

## 반사방지 나노 구조체를 이용한 AlGaN UV 광다이오드의 광반응도 향상

Duc Chu Dac<sup>1</sup> · 최준행<sup>1</sup> · 김정진<sup>2\*</sup> · 차호영<sup>3</sup>

### Improved photoresponsivity of AlGaN UV photodiode using antireflective nanostructure

Duc Chu Dac<sup>1</sup> · June-Heang Choi<sup>1</sup> · Jeong-Jin Kim<sup>2\*</sup> · Ho-Young Cha<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Graduate Student, School of Electronic and Electrical Engineering, Hong-Ik University, Seoul, 04066 Korea

<sup>2\*</sup>Research professor, Metamaterial Electronic Device Research Center, Hong-Ik University, Seoul, 04066 Korea

<sup>3</sup>Professor, School of Electronic and Electrical Engineering, Hong-Ik University, Seoul, 04066 Korea

#### 요약

본 연구에서는 Ni cluster를 이용하여 제작된 나노 구조체를 반사방지막으로 활용하여 비가시광 UV 광통신용 신호 수신단에 적용 가능한 AlGaN 광다이오드의 성능을 개선하는 구조를 제안하였다. 반사방지막의 제작은 SiO<sub>2</sub> 위에 Ni cluster를 형성한 후 SiO<sub>2</sub>를 부분적으로 식각하는 방식으로 제조하였다. 반사방지막이 적용된 샘플은 반사방지막이 없는 구조의 샘플에 비해 상대적으로 작아진 반사도를 보였으며 나노구조체가 없는 SiO<sub>2</sub>가 증착된 구조에 비해 입사 광파장의 변화에 대해 균일한 반사도를 보였다. 최종적으로 2 nm 두께의 Ni 층을 열처리하여 제작된 Ni cluster를 이용한 반사방지막을 적용하여 UV 광다이오드를 제작하였고, 그 결과 SiO<sub>2</sub> 단일막을 가진 센서에 비해 240 nm에서 270 nm 파장영역에서 개선된 광반응도를 보였다.

#### ABSTRACT

In this study, we proposed an anti-reflective nano-structure to improve the photoresponsivity of AlGaN UV photodiode that can be used as a receiver in a solar blind UV optical communication system. The anti-reflective nano-structure was fabricated by forming Ni nano-clusters on SiO<sub>2</sub> film followed by etching the underneath SiO<sub>2</sub> film. A sample with the anti-reflective nano-structure exhibited lower surface reflection along with less dependency on the wavelength in comparison with a sample without the nano-structure. Finally, a UV photodiode was fabricated by applying an anti-reflective structure produced by heat-treating a 2 nm-thick Ni layer. The photodiode fabricated with the proposed nano-structure exhibited noticeable improvement in the photoresponsivity at the wavelength range from 240 nm to 270 nm in comparison with the same photodiode with a SiO<sub>2</sub> film without the nano-structure.

**키워드** : AlGaN, 비가시광 UV 광통신, 광다이오드, 반사방지구조

**Keywords** : AlGaN, Solar-blind UV optical communication, Photodiode, Anti-reflective structure

Received 27 August 2020, Revised 17 September 2020, Accepted 22 September 2020

\* Corresponding Author Jeong-Jin Kim(E-mail:jeongjin19@hongik.ac.kr, Tel:+82-2-320-3078)

Research professor, Metamaterial Electronic Device Research Center, Hong-Ik University, Seoul, 04066 Korea

Open Access <http://doi.org/10.6109/jkiice.2020.24.10.1306>

print ISSN: 2234-4772 online ISSN: 2288-4165

©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.  
Copyright © The Korea Institute of Information and Communication Engineering.

