

나노갭 트렌치 공정을 이용한 가속도센서 제작

김현철*, 권희준

Fabrication of the accelerometer using the nano-gap trench etching

Hyeon-Cheol Kim*, Hee-jun Kwon

요약 본 논문은 광 도움 전기화학적 식각으로 나노갭 트렌치 구조를 형성하고 이를 이용해서 정전 용량형 가속도 센서를 설계하고 제작한 것에 대한 연구이다. 정전 용량형 가속도 센서의 감도를 증가시키기 위해 스프링에 연결된 관성질량과 연결된 전극과 감지전극 사이의 간격을 좁혀 커패시턴스의 변화량을 증가시키고 있다. 이를 실현시키기 위해 광-도움 전기화학적 식각을 이용하였고 ANSYS 프로그램을 이용하여 구조해석을 실시하여 1mm×1mm 크기의 초소형 정전 용량형 가속도 센서를 설계하였다. 광-도움 전기화학적 식각의 실험 변수인 빛의 세기, dc 전압, 용액의 조성, 피치 등을 고려하여 가속도 센서는 제작 되었다. 최적 공정 조건은 dc전압 2V, Blue LED 20mA, 49wt% HF:DMF:D.I.Water=1:20:10, 피치 20µm이며, 폭 344nm, 깊이 11.627µm의 나노갭 트렌치가 형성되었다.

Abstract This paper proposes a novel fabrication method for a capacitive type micro-accelerometer with uniform nano-gap using photo-assisted electro-chemical etching. The sensitivity of the accelerometer should be improved while the electrodes between the inertial mass and the sensing comb should be narrowed. In this paper the nano-gap trench structure is fabricated using the photo-assisted electrochemical etching method. The sensor was designed and analysed using ANSYS simulator. The characteristics of the etching were observed according to the dc bias, the light intensity, the composition of the solution, the temperature of the solution, and the pattern pitch variation. The optimum etching conditions were dc bias of 2V, Blue LED of 20mA, 49wt% HF:DMF:D.I.Water=1:20:10, the pattern pitch of 20µm. Uniform trench structure with width of 344nm and depth of 11.627µm are formed using the optimum condition.

Key Words : Accelerometer, Capacitive sensor, Electrochemical etching, LED, Nano-gap trench

1. 서론

센서란 ‘외부자극으로부터의 입력신호를 전기신호로 변환하는 소자’ 라고 한다. 외부자극이란 우리가 검출 또는 측정하고자 하는 양, 특성, 또는 상태를 의미한다. 사람으로 나타내면 온도, 빛, 소리, 압력 등을 시각, 청각, 촉각, 미각, 후각인 오감을 이용하여 감지하는 것을 말한다.

가속도 센서는 물체의 가속도, 진동, 충격 등의 동적 힘을 측정하는 것으로 가속도 입력에 대응한 관성력 $F=ma$ 와 훅의 법칙으로 표현되는 복원력 $F=kx$ 을 이용하여 물체의 운동상태를 감지한다. 자동차의 에어백, 네비게이션, 조향 시스템, 자동 잠금 장치, 지진계, 휴대폰, 로봇, 노트북 등 여러 분야에서 많은 용도로 사용되고 있으며 활용 범위가 넓어지고 있다.

This work was supported by research fund of Ulsan University in 2008

*Corresponding Author : School of Electrical Engineering, University of Ulsan(hckim08@ulsan.ac.kr)

Received April 11, 2016

Revised April 22, 2016

Accepted April 26, 2016

정전 용량형 가속도 센서는 외부에서 인가되는 힘에 의해 질량(Mass)이 움직이는데 판성질량과 연결된 전극과 기판에 고정된 전극 사이의 간극 차이에서 발생하는 커패시턴스(Capacitance)의 변화를 측정한다. 표면 마이크로머시닝 공정을 통해 제작되며 상대적인 커패시턴스의 변화는 압저항형 센서의 저항 변화보다 큰 변화량을 통해 높은 감도를 가진다[1].

