

가시광 수중 무선통신을 위한 이종접합 유기물 반도체 기반 고감도 포토트랜지스터 연구

이정민¹, 서성용², 임영수³, 백강준^{1,4} 

¹ 부경대학교 스마트그린기술융합공학과

² 부경대학교 화학과

³ 부경대학교 신소재시스템전공

⁴ 부경대학교 나노융합공학과

Photo-Transistors Based on Bulk-Heterojunction Organic Semiconductors for Underwater Visible-Light Communications

Jeong-Min Lee¹, Sung Yong Seo², Young Soo Lim³, and Kang-Jun Baeg^{1,4}

¹ Department of Smart Green Technology Engineering, Pukyong National University, Busan 48513, Korea

² Department of Chemistry, Pukyong National University, Busan 48513, Korea

³ Department of Materials System Engineering, Pukyong National University, Busan 48513, Korea

⁴ Department of Nanotechnology Engineering, Pukyong National University, Busan 48513, Korea

(Received November 29, 2022; Revised December 5, 2022; Accepted December 6, 2022)

Abstract: Underwater wireless communication is a challenging issue for realizing the smart aqua-farm and various marine activities for exploring the ocean and environmental monitoring. In comparison to acoustic and radio frequency technologies, the visible light communication is the most promising method to transmit data with a higher speed in complex underwater environments. To send data at a speedier rate, high-performance photodetectors are essentially required to receive blue and/or cyan-blue light that are transmitted from the light sources in a light-fidelity (Li-Fi) system. Here, we fabricated high-performance organic phototransistors (OPTs) based on P-type donor polymer (PTO2) and N-type acceptor small molecule (IT-4F) blend semiconductors. Bulk-heterojunction (BHJ) PTO2:IT-4F photo-active layer has a broad absorption spectrum in the range of 450~550 nm wavelength. Solution-processed OPTs showed a high photo-responsivity >1,000 mA/W, a large photo-sensitivity >10³, a fast response time, and reproducible light-On/Off switching characteristics even under a weak incident light. BHJ organic semiconductors absorbed photons and generated excitons, and efficiently dissociated to electron and hole carriers at the donor-acceptor interface. Printed and flexible OPTs can be widely used as Li-Fi receivers and image sensors for underwater communication and underwater internet of things (UIoTs).

Keywords: Organic phototransistors, Organic semiconductors, Bulk-heterojunction, Underwater communication, Visible light wireless communication

✉ Kang-Jun Baeg; kangjun100@pknu.ac.kr

Copyright ©2023 KIEEME. All rights reserved.
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

ICT 기반 디지털 기술을 바탕으로 촉발된 4차 산업혁명은 산업·국가·사회 전반의 혁신을 촉진하고 있으며, 해양/수산 분야도 ICT 기술을 활용하여 성장이 둔화된 산업의 혁신을 꾀하기 위한 노력이 활발히 진행 중이다. 특히, 파급효과와 상용화 가능성이 큰 자율운행 선박, 스마트 항만, 스마트양식 등을 구현을 위한 핵심기술로써 해양수산 분야에 특화된 통신기술의 발달이 중요하다 [1,2]. 또한, 해양에 관한 관심 증가로 전세계적으로 약 800여 종 이상의 수중 드론이 개발되어 해양탐사 및 자원개발에 사용되고 있으며, 점차 다양하고 복잡해지고 있는 이들의 원활한 임무 수행을 위해 해저 정밀 항법장치, 소나, 수중 통신 등의 핵심기술이 필요하다. 이 중 가장 극복해야 할 분야가 바로 수중(underwater) 통신기술이다 [3]. 수중 통신 기술은 일반적으로 radio frequency (RF), 음향, 광 통신으로 구분된다. RF통신의 경우 대기 중에서 매우 높은 통신 속도를 가지고 있지만 수중에서는 전자기파의 도달까지의 거리가 매우 짧아 수중 무선 통신에 쓰이기에는 어렵다 [4]. 현재 수중 통신 기술에 가장 많이 쓰이고 있는 음향파 통신은 신호 감쇠가 작고 열적 안정성이 우수하여 가장 광범위하게 사용되고 있다. 하지만 수중에서는 온도 변화 때문에 발생하는 잡음 및 음파의 반사와 굴절에 의한 간섭이 존재하며, 느린 음파 속도로 인해 고속통신에 부적합하다 [5]. RF와 음향 통신이 가지고 있는 이러한 문제에 대한 대안으로 순수한 바닷물의 흡수계수(absorption coefficient)가 가장 낮은 수중장에 해당하는 블루 또는 청록색 영역의 레이저를 활용한 가시광 무선통신(light fidelity, Li-Fi) 기술에 대한 연구가 주목받고 있다 [6].

수중 무선통신에 사용되는 청색광 영역의 빛의 경우 수중 전파 속도가 광속이므로 고속의 데이터 전송이 가능하다. 또한, 해수의 온도 변화와 분포에 대한 영향이 없고 해수면에서 발생하는 선박엔진 소음 등의 잡음에도 무관하다. 광학 분야에서 레이저가 가지는 단색성, 지향성, 고휘도 특성을 활용해 초고속 수중 통신에 활용한다면 해양 탐사, 통신, 영상, 국방 분야에서 폭넓게 활용할 수 있는 획기적 계기가 된다 [7]. 해양에서의 빛은 플랑크톤과 같은 미립자들에 의해 많은 감쇠현상이 일어난다. 따라서 수중 광 통신에 요구되는 수신기(receiver, RX)의 광 검출기는 약한 빛에도 매우 높은 감도를 가지고 있어야 하며, 특정한 파장에 반응할 수 있어야 한다. 현재 광 통신에는 광 검출기로써 포토-다이오드가 많이 사용되고 있다. 그러나 실제로 포토다이오드는 상대적으로 높은 잡음 강도를 가지고 있으며, 임계 검출 값이 높아 수신기로 사용하기에는 부족

한 측면이 있다.

