

BIPV 시스템을 위한 전이금속 산화물 다중층 컬러 유리 구현 기술 연구

Transition Metal Oxide Multi-Layer Color Glass for Building Integrated Photovoltaic System

안 현 식*, Akpeko Gasonoo*, 장 은 정*, 김 민 회**, 이 재 현**★, 최 윤 석*

Hyeon-Sik Ahn^{1*}, Akpeko Gasonoo^{1*}, Eun-Jeong Jang¹, Min-Hoi Kim²,
Jae-Hyun Lee^{2★}, Yoonseuk Choi^{1★}

Abstract

This paper proposed colored front panel glass for Building Integrated Photovoltaic (BIPV) systems using multi-layered thin films composed of transition metal oxide (TMO) layers. Molybdenum oxide (MoO₃) and tungsten oxide (WO₃) provided complementary and suitable materials in making effective interference of reflected light from interfaces with significant difference in refractive indices. A simple, fast, and cheap fabrication method was achieved by depositing the multi-layer films in a single thermal evaporator. Magenta colored glass with optical transmittance of more than 90% was achieved with MoO₃(60nm)/WO₃(100nm) multi-layered film. This technology could play in a critical role in commercial BIPV system applications.

요 약

이 논문에서는 전이 금속 산화물(TMO)층으로 구성된 다층 박막을 사용하는 BIPV(Building Integrated Photovoltaic) 시스템용 전면 컬러 유리를 제안하였다. 몰리브덴 산화물(MoO₃) 및 텅스텐 산화물(WO₃)은 굴절률 차이가 큰 계면을 형성하여 적절한 간섭효과를 얻을 수 있다. 단일 Thermal Evaporator 증착 방법을 통해 다층 박막을 제작함으로써 간단하고 빠르게 저렴한 제조 방법을 제안하였다. MoO₃(60nm)/WO₃(100nm) 다층 박막으로 90% 이상의 광 투과율을 갖는 자홍색 유리를 시연하였으며, 이 기술은 상용화된 BIPV 시스템에 유용할 것으로 기대된다.

Keywords : MoO₃, WO₃, Multi-layer, Transition Metal Oxide, BIPV

* These authors contributed equally to the work.

* Department of Electronic Engineering, Hanbat National University, Republic of Korea

** Department of Creative Convergence Engineering, Hanbat National University, Republic of Korea

★ Corresponding author

E-mail : ychoi@hanbat.ac.kr, jhyunlee@hanbat.ac.kr, Tel : +82-42-821-1970, +82-42-821-1134

※ Acknowledgment

This research was supported by Basic Science Research Program through the National Research Foundation of Korea (NRF) funded by the Ministry of Education (NRF-2018R1A6A1A03026005) and the KETEP and the MOTIE of the Republic of Korea (No. 20183010013840)

Manuscript received Dec. 8, 2019; revised Dec. 20, 2019; accepted Dec. 26, 2019.

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.

I. 서론

BIPV(Building Integrated Photovoltaic) 시스템은 주로 건축에서 재생 에너지를 사용하여 에너지 효율을 높이기 위해 건물 외벽에 태양 에너지를 수확하는 장치를 부착한 것을 의미한다[1-4]. 효율적인 재생 가능 에너지 발생원인 태양전지(Photovoltaic)의 연구 및 개발은 수십 년 전부터 시작하였다[5-6]. 최근에는 특히, 유기 반도체 박막을 사용하여 태양광을 전기로 변환하는 기술인 유기 태양전지(Organic PV)의 도입에 대한 연구가 활발하게 이루어져 왔으며 최근에는 산업 분야에서 관심이 높아지고 있다[7-9]. 이 기술은 얇고 유연한 폼 팩터(Form Factor)를 갖춘 새로운 저가형 태양열 전력 제품을 생산할 수 있다는 잠재력이 있다. PV를 기반으로 하는 BIPV 시스템은 순수 에너지 재생 건물을 구현하기 위한 가장 좋은 방법이다. 태양광 에너지 기술의 대규모 적용 및 통합을 통해 전 세계 모든 건물에서 에너지의 생성 및 소비가 가능해지며, 생성된 전기의 상당 부분이 건축 환경 내에서 소비되어 스마트 그리드에 의한 전력 분배 및 운송 비용이 줄어든다[10]. BIPV 시스템은 주로 전기를 생산하기 위해 건물에 부착되어 있지만, 건물 외벽 통합 태양 에너지 시스템은 건축물의 주요 고려사항 중 하나인 심미성이 떨어지는 문제가 있다. 넓은 면적의 건물(지붕 및 정면)에 설치된 기존의 태양광 시스템은 일반적으로는 검은색 또는 파란색 태양광 모듈로 제공되며, 대부분 PV셀 내의 반사 방지 코팅(ARC : Anti-Reflective Coating)층으로 구성되어 있다[11]. 이것은 일반적으로 심미성을 떨어뜨리는 요소이며 대부분의 사용자가 선호하지 않는다. 이 문제를 해결하기 위한 해결책은 PV 전지의 활성층을 감출 수 있지만 빛의 흡수가 거의 없고 투과도가 높아 빛을 활성층으로 전달하면서도 열을 견딜 수 있는 안정적인 전면 패널 컬러 유리를 개발하는 것이다[12-13]. 본 연구진에서는 다른 굴절률을 갖는 금속 산화물 다층 박막으로 우수한 투과율을 가지면서도 전면 패널 유리에 선택적인 색의 반사를 나타내는 다층 간섭 필터를 구현할 수 있다고 보고한 바 있다[14]. 전이 금속 산화물(TMO)은 특히 고급 BIOPV(Building Integrated Organic Photovoltaic) 시스템의 다층 간섭 필름에 적합하다. TMO는 일반적으로 전이 금속에 결합된 산소

