

## CVD에 의한 M/NEMS용 다결정 3C-SiC 박막 성장

정귀상\* · 김강산 · 정준호

### Growth of polycrystalline 3C-SiC thin films for M/NEMS applications by CVD

Gwi-yang Chung<sup>†</sup>, Kang-San Kim, and Jun-Ho Jeong

#### Abstract

This paper presents the growth conditions and characteristics of polycrystalline 3C-SiC (silicon carbide) thin films for M/NEMS applications related to harsh environments. The growth of the 3C-SiC thin film on the oxidized Si wafers was carried out by APCVD using HMDS (hexamethyldisilane:  $\text{Si}_2(\text{CH}_3)_6$ ) precursor. Each samples were analyzed by XRD (X-ray diffraction), FT-IR (fourier transformation infrared spectroscopy), RHEED (reflection high energy electron diffraction), GDS (glow discharge spectrometer), XPS (X-ray photoelectron spectroscopy), SEM (scanning electron microscope) and TEM (tunneling electro microscope). Moreover, the electrical properties of the grown 3C-SiC thin film were evaluated by Hall effect. From these results, the grown 3C-SiC thin film is very good crystalline quality, surface like mirror and low defect. Therefore, the 3C-SiC thin film is suitable for extreme environment, Bio and RF M/NEMS applications in conjunction with Si fabrication technology.

**Key Words** : Polycrystalline 3C-SiC, M/NEMS, APCVD, HMDS

## 1. 서 론

최근 급속히 발전하고 있는 Si-M/NEMS(micro/nano electro mechanical system)는 Si의 1.1 eV의 낮은 밴드 갭으로 인해 100 °C 전후 그리고 SOS(Si-on-Sapphire)와 SOI(Si-on- Insulator) 구조의 경우는 300 °C까지 사용이 가능하지만, 집적화된 M/NEMS의 높은 발열문제를 극복하기에는 그 한계가 있다<sup>[1]</sup>.

이러한 Si-M/NEMS의 문제점을 극복할 수 있는 대안으로 우수한 물리적, 전기적, 기계적, 화학적, 광학적 특성뿐만 아니라 Si 미세표면가공기술을 이용할 수 있는 SiC-M/NEMS에 대한 관심이 증대되고 있다<sup>[2]</sup>.

SiC는 Si에 비해 밴드갭이 2~3배이상 높고 열전도도가 3배가량 뛰어나 높은 한계 온도를 가지며 화학적 안정성과 내부식성, 내산화성이 매우 양호하기 때문에 극한 환경에서도 사용이 가능하다<sup>[3]</sup>. 더구나, 우수한

기계적 특성과 생체에 적합성때문에 최근 차세대 RF와 Bio용 M/NEMS로서 주목을 받고 있다<sup>[4]</sup>. 특히, 3C-SiC는 저온에서 다양한 기판위에 대면적 성장이 가능하며 Si-M/NEMS 기술을 적용할 수 있다. 단결정 3C-SiC는 1300 °C 이상의 고온에서 성장이 가능하지만, Si와 SiC 두 물질간의 큰 열팽창계수 차이와 격자부정합으로 인해 크랙, 뒤틀림 등의 스트레스가 발생한다. 더구나, 고온 성장은 대면적의 단결정 3C-SiC 결정성장이 어렵고 Si기판과의 계면에서의 누설로 인하여 고온에서의 특성이 떨어진다<sup>[5]</sup>. 이러한 결점을 극복하기 위해 산화막 혹은 질화막위에 대면적의 성장이 가능하고 우수한 결정질을 갖는 다결정 3C-SiC의 성장이 M/NEMS용 재료로서 유용하다.

현재 3C-SiC 결정성장은 주로 두 개의 전구체( $\text{SiH}_4$ ,  $\text{C}_2\text{H}_2$ )를 사용하여 성장하고 있지만, Si와 C의 화학량론적 제어가 어렵고 독성으로 인한 환경오염, 폭발성 등의 위험이 있다. 최근에는 정확한 화학량론적 비율을 제공하고 낮은 온도에서 분해가 용이하며 폭발의 위험성이 적은 단일 전구체를 사용하는 연구가 활발히 진행되고 있다<sup>[5]</sup>.

