

UV를 차단하는 Ga₂O₃/Cu₂O 이종접합 광전소자

주영웅¹ · 배승한¹ · 김우혁¹ · 정진솔¹ · 정우용¹ · 이준식² · 최찬혁¹ · Naveen Kumar³ · 윤주형⁴ · 김준동^{4*}

¹인천대학교 전기공학과, 학사과정

²인천대학교 전기공학과, 석사과정

³인천대학교 전기공학과, 겸임교수

⁴인천대학교 전기공학과, 교수

UV Blocking Ga₂O₃/Cu₂O Heterojunction Photoelectric Device

Ju Youngwoong¹ · Bae Seunghan¹ · Kim Woohyeok¹ · Jeong Jinsol¹ · Jung Uyoung¹ · Lee Junsik² · Choi Chanhyuk¹ · Naveen Kumar³ · Juhung Yun⁴ · Kim Joondong^{4*}

¹Bachelor Course, Department of Electrical Engineering, Incheon National University

²Master Course, Department of Electrical Engineering, Incheon National University

³Adjunct Professor, Department of Electrical Engineering, Incheon National University

⁴Professor, Department of Electrical Engineering, Incheon National University

*Corresponding author: joonkim@inu.ac.kr

Abstract

A transparent photoelectric device was fabricated using a metal-oxide heterojunction. Owing to the large energy bandgap of the p-type (Cu₂O) – n-type (Ga₂O₃) junction, a space charge region was spontaneously formed, which provided an electric field to collect the photogenerated carriers, resulting in photovoltaics with solar-cell features. The formation of the Cu₂O layer was modulated by the O₂ flow rate to tune the photovoltage to 910 mV and the photocurrent to 3.2 mA/cm². In addition, a transparent photovoltaic device was used along with the photodetectors to achieve high responsivity (149 mA/W) and detectivity (1.39 × 10¹² Jones) at a wavelength of 340 nm. This suggests that high-performance and transparent Cu₂O/Ga₂O₃ devices can be adopted for self-powering invisible human electronics.

Keywords: 광전소자(Photoelectric device), 태양전지(Solar cell), 광검출기(Photodetector), Cu₂O/Ga₂O₃

1. 서론

현대 사회에서 마주한 가장 중요한 문제 중 하나는 미래 에너지 관련 분야이다. 화석연료를 이용한 발전으로 기술적인 진보를 이루어 왔으나, 그로 인해 발생한 환경 문제와 자원 소실에 대한 문제가 대두되고 있다. 이러한 문제점들을 해결하고 지속적인 발전을 영위하기 위해서 태양 에너지의 활용은 중요한 미래 에너지로 이용될 수 있다. 다양한 스펙트럼을 가지는 태양광 단파장의 자외선, 장파장의 적외선(ultraviolet) 그리고 인간의 눈이



Journal of the Korean Solar Energy Society
Vol.43, No.4, pp.19-27, August 2023
<https://doi.org/10.7836/kses.2023.43.4.019>

pISSN : 1598-6411

eISSN : 2508-3562

Received: 3 May 2023

Revised: 2 June 2023

Accepted: 20 June 2023

Copyright © Korean Solar Energy Society

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution NonCommercial License which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

볼 수 있는 가시광 영역으로 구성되어 있다. 즉 자외선 혹은 적외선 영역의 빛을 이용하여서, 보이지 않는 (Invisible) 파장 대역 빛을 이용해서 에너지를 생산하는 방안을 구축할 수 있다.

아울러, 짧은 파장대의 자외선은 포톤 에너지가 커서 인간의 눈에 노출이 되면 각막 손상, 백내장 등 만성 질환으로 시력 저하가 발생할 수 있고, 피부에 노출되면 피부질환 및 피부암을 유발하는 등 인간의 건강에 심각한 영향을 끼친다¹⁾. 따라서 자외선 영역의 빛을 흡수하는 광전소자를 이용하면 에너지 생산에 대한 새로운 패러다임을 제공하면서도, 유해한 자외선을 효과적으로 차단 및 활용하여, 건강하고 지속 가능한 에너지 시스템을 구현할 수 있다.

본 연구에서는 자외선 영역 파장의 빛을 주로 흡수하며 높은 광 투과성으로 디스플레이, 센서, 착용형 기기 (wearable device) 등에 활용할 수 있는 광전소자를 만들기 위해 Ga_2O_3 와 Cu_2O 를 각각 n-type, p-type으로 이용해서 투명 광전소자(Transparent Photovoltaic, TPV)를 제작하였다. PN 접합의 공핍영역에 빛에너지가 입사되면 전자 정공 쌍이 생성되고 공핍영역 안에 형성된 전기장에 의해 정공은 p-type 반도체로 전자는 n-type 반도체로 추진력을 얻어 이동하게 된다. 이로 인해 전류가 흐르고 광전소자가 동작하게 된다. 전자의 이동에 따라서, n-type 반도체에 축적된 전자에 의해서 광전압(Photovoltage)가 발생하며, 이의 최대치의 값은 광전소자에서 개방전압(Open circuit voltage)로 나타난다.