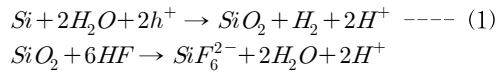
대부분의 MEMS 구조는 고종횡비의 건식 식각인 DRIE 공정으로 제작된다. 그러나 DRIE 공정은 Scallop 현상, footing effect, undercut 현상과 제한적인 종횡비라는 문제점을 가지고 있다. 따라서 이런 문제와 제한을 해결하기 위해서 광 효과를 이용한 전기화학적 식각으로 제작하려고 한다[2][3].

본 논문에서는 광 도움 전기화학적 식각 공정을 기반으로 정전 용량형 가속도 센서를 설계 및 제작하였다. 현재 센서의 크기는 점점 작아지고 있으며 상용화 되고 있는 압저항형 센서의 크기는 2mm × 2mm로 제작되고 있다[4]. 센서의 크기가 작아질수록 질량(Mass)과 스프링(Spring)의 크기 제한이 감도 저하로 나타나므로 새로운 공정 방법이 필요하다. 두 전극 사이의 간격(Gap)을 광 도움 전기 화학적 식각의 최적 공정을 통해 줄이고 상대적인 커패시턴스의 변화량을 높게 하여 높은 감도 특성을 나타내게 하였다. 센서 크기는 1mm × 1mm로 작게 설계하였으며 ANSYS를 이용하여 시뮬레이션하고 가속도 센서를 제작하였다.

2. 나노갭 트렌치 공정 최적화

2.1 나노갭 트렌치 공정 원리

광 도움 전기화학적 식각은 다공성 실리콘을 제작하는데 주로 사용되고 있다. 대개 광 도움 전기화학적 식각은 다공성 형태의 공정에 주로 연구하고 있다[5-7]. 용해 반응은 식(1)과 같다.



LED 빛(Photon)를 웨이퍼(Wafer) 밑에서 비추어 내부 광전 효과를 발생한다. N형 웨이퍼의 소수 캐리어와 P형 웨이퍼의 다수 캐리어인 정공은 빛에 의하여 실리콘 내부에서 발생하여 전기장을 따라 빛이 노출된 반대편 웨이퍼 표면에 정공이 모이게 된다. N형 웨이퍼의 정공은 소수 캐리어이므로 P형 웨이퍼에 비하여 정공의 농도 조절이 쉬어 본 논문에서는 N형 웨이퍼를 사용한다. 특히, KOH를 이용하여 습식 식각에 의해 형성된 V-groove의 끝부분에는 전기장이 집중되므로 더욱 쉽게 정공이 모여 식(1)과 같이 화학적 반응이 발생하여 식각이 이루어진다. 이러한 전기화학적 식각은 dc 전압의 세기와 빛의 강도, 용액의 종류와 농도, 패턴 pitch에 따라 형성되는 조건의 변수를 조절하여 변한다[2].

2.2 공정 최적화

2.2.1. KOH 수용액을 이용한

초기 핏 형성공정

실리콘의 이방성(Anisotropic) 식각은 단결정 실리콘을 공정하는데 중요한 기술이다. (100)면과 (110), (111)면의 원자밀도가 다르기에 식각되는 속도의 차이로 V-groove가 형성된다. 트렌치(trench)를 형성하기 위해서는 V-groove의 끝부분에 정공을 집중하여 식각을 한다. 정공을 모으기 위해선 V-groove의 거칠기(Roughness)가 작을수록 정공이 집중이 되고 용액의 밀도, 온도 조건을 맞추어 거칠기 조절이 가능하다. KOH 용액의 온도에 영향을 받는데 용액 농도를 일정하게 하고 온도 조건만을 변화하여 실험을 하였다. 용액의 온도가 90°C 이상의 온도에서 U자형 groove 형성이 되고 80°C 이하에서는 V자형 groove를 형성하였다. 용액의 온도가 낮을 경우 hillock의 밀도 높아져서 웨이퍼 거칠기에 영향을 준다. 용액의 밀도가 높을 경우, 식각 속도가 느리지만 거칠

기는 좋은 더 작아진다. 용액 밀도는 40wt%에 용액 온도 60~65°C에서 가장 좋은 거칠기를 보여준다. <그림1>는 40wt%, 60~65°C 조건에서 생성된 V-groove 모습이다.

