

깊은 준위 결함에 의한 SiC SBD 전기적 특성에 대한 영향 분석

The effect of deep level defects in SiC on the electrical characteristics of Schottky barrier diode structures

이 건 희*, 변 동 욱*, 신 명 철*, 구 상 모**

Geon-Hee Lee*, Dong-Wook Byun*, Myeong-Cheol Shin*, Sang-Mo Koo**

Abstract

SiC is a power semiconductor with a wide bandgap, high insulation failure strength, and thermal conductivity, but many deep-level defects. Defects that appear in SiC can be divided into two categories, defects that appear in physical properties and interface traps that appear at interfaces. In this paper, $Z_{1/2}$ trap concentration $0 \sim 9 \times 10^{14} \text{ cm}^{-3}$ reported at room temperature (300 K) is applied to SiC substrates and epi layer to investigate turn-on characteristics. As the trap concentration increased, the current density, Shockley-read-Hall (SRH), and Auger recombination decreased, and R_{on} increased by about 550% from 0.004 to 0.022 mohm.

요 약

SiC는 차세대 전력반도체의 핵심 재료로 넓은 밴드갭과 높은 절연파괴강도, 열전도율을 가지고 있지만 deep level defect와 같은 다양한 문제를 야기하는 결함이 존재한다. SiC에서 나타나는 defect는 물성에서 나타나는 defect와 계면에서 나타나는 interface trap 2가지로 나뉜다. 본 논문은 상온 (300 K)에서 보고되는 $Z_{1/2}$ trap concentration $0 \sim 9 \times 10^{14} \text{ cm}^{-3}$ 을 SiC substrate와 epi layer에 적용하여 turn-on 특성을 알아보고자 한다. 전류밀도와 SRH(Shockley-Read-Hall), Auger recombination을 통해 구조 내 재 결합률을 확인하였다. trap concentration이 증가할수록 turn-on시 전류밀도와 재 결합률은 감소하며 R_{on} 은 0.004에서 0.022 m Ω 으로 약 550% 증가하였다.

Key words : SiC, Defect, $Z_{1/2}$, Sentaurus TCAD, Trap concentration, Recombination

* Ph.D. Student, Dept. of Electronic materials Engineering, Kwangwoon University

★ Corresponding author

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

※ Acknowledgment

Manuscript received Dec. 3, 2021; revised Dec. 20, 2021; accepted Mar. 17, 2022.

Fostering Global Talents for Innovative Growth Program through the Korea Institute for Advancement of Technology (KIAT), under grant (P0017308), Technology Innovation Program (20003540). 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.

1. 서론

Silicon carbide(SiC)는 차세대 전력반도체에 사용하는 재료로서, Silicon(Si)대비 넓은 bandgap과 높은 절연파괴강도, 열전도율을 가지고 있다[1]-[4]. 하지만 SiC epi-layer 성장 시 온도에 따라 넓은 energy band 내 다양한 결함(deep level defect/trap)이 나타난다[5], [6]. Energy band 내에 존재하는 의도치 않은 defect는 carrier trapping의 증가로 carrier lifetime의 감소를 야기하며 누설전류를 증가시키는 등 다양한 문제점이 발생된다. 일반적으로 $Z_{1/2}$ 와 같은 deep level defect는 소자의 구조 및 위치에 따라 2가지로 정의된다. Interface trap은 MOS(Metal Oxide Semiconductor)와 같이 반

도체와 산화물의 계면(interface)에 channel이 형성될 때, electron 또는 hole carrier가 빈 공간(trap)에 포획, carrier charge가 증가하며 소자의 turn-on에 영향을 미치는 것을 말한다. 또한, 앞서 명시한 바와 같이 epi-layer 성장에 따라 발생하는 defect가 있다. 이것은 carrier lifetime killer라고 불리며 SiC substrate, epi-layer가 가지고 있는 carrier mobility에 중대한 영향을 미친다. 본 논문은 SiC의 substrate 및 epi-layer의 trap concentration에 의한 SBD(Schottky Barrier Diode)의 전기적 특성 변화를 보고자 Synopsys사의 Sentaurus TCAD를 사용하여 SiC기반 SBD를 설계하고 substrate 및 epi-layer에 defect인 $Z_{1/2}$ trap을 적용하였다.

