

논문 2017-54-1-3

# 단결정 $\beta$ -Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 반도체를 이용한 쇼트키 배리어 다이오드 제작

( Schottky Barrier Diode Fabricated on Single Crystal  
 $\beta$ -Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> Semiconductor )

김 현 섭\*, 조 민 기\*, 차 호 영\*\*

( Hyun-Seop Kim, Min-Gi Jo, and Ho-Young Cha<sup>©</sup> )

## 요 약

본 연구에서는 최근 차세대 전력 반도체로 관심을 받고 있는 단결정  $\beta$ -Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub>를 이용한 쇼트키 배리어 다이오드 제작 및 특성 분석을 수행하였다. 쇼트키 배리어 다이오드는 Sn으로 도핑된 2  $\mu$ m 두께의 저농도 N 타입 에피층 상에 Pt/Ti/Au 쇼트키 접합으로 제작되었으며 측정된 특성은 > 180 V의 항복전압, 1.26 m $\Omega$ ·cm<sup>2</sup>의 온 저항, 그리고 1 V의 순 방향 전압에서 77 A/cm<sup>2</sup>, 1.5 V에서 473 A/cm<sup>2</sup>의 순방향 전류 특성을 나타내었다. 본 연구를 통하여 단결정  $\beta$ -Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub>의 전력반도체 활용 가능성을 확인 할 수 있었다.

## Abstract

In this study, we have fabricated Schottky barrier diodes (SBD) on single-crystal  $\beta$ -Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> semiconductor that has received much attention for use in next-generation power devices. The SBD had a Pt/Ti/Au Schottky contact on a 2  $\mu$ m Sn-doped low concentration N-type epitaxial layer. The fabricated device exhibited a breakdown voltage of > 180 V, a specific on-resistance of 1.26 m $\Omega$ ·cm<sup>2</sup>, and forward current densities of 77 A/cm<sup>2</sup> at 1 V and 473 A/cm<sup>2</sup> at 1.5 V, which proved the potential for use in power device fabrication.

**Keywords** : Gallium oxide(Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub>), Schottky barrier diode (SBD), single-crystal, power semiconductor

## I. 서 론

산화갈륨 ( $\beta$ -Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub>)은 큰 에너지 밴드갭 특성을 갖는 재료 물성으로 인하여 고내압, 저손실 파워 소자용 차세대 반도체 재료로 매우 각광받고 있다.  $\beta$ -Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub>은 약 4.8 eV의 큰 에너지 밴드갭을 가지고 있으며 그림 1과

\* 학생회원, \*\* 정회원, 홍익대학교 전자전기공학부  
(School of Electronic and Electrical Engineering, Hongik University)

© Corresponding Author(E-mail : hcha@hongik.ac.kr)

※ 본 연구는 2015년도 정부(한국연구재단) 및 2014년도 정부(산업통상자원부), 2012년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임 (No. 2015R1A6A1A03031833, 2012M3A7B4 035274, 10048931).

Received ; September 09, 2016 Revised ; September 30, 2016

Accepted ; December 08, 2016

같이 밴드갭에 따른 항복 전계 특성을 고려해 보았을 때 8 MV/cm의 매우 높은 항복 전계 특성을 나타낼 것으로 기대된다<sup>[1-2]</sup>. 표 1에서 비교된 바와 같이,  $\beta$ -Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub>의 물질 특성은 최근 전 세계적으로 고전압, 고전력 반도체 물질로 활발히 연구되고 있는 질화갈륨(GaN)과 탄화규소(SiC) 보다 2배 이상 뛰어나다. 비록 전자 이동도는 약 300 cm<sup>2</sup>/(V·s)<sup>[3]</sup>로 다른 반도체보다 상대적으로 낮은 값이지만 전력 소자에 적합한 물질을 평가하는 Baliga의 성능지수 (Baliga's Figure of Merit, BFOM)<sup>[4]</sup>로 볼 때 GaN 및 SiC 보다 약 4~5배 이상 뛰어난 특성을 가지고 있어 차세대 전력 반도체로 적합한 물질이라 할 수 있다. 또한, 간편한 용액 성장법에 의해 단결정 기판을 만들 수 있다는 특성으로 제조에 필요한 에너지나 비용의 절감을 이끌 수 있어 산업적인 측면에서 유리한 특징을 가지고 있다<sup>[2]</sup>. 최근에는 일본

