

유속감지를 위한 반도체 유량센서

*이영주, 전국진
*서울대학교 전자공학과, 반도체 공동연구소

Semiconductor Flow Sensor To Detect Air Flow

*Youngjoo Yee, Kukjin Chun
*Dep. of electronic engineering, Seoul National University
and Inter-university Semiconductor Research Center.

Abstract

Silicon flow sensor which can detect the magnitude and direction of two dimensional air flow was designed and fabricated by CMOS process and bulk micromachining technique. The flow sensor consists of three-layered dielectric diaphragm, a heater at the center of the diaphragm and four thermopiles surrounding the heater at each side of diaphragm as sensing elements. This diaphragm structure contributes to improve the sensitivity due to excellent thermal isolation property of dielectric materials and its tiny thickness. The flow sensor has good axial symmetry to sense 2-D air flow with the optimized sensing position in the given structure. Measured sensitivity of our sensor is $18.7 \text{ mV}/(\text{m/s})^{1/2}$.

1. 서론

실리콘을 기초물질로 이용한 반도체 센서는, 이미 일반화된 반도체 일괄제조공정(batch process)에 의한 단위 생산비의 절감, 소형화에 따른 소모전력의 감소와 경량화 및 빠른 응답특성, 실리콘 미세가공(micromachining) 기술을 이용하여 센서를 기존의 집적회로와 함께 하나의 실리콘 기판상에 제작하는 지능화 센서, 여러가지 센서를 하나의 칩에 집적하는 다기능 센서로의 가능성 등의 여러가지 장점을 가지고 있다. 여러 종류의 센서들 중에서 유량센서는 유체의 속도를 감지할 수 있는 역학센서이며, 가장 널리쓰이는 대표적인 센서중의 하나이다[1].

본 논문에서 다루는 유량센서는, 감지원리가 유속(流速)에 의해 유기되는 감지부의 온도변화를 출력 전기신호로 변환하는 열형 유량센서이다. 유량센서의 기본구조는 그림 1에 보이는 것과 같이, 유속의 변화를 온도의 변화로 변환시켜 주기위한 가열부와 변환된 온도를 감지하는 온도감지 요소(thermocouples)가 있으며, 감도(sensitivity)를 개선하기 위하여 위의 두 기본 구성요소를 약 $1\mu\text{m}$ 두께의 절연체 다이아프램 위에 배치함으로써 이루어진다. 절연체 다이아프램

구조는, 구성을질인 실리콘 산화막과 실리콘 질화막의 낮은 열전도도때문에, 가열부에 공급한 전력량에 대해 열전도로 소모되는 부분을 억제함으로써 상대적으로 유속에 의한 온도변화를 크게하여 동일한 입력 전력량에 대해 유속에 대한 감도를 높여주게 된다. 온도의 변화를 감지하는 요소로는 다결정 실리콘(polysilicon)과 알루미늄으로 이루어진 열전도(thermopile)을 이용함으로써 CMOS 공정을 이용한 제작이 가능하도록 하였다. 특히, 본 유량센서의 구조는 2차원 유속의 크기와 방향을 측정할 수 있도록 대칭적인 구조로 설계되었다.

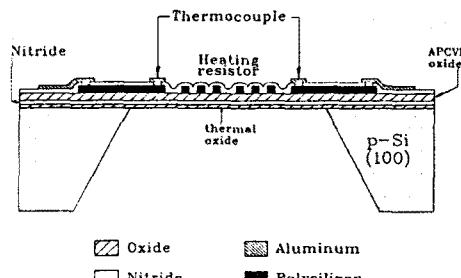


그림 1. 2차원 실리콘 유량센서의 단면도

2. 감지원리

본 논문에서 제안하는 유량센서는 2차원의 유속을 직교하는 두 축성분으로 파로 측정하여, 각각의 출력성분을 이용하여 유속의 크기와 방향을 감지한다. 그림 2에 2차원 유속의 감지원리를 나타내었다.

