論文94-31A-5-14

유속 감지를 위한 실리콘 유량센서의 설계 및 제작

(Design and Fabrication of Silicon Flow Sensor For Detecting Air Flow)

李 泳 柱*, 全 國 鎭*, 부 종 욱**, 김 성 태**

(Young joo Yee, Kuk jin Chun, Jong uk Bu and Sung tae Kim)

要 約

유속의 크기 및 방향을 감지할 수 있는 실리콘 유량센서를 설계하고 집적회로 제작공정과 벌크 미세가공 기술을 이용하여 제작하였다. 이 유량센서는 삼층으로 된 절연 물질 다이아프램과, 다이아프램 중앙부에 위치한 가열부와, 감지 요소로서 가열부 주위의 다이아프램 각 변에 놓인 네 개의 열전대 등으로 구성된다. 이와 같은 다이아프램 구조는 절연 물질들의 우수한 열차단 특성과 얇은 두께 때문에 센서의 감도를 향상시키는데 기여한다. 이 유량센서는 2차원 유속 감지를 위하여 축 성분 방향의 대칭성이 우수하며, 주어진 구조에서 최적화된 감지 위치를 갖는다. 센서는 CMOS 공정과 호환성이 있는 공정을 이용하여 제작한 후, 공정 마지막에 KOH와 EDP 용액으로 실리콘 이방성 식각을 행하여 1μ m 두께의 절연 물질 다이아프램을 형성하였다. 제작된 유량센서의 가열부 저항의 온도계수(TCR : Temperature Coefficient of Resistance)를 측정하여 가열부의 동작 온도를 계산하였으며, 유속에 따른 출력 전압을 측정하였다. 가열부 다결정 실리콘 저항의 온도계수는 697ppm/K 이며, 인가된 전압이 5V일 때의 가열부의 온도는 331℃이다. 측정된 센서의 감도는 유속이 10m/s 이하인 범위에서 18.7mV/(m/s)$^{1/2}$ 이다.

Abstract

Silicon flow sensor that can detect the velocity and direction of air flow was designed and fabricated by integrated circuit 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 of the sensor due to excellent thermal isolation property of dielectric materials and their tiny thickness. The flow sensor has good axial symmetry to sense 2-D air flow with the optimized sensing position in the proposed structure. The sensor is fabricated using CMOS compatible process followed by the anisotropic etching of silicon in KOH and EDP solutions to form 1μ m thick dielectric diaphragm as the last step. TCR(Temperature Coefficient of Resistance) of the heater of the fabricated sensors was measured to calculate the operating temperature of the heater and the output voltage of the sensor with respect to flow velocity was also measured. The TCR of the polysilicon heater resistor is 697ppm/K, and the operating temperature of the heater is 331℃ when the applied voltage is 5V. Measured sensitivity of the sensor is 18.7mV/(m/s)$^{1/2}$ for the flow velocity of smaller than 10m/s.

* 正會員, 서울大學校 電子工學科
(Dept. of Elec. Eng., Seoul National Univ.)
** 正會員, 金星社 中央硏究所
(Centrl Research Center, Goldstar co.)
接受日字 : 1993年 7月 29日

Ⅰ. 서론

실리콘을 이용한 센서는, 반도체 일괄제조공정(batch process)의 장점을 활용할 수 있고, 실리콘 미세가공(micromachining) 기술을 이용하여 단일 기판 상에 지능화 센서, 다기능 센서를 구현할 수 있는 등의 여러 가지 장점을 가지고 있다.

여러 종류의 센서들 중에서 유량센서는 다양한 응용 분야에서 널리 쓰이는 대표적인 역학 센서 중의 하나이며[1,2], 표 1에서와 같이 여러 형태가 개발되어 왔으나, 실리콘 다이아프램이나 멤브레인 등에 센서를 구현함으로써 발생하는 전도열에 의한 열손실로 인해 감도가 떨어지거나, 별도의 유량관을 제작하여 센서에 부착하는 복잡한 공정으로 제작하는 등의 문제점이 있다

본 논문에서는 CMOS 제조공정을 활용하여 실리콘 유량센서를 제작함으로써 집적회로와 유량센서를 단일 기판 상에 제작하는 가능성을 모색하고, 기존의 실리콘 유량센서에서 채택하고 있는 실리콘 박막(또는 후막)구조[8,9]의 단점인 전도열 손실을 줄이기 위해 열전도도가 낮은 산화막/질화막/산화막으로 된 삼층 구조의 복합 절연체 다이아프램 상에 가열부 및 감지부를 위치시킴으로써 센서의 감도를 높이도록 하였다.

또, 주어진 다이아프램의 구조에서 유속의 변화에 따라 방출되는 열량의 변화가 최대인 위치를 결정하여 온도 감지 요소의 최적 지점을 결정함으로써 센서를 최적화하여 설계하고, 전기 회로 시뮬레이터인 SPICE를 이용하여 설계된 유량센서의 동작 특성을 예측한 후, 표준 CMOS 공정과 실리콘 이방성 식각을 통해 실리콘 유량센서를 제작하였다.

