

새로운 미세 가열기를 이용한 마이크로 시스템의 패키징

심영대, 신규호*, 좌성훈*, 김용준
연세대학교 기계공학부, *삼성전자 종합기술원

Micro System Packaging using New Micro-Heater

Young-Dae Shim, Kyu-Ho Shin*, Sung-Hun Choa*, Yong-Jun Kim
School of Mechanical Engineering at Yonsei University, SAIT

Abstract - 기존에 연구된 미세 가열기를 이용한 마이크로 시스템 패키징의 문제점을 해결하기 위해 새로운 미세 가열기를 제작하여 접합 실험을 실시하였다. 기존 형상의 미세 가열기와 새로운 미세 가열기의 형상을 각각 제작하여 접합시 미세 가열기에 발생하는 열분포를 IR 카메라를 이용하여 실험하였으며, 기존 형상의 미세 가열기가 불균일하게 가열되는 반면, 새로운 형상의 미세 가열기는 매우 균일하게 가열되는 형상을 나타내었다. IR 카메라 실험 결과를 바탕으로 접합 실험을 실시하기 위해서 폭 50 μ m, 두께 2 μ m의 미세 가열기를 제작하였으며, 0.2 Mpa의 압력을 Pyrex glass cap에 가한 상태에서 150 mA의 전류를 공급함으로써 접합을 완료하였다. 접합이 완료된 시편들에 대해서 IPA를 통한 leak 실험을 실시하였으며, 기존 형상의 미세 가열기를 이용한 시편들은 66%가 테스트를 통과한 반면 새로운 형상의 미세 가열기를 이용한 시편들은 85% 이상이 테스트를 통과하였다. Leak 실험을 통과한 각각의 시편들에 대해서 접합력 측정을 실시한 결과, 기존 형상의 미세 가열기를 이용한 시편들은 15~21 Mpa의 접합력을 나타내었고, 새로운 형상의 미세 가열기를 이용한 시편들은 25~30 Mpa의 우수한 접합력을 나타내었다.

1. 서 론

최근에 개발되는 MEMS 제품의 적용 단계에 있어서 반드시 필요한 공정이 시스템의 성능을 유지할 수 있는 hermetic 패키징 공정이다. 이러한 패키징의 중요성은 마이크로 머시닝 기술의 발전으로 초소형화, 고집적화 되어지고, 외부 환경에 민감한 소자들의 보호를 위해서 급속도로 증가하고 있다. 일반적인 전기 부품이나 소자의 패키징은 표준화된 패키징 공정으로 가능하지만 마이크로 단위에서 제작된 마이크로 센서나 마이크로 액츄에이터 등과 같은 MEMS(micro electro mechanical system) 구조물의 패키징 디자인은 제품 설계 초기부터 고려해야 하는 중요한 공정이다[1]. 또한 미세한 크기의 MEMS 구조물에서는 다양한 기계적인 시스템이 응용되기 때문에 표준화된 패키징 방법이 존재하지 않는다. 따라서 MEMS 패키징 기술은 각각의 시스템의 목표에 따라서 적절히 설계해야만 한다[2].

마이크로 단위의 소자들에 대한 패키징을 위해서 연구된 일반적인 접합 기술(bonding technique)은 모재와 구성요소의 기계적이고 전기적인 결합이 요구되는 미세 가공(micro machining) 분야에서 널리 이용되고 있으며, 용해 접합(fusion bonding), 낮은 온도에서 금속의 용해되는 성질을 이용하는 공융 접합(eutectic bonding), 금속의 전기적인 특성을 이용하는 양극 접합(anodic bonding) 방식 등이 있다. 이러한 접합 기술들은 IC나 MEMS 구조물의 제작을 위해서 그 동안 널리 이용되어 왔다[3].

위와 같은 목적을 갖는 일반적인 접합 공정은 공통적으로 두 가지 기본적인 상태에 진행해야 한다는 단점을 갖는데, 첫 번째는 접합 과정에서 처음으로 접촉하는

두 번의 표면이 매우 평평하고 부드러운 표면이어야 한다는 것이고, 두 번째는 접합 에너지(bonding energy)를 공급하기 위해서 웨이퍼 전체에 적절한 온도와 압력을 접합과정 동안에 공급해야 한다는 것인데, 일반적인 접합 방식을 이용한 과정에서는 비교적 고온에서 접합이 이루어지고 고온 공정에서 발생하는 열이 각각의 디바이스에 전달되면서 여러 가지 문제점들이 발생하게 된다. 특히 열전도에 의해서 소자에 열이 전도되어 소자의 성능을 저하시키는 현상은 시스템 전체에 영향을 주는 중요한 인자이다. 접합물로 사용되어지는 재료의 개선으로 접합 강도가 향상되고, 접합 온도가 낮아졌지만 문제가 완전히 해결된 것은 아니었기 때문에 문제점들의 해결을 위해서 부분적인 가열 방식이 연구되었다[4].