이에 대한 대안으로 더 높은 감도와 낮은 잡음을 가지고 있는 포토-트랜지스터(photo-transistor)에 대한 연구가 이루어지고 있다 [8]. 포토-트랜지스터는 다이오드보다 높은 감도를 가지고 있으며, 낮은 노이즈로 인하여 고효율/고감도 광-센서 소자로서 주로 사용된다. 실리콘이나 산화물 등의 무기물 반도체 기반 광-센서들은 높은 신뢰성과 우수한 성능을 가지고 있다 [8]. 하지만 일반적으로 박막 증착을 위해 고온과 진공 공정이 요구되며, 높은 강도와 깨지기 쉬운 물리적인 특성 한계 때문에 유연하고 자유로운 변형이 가능한 광-센서 및 응용부품 개발에는 제약이 많다. 따라서, 상압/용액공정을 통해 저비용으로 제작 가능한 유기물 반도체 기반 포토-트랜지스터가 주목받고 있다 [9]. 활성층으로 유기물 반도체를 사용하는 유기물 포토-트랜지스터(organic phototransistors, OPTs)는 반도체에 조사되는 빛(photon)의 흡수를 통해 분자의 에너지 상태를 여기(excited)시켜 엑시톤(exciton)을 생성하거나, 분자의 형태 변화를 유도함으로써 광 전류를 형성한다. 전계-효과 트랜지스터(field-effect transistor, FET)는 신호를 전기적 신호로 변환하고 그 신호를 증폭하는 역할을 한다. 이로 인해 낮은 광량의 빛에서도 높은 감도를 가지는 고성능 광-센서 구현이 가능하다. 또한, 유기물 반도체는 공액-구조의 분자구조를 설계하고 합성함으로써 자외선 영역(UV)부터 근적외선 영역(NIR)까지 넓은 영역대의 빛을 흡수한다는 점에서 다양한 응용 분야에 활용 가능하다 [10]. OPT에는 저분자 또는 고분자 물질이 단일 활성층으로 사용되거나, 다양한 물질의 혼합과 이중층(bi-layer) 또는 벌크 이종접합(bulk-heterojunction, BHJ) 구조 제작을 통해 개발된다. 일반적으로 사용되는 저분자 물질로는 DNTT, Pentacene, C8-BTBT, PCBM 등이 있으며, 높은 유연성을 가지는 고분자 물질로는 P3HT, F8T2, DPP-DTT, PTAA 등이 있다 [11].

본 연구에서는 가시광 수중 무선통신에 응용하기 위해 청색광 흡수 파장대를 가지는 고분자 반도체와 저분자 물질의 BHJ 구조 도입을 통해 상대적으로 높은 엑시톤 결합 에너지를 갖는 유기물 반도체의 효과적인 전자-정공 해리를 유도해 우수한 광전(optoelectronic) 특성을 가지는 OPT 소자를 개발하였다.