울산대학교 전기전자정보시스템공학부(School of Electrical Eng., University of Ulsan)

<sup>†</sup>Corresponding author: gschung@ulsan.ac.kr

(Received : December 29, 2006, Accepted : February 1, 2007)

따라서, 본 연구에서는 APCVD법으로 상온에서 액체 상태인 HMDS(hexamethyildisilane:  $\text{Si}_2(\text{CH}_3)_6$ )을 단일 전구체로 사용하여 산화막이 성장된 Si기판위에 M/NEMS용 다결정 3C-SiC 박막을 성장했다.

## 2. 실험

본 연구에서는 산화막이 형성된 Si(100)기판위에 다결정 3C-SiC를 성장했으며 고순도 아르곤을 캐리어 가스로 사용하여 성장온도까지 가열후 HMDS 전구체를 주입하였다. 1000 °C부터 50 °C 단위의 온도별 성장을 했으며 유량별 성장을 위해 전구체를 6~8 sccm으로 조절하였다. 성장된 다결정 3C-SiC 박막의 특성을 분석 및 평가했으며,  $\text{H}_2$ 의 유량에 따른 표면 거칠기의 변화와 기판 위치에 따른 차이를 분석하였다.

## 3. 결과 및 고찰

그림 1은 산화막이 성장된 Si기판위에 온도별로 증착된 다결정 3C-SiC 박막의 RHEED 스펙트럼이다. 그림 1(a)는 1000 °C에서 성장된 3C-SiC 박막의 패턴으로써 SiC 고유의 링 패턴이 형성되었으나 그 세기가 매우 약함을 알 수 있다. 이것은 SiC 결정의 크기가 매우 작아 충분한 결정성을 확보하지 못했음을 의미한다. 반면, 1100 °C에서 성장된 그림 1(b)의 패턴은 아주 선명한 링 패턴이 관측되었는데, SiC의 미세결정

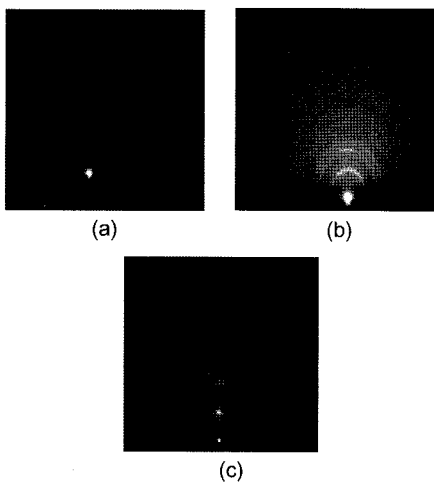


그림 1. 성장온도에 따른 다결정 3C-SiC 박막의 RHEED 스펙트럼

Fig. 1. RHEED spectra of the polycrystalline SiC thin film according to growing temperature.

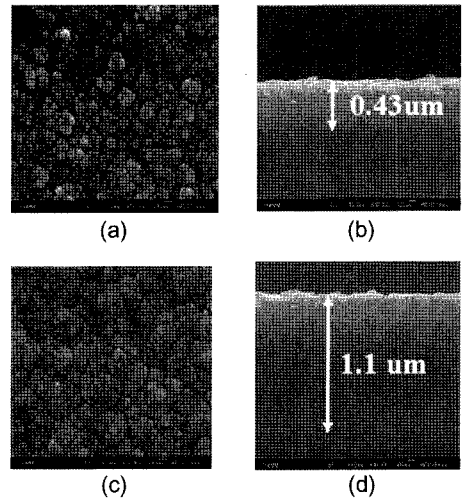


그림 2. HMDS 유량에 따른 다결정 3C-SiC 박막의 SEM 이미지(단위: sccm): (a) 표면: 6, (b) 계면: 6, (c) 표면: 8, (d) 계면: 8

Fig. 2. SEM images of polycrystalline 3C-SiC thin films according to various HMDS flow ratio (unit: sccm): (a) surface: 6, (b) interface: 6, (c) surface: 8, and (d) interface: 8.

들이 1100 °C에서는 충분한 에너지로 인해 큰 결정으로 성장하였기 때문에 사료된다. 한편, 1200 °C에서 성장된 그림 2(c)의 경우, 링 패턴에서 점(spot) 패턴으로 바뀌는 것을 확인할 수 있는데, 이것은 박막의 결정질이 더욱 향상되어 SiC 고유의 결정구조가 형성됨을 의미한다.

그러나, 본 연구에서는 높은 온도에서는 박막 내부에 많은 스트레스를 가지기 때문에 결정성이 충분히 확보되고 상대적으로 낮은 1100 °C를 성장용 최적의 온도로 선택했다.