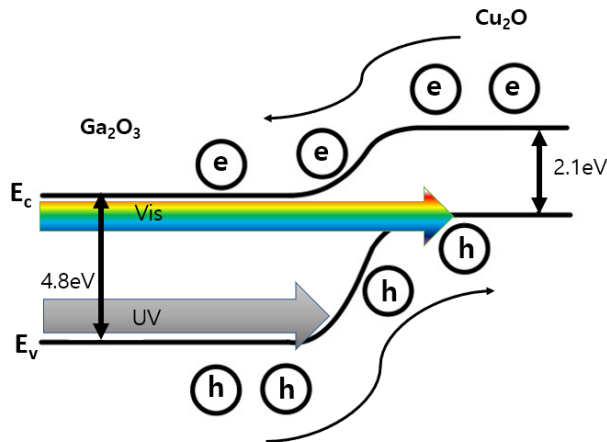


Fig. 1 Band energy diagram of the TPV device under light illumination

Ga_2O_3 와 Cu_2O 는 지구상에 풍부하게 존재하며 독성이 없는 금속 산화물이다. Fig. 1에서 보이는 것과 같이 Ga_2O_3 는 4.8 eV의 넓은 에너지 밴드 갭을 갖는 n-type 산화물로, 약 1.5–3.0 eV의 에너지를 가지는 가시광은 흡수하지 않고 투과시켜 가시광선에 투명한 특징을 가지고 있다^{2,3)}. 또한 Cu_2O 는 2.1 eV의 밴드 갭을 가지며 높은 흡수계수(10^5 cm^{-1})를 갖고 600 nm보다 짧은 파장영역에서 UV를 차단할 수 있다⁴⁾. 이 두 물질을 물리 증착법인 DC 스퍼터링 시스템과 RF 스퍼터링 시스템을 각각 이용해 안정적인 금속 산화물 이중 접합 반도체를 만들었다. 최근 Cu_2O/Ga_2O_3 의 연구는 스퍼터링 기반의 공정에 비해 원자층 증착 공정과 화학 기상 증착 공정이

주로 이루어지고 있다⁵⁾. 하지만 원자층 증착 공정은 박막의 성장 속도가 느리다는 단점을 가지고 있고 화학 기상 증착 공정은 고온에서 공정이 이루어진다는 단점을 갖는다. 이에 비교적 증착 속도가 빠르고 저온에서 공정이 이루어지는 스퍼터링 공정을 이용하면 소자의 상용화에서 이점을 가질 수 있다. 스퍼터링은 이온화된 가스 이온 원자를 증착시키려는 물질에 충돌시켜 기판에 박막을 형성하는 방법이다. 강한 전압을 가해 자유전자와 Ar 기체 간의 충돌로 플라즈마를 발생시키고 Ar 기체가 Ar⁺로 이온화되어 음의 전압이 가해진 타겟 기판에 충돌해 튀어나온 증착 물질들이 양의 전압이 가해진 증착 기판에 증착되는 과정으로 이루어진다.

소자의 최하단에는 투명 전도성 산화물(Transparent Conductive Oxide, TCO)인 FTO (Fluorine Tin Oxide)를 위치시켰다. FTO는 밴드 갭이 약 3.86 eV로 높아 가시광선 영역(380~780 nm)에서 70% 이상의 투과율을 가져 사람의 눈에 투명하고, $10^{-3} \sim 10^{-4} \Omega \cdot \text{cm}$ 의 낮은 비저항과 높은 전기 전도성을 가진다⁶⁾. 또한 FTO는 일반적으로 광전소자에서 많이 사용되는 ITO보다 가격이 상대적으로 낮고 수급이 원활한 장점이 있으며, ITO에서 전자의 확산(diffusion)이 상단의 금속 전극까지 발생하여 소자의 불안정성을 초래하는 문제를 해결하는 것에도 적합하다^{7,8)}. 또한 FTO는 ITO보다 열적으로 안정적이며, 표면 저항(sheet resistance)이 7-8 Ω/\square 정도로 ITO보다 우수하다⁹⁾.

본 연구에서는 투명한 광전소자를 구현하기 위해서 n-Ga₂O₃/p-Cu₂O의 이종접합을 구성하였으며, 하부에는 FTO의 투명 전도층을 상부에는 은 나노 와이어(Silver nanowires, AgNWs)를 이용하여 가시광 영역에서 투과도가 높은 광전소자를 구현하여 효과적인 광전소자 특성을 분석하였다.

