

マイクロメカニクスを用いた Flexible センサー パッケージ

황은수, 김용준
연세대학교 기계공학부

Flexible Sensor Packaging using Micromachining Technology

Eun-Soo Hwang and Yong-Jun Kim
School of Mechanical Engineering, Yonsei University

Abstract - 새로운 방식의 일체형 flexible sensor module을 제작하였다. MEMS공정을 이용하여 제작된 이 센서 모듈은 배선기판은 물론 strain sensor 역시 임의의 곡면에 실장을 위해 자유로운 굽힘이 가능하도록 제작되었다. 실리콘웨이퍼에 구현된 piezoresistor 스트레이인 센서는 release-etch 방법을 통해 웨이퍼로부터 분리되어.. 폴리이미드를 기판으로 하는 Flexible Sensor Array Module로 완성되었다. 소자와 기판은 따로 제작한 후 조립하는 기존의 방식에 비해, 웨이퍼 위에서 flexible 기판을 형성하여 수율이 높고 사진공정의 정밀도를 그대로 보전한 기판과 센서 어레이의 패키징이 가능하였으며, 칩을 기판에 실장하기 위한 정밀한 조립공정도 불필요하였다. 폴리이미드 기판은 전기도금을 통해 회로를 구성하여 1단계 패키징(chip to chip carrier)과 2단계 패키징(chip to substrate)을 웨이퍼 레벨에서 완성하였다. 마지막으로 불산 용액을 통해 회생층을 제거함으로서 웨이퍼로부터 센서어레이 모듈을 분리하였다.

1. 서 론

정보화 사회로 발전해 가면서 캔들러폰, PDA(Personal Digital Assistant), Notebook computer 등 많은 휴대용 기기들이 등장하게 되었다. 정보 수준이 높아지고, 정보 교환 빈도가 증가함에 따라 오늘날의 휴대용 기기들은 내일의 일을 수 있는 기기(wearable device)로 진화하게 될 것이다[1]. 전기·전자 제품을 입을 수 있는 기기로 생산하기 위해서는 IC(Integrated Circuit), 센서 등의 반도체 소자를 non-planar 표면상에 실장 시켜야 하며, 이를 위해서 flexible packaging 기술의 개발이 필요하다. 실리콘웨이퍼를 대략 $50\ \mu\text{m}$ 이하로 얇게 가공하였을 때 실리콘이 휘어지기 쉬운 성질을 이용하여, 웨이퍼 연삭을 통해 유연성 있는 칩을 생산하고, RF ID 카드를 제작한 연구 결과가 발표된 바 있다[2]. 그러나, 얇게 가공된 칩, 웨이퍼는 그 유연함으로 인해 다루기가 어려우므로 패키징 단계에서 수율이 낮아지는 문제가 발생할 수 있고, 칩과 기판간의 전기적 연결을 구현하는 데에도 칩의 파손 등의 문제가 발생할 수 있다. 또한 array를 구성하는데 있어서도, 정밀한 형태의 조립에는 많은 어려움과 비용의 문제가 있는 것도 사실이다. 본 논문에서는 표면 마이크로메카니크 기술을 이용한 새로운 flexible packaging 기술을 제안한다. 폴리실리콘으로 구현된 스트레이인 게이지 위에 폴리이미드 층을 구현하고, 이 층을 인쇄회로기판(PCB)의 역할을 할 수 있도록 신호선을 구현한다. 최종적으로 일반적인 표면 마이크로메카니크 기술을 이용하여 칩과 폴리이미드 기판을 분리하여 완성된다. 제안된 방법으로 구현된 모듈의 경우 앞서 기술한 바와 같이 임의의 곡면에 부착이 가능한 자유로운 굽힘이 가능하게 된다. 또한 모든 구조가 사진 공정에 의해 정의되므로 추가적인 패키징 공정이 필요 없게 되고, 이에 따라 손쉽게 array 형태나 소자의 정밀한 2차원적 배치가 가능해 진다.