Ⅱ. 실리콘 유량센서의 설계

1.유량센서의 구조

본 논문에서 다루는 유량센서는, 그 감지 원리가 유속에 의해 유기되는 감지부의 온도 변화를 출력 전기 신호로 변환하는 열형 유량센서이다. 유량센서의 기본 구조는 그림 1에 보이는 것과 같이, 유속의 변화를 온도의 변화로 변환시켜 주기 위한 가열부와 변환된 온도를 감지하는 온도 감지 요소가 있으며, 기존의 실리콘 박막 구조의 유량센서에서 문제가 되는 전도열 손실에 의한 낮은 감도(sensitivity)를 개선하기 위하여 위의 두 기본 구성 요소를 약 1μ m 두

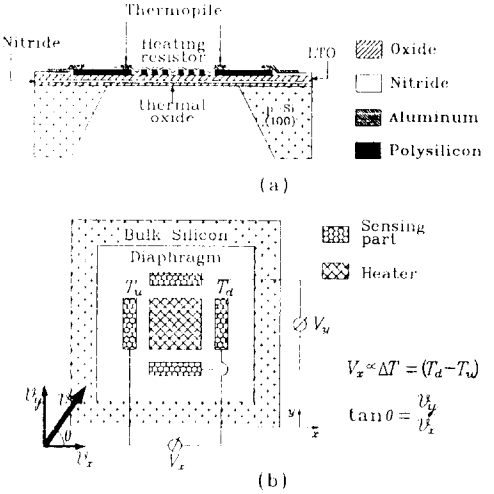

그림 1. (a) 실리콘 유량센서의 단면도
(b)측정원리

Fig. 1. (a)Cross section of silicon flow sensor, (b)Sensing principle.

표 1. 몇가지 유형의 유량센서 비교

Table 1. Comparison of several types of flow sensor

	크기 [μm×μm]	최소선폭 [μm]	감도 [mV/(m/s)$^{1/2}$]	dynamic range [m/s]	최소측정 가능치 [m/s]	감지물질	감지원리	참고 문헌
캔티레버형 열전대	450×450 (sensor)	4	14	0~25	0.1	일루미늄 다결정 실리콘	열기전력 효과	[2]
마이크로브리지형 열저항체	400×450 (sensor)	10	5	0~7	0.1	다결정 실리콘	열저항 효과	[2]
빔(beam)형 열저항체	6000×8000 (sensor)	75	1000(증폭후)	10~60	1	니켈	열저항 효과	[3]
실리콘 채널형 열저항체	4500×500 (sensor)	10	832(증폭후)	0~5	0.01	티타늄	열저항 효과	[4]
다이아프램형 열저항체	3500×5000 (chip)	10	9	0~5	0.1	금/크롬	열저항 효과	[5]
용량형 마이크로 채널	9700×3000 (chip)	3.5		~10^{-4}	10^{-5}	실리콘	유속에따른 압력 변화	[6]
초전형 유량계	6000×6000 (chip)	100	~1	0~30	0.1	$LiTaO_3$ 기판/ NiCr 평판전극	정전용량 변화	[7]

께의 열전도도가 낮은 절연체 다이아프램 위에 배치함으로써 이루어진다. 따라서, 센서에서 일어나는 전체 열전달 중 전도열을 줄임으로써, 유체에 의한 열손실 비율을 높여 감도를 개선하게 된다. 온도의 변화를 감지하는 요소로는 다결정 실리콘(polysilicon)과 알루미늄으로 이루어진 열전쌍(thermocouple) 7개를 직렬로 연결시킨 열전대(thermopile)를 이용함으로써 집적회로 제작공정을 이용한 제작이 가능하도록 하였다. 그리고, 다른 불순물에 비해 지벡계수를 상대적으로 높게 하는 불순물인 인을 주입하여[10] 온도 감지 요소용 다결정 실리콘을 형성하였다. 특히, 본 유량센서의 구조는 MFC(mass flow controller) 등의 예처럼 유량관(flow channel)에 설치되는 유량센서의 경우와는 달리 유체의 흐름의 방향이 정해지지 않은 2차원 유속의 크기와 방향을 동시에 측정할 수 있도록 대칭적인 구조로 설계되었다.