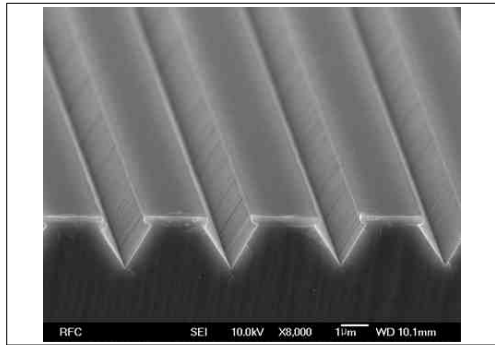


그림 1. V-groove 형성된 실리콘 웨이퍼 SEM 사진
Fig. 1. SEM photograph of the V-grooved Si wafer

2.2.2 용액 구성

용액의 구성은 전기화학적 식각을 하는데 중요한 역할을 한다. HF용액의 양이 증가할수록 이방성 특성이 많이 나타날 것이다. 실리콘과 HF의 반응으로 HF의 H⁺ 이온은 실리콘 표면의 Si의 전기음성도가 상대적으로 낮아져 Si-H 결합에 전자의 편극 현상이 발생하고 F⁻ 이온의 반응으로 Si-H 결합에서 Si-F 결합이 형성된다. 이러한 반응으로 인해 실리콘 표면부터 식각이 진행된다[8]. 실리콘 기판과 HF의 화학적 반응에서 발생하는 기포는 실리콘 기판의 화학적 반응을 방해하기 때문에 기포의 발생을 줄여야 한다. D.I.Water, DMF, HF 용액의 비율을 조절하여 식각 용액으로 기포를 줄였다. 또한 DMF (dimethylformamide)는 방향족 용액으로 HF (Hydrofluoric Acid)용액의 실리콘 웨이퍼 식각에 도움이 된다. <그림2>에서 보듯이 48wt% HF 용액과 D.I.Water만 혼합했을 때 보다 DMF를 첨가하여 실험한 경우 2.2배의 식각 속도로 고종횡비를 나타내었다.

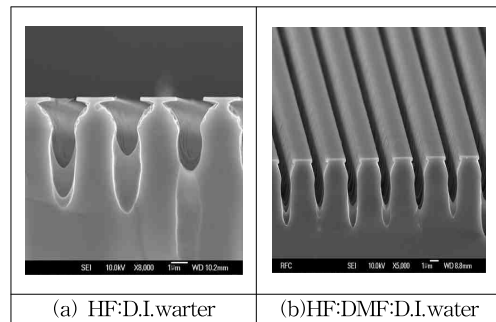


그림 2. 용액 조성에 따른 식각 SEM 사진
Fig. 2. SEM photograph of the etched Si according to the different etching solution

2.2.3. 빛 강도의 세기

BLUE LED의 빛의 강도를 조절하면 콤 사이의 간격 조절이 가능하다. 파란 빛은 단파장이기 때문에 투과율이 작아 표면에서 주로 전자-정공 쌍을 생성한다. 표면에 전달되는 정공의 수가 증가하여 용액과 화학적 반응이 <그림3>에서 볼 수 있듯이 상대적으로 더 넓은 면적에서 발생하게 되어서 트렌치의 넓이가 더 넓어진다.

