위 실장

강성찬^{1,+}, 장연수¹, 김현철², 전국진¹

Wafer-Level Package of RF MEMS Switch using Au/Sn Eutectic Bonding and Glass Dry Etch

Sungchan Kang^{1,+}, Yeonsu Jang¹, Hyeon Cheol Kim², and Kukjin Chun¹

Abstract

A low loss radio frequency(RF) micro electro mechanical systems(MEMS) switch driven by a low actuation voltage was designed for the development of a new RF MEMS switch. The RF MEMS switch should be encapsulated. The glass cap and fabricated RF MEMS switch were assembled by the Au/Sn eutectic bonding principle for wafer-level packaging. The through-vias on the glass substrate was made by the glass dry etching and Au electroplating process. The packaged RF MEMS switch had an actuation voltage of 12.5 V, an insertion loss below 0.25 dB, a return loss above 16.6 dB, and an isolation value above 41.4 dB at 6 GHz.

Keywords : Wafer-level Package, RF MEMS switch, Eutectic Bonding, Glass dry etch

1. 서론

MEMS란 반도체 공정 기술을 이용하여 제작된 전기, 기계적 부분으로 구성된 디바이스를 말한다[1]. RF MEMS는 이러한 MEMS 기술을 이용하여 인덕터(inductor), 가변 캐패시터(variable capacitor), 스위치(switch), 안테나(antenna), 필터(filter) 등을 개발하여 RF 모듈에 응용한다[2-5]. MEMS 스위치의 경우 다기능, 소형화되는 현 기술 추세에 부합하는 고성능의 부품으로 많은 관심을 받고 있다.

기존의 GaAs MESFET 스위치의 경우 좋은 RF 특성을 가지고 있으나, 주파수가 증가하면 내재하는 기생 파라미터(parasitic parameter) 때문에 성능이 저하되어 고주파에서 응용하기 힘들다. 이에 반해 MEMS 스위치는 다른 반도체 스위치에 비해 삽입 손실(insertion loss)과 격리도(isolation) 특성이 우수하며, 특히 주파수가 올라 갈수록 그 성능이 반도체 스위치에 비해 더욱 우수하다[6]. 또한 다중 출력(multi-throw) 스위치를 개발하는데 있어 우수한 RF 성능은 더욱 중요하기 때문에 MEMS 스위치의 중요성이 더욱 부각되고 있다.

MEMS 스위치의 경우 기계적인 움직임은 가지는 부분이 존재하며, 또한 끊어진 신호선 사이를 연결 시키기 위해 저항 접촉 또는 정전용량 접촉이 필요한데 이 사이에 이물질이 붙으면 스위치로서 역할을 더 이상 수행할 수 없다. 따라서 외부 환경으로부터 구조물이 보호되어야 한다[7]. 보호를 위하여 구조물의 실장이 반드시 필요하다. 또한 신호선과 전극 등을 외부와 연결시키기 위한 신호선 및 바이어스 선의 생성이 필요하다. 그리고 이러한 실장 방법이 구조물 자체보다 제작이 어렵거나 공정 가격이 비싸면 안되므로 기판 단위 실장이 가능해야 한다. 본 논문에서 RF MEMS 스위치의 보호와 외부와의 연결을 위한 기판 단위 실장 방법을 제시하고자 한다.

그 동안 개발된 MEMS 디바이스의 접합 방법은 표면 접합(surface bonding)과 간층 접합(interlayer bonding)으로 구분할 수 있다. 표면 접합 방법에는 양극 접합(anodic bonding), 결합 접합(fusion bonding), 표면 활성화 접합(surface activated bonding) 등이 있다. 간층 접합에는 공융점 접합(eutectic bonding), 솔더 접합(solder bonding), 폴리머 접합(polymer bonding) 등이 있다[8].