2. 본 론

2.1 Strain gauge

실리콘 재료의 piezoresistive 효과는 잘 알려져 있으며 압력 센서, 가속도 센서 등은 MEMS 용융제품의 주류를 이루고 있다. 압력 센서나, 가속도 센서와 같이 응력을 받는 부분에 직접 드링의 방법을 통해 구성되는 스트레이인 게이지 외에 접착제를 통해 응력을 받는 구조물에 붙여지는 형태의 스트레이인 게이지로는, 실리콘 재료의 높은 감도(sensitivity)에도 불구하고, 금속이 가장 많이 사용되고 있다. 금속을 이용한 스트레이인 게이지는 폴리이미드 기판 위에 스퍼터를 이용하여 금속선을 형성할 수 있으므로 공정이 간단하나, 감도가 떨어지는 단점이 있다 (일반적으로 GF=2~3). 실리콘 스트립(strip)을 이용한 반도체 스트레이인 게이지는 감도(GF=80~200)는 크게 좋으나, 그 제작공정 복잡하여 사용 가격이 대단히 비싸다. 최근에 실리콘 봄바가공(bulk micromachining)을 이용하여 flexible substrate에 실리콘 스트레이인 게이지를 만드는 공정이 보고되어, 고감도 스트레이인 센서로서의 용용될 수 있으나, 실리콘 스트레이인 게이지의 piezoresistive 효과의 방향성으로 인해, 같은 방향으로의 배열만이 가능하여 그 용용이 제한적일 수 밖에 없다[3]. 반면에 폴리실리콘 스트레이인 게이지는 임의의 방향으로 배열할 수 있으며, 금속에 비해 감도(sensitivity)가 수배에서 수십 배 높음으로, 각각 피부(sensitive skin)등 다양한 분야에 적용되어질 수 있다.

폴리실리콘의 경우 그레인(grain)크기에 따라 단결정 실리콘에 비해 일반적으로 7배 정도 작은 게이지 팩터(gauge factor)값을 가진다[4]. 본 연구에서는 폴리실리콘에 Boron 이온을 주입 하였으며, 총 dose 양은 $1.0 \times 10^{16}/\text{cm}^2$ 으로 하였다. 이 경우 게이지 팩터는 1.5~2.5에 이른다[5]. 스트레이인 게이지가 패키징된 후에는 폴리이미드 기판에서의 댐핑(damping)효과와 폴리실리콘, 폴리이미드 접합면에서의 스트레이인 손실로 인해 예측된 게이지 팩터값보다 낮을것으로 예상할 수 있다.

2.2. Fabrication

일반적인 반도체 공정을 이용하여 회생층으로 사용될 실리콘 산화막층(LTO) $2\ \mu\text{m}$ 과 폴리실리콘 층을 LPCVD를 이용하여 $0.5\ \mu\text{m}$ 증착하였다. 폴리실리콘은 Boron 이온 주입공정을 통해 전도성을 가지도록 하였다(a). 폴리실리콘층 위에 알루미늄 박막을 증착하고 패팅하여 건식 식각을 위한 마스크로 사용하였다(b). SF_6 기반의 RIE(Reactive Ion Etching)공정으로 폴리실리콘을 식각하였다(c). (a)(b)(c)공정을 통하여 스트레이인 센서 어레이를 제작하였다. 표면 미세 가공을 통해서 제작된 폴리실리콘 스트레이인 게이지를 적당한 칩 캐리어(chip carrier)에 실장 시키기 위해서, 본 논문에서는 폴리이미드(DuPont-PI2611)을 코팅하고 큐어링하여 기판을 형성하였다. 전기신호를 교환하기 위한 회로는 전기도금을 통해 구성하였다. 이러한 공정을 통해 폴리이미드는 인쇄회로기판(PCB;Printed Circuit Board)의 역할을 할 수 있으며, 웨이퍼에 제작되어 있는 센서 어레이는 별도의 조립 공정 없이 폴리미드 기판 내에 위치하여 외부와 신호를 주고 받을 수 있다. 세부공정을 아래에 열거하였다.