그림 2는 1100 °C에서 유량별로 성장한 다결정 3C-SiC 박막의 SEM 이미지를 나타낸 것이다. 8 sccm의 경우, 6 sccm에 비해 성장률이 2.5배 높으며 막의 표면 그래인들이 조밀하게 형성되었다. 이것은 6 sccm의 경우, 반응가스의 유량이 결정성장의 요구치를 만족시키지 못했기 때문에 사료되며 8 sccm의 조건에서 성장률은 36.67 nm/min였다.

그림 3는 GDS로 2 μm의 두께로 성장된 다결정 3C-SiC 박막의 깊이에 따른 원소의 성분 분포를 나타낸 것이다. 박막의 표면에서부터 산화막이 있는 계면까지 Si와 C의 비율이 일정하게 유지되는 것을 확인했다.

성장된 3C-SiC 박막 표면의 표면 거칠기 향상을 위해 1100 °C와 8 sccm HMDS의 조건에서  $\text{H}_2$ 를 일정

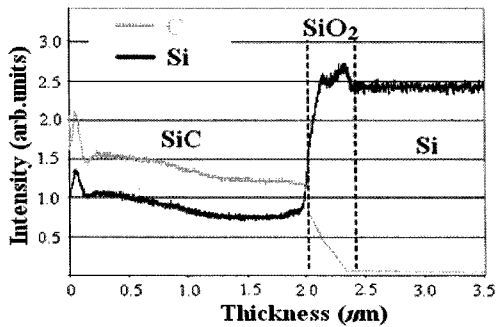


그림 3. 다결정 3C-SiC 박막의 깊이에 따른 GDS분석  
Fig. 3. Depth profiling of the polycrystalline 3C-SiC thin film by GDS.

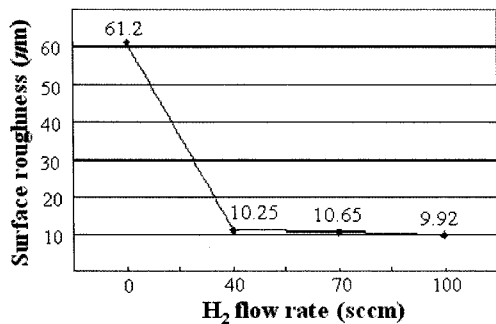


그림 4. H<sub>2</sub>의 유량에 따른 거칠기 변화  
Fig. 4. Roughness variations according to H<sub>2</sub> flow ration.

비율로 첨가시켜 H<sub>2</sub>의 유량에 따른 박막의 표면 거칠기 변화를 분석했다. 그림 4는 20분동안 성장된 다결정 3C-SiC 박막의 H<sub>2</sub>의 유량에 따른 표면 거칠기 변화를 나타낸 것이다. H<sub>2</sub>의 유량이 0~40 sccm에서 박막의 표면 거칠기가 가장 크게 향상되었지만, 40~100 sccm에서는 큰 변화를 보이지 않았다.

본 연구에서는 H<sub>2</sub>의 주입은 표면의 거칠기뿐만 아니라 성장률에도 영향을 줄 것 이라 판단하여 H<sub>2</sub>의 주입량과 기관의 위치에 따른 두께를 분석했다. 그림 5는 기관 위치와 H<sub>2</sub> 유량에 따른 박막의 두께 변화를 나타낸 것이다. 박막의 두께는 크게 up stream, center, down stream 세부분으로 나누어 SEM으로 측정하였다. H<sub>2</sub>의 유량이 증가됨에 따라 up stream과 center 두께는 전체적으로 증가하였으나, down stream 쪽에서는 큰 차이를 보이지 않았다. H<sub>2</sub>의 유량이 증가할수록 박막의 성장률의 증가와 함께 stream 위치에 따른 두께의 편차 또한 증가했다. 특히, 70 sccm의 H<sub>2</sub>가 주입되었을 경우, up stream과 down stream의 두께차이는 약 0.42 μm로 가장 큰 차이를 보였다. H<sub>2</sub>의 유량이 100 sccm인 경우

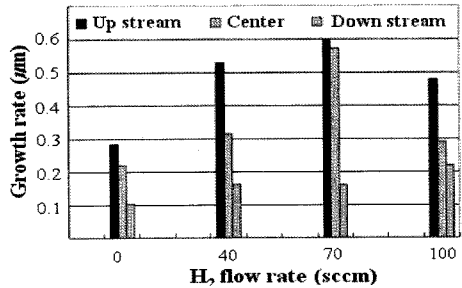


그림 5. 기관 위치와 H<sub>2</sub> 유량에 따른 성장된 다결정 3C-SiC 박막의 두께 변화  
Fig. 5. Thickness variations of the grown polycrystalline 3C-SiC thin film according to the location of substrate and H<sub>2</sub> flow ration.

