

# Ni/AlN/4H-SiC 구조로 제작된 소자의 후열처리 효과

## The Effect of Post-deposition Annealing on the Properties of Ni/AlN/4H-SiC Structures

민 성 지\*, 구 상 모\*<sup>★</sup>

Seong-Ji Min\*, Sang-Mo Koo\*<sup>★</sup>

### Abstract

We investigated the influence of rapid thermal annealing on aluminum nitride (AlN) thin film Schottky barrier diodes (SBDs) manufactured structures deposited on a 4H-silicon carbide (SiC) wafer using radio frequency sputtering.

The Ni/AlN/4H-SiC devices annealed at 400 °C exhibited Schottky barrier diode (SBDs) properties with an on/off current ratio that was approximately 10 times higher than that of the as-deposited device structures and the devices annealed at 600 °C as measured at room temperature. Auger electron spectroscopy (AES) measurements revealed that atomic oxygen concentrations in the annealed AlN devices at 400 °C, is ascribed to the improvement in on/off ratio and the reduction of on-resistance. Additionally, we investigated the electrical characteristics of the AlN/SiC SBD structures depending on the frequency variation of sound waves.

### 요 약

본 연구에서는 RF 스퍼터를 이용하여 SiC 기판위에 AlN막을 증착하고 급속 열처리 (RTA) 공정의 온도에 따른 AlN/4H-SiC 구조의 전기적, 재료적 특성에 대한 영향을 분석하였다. 400도에서 RTA 공정을 진행한 Ni/AlN/4H-SiC SBD 소자의 온/오프 비율은 RTA 공정 전 그리고 600도에서 RTA 공정을 한 소자에 비해 약 10배정도 높은 값을 가졌다. 또한 오제이 전자현미경을 통한 원자성분 분석을 통해 증착한 AlN 층내의 존재하는 산소의 양이 후열 처리 조건에 따라 변화함을 확인하였고 소자의 온/오프 비율 그리고 온-저항 등 소자의 성능에 영향을 주는 것을 분석하였다. 추가적으로, 제작한 소자의 노출된 음향 주파수에 따른 전기적 특성변화를 분석하였다.

*Key words : Rapid thermal annealing, sound wave, Schottky barrier diode, Aluminum nitride, Silicon carbide*

### 1. 서론

질화 알루미늄 (AlN)은 높은 밴드 갭 에너지(~6.2eV), 높은 열전도도, 높은 절연파괴강도 및 낮은 열 팽창 계수로 인하여 고온압력센서, 자외선 검출

기, 레이저 및 단파장 방출기 및 검출기를 포함한 여러 응용 분야에 상당한 주목을 받는 물질이며 새로운 기능이 계속 개발되고 있다[1-2]. 또한 AlN물질은 3-5족 화합물 반도체로서 육방정계 Wurzite 결정 구조를 가지며 빠른 음향속도와 큰 압전 상수

\* Dept. of Electronic Materials Engineering, Kwangwoon University

★ Corresponding author

E-mail : smkoo@kw.ac.kr, Tel : +82-2-940-5763

※ Acknowledgment

This study was supported by the Research Grant of Kwangwoon university in 2020.

manuscript received Jun. 7, 2020; revise Jun. 22, 2020; accepted Jun. 23, 2020.