## I. 서 론

기지국이 필요 없는 비가시광 UV 광통신은 무선데이터 전송, 저전압 호출 등 기존의 RF 통신 기술을 대체할 미래 통신기술로 기대된다. UV 광통신은 송신부에서 보내진 UV 빛이 공기중으로 송출되면 대기가스에 의해 산란이 발생하고 그로인한 확산신호를 수신하여 신호를 복조함으로써 기능하게 된다[1]. 이러한 UV 광통신 기술의 주요 기술 중 하나는 미약한 확산신호를 수신할 수 있는 수신기로 이에 고성능 UV 수광소자가 요구된다. 현재 UV를 검출하기 위한 센서로 photomultiplier tube (PMT, 광전자증배관) 소자가 주로 사용되고 있으나 전력소모 및 모듈의 부피가 크며 온도 변화에 대한 안정화 시간이 길어 활용에 제한이 있다[2]. 반도체 기반 수광소자로 UV-enhanced Si 기반 광다이오드가 활용될 수 있으나 UV 영역대보다 가시광 영역의 흡수에 적합한 Si의 물성적 특징 때문에 고가의 가시광 필터 등이 요구되고 수광 효율이 낮으며 밴드갭이 작아 고온 동작이 어려운 단점이 있다. 이에 비해 wide bandgap(WBG)을 갖는 화합물반도체 기반의 UV 센서는 가시광에 반응하지 않고 고온 동작이 가능하고 고효율 저전력 구동 및 소형화가 가능하여 모바일 기기 적용에 강점을 가진다[3-4].

UV 광통신에 있어서 미약한 광신호를 감지하기 위하여 수광소자에서 광 반사를 줄이고 수광효율을 높이는 기술이 필수적이며 이를 위한 반사방지막 기술의 연구가 중요하게 여겨진다. 전통적인 방식의 반사방지막 형태로 박막의 두께를 입사광 파장의 1/4로 제작하여 특정파장에서 상쇄간섭을 이용한 광반사 억제기술이 쓰이고 있으나 이러한 간섭에 의한 반사 억제가 제한적인 조건에서 발생하기 때문에 이를 실용화하기 위해서는 여러 제한이 따른다[5]. 이를 보완하는 기술로 최근에는 야행성 곤충인 나방의 겹눈과 같은 구조로 박막을 제조하였을 때 반사도가 작아진다는 연구결과가 보고되고 있다[6-8]. 무수한 돌기모양의 나방겹눈 구조에서는 입사광이 굴곡면을 통해 입사하게 되는데 이때 입사광의 높이에 따라 굴절률이 점진적으로 변하는 구조가 되므로 입사광의 파장 및 입사 각도에 관계없이 굴절률계면에 의한 광반사를 최소화하는 특징을 가지고 있다[6-8].

본 연구에서는 AlGaN 기반 p-i-n 광다이오드의 수광 효율을 개선하기 위하여 반사방지구조를 적용하였다.

반사방지막으로 사용되는 패시베이션 박막의 굴절률계면에 의한 광반사를 줄이기 위해 Ni cluster를 이용하여 수광부 상단의 패시베이션 박막을 요철 형태로 식각하여 반사방지 구조를 제작하였다. Ni cluster를 이용하여 제작된 요철구조는 기존의 나방눈 구조의 반사방지막에 비해 더 좁은 간격의 요철구조를 형성할 수 있었으며 반사방지막을 UV 광다이오드에 적용한 결과 소자의 광반응도가 개선된 것을 확인하였다.