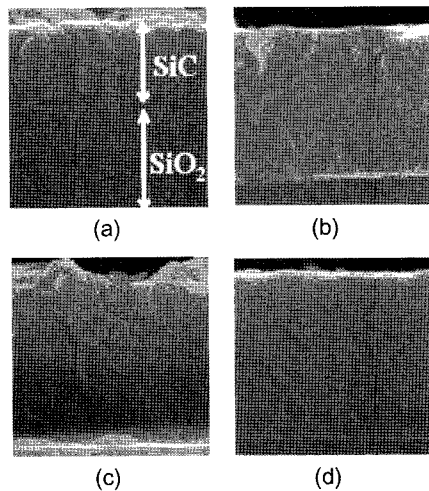


그림 6. H<sub>2</sub> 유량에 따른 성장된 다결정 3C-SiC 박막의 단면 SEM 이미지(단위: sccm): (a) 0, (b) 40, (c) 70, (d) 100  
Fig. 6. Cross-section SEM images of the grown polycrystalline 3C-SiC thin film according to H<sub>2</sub> flow ration (unit: sccm): (a) 0, (b) 40, (c) 70, and (d) 100.

에는 오히려 전체적인 두께는 감소하였지만, stream 위치에 따른 두께의 편차 또한 감소하여 다른 유량에 비해 상대적으로 평탄한 두께 분포를 보였다.

그림 6은 H<sub>2</sub>의 유량 변화에 영향을 가장 많이 받은 up stream 부분을 H<sub>2</sub>의 유량에 따른 박막의 밀도 확인을 위해 SEM으로 분석한 이미지들이다. H<sub>2</sub>의 유입량이 없을 경우, 박막이 덩어리져 형성됨을 알 수 있으며 표면의 상태도 매우 거칠었다. 그러나, 이러한 현상은 H<sub>2</sub>의 유량이 증가할수록 향상되었는데 특히, 70 sccm에서는 박막의 덩어리짐이 크게 감소했으며 100 sccm의 경우, 박막이 매우 균일한 밀도를 이루며 성장된 것

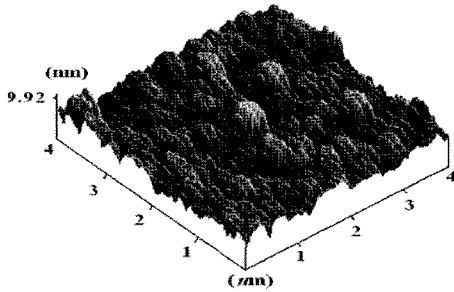


그림 7. 성장된 다결정 3C-SiC 박막의 AFM 이미지  
Fig. 7. AFM image of the grown polycrystalline 3C-SiC thin film.

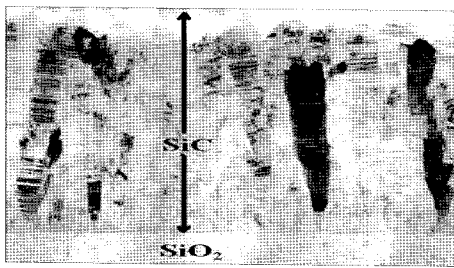


그림 8. SiO<sub>2</sub>와 3C-SiC간의 계면 TEM 이미지  
Fig. 8. TEM image of SiO<sub>2</sub> and 3C-SiC interface.

을 알 수 있다. 100 sccm의 H<sub>2</sub> 유량에서 표면 거칠기는 9.920 nm로 70 sccm에서의 10.654 nm에 비해 큰 변화를 보이지 않았으나, 위치에 따른 두께의 평탄도 혹은 박막의 밀도 측면에서 볼 때 100 sccm에서 우수한 결과를 보였다.

그림 7은 8 sccm HMDS 유량과 1100 °C, 100 sccm의 H<sub>2</sub>에서 성장된 다결정 3C-SiC 박막의 AFM 이미지이다. 표면의 거칠기는 9.920 nm이며 향후 반응관 내부 유속의 제어로 인해 더욱 향상될 것으로 기대된다.