유량센서의 기본적인 구조인 다이아프램은 열전도를 억제하는 열차단막 기능을 위해서는 두께가 얇을수록 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 열전도도를 가지고 있지만, 열산화막의 경우 3×10^9dyne/cm^2 정도의 고유한 압축성 스트레스(compressive stress) 때문에 열산화막만으로는 충분한 두께의 다이아프램을 얻을 수 없다. 따라서, 이와 상반되는 스트레스를 가지는 저압화학기상증착(LPCVD)된 실리콘 질화막을 삽입함으로써 열산화막에 의한 스트레스를 줄이고, 이 질화막 위에 다시 산화막을 증착함으로써 실리콘 산화막의 우수한 열차단 특성을 이용할 수 있게 된다. 저압 화학기상증착 된 실리콘 질화막의 경우는 약 10^{10}dyne/cm^{2}의 인장성 스트레스(tensile stress)를 보인다. 본 연구에서는 열산화막/실리콘 질화막/저온 산화막의 두께를 각각 3000Å/1500Å/6000Å 으로 설계하였으며, 다이아프램의 크기는 500μ m × 500μ m로 하였다.

2. 감지 원리

본 논문에서 제안하는 유량센서는 2차원의 유속을 직교하는 두 축 성분으로 따로 측정하여, 각각의 출력 성분을 이용하여 유속의 크기와 방향을 감지한다. 그림 1의 (b)에 2차원 유속의 감지 원리를 나타내었다. 이 그림에서 x 축 성분의 출력 전압은 다음 식과 같이 유속의 x 축 성분의 크기와 함수 관계를 갖게 된다.

$$V_x \propto \Delta T \propto v_x^p \cdot (T_s - T_f) \tag{1}$$

여기서 ΔT는 x축 방향으로 배치된 두 감지부의 온도차($T_d - T_u$)이며, T_s, T_f는 각각 감지부와 유체의 온도를 나타낸다. 감지부는 다이아프램 내의 다결정 실리콘과 알루미늄의 접촉점이다. 이 온도차는 가열부를 지나기 전의 공기와 가열부를 지나면서 가열된 공기에 의한 강제대류(forced convection)에 의해 두 지점에서 방출되는 열량의 차이 때문이며, 방출되는 열량에 비례해서 그 점의 온도가 낮아지게 된다. p는 유체가 laminar flow($p = 0.5$)인지 turbulent flow($p = 0.8$)인지에 따라 결정되는 지수이다. 즉, 유속에 의해 유기되는 감지부의 온도 변화의 차를 열전대를 이용하여 측정함으로써 유속 및 방향을 감지하게 되는 것이다. 감지부로 쓰이는 열전대는 다결정 실리콘과 알루미늄으로 구성된 열전쌍 7개를 직렬로 배열하여 이루어진다. 열전쌍으로 온도를 측정하는 원리는 지벡효과(Seebeck effect)로 설명되며, 열전쌍 양단에 온도차가 있을 때 하나의 열전쌍에 유기되는 열기전력은 잘 알려져 있다.[12] 인으로 도우핑된 단결정 실리콘의 지벡계수를 계산한 결과를 같은 농도로 도우핑된 다결정 실리콘의 지벡계수 측정 결과[10]와 함께 그림 2에 도시하였다.

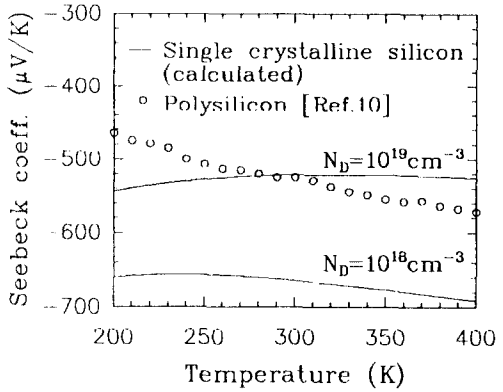

그림 2. 인의 불순물 농도에 따른 단결정 실리콘의 지벡계수

Fig. 2. Seebeck coefficient of single crystalline silicon doped with different concent- rations of phosphorus.

실리콘의 지벡계수는 알루미늄에 비해 상당히 크며[12], 상온 근방에서 거의 일정하도록 불순물 농도를 조절하면, 열전대 하나의 출력 전압(V_{pile})은 다음 식과 같이 근사할 수 있다.

$$\begin{aligned} V_{pile} &= N \cdot V_{couple} \\ &\approx N \cdot S_s \cdot (T_s - T_b) \end{aligned} \tag{2}$$

여기서 N은 열전대 하나를 구성하는 열전쌍의 개수인 7 이며, V_{couple}은 열전쌍하나의 출력전압, S_S는 다결정 실리콘의 지벡계수, T_S, $T_b(=T_I)$는 각각 감지부 및 벌크 실리콘의 온도이다. 본 연구에서 채택한 다결정 실리콘의 인 불순물 농도는 $10^{19}cm^{-3}$이며, 이 농도에서의 지벡계수는 상온에서 -520μ V/K이다. 따라서, 하나의 축 성분에 가열부를 중심으로 대칭적으로 배치된 두 열전대에서 얻어지는 차동(差動) 출력은 두 감지부의 온도차에 의해 결정된다.