그림 2에서 x 축 성분의 출력 전압은 다음식과 같이 유속의 x 축성분의 크기와 함수관계를 갖게된다.

$$V_x \propto \Delta T \propto v_x^\rho \cdot (T_s - T_f) \quad (1)$$

$$\tan \theta = \frac{v_y}{v_x} = \left(\frac{V_y}{V_x} \right)^{1/\rho} \quad (2)$$

여기서 ΔT 는 x 축 방향으로 배치된 두 감지부의 온도차이

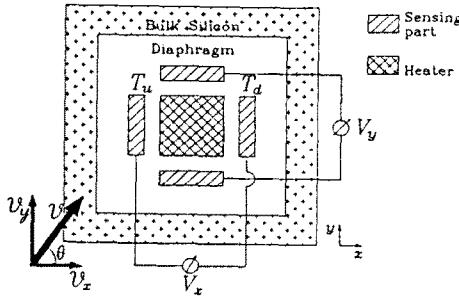


그림 2. 2차원 유속 감지원리

며, 이 온도차는 가열부를 지나기 전의 공기와 가열부를 지나면서 가열된 공기에 의한 강제대류(forced convection)에 의해 방출되는 열량의 차이때문이며, 방출되는 열량에 비례해서 그 점의 온도가 낮아지게 된다. p 는 유체가 laminar flow($p = 0.5$)인지 turbulent flow($p = 0.8$)인지에 따라 결정되는 지수이다. 즉, 유속에 의해 유기되는 감지부의 온도변화의 차를 열전대를 이용하여 측정함으로써 유속 및 방향을 감지하게 되는 것이다. 감지부로 쓰이는 열전대는 다결정 실리콘과 알루미늄으로 구성된 열전쌍(thermocouple) 7개를 직렬로 배열하여 이루어진다. 열전쌍으로 온도를 측정하는 원리는 지백효과(Seebeck effect)로 설명되며, 열전쌍 양단에 온도차가 있으면, 열전쌍에 유기되는 열기전력은 다음과 같다.

$$V_{couple} = \int_{T_1}^{T_2} (S_s - S_m) dT \quad (3)$$

$$S_s(T) = -k \left[r(T) + \frac{5}{2} - \frac{E_F(T) - E_c(T)}{kT} \right] \quad (4)$$

$$\text{여기서, } r_m = r_o \left(\frac{E}{kT} \right)^{r(T)}$$

윗 식에서 S_s, S_m 는 각각 실리콘과 알루미늄의 지백계수(Seebeck coefficient)이며, T_2 는 열전쌍의 감지부 온도, T_1 은 열전쌍의 기준온도를 나타낸다. 식(4)에서 $r(T)$ 는 온도에 따른 친화의 relaxation time을 결정하는 지수이다[2]. n형으로 도핑된 단결정 실리콘의 지백계수를 계산한 결과를 그림 3에 도시하였다. 실리콘의 지백계수는 알루미늄에 비해 상당히 크고[3], 상온 근방에서 거의 일정하므로, 열전대 하나의 출력전압은 다음과 같이 근사할 수 있다.

$$V = N \cdot V_{couple} \approx N \cdot S_s \cdot (T_2 - T_1) \quad (5)$$

여기서 N 은 열전쌍의 갯수인 7이다. 계산 결과에 따르면 지백계수는 도핑농도가 낮을수록 큰 값을 나타낸다. 본 연구에서 채택한 다결정 실리콘은 n-형으로 도핑되었으며, 농도는 10^{19} cm^{-3} 이다. 단결정 실리콘에 대해서 생각하면 지백계수는 $-300 \mu\text{V/K}$ 이다. 따라서, 하나의 축성분에 가열부를 중심으로 대칭적으로 배치된 두 열전대에서 얻어지는 차동(差動) 출력은 두 감지부의 온도차에 의해 결정된다.