그림 8은 SiO<sub>2</sub>와 SiC의 계면을 TEM으로 분석한 이미지이다. SiO<sub>2</sub>와 인접해있는 SiC는 다소 불규칙적인 층을 보였다. 이 층은 SiC결정이 방향성이 없이 배열된 것이나 기관의 휘어짐이나 void 등의 결함은 발견할 수 없었다. SiC 박막이 두꺼워질수록 원형의 결정이 잘 배열되었으며 조밀하게 형성됨을 확인했다.

그림 9는 최적의 성장조건하에서 증착된 2" 크기의 다결정 3C-SiC 박막 사진으로 거울면 처럼 평탄도가 대단히 우수함을 알 수 있다. 또한, 4" 이상의 대면적화도 가능하기 때문에 향후 극한 환경, RF, 바이오 그리고 AlN 질화물 반도체 헤트르접합을 이용한 차세대 M/NEMS 및 전자부품개발에도 사용 가능할 것으로 기

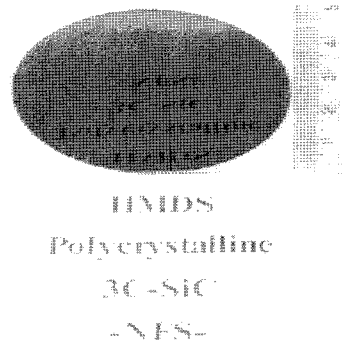


그림 9. CVD로 성장된 2" 다결정 3C-SiC 박막 사진  
Fig. 9. Photography of the grown 2" polycrystalline 3C-SiC thin film by CVD.

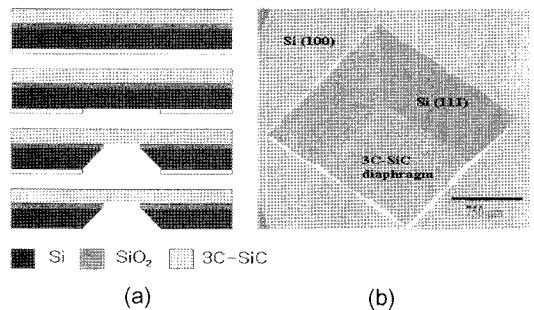


그림 10. 3C-SiC의 마이크로 다이어프램의 (a) 도식적 제작공정도 및 (b) SEM 이미지  
Fig. 10. (a) Schematic fabrication process flow chart and (b) SEM image of 3C-SiC microdiaphragm.

대된다.

그림 10은 3C-SiC 마이크로 다이어프램의 도식적 제작공정과 SEM 이미지를 나타낸 것이다. 사진식각 공정기술을 통해 1.5 × 1.5 mm<sup>2</sup> 크기의 사각형 창을 내고 20 wt%의 TMAH 용액에서 Si를 이방성 식각했다. 이러한 마이크로 다이어프램은 3C-SiC의 우수한 기계적, 열적으로 초고압, RF와 바이오용 마이크로/나노 공진기와 각종 M/NEMS에 응용이 가능할 것으로 사료된다<sup>4)</sup>.

그림 11은 Si에 RIE로 마이크로 구조물을 형성한 후, 성장온도 1100 °C, HMDS 유량 8 sccm, H<sub>2</sub> 유량 100 sccm 조건에서 SiC를 코팅한 이미지이다. 이때 성장된 SiC의 두께는 약 0.8 μm였다. SiC 박막은 Si 구조물에 요철없이 평탄하게 코팅됨을 확인했다. 따라서, SiC는 높은 물리적 안정성, 내마모성, 내산화성, 내방사선 등으로 인해 극한 환경 Si-M/NEMS에 코팅물질로 적합할 것이다.

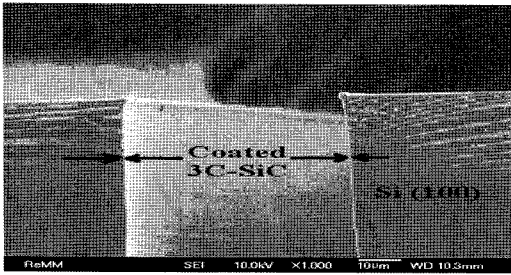


그림 11. 3C-SiC 박막이 코팅된 Si 마이크로 구조물 이미지  
Fig. 11. Image of Si microstructure coated 3C-SiC thin film.