3. 최적화된 감지부 위치를 갖는 유량센서의 설계

센서의 설계 시 유속의 변화에 따른 다이아프램의 온도 분포를 해석적인 유체 방정식을 써서 계산하여 가열부로부터 동일한 거리만큼 떨어진 두 지점의 온도차가 최대가 되는 지점을 결정함으로써 감지부의 최적 위치를 결정하였다. 가열부 영역의 크기는 200 μ m×200μ m로 하고 가열부의 온도는 일정하게 유지된다고 가정한 후, 정해진 두께를 고려하여 다이아프램 상의 온도 분포를 계산하였다. 온도 분포의 계산을 위해 다음의 열전도 방정식을 이용하였다.

$$Q = -k \cdot \nabla T \tag{3}$$

이 식에서 κ 는 복합 구조로 된 다이아프램의 열전도도를, Q는 단위 면적당 전도되는 열량을 각각 나타낸다. 이렇게 구해진 다이아프램 상의 온도 분포와 유속에 의한 강제대류 방정식을 이용하여, 하나의 축 방향을 따라서 강제대류에 의해 방출되는 열량을 계산하였다. 유체가 들어오는 쪽에서 다이아프램이 시작되는 지점을 x=0로 두고, 식 (3)에서 구한 다이아프램 표면의 온도 분포($T(\xi)$)로부터 유속 방향에 평행한 다이아프램 상의 임의의 위치(x)에서 방출되는 단위 면적당의 열량은 다음 식과 같이 구해진다.[11]

$$q(x) = \int_0^x h(x,\xi) \cdot \frac{dT(\xi)}{d(\xi)} \cdot d(\xi) \tag{4}$$

여기서, $h(x,\xi)$는 강제대류에서의 열전달 계수이며, 평판 위를 흐르는 유체일 경우 laminar flow는 식 (5), turbulent flow에 대해서는 식 (6) 과같이 주어진다.

$$h(x,\xi) = 0.332 \cdot \frac{k}{x} \cdot \mathrm{Pr}^{0.343} \cdot \sqrt{\mathrm{Re}} \cdot \frac{1}{\sqrt[3]{1-\left(\frac{\xi}{x}\right)^{3/4}}} \tag{5}$$

$$h(x,\xi) = 0.0296 \cdot \frac{k}{x} \cdot \sqrt[3]{\mathrm{Pr}} \cdot \sqrt{\mathrm{Re}^{0.8}} \cdot \frac{1}{\sqrt[3]{1-\left(\frac{\xi}{x}\right)^{3/4}}} \tag{6}$$

여기서, Pr은 프란틀 수(Prandtl number)를, Re는 레이놀즈 수(Reynolds number)를 나타낸다.

2차원 유속을 감지하기 위해서는 양 축 방향의 감지부의 위치가 가열부 및 다이아프램에서의 위치를 기준으로 서로 대칭적이어야 하므로, 가열부로부터 떨어진 거리가 같은 두 점에서 계산된 방출 열량의 차가 최대가 되는 지점이 센서의 감도를 최적화시키는 조건이 된다. 바람이 laminar flow인 경우와, turbulent flow인 경우에서 열방출량의 차가 최대가 되는 점은 각각 가열부로부터 33μ m 및 43μ m 떨어진 지점에서 나타난다(그림 3). 따라서, 유량센서가 감지할 유속의 종류에 따라 감지부의 최적 위치를 결정할 수 있으며 감지부의 위치는 본 유량센서의 크기에서는 가열부로부터 33~43μ m 떨어진 범위 내에서 결정하는 것이 바람직하다. 본 연구에서는 laminar flow인 조건에서의 최적 지점을 감지부의 위치로 정하여, 각 열전쌍의 다결정 실리콘과 알루미늄의 접촉 영역의 끝이 가열부의 경계로부터 30μ m 떨어진 지점에 위치하도록 설계하였다.

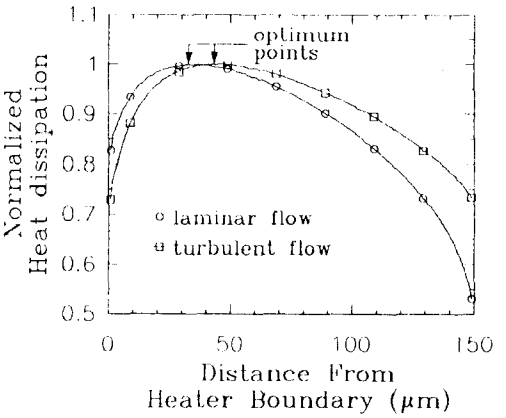

그림 3. 감지부의 최적지점
Fig. 3. Optimized sensing position.

4. SPICE를 이용한 유량센서의 감지 특성 모사

전술한 과정을 거쳐 설계된 유량센서를 회로 시뮬레이터인 SPICE를 이용하여 유속 감지 특성을 모사하였다. 열전도 방정식은 공통적으로 다음과 같은 간략화된 식을 적용할 수 있다.

$$Q = h \cdot A \cdot (T_h - T_I) \tag{7}$$

여기서 A는 열방출이 일어나는 면적을 나타낸다.