2. 실험방법

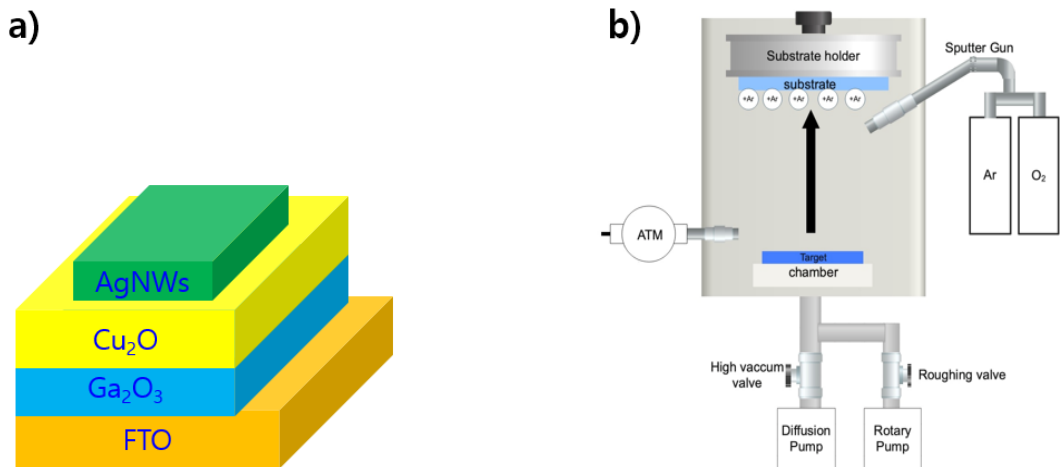


Fig. 2 (a) Schematic diagram of FTO/Ga₂O₃/Cu₂O/AgNWs device (b) Schematic diagram of sputtering system

본 실험에서는 Fig. 2(a)와 같이 기판으로 FTO-coated glass를 사용하였고, Ga₂O₃, Cu₂O, AgNWs를 순서대로 증착시켜 층을 구성하였다. 증착 전, 초음파 세척기를 사용해 아세톤, 메탄올, 증류수로 각 10분간 FTO 기

판을 세정하였다.

Fig. 2(b)는 스퍼터링 과정을 나타낸 그림이다. 스퍼터링 공정은 Physical Vapor Deposition 방식의 Magnetron Sputtering System (SNTEK-12SN048)을 사용하였다. Ga_2O_3 는 실온에서 60분 동안 RF 전력 150 W 및 공정 압력 5 mTorr, Ar 50 sccm 조건으로 RF 스퍼터링하였다. DC 스퍼터링은 타겟이 부도체일 경우 Ar^+ 의 충돌에도 전자가 분리되지 않고 스퍼터링이 진행되지 않으므로, RF 스퍼터링 방식을 이용하였다. 전기 전도성이 좋은 Cu_2O 의 경우에는 DC 스퍼터링 방식으로 증착하였다. Cu_2O 는 실온에서 8 mTorr의 공정 압력, 80 W DC 전력의 조건에서 10분 동안 DC 스퍼터링 하였으며, Ga_2O_3 상에 형성한 Cu_2O 필름은 형성되는 동안 산소 분압에 매우 민감하므로 O_2 분위기는 2, 3, 4, 5, 6 sccm으로 차이를 두었고, O_2 분위기에 따른 가장 높은 광전류와 광전압을 갖는 소자를 선택하여 실험을 진행하였다. Ar 은 50 sccm으로 유지하였다. Cu_2O 박막을 증착한 후, 진공에서 10분동안 250°C로 어닐링하고, 소자의 상부에는 1차원 구조의 총횡비가 높아 우수한 광학적 투과율을 확보할 수 있는 직경 20 nm, 길이 20 μm 의 은 나노 와이어를 2500 rpm의 속도로 스핀 코팅하여 표면 저항이 12.6 Ω/\square 으로 우수한 전도성을 나타내는 투명 전도성 전극을 구성하였다. 소자의 증착 구조를 확인하기 위해 전계 방출형 주사 현미경(Field Emission Scanning Electron Microscope, FE-SEM)을 사용해 박막 물질 구조를 확인하고, 투과율과 흡수율을 측정하기 위해 분광 광도계(UV-vis spectro photometer, UV-2600)를 이용하였다.

