



저작자표시-비영리-변경금지 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.



비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.



변경금지. 귀하는 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공할 수 없습니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 [이용허락규약\(Legal Code\)](#)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

[Disclaimer](#)

공 학 석 사 학 위 논 문

수중 가시광 통신을 위한
고 응답성 유기 광 트랜지스터



2023 년 2 월

부 경 대 학 교 대 학 원

스마트그린기술융합공학과

이 정 민

공 학 석 사 학 위 논 문

수중 가시광 통신을 위한
고 응답성 유기 광 트랜지스터



이 논문을 공학석사 학위논문으로 제출함.

2023 년 2 월

부 경 대 학 교 대 학 원

스마트그린기술융합공학과

이 정 민

이정민의 공학석사 학위논문을
인준함.

2023 년 2 월 17 일



위 원 장 공학박사 이 지 열



위 원 공학박사 백 강 준



위 원 공학박사 서 민 호



목 차

목 차	ii
List of Figures&Table	iii
Abstract.....	v
I. 서 론	1
II. 이 론	4
1. 수중 광 통신 기술.....	4
2. 유기물 기반 포토트랜지스터 (OPTs)	7
3. 벌크 이종접합 구조 (Bulk Hetero-Junction)	10
4. 유기 전계효과 트랜지스터 (OFET)	13
III. 실험 및 측정	17
1. 실험 재료	17
가. IT-4F, PTO2	17
나. CYTOP.....	19
2. 실험 방법	21
가. 기판 제작 및 세척	21
나. 스핀코팅을 통한 활성층 박막 형성과 고분자 절연체 박막 형성.....	22
다. 게이트 전극 증착.....	24
3. 측정 방법	25
가. Vacuum Probe Station & Energy meter	25
나. Atomic Force Microscope (AFM)	27
다. UV-Visible spectroscopy	28
IV. 실험 결과	30
1. 결과 및 고찰	30

가. 엑셉터-도너 비율에 따른 광 흡수 파장대 측정.....	30
나. 엑셉터-도너 물질의 혼합에 따른 박막의 상 변화.....	32
다. 포토트랜지스터의 전기적 특성 평가.....	34
V. 결 론	43
참 고 문 헌.....	52



List of Figures&Table

Figure 1. Benefits and limitations of each communication technology	6
Figure 2. Charge transport process in Bulk hetero-junction structure.....	12
Figure 3. OFET device structure	14
Figure 4. Molecular structure of IT-4F PTO2.....	18
Figure 5. Molecular structure of CYTOP.....	20
Figure 6. Vacuum probe station and Jig in our lab	26
Figure 7. UV-Visible absorption data of film IT-4F, PTO2 and its blended	30
Figure 8. AFM images of (a) IT-4F, (b) 2:1 blended (c) PTO2	33
Figure 9. Transfer curve and Output curve of (a) pristine IT-4F, (b) pristine PTO2	36
Figure 10. Transfer curve and Output curve of blended device (a) 2:1 blended, (b) 1:1 blended, (c) 1:2 blended (Acceptor:Donor, wt%)	37
Figure 11. Transfer curve under dark state /light state (a) pristine IT-4F (b) pristine PTO2 at $V_d=10V$ (488nm, $0.2mW/cm^2$ laser diode)	38
Figure 12. Transfer curve under dark state /light state (a) 2:1 blended, (b) 1:1 blended, (c) 1:2 blended (Acceptor:Donor, wt%) , at $V_d=10V$ (488nm, $0.2mW/cm^2$)	38
Figure 13. Field-effect Mobility and Photoresponsivity by Acceptor-Donor Ratio	39
Table 1. Fundamental device parameters of OPTs using IT-4F, PTO2 blend semiconductors with different ratio; 2:1, 1:1, and 1:2 wt%	39
Figure 14. Comparison of Trasfer curves and output curves under (a) Dark state and light illumination of (b) 450nm, (c) 488nm, (d) 532nm	42
Figure 15. Comparison of Trasfer curve at dark state and light illumination ($V_d=+10V$)	43