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

를 가지고 있으므로 AlN 박막을 표면 탄성과 소자(SAW, Surface Acoustic Wave)나 음파에 의한 압력효과를 적용한 의학적인 용도의 초음파센서 등 응용하려는 연구가 주목받고 있다[3-5]. 그리고 AlN은 고에너지갭 반도체 소재로서 기관 기술이 가장 발달한 탄화규소(4H-SiC)와의 낮은 격차 불일치율은 보이며 따라서 4H-SiC 기관위에 AlN 박막을 성장시키기에 적합하다. AlN 에피 층은 금속 유기 화학 기상 증착(MOCVD, metal organic chemical vapor deposition)을 사용하여 박막으로 형성되는 경우가 많이 보고되고 있으며, 통상적인 사파이어 기관위에 600nm 이상의 AlN은 성장시키기 위해선 고온에서 공정을 진행해야하는 단점이 있다[6]. MOCVD 또는 분자 빔 에피 택시(MBE, molecular beam epitaxy)를 사용하여 AlN 막을 성장시키기 위해선 고온에서 공정을 진행해야하는 반면, RF 스퍼터링 장비를 사용하게 되면 저온에서 AlN 막을 성장시킬 수 있어 마이크로 전자소자용 AlN 막을 제작하는데 유리하다. 그러나, RF 스퍼터링 장비로 막을 성장시키면 AlN 박막에 상당한 양의 산소 관련 불순물을 함유하게 되어 이동도를 감소시키고 소자의 전기적, 광학적 성능 감소에 영향을 줄 수 있다[7-9]. 급속열처리 공정(RTA)은 GaAs, SiC 및 AlN과 같은 화합물 반도체에서 결함의 밀도를 감소시킬 수 있다[10]. 또한, 어닐링 공정을 통한 AlN 막층에 산소의 Vacancy의 감소는 AlN 기반 광 검출기의 감도, 응답 속도 및 정류비를 향상시키는 연구가 진행되어왔다[11]. 본 연구에서는 스퍼터(Sputter)를 이용하여 4H-SiC 기관상에 AlN 박막을 형성하는 최적화 실험을 진행하였고 최적화 박막형성 조건을 도출하기 위하여 AlN/SiC 쇼트키 배리어 다이오드(SBD)를 제작하고 RTA공정을 각 400도, 600도에서 진행하여 열처리 온도에 따른 SBD의 전기적특성을 분석하였고, 음파에 의한 압력에 따른 제작된 소자의 전기적 특성을 분석하였다. 또한 오제이 전자현미경(AES) 통해 급속열처리 공정을 통한 막의 변화를 분석하였다.

## II. 소자 제작 및 성분분석

본 연구에서 제작된 AlN/SiC 쇼트키 장벽 다이오드의 도식도는 그림 1과 같다. 황산(H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>)과 과산화수소(H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>)의 4:1 SPM 세척액에서 4H-SiC

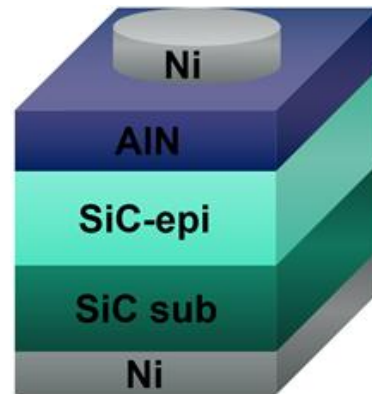


Fig. 1. Structure of AlN Schottky barrier diode.

그림 1. AlN 쇼트키 장벽 다이오드 구조

( $N_{\text{epi}} = 5 \times 10^{16} \text{cm}^{-3}$ ) 기관을 화학 세척한 후, SiO<sub>2</sub> 층은 산화물 에칭 용액(BOE)을 이용하였다. 하부전극 형성을 위해 전자빔증착장비를 이용하여 니켈을 증착한 후 오믹접촉을 형성하기 위하여 질소분위기, 1050°C에서 90초 동안 RTA공정에 의해 니켈실리사이드를 형성했다. 그 후 고순도의 아르곤 가스 분위기에서 RF 스퍼터 장비를 사용해 AlN 막을 증착했다. RF 스퍼터링 공정은 직경 5.08cm의 AlN 타겟에 150W의 스퍼터링 파워를 가했다. 고순도 아르곤 가스는 질량 흐름 제어기를 사용하여 5.5 sccm의 유량으로 챔버에 주입되었다. 압력은 120분 증착 시간 동안 10mTorr로 유지되어 약 200nm의 필름 두께를 형성하였다. 증착된 AlN 막은 RTA공정을 통해 질소 분위기에서 5분 동안 각각 400 °C, 600 °C에서 열처리 되었다. 그 후 다시 전자 빔 증착장비를 사용하여 150nm 두께의 니켈 필름을 증착시켜 상부전극을 형성하여 Ni/AlN/SiC/Ni 소자 구조를 형성하였고 제작한 소자의 전기적 특성은 반도체 파라미터 분석기(Keithely 4200-SCS)를 이용하여 분석하였으며, 소리주파수에 의한 압력은 100~10000 Hz으로 주파수를 증가시켜주면서 측정하였다. 또한 AES 분석을 통해 각 소자의 알루미늄, 질소, 산소, 실리콘, 탄소의 깊이별 프로파일을 확인하였다.