3. 결과 및 토의

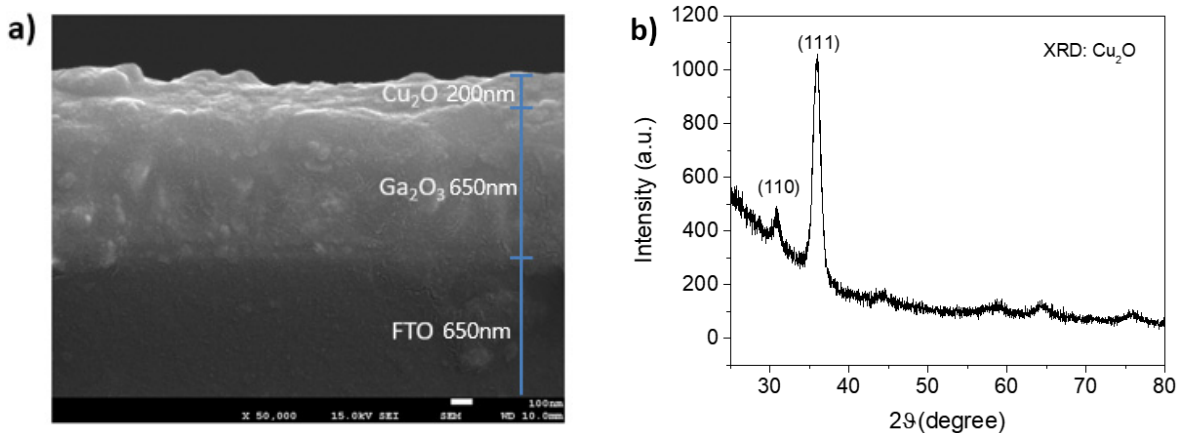


Fig. 3 (a) FE-SEM image of FTO/ Ga_2O_3 / Cu_2O /AgNWs (b) XRD pattern of deposited Cu_2O

Fig. 3 (a)는 주사전자 현미경을 이용해 FTO/ Ga_2O_3 / Cu_2O 의 단면을 촬영한 사진이다. 단면 사진을 통해 FTO, Ga_2O_3 , Cu_2O 의 두께가 각각 650 nm, 650 nm, 200 nm로 증착된 구조를 확인할 수 있다. Fig. 3(b)는 Cu_2O 상의 X-ray diffraction (XRD) 피크를 나타내었으며 36°에서 가장 높은 강도를 보였으며 그때의 결정면의 방향은 (111)로 관측되었다. 이 결과는 상온에서 스퍼터링되어 얻어진 산화구리 박막의 값을 나타내는 JCPDS-45-0937의 패턴과 일치하여 Cu_2O 박막이 성장하였음을 확인할 수 있다.

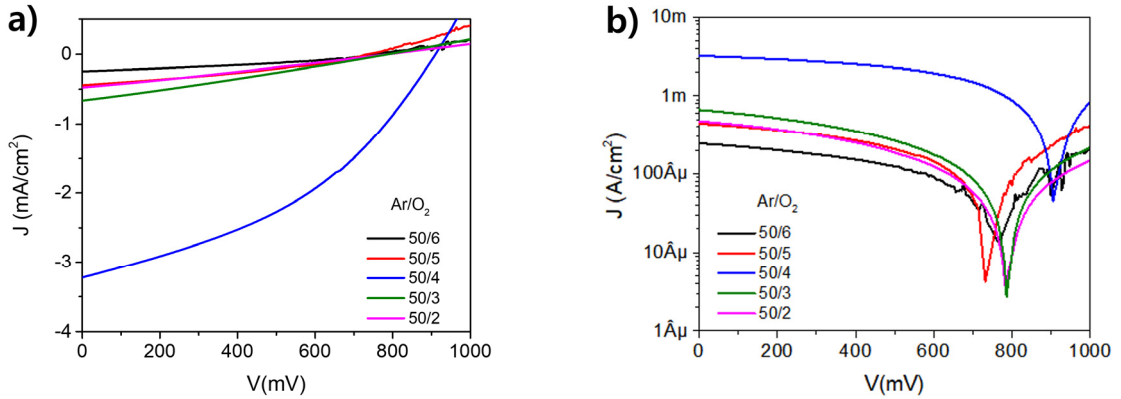


Fig. 4 (a) Linear I-V Characteristics of device (b) Semilogarithmic I-V Characteristics of device

광전소자 특성을 평가하기 위해 소자에 365 nm 파장의 UV LED 광원을 10 mW/cm² 강도로 비추었을 때의 I-V 특성을 선형과 로그 그래프로 각각 Fig. 4(a), (b)에 나타내었다. 위 소자는 Ar의 유량을 50 sccm으로 고정하고 O₂를 2 sccm부터 6 sccm의 유량에서 Cu₂O를 성장하였을 때 4 sccm에서 광전소자가 3.2 mA/cm²와 910 mV의 가장 높은 광전류와 광 전압을 보였다. 이때 소자의 Fill Factor (FF)는 27%이므로 식(1)에 따라 10 mW/cm² 강도의 UV LED 아래에서 7.86%의 광전 효율을 가진다.