다결정 3C-SiC의 전기적 특성은 Hall effect measurement system(HEM-2000)으로 수행했다. 스퍼터링으로 SiC 표면에 4개의 원형 Al 전극을 증착한 다음, 400 °C에서 20분간 진공열처리후 측정했다. 측정에 사용된 다결정 SiC 박막의 두께는 0.5  $\mu\text{m}$ 였다. 상온에서 측정된 결과, 캐리어농도는  $2.7 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ 였고 전자의 이동도는  $7 \text{ cm}^2/\text{Vs}$ 였다. 또한, 다결정 3C-SiC 박막의 두께가 두꺼워질수록 전자 이동도가 향상될 것으로 기대된다.

#### 4. 결 론

본 논문은 HMDS를 단일 전구체로 사용하여 열산화막을 갖는 Si기판위에 CVD로 다결정 3C-SiC 박막을 성장했으며 물리적, 전기적 특징을 분석했다.

XRD, FT-IR, SEM으로 결정성장 온도 및 유량에 따른 XRD로 박막의 결정성을 분석했으며 GDS로 박막의 깊이에 따른 성분비가 일정하게 유지됨을 확인했다. 또한, AFM과 SEM으로 성장된 다결정 3C-SiC 박막의 표면 거칠기와 밀도 그리고 TEM으로 SiO<sub>2</sub>와 SiC의 계면특성을 분석했다. 더구나, 홀 효과의 측정으로 캐리어농도와 전하이동도를 측정했으며 최종적으로 다결

정 3C-SiC 마이크로 다이어프램과 SiC가 코팅된 내마모성, 내산화성, 내부식성, 내방사선용 Si 마이크로구조물을 각각 제작했다.

따라서, 본 연구에서 성장한 다결정 3C-SiC 박막은 물리적, 전기적, 특성이 우수하기 때문에 각종 M/NEMS 분야의 기관으로 사용가능할 것으로 기대된다.

#### 감사의 글

“이 본문은 2006년 정부(교육인적자원부)의 재원으로 한국학술진흥재단의 지원을 받아 수행된 연구임”(KRF-2006-D00177).

#### 참고 문헌

- [1] G. S. Chung and S. Y. Chung, “Ohmic contact characteristics of polycrystalline 3C-SiC for high-temperature MEMS application”, *J. of the Korean Sensors Society*, vol. 15, no. 6, pp. 386-390, 2006.
- [2] P. M. Sarro, “Silicon carbide as a new MEMS technology”, *Sensors & Actuators A*, vol. 3, pp. 210-218, 2000.
- [3] Y. T. Yang, K. L. Ekinci, X. M. H. Huang, L. M. Schiavone, M. L. Roukes, and M. Mehregany, “Monocrystalline silicon carbide nanoelectromechanical systems”, *Appl. Phys. Lett.*, vol. 78, no. 2, pp. 165-167, 2001.
- [4] X. M. H. Huang, C. A. Zorman, M. M. Mehregany, and M. L. Roukes, “Nanodevice motion at microwave frequencies”, *Nature*, vol. 421, pp. 496-496, 2003.
- [5] M. B. J. Wijesundara, G. Valente, W. R. Ashurst, R. T. Howe, A. P. Pisano, C. Carraro, and R. Maboudian, “Single-source chemical vapor deposition of 3C-SiC films in a LPCVD reactor I. Growth structure, and chemical characterization”, *J. Electrochem. Soc.*, vol. 151, pp. C210-C214, 2004.



정귀상 (Gwi-Sang Chung)

- 1992년 3월 Toyahash Univ. of Tech. (공학박사)
- 1993년 2월 ETRI 선임연구원
- 2004년 2월 UC Berkeley 연구교수
- 현재 울산대학교 전기전자정보시스템공학부 교수
- 주관심분야 : SiC, SiC, AlN, ZnO-M/NEMS



김강산 (Kang-San Kim)

- 2006년 2월 울산대학교 전기전자 정보시스템공학부 졸업(공학사)
- 현재 울산대학교 대학원 전기전자정보시스템공학부 석사과정
- 주관심분야 : SiC-M/NEMS

**정준호 (Jun-Ho Jeong)**

- 1997년 2월 Univ. of Massachusetts at Lowell(이학석사)
- 2004년 5월 State of New York at Albany (이학박사)
- 현재 울산대학교 전기전자정보시스템공학부 연구교수
- 주관심분야 : SiC-M/NEMS