II. 본론

1. 실험방법

그림 1과 표 1은 Sentaurus TCAD를 이용한 SiC기반 SBD 구조와 설계 parameter를 보여준다. N-type 불순물인 phosphorus를 사용하여 doping concentration을 조절하였으며 SBD의 top 전극인 Anode는 schottky 특성을 나타내기 위해 니켈(Ni)의 일함수(work function) 5.1 eV를 적용하였다. Epi-layer thickness 5 μm , doping concentration $1 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$ 이며 substrate thickness 10 μm , doping concentration $1 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ 이다.

Table 1. SBD Structure Parameter.

표 1. SBD 구조 파라미터

Parameters	Value	Unit
Pitch	5	μm
Epi Thickness	5	μm
Epi Doping Concentration	1×10^{15}	cm^{-3}
Anode Pitch	3.2	μm
Anode Metal Workfunction	5.1	eV

상온(300 K)에서 발견되는 SiC의 defect인 $Z_{1/2}$ trap concentration에 따른 전기적 특성을 시뮬레이션 구현 및 관찰을 위해 SiC defect physics와 SRH(Shockley-Read-Hall) doping dependence 및 Auger recombination 수식을 이용한다.

가. Defect Physics

DLTS(Deep Level Transient Spectroscopy)와 같

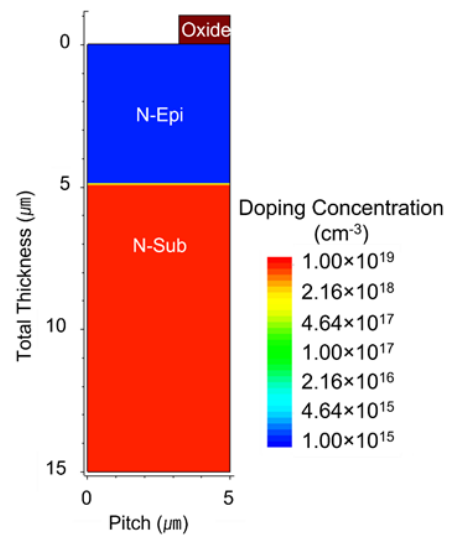


Fig. 1. SBD Structure used for simulation.

그림 1. 시뮬레이션에 사용한 SBD 구조

은 측정 분석 장비를 통해 SiC defect의 종류와 특성이 보고되었으며 이를 통해 SiC material physics에 표 2와 같이 $Z_{1/2}$ trap 특성을 적용하였다[10], [11].

Table 2. $Z_{1/2}$ Trap parameter.

표 2. $Z_{1/2}$ Trap 파라미터

Parameters	Value	Unit
E_t	0.67	eV
N_t	$0 \sim 9 \times 10^{14}$	cm^{-3}
σ_n	2×10^{-14}	cm^2
σ_p	3.5×10^{-14}	cm^2

$Z_{1/2}$ 는 conduction band(acceptor level)로부터 약 0.67 eV 깊이에서 관찰되며 electron 및 hole cross section의 크기는 일정하다. 하지만 trap concentration은 물질마다 차이가 관찰되며 전기적 특성에서 차이가 발생할 수 있다.

SiC의 substrate 및 epi-layer에서 $Z_{1/2}$ trap concentration은 $2 \times 10^{14} \sim 3 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$ 으로 보고되고 있다. 이 trap concentration은 영역의 최대 doping concentration을 초과할 수 없으며 epi-layer의 doping concentration $1 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$ 을 초과하지 않는 $9 \times 10^{14} \text{ cm}^{-3}$ 를 최댓값으로 설정하여 trap concentration에 따른 전기적 특성을 확인하고자 한다[12].

나. SRH Recombination Model

SRH recombination은 electron과 hole이 direct recombination하지 않고 conduction band의 electron

이 trap에 들어간 뒤 trap에서 valance band의 hole과 recombination 한다.

$Z_{1/2}$ trap concentration의 증가에 따른 SiC 내부 trap concentration을 계산하기 위해 SRH(Shockley-Read-Hall) recombination 모델을 사용하였으며 Sentaurus device에서 수식 1을 제공한다[13].

$$R_{net}^{SRH} = \frac{np - n_{i,eff}^2}{\tau_p(n + n_1) + \tau_n(p + p_1)} \quad (\text{수식 1})$$

τ_p 는 hole의 minority carrier lifetime, τ_n 은 electron의 minority carrier lifetime을 뜻하며 trap의 에너지 위치에 의해 결정되는 상수이다. $N_{i,eff}$ 는 effective intrinsic carrier density를 뜻하며 이것은 trap concentration과 trap이 electron과 hole carrier를 얼마나 포획하는지에 대해 결정된다. n_1 과 p_1 은 trap이 갖는 에너지 위치를 나타내며 E_{trap} 을 온도와 나누어 $N_{i,eff}$ 를 곱한 값으로 나타낼 수 있다. E_{trap} 은 conduction band 또는 acceptor level에서의 defects level 차이로 표 2와 같이 0.67 eV를 적용하였다[14].