## II. 실험 방법

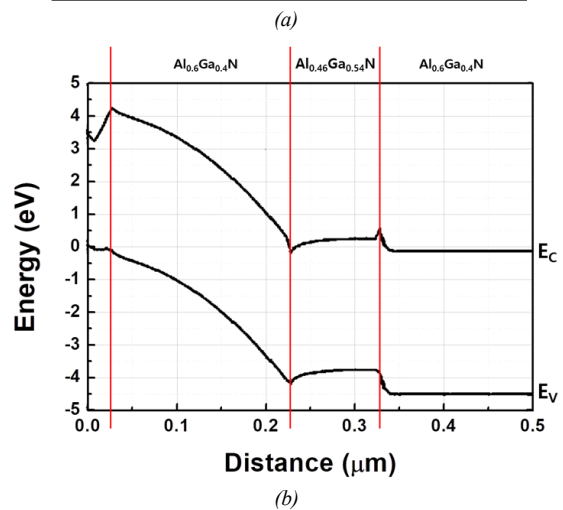
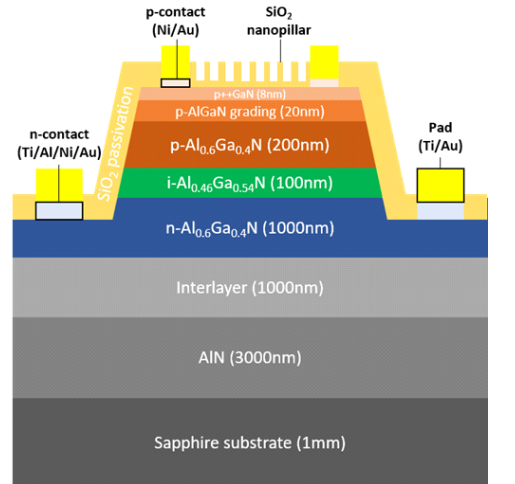


Fig. 1 (a) Epitaxial structure of the AlGaN photodiode and (b) its energy band diagram

본 연구에 사용된 기판은 1 mm 두께의 사파이어 기판 위에 3 um의 AlN 층, 1 um의 interlayer층, 1 um의 두께의  $8 \times 10^{18} \text{cm}^{-3}$  농도로 n-type 도핑된 n-Al<sub>0.6</sub>Ga<sub>0.4</sub>N 층, 100nm 두께의 도핑되지 않은 i-Al<sub>0.46</sub>Ga<sub>0.54</sub>N 층, 200 nm 두께의  $8 \times 10^{16} \text{cm}^{-3}$  농도로 p-type 도핑된 p-Al<sub>0.6</sub>Ga<sub>0.4</sub>N 층, 그리고  $1 \times 10^{18} \text{cm}^{-3}$  농도로 p-type 도핑되고 점진적으로 Al 물분율이 달라지는 20 nm 두께의 p-AlGaIn 층, 마지막으로 8nm 두께의  $1 \times 10^{20} \text{cm}^{-3}$ 의 고농도로 p-type 도핑된 p-GaN 층을 유기금속화학증착 (metalorganic vapour-phase epitaxy : MOCVD) 방식을 이용하여 성장한 구조를 사용하였다. 설계된 에피 구조 및 광다이오드의 단면 모식도를 그림 1 (a)에 도시하였다. 0.6의 Al 물분율을 갖는 AlGaIn의 밴드갭은 5.1 eV로 이는 차단파장  $\lambda_{\text{cutoff}} = 243 \text{ nm}$ 에 해당하며, 0.46의 Al 물분율을 갖는 AlGaIn의 밴드갭은 4.715 eV로 이는 차단파장  $\lambda_{\text{cutoff}} = 263 \text{ nm}$ 에 해당한다. 결과적으로 약 240 ~ 270 nm 영역대의 UV를 흡수하여 감지할 수 있는 에피 구조를 설계하였으며 해당구조에 대한 밴드 다이어그램을 그림 1 (b)에 도시하였다.

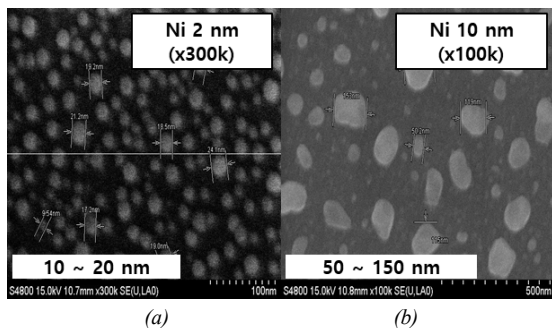


Fig. 2 Ni clusters formed by heat-treating (a) 2 nm of Ni layer and (b) 10 nm of Ni layer, respectively.