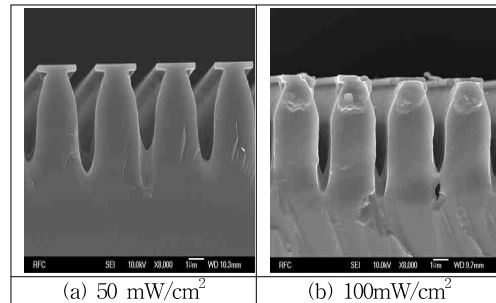


그림 3. 빛의 세기에 따른 식각 SEM 사진
Fig. 3. SEM photograph of the etched Si according to the different photo intensity

2.2.4 DC 전압

dc 전압은 전기화학적 식각에서 중요한 역할을 한다. 용액에 (-)전극을 가하고 웨이퍼에 (+)전극을 가하여 식각이 되는 웨이퍼 표면의 V-groove에 높은 전기장이 형성되게 하고 많은 정공을 모아서 식각이 일어날 수 있도록 해주는 역할을 한다. 0.5V에서 1V, 2V로 전압을 인가할 때에는

V-groove에 더 많은 정공이 모이게 하여 식각이 향상되지만, 5V의 전압에서는 너무 많은 정공이 표면으로 움직이게 되고 표면에서도 화학반응을 일으켜서 마이크로 기공(pore)가 형성되고 트렌치의 넓이가 더 넓어지는 것을 <그림4>에 보인 SEM 사진에서 확인할 수 있다.

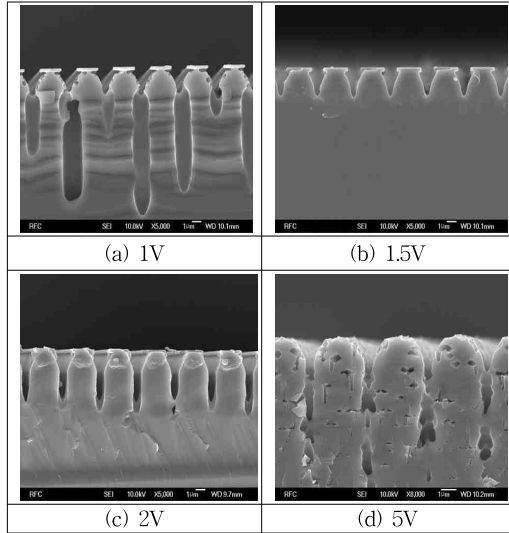


그림 4. dc 전압에 따른 식각 SEM 사진
Fig. 4 SEM photograph of the etched Si according to the different dc voltage source

2.2.5 패턴 Pitch에 따라

빛의 강도 세기 및 용액 종류, 비율, dc전압 등 영향을 받아 트렌치의 넓이 조절이 가능하다. 트렌치의 깊이는 다른 조건들보다 Pitch의 영향에 민감하다. V-groove에 형성되는 전기장이 주위 전기장과 상호 작용하지 않고 좀더 집중되어 주위 실리콘으로부터 정공이 잘 모이기 때문이다.

<그림5>에서 패턴 pitch를 변화할 때 식각된 단면 SEM 사진을 보여주고 있다. 2V 웨이퍼 인가 전압과 20mA LED 조건으로 120분동안 식각된 패턴 피치 4μm, 10μm, 14μm, 20μm에서 형성된 트렌치를 보여준다. <표1>에서 패턴 pitch에 따른 식각된 나노갭의 폭, 깊이, 종횡비를 나타낸다.

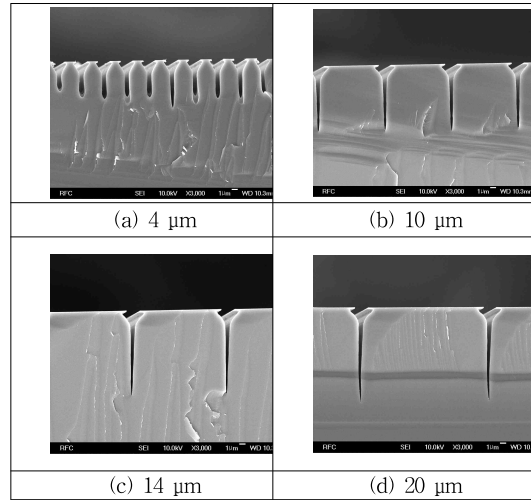


그림 5. 패턴 피치에 따른 식각 SEM 사진
Fig. 5. SEM photograph of the etched Si according to the different pattern pitch