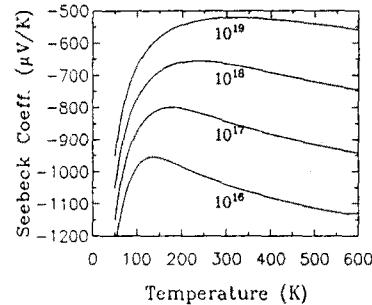


그림 3. n형 단결정 실리콘의 지백계수

3. 최적화된 감지부 위치를 갖는 유량센서의 설계

유량센서의 기본적인 구조인 다이아프램은 열전도에 의한 불필요한 열손실을 억제하는 열차단막 구성을 하게되며, 열전도를 줄이기 위해서는 다이아프램의 두께가 얕을수록 좋다. 그러나, 이 다이아프램은 열차단막으로서의 역할 뿐만아니라 가열부 및 감지부를 지탱하는 기계적인 지지대 역할도 하여야 하므로, 두 가지 상반되는 조건을 만족하는 두께가 요구된다. 실리콘 산화막은 실리콘 질화막보다 훨씬 작은 열전도를 가지고 있지만, 열산화막의 경우 고유한 스트레스 때문에 열산화막만으로는 충분한 두께의 다이아프램을 얻을 수 없다. 따라서, 열산화막과 상반되는 스트레스를 가지는 실리콘 질화막을 삽입함으로써 열산화막의 스트레스를 줄이고, 이 질화막위에 다시 산화막을 중착함으로써 실리콘 산화막의 우수한 열차단 특성을 이용할 수 있게된다. 다이아프램의 구성은 열산화막, LPCVD로 중착된 실리콘 질화막, 저온 산화막(LTO)의 삼층 구조로 하였으며, 크기는 $500\mu\text{m} \times 500\mu\text{m}$ 로 하였다.

가열부 영역의 크기는 $200\mu\text{m} \times 200\mu\text{m}$ 로 하고 가열부의 온도는 일정하게 유지된다고 가정한 후, 정해진 두께를 고려하여 다이아프램 상의 온도분포를 계산하였다. 이렇게 구해진 온도분포와 유속에 의한 강제대류 방정식을 이용하여, 하나의 축방향을 따라서 강제대류에 의해 방출되는 열량을 계산하였다. 2차원 유속을 감지하기 위해서는 양 축방향의 감지부의 위치가 가열부 및 다이아프램에서의 위치를 기준으로 서로 대칭적이어야 하므로, 가열부로부터 떨어진 거리가 같은 두점에서 계산된 방출열량의 차가 최대가 되는 지점이 센서의 감도를 최적화시키는 조건이 된다. 바람이 laminar flow인 경우와, turbulent flow인 경우에서 열방출량의 차가 최대가 되는 점은 각각 가열부로부터 $20\mu\text{m}$ 및 $45\mu\text{m}$ 떨어진 지점에서 나타난다(그림 4). 본 연구에서는 laminar flow인 조건에서의 최적지점을 감지부의 위치로 정하였다.

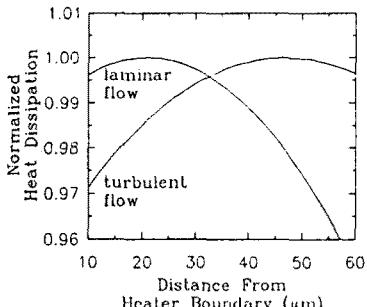


그림 4. 감지부의 최적지점

또, 열전도와 전기전도와의 유사성을 이용하여, 설계된 유량센서의 동작특성을 회로 simulator인 SPICE를 이용하여 예측하였다. 온도차에 의한 열방출을 나타내는 아래의 식은 전류·전압의 관계식과 같은 형식을 취한다.

$$Q = h \cdot A \cdot (T_h - T_i) \quad (6)$$

여기서, Q 는 전류로 T 는 전압에 대응시키고, 열전달 계수인 h 와 열방출 면적 A 의 곱을 열전달 방식에 따라 적당한 conductance에 대응시키면 된다[4]. 설계된 유량센서는 대칭성이 우수하므로, 하나의 축방향에 대하여 시뮬레이션을 하여 얻은 두 감지부의 온도차를 계산하고, 앞서 계산한 다결정 실리콘의 지벽계수를 곱하여, 전기적 출력력을 예측하였다. 그림 5는 센서의 구조에 대응되는 전기회로도이다. 이 회로는 여러 물질의 다층구조로 되어있는 센서에서 감지부와 가열부에서 하나의 축방향을 잘게 나눈 성분회로이다. 감지부(sensing part) 및 가열부(heater)로 구성되는 센서의 전체 동작회로는 그림에 표시된 회로가 여러개 병렬로 연결된 형태로 시뮬레이션이 행해진다. 그림에서 G_f 와 G_n 는 각각 강제 대류 및 자연대류를 나타내는 종속 전류원(VCCS:voltage controlled current source)이며, V_t 와 V_b 는 각각 유체의 온도와 가열부 저항의 온도를 나타낸다. 시뮬레이션 결과는 본 논문 「5절」의 그림 8에 센서의 실제 측정 자료와 함께 비교·도시하였다. 이 그림에서는 가열부의 온도가 330이고 유체의 온도가 상온일 경우의 시뮬레이션 결과를 보여준다.