표면 접합의 경우 표면의 거칠기나 기판의 휨(warp) 상태에 영향을 많이 받으므로 기판 단위 접합이 어려운 반면, 간층 접합의 경우 표면 상태에 영향을 덜 받아 기판 단위 접합에 유리하다. 솔더 접합의 경우 산화막 제거를 위한 플럭스(flux)를 사용해야 하는 단점이 있고, 폴리머 접합의 경우 밀봉 실장(hermetic sealing)이 안 된다는 단점이 있다[9]. 따라서 본 논문에서는 표면 형상에 둔감하여 기판 단위 접합이 가능하고,

¹서울대학교 전기컴퓨터공학부(School of Electrical Engineering, Seoul National University)

²울산대학교 전기전자정보시스템공학부(School of Electrical Engineering, Ulsan University)

⁺Corresponding author: kangsc@mintlab.snu.ac.kr

(Received : Dec. 27, 2010, Revised : Jan. 14, 2011,

Accepted : Jan. 14, 2011)

플렉스를 사용하지 않으며, 밀봉 실장이 가능한 공용점 접합을 이용하여 기판 단위 접합을 하였다[10].

System In Package(SIP)를 위해 실리콘 수직 관통 비아(Si through-via)가 많이 이용되고 있다. 하지만 실리콘 수직 관통 비아의 경우 비아 사이의 절연이 필요하고, 실리콘의 전도성으로 인해 RF 디바이스에 응용 시 손실을 증가 시킬 수 있다. 본 논문에서는 유리 기판(glass substrate)을 이용하여 수직 관통 비아를 형성하고, 기판 단위 실장을 하였다[11].

2. 설계

2.1 고주파 MEMS 스위치

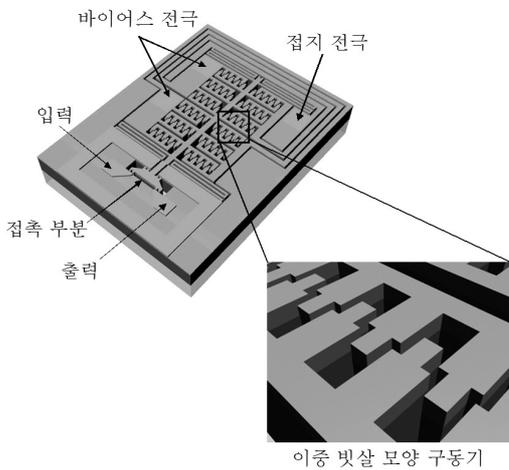


Fig. 1. Schematic of the proposed RF MEMS switch.

Fig. 1은 RF MEMS 스위치의 모식도이다. 한 개의 RF 신호 입력(input port)과 한 개의 출력(output port)이 있으며, 이중 빗살 모양 구동기를 동작시키기 위한 직류 전압 바이어스 전극과 접지 전극이 있다[12].

직류 전압이 앞 방향 구동을 위한 전극에 가해지면, 이중 빗살 모양 사이에 정전력이 발생하고, 이 힘으로 인해 스위치의 접촉부가 움직인다. 접촉부의 움직임을 통해 끊어져 있는 입력 신호 선과 출력 신호 선이 연결 상태가 된다. 앞 방향 구동을 위한 직류 전압이 풀어지고 뒤 방향 구동을 위한 전극에 직류 전압이 가해지면, 접촉부가 제자리로 돌아와 출력이 개방 상태가 된다.

2.2 기판 단위 실장

MEMS 스위치는 움직이는 구조물이 있으므로 외부 환경으로부터 보호되어야 한다. 또한 외부 환경의 영향으로 MEMS

스위치 성능에 영향을 미칠 수 있으므로, 이러한 영향을 차단하기 위한 스위치의 실장이 필요하다. 예를 들어 높은 습도는 구동 부분 또는 저항 접촉 부분에 점착(stiction) 현상을 발생시킬 수 있다.