Figure 16. Photoresponsivity under the light illumination at each wavelength (a) 450nm, (b) 488nm, (c) 532nm	44
Figure 17. Reproducible light-On/Off switching characteristics of OPTs by irradiation of cyan-blue light	45



High Responsivity Organic Phototransistors for Underwater Visible Light Communications

Lee Jeong Min

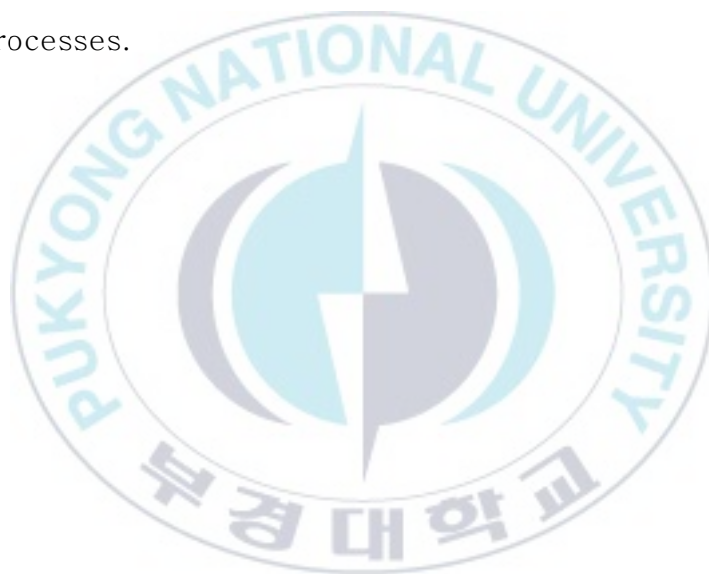
Abstract

The technology of underwater communications can greatly enhance human's ability to study, monitor, and explore the ocean, as well as to realize smart aqua farm, defense systems, and underwater drone. Among underwater communication technology, underwater optical communication has the advantage of being able to communicate faster than RF communication or acoustic communication. To send data at a speedier rate, high performance photodetectors are required in receiver model. In addition, photodetector should exhibit high photo-responsivity with blue/cyan-blue light irradiation.

In this study, we fabricated High performance organic phototransistors (OPTs) based on N-type non-fullerene small molecule acceptor IT-4F and P-type polymer donor PTO2. Bulk-heterojunction IT-4F:PTO2 has wide absorption spectrum in the range of 450nm-550nm wavelength. From the electrical characterization of the OPTs devices with BHJ photoactive layer, it showed high photo-responsivity $>1\text{A/W}$,

large photo-sensitivity $>10^3$ even under very weak incident light.

BHJ photoactive layer can absorb a wide spectrum of visible-light to produce exciton, and efficient dissociation of exciton occurs at the interface between donor and acceptor. The result of this study showed the possibility of being applied to various optical sensor such as low-cost image sensors and optical communication modules through various printing processes.



I. 서론

현대의 수중 무선통신기술은 스마트 아쿠아팜, 해양 방위산업 시스템, 수중 드론등을 구현하기 위한 중요한 기술이며, 해양의 환경을 연구하고 발전시키는 인간의 능력을 크게 향상 시킬수 있다. 수중 무선 통신기술은 광통신과 음향통신, Radio-frequency(RF)통신이 있다. RF 통신은 대기 중에서는 매우 빠른 속도의 통신능력을 보이나 수중에서는 바닷물에 바닷물에 의한 흡수로 인해 감쇠현상이 매우 심각하여 통신이 어렵다.^[1] 음향통신은 매우 안정된 기술로 수십 km 의 장거리 통신이 가능하나 수중에서 음파의 속도는 매우 느리다.^[2] 반면 광통신은 음향통신보다 훨씬 빠른 통신속도를 가지며 해양의 여러 소음에도 크게 영향을 받지 않는다는 장점을 가지고 있어 수중 무선통신기술의 필수적인 요소로 자리잡고 있다.^{[3][4]} 이러한 수중 무선 광통신 기술의 단점은 해양의 깊이에 따른 현탁도나 플랑크톤과 같은 미립자들에 의해 빛이 산란되어 감쇠현상이 일어나 전체적인 광량이 줄고, 신호의 방해요소로 작용한다는 것이다. 수중에서는 극히 일부의 가시광선 영역인 청색~녹색 (450nm~550nm) 영역의 빛이 높은 투과도를 가지므로 광 통신기술에 적용된다.^[4] 따라서 수중 무선 광통신을 위해서는 가시광 영역의 빛에 대해 높은 반응성을 가지고 있는 광소자가 필요시 되고, 이에 따라 가시광 영역부터 근적외선 영역까지 다양한 파장대에서 높은 흡광도를 보이는 유기반도체 기반 포토트랜지스터가 주목받고 있다.^[5]