2. 본 론

2.1 Principle of Localized Heating and Bonding

기존의 접합 방식에서 발생하는 문제점들을 해결하기 위해서 새롭게 연구된 패키징 방법 방식이 미세 가열기(micro heater)를 이용한 접합 방식이다. 부분 가열(localized heating)은 기본적으로 공융 접합에 바탕을 두고 전체적인 가열기(furnace)를 사용하는 대신에 미세 가열기를 사용하여 접합에 필요한 온도를 공급하게 된다. 이러한 미세 가열기를 이용한 가열 방법은 아주 작고 가느다란 미세 가열기를 이용하여 가열되는 부분을 작은 범위로 제한함으로써 절연 물질(insulation material)에 둘러싸인 미세 구조물에 미치는 영향을 미미하게 줄여준다. 장점이 있다. 이러한 부분 가열의 효과는 접합 물질의 선정과 전체 구조물의 기하학적인 형태에 설계에 따라서 많이 좌우되며 간단한 원리는 그림 1(a)에 설명되어 있다[5],[6].

예를 들어, 최근에 발표된 열전달 연구 이론에 따르면, 그림 1(b)에서 보여지듯 미세 가열기를 이용해서 1000 $^{\circ}$ C 이상으로 가열을 하였을 경우에 미세 가열기로부터 2 μ m 거리의 주변 온도는 대략 100 $^{\circ}$ C 가량으로 떨어짐을 열적 해석(thermal analysis)을 통하여 확인할 수 있었다. 이러한 장점 때문에 미세 가열기를 이용한 금속 접합물(metal solder) 접합은 IC나 MEMS 패키징에 많이 적용하고 있으며, 앞으로 더 많은 부분의 마이크로 시스템의 패키징에 적용될 것으로 예상된다[6].

미세 가열기를 이용한 패키징의 기본 원리는 실리콘 웨이퍼 위에 전기적, 열적 절연층으로 사용할 SiO₂ 층을 1 μ m 이상 증착(deposition)하고 난 후, 미세 가열기로 사용할 폴리 실리콘(poly-silicon)을 증착, 형상화(patterning)하여 공정을 진행한다. 제작된 미세 가열기에 전류를 공급하게 되면, 저항을 갖고 있는 미세 가열기의 온도가 증가하게 되고 접합 과정이 이루어지게 된다[4].

전류의 변화에 따라 미세 가열기에 발생하는 온도가 변화하게 되고, 이러한 미세 가열기의 전기적-열적 모델은 에너지 보존 법칙에 의하여 그 온도를 예상할 수 있으며, 미세 가열기에 발생하는 온도 변화는 식 (1)을 이용하여 계산할 수 있다[4].

$$\frac{\partial T^2}{\partial x^2} = \frac{1}{\alpha_p} \frac{\partial T}{\partial t} + \varepsilon(T - T_r) \quad (1)$$

여기서 T는 미세 가열기에 발생하는 온도를 의미하며, α_p 는 폴리 실리콘의 열 확산 계수, ε 는 전류 밀도 등을 포함하는 미세 가열기의 가변 인자를 의미하고, T_r 미세 가열기의 초기 온도를 의미한다. 각 항목에 대한 설명은 아래의 식 (1.1-2)에 설명되어 있다.

$$\alpha_p = \frac{1}{c_p} \frac{k_p}{\rho_p} \quad (1.1)$$

$$\varepsilon = \frac{k_0 F_s}{k_p z t_0} - \frac{J^2 \rho_0 \zeta_p}{k_p} \quad (1.2)$$

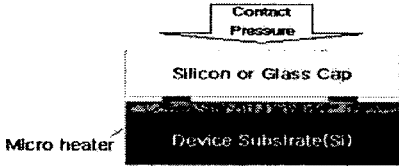


그림 1. (a) Principle of the localized bonding experiments cross-sectional view.