다. Auger Recombination Model

Auger recombination은 carrier가 conduction band에서 valance band로의 direct recombination 현상과 유사하다. Conduction band에서 electron이 hole과 recombination할 때 발생하는 에너지로 인해 conduction band에 존재하는 electron이 conduction band 내부로 깊게 밀려난다[15]. 수식 2와 같이 Auger recombination을 나타낼 수 있으며 SRH recombination과 동일하게 온도, carrier lifetime, effective intrinsic carrier density에 의해 값이 결정되는 것을 확인할 수 있다.

$$R_{net}^A = (C_n n + C_p p)(np - n_{i,eff}^2) \quad (\text{수식 2})$$

온도와 doping concentration에 의해 변동되는 Auger 계수 electron(C_n), hole(C_p) carrier를 적용할 수 있다.

III. 결과

그림 2-(a), (b)는 $Z_{1/2}$ trap concentration 0(non-trap)과 $9 \times 10^{14} \text{ cm}^{-3}$ 을 적용한 SiC SBD 구조의 current density를 보여준다. 범주는 $100 \sim 1500 \text{ A} \times \text{cm}^{-2}$ 로

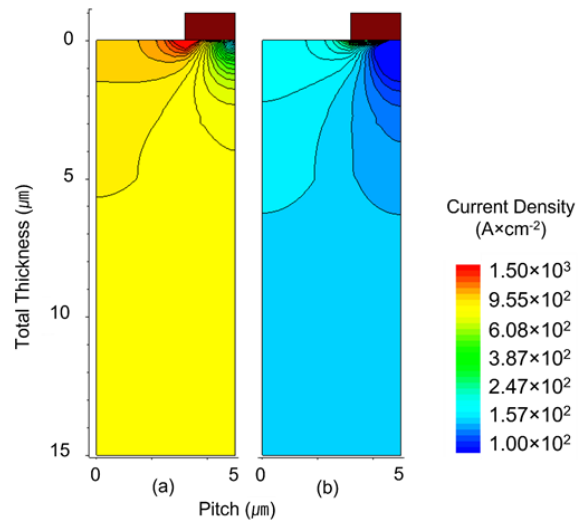


Fig. 2. Current density to cross-section for (a) non-trap SBD, (b) $Z_{1/2}$ trap concentration $9 \times 10^{14} \text{ cm}^{-3}$ SBD structure.

그림 2. (a) non-trap SBD와 (b) $Z_{1/2}$ trap concentration $9 \times 10^{14} \text{ cm}^{-3}$ SBD 구조의 전류밀도

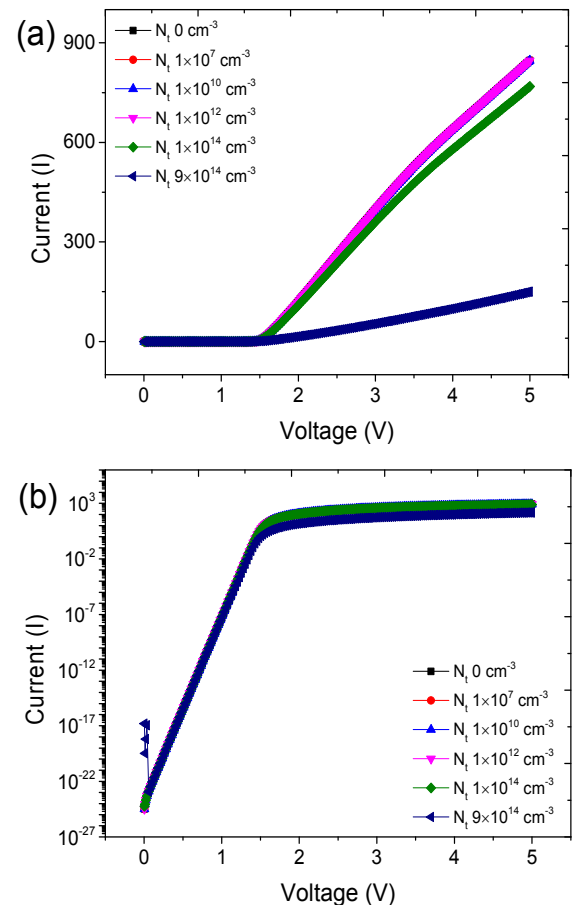


Fig. 3. I-V characteristics on (a) linear and (b) semi-log plot for trap concentration.