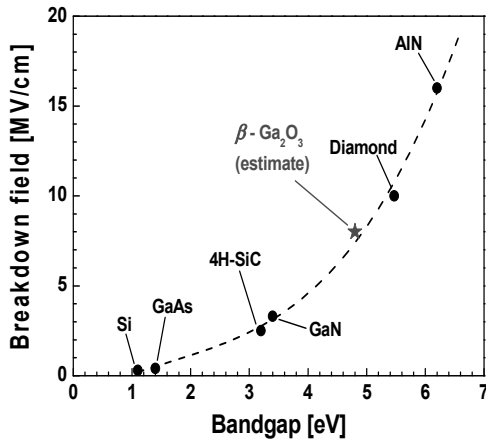


그림 1. 항복 전압과 에너지 밴드갭의 상관관계<sup>[2]</sup>  
 Fig. 1. Correlation of the breakdown field and energy bandgap<sup>[2]</sup>.

표 1. 주요 반도체와  $\beta$ -Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub>의 물질 특성 비교  
 Table1. Material properties of major semiconductors and  $\beta$ -Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub>.

	Si	4H-SiC	GaN	$\beta$ -Ga <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
Energy bandgap [eV]	1.1	3.3	3.4	4.8
Electron mobility [cm <sup>2</sup> /(V·s)]	1,500	1,000	1,200	300
Breakdown field [MV/cm]	0.3	3.0	3.3	8
Dielectric constant	11.8	10	9.5	10
Baliga's FOM <sup>[4]</sup>	1	570	860	3,200

에서 4인치 구경까지 성장된 단결정  $\beta$ -Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 웨이퍼가 보고되었으며<sup>[5]</sup> 단결정  $\beta$ -Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 물질을 이용한 쇼트키 배리어 다이오드 (Schottky barrier Diode, SBD) 및 산화막 반도체 전계효과 트랜지스터 (Metal-Oxide-Semiconductor field-effect-transistors, MOSFETs)는 높은 항복 전압 및 전류 밀도를 가지며 우수한 고온 신뢰성으로 차세대 전력 반도체로서의 가능성을 입증하였다<sup>[6-10]</sup>.

본 논문에서는 이러한 뛰어난 물질 특성으로 차세대 전력 반도체로 관심을 받고 있는 단결정  $\beta$ -Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub>을 이용하여 SBD를 실제 제작하고 전류-전압 특성 및 항복 전압을 측정하였으며, 이를 바탕으로 차세대 전력 반도체로서  $\beta$ -Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub>의 적합성 및 사용 가능성을 확인하였다.

## II. $\beta$ -Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 쇼트키 배리어 다이오드 제작

그림 2는 본 연구에서 제작된 단결정  $\beta$ -Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub>을 이용한 SBD의 단면 구조를 보여준다. 웨이퍼의 예