표 1. 패턴 피치에 따른 나노갭 식각 특성
Table 1. Characteristics of the etched nano-gap

Pitch	4μm	10μm	14μm	20μm
폭 [μm]	0.38	0.38	0.32	0.34
깊이 [μm]	9.5	8.81	11.1	11.6
종횡비	25	23	34	34

3. 나노갭 가속도센서 설계

3.1 나노갭 가속도센서 설계

정전용량형 가속도 센서는 질량-댐퍼-스프링으로 구성된 시스템으로 식(2)와 같이 2차 미분방정식으로 묘사할 수 있다.

$$m \frac{d^2x}{dt^2} + c \frac{dx}{dt} + kx = ma \quad \text{----- (2)}$$

여기서, m은 관성질량, c는 댐핑상수, k는 스프링 상수를 의미하고 a는 외부에서 가해지는 가속도를 의미한다. 관성질량은 스프링에 연결되어 외부 가속도에 의한 관성력에 의하여 움직일 수 있는 구조이며, 정전용량형 가속도 센서는 <그림6>에 보인 바와 같이 관성 질량에 머리빗(comb) 모

양의 전극을 연결하고 맞은 편에 기판에 연결되어 움직이지 않는 고정 전극을 연결한 모양이다.

가속도 센서의 공진주파수보다 매우 작은 저주파 동작 상태에서는 변위 x 는 식(3)과 같이 표현된다.

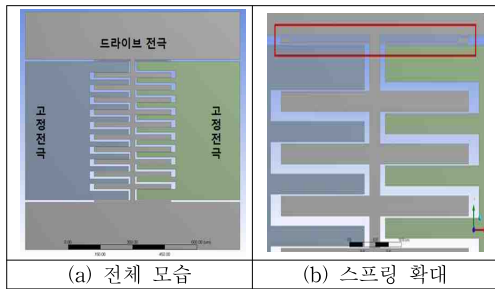


그림 6. 정전용량형 가속도 센서 설계

Fig. 6. Design of the capacitive accelerometer

$$x = \frac{m}{k} a \quad (3)$$

정전용량형 가속도센서의 출력은 식(4)과 같다.

$$\Delta C = \epsilon_0 \frac{A}{d-x} - \epsilon_0 \frac{A}{d} \approx \epsilon_0 \frac{A}{d} \cdot \frac{x}{d} \quad (4)$$

그러므로 <그림6>에 나타낸 정전용량형 가속도센서의 출력은 식(4)에 식(3)을 넣고 질량 m 과 k 를 각각 설계 변수를 이용하여 넣어서 정리하면 식 (5)와 같이 된다.

$$\frac{\Delta C}{a} = \epsilon_0 \frac{A}{d^2} \left(\frac{m}{k} \right) = \epsilon_0 \frac{l_s t_s}{d^2} \left(\frac{\rho l_m w_m t_m}{k} \right) \propto \left(\frac{t_m}{d} \right)^2 \quad (5)$$

여기서, t_s 와 t_m 는 각각 전극의 두께와 관성질량의 두께를 의미하며 표면 마이크로머시닝 공정에 의하여 제작되는 경우 같은 값을 나타낸다. 즉 가속도 입력에 대한 출력은 전극 간격 d 와 전극 두께 t_m 의 비의 제곱에 비례하는 것으로 나타낼 수 있으며 높은 종횡비의 경우 감도가 더 크게 나타난다.

3.2 ANSYS 시뮬레이션

나노갭 가속도센서의 주요 설계 사양은 <표2>

에 정리되어 나타내었다. 20 μ m 간격의 피치로 가속도 센서를 설계하였으며 가속도 센서의 동작 여부는 ANSYS 시뮬레이션에 의하여 검증하였다. 설계에 사용된 실리콘 질량밀도, 영률, 그리고 포아송 비는 각각 2330kg/m³, 170GPa, 0.3이며, 8-node 요소로 메쉬를 구성하였으며 모드 해석을 통하여 첫 번째 공진주파수를 구하였다. 스프링과 연결된 관성 질량은 6.58 μ g이고, 13,071Hz의 수평방향 공진주파수와 44.3N/m의 스프링 상수를 구하였다. <그림7>에 ANSYS 시뮬레이션 결과를 보여주고 있다.