기존의 광검출기에 사용되었던 포토트랜지스터는 무기물 반도체 기반으로 제작되었고, 높은 전하 이동도, 우수한 안정성, 높은 빛 반응성과 민감도를 가지고 있어 매우 우수한 성능을 보여주었다.^[7] 그러나 무기물 반도체는 넓은 흡수 영역을 가지고 있어 특정 파장의 선택적인 흡수가 힘들었고, 취성이 매우 높아 유연소자에 적용하기는 한계가 있었다. 이 문제점들은 해결하기 위하여 유기물 반도체 기반의 포토트랜지스터에 대한 많은 연구가 이루어졌다^[6]. 유기물 반도체는 구조를 제어하여 자외선(UV)영역부터 근적외선(NIR) 영역까지의 넓은 영역대의 파장의 선택적인 흡수가 가능하다는 이점과 용액공정을 통한 유연소자에 적용한다는 이점을 통하여 대면적, 저비용 광검출장치를 제작하는데 효율적이다. 이러한 유기물 반도체 기반 광 검출 장치는 이미지 센서(Image sensor), X 선 검출장치(X-ray), 웨어러블 디바이스(Wearable Device) 등에 쓰일 수 있다. 그러나 유기물 반도체 기반 광 검출기의 경우 무기물 반도체 기반의 소자에 비해 낮은 전하 이동성 및 무질서한 분자정렬로 인해 더 낮은 감도와 응답속도를 초래할 수 있다^[10]. 유기물 반도체 기반의 포토트랜지스터에서는 이러한 문제점의 해결을 위하여 도너-억셉터 벌크이종접합 구조를 제시하였다. 도너 물질과 억셉터 물질의 혼합으로 기존 단일 물질의 포토트랜지스터에 비해 더 높은 감도와 응답속도를 가질 수 있으며, 다양한 물질의 조합으로 원하는 파장대의 빛을 흡수 할 수 있다^[9,10].

본 연구에서는 ‘수중 무선 광통신’에 초점을 두어 벌크이종접합 구조의 활성층을 가지고 있는 포토트랜지스터를 제안하였다. IT-4F 저분자 억셉터 물질과 PTO2 고분자 도너 물질을 다양한 비율로 혼합하여 혼합 용액을 용액공정인 스핀코팅을 통하여 박막을 증착하였다. 박막 형성 후 파장대 별 빛의 흡수도와 박막의 표면특성을 확인하였으며, BL-TGBC 구조의 유기 포토트랜지스터를 제작하여 전기적 특성을 통해 전류 및 광전류 특성을 확인하였다. 가시광 영역에서 1A/W 이상의 광 반응성을 나타내며, 수중 가시광 무선 통신에 적용할 유기 포토트랜지스터에 대한 가능성을 제시하였다.