반사방지구조(anti-reflective structure : ARS)를 적용한 AlGaIn 기반 광다이오드 제작에 선행하여 반사방지막의 형태를 최적화하는 실험을 수행하였다. 먼저 PECVD 방식으로 SiO<sub>2</sub>를 400 nm 두께로 증착하고 그 위에 Ni cluster를 형성하였다. Ni cluster의 크기 및 형태를 조절하기 위해 증착되는 Ni의 두께를 각각 2 nm, 10 nm로 다르게 적용하였다. 금속 증착 후 RTA(rapid thermal annealing) 방식으로 N<sub>2</sub> 분위기에서 850 °C에서 1분간 열처리 하여 Ni 금속층이 서로 뭉쳐져 cluster 형태가 되도록 하였다. 실험 결과 그림 2에서 보이는 것처럼

Ni의 두께에 따라 클러스터의 형태 및 크기가 정해졌는데, 2 nm 두께의 Ni 층으로 제조된 Ni cluster는 약 10 ~ 20 nm 크기로 매우 미세한 크기로 균일한 분포를 갖는 형태를 띠었다. 반면 10 nm 두께의 Ni 층을 열처리하여 Ni cluster를 제조하였을 때 수십 ~ 수백 nm 크기로 상대적으로 큰 크기와 편차를 갖는 형태로 cluster가 형성되었다. 제조된 Ni cluster를 식각 마스크로 활용하여 SiO<sub>2</sub>를 250 nm 깊이로 F 기반 RIE(reactive ion etching) 플라즈마 식각 방식으로 식각한 후 100 °C로 가열된 질산용액에 10분간 처리하여 Ni를 습식식각 하여 표면에 요철구조가 형성된 반사방지 구조를 제작하였다.

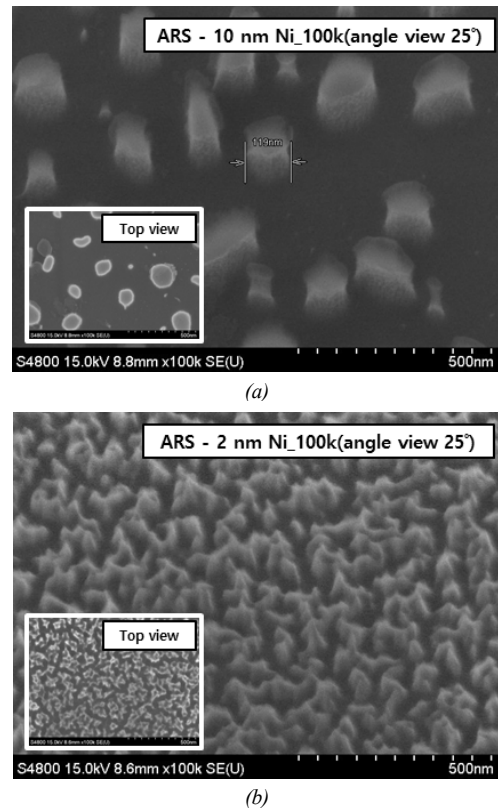


Fig. 3 Fabricated anti-reflective nano-structures from (a) 2 nm thick Ni film and (b) 10 nm thick Ni film.

그림 3은 두 가지 형태의 Ni cluster를 이용하여 제조된 반사방지구조의 SEM(scanning electron microscope) 분석에 의한 표면이미지를 보여준다. 최종적으로 UV 광다이오드에 적용한 반사방지 구조는 2 nm Ni 층을 열처리하여 형성한 Ni cluster를 이용하여 제작되었으며

AlGaIn 광다이오드 제작 후 수광부 위에 Ni cluster를 이용한 반사방지구조를 제작하는 공정 모식도를 그림 4에 도시하였다. AlGaIn 기반 UV 광다이오드는 원형의 메사 구조를 갖는 형태로 제조되었다.