원자로 구성된 화합물이다. 그것들은 상이한 산화 상태로 존재하게 하는 절반이 채워진 'b'오비탈로 인해 촉매 적용에 바람직한 재료이다[15]. 폴리브텐 산화물(MoO₃), 텅스텐 산화물(WO₃), 바나듐 산화물(V₂O₅) 및 레늄 산화물 (ReO₃)와 같은 TMO는 많은 반도체 소자 [p-dopants]로 알려져 있다 [16-18]. 본 논문에서는 TMO 층으로 구성된 다층 박막을 사용하여 BIPV 시스템용 컬러 전면 패널 유리를 제안한다. 단일 Thermal Evaporator로 제조된 MoO₃ 및 WO₃ 층을 포함하는 다층 필름은 전면 패널 컬러 유리를 BIPV 시스템에 매우 적합한 간단하고 저렴한 방법이다. 기본 구조에 대한 광학 특성에 대한 분석은 입사광과 반사광 간의 간섭을 파동광학 기반으로 분석하여 이루어졌다. 시뮬레이션을 통해 컬러 유리의 투과율과 반사율을 분석하여, 원하는 파장에서 목표하는 반사율과 투과율을 얻기 위해 두께를 조정하였다. 또한 제작된 컬러 유리가 시간에 따라 성능 저하가 일어나지 않아 안정화하는 것을 확인하였다.

II. 실험 및 시뮬레이션

1. 실험

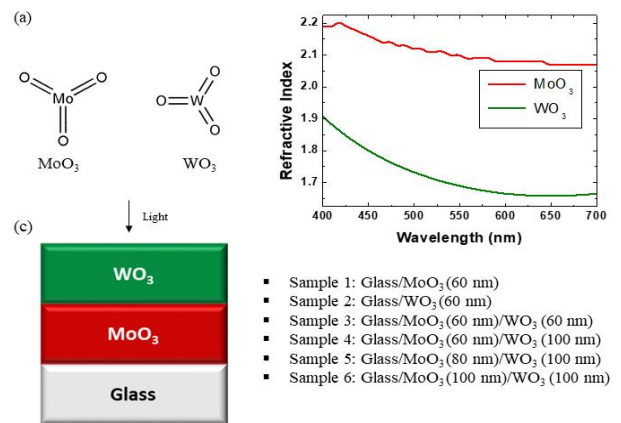


Fig. 1. (a) Schematic structure of a MoO₃/WO₃ based color glass (b) Refractive index of MoO₃ and WO₃ layers (c) Molecular structures of MoO₃ and WO₃.