2. 실험 방법

2.1 소자 제작

그림 1(a)는 top-gate/bottom-contact (TG/BC) 구조

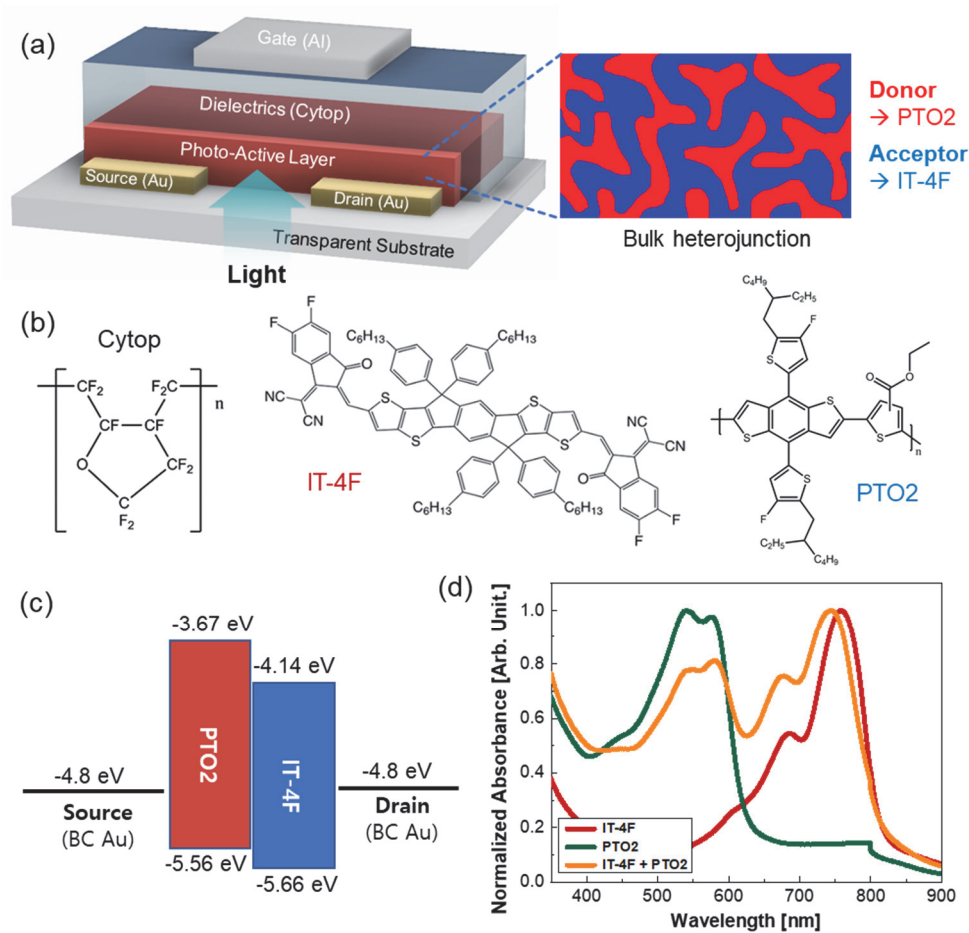


Fig. 1. (a) Device structure of organic phototransistors based on bulk-heterojunction PTO2 and IT-4F semiconductors, (b) chemical structures of gate dielectric (Cytop™) and semiconductors (IT-4F and PTO2), (c) Energy band structure of organic semiconductors, and (d) UV-VIS-NIR absorption spectra of pristine IT-4F, pristine PTO2, and IT-4F:PTO2 blend (2:1 wt%) layers.

의 OPT 소자 모식도이다. OPT 제작을 위하여 유리 기판에 포토리소그래피 공정으로 2~20 μm 채널 길이와 1 mm의 넓이를 가지는 소스-드레인 전극(Au/Ni: 두께=15 nm/3 nm)을 형성하였다. 제조된 기판은 아세톤과 이소프로필알코올(IPA)을 이용해 각각 20분 동안 초음파 세척을 진행한 후, 고압 질소를 이용해 건조한 후 30분 동안 오븐에 넣어 잔여 용매를 완전히 제거하였다. 이후 30분의 UV/O₃ 처리를 통해 표면의 잔류 유기물을 제거하고 표면 접착력을 높여 주었다. 본 연구에서 청록색 광 흡수를 위해 사용된 P형 고분자 반도체인 poly[(2,6-(4,8-bis(5-(2-ethylhexyl)thiophen-2-yl)-benzo[1,2-b:4,5-b']dithiophene))-alt-(2,2-ethyl-3(or 4)-carboxylate-thiophene)] (PTO2, M_w=63 kDa)는 Ossila (UK)에서 구매하여 사용하였으며, 후처리 과정 없이 그대로 사용하였다. BHJ 구조의 도입을 통해 이종 계면에서 전자와 정공의 분리를 돕기 위해 2,2'-

[[6,6,12,12-Tetrakis(4-hexylphenyl)-6,12-dihydro-dithieno[2,3-d:2',3'-d']-s-indaceno[1,2-b:5,6-b']dithiophene-2,8-diyl] bis[methyldiyl(5,6-difluoro-3-oxo-1H-indene-2,1(3H)diylidene))] bis[propane-dinitrile] (IT-4F, Lumtec Inc., Taiwan)를 PTO2와 혼합하여 사용하였다. 본 연구에 사용된 PTO2와 IT-4F의 화학구조를 그림 1(b)에 나타내었다.

IT-4F와 PTO2은 각각 5 mg/ml의 농도로 P-xylene 용매에 65°C의 온도에서 하루 동안 용해시켰다. 각 용액이 완벽히 용해된 다음 부피 비율에 따라 용액을 혼합한 뒤 3시간 이상 magnetic stirring 방법을 통해 용액이 고르게 혼합될 수 있도록 하였다. 혼합된 반도체 용액을 스핀-코팅(1,500 rpm, 60s)을 이용하여 기판 위에 약 20 nm 정도의 두께로 균일하게 도포하였다. 스핀-코팅 방법은 원심력을 통해 짧은 시간 안에 균일한 박막을 형성할 수 있으며, 용

액의 농도와 스펀 속도 제어를 통해 최적의 반도체 두께를 확보하였다. 이후 150°C 핫 플레이트에서 약 1시간 동안 어닐링하여 잔류 용매를 제거하고, 혼합된 반도체 물질 간의 적절한 상분리를 통한 BHJ 구조를 형성하도록 유도하였다.

게이트 절연체로 사용된 불소계 고분자인 Cytop™ (Ashahi Glass, Japan)은 희석 용매와 2:1 비율로 혼합하여 용액공정을 진행하였다. 2,000 rpm, 60s 조건에서 스펀-코팅하여 박막을 형성하였고, 80°C의 온도에서 1시간 열처리를 통해 잔류용매를 완전히 제거해 주었다. 모든 공정은 질소 분위기의 글러브박스 내부에서 진행하였다. 마지막으로 게이트 전극 패턴 제작을 위해 금속 웨도우 마스크를 이용해 35 nm 두께의 알루미늄(Al)을 10^{-6} Torr 이하 고진공에서 열-증착하여 최종적으로 소자를 완성하였다.