식 (7)을 보면 전기 회로의 전류-전압 관계식과 일치함을 알 수 있다. 방출 열량(Q)을 전류(I)에 대응시키고, 온도 T_h, T_f을 전압 V_h, V_f에 각각 대응시키면, 열전달 계수(h)는 전기 회로의 상호 전달 특성(transconductance)에 대응된다. 유량센서에서 일어나는 열전달 중에서 전도에 의한 열전달의 경우, 열전달 계수는 전도가 일어나는 물질의 열전도도에만 관계되므로 전기 회로에서는 저항에 대응시킬 수 있다. 식 (5) 와 (6) 에서 볼 수 있듯이 강제대류 및 자연대류와 같이 열전달 계수가 열방출이 일어나는 표면 온도의 함수이면 전기 회로의 종속전류원(VCCS : voltage controlled current source)에 대응시켜 회로를 구성할 수 있다.[13] 그림 4는 본 유량센서의 유속 감지 특성을 모사하기 위한 등가회로이다. 등가회로에서 저항 성분들은 삼층 구조로 이루어진 다이아프램 박막의 각층 및 감지부의 다결정 실리콘과 알루미늄, 다결정 실리콘과 알루미늄 배선을 격리시키기 위한 중간층 질화막으로 구성된 복합 구조를 통한 열전도 경로에 해당되며, G_n및 G_f는 각각 자연대류 및 강제대류에 의한 열전달 경로를 나타내고, V_f는 유체의 온도에 대응된다. 특히, 자연대류로 방출되는 열량(Q_n)은 다이아프램 표면과 유체의 온도차에 비선형적인 지수 비례 관계를 갖는다. Laminar flow일 때 온도차의 4/3 거듭제곱에, turbulent flow인 경우 5/4 거듭제곱에 각각 비례하게 된다. SPICE에서는 이와 같은 비선형적인 전류-전압 관계를 식 (8)와 같이 급수 전개하여 다항 종속전류원(polynomial VCCS)으로 근사시켜 모델링할 수 있다.

$$Q_n \approx \sum_{i=0}^{N} P_i \cdot T_f^i \tag{8}$$

유속 감지 특성의 모사를 위해 유량센서의 두 쌍의 감지 요소 중 하나의 축 방향에 평행한 유속을 가정하였다. 이 축 방향을 따라 센서를 분할하여 분할된 각 요소마다 그림 4의 등가회로를 대응시켜 유량센서의 열전달 등가회로를 구성하였다. G_n을 근사하기 위해 식 (8)에서 N을 4로 두고 계수 Pi의 값들을 결정하였다. 이렇게 구성된 전체 등가회로를 SPICE로 시뮬레이션하여 두개의 감지부에서의 전압차(온도차)를 구하고, 지벡계수를 곱하여 유량센서의 출력 전압을 계산하였다. 각 부분 등가회로에 대응되는 분할된 요소의 크기를 3μ m×3μ m로 하고, 가열부의 온도(V_h)가 600K이고 유체의 온도가 300K일 때 유속에 대한 출력 전압의 시뮬레이션 결과를 제 Ⅳ절의 그림 8에 측정 결과와 함께 비교하였다.

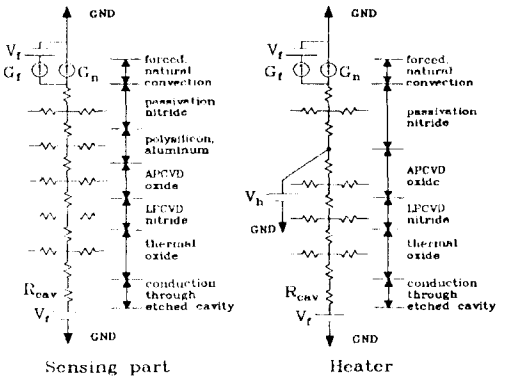

그림 4. 본 실리콘 유량센서의 유속감지특성 모사를 위 한 SPICE 부분 등가회로

Fig. 4. Equivalent sub-circuit for SPICE to simulate the flow sensing characteristics.