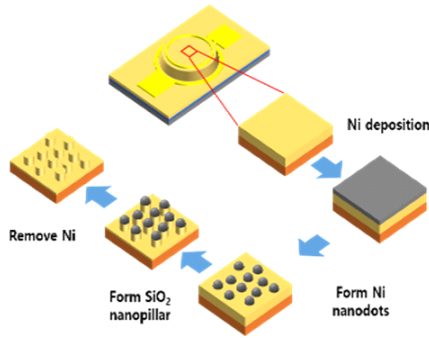


Fig. 4 Process flow of the anti-reflective nano-structure on the AlGaIn photodiode.

먼저 각 소자의 전기적 절연을 위하여  $\text{BCl}_3/\text{Cl}_2$  기반의 reactive ion etch (RIE) 방식으로 메사 식각 되었다. 메사 단차에서 발생하는 전기장의 집중을 완화시켜 항복전압을 향상시키기 위해 작은 각도를 갖는 메사 구조를 제작할 필요가 있다[9-10]. 식각 면의 각도를 조절하기 위하여 포토 리소그래피 고정 후 추가 열처리를 통해 감광막(PR)을 reflow 시켜 PR 계면이 완만한 경사를 이루도록 하였고, 그 위에 메사 식각을 수행하여 약 11도로 완만한 경사를 이루는 식각 면을 형성하였다. 광 다이오드의 cathode 전극을 제작하기 위해 메사 단차 아래의 n-type AlGaIn 층 위에 E-beam evaporation 방식을 이용하여 Ti/Al/Ni/Au를 20/120/25/50 nm 두께로 증착한 후 RTA 방식으로  $\text{N}_2$  분위기에서  $840^\circ\text{C}$  에서 30초간 열처리하여 n-type 오믹 전극을 형성하였다. 광 다이오드의 anode 전극을 제작하기 위해 메사 단차 위의 p-type GaN 층 위에 Ni/Au를 5/5 nm 두께로 증착한 후  $\text{N}_2$  분위기에서 60초간  $500^\circ\text{C}$  에서 열처리하여 p-type 오믹 전극을 형성하였다. 전극 형성 후 소자의 표면 보호와 반사방지막의 역할을 할  $\text{SiO}_2$  박막을 250 nm 증착하였다. 소자의 패키징 및 측정 분석 시 소자에 탐침을 접촉시킬 패드를 제조하기 위해 접촉될 영역의  $\text{SiO}_2$ 를 RIE 방식으로 모두 식각하고 Ti/Au 구조의 패드 금속층을 20/350 nm 두께로 형성하여 기본적인 광다이오드의 구조를 제작하였다. 마지막으로 소자의 수광부에 반사방지구조

를 형성하기 위해 앞서 기술한 방식으로 Ni cluster를 형성한 후 RIE 방식으로  $\text{SiO}_2$ 를 약 200 nm 깊이로 식각하고 질산을 이용해 Ni cluster를 습식식각 하여 반사방지구조를 형성 하여 최종적으로 그림 1 (a)와 같은 구조의 소자를 제작하였다.

### III. 본론

UV 광다이오드에 적용될 반사방지 구조의 성능을 시험하기 위해 실리콘 기판 위에 반사방지구조를 형성시키고 그림 5와 같이 실리콘 기판 및  $\text{SiO}_2$  박막이 증착된 실리콘 기판과 반사방지구조가 형성된 기판의 반사도를 비교해 보았다.

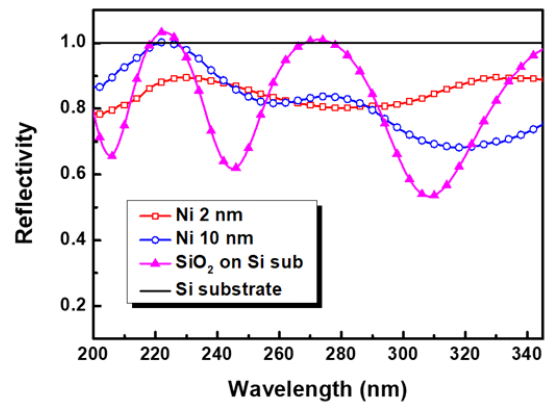


Fig. 5 Wavelength dependent reflectivity for various samples; bare Si, Si with  $\text{SiO}_2$  film, Si with nano-structured  $\text{SiO}_2$  films using 2 nm and 4 nm thick Ni films.