그림 1. (a) MoO₃ 및 WO₃의 분자 구조 (b) MoO₃ 및 WO₃ 층의 굴절률 (c) MoO₃ / WO₃ 기반 컬러 유리의 도식적 구조

MoO₃ 및 WO₃의 분자 구조는 그림 1(a)에 도시되어 있다. 그림 2(b)는 전면 컬러 유리 제작에 사용된 MoO₃ 및 WO₃의 굴절률을 나타낸다. 높은 굴절

를 갖는 MoO₃층 및 낮은 굴절률을 갖는 WO₃층을 포함하는 다층 필름은 원하는 색상의 파장대역을 반사시키기 위한 간섭을 보장한다. 샘플 1, 2, 3, 4, 5 및 6의 층 순서 및 두께는 그림 1(c)에 도시되어 있다. 유리 기판을 사용하여 아세톤 및 이소프로필 알코올로 각각 15분씩 세정한 후 전면 패널 컬러 유리를 제조하였다. TMO 층은 10⁻⁷ torr 미만의 Thermal Evaporator 챔버에서 증착(Evaporation)에 의해 형성되었다. MoO₃ 및 WO₃의 증착 속도는 각각 1, 2Å/s로 증착되었으며 증착물의 속도 및 두께는 STM-2XM, Instruments Sycon을 사용하여 모니터링 되었다. 필름의 두께는 알파스텝에 의해 측정되었으며 광 투과율 및 반사율은 Lambda 950 UV-vis-NIR spectrophotometer (PerkinElmer)로 측정하였다.

2. 시뮬레이션

그림 1(b)에 도시되어 있는 샘플의 두께 및 박막 순서는 상용 광학해석 프로그램인 D사의 Essential Macleod 프로그램을 사용하여 입사각과 증착된 두께에 따른 반사율에 대한 시뮬레이션 결과로 결정하였다. 그림 2는 MoO₃ 및 WO₃의 두께에 따른 반사율 그래프를 나타낸다.

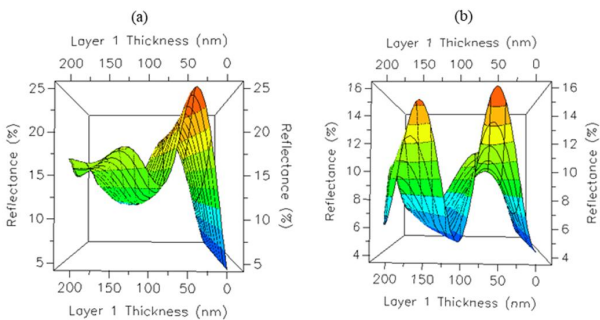


Fig. 2. 3D plot for Reflectance as a function of thickness of (a) MoO₃ (b) WO₃.

그림 2. (a) MoO₃ (b) WO₃의 두께에 따른 반사율에 대한 3차원 그래프

그림 1(b)의 샘플 1~3의 경우, 박막의 반사율을 높여 선명한 컬러의 유리를 만들기 위해 그림 2의 (a)와 같이 두께가 약 40~60nm 사이에서 높은 반사율을 나타내는 MoO₃ 및 그림 2의 (b)와 같이 약 40~60nm 및 150~170nm에서 높은 반사율을 나타내는 WO₃의 시뮬레이션 결과에 의해 정해졌다. 샘플 4~6의 경우, MoO₃ 박막의 두께를 고정한 상태

에서 WO₃ 박막 두께를 변화시키거나 WO₃ 박막의 두께를 고정한 상태에서 MoO₃ 박막의 두께를 변화시켰을 경우 나타나는 파장 천이 및 반사율 변화의 경향성을 알아보기 위해 선정되었다. BIPV용 컬러 유리에서 내부에 설치되는 태양광 패널의 효율을 높이기 위해서 유리의 반사도와 투과도의 조절은 필수적이다. 유리의 투과도가 높게 나타나게 되면 유리가 투명해지기 때문에 내벽에 설치되는 태양광 모듈이 비치게 되고 심미성이 떨어진다. 반면 투과도가 너무 낮은 경우에는 태양광 패널의 효율이 급격하게 떨어진다. 따라서 산화 몰리브덴 및 산화 텅스텐 층의 제어를 통해 반사도와 투과도를 조절하고 색상을 조절할 수 있는 다중층 구조가 본 연구에 적합하다고 판단된다.

III. 결과 및 토론

그림 3은 MoO₃ 및 WO₃의 단일층과 MoO₃/WO₃ 다중층이 증착된 샘플 1~6의 반사율과 투과율 그래프 및 각 샘플의 사진을 나타낸다. 그림 4는 2.5cm 정사각형 유리 위에 제작된 컬러 유리 샘플 1~6의 사진을 나타낸다.