SiC 기관위에 AlN을 증착시켜 400도, 600도에서 급속열처리 후 막의 화학적 성분 분석을 위해 AES 분석을 통하여 얻은 Depth profile을 그림 2에 나타내었다. AlN 막 내의 산소원자는 Deep donor로 작용하며 이는 큰 활성화 에너지(약 2 eV)를 가지며, AlN 소자의 절연효과를 보여주는 것으로 알려져 있으므로[12-13], 이에 관한 분석은 중요하다. 그림

2의 3개의 그래프를 통하여 AlN막 내에서 두께에 따른 알루미늄의 원자농도의 경우 거의 유사한 수준으로 나타남을 볼 수 있다. 산소원자의 경우는 표면으로부터 ~170 nm 깊이 까지의 열처리 전, 400도 열처리, 600도 열처리한 AlN막 내의 농도가 각각 36%, 25%, 35% 으로 나타났으며, 400도 열처리한 막의 산소원자의 농도가 가장 낮은 것으로 나타났다. 또한 200 nm 이후의 depth profile에서는 AlN/SiC 계면에 가까워짐에 따라 SiC의 성분이 나타남을 확인 할 수 있다.

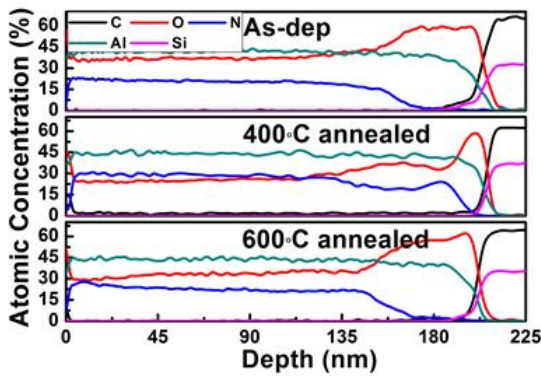


Fig. 2. AES depth profile depending on RTA conditions. 그림 2. 제작된 각 소자의 후열처리 조건에 따른 AES 분석 결과 그래프

### III. 결과 및 고찰

AlN막의 후열처리 조건에 따른 화학적 성분 분포 차이를 확인하였고 이에 따른 전기적 특성을 분석하기 위하여 Ni/AlN/SiC 쇼트기 다이오드 구조에 대한 I-V 측정 결과를 그림 3에 나타내었다.

그림 3은 열처리 조건별 AlN 쇼트기 다이오드 소자들의 전류밀도-전압 특성 그래프이며, 그래프는 -5 V ~ 5 V까지 0.05V step으로 상온에서 측정하였고 RTA 후열처리 공정이 적용되지 않은 소자는 As-dep, 400도에서 RTA 공정을 한 소자는 400 °C annealed, 그리고 600도에서 처리된 소자는 600 °C annealed로 나타내었다.

순방향(0~5V)과 역방향(-5~0V)의 전압영역에서 전류를 잘 분석할 수 있도록 나타내었으며 그림 3 (a)는 순방향 전류밀도-전압 그래프이다. 400도, 600도 그리고 열처리전 소자 순으로 전류레벨이 높은 것을 알 수 있다. 또한 소자의 문턱전압의 경우, 제작소자 모두 약 ~2.8 V였다. 그림 3 (b)는 역방향