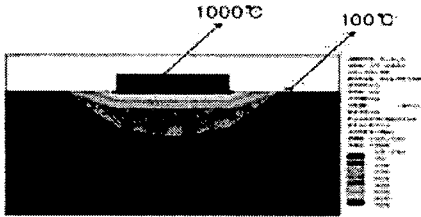


그림 1. (b) Isothermals around a micro heater capped with a Pyrex glass substrate.

2.2 기존 미세 가열기 방식(Conventional micro heater scheme)의 문제점

기존에 연구된 미세 가열기를 이용한 실험은 비교적 우수한 접합력(bonding strength)을 갖는 것을 알 수 있었다. 그러나, 기존 형상의 미세 가열기를 이용한 실험에서는 접합물과 Pyrex glass 사이에 접합이 잘 이루어지지 않는 부분(unbonded region)이 발생하는 문제점을 가지고 있었으며, 이러한 문제는 패키징한 마이크로 시스템이 정상적으로 작동하지 못하는 중요한 원인임을 알 수 있었다. 이러한 접합이 잘 이루어지지 않는 부분을 제거하기 위하여 미세 가열기의 온도를 증가시켜 실험을 실시하였으며, 접합이 잘 일어나지 않는 부분에 대한 문제에 대한 해결은 가능하였으나, 문제 해결을 위해 증가시킨 열에 의한 열 응력(thermal stress)에 의해서 그림 2에서와 같이 Pyrex glass에 미세 균열(micro crack)이 발생하는 문제를 가지고 있었다.[7].

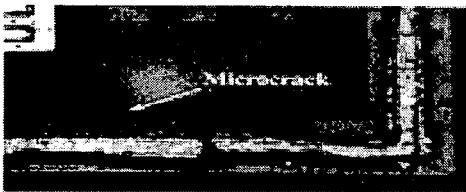


그림 2. Optical photograph of the hermetic package fabricated at 850°C for 2 min showing microcrack formation on the glass capsule due to the thermal stress effects

Pyrex glass cap에 발생된 미세 균열도 접합이 잘 이루어지지 않는 부분과 마찬가지로 패키징 된 마이크로 시스템에 leak이 발생하는 가장 큰 원인이 된다는 것을

알 수 있었으며, 본 연구는 이러한 문제점의 해결에 중점을 두고 연구되었다.

2.3 FP Scheme Fabrication and Experimental Results

앞에서 설명된 기존의 미세 가열기를 이용한 실험에서 나타난 문제점을 해결하기 위해서 연구 방식이 그림 3에서 보여주는 forced potential(FP) scheme의 미세 가열기 방식이다. 기존의 미세 가열기가 한 곳에서 전류를 공급하는 방식으로 미세 가열기 전체에 공급되는 전류에 의한 미세 가열기의 발열이 균일하지 못하기 때문에 그림 2와 같이 접합이 균일하게 이루어지지 못하는 현상이 발생하였고, 이러한 문제점을 해결하기 위해 그림 3에서 보여지듯이 기본적인 방식 이외에 추가적으로 2곳에 전압을 가하여 미세 가열기 전체가 균일하게 가열할 수 있도록 연구되었다.

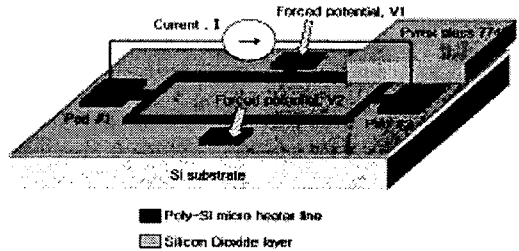


그림 3. Experimental set up of the forced potential (FP) scheme micro heater on a silicon wafer.

FP scheme의 미세 가열기를 이용한 마이크로 시스템의 패키징 실험을 위해 미세 가열기를 제작하는 공정을 그림 4와 같이 나타낼 수 있다. 일반적인 P-type의 실리콘 웨이퍼에 전기적, 열적인 절연층(insulation layer)인 SiO_2 층을 $2\mu\text{m}$ 증착한 후 (a), LPCVD를 이용하여 폴리 실리콘을 $2\mu\text{m}$ 증착하였으며, 증착이 완료된 웨이퍼에 대해서 폴리 실리콘에 확산 공정을 통하여 Phosphorus를 주입함으로써 폴리 실리콘에 전도성을 갖도록 하였다(b). 폴리 실리콘 층 위에 알루미늄 박막을 증착하고 패터닝 하여 건식 식각을 위한 마스크로 사용하였다(c). 제작되어진 미세 가열기 위에 전기 절연층으로 사용될 $\text{SiO}_2/\text{Si}_3\text{N}_4/\text{SiO}_2$ 구조를 증착하여 형성화하고(d), 접합물로 사용되어질 알루미늄(Al)을 증착하여 공정을 마무리하였다(e).