Ⅲ. 실리콘 유량센서의 제작

본 연구에서는 유량센서를 제작하기 위하여 5개의 사진식각용 마스크를 사용하였다. 사용된 웨이퍼는 p형 (100)방향 4인치 웨이퍼이다. 우선 다이아프램을 구성할 절연막 물질을 성장 및 증착하였다. 각각의 두께는 앞서 언급한 대로 구성 물질의 스트레스를 고려하여 결정되며, 열산화막이 3000Å, LPCVD로 증착된 실리콘 질화막이 1500Å, 저온 산화막이 6000Å이다. 저온 산화막이 증착된 후 진행되는 고온의 열처리 공정 때문에 저온 산화막은 구조가 치밀해져서 두께가 줄어들게 된다. 이렇게 형성된 다층 절연체 위에 LPCVD로 625℃에서 다결정 실리콘을 4000Å 증착하였다. 증착된 다결정 실리콘에 이온 주입법을 이용하여 80KeV에서 인(phosphorus)을 10^{19}cm^{-3} 농도로 도우핑하여, 감지부의 농도를 결정한다. 실리콘을 사진식각 공정을 통하여 형상(patterning)하고, 가열부 및 알루미늄과의 접촉부분을 $POCl_3$로 높게 도우핑한다. LPCVD로 실리콘 질화막을 증착하여 다결정 실리콘과 알루미늄 사이의 절연층을 형성한 후 접촉용 창을 뚫고 알루미늄을 증착한다. 증착된 알루미늄을 형상하고 앞면 보호막 구실을 하는 PSG를 증착한다. 여기까지의 공정은 표준 CMOS 공정과 차이가 없다.

양면 정렬기를 이용하여 식각될 부분을 앞면의 알루미늄 패턴에 정렬시켜 웨이퍼 뒷면에 형상한다. 뒷면에 정의된 식각창을 통하여 실리콘을 이방성 식각하였다. 식각 용액으로는 KOH와 EDP를 사용하였다. 먼저 35%의 KOH 수용액을 80℃로 유지하며 실

리콘을 490μ m 만큼 식각한다. EDP에 비해 KOH는 실리콘 식각율이 높고(EDP의 식각율:1.0μ m/min, KOH의 식각율:1.2μ m/min), (100)방향에 대한 (111)방향의 식각 비율이 낮아, 식각 시간을 줄일 수 있고 수평 방향의 식각으로 인해 다이아프램이 넓어지는 영향을 줄일 수 있기 때문에 실리콘 식각에 적합하다. 그러나, KOH는 실리콘 산화막-특히 저온 산화막-과 실리콘간의 선택도가 매우 낮아서, 열산화막을 다이아프램의 최하층 물질로 사용하는 본 구조를 형성하기가 힘들다. 따라서, 실리콘에 대한 실리콘 산화막의 선택도가 높은 EDP[14]에서 2차 식각을 함으로써 다층 절연막 최하층의 열산화막에서 식각 정지가 일어나도록 하여 다이아프램을 형성한다. 특히, EDP의 경우는 식각 시간이 길어짐에 따라 탄소 화합물인 백색 침전물(white residue)이 식각면에 쌓일 수 있고, 이 침전물에 의해 원하지 않는 식각 정지가 일어나거나 피라미드 모양의 힐록(hillock)을 유발할 수 있으므로, EDP에서의 식각 시간을 줄이는 것이 바람직하다.

KOH 수용액에서 뒷면을 식각할 때는 앞면의 알루미늄 패턴이 손상되지 않도록 앞면을 밀폐하는 장치를 만들어 사용하였다. 그러나, EDP는 앞면에 저온 산화막으로 알루미늄 패턴을 보호하도록 하여 특별한 보호 장치 없이 식각할 수 있다. 식각 정지에 의해 절연 물질 다이아프램을 형성한 후 앞면 보호용 저온 산화막을 7:1 BHF에서 제거하였다. 그림 5에는 실제 제작된 실리콘 유량센서의 현미경 사진을 보였다. 이 실리콘 유량센서의 최소 선폭은 열전쌍을 직렬로 연결해 주는 알루미늄 배선의 폭인 4μ m이다.

Ⅳ. 측정 및 분석

측정을 위해, 제작된 유량센서를 잘라 12핀 TO header에 붙여, 금속선 접착(wire bonding)을 하였다. 제작된 유량센서의 특성은 질소 기체의 유량을 조절하며, 유속의 변화에 따라 나타나는 유체의 흐름에 평행한 두 감지부 열전대의 출력 전압의 차를 측정하여 얻었다. 우선 가열부 저항의 특성을 알아보기 위하여, 항온조에서 온도를 바꾸어 가면서 온도의 변화에 따른 저항 값을 측정하였다. 측정 결과 $POCl_3$에 의해 높은 농도로 도우핑된 가열부 다결정 실리콘의 저항 온도계수(TCR)는 697ppm/K 이다(그림 6). 여기서 저항의 온도계수는 다음 식과 같이 정의된다.

$$TCR = \frac{1}{R_0} \cdot \frac{dR(T)}{dT} \tag{9}$$

이 식에서 R_0는 기준 온도(0℃)일 때의 저항 값을 나타낸다. 인가되는 입력 전압에 따른 가열부의 저항 값을 측정하고, 앞서 측정된 저항 온도계수를 이용하여 인가 전압에 따른 가열부의 발열 온도를 계산하였다(그림 7). 계산 결과 5V의 전압이 가해질 때, 가열부는 330℃ 정도에서 동작한다. 그림 7에 나타난 실선은 온도의 변화에 무관하게 저항이 일정하고, 저항 값이 상온일 때 유량센서의 가열부 저항과 같은 이상적인 저항체가 인가되는 전압에 따라 발열하여 달라지는 저항체의 온도를 계산한 값이다. 측정 결과가 보여주듯이 가열부의 저항에 인가되는 전압이 커질수록 발열에 의해 상승되는 온도는 이상적인 저항체의 경우보다 작아지게 되는데, 이것은 가열부 저항