표 2. 나노갭 가속도센서 설계 사양

Table 2. Design specification for the nano-gap accelerometer

Parameter	Design spec.
Size	1 mm x 1 mm
Thickness	10 μ m
mass	6.58 $\times 10^{-9}$ kg
Spring constant	44.3 N/m
Resonance frequency	13,071 Hz

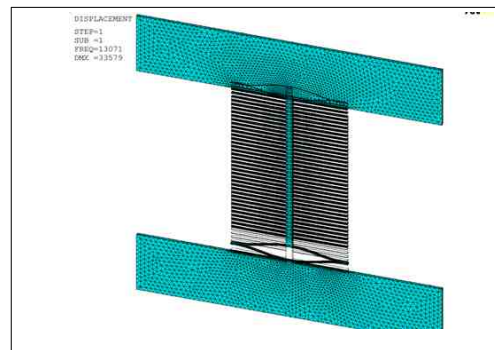


그림 7. 가속도 센서 ANSYS 시뮬레이션

Fig. 7. ANSYS simulation for the accelerometer

4. 나노갭 가속도센서 제작

<그림8>에 나노갭 가속도센서 제작 공정을 보여주고 있다. N형 (100) 웨이퍼를 사용하여 제작하였다. KOH 수용액을 이용하여 v-groove를 형성하고 2장에서 설명한 광도움 전기화학적 식각 방법을 사용하여 전극을 형성하였다. 100nm의 산

화막을 증착하였고 코닝 #7740 파이렉스 글래스를 이용하여 실리콘 웨이퍼와 양극산화 접합을 수행하였다.

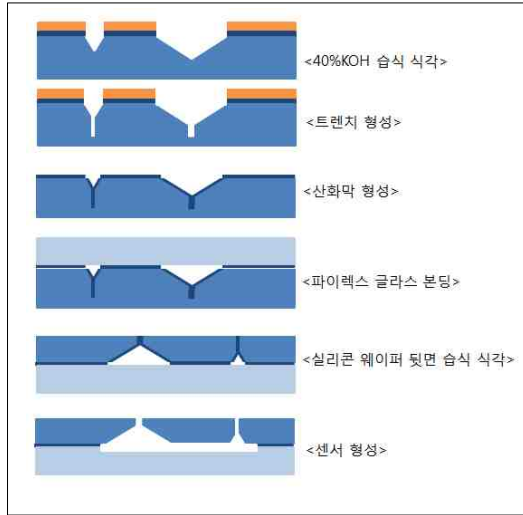


그림 8. 나노갭 가속도센서 제작 공정

Fig. 8. Fabrication process of the nano-gap accelerometer

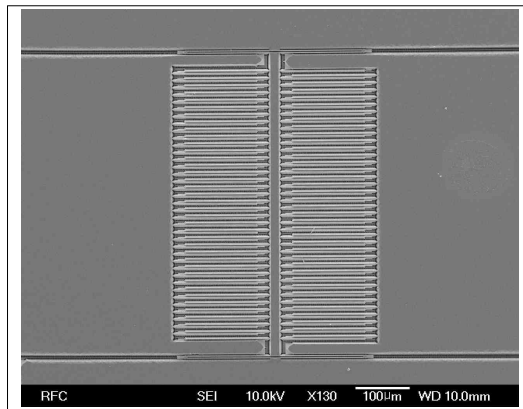


그림 9. 제작된 나노갭 가속도센서 SEM사진

Fig. 9. SEM photograph of the fabricated nano-gap accelerometer

이후 TMAH 수용액을 이용하여 실리콘을 식각하여 실리콘 두께를 10 µm로 하였으며 BHF 용액을 사용하여 산화막을 제거하고 센서를 제작하였다. <그림9>는 제작된 나노갭 가속도센서의 SEM 사진을 보여준다.