II. 이 론

1. 수중 광 통신 기술

해양에 대한 많은 연구가 관심이 늘어나면서 수중 통신 기술에 대한 연구도 다양하게 나타나고 있다. 해양 산업의 일부인 아쿠아팜, 수중 드론, 해양 방위 산업 등 모두 빠른 속도의 통신 기술을 필요로 하며 해면으로부터 수 m~수십 m 까지의 다양한 깊이에서 이루어진다. 수중 통신 기술은 RF 통신, 음향 통신, 광 통신 방법으로 나누어진다. RF 통신의 경우 대기 중에서 높은 통신 속도를 가지고 있고, 선박의 스크류나 파도로 인한 잡음등에 큰 영향을 받지 않는다는 장점이 있다. 그러나 전자기파는 바닷물에 의해 흡수되기 때문에 빠른 속도의 통신은 10m 이내의 매우 짧은 거리에서만 가능하다는 한계점이 분명한 기술이다^[1]. 현재 수중 통신 기술에 가장 많이 쓰이고 있는 음향 통신은 많은 연구가 이루어져 수십 km 의 장 거리에서도 통신이 가능하며 신호 감쇠가 적고 열적 안정성이 뛰어나 수중 광통신 상용화에 쓰이고 있는 기술이다. 그러나 음향 통신기술을 수중에서 매우 느린 속도를 가지고 있으며, 온도변화 및 잡음에 민감하기에 고속통신을 위한 기술로는 적합하지 않다^[2].

RF 통신과 음향통신이 가지고 있는 문제점들을 대한 대안으로 수중 무선통신 기술에 광통신을 적용한 일명 'Li-Fi' 기술에 대한 많은 연구가 이루어지고 있다. 수중 무선통신 기술은 송신기(Transmitter)에서 LED 나

레이저로 조사한 빛을 송신기(Receiver)에 있는 광 검출기 (Photo - detector)가 받아들이고, 해당 광 신호를 전기적 신호로 변조하여 인식하는 원리이다. 수중 무선 통신기술에 사용되는 가시광 영역의 빛의 경우, RF 통신에 비해 바닷물에 의한 흡수가 매우 적고, 음향 통신의 낮은 통신 속도에 비해 매우 빠른 속도의 통신이 가능하다. 또한 음향 통신에 비해 선박의 스크류와 같은 잡음에도 무관하다^[3,4]. 그러나 수중에서의 광 통신 기술의 경우 송신기에서 나온 빛이 플랑크톤과 같은 미립자들에 의해 감쇠현상이 일어나고, 빛의 전체적인 세기가 낮아진다. 따라서 수중 광통신에 요구되는 수신기(RX)의 광 검출기는 약한 빛에도 매우 높은 감도를 가지고 있어야하며, 특정한 파장에 반응 할 수 있어야한다. 현재 광 통신에는 광 검출기로써 포토다이오드가 많이 사용되고 있다. 그러나 실제로 포토다이오드는 매우 높은 잡음 강도를 가지고 있으며, 임계 검출값이 높아 수신기로 사용하기에는 적절하지 않다. 이에 포토 -다이오드에 대한 대안으로 더 높은 감도와 낮은 잡음을 가지고 있는 포토 트랜지스터에 대한 연구가 이루어지고 있다^[5].