그림 3. Trap concentration에 따른 I-V (a) 리니어, (b) 로그 특성

설정하여 나타내었다.

그림 2-(b)에서 볼 수 있듯이 $Z_{1/2}$ trap을 보유한 SBD 구조에서 current density가 non-trap SBD보다 작은 값을 나타낸다. 전류밀도가 감소하기 시작하는 trap concentration을 특정하기 위해 그림 3과 같이 non-trap에서 trap concentration $9 \times 10^{14} \text{ cm}^{-3}$ 으로 점차 증가시키며 순방향 전류특성을 확인하였다.

본 시뮬레이션에서 설계된 SBD의 turn-on은 1.5 V로 동일하지만 $Z_{1/2}$ trap concentration의 증가에 따라 current가 감소하고 이로 인해 R_{on} 은 증가하게 된다. trap이 없는 non-trap SBD의 R_{on} 은 0.004 m Ω , $Z_{1/2}$ trap concentration 최댓값인 $9 \times 10^{14} \text{ cm}^{-3}$ 이 적용된 SBD는 0.022 m Ω 로 약 550 % 증가하는 것을 확인하였다. Trap concentration이 $1 \times 10^{12} \text{ cm}^{-3}$ 까지 R_{on} 은 0.004 m Ω 으로 non-trap 구조와 유사한 순방향 전류특성을 보였으며, trap concentration $1 \times 10^{14} \text{ cm}^{-3}$ 이상부터 전류량은 확연히 감소하며 R_{on} 은 0.006 m Ω 에서 0.022 m Ω 으로 증가하는 것을 확인하였다. 이 때, trap concentration 증가에 따른 R_{on} 증가량을 그림 4에 나타내었다. Turn-on시, doping concentration 차이에 의해 epi-substrate 경계에서 trap concentration에 의한 carrier간 recombination 감소할 것으로 예상되며 이에 따른 SRH recombination과 Auger recombination을 확인하였다.

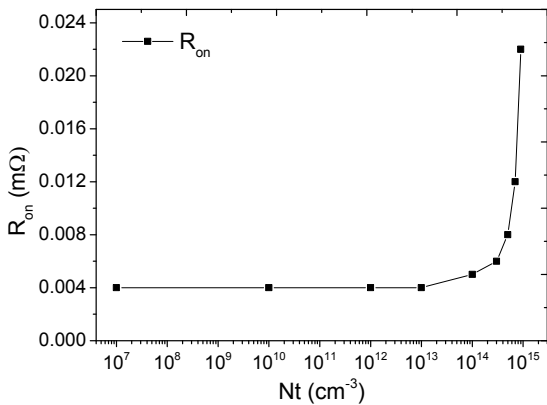


Fig. 4. R_{on} characteristics on semi-log plot for trap concentration.

그림 4. Trap concentration에 따른 R_{on} 로그 특성

그림 5와 6은 trap concentration에 따른 SRH recombination과 Auger recombination을 보여주며 그림 5, 6의 (a) ~ (f)는 각각 $Z_{1/2}$ trap concentration 0, 1×10^7 , 1×10^{10} , 1×10^{12} , 1×10^{14} , $9 \times 10^{14} \text{ cm}^{-3}$ 을 갖는 SBD 구조이다. 각각의 recombination은 순방향

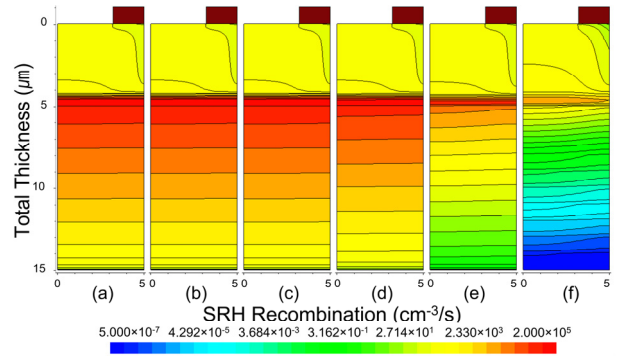


Fig. 5. The trap concentration cross-section of SRH recombination rate.