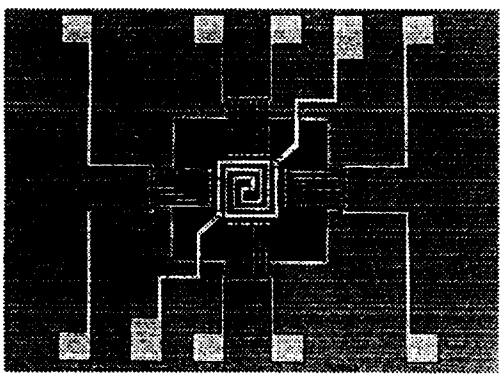

그림 5. 제작된 실리콘 유량센서의 현미경 사진
Fig. 5. Microphotograph of the fabricated silicon flow sensor.

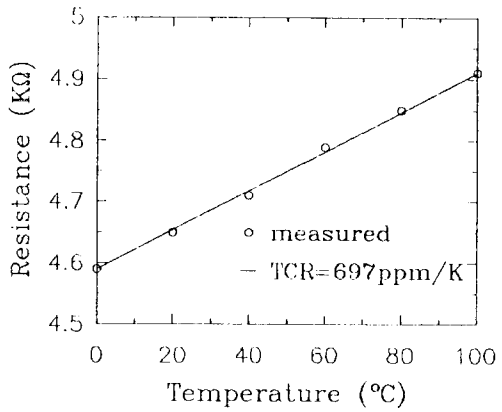

그림 6. 온도에 따른 가열부 저항의 변화
Fig. 6. Change of resistance due to temperature.

의 자체 가열 효과에 의하여 인가되는 전압이 커짐에 따라 다결정 실리콘 저항의 온도가 상승하게 되고 따라서 상승된 온도만큼 저항 온도계수에 비례하여 가열부의 저항이 커지기 때문이다.

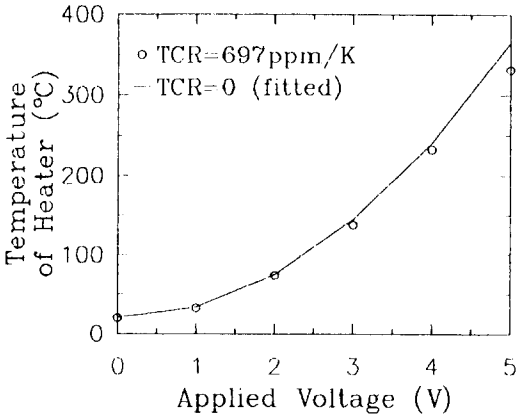

그림 7. 인가 전압에 따른 가열부의 온도 변화
Fig. 7. Temperature of heater with respect to the applied voltage to the heater.

질소 기체의 유량을 조절해 가면서 제작된 유량센서의 감지 특성을 측정하였다. 사용된 질소 기체의 온도는 20℃였고, 가열부에는 직류 5V의 전압을 인가하였다. 측정 결과를 그림 8에 도시하였다. 제작된 유량센서의 감도는 18.7mV/(m/s)$^{1/2}$이며, 분별 가능한 최소 유속은 약 0.1m/s 이다. 유속이 없는 경우에도 양 열전대에 5mV의 offset 출력이 나타나며,

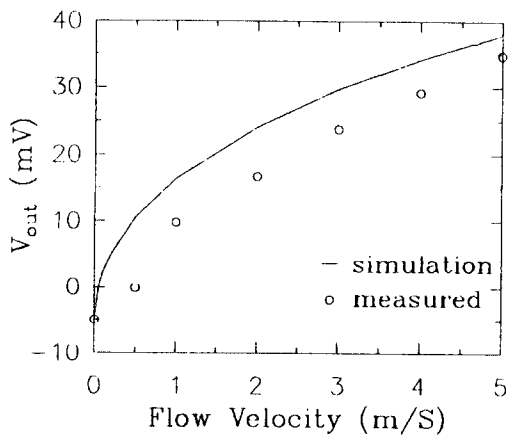

그림 8. 유속의 변화에 따른 실리콘 유량센서의 출력 전압
Fig. 8. Output voltages of the silicon flow sensor with respect to flow velocities.

이는 양면 정렬 시의 정렬 오차 등에 의해 다이아프램의 위치가 선형적으로 이동(shift)하거나 정렬 시의 회전 오차(tilt)에 의해 실리콘 (110) 결정 방향과 평행 또는 수직이 되지 않아 이방성 식각 시 모양이 왜곡됨으로써, 감지부의 대칭성이 깨어지기 때문이다.