제작이 완료되어진 미세 가열기의 형상은 그림 5와 같으며, 제작되어진 기존의 미세 가열기와 FP scheme의 미세 가열기의 가열 형상의 차이를 알아보기 위하여 IR camera를 이용, 관찰한 결과가 그림 6이며, IR camera의 측정 한계가 $2\text{ cm} \times 2\text{ cm}$ 이므로 기준에 맞추어 특별한 시편을 제작하였고, 실험에 사용된 미세 가열기는 폭이 $100\mu\text{m}$, 두께가 $2\mu\text{m}$ 인 미세 가열기를 사용하였다.

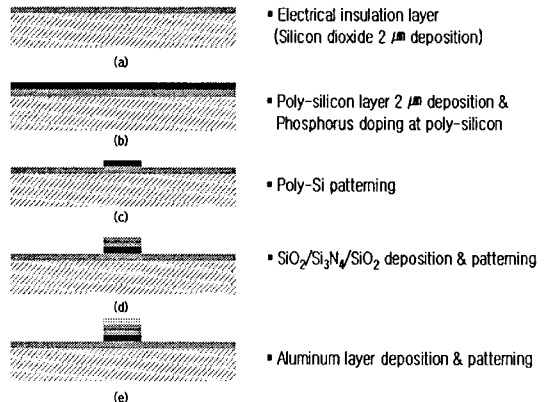


그림 4. Fabrication process of FP scheme micro heater

기존의 미세 가열기의 경우 그림 6 (a)에서 보여지듯이 미세 가열기의 가장자리 부분에서 가열이 균일하게 이루어지지 않았으며, FP scheme의 경우 그림 6 (b)와 같이 매우 균일하게 가열되는 현상을 관찰할 수 있었다.

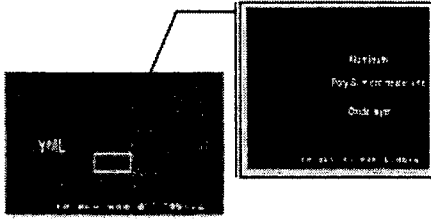


그림 5. Fabrication result of FP scheme microheater

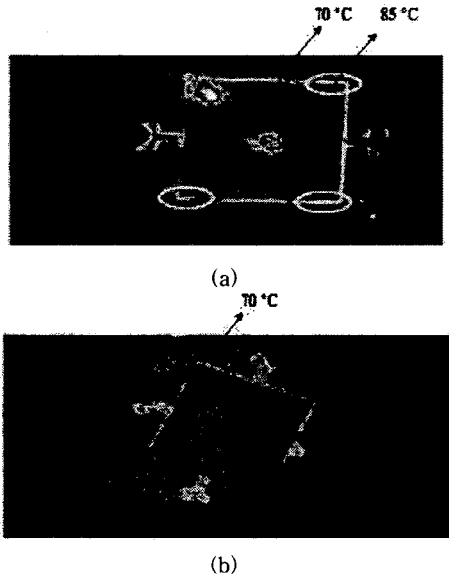


그림 6. IR camera test results of (a) conventional scheme micro heater (b) FP scheme micro heater

IR camera 실험 결과를 바탕으로 실제 접합 실험을 진행하였다. 접합 실험시 사용한 시편의 크기는 각각 8mm x 8mm, 5mm x 5mm, 3mm x 3mm의 크기와 폭 50 μ m, 두께 2 μ m로 제작되었고, 150 mA의 전류를 공급하였으며, glass cap에 접촉 압력은 0.2 Mpa이하인 상태에서 3분간 접합을 진행하였다. 이러한 접합 공정을 통하여 패키징 되어진 시편에 대해서 IPA(Isopropanol Alcohol)를 이용하여 leak test를 실시하였다. IPA는 접합된 시편에 대한 leak check 실험에서 있어서 물보다 뛰어난 wet-ability를 가지고 있기 때문이며, 기존 형상의 미세 가열기를 이용한 패키징과 FP scheme 형상의 미세 가열기를 이용한 패키징 소자들에 대해 각각 실험을 진행한 결과가 그림7과 같다.