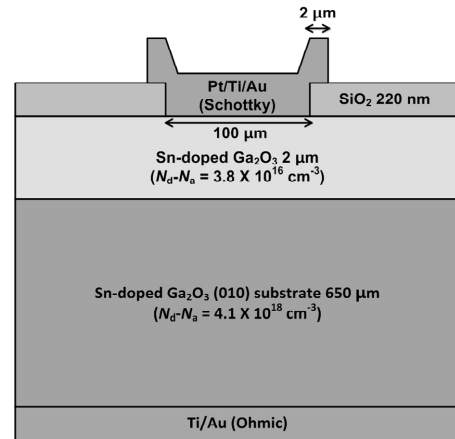
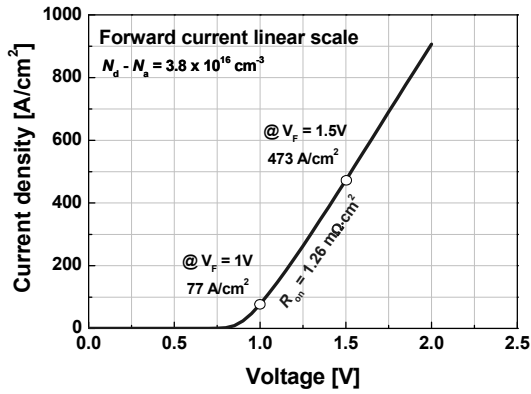
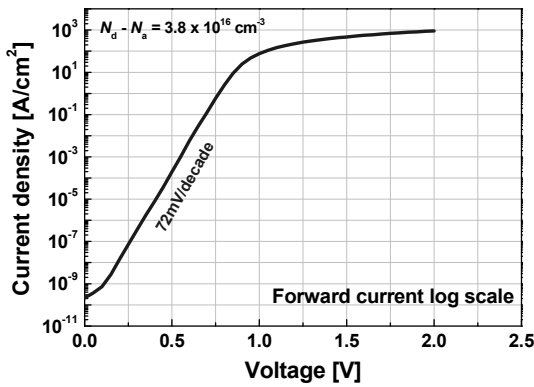


그림 2. Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 쇼트키 배리어 다이오드 소자의 단면도  
 Fig. 2. Cross-sectional view of Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> schottky barrier diode.

구조는 Sn으로 도핑된 650  $\mu$ m 두께의  $4.1 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ 의  $N_d-N_a$  도핑 값을 가지고 있는 고농도  $n^+$ -Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (010) 기판 위에 2  $\mu$ m 두께의 Sn으로 도핑 되어있는  $3.8 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ 의  $N_d-N_a$  값을 가진  $n^-$ -Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub>가 존재한다. 소자 제작에서는 우선 Sulfuric Peroxide Mixture (SPM, H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> : H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>) 용액을 이용하여 표면 유기물 및 오염 물질을 제거한 후 Buffered Oxide Etch (BOE, NH<sub>4</sub>F : HF)를 사용하여 표면의 자연산화물을 제거하였다.  $n^-$ -Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 표면 위에 플라즈마 화학기상증착 (Plasma Enhanced Chemical Vapor Deposition, PECVD)을 이용하여 220 nm 두께의 SiO<sub>2</sub>를 증착하였다. 사진식각공정으로 게이트 접합 영역을 정의한 후 BOE (NH<sub>4</sub>F : HF)를 이용한 습식식각으로 SiO<sub>2</sub> 막을 제거하고 기존의 패터닝 되어 있는 부분을 아세톤과 IPA로 깨끗하게 지웠다. 이후, 2차 패터닝을 통하여 전계관 형상을 갖는 쇼트키 접합으로 Pt/Ti/Au (= 15/5/250 nm)를 전자빔 증착기를 이용하여 증착하였으며, 소자 뒷면에 낮은 저항의 오믹 접합을 형성하기 위해 BCl<sub>3</sub> 기반의 Reactive Ion Etching (RIE) 공정으로 식각을 통한 의도적인 손상을 주고 Ti/Au (= 20/230 nm)를 전자빔 증착기를 이용하여 오믹 접합을 형성하였다<sup>[11]</sup>. 마지막으로 SiO<sub>2</sub>와  $\beta$ -Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub>의 계면 안정화 및 특성을 향상시키기 위하여 400°C의 산소(O<sub>2</sub>) 분위기 안에서 10분 동안 후열처리 과정을 진행하였다. 제작된  $\beta$ -Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 기반 SBD 소자의 게이트 접합 부분의 지름은 100  $\mu$ m이며, 항복 전압 특성을 향상시키기 위한 전계관의 길이는 2  $\mu$ m로 설정하였다.