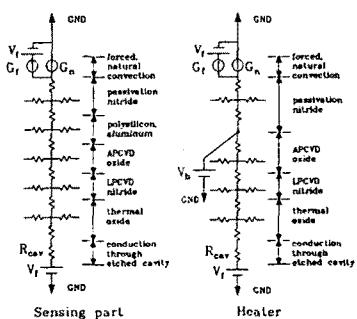


그림 5. SPICE simulation을 위한 센서의 감지부와 가열부의 동작회로요소

4. 2차원 실리콘 유량센서의 제작

본 연구에서는 유량센서를 제작하기 위하여 5개의 사진식 각각 마스크를 사용하였다. 유량센서 제작을 위한 공정 순서도를 그림 6에 보였다. 사용된 웨이퍼는 p형 (100)방향 4인치 웨이퍼이다. 우선 다이아프램을 구성할 절연막 물질을 성장 및 증착한다. 각각의 두께는 구성 물질의 스트레스를 고려하여 결정되며, 열산화막이 3000Å, LPCVD로 증착된 실리콘 질화막이 1500Å, 저온산화막이 6000Å이다. 저온 산화막이 증착된 후 진행되는 고온의 열처리 공정에서 저온 산화막은 구조가 치밀해진다. 이렇게 형성된 다층 절연체 위에 다결정 실리콘을 4000Å 증착하였다. 증착된 다결정 실리콘에 이온 주입법을 이용하여 인(Phosphorus)을 10^{14} cm^{-3} 농도로 도핑하여, 감지부의 농도를 결정한다. 실리콘을 사진식 각공정을 통하여 패터닝하고, 가열부 및 알루미늄과의 contact 부분을 POCl_3 로 높게 도핑한다. LPCVD로 실리콘 질화막을 증착하여 다결정 실리콘과 알루미늄사이의 절연층을 형성한 후 contact을 뚫고 알루미늄을 증착한다. 증착된 알루미늄을 패터닝하고 앞면을 보호할 보호막으로써 PSG를 증착한다. 여기까지의 공정은 CMOS 공정과 차이가 없다. 양면 정렬기를 이용하여 식각될 부분을 앞면의 패턴에 정렬시켜 웨이퍼 뒷면에 패터닝한다.

열산화막 성장
실리콘 질화막 증착 (LPCVD)
저온산화막 증착

다결정 실리콘 증착 및
이온 주입(iion implantation)

다결정 실리콘 patterning

가열부 및 contact용 추가 도핑

contact 형성

알루미늄 증착 및 patterning

밸크 마이크로머시닝

그림 6. 2차원 실리콘 유량센서의 제작을 위한 공정 순서도

뒷면에 정의된 식각창을 통하여 실리콘을 이방성 식각하였다. 식각용액으로는 KOH와 EDP를 사용하였다[5]. 35%의 KOH 수용액에서 1차로 실리콘을 490μm 만큼 식각한다. EDP에 비해 KOH는 식각율이 높고 (100)방향에 대한 (111) 방향의 식각비율이 낮아, 식각 시간을 줄일 수 있고 다이아프램이 넓어지는 영향을 줄일 수 있기 때문에 실리콘 식각에 적합하다. 그러나, KOH는 실리콘 산화막과 실리콘간의 선택도가 매우 낮아서, 열산화막을 다이아프램의 최하층 물질로 사용하는 구조를 형성하기가 힘들다. 따라서, 실리콘에 대한 실리콘 산화막의 선택도가 높은 EDP에서 2차 식각을 하여, 다층 절연막 최하층의 열산화막에서 식각정지가 일어나도록 하여 다이아프램을 형성한다. KOH 수용액에서 뒷면을 식각할 때는 앞면의 알루미늄 패턴이 손상되지 않도록

앞면을 밀폐하는 장치를 만들어 사용하였다. 그러나, EDP는 앞면에 저온산화막으로 알루미늄 패턴을 보호하도록 하여 특별한 보호장치 없이 식각할 수 있다. 식각정지에 의해 절연물질 다이아프램을 형성한 후 앞면 보호용 저온 산화막을 7:1 BHF에서 제거하였다. 그림 7에는 실제 제작된 실리콘 유량센서의 현미경 사진을 보였다. 이 실리콘 유량센서의 최소 선폭은 열전쌍을 직렬로 연결해주는 알루미늄 배선의 폭인 $4\mu\text{m}$ 이다.