박막이 증착되지 않은 실리콘 기판의 반사도를 1로 표준화하였을 때  $\text{SiO}_2$  박막이 있는 샘플과 반사방지구조를 형성한 샘플들은 박막이 증착되지 않은 실리콘 기판 대비 낮은 반사도를 보였다.  $\text{SiO}_2$  박막 증착 후에는 박막의 굴절률 및 두께에 영향을 받는 보강/상쇄 간섭에 의해 특정 파장의 입력광에서만 반사도가 떨어지는 양상을 보이는 반면 Ni cluster를 이용하여 제조된 반사방지구조를 적용한 두 샘플은 실리콘 기판에 비해 전체적으로 낮은 반사도를 가지며  $\text{SiO}_2$  박막에 비해서 입력광의 파장에 대해 의존도가 낮은 반사도 특성을 보인다. 표면이 나노 필러로 이루어진 반사방지 구조의 형태에서는 공기와  $\text{SiO}_2$ 로 이루어진 반사방지구조 사이

의 굴절률의 차이가 점진적으로 달라지므로 균일한 두께의 패시베이션 막에서 공기와 박막의 굴절률의 차이에 의한 반사를 줄일 수 있다[6-8]. 2 nm 와 10 nm의 각각 다른 두께의 Ni 금속층을 이용하여 제작된 반사방지 구조의 반사도를 비교하면 2 nm 두께의 Ni을 이용한 반사방지구조의 파장 의존도가 더 낮은 것이 확인되었다. 그림 3에서 보이는 것처럼 2 nm Ni을 이용하여 제작된 반사방지구조가 10 nm Ni을 이용한 구조에 비해 더 촘촘한 표면 형상을 나타내는 것을 확인할 수 있으며 구조체의 밀도가 높을 때 단파장인 UV 입사광의 반사가 적게 되는 것으로 보여진다. 2 nm Ni을 이용하여 제작된 반사방지구조에서 비가시광 영역인 290 nm 이하의 파장대에서 대체로 10 nm Ni을 이용한 구조에 비해 낮은 반사도를 보이며 공정 균일도가 높은 것이 확인 되므로 2 nm Ni 을 이용한 반사방지구조를 적용하여 AlGaIn p-n 구조의 광 다이오드를 제작하였다. 제작된 소자에 역바이어스를 인가하였을 때 250 nm 파장을 갖는 UV 입력에 대한 광전류 및 암전류 특성이 그림 6 과 같이 나타났다. AlGaIn 화합물 반도체는 wide bandgap 물질로 가시광선을 흡수하지 않기 때문에, 가시광선을 차단하지 않더라도 0 V 바이어스 상태에서 암전류는 UV 광전류보다 약 4 order 낮은 특성을 보여 주었다.

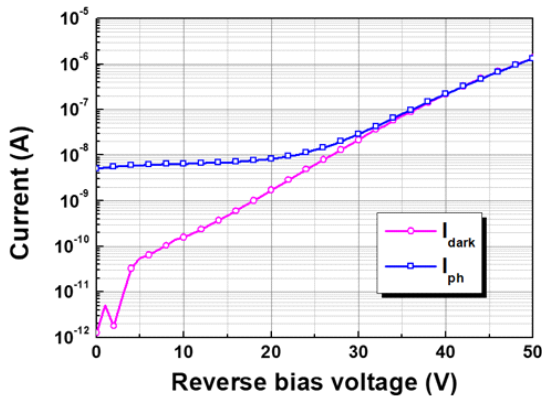


Fig. 6 Photo and dark currents of the AlGaIn UV photodiode.

