

MEMS기반 에너지 하베스터 제작을 위한 실리콘 KOH 식각 모형화

민철홍¹, 강경우², 김태선^{2,a}

¹ 가톨릭대학교 컴퓨터공학과

² 가톨릭대학교 정보통신전자공학부

Modeling of Silicon Etch in KOH for MEMS Based Energy Harvester Fabrication

Chul Hong Min¹, GyeongWoo Gang², and Tae Seon Kim^{2,a}

¹ School of Computer Science and Engineering, The Catholic University, Bucheon 420-743, Korea

² School of Information, Communications and Electronics Engineering, The Catholic University, Bucheon 420-743, Korea

(Received February 13, 2012; Revised February 16, 2012; Accepted February 16, 2012)

Abstract: Due to the high etch rate and low fabrication cost, the wet etching of silicon using KOH etchant is widely used in MEMS fabrication area. However, anisotropic etch characteristic obstruct intuitional mask design and compensation structures are required for mask design level. Therefore, the accurate modeling for various types of silicon surface is essential for fabrication of three-dimensional MEMS structure. In this paper, we modeled KOH etch profile for MEMS based energy harvester using fuzzy logic. Modeling results are compared with experimental results and it is applied to design of compensation structure for MEMS based energy harvester. Through Fuzzy inference approaches, developed model showed good agreement with the experimental results with limited etch rate information.

Keywords: KOH etch, Fuzzy logic, Etch modeling, Energy harvest

1. 서 론

에너지 하베스팅 기술은 그 응용분야에 따라 다양한 구조를 갖는 장치개발 연구가 꾸준히 진행되고 있으며, 최근 MEMS 기술의 발달과 더불어 그 크기 및 성능이 크게 개선되고 있다 [1-3]. MEMS 기술을 기반으로 하는 다양한 에너지 하베스터 소자들은 대부분 실리콘 웨이퍼를 기반으로 하고 있으며, 구조적 특징에 따라 실리콘 웨이퍼 위에 구조물을 쌓기도 하고, 실리콘 기판의 이방성 (anisotropy) 식각 특징을

이용하여 3차원 구조물을 제작하기도 한다 [1-3]. 일반적으로 사용하는 이방성 실리콘 식각용액은 TMAH (tetramethy ammonium hydroxide), KOH (potassium hydroxide), EDP (ethlene dianmine pyrocatechol) 등이 있지만 그 중 KOH 용액은 다른 용액에 비해 식각속도가 빠르고 비용이 저렴하여 가장 널리 사용된다. 이방성 식각은 실리콘 웨이퍼의 {1,1,1}면과 다른 면들과의 식각속도 차이로 인해 발생되기 때문에 구조물의 형태에 따라 식각되는 모양과 속도가 서로 다르다. 따라서 다양한 3차원 구조물을 제작하기 위해 많은 연구들이 진행되고 있다

a. Corresponding author: tkim@catholic.ac.kr

[4,5]. 그 중 대표적인 방법은 상대적으로 식각이 빠른 부분에 구조물을 덧붙여 원하는 3차원의 구조물을 제작하는 보상 구조물 (compensation structure) 방법으로, 이 방법을 사용하기 위해서는 제작하고자 하는 구조물의 식각방향과 식각속도의 예측을 위한 모형개발이 필수적이다. 일부 논문에서는 실제 식각실험을 통해 구조물에 대한 식각정보를 얻고 있지만, 다양한 구조물의 제작에 직접 적용하기에는 한계가 있다 [5]. 따라서 시간과 비용을 절약하기 위해 이방성 식각에 대한 모형화 방법을 주로 사용하고 있으며, 그 대표적인 방법은 CA (cellular automata) 모델이다 [6]. CA 모델과 같은 수치해석을 이용한 접근법은 모든 각도에 대한 실리콘 웨이퍼의 식각비율 (etch rate)이 반드시 필요하기 때문에 비선형적인 식각비율에 대한 복잡한 일반화 작업을 거쳐야 한다. 또한 KOH를 비롯해 식각용액의 온도와 농도가 달라질 경우 식각비율 또한 비선형적으로 변화하기 때문에 그때마다 식각비율에 대한 일반화 작업을 다시 거쳐야 하는 단점이 있었다. 본 논문에서는 이러한 단점을 보완하기 위해 퍼지논리 (fuzzy logic)를 이용하여 실리콘 웨이퍼의 모든 각도에 대한 식각률을 추론하였으며, 추론된 식각률을 기반으로 이방성 식각에 대한 모형화를 진행하였다. 모형화 성능은 실제 KOH 식각 실험결과를 비교하여 식각방향 및 식각속도를 검증하였다. 이 결과를 기반으로 제안된 MEMS기반 에너지 하베스터의 제작에 필요한 보상 구조물을 추가하여 삼차원 구조의 패턴을 형성하였다.