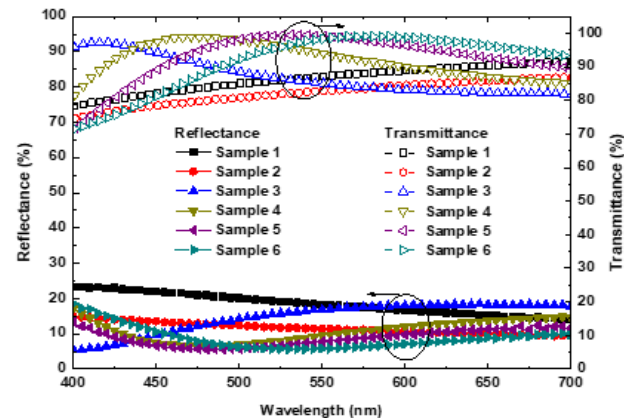


Fig. 3. Reflectance (solid symbols) and Transmittance (open symbols) Spectra of Samples.

그림 3. 시료의 반사율(고체 기호) 및 투과율(개방 기호) 스펙트럼

1과 2는 각각 MoO₃ 및 WO₃의 단일층으로 제작되었으며 샘플 4~6은 서로 다른 두께의 MoO₃/WO₃ 다중층으로 제작된 컬러 유리를 나타낸다. 컬러 유리의 색은 가시광선 영역에서의 높은 반사율을 같은 파장에 의해 결정된다. 샘플 1 및 2의 경우

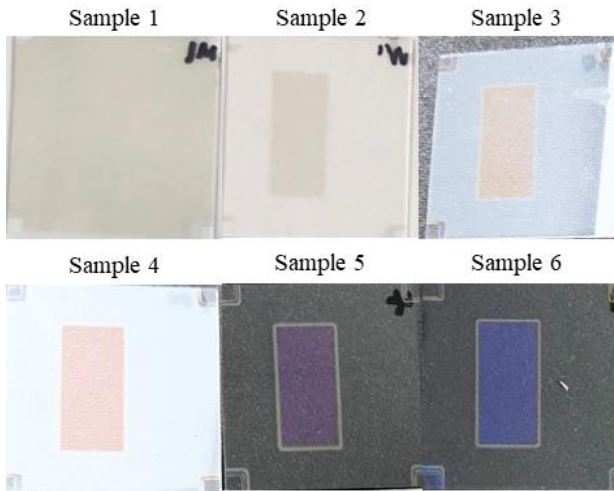


Fig. 4. Samples 1 to 6 produced by the thermal evaporator.
그림 4. thermal evaporator에 의해 제작된 샘플 1~6

400~700nm에서 피크를 가지지 않고 고르게 반사한다. 따라서 제작된 샘플은 회색을 띄게 되며 이는 건축물의 심미성을 고려하여 BIPV 시스템에 사용하기 힘들다. 샘플 3은 550~700nm의 파장에서 거의 일정한 반사율을 가지며 570~590nm(Yellow), 590~630nm(Orange), 630~750nm(Red)의 컬러를 가지는 파장을 반사하여 오렌지색의 컬러 유리가 제작되었다. 샘플 3에 비해 WO₃의 두께가 40nm만큼 더 증착되어 자홍색을 띄는 샘플 4는 반사율과 투과율이 적색 파장대역으로 Shift 되었음을 보아 WO₃의 두께를 제어하여 파장대역이 이동하는 것을 알 수 있다. 샘플 5 및 6은 샘플 4에 비해 MoO₃의 두께가 각각 20nm, 40nm 상승되었다. 샘플 5는 보라색을 나타내는 파장대역(380~420nm)에서 반사율의 최대치를 나타냈으며 제작된 샘플 역시 보라색을 나타내었다. 샘플 6 역시 보라색 파장대역에서 반사율의 최대치는 나타냈지만 파란색 파장대역(450~490nm)에서 반사율이 상승하고 보라색 파장대역(380~420nm)과 빨간색 파장대역(630~750nm)에서 발생한 반사에 의해 어두운 파란색(Dark Blue)의 컬러 유리가 제작되었다. 샘플 4~6의 결과를 보아 MoO₃의 두께를 제어하여 다중 박막의 반사율을 조절할 수 있다. 따라서 굴절률이 높은 전이 금속 산화물(MoO₃)의 두께 제어를 통하여 다중 박막의 반사율을 조절할 수 있으며, 굴절률이 낮은 전이 금속 산화물(WO₃)을 제어하여 투과율 및 반사율 파장대역의 이동에 영향을 미친다.