V. 결론

2차원 유속에 대한 감지가 가능한 다이아프램 구조의 실리콘 유량센서를 최적화된 감지부를 결정하여 설계하고 집적회로 제작공정과 벌크 마이크로머시닝을 적용하여 제작하였다. 제작 후 측정된 결과는 출력단에 추가의 증폭단 없이도 충분히 식별 가능한 유속 감지 특성을 보여준다. 특히 유속이 10m/s 이하인 범위에서 측정된 센서의 감도는 18.7mV/(m/s)$^{1/2}$로 증폭단을 거치지 않은 경우의 기존의 센서보다 높은 감도를 보인다. 강제대류에 의해 방출되는 열량은 유속의 종류에 따라 0.5~0.8 거듭제곱에 비례하게 된다. 제작된 센서의 너비를 고려하여 계산한 레이놀즈 수(Reynolds number)는 유속이 수 m/s인 범위에서는 500보다 작다. 따라서, 측정 시 나타나는 유속의 특성은 laminar flow에 가까우며, 그림 8의 측정 결과에서도 이러한 특성을 확인할 수 있다. 출력 전압이 유속의 제곱근에 정확히 비례하지 않는 것은 실험 장치에서 유입되는 유속 자체가 약간의 turbulent flow의 특성을 가지고 있기 때문이라고 여겨진다. 따라서, 본 연구에서는 높은 감도의 감지 특성이 확인되었으며, CMOS 신호 처리 회로와 단일 칩(chip)상에 집적할 수 있는 유량센서 공정이 개발되었다.

參 考 文 獻

[1] W. Göpel, J. Hesse and J. N. Zemel, 「*Sensors - A comprehensive survey*」, vol.1. Fundamentals and General Aspects. VCH.

[2] G. Wachutka, R. Lenggenhager, D. Moser and H. Baltes, "Analytical 2D-Model of CMOS Micro- machined Gas Flow Sensors", Transducers '91, p.22, 1991.

[3] C. H. Stephan and M. Zanini, "A Micromachined Silicon Mass Air Flow Sensor For Automotive Applications",

Transducers '91, pp.30-33, 1991.
[4] Masayoshi Esashi, "Micro Flow Sensor and Integrated Magnetic Oxygen Sensor Using It", Transducers '91, p. 34, 1991.
[5] Euisik Yoon and Kensall D. Wise, "A Multi-element Monolithic Mass Flowmeter With On-chip CMOS Readout Electronics", IEEE IEDM Tech. Digest, pp.670-673, 1988.
[6] Steve T. Cho, Khalil Najafi, Clark E. Lowman and Kensall D. Wise, "An Ultrasensitive Silicon Pressure-Based Microflow sensor", Transactions on Electron Devices, vol. 39, p.825, 1992.
[7] H. Y. Hsieh, A. Spetz and J. N. Zemel, "Wide Range Pyroelectric Anemometers for Gas Flow Measurement", Trasducers '91, pp.38-40, 1991.
[8] B. W. Van Oudheusden and J. H. Huijsing, "An Electronic Wind Meter Based on a Silicon Flow Sensor", Sensors and Actuators, A21-A23, pp. 420-424, 1990.
[9] B. W. Van Oudheusden and A. W. Van Herwaarden, "High-sensivity 2-D Flow Sensor with an Etched Thermal Isolation Structure", Sensors and Actuators, A21-A23, pp.425-430, 1990.
[10] F. V Iklein and H. Baltes, "Thermoelectric Properties of Polysilicon Films Doped with Phosphorus and Boron", Sensors and Materials, pp.325-334, 1992.
[11] Milton Ohring, 「The Materials Science of Thin Films」, Academic Press, 1991.
[12] K. Seeger, 「*Semiconductor Physics*」, Springer series in Solid-State Sciences, vol. 40.
[13] N. Swart *et al* "Numerical Optimisation of Flow-Rate Microsensors Using Circuit Simulation Tools", Transducers '91, pp.26-29, 1991.
[14] H. Seidel, "The Mechanism Of Anisotropic Silicon Etching And Its Relevance For Micro- machining", Transducers '87, Rec. of the 4th Int. Conf. on Solid-State Sensors and Actuators, pp.120-125, 1987.

著者紹介

李泳柱(正會員)
1968年 8月 23日生. 1991年 2月 서울대학교 전자공학과 졸업(학사). 1993年 2月 서울대학교 대학원 전자공학과 졸업(석사). 1993年 3月 ~ 현재 서울대학교 대학원 전자공학과(박사과정) 재학중. 주관심 분야는 실리콘 센서 및 액튜에이터 등임.

부 종 욱(正會員)
현재 금성사 중앙연구소 선임연구원 공학박사

全 國 鎭(正會員) 第 29卷 A編 第 5號 參照
현재 서울대학교 전자공학과 교수

김 성 태(正會員)
현재 금성사 중앙연구소 기초 2실 책임연구원
공학박사