2. 실험 방법

2.1 에너지 하베스터 제작을 위한 KOH 식각

제안한 에너지 하베스터 소자의 구조는 그림 1(a)의 ㉠와 같이 실리콘 웨이퍼에 KOH를 이용하여 이방성 식각을 진행한 후 그림 1(a)의 ㉡와 같이 그 위에 미세 패턴을 형성 시킨다. 형성된 미세 패턴 위로 그림 1(b)의 ㉢와 같이 자성체를 증착한 후 그림 1(c)와 같이 미세패턴들이 서로 단락되지 않고 연결될 수 있도록 제작된 웨이퍼를 분당하여 미세 패턴의 마이크로 코일들이 자성체 주위를 감싸고 있는 형태의 에너지 하베스터 소자를 제안한다. 즉, 내부 자성체의 극성을 바꿔주어 미세 패턴들로부터 유도기전력을 발생시키는 원리이다. 기존의 전자기 방식의 에너지 하

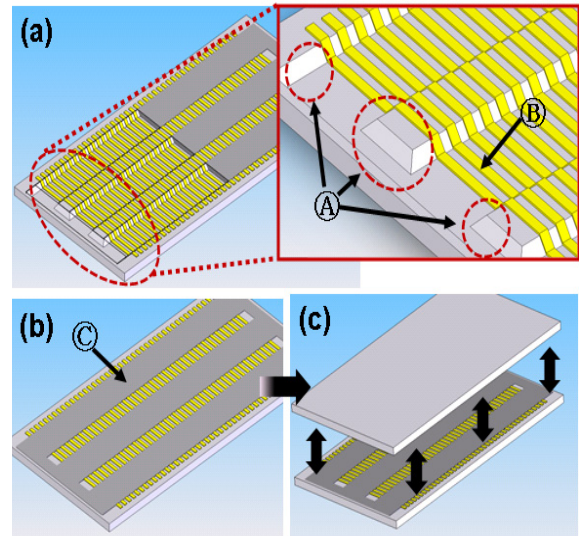


Fig. 1. Proposed energy harvest structure. (a) energy harvest structure, (b) magnetic material insertion, (c) wafer bonding.

베스팅 시스템과 다르게 코일 안으로 자석의 수직운동을 인가할 필요가 없어 그 크기를 줄이고 코일의 파손위험도 줄일 수 있는 장점을 갖고 있다.

2.2 이방성 식각 모형화

일반적으로 (1,0,0) 실리콘 웨이퍼의 경우 사각형의 silicon nitride (Si_3N_4) 마스크를 이용하여 이방성 습식식각을 진행할 경우 사각형의 안쪽을 향해 54.74° 의 경사면을 갖도록 식각이 진행된다. 그러나 사각형의 마스크 안쪽으로 새로운 구조물이 추가될 경우 안쪽 구조물의 식각방향과 속도를 예측하기가 쉽지 않다.

따라서 본 논문에서는 에너지 하베스터 소자의 구조물을 제작하기 위해 식각률이 높은 부분에 새로운 구조물을 추가하여 다른 면들과의 식각속도를 맞추는 보상 구조물 방법을 사용하였다. 이를 위해서는 보상 구조물의 구조와 크기, 길이 등의 정보가 필요하기 때문에 실리콘 웨이퍼의 이방성 식각에 대한 모형화 과정을 먼저 필요로 한다. 이방성 식각의 모형화는 40%의 KOH 식각용액 70°C 환경과 (1,0,0) 실리콘 웨이퍼를 기준으로 진행하였으며, 실리콘 웨이퍼의 3차원 공간정의, 면방향 (plane direction) 결정, {1,1,1}면과의 내각 계산, 식각률과 언더컷 (undercut) 정의, 식각의 순서로 진행된다.