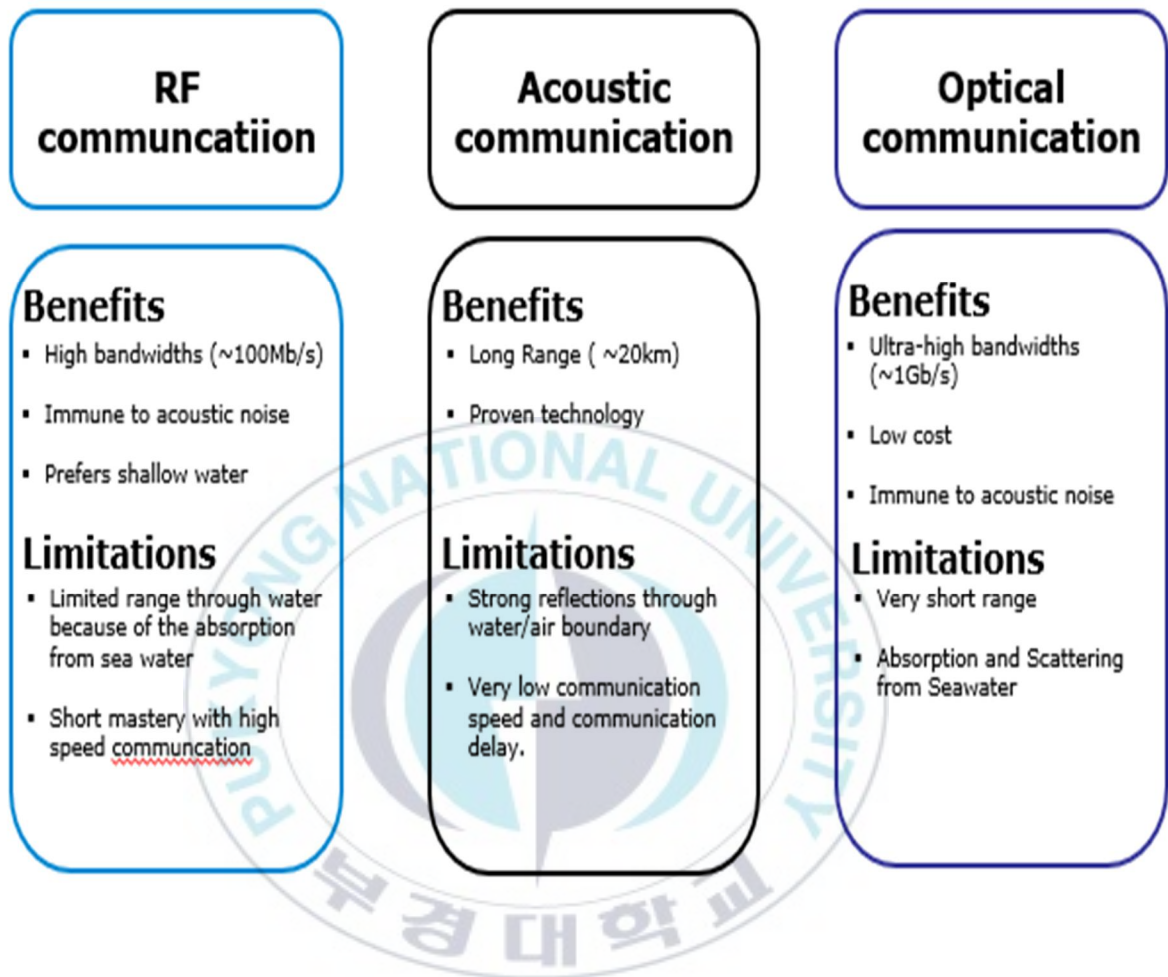


Figure 1. Benefits and limitations of each communication technology

2. 유기 포토트랜지스터

포토트랜지스터는 포토다이오드보다 높은 감도를 가지고 낮은 노이즈로 인하여 광-센서의 소자로써 주로 사용된다. 또한 전계 효과 트랜지스터(FET)를 기반으로 만들어진 유기 포토 트랜지스터(Organic Photo-transistor; OPTs)는 광 신호를 전기적 신호로 변환하고 그 신호를 증폭하므로 포토다이오드에 비교하였을 때, 추가적인 신호 전달이 가능하다는 장점이 있다^[5]. 유기 포토트랜지스터의 기본적인 원리는 OPT 에 조사되는 빛을 통해 분자의 에너지 상태를 여기시켜 엑시톤을 생성하거나, 분자의 형태 변화를 유도함으로써 광 전류를 나타낸다. OPT 의 활성층인 유기반도체에 빛이 조사되면 유기반도체층은 광자(Photon)를 흡수하며 전자-정공의 한쌍인 엑시톤(Exciton)을 형성한다. 상대적으로 높은 결합 에너지를 갖지만 매우 짧은 확산거리(<10nm)를 가지고 있는 엑시톤의 해리를 통해 전자(정공)이 드레인 전극으로 이동하여 광전류를 검출할 수 있다^[6]. 기존의 무기물 반도체를 기반으로 한 광센서들은 높은 신뢰성과 우수한 성능을 가지고 있지만 박막 증착에 고온과 진공을 기반으로 한 고 비용이라는 단점과 박막의 물리적인 한계 때문에^[7] 더 유연하고 용액공정을 통해 저비용으로 대체 가능한 유기물 반도체 기반 광센서가 주목받고 있다^[6]. 활성층으로 유기물 반도체를 사용한 유기 포토트랜지스터(OPTs)는 유기물 반도체가 자외선 영역(UV)부터 근적외선 영역(NIR)까지 넓은 영역대의 광을