BIPV에서는 건물 외벽이 유리로 만들어지기 때

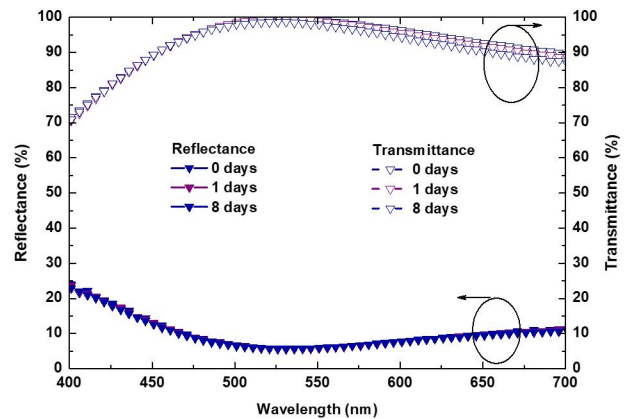


Fig. 5. Spectra of fabricated Device 5 measured over a week.
그림 5. 제작된 Device 5의 안정도 평가 그래프

문에 유리의 안정도가 중요하다. 따라서 본 실험을 통해 개발된 소자의 안정도 테스트를 추가로 진행하였고 그 결과를 그림 5에 나타내었다. 상온에 샘플을 방치하고 반사도와 투과도의 변화하는 정도를 확인한 결과 1주일 이상이 지남에도 거의 차이가 없음을 확인하였다. 향후 습도와 온도를 가속하는 실험을 통해, 보다 장기적인 안정도에 대한 평가가 이루어질 예정이다.

IV. 결론

TMO층으로 구성된 다중 박막을 사용하여 BIPV 시스템용 컬러 전면 패널 유리를 제작하였다. 높은 굴절률을 갖는 MoO₃층 및 낮은 굴절률을 갖는 WO₃층을 포함하는 다중 필름은 양호한 투과율을 가지면서도, 원하는 색상을 구현하기 위해 계면으로부터 반사된 광들이 효과적으로 간섭할 수 있는 구조를 제공하였다.

단일 Thermal Evaporator 내에서 다중 필름을 증착함으로써 간단하고 빠르며 저렴한 제작이 가능하였다. 필름 내의 각 층의 두께를 조정함으로써 원하는 반사율 및 투과율을 갖는 컬러 유리를 제작하였다. MoO₃층을 제어하면 색상의 반사율을 상당히 조절할 수 있으며, WO₃ 층의 두께는 다중 박막의 투과율 및 반사율 파장대역의 이동에 영향을 미치는 것으로 조사되었다.

마지막으로, 시간이 지남에 따라 광학적 특성이 변하지 않는 안정성을 확인함에 따라 이 기술은 향후 대면적 BIPV 시스템에 적용될 가능성이 높다고 할 수 있다.