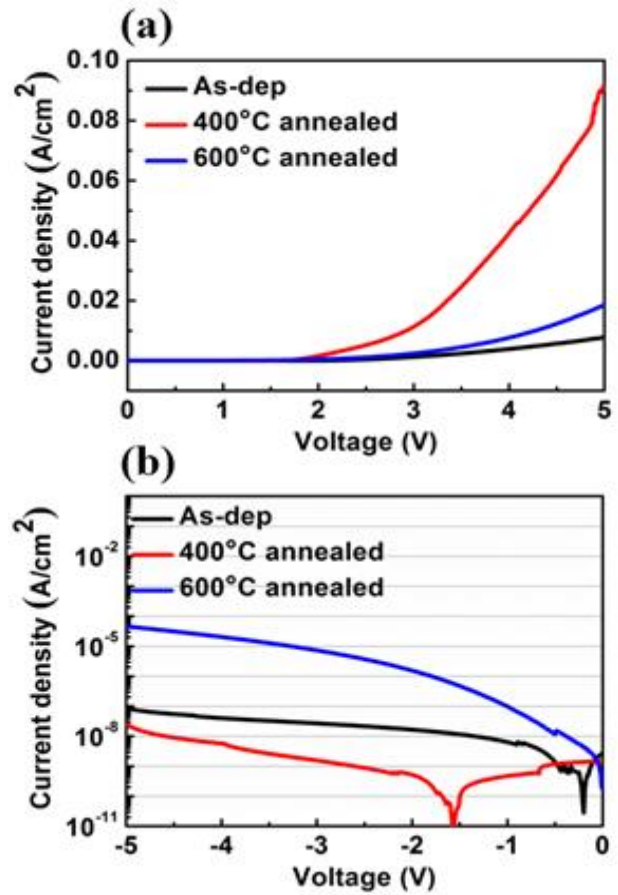


Fig. 3. measured J-V curve (a) forward bias (b) reverse bias (log scale). 그림 3. 제작한 소자들의 후열처리 조건에 따른 전기적 I-V 특성그래프 (a) 순방향 on 특성 (b) 역방향 off 특성 (log scale)

전류밀도-전압 지수 그래프이며, 누설전류의 경우 600도에서 RTA 공정을 한 샘플이  $4.0 \times 10^{-4}$  A/cm<sup>2</sup> (@V = -5 V) 으로 가장 높고, 400도에서 RTA 공

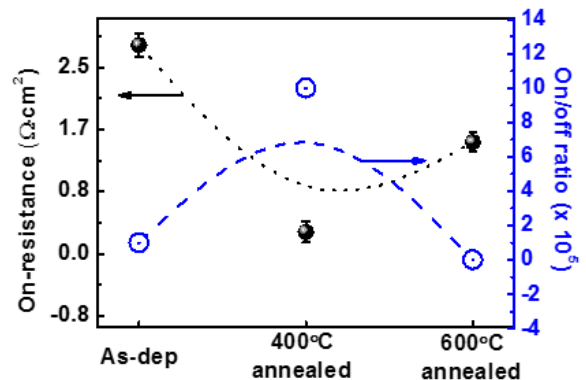


Fig. 4. on-resistance and on/off ratio depending on RTA conditions. 그림 4. 열처리 조건별 제작한 소자의 온-저항 특성과 온/오프 비율

정을 한 샘플이  $1.0 \times 10^{-8} \text{ A/cm}^2$  (@V = -5 V)으로 가장 낮은 값을 나타낸다.

제작소자의 전류밀도-전압 측정을 통하여, 온-저항 특성과 온/오프 비율을 계산하여 그림 4에 나타내었다. 온-저항의 경우 열처리 전, 400도, 600도 열처리 소자에서 각각  $2.7 \Omega \cdot \text{cm}^2$ ,  $0.3 \Omega \cdot \text{cm}^2$  그리고  $1.5 \Omega \cdot \text{cm}^2$ 으로 측정되었으며, 400도에서 RTA 공정을 한 소자가 가장 낮은 값을 가졌다. 또한 온/오프 비율의 경우, 400도에서 열처리를 한 소자가  $\sim 10^6$ 으로 가장 높은 값을 가졌다. 그림 3과 그림 4의 열처리 조건별 전기적 특성 비교 그래프 결과들을 보았을 때, 400도에서 열처리를 한 소자가 가장 우수한 전기적 성능을 보여주었다. 이는 400도에서 열처리한 소자의 AlN막 내에 존재하는 산소의 함량이 제작한 다른 소자들과 비교하여 가장 낮은 것

과 연관이 있는 것으로 이는 앞서 AlN 막 내의 활성화에너지가 높은 산소원자의 농도가 높아질수록 절연효과가 커지기 때문인 것으로 판단된다.

그림 5 (a)는 가장 좋은 성능을 보여준 400도 열처리 소자를 반도체 파라미터 분석기를 이용하여 다양한 영역의 음향 주파수(100 Hz~1k Hz)에 노출된 Ni/AlN/SiC소자 구조의 I-V 특성을 측정된 그래프이다. 순방향에서는 음향 주파수별 전류는 100 Hz, 500Hz 일 때에 각각  $1.2 \times 10^{-8}$ ,  $1.0 \times 10^{-8} \text{ A/cm}^2$ 으로 작은 값을 가졌다. 또한 1000 Hz 이상의 음향 주파수에서의 전류는 소리를 가해주지 않은 상태의 전류와 비슷했다. 그림 5 (b)는 음향 주파수별 전류변화 그래프이며, I=음향 주파수를 인가한 전류,  $I_0$ =무음일 때의 전류이다. inset 그림은 측정시스템을 도식화 하였다. 500 Hz의 음향 주파수 일 때, 소자에는 낮은 전류가 흘렀는데, 이는 AlN 물질의 500 Hz에서 음과 압전효과로 인해 음파에 의한 압력에 의해 제작된 AlN/SiC 소자의 격자진동에 영향을 주어 전하의 흐름을 방해할 수 있기 때문인 것으로 판단된다. 이에 대한 음향 센서로 적용하거나 심화된 포논의 영향을 분석하기 위한 추가적인 연구가 필요할 것으로 기대된다.