본 논문에서 금(Au)/주석(Sn) 공용점 접합(eutectic bonding)을 이용하여 스위치를 보호하기 위한 보호 뚜껑(cap)을 기판 단위 접합 한다[13]. 그리고 유리 기판을 보호 뚜껑의 물질로 사용하고 유리 기판에 수직 관통 비아(via)를 형성한다[14]. 수직 관통 비아는 스위치 전극과 외부 전극 사이를 최단 거리로 연결 한다. 실장으로 인한 신호선의 길이를 최대한 짧게 함으로써 손실의 증가를 최소화 하였다. 절연 성능이 우수한 유리 기판에 비아를 형성하여 비아 사이의 격리 특성을 향상 시켰다.

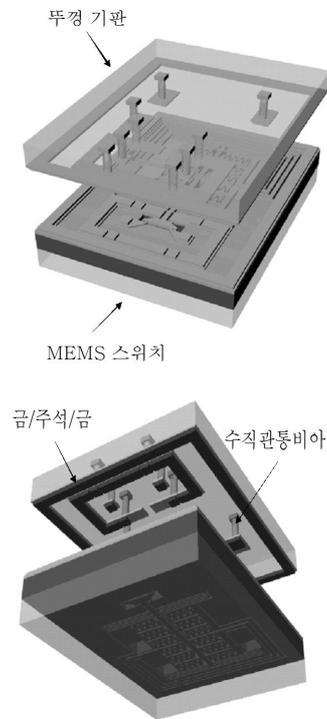


Fig. 2. Schematic of the wafer-level package.

Fig. 2에 제안한 기판 단위 접합의 모식도를 나타내었다. MEMS 스위치 제작 시 형성된 금 부분과 보호 뚜껑에 형성된 주석 부분이 공용점 접합을 한다.

그리고 Fig. 3에 기판 단위 실장 후 RF MEMS 스위치의 성능 변화를 예측하기 위한 HFSS 소프트웨어 시뮬레이션 결과를 나타내었다. 실장 전 RF MEMS 스위치는 6 GHz에서 0.05 dB의 삽입 손실과 26.4 dB의 반사 손실, 44.6 dB의 격리도 특성을 가졌다. 실장 후에는 6 GHz 에서 0.06 dB의 삽입 손실과 27.2 dB의 반사 손실, 41.6 dB의 격리도 특성을 가졌다. 그래프에서 알 수 있듯이 기판 단위 실장 후 삽입 손실

0.01 dB, 격리도 특성 3 dB 가 저하되었음을 알 수 있다.

3. 제작

3.1 기판 단위 실장 공정

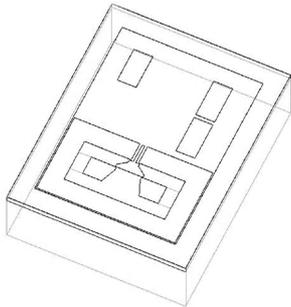
본 논문에서는 금과 주석의 공용점 접합을 통해, 구조물을 보호하기 위한 뚜껑과 제작한 스위치 기판을 접합한다. 그리고 접합된 뚜껑에 전기적 연결을 위한 수직 관통 비아를 제작한다. 각 전기적 연결의 격리를 위해 뚜껑 물질로 절연 성능이 우수한 유리 기판(Pyrex 7740)을 사용하였다.

뚜껑 기판의 공정 순서는 Fig. 4와 같다. 실리콘 기판과 유리 기판을 양극 접합(anodic bonding)을 이용하여 접합한 후 유리 기판의 두께가 30 μm 가 되도록 Chemical Mechanical Polishing(CMP)를 이용하여 유리 기판을 가공한다. 실리콘 기판과 유리 기판을 접합한 기판을 사용하는 이유는 유리 기판에 수직 관통 비아를 생성 시 식각 마스크로 단결정 실리콘을 사용하기 위함이다.