(a)



(b)

그림 3.  $\beta$ -Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 쇼트키 배리어 다이오드 소자의 (a) 선형 및 (b) 로그 스케일 순방향 전류-전압 특성  
Fig. 3. Forward current-voltage characteristics of a  $\beta$ -Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> schottky barrier diode plotted on (a) linear and (b) logarithmic scales.

### III. 실험 결과 및 토의

$\beta$ -Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub>를 이용하여 제작된 SBD 소자가 차세대 전력 반도체로서의 효용 가치가 있는지를 확인해보기 위하여 순방향 및 항복 특성을 측정하였다. 그림 3(a) 및 (b)는 본 연구에서 제작된 SBD 소자의 순방향 전류-전압 특성을 나타낸다. 그림 3(a)의 선형 그래프에서 보여지는 바와 같이 순방향 전압 1 V에서 약 77 A/cm<sup>2</sup>, 1.5 V에서 약 473 A/cm<sup>2</sup>의 매우 높은 전류 밀도를 나타내었으며 1 V 와 1.5 V 사이의 선형 구간으로부터 추출한 온 저항 특성은 1.26 mΩ·cm<sup>2</sup>의 매우 낮은 값을 갖는 것을 확인하였다. 또한, 그림 3(b)의 로그 그래프에서 보여지는 바와 같이 72 mV/dec의 낮은 문턱전압 이하에서의 기울기 (Subthreshold slope, SS) 특성을 가졌다. 측정된 역 전압 인가에 따른 항복 특성은 그림 4에 나타나 있으며 약 180 V의 항복 전압을 보였다. 제작된 소자의 순방향 전류 밀도가 매우 높다는 점을 감안할

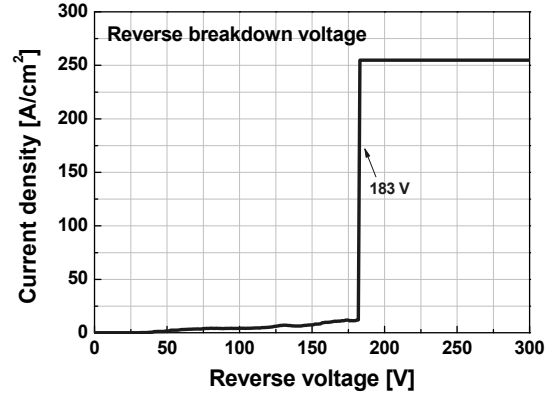


그림 4. Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 쇼트키 배리어 다이오드의 역방향 항복 전압 특성

Fig. 4. Reverse breakdown characteristics of fabricated Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> Schottky barrier diode.

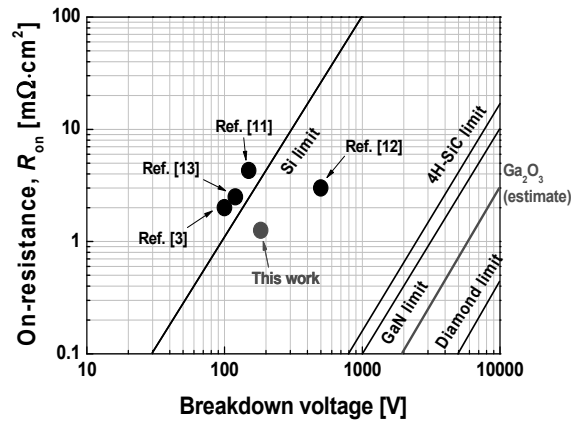


그림 5. 제작된 소자 및 주요 반도체의 온 저항 및 항복 전압 특성

Fig. 5. On-resistance as a function of breakdown voltage of the fabricated device and major semiconductors.

때, 저농도 도핑을 통한 항복전압 증가를 기대할 수 있을 것으로 판단된다.