2.3 3차원 공간의 정의

초기 제작하고자하는 모양의 마스크를 설계한 후 설계된 마스크의 흰색부분과 검정색부분을 구분하여 식각부분을 정의한다. 여기서 마스크의 존재유무는 $Ma(x,y)$ 로 정의하였다. 그 후 실리콘 웨이퍼의 3차원 공간을 표현해 주기위해 X축과 Y축을 기준으로 $X \times Y$ 크기를 갖는 2차원 배열로 표현 하였으며, 2차원 배열의 값은 Z축 즉, $\langle 1,1,0 \rangle$ 방향의 값으로 표현하여 3차원 공간상에 메쉬 (mesh)형태로 표현하였다. 본 논문에서는 마스크의 X방향 길이(S_w)와 Y방향 길이(S_h)를 각각 $1,600 \times 1,600 \mu\text{m}$ 정의하였으며, 웨이퍼의 두께(S_{th})는 $550 \mu\text{m}$ 로 정의하였다.

2.4 면방향 결정

위와 같이 3차원 공간이 정의 되면 실리콘 웨이퍼의 식각방향을 정의하게 된다.

우선, 실리콘 웨이퍼가 KOH 식각용액과 반응하여 식각이 되면 새로운 식각면이 나타나게 된다. 이때 새롭게 나타난 면은 기존의 식각방향을 알아야 다음 식각될 방향과 각도 식각비율이 결정되는데, 본 논문에서는 식각된 면의 법선벡터를 이용하여 식각면의 방향을 정의하였다. 법선벡터 N 의 정의는 식 (1-1)과 식 (1-2)에서 정의된 X , Y 와 같이 두 벡터의 외적 (outer product)으로 계산하였으며, 식 (1-3)과 같이 정의하였다.

$$\begin{aligned} X_{t,x,y} & \\ &= (1, 0, [S(t, x + 1, y) - S(t, x - 1, y)]/2/D_x) \end{aligned} \tag{1-1}$$

$$\begin{aligned} Y_{t,x,y} & \\ &= (0, 1, [S(t, x, y + 1) - S(t, x, y - 1)]/2/D_y) \end{aligned} \tag{1-2}$$

$$N_{t,x,y} = X_{t,x,y} \times Y_{t,x,y} \tag{1-3}$$

여기서, $S(t,x,y)$ 은 실리콘 웨이퍼의 경계면을 나타내며, D_x 은 배열 한 원소의 X방향 크기, D_y 은 Y방향 크기를 나타낸다. 법선벡터 N 은 $\langle 1,1,0 \rangle$ 방향의 Z성분이 양수와 음수 두 가지 경우로 계산이 될 수 있으며, 이때 KOH에 의해 식각되는 실리콘 웨이퍼의 각도가 최대 90° 이상을 넘지 않으므로 법선벡터 N 의 Z성분은 항상 양수라고 가정하였다. 따라서 법선벡터

N 을 Z성분으로 나누어 그 벡터 값이 항상 1이 되도록 하여 실제 면방향을 정의하였다. 이때의 면방향을 벡터 N^e 라고하면 식 (1-4)와 같이 표현할 수 있다.

$$N_{t,x,y}^e = N_{t,x,y} / N_{t,x,y}^Z \tag{1-4}$$

2.5 {1,1,1} 면과의 내각 계산

식각된 실리콘 웨이퍼의 면방향을 정의한 후 각도에 따른 실리콘 웨이퍼의 식각률을 적용하기 위해서 실리콘 웨이퍼의 식각각도를 정의해야 한다. 실리콘 웨이퍼의 식각각도 정의는 $\{1,1,1\}$ 면을 기준으로 두 벡터 사이의 내각으로 표현하였다. $(1,0,0)$ 웨이퍼의 경우 웨이퍼의 플랫 존(flat zone)면은 $\{1,1,0\}$ 면을 갖는다. 따라서 정의된 입방격자의 $\{1,1,1\}$ 면과 $\{1,1,0\}$ 면을 웨이퍼의 플랫 존 방향과 동일한 면으로 맞추어 주기 위해 정의된 입방격자의 $\{1,1,1\}$ 면을 45° 회전시켜 P'_i 벡터를 정의 하고, 식 (2-1)과 같이 각각의 내각을 계산하고 그 중 가장 작은 내각을 취하였다.