References

- [1] A. Henemann, "BIPV : Built-in solar energy," *Renewable Energy Focus*, vol.9, no.6, pp.14-16-19, 2008. DOI: 10.1016/S1471-0846(08)70179-3
- [2] I. Cerón, E. Caamaño-Martín, F. J. Neila, "'State-of-the-art' of building integrated photovoltaic products," *Renewable Energy*, vol.58, pp.127-133, 2013.
- [3] A. K. Shukla, K. Sudhakar and P. Baredar, "Recent advancement in BIPV product technologies: A review," *Energy and Buildings*, vol.140, pp.188-195, 2017. DOI: 10.1016/j.enbuild.2017.02.015
- [4] A. P. Enkvist, J. Dinkel, C. Lin, "Impact of the Financial Crisis on Carbon Economics: Version 2.1 of the Global Greenhouse Gas Abatement Cost Curve," McKinsey & Company, 2010.
- [5] M. Wolf, "Performance analysis of combined heating and photovoltaic power systems for residences," *Energy Conversion*, vol.16, no.1-2, pp.79-90, 1976. DOI: 10.1016/0013-7480(76)90018-8
- [6] L. W. Florschuetz, "Extension of the Hottel-Whiller model to the analysis of combined photovoltaic/thermal flat plate collectors," *Solar Energy*, vol.22, no.4, pp.361-366, 1979. DOI: 10.1016/0038-092X(79)90190-7
- [7] B. Kippelen, and J.-L. Brédas, "Organic photovoltaics," *Energy Environ. Sci.*, vol.2, pp. 251-261, 2-009. DOI: 10.1039/B812502N
- [8] C. J. Brabec, "Organic photovoltaics: technology and market," *Solar Energy Materials & Solar Cells*, vol.83, no.2-3, pp.273-292, 2004. DOI: 10.1016/j.solmat.2004.02.030
- [9] Y.-W. Su, S.-C. Lan, K.-H. Wei, "Organic photovoltaics," *materialstoday*, vol.15, no.12, pp.554-562, 2012. DOI: 10.1016/S1369-7021(13)70013-0
- [10] M. Amado, F. Poggi, "Solar Energy Integration in Urban Planning: GUUD Model," *Energy Proc.*, vol.50, pp.277-284, 2014. DOI: 10.1016/j.egypro.2014.06.034
- [11] L. L. Kazmerski, "Photovoltaics: A review of cell and module technologies," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol.1, no.1-2, pp.71-170, 1997. DOI: 10.1016/S1364-0321(97)00002-6
- [12] A. Schüler, C. Roecker, J. Boudaden, P. Oelhafen, J.-L. Scartezzini, "Potential of quarterwave interference stacks for colored thermal solar collectors," *Solar Energy*, vol.79, no.2, pp.122-130, 2005. DOI: 10.1016/j.solener.2004.12.008
- [13] S. Mertin, V. Hody-Le Caër, M. Joly, I. Mack, P. Oelhafen,, J.-L. Scartezzini, A. Schüler, "Reactively sputtered coatings on architectural glazing for coloured active solar thermal façades," *Energy and Buildings*, vol.68, PART C, pp.764-770, 2014. DOI: 10.1016/j.enbuild.2012.12.030
- [14] A. Gasonoo, H.-S. Ahn, M.-H. Kim, J.-H. Lee, Y. Choi, "Metal Oxide Multi-Layer Color Glass by Radio Frequency Magnetron Sputtering for Building Integrated Photovoltaic System," *j.inst.Korean.electr.electron.eng.*, vol.22, no.4, pp. 1056-1061, 2018. DOI: 10.7471/ikeee.2018.22.4.1056
- [15] A. Pareek, S. V. Mohan, "Chapter 1.4 - Graphene and Its Applications in Microbial Electrochemical Technology," *Microbial Electrochemical Technology*, pp.75-97, 2019.
- [16] J.-H. Lee, D.-S. Leem, H.-J. Kim, J.-J. Kim, "Effectiveness of p-dopants in an organic hole transporting material," *Appl. Phys. Lett.*, vol.94, no.12, pp.123306, 2009. DOI: 10.1063/1.3107267
- [17] J.-H. Lee, D.-S. Leem, J.-J. Kim, "Effect of host organic semiconductors on electrical doping," *Organic Electronic*. vol.11, no.3, pp.486-489, 2010. DOI: 10.1016/j.orgel.2009.12.002
- [18] J.-H. Lee, H.-M. Kim, K.-B. Kim, J.-J. Kim, "Origin of charge generation efficiency of metal oxide p-dopants in organic semiconductors," *Organic Electronic*. vol.12, no.6, pp.950-954, 2011. DOI: 10.1016/j.orgel.2011.03.008

BIOGRAPHY

Hyeon-Sik Ahn (Member)



2019 : BS degree in Electronics & Control Engineering, Hanbat Nat'l University.

2019~ present : MS degree in Electronic Engineering, Hanbat Nat'l Univ.

Akpeko Gasonoo (Member)

2013 : BS degree in Computer Engineering, KNUST, Ghana
 2017 : MS degree in Electronic Engineering, Hanbat Nat'l Univ.
 2017 ~ present : PhD degree in Electronic Engineering, Hanbat Nat'l Univ.

Eun-Jeong Jang (Member)

2016 ~ present : BS degree in Electronics & Control Engineering, Hanbat National University.

Min-Hoi Kim (Member)

2006 : BS degree in Electrical Engineering, Yonsei University.
 2013 : PhD degree in Electrical and Computer Engineering, Seoul Nat'l Univ.
 2013 ~ present : Associate Professor, Hanbat Nat'l Univ.

Jae-Hyun Lee (Member)

2002 : BS degree in Material Science and Engineering, Korea University.
 2011 : PhD degree in Material Science and Eng., Seoul Nat'l Univ.
 2011~2012 : Post Doc. Researcher, IAPP, TU Dresden (Germany).
 2012 ~ present : Associate Professor, Hanbat National University.

Yoonseuk Choi (Member)

1999 : BS degree in Electrical Engineering, Seoul Nat'l Univ.
 2006 : PhD degree in Electrical and Engineering, Seoul Nat'l Univ.
 2006~2008 : Principal Researcher, Hanyang Univ.
 2008~2010 : Post Doctoral Scholar, Case Western Reserve Univ.
 2010 ~ present : Associate Professor, Hanbat National University.