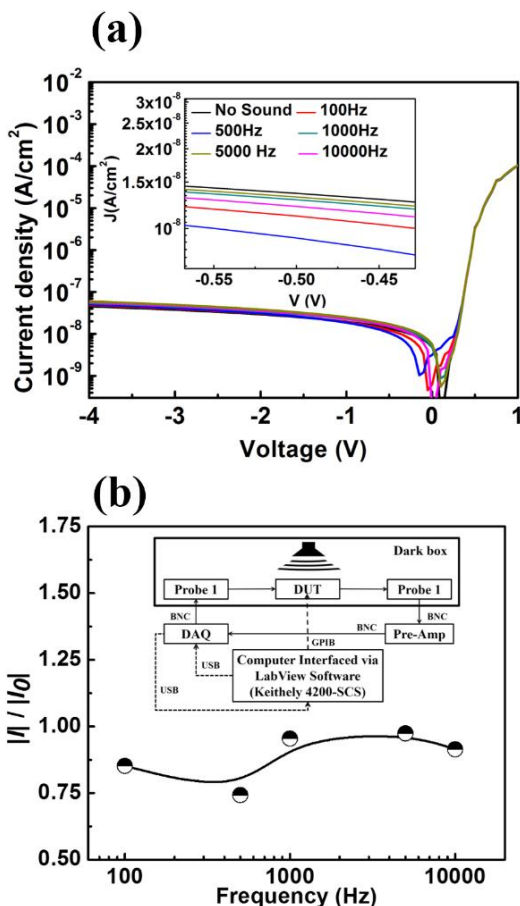


Fig. 5. dependent of frequency variation of sound waves (a) J-V curve (b) piezoelectric current (inset : piezoelectric current test system).

그림 5. Ni/AlN/SiC구조의 (a) 음향 주파수별 I-V curve, (b) 주파수 증가에 따른 압전전류 변화 (inset : 음향 주파수에 의한 압전전류 테스트 측정 시스템 모식도)

#### IV. 결론

본 연구에서는 AlN RF 스퍼터링 장비를 이용하여 증착하여 Ni/AlN/SiC 다이오드소자를 제작하였으며, 후열처리 온도에 따른 AlN막의 AES 분석을 통해 박막 내의 원자별 농도를 파악하여 열처리에 의한 성분 변화를 확인하였다. 그리고 해당하는 소자들의 전기적 특성 분석을 통하여 수행하였고, 이를 통해 400도에서 열처리공정을 진행한 소자의 높은 포화전류와 낮은 전류를 가지는 것을 확인하였다. 이러한 전기적인 특성 변화는 AlN 막 내의 산소원자농도에 의한 영향으로 파악되었으며 최적화 조건으로 분석된 소자를 이용하여 노출된 음향 주파수에 따른 전기적 특성변화를 분석하였으며, 500 Hz일때에 가장 낮은 전류값을 가짐을 확인하였다.

#### References

[1] F. Jiang, C. Zheng, W. Changda, Fang. Li, P.

Wenqing, D. Yong, J. Dai, "The growth and properties of ZnO film on Si (111) substrate with an AlN buffer by AP-MOCVD," *J. Lumin.*, vol.123, pp.905-907, 2007.

DOI: 10.1016/j.jlumin.2006.01.322

[2] C. M. Lin, Y. Y. Chen, V. V. Felmetger, W. C. Lien, T. Riekkinen, D. G. Senesky, A. P. Pisano, "Surface acoustic wave devices on AlN/3C-SiC/Si multilayer structures," *J. Micromechanics Micro-engineering*, vol.23, pp.25019, 2013.