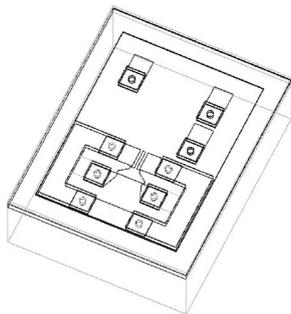
유리 기판 면에 공용점 접합을 위한 금속을 생성한다. 네거티브 감광제(JSR)를 이용하여 금속 리프트오프(lift-off) 공정을 위한 사진 공정을 한다. 티타늄(Ti)/금(Au) 박막을 각각 0.05/2 μm 스퍼터링(sputtering) 방법으로 증착한다. 네거티브 감광제를 제거하면 감광제 위에 증착된 금속이 제거되어, 감광제가 없었던 부분에만 금속이 남게 된다. 티타늄/금으로 이루어진 패턴을 생성 후, 다시 금속 리프트오프 공정을 통해 금/주석/금 박막을 각각 1/2/0.2 μm 두께로 스퍼터링 방식으로 증착한다. 마찬가지로 네거티브 감광제를 제거하여 금속 박막으로 이루어진 패턴을 형성한다. 주석 위에 금 박막을 생성한 이유는 주석이 공기 중에서 쉽게 산화되어 공용점 접합 시 산화막으로 인해 접합이 안될 수 있으므로, 주석의 산화 방지를 위해 금 박막을 추가적으로 생성하였다.

제작된 스위치 기판과 뚜껑 기판을 정렬 접합한다. 스위치 기판에 제작된 금으로 이루어진 패턴과 뚜껑 기판에 제작된 금/주석/금 패턴 사이에 8000 N의 힘과 280 도 온도를 가해 공용점 접합을 한다. 접합 후 뚜껑의 실리콘 기판이 10 μm 두께를 가지도록 CMP를 통해 가공한다. 그리고 1.2 μm 두께를 가지는 감광제를 이용하여 실리콘 식각을 위한 식각 마스크를 사진 공정을 통해 생성한다. Deep Si etch 방법을 이용하여 실리콘 기판을 10 μm 식각하여, 식각된 부분에 유리 기판이 드러나도록 한다. 산소 플라즈마를 이용한 애싱(ashing)으로 감광제를 제거한다. 패턴닝 된 실리콘 기판을 식각 마스크로 사용하여 유리 기판을 30 μm 식각 한다.

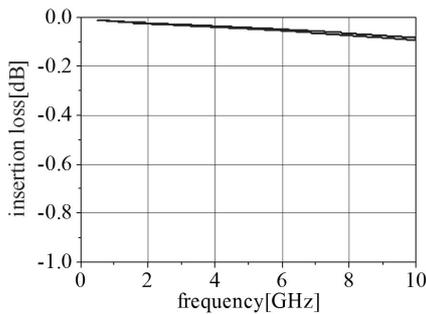
유리 기판의 수직 방향 건식 식각을 위해 ICP(Inductively Coupled Plasma) 방식의 식각 장비를 이용하였다. C_4F_8 , O_2 가스와 1600 W 전극 파워, 300 V 직렬 바이어스 조건으로 식각하였다. 약 0.5 $\mu\text{m}/\text{min}$ 의 식각 속도를 가졌다. 유리 기판 식각 후 식각 마스크로 사용된 실리콘을 RIE(Reactive



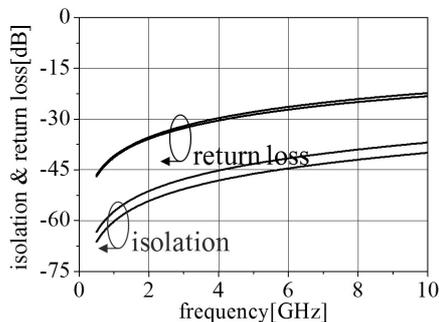
(a) HFSS simulation model of non-packaged RF MEMS switch.



(b) HFSS simulation model of packaged RF MEMS switch.



(c) HFSS simulation results : insertion loss of non-packaged and packaged RF MEMS switches.