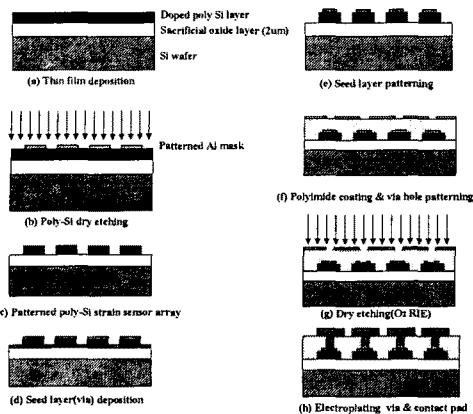


그림 1. Simplified fabrication process

Cr/Cu/Cr 을 각각 $500\text{\AA}/3000\text{\AA}/500\text{\AA}$ 을 via 전기 도금을 위한 씨앗층(seed layer)으로 증착하였다.(d). 이 씨앗층을 선택적으로 노출시켰다. 회석시킨 염산용액과 PAN 용액을 통하여 각각 크롬층과 구리층을 흡식 식각 하였다.(e). 폴리아이미드를 1000rpm 으로 2회 스판 코팅한 후, 350°C 에서 1H 동안 큐어링(curing)하여 $15\ \mu\text{m}$ 의 폴리머 기판을 형성하였다. 폴리실리콘 스트레인 케이지와 전기 접촉을 위한 via를 만들기 위해 알루미늄을 1500\AA 증착하였다.(f). 알루미늄을 패터닝한 후, $100\% \text{ O}_2$ RIE로 폴리아이미드 기판을 건식 식각하여 via hole을 구성하였다.(g). Cu 전기도금을 통해 via를 형성하고 다시 씨앗층을 증착, 외부와 신호 전달을 위한 contact pad와 회로를 형성하였다.(h).

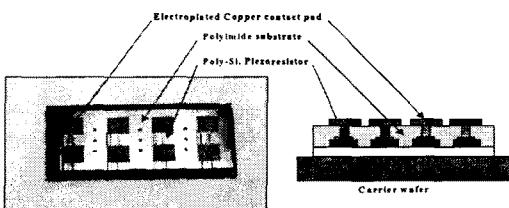


그림 2. Fabricated sensor array module (before release)

2.3 Release-etching

웨이퍼에 표면 미세가공(surface micromachining)을 통해 구성된 스트레인 케이지 어레이는 회생층을 제거함으로써 단단한 웨이퍼 표면으로부터 분리되어야 하며 이러한 공정을 통해 flexible module화 될 수 있다. 폴리아이미드 기판과 스트레인 센서를 웨이퍼로부터 분리하기 위한 release-etch 공정은 확산 메커니즘에 의한 과정이므로 자칫 긴 시간이 소요되게 되어 생산성을 저하시키며, 기기의 성능을 낮추는 효과를 가져올 수 있다. 따라서, release-etch 시간을 최소화하기 위한 모듈 설계가 필요하며, 이를 위해서 release-etch에 필요한 시간을 미리 예측하는 것은 생산성 향상을 위한 중요한 작업이다.

실리콘 산화막과 불산 용액과의 반응은 많은 사람에 의해 연구되어져 있다.

실리콘 산화막의 식각 속도는 불산 용액의 유속(flux)에 비례 한다.

$$\frac{d\delta}{dt} = (\alpha J_{HF}) \Big|_{x=\delta} \quad (1)$$

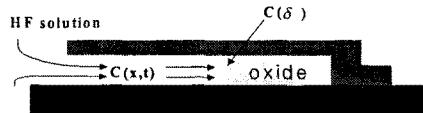


그림 3. 1D Wet etch model

불산용액의 유속은 농도의 함수이며 이 함수는 실험적으로 아래의 식과 같다[6].

$$J_{HF} = f(C) = k_1 C + k_2 C^2 \quad (2)$$

where, C is concentration of HF solution

Fick의 확산법칙으로부터,

$$J_{HF} = -D(\nabla C) \quad (3)$$

where, D is the diffusivity of HF in water

연속방정식으로부터,

$$u \nabla C + \frac{\partial C}{\partial t} = D \nabla^2 C \quad (4)$$

(4)번식에서 대류에 의한 영향을 무시하고, 준정적(quasi-static)과정임을 고려하여 시간에 대한 농도의 변화를 무시한다면,

$$D \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} = 0$$

Having general solution, $C(x) = Ax + B$

From Boundary condition, $C(0) = C_b$

where, C_b is bulk etchant concentration.