$$\theta_{t,x,y} = \min [\angle (N_{t,x,y}^e, P'_i)]_{i=1}^8 \tag{2-1}$$

2.6 퍼지이론을 이용한 식각률 추정

퍼지논리를 이용하여 다양한 식각면의 식각률을 추정하기 위해, 실험적으로 얻어진 실리콘 결정방향에 따른 12개의 식각률 데이터를 이용하였다 [7]. 이를 통해 결정방향에 따른 12개의 입력과 출력 membership function을 정의했다. 정의된 membership function의 모양은 좌우가 서로 다른 “II-shape”로 구성하였으며, 무게중심법 (center of gravity)을 통하여 12개의 출력 membership function으로 부터 식각률을 추론하였다.

2.7 식각률 및 언더컷 (undercut) 정의

퍼지논리로 부터 추론된 식각률을 기준으로 임의의 시간 t 에서 정의된 실리콘 웨이퍼의 각 메쉬에서의 식각률을 $Er_{t,x,y}$ 라 하고, $\{1,1,1\}$ 면과의 내각과 식각률 사이의 관계를 함수 $F(\theta)$ 라고 하면, 다음 식 (3-1)과 같은 관계를 얻을 수 있다.

$$Er_{t,x,y} = F(\theta_{t,x,y}) \tag{3-1}$$

실리콘 웨이퍼에서 Si₃N₄로 마스크 처리된 부분은 식각률은 '0'이 되어야 한다. 그러나 각 픽셀 값들이 식각이 되면서 마스크 부분을 만나게 되면 그 부분에 대한 식각이 다시 정의되어야 한다. 이와 같이 마스크가 존재할 경우 식각에 대해 정의는 식 (3-2)와 같다.

$$R(\lambda) = \begin{cases} 0 & , \lambda < 0 \\ 1 & , \lambda > m \\ \frac{e^{\alpha\lambda}}{e^{\alpha m}} & , otherwise \end{cases} \quad (3-2)$$

$$Er'_{t,x,y} = \begin{cases} Er_{t,x,y}, & Ma(x,y) = false \\ Er_{t,x,y} R(G(t,x,y)), & Ma(x,y) = true \end{cases}$$

여기서, m 과 α 는 식각특성 상수이며, $G(t,x,y)$ 는 $\frac{1}{2}(S_{th} - S(t,x,y))$ 로 정의하였다. 실제 이방성 식각을 진행 할 경우 마스크와 실리콘 웨이퍼의 접합부분으로 식각용액이 침투하여 미세하게 식각이 이루어진다. 이러한 현상을 언더컷이라고 하고 본 논문에서는 식 (3-3)과 같이 정의하였다.

$$Er''_{t,x,y} = Er'_{t,x,y} + \frac{1}{4} \sum_{i=x-1}^{x+1} \sum_{j=y-1}^{y+1} [Er'_{t,i,j} R(H(t,x,y,i,j))] \quad (3-3)$$

여기서, $H(t,x,y,i,j)$ 는 $S(t,x,y) - S(t,i,j)$ 와 같이 정의하였다.

2.8 식각공정 정의

실제 실리콘 웨이퍼의 식각은 3차원 공간 상에서 진행되기 때문에 Z축 방향뿐만 아니라 X, Y방향으로도 식각이 진행된다. 그러나 모형을 위해 정의된 메쉬형태의 배열값은 시뮬레이션의 X 방향 배열크기 (PX_w)와 Y방향 배열크기(PX_h)의 $PX_w \times PX_h$ 로 제한되어 있기 때문에 정밀한 모형화 결과를 얻기 위해서 본 논문에서는 정의된 배열과 배열의 사이 값들을 선형보간 (linear interpolation)법을 이용하여 정밀도를 향상시켰다. 또한 해당 배열값을 기준으로 상, 하, 좌, 우에 위치한 배열값과 선형보간을 수행하여 다음 시간에 형성될 경계면을 예측하고, 4개의 예측된 결

과값을 평균하였다. 시간 t 에서 각 메쉬들이 식각되어 이동될 위치를 벡터 $\mathbb{P}_{t,x,y}$ 라 하고 다음 식 (4-1)과 같이 정의 된다.