그림 7에서 알 수 있듯이, 기존의 형상의 미세 가열기의 경우 15개의 시편 중 10개의 시편이 IPA 실험을 통과하여 66%의 통과율을 보인 반면, FP scheme의 경우 15개의 시편 중 13개의 시편이 실험을 통과하여 85%의 통과율을 나타내었다.

IPA를 이용한 leak 실험을 통과한 시편을 대상으로 각각의 접합력을 측정하는 실험을 실시하였으며, 기존 형상의 미세 가열기의 경우 단위 면적당 15~20 Mpa 정도의 접합력을 나타낸 반면, FP scheme 형상의 미세 가열기는 25~30 Mpa이상의 우수한 접합력을 나타냄을 알 수가 있었다.

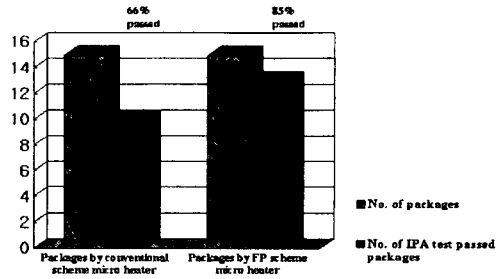


그림 7. Results of IPA test. The pass ratio of bonded dies was 66%, for conventional localized heating, and 85% for newly developed FP scheme.

3. 결론

본 논문에서는 기존에 연구되어진 미세 가열기를 이용한 접합 실험의 문제점에 대해 연구하고, 그 문제의 해결 방안으로 FP scheme의 미세 가열기를 이용한 비교 실험을 진행하였다. IR camera를 이용한 실험 및 IPA test, 접합 강도 실험 결과 등을 통하여 기존 형상의 미세 가열기 형상과 FP scheme의 미세 가열기 형상을 비교한 결과, FP scheme의 미세 가열기를 이용한 마이크로 시스템의 패키징이 기존의 미세 가열기를 이용한 경우 보다 매우 균일하게 가열되었고, 성능 면에서도 매우 우수한 성능을 갖고 있다는 것을 알 수 있었으며, 기존의 미세 가열기를 이용한 방식에서 발생하는 균일하지 못한 가열과 Pyrex glass에 발생되어지는 미세 균열 현상도 발견되지 않았다. 따라서, 현재까지 연구되어진 실험 결과를 바탕으로 그 동안에 개발된 습도 센서와 공진기 등에 적용을 통하여 FP scheme의 미세 가열기를 이용한 마이크로 시스템 패키징을 실시할 것이다. 그러한 결과들을 바탕으로 FP scheme의 미세 가열기를 이용한 패키징이 다양한 마이크로 시스템에 적용되어 많은 MEMS 소자들의 실현을 가능하게 할 것이다.

감사의 글

본 연구는 삼성전자 종합기술원의 지원으로 진행되었습니다.

참고 문헌

- [1] Wen H. Ko, "Packaging of Microfabricated Devices and Systems", Materials Chemistry and Physics, vol. 42, pp 169-175, 1995
- [2] Duck-Jung Lee, Byeong-Kwon Ju, Yun-Hi Lee, Jin Jang, Myung-Hwan Oh, "Glass- to-glass anodic bonding for high vacuum packaging of microelectronics and its stability", MicroElectro- Mechanical Systems, 2000. pp 253 - 258, The Thirteenth Annual International Conference on, 2000
- [3] Gregory T. A. Kovacs, "Micromachined Transducers Source-book", McGraw-Hill, 1997
- [4] Liwei Lin, "MEMS Post-Packaging by Localized Heating and Bonding", IEEE Transactions on Advanced Packaging, Vol 23, No 4, pp 608 - 616, November 2000
- [5] Ramesham, R.; Ghaffarian, R., "Challenges in interconnection and packaging of microelectro-mechanical systems (MEMS)", pp 666 - 675, Electronic Components & Technology Conference, 2000. 2000 Proceedings. 50th, 2000
- [6] Cheng, Y. T., Lin, L. and Najafi, K., "Localized silicon fusion and eutectic bonding for MEMS fabrication and packaging", Microelectromechanical Systems, Journal of, Volume: 9 Issue: 1, Page(s): 3-8, March 2000
- [7] Cheng, Y. T., Lin, L. and Najafi, K., "A hermetic glass-silicon package formed using localized aluminum/silicon-glass bonding", Microelectro mechanical Systems, Journal of, Volume: 10 Issue: 3, Page(s): 392 -399, Sept. 2001