2.2 측정 및 분석

제작한 OPT 소자의 트랜지스터 특성을 확인하기 위하여 질소 분위기의 글러브 박스 내부에 설치된 probe station (MS Tech., Korea)와 Keithley 4200 반도체 특성분석 장비(Agilent, USA)를 사용하여 transfer plots (드레인 전류 I_d vs. 게이트 전압 V_g 곡선)을 측정하였다. 이를 위해 드레인 전압(V_d)를 ± 10 V (linear region), ± 50 V (saturation region)로 고정된 뒤, V_g 를 -60 V부터 60 V까지 0.5 V 간격으로 전압을 가해 주었다. 3D프린터로 자체 제작한 bottom-light exposure 측정용 지그를 이용해 450 nm, 488 nm, 532 nm의 파장을 가진 레이저를 조사하여 OPT 소자의 광-센서 특성을 확인하였다. 레이저 다이오드는 power-supply 장비를 통해 전력을 조절하여 밝기와 파워를 조절하였다.

반도체 박막 표면의 morphology 분석을 위해 atomic force microscopy (AFM, Icon-PT-PLUS, Bruker, USA) 방법을 이용해 표면 이미지를 측정하였다. 또한, IT-4F 저분자 엑셉터 물질과 PTO2 고분자 도너 물질의 혼합 비율에 따라 흡수되는 가시광 영역의 파장대를 확인하기 위하여 자외선-가시광선-적외선(UV-VIS-NIR) 분광계(V-670, JASCO, Inc., Japan)를 사용하여 광-흡수 스펙트럼을 측정하였다. 세척 후 UV-O₃ 처리된 유리기판에 스펀-코팅으로 반도체 박막을 형성하였으며, 측정 파장대는 유리기판이 흡수하지 않는 400~1,200 nm에서 진행하였다.

3. 결과 및 고찰

본 연구에서 N-type 반도체로 사용된 IT-4F는 비폴러

렌 엑셉터로 태양전지 분야에서 많이 쓰이고 있는 3,9-bis(2-methylene-(3-(1,1-dicyanomethylene)-indanone))-5,5,11,11-tetrakis(4-hexylphenyl)-dithieno[2,3-d':2',3'-d']-s-indaceno[1,2-b:5,6-b']dithiophene (ITIC)의 말단 페닐핵실기가 불소로 치환된 형태의 분자이다 [12]. IT-4F의 highest occupied molecular orbital (HOMO)와 lowest unoccupied molecular orbital (LUMO) 준위는 각각 -5.66 eV, -4.14 eV이고 밴드갭은 1.52 eV로 불소원자가 가지는 높은 전자를 끌어당기는 힘으로 인해 ITIC에 비해 낮은 에너지 준위를 보여준다 [그림 1(c)]. 이는 IT-4F가 가지는 우수한 화학적 안정성과 낮은 에너지 준위로 인해 광-활성층으로 이용된 BHJ 구조 유기물 반도체의 엑셉터-도너의 계면에서 엑시톤의 해리를 돕는다. P-type 반도체로 사용된 PTO2는 HOMO/LUMO 준위가 -3.67 eV/-5.56 eV이며, benzodithiophene donor (D)와 싸이오펜 카복실레이트 acceptor (A) 성분을 주축로 가지는 넓은 밴드갭을 가지고 있는 D-A 구조의 공중합체 물질이다 [13]. IT-4F 엑셉터 물질과 HOMO 에너지 준위의 차이는 0.1 eV로 차이가 매우 낮은 수준이지만, 두 물질 간의 매우 큰 분자 정전기 전위의 차이로 인해 유도된 분자 간 전기장이 엑시톤의 해리를 도와 효율적인 물질 조합을 이룬다 [14]. 그림 1(d)는 UV-VIS-NIR 측정 결과를 나타내며, IT-4F 저분자 엑셉터 필름의 경우 적색과 낮은 근적외선(NIR) 영역에서 가장 높은 피크를 보여준다. 반면 PTO2 고분자 도너의 경우에는 청록색에서 녹색 영역에서 넓은 흡광도를 보여주었다. 혼합 반도체 박막의 경우 IT-4F와 PTO2가 가지는 흡광 피크를 모두 가지는 모습을 보여주었다. 또한, IT-4F와 PTO2를 2:1, 1:1, 1:2 wt% 비율로 혼합하여 필름을 제작하였을 경우 피크의 상대적 크기를 제어할 수 있었다. 도너 물질의 비율이 늘어날수록 녹색 영역에서 높은 흡광도를 보여주었으며, 도너물질의 비율이 매우 낮을 때도 비교적 넓은 피크가 나타났다.

BHJ 구조에서 엑셉터-도너의 비율은 매우 중요하다. 하지만 PTO2 도너의 비율이 늘어나 청록색 영역의 흡수가 증가한다고 해도 전기적 특성에서는 과도한 상극 캐리어의 축적으로 인해 전하 이동이 방해될 수 있다. 따라서 적절한 엑셉터-도너 비율을 설정하기 위하여 OFET 소자 제작을 통한 전기적 특성 파악과 함께 AFM을 이용한 반도체 박막의 표면 상태를 분석하였다. 그림 2는 PTO2와 IT-4F 단독 물질과 두 반도체를 혼합한(PTO2:IT-4F blend, 1:2 wt%) 박막의 표면 morphology를 보여준다. IT-4F의 경우 비교적 큰 입자 크기를 가진 저분자 물질들이 확인되었고, PTO2 박막의 경우 매우 평평하고 고른 박막이 형성된 것을 확인할 수 있었다. 엑셉터-도너 혼합 박막은 큰 입자