$$PCE = \frac{V_{oc} \times J_{sc} \times FF}{P_{in}} \tag{1}$$

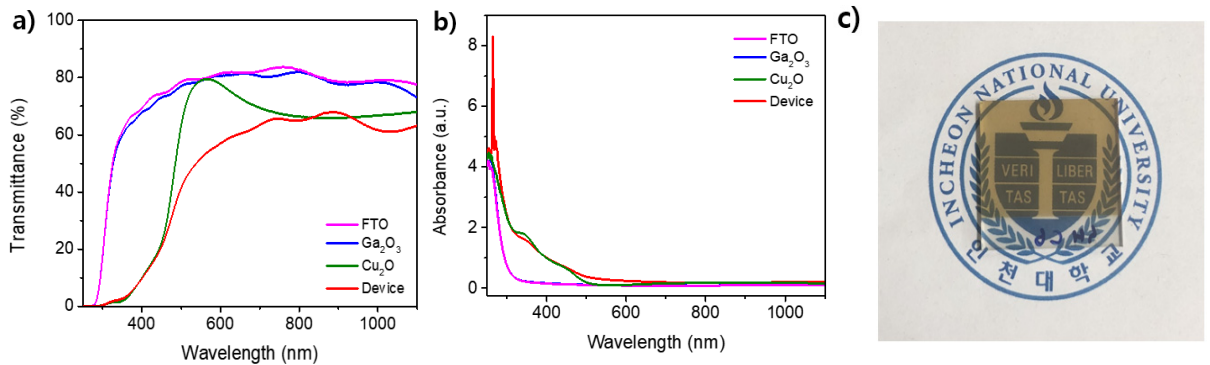


Fig. 5 (a) Transmittance of each layer by wavelength (b) Absorbance of each layer by wavelength (c) Photograph of FTO/Ga₂O₃/Cu₂O/AgNWs

Fig. 5의 소자는 Cu₂O를 4.0 sccm의 산소 유량에서 증착한 FTO/Ga₂O₃/Cu₂O/AgNWs 구조를 가지며, Fig. 5(a)는 가시광 투과도에 대한 특성을 측정하기 위해 분광 광도계를 사용하여 파장대별 투과도를 관측한 그래프이다. 투과율은 반사되거나 흡수되지 않고 얼마나 많은 양의 빛이 투과하는지 나타내는 지표이다. TPV 소자는 가시광선 영역인 600 nm에서 약 60%의 투과율을 보이며, Fig. 5(c)에서 소자가 높은 가시성과 투과율을 가짐을

확인할 수 있다. 또한 자외선 영역에서는 투과율의 저하를 보이는데, 이는 단파장에서 자외선 영역의 빛 대부분이 FTO/Ga₂O₃/Cu₂O/AgNWs 소자에 흡수됨을 의미한다. 이는 투과율 그래프 Fig. 5(b)에서도 확인할 수 있다. 실험 결과를 통해 소자에 빛이 입사되면 단파장에 민감하게 반응하여 자외선은 흡수하고, 그보다 큰 파장의 빛은 투과시켜 투명한 UV 광전소자로서 활용할 수 있음을 알 수 있다.