그림 5는 본 실험에서 제작된  $\beta$ -Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 기반 SBD 소자와 주요 반도체의 온 저항 및 항복 전압 특성을 보여준다. 그래프에서 나타난 직선들은 주요 반도체 물질의 이론적인 한계를 나타낸 것이다. 그리고 빨간색 선으로 나타난 부분은  $\beta$ -Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub>의 이론적인 온 저항 및 항복 전압 한계선을 표 1을 바탕으로 예상한 값이다. 제작된 소자의 특성은  $\beta$ -Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub>의 이론적 한계선에 비해 많이 부족하지만 기존 Si의 이론적 한계선을 넘어선 특성으로 차세대 전력 반도체로서  $\beta$ -Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub>의 사용 가능성을 충분히 확인하였으며, 향후 도핑과 에피층 두께의 최적화를 통하여 보다 향상된 특성을 보일 것으로 기대된다.

#### IV. 결 론

본 연구에서는 차세대 전력 반도체로 관심을 받고 있는 단결정 산화갈륨 ( $\beta$ -Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) 반도체를 이용한 쇼트키 배리어 다이오드를 제작하였다. 제작된 소자의 특성은 약 180 V 크기의 항복 전압 특성, 1.26 m $\Omega$ ·cm<sup>2</sup>의 온저항, 72 mV/dec의 문턱전압 이하에서의 기울기 및 1.5 V의 순방향 전압에서 473 A/cm<sup>2</sup>의 특성을 나타내었다. 제작된 소자의 특성으로 볼 때, 차세대 전력 반도체로써  $\beta$ -Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 물질이 기존 Si의 한계점을 극복하고 물질 성장의 용이성에 기인하여 미래에 가격 경쟁력을 갖춘 고효율 전력 소자로서 매우 광범위한 영역에서 응용될 것으로 기대된다.