흡수한다는 점을 통해 다양한 영역에서의 광-센서로써 쓰이고 있다^[8]. 이러한 유기물 반도체 기반 포토트랜지스터의 경우 웨어러블 디바이스, 이미지 센서 등 다양한 신축성 전자소자에 사용될 수 있다. 유기 포토트랜지스터에는 저분자, 고분자 물질이 단일로 활성층으로 사용되거나, 고분자/ 고분자, 고분자/저분자, 저분자/저분자 등 혼합 용액을 기반으로 제작된다. 저분자 물질로는 DNTT, Pentacene, CuPc 등 다양한 물질이 있으며 풀러렌 구조인 C₆₀ 과 PC₆₁BM 도 많은 연구가 이루어졌다. 또한 더 높은 유연성을 가지는 고분자 물질로는 PDVT-10, P3HT, P(NDI2OD-T2) 등이 있다. 본 연구의 목적인 가시광 통신을 위해 사용되는 물질로는 F8T2, PQT12, F8B7, PTO2 등 에너지 밴드갭이 넓은 여러 고분자 물질들이 가시광 영역에 높은 흡수도를 보인다. 특히나 F8T2, PQT12 와 같은 물질은 수중에서 높은 투과도를 가지는 Cyan 영역 (480nm~500nm)에 높은 흡수도를 가지는 물질 들이다^[9,10]. 포토 트랜지스터의 구조는 빛이 상단에서 조사될 때 상단조명구조 (Top-Light, TL) 라 하고, 빛이 하단에서 조사될 때 하단조명구조(Bottom-Light, BL)로 정의된다. 본 논문에서는 채널층에 직접적인 빛 조사를 위하여 BL-TGBC 구조의 소자를 제작하였다. 포토트랜지스터의 성능을 평가하는 주요 지표는 전계효과 트랜지스터의 이동도, 점멸비, 문턱전압등을 기본으로 하며, 추가로 광 조사에 대한 응답특성인 광응답성 (Photoresponsivity)과 광민감도 (Photosensitivity)를 주요 지표로 한다. 아래의 식은 광응답성과 광 민감도에 대한 식이다.

$$(a) \text{Photoresponsivity}(R_p) = I_{ph} / (P_{light} \cdot A)$$

$$(b) \text{Photosensitivity} = I_{ph} / I_{dark}$$

$$I_{ph} = I_{light} - I_{dark}$$

$$P_{light} = \text{Intensity of light (W/cm}^2\text{)}$$

$$A = \text{Area of the channel}$$

광 응답성 (Photoresponsivity)와 광 민감도 (Photosensitivity)는 유기 포토 트랜지스터의 전기적 특성인 전송곡선에 의해 계산되었으며, 빛의 세기는 Energy meter를 통하여 측정되었다. 또한 채널 영역은 채널의 넓이 (Channel Width)와 채널의 길이 (Channel Length)의 곱으로 계산되었다.