(d) HFSS simulation results : isolation and return loss of non-packaged and packaged RF MEMS switches.

Fig. 3. HFSS simulation models and results of non-packaged and packaged RF MEMS switches.

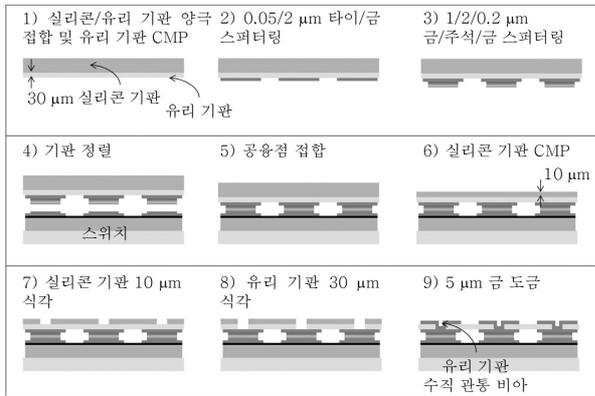
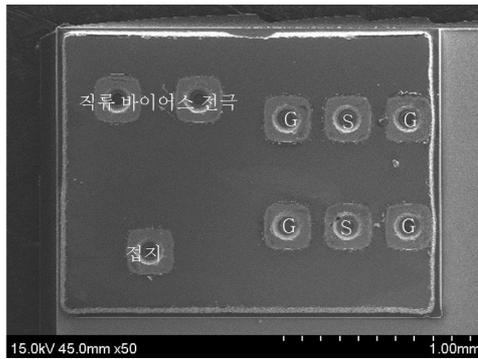


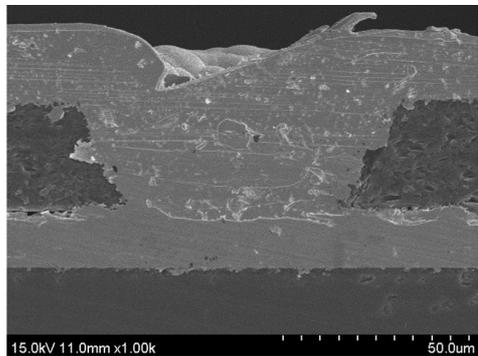
Fig. 4. Process flow of wafer-level package.

IonEtching) 방식의 건식 식각을 통해 제거한다. 마지막으로 금 도금을 위한 티타늄/금 박막을 0.05/0.2 μm 증착 한 후 드라이 필름 감광제(dry film resist)를 이용하여 도금 될 부분을 패터닝 한다. 전해 도금을 통해 5 μm 두께의 금 박막을 형성한다. 감광제 제거 후 도금을 위해 증착 된 티타늄/금 박막을 식각 용액을 이용해 제거한다.

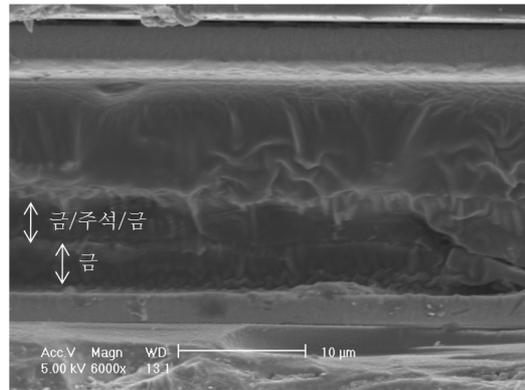
3.2 공정 결과



(a) Packaged RF MEMS switch



(b) Cross sectional view of glass through-via



(c) Cross sectional view of Au/Sn eutectic bonding

Fig. 5. SEM images of wafer-level packaged RF MEMS switch.