(5)식과 (3)식을 이용하여, 불산 용액의 유속은 다음과의 식으로 표현된다.

$$J_{HF} = -D \frac{\partial C}{\partial x} \Big|_{x=\delta} = -DA \quad (6)$$

(2)식, (6)식으로부터,

$$A = -\frac{1}{2k_2\delta^2} \{ D + (k_1\delta + 2\delta k_2 C_b) - \sqrt{k_1^2\delta^2 + (2Dk_1 + 4C_b Dk_2)\delta + D^2} \} \quad (7)$$

(7)식과 (1)식을 이용하여 식각률을 구할 수 있다.

$$\frac{d\delta}{dt} = -\frac{a}{2k_2} \left\{ -(k_1 + k_2 C_b) \frac{D}{\delta} - \frac{D^2}{\delta^3} + \left(\frac{D}{\delta} \right) \sqrt{k_1^2 + 2(k_1 + 2k_2 C_b) \left(\frac{D}{\delta} \right) + \left(\frac{D}{\delta} \right)^2} \right\} \quad (8)$$

(8)번식을 적분하면, 식각 길이에 필요한 시간을 계산해낼 수 있다.

$$t(\delta) = \frac{k_2 \left[\left(\frac{D}{k_1^2} - \frac{\delta^2}{D} - \frac{\beta}{k_1^2} \right) \eta - 2\delta - \beta \frac{\delta}{D} \right]}{\alpha(k_1^2 - \eta^2)} - \frac{k_2 D \ln \left[\frac{k_1 \beta + k_1^2 \delta + \eta D}{D(k_1 + \eta)} \right]}{\alpha k_1^3} \quad (9)$$

$$\text{where, } \eta = k_1 + 2C_b k_2 \quad \beta = \sqrt{2\eta\delta D + k_1^2\delta^2 + D^2}$$

(9)식을 통해, 확산 메커니즘에 의한 실리콘산화막의 식각 길이에 소요되는 시간을 예측할 수 있다. 위의 모델을 바탕으로 센서 모듈의 크기는 $9.4\text{mm} \times 4\text{mm}$ 으로 설계하였고, release-etch에 소요되는 시간은 2시간 40분으로 예상되었다.

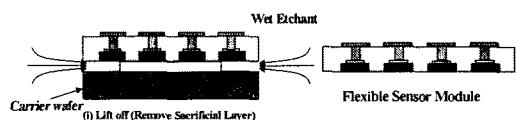


그림 4. Release-etch process

49% 불산 용액을 통해 폴리머를 기판으로 하고 폴리실

리콘 스트레인게이지와 내부 회로를 포함한 센서 모듈을 웨이퍼로부터 분리, 완성하였다(그림 5.).

2.4 Sensitivity

스트레인게이지의 감도는 GF(gauge factor)로 표현된다.

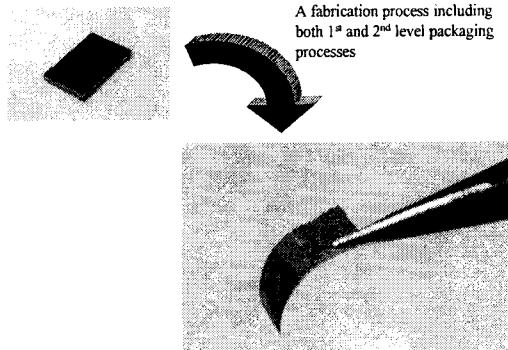


그림 5. Released flexible sensor array module

다. GF는 가해진 변형률에 대한 저항 값의 변화율로 정의되며 아래의 식과 같다.

$$GF = \frac{\frac{\Delta R}{R}}{\frac{\Delta L}{L}} = \frac{\Delta R}{\epsilon R} \quad (3)$$

제작된 센서 모듈의 GF를 측정하기 위해 다음과 같이 실험장치를 구성하였다(그림 6).

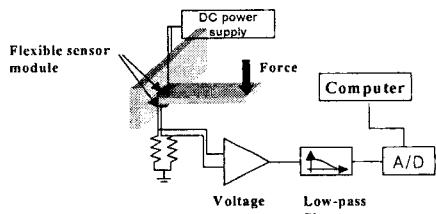


그림 6. Simple GF measurement scheme

외판보에 힘을 가하는 것은 추를 이용하여 하였다. 변형률은 moment-curvature equation을 이용해서 구해질 수 있다.

$$x = \frac{M}{EI}$$

$$\epsilon = x \times \text{thickness}/2$$

where E is young's Modulus of Aluminum alloy
 I is moment of Inertia of area

표 1. 변형률에 대한 저항 값의 변화율

strain(ϵ)	$\Delta R/R$
-4.923×10^{-4}	-3.106×10^{-3}
-3.282×10^{-4}	-2.280×10^{-3}
-1.641×10^{-4}	-1.206×10^{-3}
0	0
1.641×10^{-4}	1.255×10^{-3}
3.282×10^{-4}	2.718×10^{-3}
4.923×10^{-4}	3.522×10^{-3}

완성된 스트레인 게이지의 게이지 팩터는 7로 측정되었다.