3. 벌크 이중접합 구조

단일 유기 반도체로 이루어진 활성층에서 나타나는 엑시톤의 해리 및 자유 전하 수송을 돕기 위해서는 전기장과 같은 외부의 힘이 요구된다. 이러한 단일 유기 반도체를 기반으로한 OPT 의 경우 정공 또는 전자의 수송을 개별적으로 컨트롤 하기 어렵다^[6]. 본 논문의 중심 주제는 가시광 통신용 포토트랜지스터에 대한 연구이고 가시광 통신에 사용되는 광 통신용 소자는 광을 조사하였을 때, 그 에너지가 전류로 변환되는 과정이 필요하며 이는 매우 빠른 시간안에 이루어진다. 그러나 단일 물질로 이루어진 포토트랜지스터의 경우 엑시톤의 생성과 해리까지의 시간이 오래걸리며, 물질 내부에서 재결합되는 문제점 때문에 빠른 속도를 요구하는 광통신용 소자에 적용하기에는 적합하지 않다. 이 문제점을 해결하며 엑시톤의 해리를 통해 전하의 생성을 향상시키 위하여 도너-억셉터 이중층보다 계면이 넓은 벌크 이중접합 구조(Bulk Hetero-junction)에 대한 많은 연구가 이루어졌다. 벌크 이중접합 구조는 도너-억셉터의 고른 형성으로 계면에서의 엑시톤의 해리 효율을 높혀 전하의 빠른 수송을 돕고, 상극의 전하를 트래핑하는데 효과적이다^[11]. 엑시톤의 확산 거리는 10nm~20nm 로 매우 짧으며, 그 수명 또한 100^{-12} s 정도로 매우 짧기 때문에 도너-억셉터의 접합 계면이 유기반도체가 광자를 받아 엑시톤이 형성된 곳으로부터 10nm 이내에 존재해야 효율적으로

엑시톤의 해리를 통해 전하수송이 이루어질 수 있다^[12,13]. 엑시톤이 도너-억셉터의 접합 계면에 도달하면 전하 수송상태로 변하고, 전자는 분자의 가장 낮은 비점유- 분자궤도(LUMO)로 이동하며 정공은 가장 높은 점유 분자궤도 (HOMO)로 이동한다. 그러나 도너-억셉터 영역의 연속성이 보장되지 않으면 정공(전자)의 이동에 방해요소로 작용하므로 벌크 이중접합 구조의 포토트랜지스터의 광전류 성능에 큰 영향을 미친다^[9,14]. 유기 포토트랜지스터에서는 저분자-저분자, 고분자-고분자, 고분자-저분자 등의 조합으로 벌크 이중접합 구조를 형성하였으며, 각 물질간의 조합이 적절하지 않으면 물질간의 응집이 일어나거나 상분리 현상이 일어나 도너-억셉터의 역할을 수행하지 못한다. 따라서 도너-억셉터간의 조합이 매우 중요한 요소로 여겨진다^[15]. 아래의 그림을 통해 벌크 이중접합 구조의 OPT 에서의 엑시톤의 생성, 해리 과정과 전하의 이동을 상세하게 나타내었다.