Fig. 5(a)에 기판 단위 실장 된 RF MEMS스위치의 Scanning Electron Microscope(SEM) 사진을 나타내었다. 그리고 유리 기판에 제작된 수직 관통 비아의 단면 SEM 사진을 (b)에 나타내었다. 유리 기판 식각 시 식각 프로파일이 약 63 도(degree)이다. 50 μm 직경의 홀(hole) 모양의 패턴이 아래 면의 직경은 60 μm, 윗면의 직경은 90 μm가 되었다. 금 도금을 통해 형성된 금속을 통해 제작된 스위치의 금속이 유리 기판을 수직 관통하여 외부와 연결되었음을 알 수 있다. 금/주석 공용점 접합 단면의 SEM 사진을 (c)에 나타내었다. 접합 부분을 살펴보면 금 부분, 금과 주석의 공용 부분으로 나누어져 있음을 확인할 수 있다.

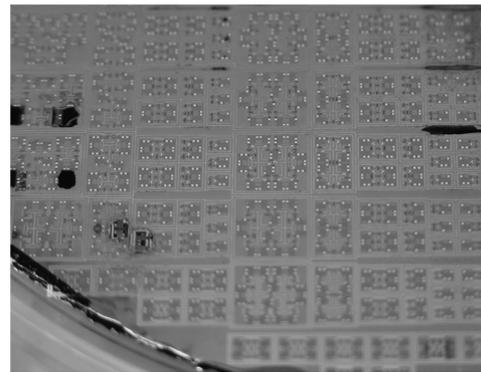
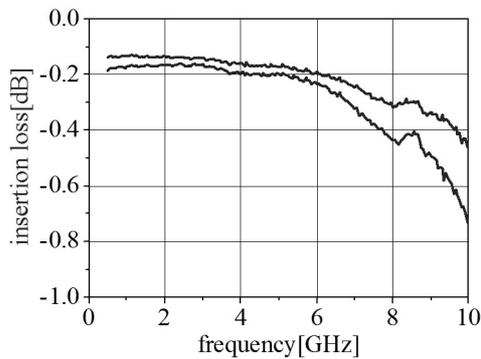


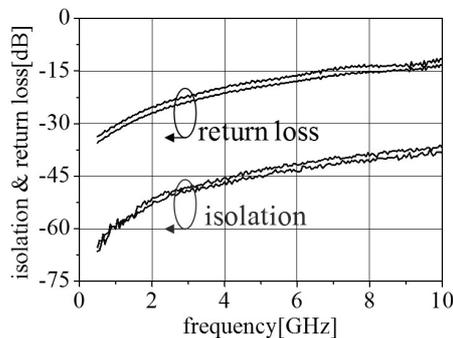
Fig. 6. Images of wafer-level packaged RF MEMS switch.

Fig. 6에 기판 단위 실장 된 RF MEMS 스위치의 웨이퍼 사진을 나타내었다. 일부 뚜껑 기판이 떨어져 나간 부분이 있지만, 전체적으로 접합이 된 것을 확인할 수 있다. 상대적으로 밝게 보이는 부분이 유리 건식 식각과 도금을 통해 형성된 관통 비아이다.

4. 측정 및 고찰



(a) Measurement results: insertion loss of non-packaged and packaged RF MEMS switches



(b) Measurement results: isolation and return loss of non-packaged and packaged RF MEMS switches

Fig. 7. Measurement results of non-packaged and packaged RF MEMS switches.

Fig. 7에 기판 단위 실장 전후 RF 특성 변화를 나타내었다. 실장 전 RF MEMS 스위치는 6 GHz에서 삽입 손실은 0.20 dB, 반사손실은 17.9 dB, 격리도는 42.7 dB의 특성을 가졌다. 실장 후 6 GHz에서 삽입 손실은 0.25 dB, 반사손실은 16.6 dB, 격리도는 41.4 dB의 특성을 가졌다. 실장 전에 비해 삽입 손실은 0.05 dB 저하 되었고, 격리도 특성은 1.3 dB 저하 되었다. 삽입 손실이 저하 된 이유는 입력에서 출력까지의 신호 선의 길이 증가와 더불어 뚜껑 기판을 통한 플린징 (fringing) 캐패시턴스(capacitance)의 증가로 인해 손실이 증가하였기 때문이다. 그리고 격리도 특성은 입력과 출력 사이의 커플링(coupling) 캐패시턴스 값에 의해 결정 된다. 실장 후 입력과 출력의 신호 선의 길이 증가로 인해 커플링 캐패시턴스 값이 증가하여, 격리도 특성이 저하되었다. 하지만 수직 관통 비아 형태로 제작하여 실장으로 인한 신호 선의 증가를 최소화하여, 실장으로 인한 RF 특성의 저하를 최소화 하였다.