DOI: 10.1088/0960-1317/23/2/025019

[3] Y. Wang, X. Tao, R. Tao, J. Zhou, Q. Zhang, D. Chen, H. Jin, S. Dong, J. Xie, Y. Q. Fu, "Acoustofluidics along inclined surfaces based on AlN/Si Rayleigh surface acoustic waves," *Sensors and Actuators A: Physical*, vol.306, pp.111967, 2020. DOI: 10.1016/j.sna.2020.111967

[4] E. Ledesma et al., "AlN Piezoelectric Micro-machined Ultrasonic Transducer Array Monolithically Fabricated on Top of Pre-Processed CMOS Substrates," *2019 20th International Conference on Solid-State Sensors, Actuators and Microsystems & Eurosensors XXXIII*, pp.655-658, 2019.

DOI: 10.1109/TRANSDUCERS.2019.8808706

[5] L. Vergara, M. Clement, E. Iborra, A. Sanz-Hervás, J. García López, Y. Morilla, J. Sangrador, M. A. Respaldiza, "Influence of oxygen and argon on the crystal quality and piezoelectric response of AlN sputtered thin films," *Diam. Relat. Mater.*, vol.13, pp.839-842, 2004.

DOI: 10.1016/j.diamond.2003.10.063

[6] J. H. Edgar, Z. Gu, L. Gu, D. J. Smith, "Interface properties of an AlN/(AlN)  $x$ (SiC)  $1-x$ /4H-SiC heterostructure," *Phys. Status Solid Appl. Mater. Sci.*, vol.203, pp.3720-3725, 2006.

DOI: 10.1002/pssa.200622279

[7] X. H. Xu, H. S. Wu, C. J. Zhang, Z. H. Jin, "Morphological properties of AlN piezoelectric thin films deposited by DC reactive magnetron sputtering," *Thin Solid Films*, vol. 388, pp.62-67, 2001. DOI: 10.1016/S0040-6090(00)01914-3

[8] T. Ghz, W. Xing, Z. Liu, H. Qiu, K. Ranjan, Y. Gao, "InAlN/GaN HEMTs on Si With High

fT of 250 GHz," *IEEE Electron Device Lett.*, vol.39, pp.75-78, 2018.

DOI: 10.1109/LED.2017.2773054

[9] T. Mattila, R. Nieminen, "Ab initio study of oxygen point defects in GaAs, GaN, and AlN," *Phys. Rev. B - Condens. Matter Mater. Phys.*, vol.54, pp.16676-16682, 1996.

DOI: 10.1103/PhysRevB.54.16676

[10] R. Singh, S. H. Christiansen, O. Moutanabbir, U. Gösele, "The phenomenology of ion implantation-induced blistering and thin-layer splitting in compound semiconductors," *J. Electron. Mater.*, vol.39, pp.2177-2189, 2010.

DOI: 10.1007/s11664-010-1334-x

[11] Y. J. Lv, X. B. Song, Y. G. Wang, Y. L. Fang, Z. H. Feng, "Influence of Surface Passivation on AlN Barrier Stress and Scattering Mechanism in Ultra-thin AlN/GaN Heterostructure Field-Effect Transistors," *Nanoscale Res. Lett.*, vol.11, no.373, 2016. DOI: 10.1186/s11671-016-1591-6

[12] S. Swaminathan, B. Srinivasa Rao, V. Jayaram, "The influence of oxygen impurities on the formation of AlN-Al composites by infiltration of molten Al-Mg," *Mater. Sci. Eng. A*, vol.337, pp.134-139, 2002.

DOI: 10.1016/S0921-5093(02)00002-3

[13] J. Jarrige, J. P. Lecompte, J. Mullot, G. Müller, "Effect of oxygen on the thermal conductivity of aluminium nitride ceramics," *J. Eur. Ceram. Soc.*, vol.17, pp.1891-1895, 1997.

DOI: 10.1016/S0955-2219(97)00078-2

## BIOGRAPHY

### Seong-Ji Min (Member)



2018 : BS degree in Dept. of Electronic Materials Engineering, Kwangwoon University.  
2020 : MS degree in Dept. of Electronic Materials Engineering, Kwangwoon University.

**Sang-Mo Koo** (Member)

1993 : BS degree in Electrical Engineering, Korea University.  
1997 : MS degree in Engineering Material Physics, KTH University.  
2003 : PhD degree in Electronics, KTH University.

2003~2006 : National Institute of Standards and Technology (NIST)

2006~2011 : Assistant Professor Kwangwoon University.

2014.9~current : Full Professor, Kwangwoon University.