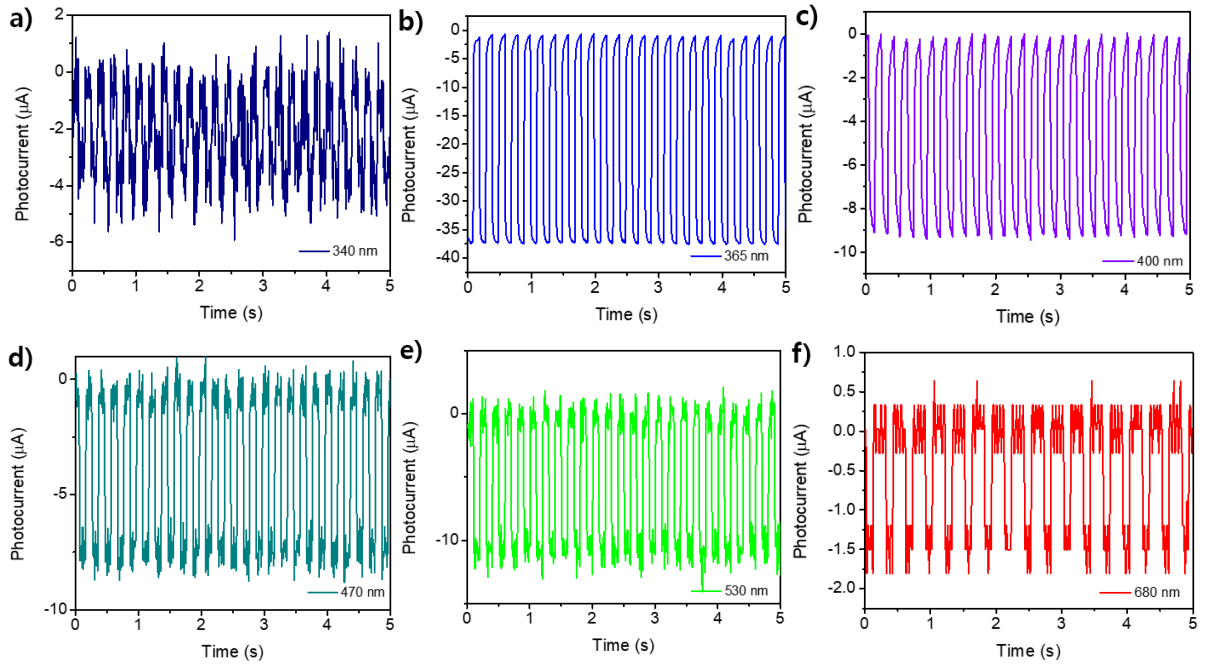


Fig. 6 Photocurrent when irradiated with(a) 340 nm, (b) 365 nm, (c) 400 nm, (d) 470 nm, (e) 530 nm, (f) 680 nm wavelength light

광전소자의 성능을 분석하기 위해 파장별로 생성되는 광전류를 측정된 결과가 Fig. 6에 나타나 있다. 340 nm 파장의 빛에서 광전류는 5.62 μA , 365 nm에서는 37.5 μA , 400 nm 파장에서는 9.44 μA , 470 nm에서는 8.72 μA , 530 nm에서는 11.3 μA , 680 nm에서는 1.76 μA 로 나타났다.

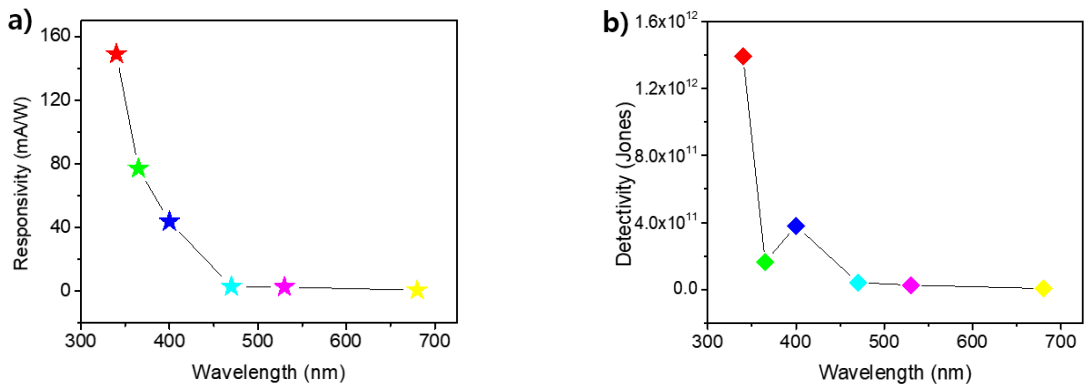


Fig. 7 (a) Responsivity and (b) Detectivity when irradiated with 340 nm, 365 nm, 400 nm, 470 nm, 530 nm, 680 nm wavelength light

파장을 달리하여 광전소자에 입사하였을 때 검출되는 광전류의 양이 달라진다¹⁰⁾. 빛의 파장에 따른 입사광의 전력과 출력 전류량의 비를 응답도(Responsivity)라 하며, 다음 식과 같이 계산할 수 있다.

$$R = \frac{I_{photo} - I_{dark}}{P_{optical} * A} \quad (2)$$

광전소자의 출력 전류량에 대한 비를 구하기 위해서, 광원이 존재하는 경우를 광전류(I_{photo}) 광원이 없는 상태에서의 값을, 암전류(I_{dark})라 한다. 또한 소자에 입사하는 전력량은 소자의 면적(A)과 단위면적 당 광자에너지($P_{optical}$)의 곱으로 나타내었다. 응답도는 암전류와 광전류의 차이가 클수록 성능이 좋으며, 응답도가 높을수록 민감도와 신뢰성이 높은 광전소자이다^{11,12)}. 또한 소자가 얼마나 빛을 잘 흡수하는지에 대한 지표인 검출도(Detectivity)는 다음 식에 의해 결정된다.