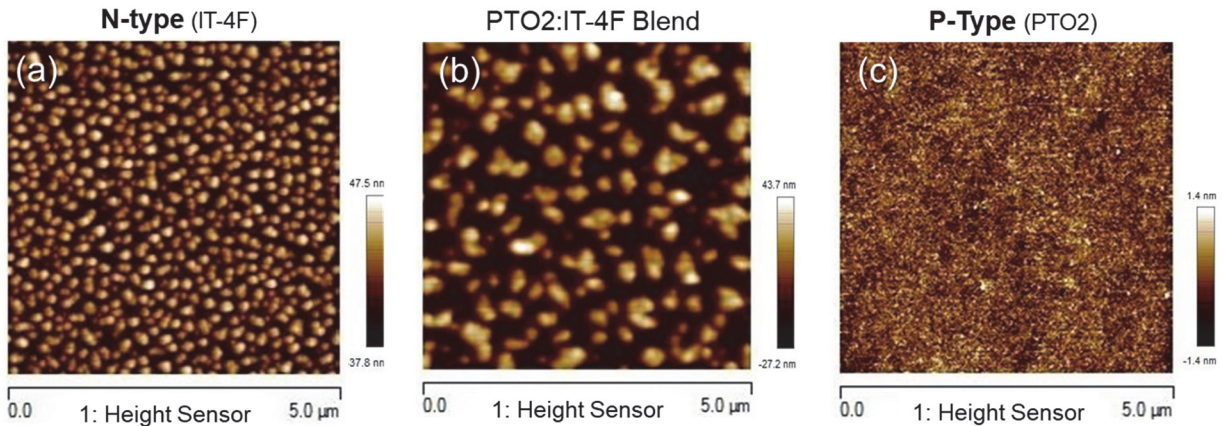


Fig. 2. AFM images of photo-active semiconductor films; (a) pristine n-type IT-4F, (b) PTO2:IT-4F (1:2 wt%) blend, and (c) pristine p-type PTO2 semiconductors.

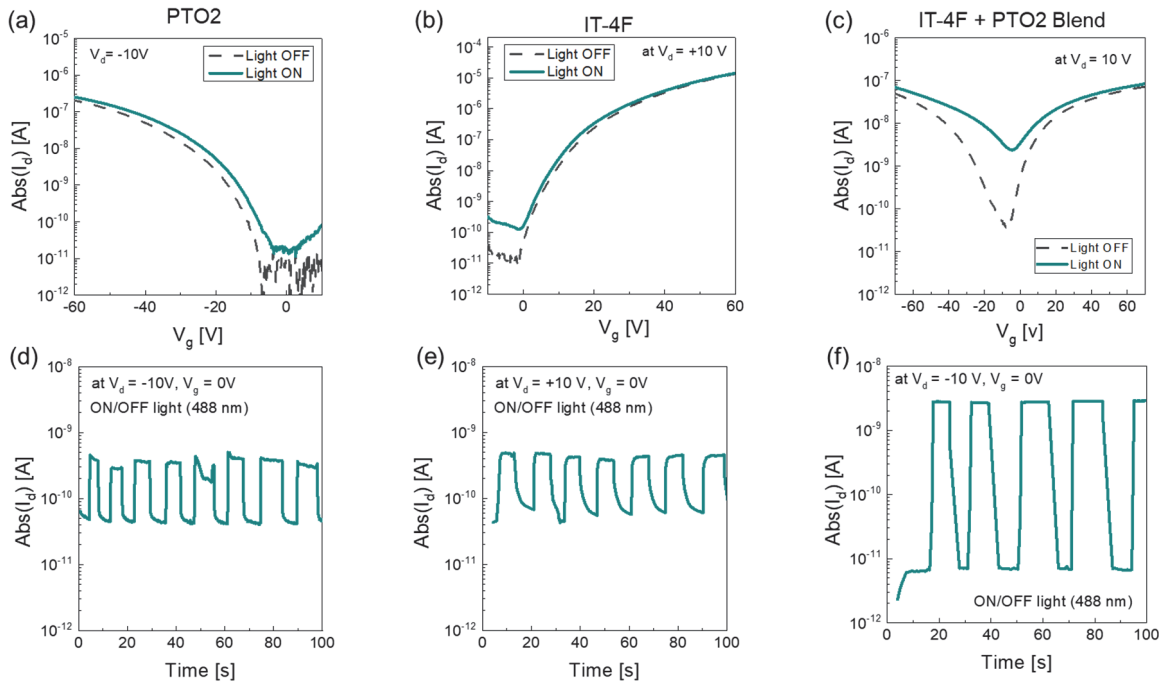


Fig. 3. (a-c) Transfer characteristics (at $V_d = \pm 10V$) and (d-f) light-On/Off switching test of OPTs based on (a) pristine PTO2 (P-type), (b) pristine IT-4F (N-type), and IT-4F:PTO2 blend (ambipolar) semiconductors [Cyan-blue light (wavelength = 488 nm) laser illuminated the OPTs ($P_m = 1 \text{ mW/cm}^2$)].

를 가진 IT-4F 엑셉터 물질과 고른 박막을 가진 PTO2 도너 물질이 나노미터 단위로 고르게 분포되어 있는 것을 확인할 수 있었다. 이는 두 물질 간의 응집이 크게 일어나지 않고 BHJ 이중접합 구조의 도너-엑셉터 박막이 잘 형성된 것을 알 수 있다.