$$\mathbb{P}_{t,x,y} = (xD_x, yD_y, S(t,x,y)) + Er''_{t,x,y} \quad (4-1)$$

그리고 다음시간($t+1$)에 식각되어 이동될 실리콘 웨이퍼의 픽셀은 아래 식 (4-2)와 같이 정의된다.

$$S(t + \Delta t, x, y) = \frac{1}{4} [St(t, x, y, x - 1, y) + St(t, x, y, x + 1, y) + St(t, x, y, x, y - 1) + St(t, x, y, x, y + 1)] \quad (4-2)$$

3. 결과 및 고찰

상기 기술한 바와 같이 정확한 식각모형화를 위해서는 결정 방향에 따른 식각률의 추정이 필수적이다. 그림 2는 퍼지논리로부터 추론된 식각률로써 가로축은 실리콘 웨이퍼의 결정방향을 {1,1,1}면을 기준으로 각도로 표시한 것이고, 세로축은 식각률을 표시한 것이다. 그림 2의 원들은 12개의 식각률 정보를 표시한 것이고, 실선은 퍼지논리로부터 추론된 식각률이다.

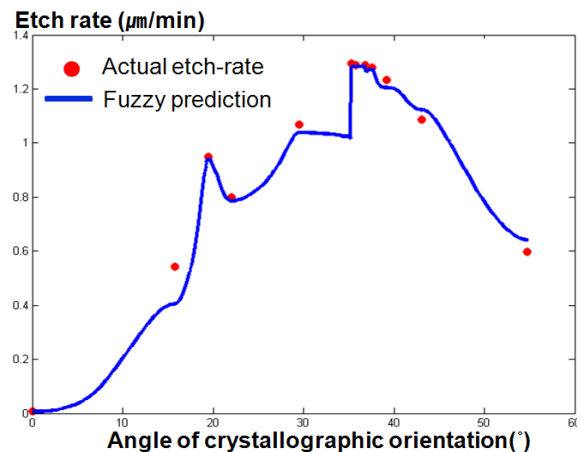


Fig. 2. Fuzzy logic based prediction results of etch rate on various silicon surface orientation.

퍼지논리로부터 추론된 식각률을 이용하여 모형화한 결과를 분석하기 위해 사각형의 마스크를 제작하여 KOH 실험을 진행하였다. 그림 3(a)는 본 논문에서

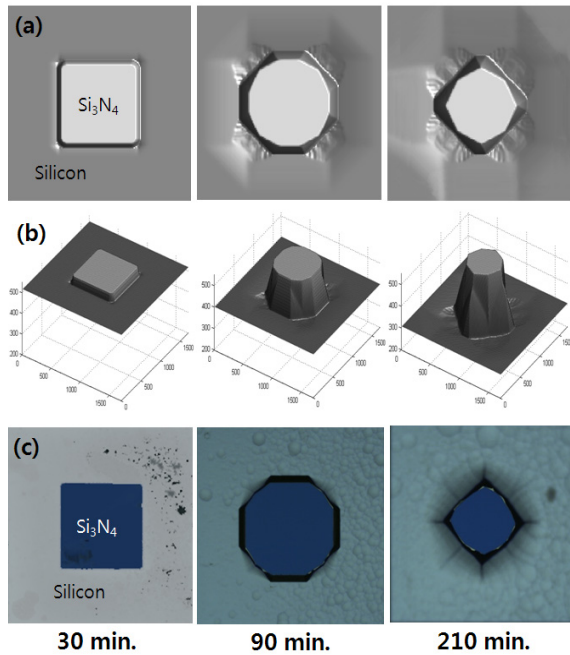


Fig. 3. Results of etch profiles using square mask. (a) Modeling result (viewed from above), (b) 3D modeling results, (c) experimental result (viewed from above).

서 제안한 모형화 결과이고, (b)는 모형화한 결과를 삼차원으로 표현한 그림이다. 그리고 (c)는 모형화 결과를 비교하기 위해 실제 실험한 결과이다.