$$D = \frac{R}{\sqrt{2 * I_{dark} * q}} \quad (3)$$

양자 효율(Quantum efficiency)은 반도체에 입사하는 광자의 양 대비 발생하는 전자 양의 비를 뜻한다. 양자 효율이 높으면 높을수록 물질에 입사하는 광자의 양 대비 발생하는 전자의 양이 늘어나 출력전류가 증가하므로 더 높은 성능의 광전소자임을 나타낸다. 양자 효율은 구성 물질에 따라 다르고, 빛의 파장에 따라서도 달라진다. 양자 효율의 전자와 광자의 갯수를 실측하기에 어려움이 있으므로 빛의 파장에 따라 가변하는 특성을 이용해 빛의 파장에 따른 응답도와 검출도의 특성에 의해 계산될 수 있다. 식(1)을 양자 효율을 포함하는 관계식으로 나타내면 다음과 같다¹³⁾.

$$R = \eta \frac{\lambda}{hc} q \quad (4)$$

η 는 양자효율, λ 는 빛의 파장(nm), h 는 플랑크 상수, c 는 빛의 속도, q 는 전자 한 개의 전하량이다. 식을 살펴보면 광 응답도와 양자 효율은 비례함을 알 수 있다. 광 검출도와 양자 효율 간의 관계를 나타낸 식은 다음과 같다.

$$D^* = \frac{\eta \frac{\lambda}{hc} q}{\sqrt{2 * I_{dark} * q}} \quad (5)$$

따라서 양자 효율과 응답도, 검출도 모두 비례관계를 가지고 높은 양자 효율을 갖는 소자는 효과적으로 광자

를 전자로 전환할 수 있다. Table 1과 Fig. 7에서 관찰할 수 있는 결과는 소자에 짧은 파장대의 빛을 조사하였을 때 높은 응답도와 검출도, 양자 효율을 보이며 반대로 파장대가 높아질수록 응답도와 검출도, 양자 효율이 낮아진다는 것이다. 이러한 결과는 자외선 영역의 빛에서는 소자가 민감하게 반응해 인간의 피부와 눈 등에 해로운 자외선의 많은 부분의 광자를 전기신호로 바꾸며 투과시키지 않는다는 것을 의미하며, 자외선보다 높은 파장의 빛은 대부분 소자에게 반응되지 않고 그대로 투과됨을 의미한다.

Table 1 Each figure according to the wavelength of the Ga₂O₃/Cu₂O heterojunction

Wavelength (nm)	I _{photo} (μA)	I _{dark} (μA)	I _{photo} -I _{dark} (μA)	Area (cm ²)	Current (mW/cm ²)	Responsivity (mA/W)	Detectivity (Jones)	Quantum efficiency (%)
340	5.62	0.036	5.85	0.25	0.15	149	1.39×10 ¹²	54.33
365	37.5	0.69	36.81	0.25	1.90	77	1.64×10 ¹¹	26.19
400	9.44	0.041	9.40	0.25	0.86	44	3.81×10 ¹¹	13.55
470	8.72	0.014	8.71	0.25	12.3	2.83	4.23×10 ¹⁰	0.747
530	11.3	0.029	11.27	0.25	17.3	2.61	2.71×10 ¹⁰	0.61
680	1.76	0.025	1.74	0.25	11.7	0.59	6.64×10 ⁹	0.11

4. 결론

본 연구는 투명한 광전소자 성능을 가지는 n-Ga₂O₃/p-Cu₂O 이종접합을 기반으로 광대역의 광검출 기능을 가지는 투명 광전소자에 대한 것이다. 제작한 소자는 600 nm의 파장 영역에서 가시광 투과도 약 60%를 가진다. 입사한 빛에 대해서 능동적인 반응을 보이며 태양광 발전 특성으로는 단락전류 3.2 mA/cm²와 910 mV의 큰 개방전압을 가지는 특성을 가진다. 이러한 태양광 발전 특성을 이용하여, 자가 구동하는 광전소자를 구성하여, 340 nm 파장 영역에서 149 mA/W의 응답도와 1.39×10¹² Jones의 검출도 및 약 54.33%의 양자 효율을 가지며 투명소자의 특성을 확인하였다. 이러한 투명 광전소자는 에너지 측면에서 사람의 눈에 보이지 않는 에너지 생산 기반을 제공할 수 있으며, 휴먼 일렉트로닉스에 적용하여서는 보이지 않는 인터페이스를 제공하는 장점을 가지므로, 넓은 분야에 적용이 될 것으로 예상된다.

후기

본 연구는 산업통상자원부의 지원을 받아 수행한 파괴적 혁신 프로젝트 연구 과제입니다(No. 20026183).