본 연구에서는 제작한 OPT의 특성을 평가하기 위하여 트랜지스터의 linear mode에서 transfer plot을 측정하

였다. 그림 3(a)와 (b)에서 보는 바와 같이 PTO2와 IT-4F 단독 박막을 가지는 소자의 경우 각각 전형적인 P형 및 N형 트랜지스터 거동을 나타낸다. 또한, PTO2와 IT-4F를 혼합한 반도체의 경우 전자와 정공의 전하이동 특성을 모두 가지는 양극성(ambipolar)을 나타내며, IT-4F:PTO2 1:1wt%의 혼합 비율에서 P형과 N형 드레인 전류의 균형을 이루는 것을 확인하였다. 3D 프린터로 자체 제작한 광

Table 1. Fundamental device parameters of OPTs using IT-4F and PTO2 blend semiconductors with different blend ratios; 2:1, 1:1, and 1:2 wt% [field-effect mobilities and threshold voltage were obtained at the saturation region of OFETs, and photo-sensitivity and photo-responsivity were measured by plotting the transfer curve during irradiation of cyan-blue light (488 nm) with an intensity of 1 mW/cm²].

IT-4F:PTO2 ratio [wt%]	2:1	1:1	1:2
Field-effect mobility [cm ² /Vs]	0.0026 (±0.003)	0.0010 (±0.007)	0.0003 (±0.0001)
Threshold voltage [V]	8.88	17.49	18.85
On/off current ratio	4.4×10 ⁶	3.3×10 ⁵	1.2×10 ⁵
Photo-sensitivity	6,440	978	543
Photo-responsivity [mA/W]	887	516	419

센서 측정용 지그에 cyan-blue [wavelength = 488 nm, incident power (P_{in}) = 1 mW/cm²] 레이저 다이오드를 장착한 후, 반도체 채널에 빛을 조사해 OPT의 전기적 특성의 변화를 확인하였다. PTO2와 IT-4F 단일물질 소자의 경우 광-조사 이후 Off 상태의 I_d 가 증가하였으며, 반복적인 light-On/Off 스위칭 테스트에서도 빠른 응답성과 안정적인 광-센서 특성을 나타내는 것을 확인하였다. 하지만 단일 소재 박막의 경우 빛의 조사 유무에 따른 OPT의 전류 차이가 10 정도로 크지 않았다. 이는 반도체 채널에서 photon의 흡수에 의해 생성된 엑시톤이 10 nm 정도의 확산 거리 이내에서 해리되지 못하고 재결합하여 사라지는 현상에 의한 것으로 파악된다. 이러한 문제를 개선하기 위해 PTO2와 IT-4F 반도체를 혼합하여 BHJ 구조로 제작한 후 빛을 조사하였을 경우, PTO2 반도체에서 주로 흡수된 청록색 대역의 빛에 의해 형성된 엑시톤이 이종접합 계면에서 전자와 정공으로 분리가 잘 이루어진다. 따라서 그림 3(f)에서 보는 바와 같이 10³ 정도의 높은 on/off ratio와 빠른 응답성, 안정적인 스위칭 거동을 가지는 우수한 성능의 OPT를 제작할 수 있었다.

PTO2 도너와 IT-4F 액셉터 분자의 혼합 비율에 따른 OPT 소자의 특성을 표 1에 정리하였다. 포화 영역에서 OFET 소자의 전계효과 이동도(field-effect mobility)와 문턱전압(threshold voltage)을 얻었으며, 이 경우 IT-4F:PTO2가 2:1의 비율에서 0.0026 cm²/Vs 정도로서 가장 높은 전하 이동도를 보여준다. 도너 물질인 PTO2의 비율이 늘어날수록 전류 점멸비(on/off ratio)가 점차 줄어들었으며, 문턱전압 역시 양(positive)의 방향으로 이동하는 것을 확인하였다. 이후 488 nm의 파장과 1 mW/cm²의 세기를 가진 레이저 다이오드를 사용하여 액셉터-도너 물질의 혼합비율에 따른 광센서 특성을 확인하였을 때, 2:1 비율에서 최대 887 mA/W의 가장 높은 광응답 특성을 얻을 수 있었다. 이는 BHJ 구조의 특성 상 일정 비율 이상의 도너 물질 포함 시에 나타나는 전하 축적으로 인한 광-전류 감소 때문으로 판단된다.