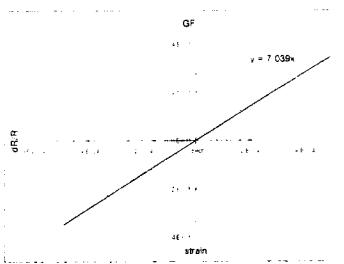


그림 7. Gauge Factor

앞에서 언급한 바와 같이 폴리실리콘에 Boron이 $1.0 \times 10^{20}/cm^3$ 정도 도핑된 경우 게이지 팩터는 그레이크기에 따라 15~25사이의 값을 가지게 되나, 폴리아미드 기판의 냅평효과, 폴리실리콘/폴리아미드 계면에서의 스트레인 손실, 접착제로 인한 스트레인 손실에 원인이 있다.

3. 결 론

マイクロマーチニング을 이용한 새로운 flexible sensor packaging의 방법이 제안되었다. 제안된 공정은 폴리실리콘에 구현된 반도체소자 위에 액상 폴리아미드를 코팅하고 전기도금을 통해 배선 회로를 구성함으로써, 폴리아미드를 반도체 소자를 포함한 인쇄회로기판(PCB;Printed Circuit Board)의 기능을 담당하게 하여 1단계 패키징과 2단계 패키징을 일괄적으로 수행할 수 있도록 해준다. 제안된 방안은 재생 가능한 공정이며, 웨이퍼 상에서 패키징 공정을 수행함으로 기존의 조립에서 발생할 수 있는 수율 저하 등의 문제점을 원천적으로 없앨 수 있는 장점을 가지며, 도금을 통해 high density interconnection도 가능하다. 표면 미세가공기술을 이용하여 제작된 폴리실리콘 스트레인 게이지 어레이는 회로를 갖춘 폴리아미드 인쇄 회로 기판에 성공적으로 실장되었으며, 센서로서의 기능을 수행할 수 있었다.

본 논문에서 제안된 flexible 패키징 방안은 폴리실리콘 스트레인 게이지의 패키징에 적용하였다. 비록, 가장 간단한 구조라는 이유로 스트레인 게이지가 본 연구에 사용되었지만, 제안된 방법을 이용하여 기타 폴리실리콘 소자를 이용하여 센서의 2차원 배열을 통한 감각피부, 압력·열 센서 어레이 등으로 용용이 가능하며, 단 결정 소자를 위한 SOI나 Silicon thinning에 의한 flexible silicon 등을 같은 방법으로 flexible substrate에 패키징 할 수 있다. 따라서, 향후 wearable device의 구현을 위한 ultra-thin 패키징의 한 방안으로 제안되어질 수 있다.

(참 고 문 헌)

- [1] Pentland, A., "Wearable information devices ", IEEE Micro , Volume:21 Issue: 3 , May June 2001 Page(s): 12 - 15
- [2] Klink, G.; Feil, M.; Ansorge, F.; Aschenbrenner, R.; Reichl, H. "Innovative packaging concepts for ultra thin integrated circuits", Electronic Components and Technology Conference, 2001.Proceedings,51st, 2001, Page(s): 1034 - 1039
- [3] Michael L. Nagy; Christopher Apnius; James W. Siekkinen, "A User-friendly, high sensitivity, Strain gauge", Sensors June, 2001
- [4] Eaton, W.P, "Surface micromachined pressure sensors", Doctoral thesis, University of New Mexico, 1997
- [5] Le Berre, M.; Kleemann, P.; Scirmiache, B.; Barbier, D.; "Electrical And Piezoresistive Characterization Of Boron Doped Lpcvd Polycrystalline Silicon Under Rapid Thermal Annealing", Solid State Sensors and Actuators, 1995 and Eurosensors IX.. Transducers '95. The 8th International Conference on , Volume: 2 Page(s): 76 - 79
- [6] Eaton, W.P.; Jarecki, R.L.; Smith, J.H. "Prediction of release etch times for surface micromachined structures", Solid State Sensors and Actuators, 1997. TRANSDUCERS '97 Chicago., 1997 International Conference on , Volume: 1 , 1997 Page(s): 249 - 252 vol.1