실험조건은 모형화한 조건과 동일한 조건으로 진행하였으며, 식각시간은 30분, 90분, 210분 간격으로 웨이퍼를 꺼내 현미경으로 식각모양을 측정하였다. 모형화한 결과를 분석해 보면 실제 실험결과와 동일하게 사각형의 모서리 부분이 먼저 식각되어 마름모 형태로 바뀐 후 점점 작은 원형으로 식각되는 것을 확인할 수 있었다. 식각깊이는 60분을 기준으로 모형화 결과는 약 75 μm 정도 식각되었고, 실험결과 또한 약 70 μm 정도로 식각량 및 형태에 있어 동일한 경향을 보였다.

그리고 퍼지논리로 부터 추론된 식각률을 검증하기 위해 12개의 식각률만을 이용하여 모형화 실험을 진행하였다. 그림 4는 12개의 식각률을 이용하여 모형화한 결과이다. 그 결과를 보면 바닥면의 식각이 일정하지 않고, 점선(원)으로 표시한 부분이 바닥면과 구멍이 나는 등 제대로 된 모형화 결과를 얻지 못했다. 또한 일부 점들이 식각이 되지 않아 기둥처럼 남아 있는 현상이 나타났는데, 이는 잘못된 식각률 정의

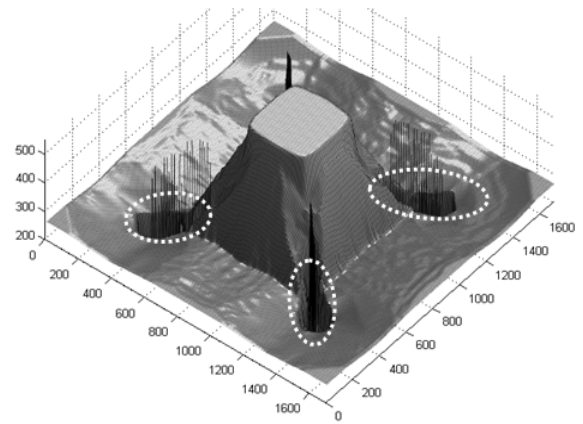


Fig. 4. Twelve etch-rate based modeling result.

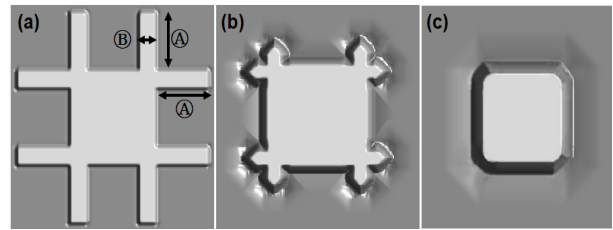


Fig. 5. Modeling results for mask with compensation structure. (a) mask design with compensation structure, (b) etch profile after 150 minutes, (c) etch profile after 210 minutes.

에 기인한 것으로 판단할 수 있으며, 퍼지 논리로부터 추론된 식각률과 모형화 방법이 실제 식각 실험치와 근접하다는 것으로 판단할 수 있다.

제안한 에너지 하베스트 소자의 구조물을 제작하기 위해 식각속도가 상대적으로 빠른 사각형의 모서리 부분에 보상 구조물을 추가하여 보상 구조물의 최적화 실험을 진행하였다. 보상 구조물의 모양은 그림 5(a)와 같은 구조로 결정하였으며, 그 이유는 다른 모양의 보상 구조물들에 비해 그림 5(a)의 ①길이를 조절함으로써 식각방향과 속도의 컨트롤이 용이하였기 때문이다. 그림 5(c)와 같은 사각형 모양의 구조물을 제작하기 위해서는 300 μm 식각 깊이를 기준으로 보상 구조물의 길이는(그림 5(a)에서 ①부분) 460 μm , 폭은(그림 5(a)에서 ②부분) 140 μm , 식각 시간은 250분 정도일 때 최적의 사각모양이 만들어 지는 것으로 실험되었다.