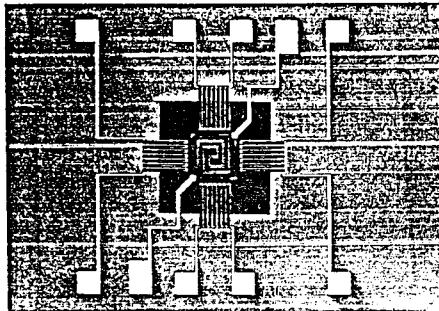


그림 7. 제작된 2차원 실리콘 유량센서

5. 측정 및 분석

측정을 위해 제작된 유량센서를 잘라 12Pin TO header에 붙여, wire bonding을 하였다. 제작된 유량센서의 특성은 질소 기체의 유량을 조절하며, 유속의 변화에 따라 나타나는 유속에 명행한 두 감지부 열전대의 출력 전압의 차를 측정하여 얻었다. 측정시 유체의 온도는 20°C 였다. 가열부 저항에는 직류 5V의 전압을 인가하였다. 그림 8에 측정 결과와 SPICE를 이용한 simulation의 결과를 함께 도시하였다. 제작된 유량센서의 감도는 $18.7\text{mV}/(\text{m/s})^{1/2}$ 이다. Turbulent flow인 경우 출력 전압이 유속의 0.8 거듭제곱에 비례하며, 측정결과 출력전압이 유속의 제곱근에 정확히 비례하지 않는 것은 측정 장비자체에서 연유한 측정 대상 유체의 turbulency 때문이라고 여겨진다. 또, 분별 가능한 최소 유속은 약 0.1m/s 이다. 유속이 없는 경우에도 양 열전대에 5mV 의 off set 출력이 나타나며, 이는 양면정렬시의 정렬오차 등에 의해 다이아프램의 위치가 이동하거나 모양이 왜곡됨으로써, 감지부의 대칭성이 깨어지기 때문이다. 이 출력변차를 줄이기 위한 방안으로, 붕소(Boron)를 다이아프램주변에 고농도로 확산시켜 미리 다이아프램의 모양을 정의하면, 실리콘 식각시 확산된 접합면에서 식각정지가 일어나게 되어 [3] 절연막 다이아프램의 모양의 왜곡이나 위치의 이동을 막을 수 있다.

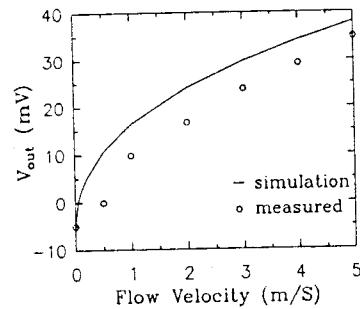


그림 8. 유속의 변화에 따른 유량센서의 출력 전압

6. 결론

2차원 유속에 대한 감지가 가능한 다이아프램 구조의 실리콘 유량센서를 최적화된 감지부를 결정하여 설계하고 전자회로 시뮬레이터인 SPICE를 이용하여 센서의 특성을 예측한 후, CMOS 제작공정과 벌크 마이크로머시닝을 적용하여 제작하였다. 제작후 측정한 기초적인 자료는 출력단에 주가의 증폭단 없이도 충분히 식별 가능한 유속 감지특성을 보여준다. 따라서, 유속의 크기에 대한 감지 특성이 확인되었고, CMOS 신호처리 회로와 단일 칩상에 집적할 수 있는 유량센서 공정이 개발되었다.

7. 참고 문헌

- [1] W. Gopel, J. Hesse and J. N. Zemel, 'Sensors - A comprehensive survey', vol.1. Fundamentals and General Aspects. VCH.
- [2] K. Seeger, 'Semiconductor Physics', Springer series in Solid-State Sciences, vol. 40.
- [3] 이영주, 「실리콘 유량센서 설계와 제작에 관한 연구」, 서울대학교 대학원 전자공학과, 공학석사 논문, 1993년 2월.
- [4] N.Swart et. al. "Numerical Optimization of Flow-Rate Microsensors Using Circuit Simulation Tools", Transducers '91, pp.26-29, 1991.
- [5] H.Seidel, "The Mechanism Of Anisotropic Silicon Etching And Its Relevance For Micromachining", Transducers '87, Rec. of the 4th Int. Conf. on Solid-State Sensors and Actuators, pp.120-125, 1987.