REFERENCES

1. Laikova, K. V., Oberemok, V. V., Krasnodubets, A. M., Gal'chinsky, N. V., Useinov, R. Z., Novikov, I. A., Temirova, Z. Z., Gorlov, M. V., Shved, N. A., Kumeiko, V. V., Makalish, T. P., Bessalova, E. Y., Fomochkina, I. I., Esin, A. S., Volkov, M. E., and Kubyshekin, A. V., Advances in the Understanding of Skin Cancer:

- Ultraviolet Radiation, Mutations, and Antisense Oligonucleotides as Anticancer Drugs, *Molecules*, Vol. 24, No. 8, pp. 1516, 2019, <https://doi.org/10.3390/molecules24081516>.
2. Kumar, N., Patel, M., Kim, J., Jeong, C., and Wong, C., Flexible Transparent Photovoltaics for Ultra-UV Photodetection and Functional UV-shielding based on Ga₂O₃/Cu₂O heterojunction, *Applied Materials Today*, Vol. 29, pp. 101620, 2022, <https://doi.org/10.1016/j.apmt.2022.101620>.
 3. Nguyen, T., Patel, M., Kim, S., and Kim, J., Transparent Photovoltaics Cells, *Information and Control Symposium*, Vol. 2022, No. 10, pp. 165-166, 2020.
 4. Shibasaki, S., Honishi, Y., Nakagawa, N., Yamazaki, M., Mizuno, Y., Nishida, Y., Sugimoto, K., and Yamamoto, K., Highly Transparent Cu₂O Absorbing Layer for Thin Film Solar Cells, *Appl. Phys.*, Vol. 119, No. 24, pp. 242102, 2021, <https://doi.org/10.1063/5.0072310>.
 5. Hagyoul, B., Adam, C., Xing, S., Jinhyun, N., Mengwei, S., Wonil, C., Gang, Q., Xiao, L., Sami, A., Haiyan, W., Dmitry, Z., and Peide, Y., Solar-Blind UV Photodetector Based on Atomic Layer-Deposited Cu₂O and Nanomembrane β -Ga₂O₃ pn Oxide Heterojunction, *ACS Omega*, Vol. 4, pp. 20756-20761, 2019, <https://doi.org/10.1021/acsomega.9b03149>.
 6. Vinutha, K., NaveenKumar, K. B., Tejas, M. K., Jaikumar, B., Sumanth Kumar, D., and Mahesh H. M., Natural Dye Sensitized Solar Cells Using Anthocyanin Pigment of Strawberry as Sensitizers, *Imperial Journal of Interdisciplinary Research(IJIR)*, Vol. 2, No.10, pp. 1011-1016, 2016.
 7. Jørgensen, M., Norrman, K., and Krebs, F. C., Degradation and Stability of Polymer and Organic Solar Cells, *Solar Energy Materials and Solar Cells*, Vol. 92, No. 7, pp. 686-714, 2008, <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2008.01.005>.
 8. Cheng, P. and Zhan, X., Stability of Organic Solar Cells: Challenges and Strategies, *Chemical Society Reviews*, Vol. 45, No. 9, pp. 085220, 2016, <https://doi.org/10.1039/C5CS00593K>.
 9. Way, A., Luke, J., Evans, A. D., Li, Z., Kim, J., Durrant, J., Lee, H., and Tsoi, W., Fluorine Doped Tin Oxide as an Alternative of Indium Tin Oxide for Bottom Electrode of Semi-transparent Organic Photovoltaic Devices, *AIP Advances*, Vol. 9, No. 8, pp. 5104333, 2021, <https://doi.org/10.1063/1.5104333>.
 10. Akiyama, H. and Yoda, T., Method for Measuring Light Transmittance and Apparatus Therefor, JP3814155B2, pp. 1-7, filed March 2001, issued September 2002.
 11. Kim, J., Lee, G., and Choi, I., Transparent UV Photodetectors, *Information And Control Symposium*, Vol. 2017, No. 10, pp. 114-115, 2017.
 12. Qin, Y., Li, L., Zhao, X., Tompa, G., Dong, H., Jian, G., He, Q., Tan, P., Hou, X., Zhang, Z., Yu, S., Sun H., Xu, G., Miao, X., Xue, K., Long, S., and Liu, M., Metal-Semiconductor-Matel ϵ -Ga₂O₃ Solar-Blind Photodetectors with a Record-High Responsivity Rejection Ratio and Their Gain Mechanism, *American Chemical Society*, Vol. 7, No. 3, pp. 812-820, 2020, <https://doi.org/10.1021/acsp Photonics.9b01727>.
 13. Arora, K., Goel, N., Kumar, M., and Kumar, M., Ultrahigh Performance of Self-Powered β -Ga₂O₃ Thin Flim Solar-Blind Photodetector Grown on Cost-Effective Si Substrate Using High-Temperature Seed Layer, *American Chemical Society*, Vol. 5, No. 6, pp. 2391-2401, 2018, <https://doi.org/10.1021/acsp Photonics.8b00174>.