위와 같은 실험을 기반으로 식각깊이 300 μm 의 그림 6(a)의 오른쪽 그림과 같은 에너지 하베스트 구조

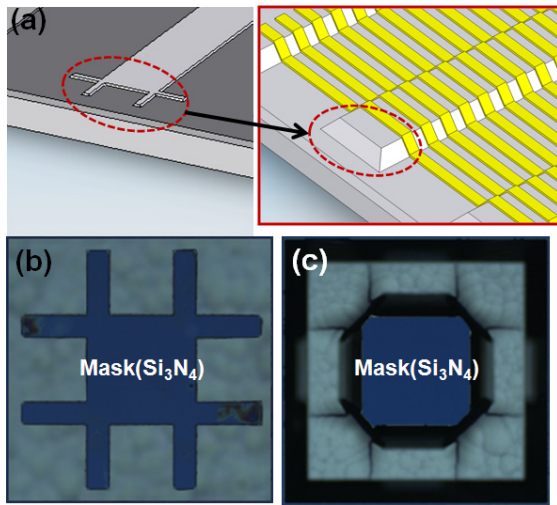


Fig. 6. Etch profile of Si for energy harvester. (a) mask design for Si etch, (b) mask shape with compensation structure, (c) etch profile after 250 minutes.

물을 제작하기 위해 그림 6(b)와 같은 마스크를 제작하였다. 그리고 KOH 식각을 진행한 결과 그림 6(c)와 같이 사각형의 구조물을 제작할 수 있었다. 이와 같은 결과는 퍼지논리로 식각률을 추론하고 모형화 실험을 진행한 그림 5의 결과와 잘 일치되어 본 논문에서 목표로 하는 에너지 하베스트 구조물 제작을 성공적으로 완성할 수 있었다.

4. 결론

본 논문에서는 KOH 식각을 이용하여 식각이 된 실리콘 웨이퍼의 구조물 위에 미세패턴을 형성시킨 전자기 유도 방식의 에너지 하베스트 소자의 구조를 제안하고, 제안한 에너지 하베스트 소자의 제작에 필요한 이방성 식각에 대한 모형화 방법을 정의하였다. 우선 각도에 따른 12개의 식각률 정보를 퍼지 논리의 입력으로 정의하여 모든 각도에 따른 식각률을 추론하였으며, 추론된 식각률을 이용하여 이방성 식각에 대한 모형화를 진행하였다. 정의한 방법에 의해 모형화된 결과는 실제 KOH 식각 실험을 통해 얻은 결과와 비교하여 식각방향 및 속도를 비교하였다.

그 결과 모형화 결과와 실제 실험한 결과의 식각방향과 식각속도가 동일한 경향으로 진행되는 것을 확인하였으며, 이를 기반으로 제작하려는 에너지 하베스트 소자의 식각 보상 구조물을 설계할 수 있었다. 퍼지를 이용한 모형화 방법은 모든 각에 대한 식각률 정보가 없어도 일반화 추론이 가능하기 때문에 식각농도와 온도가 바뀌어도 몇 개의 식각률 정보만으로 다양하고 정확한 모형화 검증이 가능하기 때문에 공정시간과 비용을 크게 줄일 수 있는 장점이 있다. 또한 이와 같은 모형화 방법은 본 논문에서 제작하려는 에너지 하베스트의 식각 구조물뿐만 아니라 KOH 식각이 이용되는 다양한 MEMS 구조물 제작에 응용이 가능할 것으로 기대한다.

감사의 글

이 논문은 2011년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 기초연구사업 지원을 받아 수행된 것임(2011-0006648).

본 연구는 2010년도 가톨릭대학교 교비연구비의 지원으로 이루어졌음.

REFERENCES

- [1] S. Das, D. P. Arnold, I. Zana, J. W. Park, M. G. Allen, and J. H. L. Lang, *J. Microelectromech. Sys.*, **15**, 1351 (2006).
- [2] S. Saadon and O. Sidek, *International Conference on Modeling, Simulation and Applied Optimization (ICMSAO)*, **1** (2011).
- [3] W. Peihong, D. Xuhan, M. Xiaodan, Z. Xiaolin, and L. Jingquan, *NEMS*, 383 (2010).
- [4] M. J. Madou, *Fundamentals of Microfabrication*, 2nd ed. (CRC Press, 2002) p. 188.
- [5] A. Kociubiński, M. Duk, T. Bieniek, and P. Janus, *JTIT*, **4**, 65 (2009).
- [6] Z. Zhu and C. Liu, *J. Microelectromech. Sys.*, **9**, 252 (2000).
- [7] K. Sato, M. Shikida, Y. Matsushima, T. Yamashiro, K. Asaumi, Y. Iriye, and M. Yamamoto, *Sensor. Actuat.*, **A64**, 87 (1998).