그림 5. Trap concentration에 의한 쇼클리-리드-홀 재결합 비율 단면

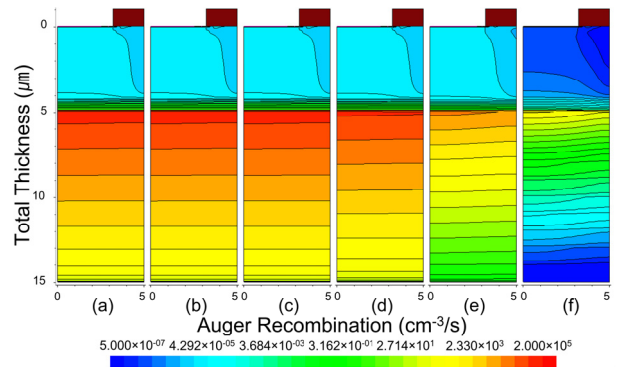


Fig. 6. The trap concentration cross-section of Auger recombination rate.

그림 6. Trap concentration에 의한 오제 재결합 비율 단면

전압 5 V에서 측정된 값이며 범주는 $5 \times 10^{-7} \sim 3 \times 10^5 \text{ cm}^{-3}/\text{s}$ 를 Log값으로 치환하여 나타내었다. Doping concentration에 큰 차이가 나타나는 epi-layer와 substrate의 경계면인 total thickness 5 μm 지점에서 가장 활발하게 recombination이 발생하는 것을 관측하였다.

그림 5와 6의 (d)구조는 $Z_{1/2}$ trap concentration $1 \times 10^{12} \text{ cm}^{-3}$ 을 적용한 SBD이며, SRH recombination과 Auger recombination이 점차 감소하는 것을 확인할 수 있고, $Z_{1/2}$ trap concentration이 $1 \times 10^{12} \text{ cm}^{-3}$ 부터 점차 증가할수록 recombination rates가 크게 감소하는 것을 확인할 수 있다. Trap concentration의 증가는 trap의 물리적인 개수의 증가를 뜻하며 SBD의 turn-on시 Anode에서 Cathode로 이동하는 전자가 특정 energy band level 또는 trap에 갇히는 것으로 풀이가 가능하다. 이것에 의해 그림 2와 같이 순방향전압 인가 시, trap에 의해 전류밀도가 크게 감소하고 저항의 증가로 이어지는 것을 확인할 수 있다.

IV. 결론

SiC의 다양한 결함들은 energy band gap 내의 깊은 준위를 가지고 분포할 수 있다. Trap은 다양한 원인에 의해 발생하지만 열에 의해 다양한 energy band에서 나타나며 상온 300 K 전후로 발생하는 $Z_{1/2}$ 를 SiC 물질에 직접 정의하여 $Z_{1/2}$ trap concentration에 따른 SBD의 특성변화를 관찰하였다. $Z_{1/2}$ trap concentration $0 \sim 9 \times 10^{14} \text{ cm}^{-3}$ 로 점차 증가했을 때, trap concentration $1 \times 10^{12} \text{ cm}^{-3}$ 까지 trap이 존재하지 않는 SBD와 전기적 특성이 유사하였으며 $1 \times 10^{13} \text{ cm}^{-3}$ 이후 전류밀도가 급격하게 감소하는 것을 확인하였다. 전류밀도 감소의 원인을 파악하기 위해 turn-on시 SRH과 Auger recombination을 관찰하였다. Doping concentration의 급격한 차이가 발생하는 epi-substrate 접합면에서 recombination의 차이가 발생하였으며 current density가 감소하기 시작하는 trap concentration $1 \times 10^{12} \text{ cm}^{-3}$ 이후 recombination 발생이 매우 낮아지는 것을 확인하였다. Turn-on시 Anode에서 Cathode로 이동하는 electron carrier가 특정 energy band level 또는 trap에 물리적으로 갇혀 전류 이동에 방해되는 것을 알 수 있다. SiC 기반 소자의 전기적 특성을 개선하기 위해 substrate의 제작, epi-layer 성장 시 발생하는 물리적인 defect와 energy band level내 발생하는 trap의 개선이 필수적으로 이뤄져야 한다.