가시광을 이용한 수중 무선통신의 단점은 바닷물이 특

정 영역을 제외한 대부분의 빛에 비교적 높은 흡수도를 가지고 있으며, 플랑크톤과 같은 미세 입자들에 의해 빛의 산란이 일어나면 감쇠 현상이 증가한다는 점이다. 수중의 깊이나 현탁도에 따라 미세한 차이는 존재하지만 일반적으로 450 nm부터 540 nm까지 영역의 파장대에서 높은 투과도를 나타낸다. 따라서 본 연구에서 개발된 OPT 소자를 수중 Li-Fi 통신에 적용하기 위해 수중층에 해당하는 450 nm (blue), 488 nm (cyan-blue) 및 532 nm (green) 파장을 가진 청색광 계열의 빛의 조사하여 파장에 따른 광센서 특성을 확인하였다. 빛의 세기는 각각 0.5, 1, 0.1 mW/cm²이며, dark (light-off) 상태와 빛이 조사되는(light-on) 조건에서 트랜지스터의 transfer plot을 측정하여 OPT 소자의 광-응답성(photo-responsivity)과 광-민감성(photo-sensitivity)을 도출하였다. 그림 4에 나타난 바와 같이, 광조사에 의한 전기적 특성 변화를 확인해 보면, 450 nm의 빛에서는 최대 1,200 mA/W, 488 nm의 빛에서는 700 mA/W, 532 nm에서는 최대 4,700 mA/W의 높은 응답 특성을 얻을 수 있었다. UV-VIS-NIR 흡광 스펙트럼에서는 IT-4F와 PTO2의 혼합 물질의 흡수 파장은 500~570 nm 영역에서 넓은 피크를 가졌으며, 이로 인해 녹색 레이저(532 nm)에서 0.1 mW/cm²의 매우 약한 빛에서도 최대 4.7 A/W의 매우 높은 광-응답성을 나타내었다. 또한, 수중 통신에 주로 활용되는 청색 영역에서도 0.5 mW/cm²의 약한 빛에 1,000 mA/W 이상의 높은 반응성을 보이는 것을 확인하였다. 이는 PTO2 고분자 도너 물질이 가시광 영역의 넓은 파장대를 흡수하여 엑시톤을 생성할 수 있으며, BHJ 구조의 이종접합 계면에서 엑시톤이 효과적으로 분리되어 광-전류를 생성함을 보여준다 [15]. 수중에서 나타나는 빛의 산란 혹은 감쇠 등의 방해요소로 인한 광량 감소로 Li-Fi 수중 무선통신에 쓰이는 OPT는 매우 약한 빛에도 반응할 수 있어야 하므로, 400 μW의 약한 빛에서도 높은 응답특성을 보이는 결과는 본 연구에서 개발한 OPT 소자의 수중 무선통신 응용에 대한 충분한 가능성을 보여준다.

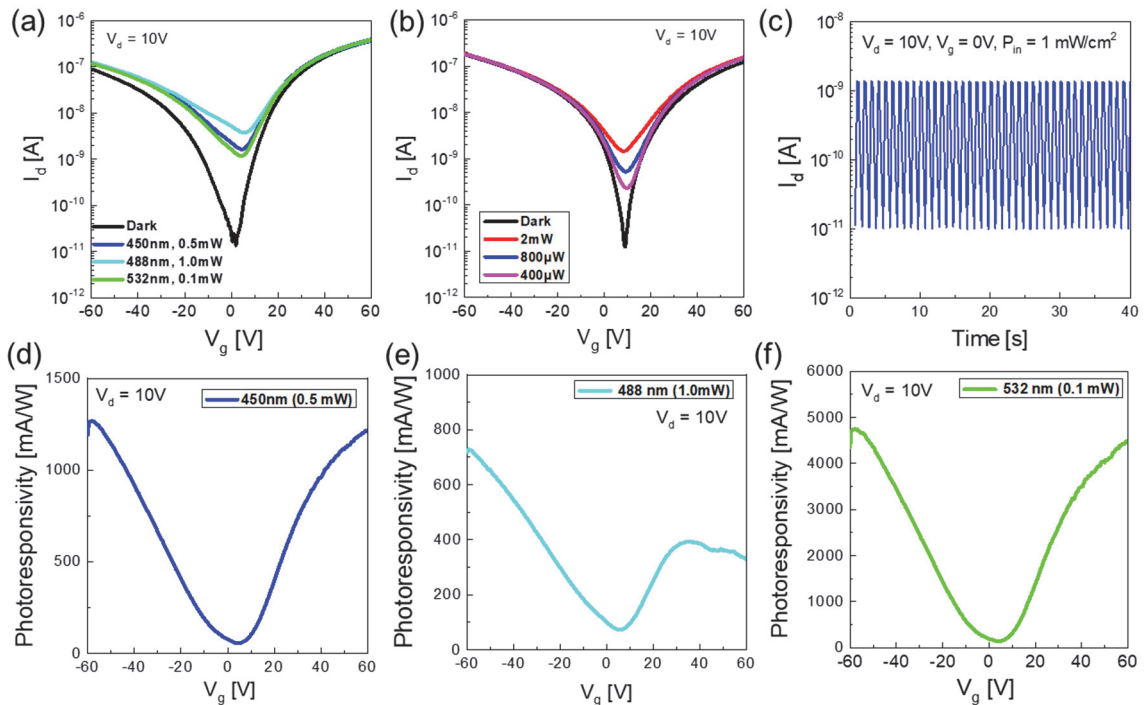


Fig. 4. OPTs based on BHJ IT-4F:PTO2 (2:1 wt%) semiconductors. (a) Transfer characteristics of OPTs at $V_d = 10 \text{ V}$ in the dark and during visible light irradiation with various wavelengths, (b) transfer plots of OPTs with cyan-blue light with various power intensities, (c) reproducible light-on/off switching characteristics of OPTs by irradiation of cyan-blue light, and (d-f) photoresponsivities of OPTs under exposure to blue (wavelength = 450 nm), cyan-blue (488 nm), and green (532 nm) laser light at $V_d = 10 \text{ V}$.