#### REFERENCES

- [1] H. H. Tippins, "Optical Absorption and Photoconductivity in the Band Edge of  $\beta$ -Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub>," *Phys. Rev.*, Vol. 140, no. 1A, pp. A316-A319, October 1965.
- [2] M. Higashiwaki, K. Sasaki, A. Kuramata, T. Masui, and S. Yamakoshi, "Gallium Oxide (Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) Metal-Semiconductor Field-Effect Transistors on Single-Crystal  $\beta$ -Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (010) Substrates," *Appl. Phys. Lett.*, Vol. 100, no. 1, p. 013504, January 2012.
- [3] K. Sasaki, A. Kuramata, T. Masui, E. G. Villora, K. Shimamura, and S. Yamakoshi, "Device-quality  $\beta$ -Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> Epitaxial Films Fabricated by Ozone Molecular Beam Epitaxy," *Appl. Phys. Exp.*, Vol. 5, no. 3, p. 035502, March 2012.
- [4] B. J. Baliga, "Power Semiconductor Device Figure of Merit for High-Frequency Applications," *IEEE Electron Device Lett.*, Vol. 10, no. 10, pp. 455-457, October 1989.
- [5] M. Higashiwaki, M. H. Wong, K. Konishi, K. Sasaki, K. Goto, Q. T. Thieu, R. Togashi, H. Murakami, Y. Kumagai, B. Monemar, A. Kuramata, T. Masui, and S. Yamakoshi, "Recent Advances in Gallium Oxide Device Technologies," *Asia-Pacific Workshop on Fundamentals and Applications of Advanced Semiconductor Devices (AWAD)*, Hakodate, Japan, 4-6 July 2016.
- [6] K. Sasaki, M. Higashiwaki, K. Goto, K. Nomura, Q. T. Thieu, R. Togashi, H. Murakami, Y. Kumagai, B. Monemar, A. Koukitu, A. Kuramata, and S. Yamakoshi, "First Demonstration of  $\beta$ -Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> Schottky Barrier Diode with Field Plate Edge Termination," *International Conference on Solid State Devices and Materials (SSDM)*, p. 1076, Sapporo, Japan, 27-30 September 2015.
- [7] H. Murakami, K. Nomura, K. Goto, K. Sasaki, K. Kawara, Q. T. Thieu, R. Togashi, Y. Kumagai, M. Higashiwaki, A. Kuramata, S. Yamakoshi, B. Monemar, and A. Koukitu, "Homoeptaxial Growth of  $\beta$ -Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> Layers by Halide Vapor Phase Epitaxy," *Appl. Phys. Exp.*, Vol. 8, no. 1, p. 015503, December 2014.
- [8] M. Higashiwaki, K. Sasaki, M. H. Wong, T. Kamimura, D. Krishnamurthy, A. Kuramata, T. Masui, and S. Yamakoshi, "Depletion-Mode Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> MOSFETs on  $\beta$ -Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (010) Substrates with Si-Ion-Implanted Channel and Contacts," *IEEE International Electron Devices Meeting (IEDM)*, pp. 28.7.1-28.7.4, Washington, USA, 9-11 December 2013.
- [9] M. H. Wong, K. Sasaki, A. Kuramata, S. Yamakoshi, and M. Higashiwaki, "Field-Plated Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> MOSFETs with a Breakdown Voltage of Over 750 V," *IEEE Electron Device Lett.*, Vol. 37, no. 2, pp. 212-215, February 2016.
- [10] M. Higashiwaki, K. Konishi, K. Sasaki, K. Goto, K. Nomura, Q. T. Thieu, R. Togashi, H. Murakami, Y. Kumagai, B. Monemar, A. Koukitu, A. Kuramata, and S. Yamakoshi, "Temperature-Dependent Capacitance-Voltage and Current-Voltage Characteristics of Pt/Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (001) Schottky Barrier Diodes Fabricated on n<sup>-</sup>-Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> Drift Layers Grown by Halide Vapor Phase Epitaxy," *Appl. Phys. Lett.*, Vol. 108, no. 13, p. 133503, March 2016.
- [11] K. Sasaki, M. Higashiwaki, A. Kuramata, T. Masui, and S. Yamakoshi, "Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> Schottky Barrier Diodes Fabricated by Using Single-Crystal  $\beta$ -Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (010) Substrates," *IEEE Electron Device Lett.*, Vol. 34, no. 4, pp. 493-495, April 2013.
- [12] M. Higashiwaki, K. Sasaki, K. Goto, K. Nomura, Q. T. Thieu, R. Togashi, H. Murakami, Y. Kumagai, B. Monemar, A. Koukitu, A. Kuramata, and S. Yamakoshi, "Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> Schottky Barrier Diodes with n<sup>-</sup>-Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> Drift Layers Grown by HVPE," *2015 73rd Annual Device Research Conference (DRC)*, pp. 29-30, 21-24 June 2015.
- [13] B. Song, A. K. Verma, K. Nomoto, M. Zhu, D. Jena, and H. G. Xing, "Vertical Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> Schottky Barrier Diodes on Single-Crystal  $\beta$ -Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (-201) Substrates," *2016 74th Annual Device Research Conference (DRC)*, 19-22 June 2016.

저 자 소 개



김 현 섭(학생회원)  
2014년 홍익대학교 전자전기공학부  
학사 졸업.  
2015년~현재 홍익대학교 전자정보  
통신공학과 석사과정.  
<주관심분야: 반도체 소자>



조 민 기(학생회원)  
2016년 홍익대학교 전자전기공학부  
학사 졸업.  
2016년~현재 홍익대학교 전자정보  
통신공학과 석사과정.  
<주관심분야: 반도체 소자>



차 호 영(정회원)-교신저자  
1996년 서울대학교 전기공학부 학  
사 졸업.  
1999년 서울대학교 전자공학부 석  
사 졸업.

2004년 Cornell University, School of Electrical  
and Computer Engineering, Ph.D.  
2004년~2005년 Post-doctoral Research, Associate  
at Cornell University, USA.  
2005년~2007년 Research Scientist at GE Global  
Research Center, USA.  
2007년~2012년 홍익대학교 전자전기공학부 조교수.  
2012년~현재 홍익대학교 전자전기공학부 부교수.  
<주관심분야: 반도체 소자>