5. 결론

본 논문은 광도움 전기화학적 식각을 이용하여 나노갭 트렌치 구조를 형성하고 최적화된 조건을 사용하여 정전용량형 가속도센서를 제작한 결과를 보여준다. 나노갭 트렌치 형성을 위한 최적 공정 조건은 dc전압 2V, Blue LED 20mA, 49wt% HF : DMF : D.I.Water = 1 : 20 : 10, 피치 20µm이며, 그 결과 폭 688nm, 깊이 11.63µm의 나노 트렌치가 형성되었다. 1mm × 1mm 크기의 정전용량형 가속도 센서에 적용하여 성공적으로 제작하였다.

REFERENCES

- [1] Yazdi N and Najafi K “An all-silicon single-wafer micro-g accelerometer with a combined surface and bulk micromachining process”, J. Microelectromech. Syst., Vol.9 pp.544 - 50, 2000
- [2] Hyeon Cheol Kim, Dae Hyun Kim, Jinwoo Jeong, and Kukjin Chun, “Fabrication of nano-gap accelerometer using photo-assisted electro chemical etching”, Transducers 2005, Seoul, pp.523 -526, 2005
- [3] Hyeon Cheol Kim, Daehyun Kim and Kukjin Chun, “Photo-assisted electrochemical etching of a nano-gap trench with high aspect ratio for MEMS applications”, J. Micromech. Microeng. 16, pp. 906-913, 2006
- [4] Jeon, Yeon-Hwa, and Hyeon-Cheol Kim. “Design and Fabrication of 2mm× 2mm sized Piezoresistive Accelerometers.” Journal of the Institute of Electronics and Information Engineers 52.2 (2015): 83-88.
- [5] Charlton, M. D. B., H. W. Lau, and G. J. Parker. “High aspect ratio photo-assisted electro-chemical etching of silicon and its application for the fabrication of quantum wires and photonic band structures.”

Microengineering Applications in Optoelectronics, IEE Colloquium on. IET, 1996

[6] Izuo S, Ohji H, French P J and Tsutsumi K J, "A novel electrochemical etching technique for n-type silicon," Sensors and Actuators A, 97, pp.720 - 724, 2002

[7] Bettotti, P., et al. "P-type macroporous silicon for two-dimensional photonic crystals." Journal of applied physics Vol.92, NO.12, pp.6966-6972., 2002

[8] H. Seidel, L. Csepregi, A. Heuberger and H. Baumgärtel, "Anisotropic etching of crystalline silicon in alkaline solutions I. Orientation dependence and behavior of passivation layers." Journal of the electrochemical society Vol.137, No.11, pp. 3612-3626. 1990

권 희 준(Hee-Jun Kwon)



- 2013년 2월 : 울산대학교 공과대학 전기공학부 (공학사)
- 2015년 2월 : 울산대학교 공과대학원 전기전자정보시스템공학전공 (공학석사)

<관심분야> 반도체 소자, 스마트 센서, 태양전지

저자약력

김 현 철(Hyeon-Cheol Kim) [중신회원]



- 1998년 8월 : 서울대학교 공과대학원 전자공학과 (공학박사)
- 1998년 9월 ~ 2001년 6월 : 삼성 전자 종합기술원 전문연구원
- 2001년 7월 ~ 2003년 12월 : Chromux Technologies Inc. Senior Engineer
- 2004년 3월 ~ 2006년 2월: 서울대학교 BK계약교수
- 2006년 3월 ~ 2007년 6월: 서울대학교 차세대트랜지스터연구단 책임연구원
- 2007년 7월 ~ 2008년 2월: 한국정보사회진흥원 UIT 클러스터추진센터 책임연구원
- 2008년 3월 ~ 현재 : 울산대학교 전기공학부 부교수

<관심분야> 반도체 소자, 스마트 센서, 광성 센서, MEMS, 나노공학