HFSS 시뮬레이션 결과와 비교해 보면 두 가지 측면에서 차

이점이 있다. 첫째는 RF MEMS 스위치의 RF 특성이 시뮬레이션 결과와 측정 결과에 차이가 있다. HFSS 시뮬레이션 수행 시 스위치 연결 상태에서 금속과 금속 사이의 접촉 저항을 고려하지 못했다. 반면 제작된 RF MEMS 스위치는 수 옴(ohm)의 접촉 저항을 가지므로, 측정 결과의 삽입 손실이 시뮬레이션 결과보다 저하된다. 둘째는 실장 전후 RF 성능의 저하 정도가 HFSS 시뮬레이션 결과와 측정 결과에 차이가 있다. HFSS 시뮬레이션 수행 시 금/주석 공용점 접합면 사이의 저항을 고려하지 못했다. 반면 제작된 금/주석 공용점 접합면은 저항을 가지므로, 실장에 따른 RF 성능 저하가 측정 결과에서 더 크다.

5. 결론

유리 기판에 수직 관통 비아를 제작하고, 공용점 접합을 통해 제작된 스위치를 기판 단위 실장 하였다. 신호 선의 길이를 짧게 형성하고 절연성이 우수한 유리 기판을 사용하여 실장 후 스위치의 성능 저하를 최소화 하였다. 기판 단위 실장 후 삽입 손실은 0.05 dB 저하 되었고, 격리도 특성은 1.3 dB 저하 되었다. 본 논문을 통해 RF MEMS 스위치의 공용점 접합과 유리 기판을 이용한 기판 단위 실장 방법을 소개하였으며, 실장으로 인한 RF 디바이스의 특성 변화를 살펴보았다. 연구 결과를 통해 그동안 많이 사용되던 실리콘 기판의 수직 관통 비아 대신 유리 기판의 수직 관통 비아의 응용 가능성을 제시하였다. 더 나아가 유리 기판을 실장의 뚜껑 기판으로 사용할 경우 RF 특성의 변화에 대한 고찰이 필요하다.

REFERENCES

- [1] H. A. C. Tilmans, W. D. Raedt and E. Beyne, "MEMS for wireless communications: 'from RF-MEMS components to RF MEMS SiP' ", *Journal of Micromechanics and Microengineering*, vol. 13, no. 4, pp. S139-S163, 2003.
- [2] G. W. Dahlmann, E. M. Yeatman, P. Young, I. D. Robertson and S. Lucyszyn, "High Q achieved in microwave inductors fabricated by parallel self-assembly", *Proc. 11th Int. Conf. on Solid-State Sensors and Actuators*, pp. 1098-1101, Munich, Germany, 2001.
- [3] Z. Feng, W. Zhang, B. Su, K. F. Harsh, K. C. Gupta, V. Bright, and Y. C. Lee, "Design and modeling of RF MEMS tunable capacitors using electro-thermal actuators", *Proc. IEEE MTT-S Int. Microw. Symp.*, pp. 1507-1510, Anaheim, USA, 1999.