SiO<sub>2</sub> 패시베이션까지 소자 제작이 완료된 상태에서 Ni cluster 의 형성 및 반사방지구조 형성의 각 공정단계에 대해 광다이오드의 광반응도를 측정 한 결과, 그림 7과 같이 AlGaIn 광다이오드의 광반응도가 공정단

계가 진행될수록 높아짐을 보이며 SiO<sub>2</sub> 패시베이션에 비해 최종적으로 제작된 반사방지 구조가 최대 광반응도 지점인 245 nm에서 15% 정도 효율이 증가되어 약 65%의 양자효율을 보였다. 이는 고성능 PMT 가 UV 영역 대에서 약 30~35%의 양자효율을 보이는 것과 대비되며[11], 저전력 소형화 구현과 함께 WBG 반도체 기반 UV 센서의 경쟁력을 높이는 특성으로 볼 수 있다.

제작된 반사방지 구조는 요철구조를 가지고 있으므로 표면 반사를 줄일 수 있고 반사된 빛의 재흡수 확률을 높일 수 있다. 습식 식각을 이용하여 Ni nano cluster 를 제거하기 전 단계의 소자 구조에서도 패시베이션 구조에 비해 높은 효율을 나타내는데 이는 소자 구조에서 가장 큰 굴절률 차이를 갖는 공기와 패시베이션 박막 사이의 경계면에서 nano-scale Ni cluster가 표면 반사를 줄이는 역할을 하기 때문으로 판단된다.

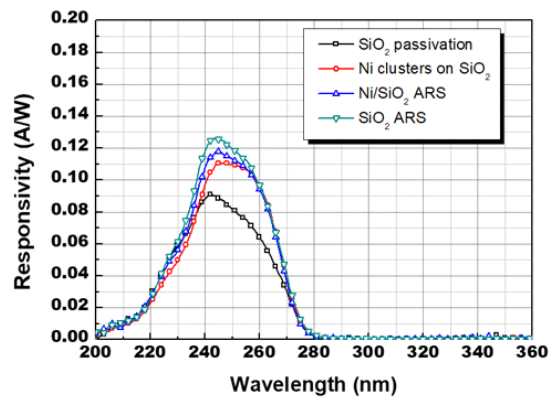


Fig. 7 Photoresponsivity of AlGaIn photodiode measured with SiO<sub>2</sub> film, Ni clusters formed on SiO<sub>2</sub>, nano-structured SiO<sub>2</sub> before Ni removal, and nano-structured SiO<sub>2</sub> after Ni removal.

#### IV. 결 론

AlGaIn 기반 p-n UV 광다이오드의 광반응도를 높이기 위해 소자의 수광부에 Ni 을 열처리함으로써 만들 수 있는 Ni cluster를 이용하여 반사방지구조를 제조하였다. 제작된 반사방지 구조는 표면이 요철구조를 갖는 SiO<sub>2</sub> 박막의 형태로 제조되었으며 반사방지구조를 형성한 결과 단일 SiO<sub>2</sub> 박막을 갖는 소자에 비해 약 15% 향상된 광반응도를 얻었다. 무수한 돌기가 형성된 것과



같은 반사방지막의 표면 형태는 공기와 패시베이션 박막 사이의 굴절률 차이에 의한 표면반사를 억제하고 반사된 빛의 재흡수율을 높여 광소자의 양자 효율을 향상시키는 역할을 한다.

### ACKNOWLEDGEMENT

This work was supported by Korea Electric Power Corporation (Grant: R18XA02) and Basic Science Research Programs (2015R1A6A1A03031833) through NRF.

### REFERENCES

[ 1 ] G. A. Shaw, A. M. Siegel, J. Model, and D. Greisokh, "Recent progress in short-range ultraviolet communication," *Proceeding SPIE Defense Security Symposium*, vol. 5796, pp. 214-225, 2005.