References

- [1] Bhatnagar. M, Baliga. B. J, "Comparison of 6H-SiC, 3C-SiC, and Si for power devices," *IEEE Transactions on electron devices*, vol.40, no.3, pp.645-655. 1993. DOI: 10.1109/16.199372
- [2] Matsunami. H, "Current SiC technology for power electronic devices beyond Si," *Microelectronic engineering*, vol.83, no.1, pp.2-4, 2006. DOI: 10.1016/j.mee.2005.10.012
- [3] Evans. T, et al, "Development of SiC power devices and modules for automotive motor drive use," *2013 IEEE International Meeting for Future of Electron Devices*, pp.116-117, 2013. DOI: 10.1109/IMFEDK.2013.6602266
- [4] She. Xu, et al, "Review of Silicon Carbide Power Devices and Their Applications," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol.64, no.10, pp.8193-8205, 2017. DOI: 10.1109/TIE.2017.2652401
- [5] Magnusson. B, "Optical characterization of deep level defects in SiC". *Materials Science Forum*, vol.483, pp.341-346, 2005. DOI: 10.4028/www.scientific.net/MSF.483-485.341
- [6] Castaldini. A, "Deep levels by proton and electron irradiation in 4H-SiC," *Journal of Applied Physics*, vol.98, no.5, 053706, 2005. DOI: 10.1063/1.2014941
- [7] Hemmingsson. C, "Deep level defects in electron-irradiated 4H SiC epitaxial layers," *Journal of Applied Physics*, vol.81, no.9, pp. 6155-6159, 1997. DOI: 10.1063/1.364397
- [8] Pintilie. L, "Formation of the $Z_{1,2}$ deep-level defects in 4H-SiC epitaxial layers: Evidence for nitrogen participation," *Applied physics letters*, vol.81, no.25, pp.4841-4843, 2002. DOI: 10.1063/1.1529314
- [9] Kawahara. K, "Investigation on origin of $Z_{1/2}$ center in SiC by deep level transient spectroscopy and electron paramagnetic resonance," *Applied Physics Letters*, vol.102, no.11, pp.102106, 2013. DOI: 10.1063/1.4796141
- [10] Dalibor. T, "Deep Defect Centers in Silicon Carbide Monitored with Deep Level Transient Spectroscopy", *Physica status solidi (a)*, vol. 162, no.1, pp.199-225, 1997. DOI: 10.1002/1521-396X(199707)162:1<199::AID-PSSA199>3.0.CO;2-0
- [11] Danno. K, "Deep level transient spectroscopy on as-grown and electron-irradiated p-type 4H-SiC epilayers", *Journal of applied physics*, vol.101, no.10, pp.103704, 2007. DOI: 10.1063/1.2730569
- [12] Pezzimenti. F, "Study and Assessment of Defect and Trap Effects on the Current Capabilities of a 4H-SiC-based Power MOSFET," *Electronics*, vol.10, no.6, pp.735, 2021. DOI: 10.3390/electronics10060735
- [13] Sentaurus Device User, Version. L, *Synopsys TCAD Sentaurus*, San Jose, 2016.

[14] Lophitis. N, *TCAD device modelling and simulation of wide bandgap power semiconductors*, IntechOpen, 2018.

[15] Klein. P. B, et al, "Recombination processes controlling the carrier lifetime in n-4H-SiC epilayers with low $Z_{1/2}$ concentrations," *Journal of Applied Physics*, vol. 108, no.3, pp.033713, 2010. DOI: 10.1063/1.3466745

BIOGRAPHY

Geon-Hee Lee (Member)



2019 : BS degree in Dept. of Photovoltaic Engineering, Far East University.
2021 : MS degree in Dept of Energy IT, Far East University.
2021~current : PhD course in Dept. of Electronic Materials Engineering, Kwangwoon University

2021 : Visiting Researcher, RISE, Kista, Stockholm, Sweden

Dong-Wook Byun (Member)



2021 : BS degree in Dept. of Electronic Materials Engineering, Kwangwoon University
2021~current : MS degree in Dept. of Electronic Materials Engineering, Kwangwoon University

Myeong-Cheol Shin (Member)



2014 : BS degree in Dept. of Photovoltaic Engineering, Far East University.
2019 : MS degree in Dept of Energy Semiconductor Engineering, Far East University.
2019~current : PhD candidate 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 - The Royal Institute of Technology.
2003 : PhD degree in Electronics, KTH-The Royal Institute of Technology.

1999 : Visiting Researcher, MIT, Cambridge, MA, USA
2003~2006 : Researcher, Semiconductor Electronics Division, National Institute of Standards and Technology (NIST), MD, USA
2006~2011 : Assistant Professor Kwangwoon University
2014~current : Full Professor, Kwangwoon University
2017~current : Director, Wide Bandgap Semiconductor Reserach Center