4. 결론

가시광을 이용한 초고속 수중 무선통신 기술은 스마트 아쿠아팜, 해양/방위산업, 해양 탐사용 수중 드론 등을 구현하기 위한 핵심기술이다. 본 논문에서는 RF 또는 음향 통신보다 훨씬 빠른 통신 속도를 가지며 수중 환경의 여러 잡음에도 영향을 받지 않는 가시광 통신 모듈용 수광 소자를 개발하기 위해 청색 계열의 빛에 효과적으로 반응하는 유기물 반도체 기반 고성능 포토-트랜지스터를 제작하였다. 청색 계열의 빛에 흡광도를 가지는 P형 반도체 PTO2 고분자 반도체를 N형 IT-4F 저분자 역셉터와 균일하게 혼합하여 벌크 이종접합 계면을 형성하였다. 수중창에 해당하는 블루 또는 청록색 빛의 흡수에 의해 생성된 엑시톤이 효율적으로 BHJ 계면에서 전자와 정공으로 효과적으로 분리되어 높은 광-전류를 형성할 수 있었다. 결과적으로 450~550 nm 대역의 빛에 의해 높은 광-감응도와 광-민감도를 보이는 높은 성능의 광-센서 소자 특성을 확보하였다. 특히, 손쉬운 용액/인쇄 공정을 통해 광활성층 박막을 제조할 수 있어서 향후 인쇄전자 기술을 활용한 저가(low-cost), 대면적의 이미지 센서 및 광통신 모듈 개발에 폭넓게 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

ORCID

Kang-Jun Baeg

<https://orcid.org/0000-0001-7821-2458>

감사의 글

이 논문은 2022학년도 부경대학교 국립대학육성사업 지원비에 의하여 연구되었음.

REFERENCES

- [1] M. C. Domingo, *J. Network Comput. Appl.*, **35**, 1879 (2012). [DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jnca.2012.07.012>]
- [2] M. Uysal and H. Nouri, *Proc. 2014 16th International Conference on Transparent Optical Networks (ICTON)* (IEEE, Graz, Austria, 2014) p. 1. [DOI: <https://doi.org/10.1109/ICTON.2014.6876267>]
- [3] A. N. Jaafar, H. Ja'afar, I. Pasya, R. Abdullah, and Y. Yamada, *Proc. the 12th National Technical Seminar on Unmanned System Technology* (Springer, Singapore, 2022) p. 93. [DOI: https://doi.org/10.1007/978-981-16-2406-3_8]
- [4] L. Liu, S. Zhou, and J. H. Cui, *Wirel. Commun. Mobile Comput.*, **8**, 977 (2008). [DOI: <https://doi.org/10.1002/wcm.654>]
- [5] J. H. Cui, J. Kong, M. Gerla, and S. Zhou, *IEEE Network*, **20**,

- 12 (2006). [DOI: <https://doi.org/10.1109/MNET.2006.1637927>]
- [6] G. S. Spagnolo, L. Cozzella, and F. Leccese, *Sensors*, **20**, 2261 (2020). [DOI: <https://doi.org/10.3390/s20082261>]
- [7] R. Seetharaman, M. Tharun, S. S. Sreeja Mole, and K. Anandan, *Mater. Today: Proc.*, **51**, 2249 (2022). [DOI: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.11.387>]
- [8] H. Yoo, I. S. Lee, S. Jung, S. M. Rho, B. H. Kang, and H. J. Kim, *Adv. Mater.*, **33**, 2006091 (2021). [DOI: <https://doi.org/10.1002/adma.202006091>]
- [9] K. J. Baeg, M. Binda, D. Natali, M. Caironi, and Y. Y. Noh, *Adv. Mater.*, **25**, 4267 (2013). [DOI: <https://doi.org/10.1002/adma.201204979>]
- [10] Y. C. Lin, W. C. Yang, Y. C. Chiang, and W. C. Chen, *Small Sci.*, **2**, 2100109 (2022). [DOI: <https://doi.org/10.1002/smssc.202100109>]
- [11] A. Tavasli, B. Gurunlu, D. Gunturkun, R. Isci, and S. Faraji, *Electronics*, **11**, 316 (2022). [DOI: <https://doi.org/10.3390/electronics11030316>]
- [12] W. Zhao, S. Li, H. Yao, S. Zhang, Y. Zhang, B. Yang, and J. Hou, *J. Am. Chem. Soc.*, **139**, 7148 (2017). [DOI: <https://doi.org/10.1021/jacs.7b02677>]
- [13] Y. Cui, H. Yao, L. Hong, T. Zhang, Y. Xu, K. Xian, B. Gao, J. Qin, J. Zhang, Z. Wei, and J. Hou, *Adv. Mater.*, **31**, 1808356 (2019). [DOI: <https://doi.org/10.1002/adma.201808356>]
- [14] H. Yao, Y. Cui, D. Qian, C. S. Ponseca Jr., A. Honarfar, Y. Xu, J. Xin, Z. Chen, L. Hong, B. Gao, R. Yu, Y. Zu, W. Ma, P. Chabera, T. Pullerits, A. Yartsev, F. Gao, and J. Hou, *J. Am. Chem. Soc.*, **141**, 7743 (2019). [DOI: <https://doi.org/10.1021/jacs.8b12937>]
- [15] A. Wadsworth, Z. Hamid, J. Kosco, N. Gasparini, and I. McCulloch, *Adv. Mater.*, **32**, 2001763 (2020). [DOI: <https://doi.org/10.1002/adma.202001763>]