- [4] Jae-Hyoung Park, "A study on the design and fabrication of electrostatically actuated RF MEMS switches", *J. Kor. Sensors Soc.*, vol. 19, no. 4, pp. 320-327, 2010.
- [5] J. C. Chiao, Y. Fu, I. M. Chio, M. Delisio, and L. Y. Lin, "MEMS reconfigurable Vee antenna", *IEEE MTT-S Int. Microw. Symp.*, pp. 1515-1518, Anaheim, USA, 1999.
- [6] S. Lucyszyn, "Review of radio frequency microelectromechanical systems technology", *IEEE Proc. Sci. Meas. Tech.*, vol. 1551, no. 2, pp. 93-103, 2004.
- [7] M. Sakata, Y. Komura, T. Seki, K. Kobayashi, K. Sano, and S. Horiike, "Micromachined relay which utilizes single crystal silicon electrostatic actuator", *12th IEEE International Conference on Micro Electro Mechanical Systems*, pp. 21-24, Orlando, USA, 1999.
- [8] E. Lee, W. Kim, I. Song, S. Moon, H. C. Kim, M. K. Kang, S. D. Choi, and K. Chun, "Wafer level lateral bonding scheme with LEGO-like structure", *Sensors and Materials*, vol. 16, no. 5, pp. 227-236, 2005.
- [9] K. H. Na, I. H. Kim, E. S. Lee, H. C. Kim, and K. Chun, "Adhesive bonding using thick polymer film of SU-8 photoresist for wafer level package", *J. Kor. Sensors Soc.*, vol. 16, no. 5, pp. 325-330, 2007.
- [10] T. Seki, "Recent progress in packaging of RF MEMS", *IEEE CSIC Dig.*, pp. 233-236, Monterey, USA, 2004.
- [11] S. Yamamoto, K. Itoi, T. Suemasu and T. Takizawa, "Si through-hole interconnections filled with Au-Sn solder by molten metal suction method", *16th IEEE International Conference on Micro Electro Mechanical Systems*, pp. 19-23, Kyoto, Japan, 2003.
- [12] S. Kang, H. C. Kim, and K. Chun, "A low-loss, single-pole, four-throw RF MEMS switch driven by a double stop comb drive", *Journal of Micromechanics and Microengineering*, vol. 19, no. 3, p. 035011, 2009.
- [13] Q. Wang, S. H. Choa, W. Kim, J. Hwang, S. Ham, and C. Moon, "Application of Au-Sn eutectic bonding in hermetic radio-frequency microelectromechanical system wafer-level packaging", *Journal of Electronic Materials*, vol. 35, no. 3, pp. 425-432, 2006.
- [14] J. H. Park, N. E. Lee, J. Lee, J. S. Park, and H. D. Park, "Deep dry etching of borosilicate glass using SF₆ and SF₆/Ar inductively coupled plasmas", *Microelectronics Engineering*, vol. 82, no. 2, pp. 119-128, 2005.



강 성 찬(Sungchan Kang)

- 2004년 8월 서울대학교 기계공학부 (공학사)
- 2004년 9월~현재 서울대학교 전기공학부 박사과정
- 주관심분야 : 반도체, MEMS, 패키지



장 연 수(Yeonsu Jang)

- 2006년 8월 서울대학교 전기공학부(공학사)
- 2006년 9월~현재 서울대학교 전기공학부 박사과정
- 주관심분야 : 반도체, MEMS, 집적회로 설계, 패키지



김 현 철(Hyeon Cheol Kim)

- 1990년 2월 서울대학교 전자공학과 (공학사)
- 1992년 2월 서울대학교 전자공학과 (공학석사)
- 1998년 8월 서울대학교 전기공학과 (공학박사)
- 2008년 3월~현재 울산대학교 전기전자정보시스템공학부 교수
- 주관심분야 : 반도체, MEMS, 패키지



전 국 진(Kukjin Chun)

- 1977년 2월 서울대학교 전자공학과(공학사)
- 1981년 2월 University of Michigan 전기공학과(공학석사)
- 1986년 2월 University of Michigan 전기공학과(공학박사)
- 1989년 3월~현재 서울대학교 전기공학부 교수
- 주관심분야 : 반도체, MEMS, 패키지, RF