[ 2 ] P. Sandvik, L. Burr, S. Soloviev, S. Arthur, K. Matocha, J. Kretchmer, L. Lombardo, and D. Brown, "SiC photodetectors for industrial applications," *Proceeding IEEE Lasers and Electro-Optics Society 2005*, vol. 1, pp. 319-320, 2005.

[ 3 ] S. S. Liu, P. W. Li, W. H. Lan, and Y. C. Cheng, "The improvement of GaN pin UV sensor by 8-pair AlGaIn/GaN superlattices structure," *Materials Science and Engineering: B*, vol. 126, pp. 33 - 36, 2006.

[ 4 ] W. H. Jang and H. Y. Cha, "Development of Selective GaN etching Process for p-GaN/AlGaIn/GaN E-mode FET Fabrication," *Journal of the Korea Institute of Information and Communication Engineering*, vol. 24, no. 2, pp. 321-324, 2020.

[ 5 ] Y. H. Lee, Y. H. Kim, H. Kim, and J. H. Oh, "Recent Research Trend in Photosensors for Electronic Skin," *Korean Industrial Chemistry News*, vol. 21, no. 1, pp. 19-33, 2018.

[ 6 ] G. Tan, J. H. Lee, Y. H. Lan, M. K. Wei, L. H. Peng, I. C. Cheng, and S. T. Wu, "Broadband antireflection film with moth-eye-like structure for flexible display applications," *Optica*, vol. 4, no. 7, pp. 678-683, 2017.

[ 7 ] S. Jang, S. M. Kang, and M. Choi, "Multifunctional Moth-Eye TiO<sub>2</sub>/PDMS Pads with High Transmittance and UV Filtering," *ACS Applied Materials Interfaces*, vol. 9, pp.

44038-44044, 2017.

[ 8 ] J. Cai and L. Qi, "Recent advances in antireflective surfaces based on nanostructure arrays," *Materials Horizons*, vol. 2, pp. 37 - 53, 2015.

[ 9 ] B.J. Baliga, "Fundamentals of power semiconductor devices," New York, NY: Springer Science, pp.137-148, 2008.

[10] E. Chong, Y. J. Koh, D. H. Lee, I. H. Bae, J. S. Kim, Y. S. Jeong, J. Y. Ryu, J. Y. Lee, M. J. Kang, J. H. Park, and K. K. Choi, "Effect of beveled mesa angle on the leakage performance of 4H-SiC avalanche photodiodes," *Solid-State Electronics*, vol. 156, pp.1-4, 2019.

[11] D. A. Orlov, R. Glazenborg, R. Ortega, and E. Kernen, "UV/visible high sensitivity MCP PMT single photon GHz counting detector for long range lidar instrumentations," *CEAS Space Journal*, vol. 11, pp. 405-411, 2019.



**Duc Chu Dac**

2017년 Hanoi University of Science and Technology, Vietnam (학사)  
2020년 홍익대학교 (석사)  
※관심분야 : 반도체소자, 광전자소자



**최준행(June-Heang Choi)**

2015년 홍익대학교 (학사)  
2018년 홍익대학교 (석사)  
2018년 ~ 현재 홍익대학교 전자전기공학부 (박사과정)  
※관심분야 : 와이드 밴드갭 반도체소자



**김정진(Kil-Dong Hong)**

2009년 전북대학교 (학사)  
2012년 전북대학교 (석사)  
2017년 전북대학교 (박사)  
2017년 ~ 2019년 한국전자통신연구원 (Post Doc.)  
2019년 ~ 현재 홍익대학교 메타물질전자소자 연구센터 (연구교수)  
※관심분야 : 반도체소자, 전력전자



**차호영(Ho-Young Cha)**

1996년 서울대학교 (학사)  
1999년 서울대학교 (석사)  
2004년 Cornell University (박사)  
2005년 ~ 2007년 GE Global Research  
2007년 ~ 현재 홍익대학교 전자전기공학부 (정교수)  
※관심분야 : 반도체소자, 전력전자, 광전자소자