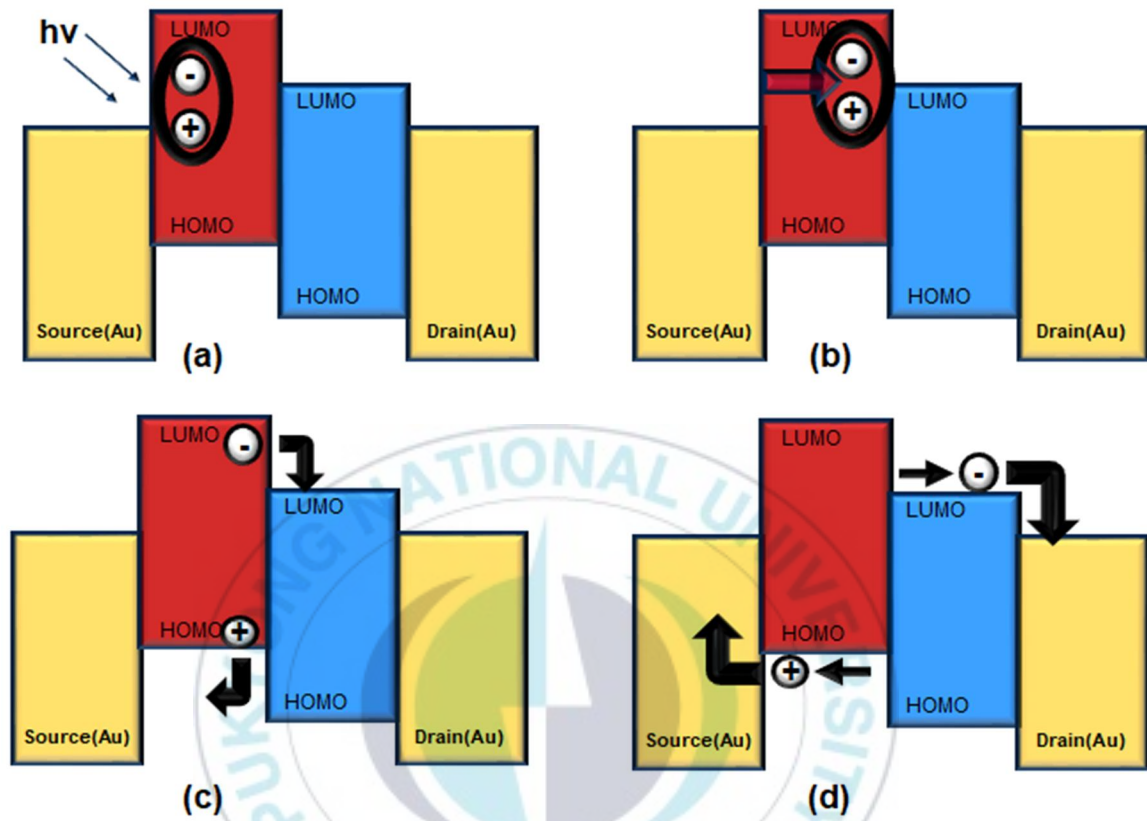


Figure 2. Charge transport process in Bulk hetero-junction

structure

4. 유기 전계 효과 트랜지스터 (OFET)

전계 효과 트랜지스터(FET)란 소스 전극과 드레인 전극 사이에 흐르는 전류를 게이트 전극에 수직으로 인가되는 전압에 의해 발생하는 전기장을 이용해 제어하는 구조의 트랜지스터 종류이다^[16]. 전계효과 트랜지스터는 전자회로 내에서 회로를 여닫는 스위칭 기능 및 신호 증폭 기능을 담당한다. 유기 전계 효과 트랜지스터 (OFET)는 유기물 반도체를 활성층으로 사용하는 전계 효과 트랜지스터 이다. 이러한 OFET 은 기판, 소스/드레인 전극, 활성층, 절연층, 게이트 전극으로 구성되어 있으며, Figuer3 에 표시된 바와 같이 게이트 전극과 소스/드레인 전극의 위치에 따라 4 가지 구조로 만들어진다. 게이트 전극이 활성층의 상단에 존재할때 Top-Gate 구조라고 하며, 게이트 전극이 활성층의 하단에 존재할때 Bottom-Gate 구조라고 한다. 또한 소스/드레인 전극이 활성층의 상단에 존재할때 Top-Contact 구조, 소스/드레인 전극이 활성층의 하단에 위치하면 Bottom-Contact 구조라고 한다. 소스/드레인 전극이 상단부에 존재하는 Top-Contact 구조의 경우, 전극 표면과 활성층이 접하는 면적이 넓어 낮은 접촉 저항을 가진다. 반면 Bottom-Contact 구조의 경우 포토리소 그래피 등의 미세기술을 통하여 다양한 패턴의 전극을 형성할 수 있어 소자구조의 설계가 자유롭다는 장점이 있다^[17]. 본 논문에서는 5um 의 소스/드레인 전극을 사용하기 위하여 포토리소 그래피

공정을 통해 형성된 소스/드레인 전극을 사용한 Top-Gate/Bottom-Contact 구조의 소자를 제작하였다.

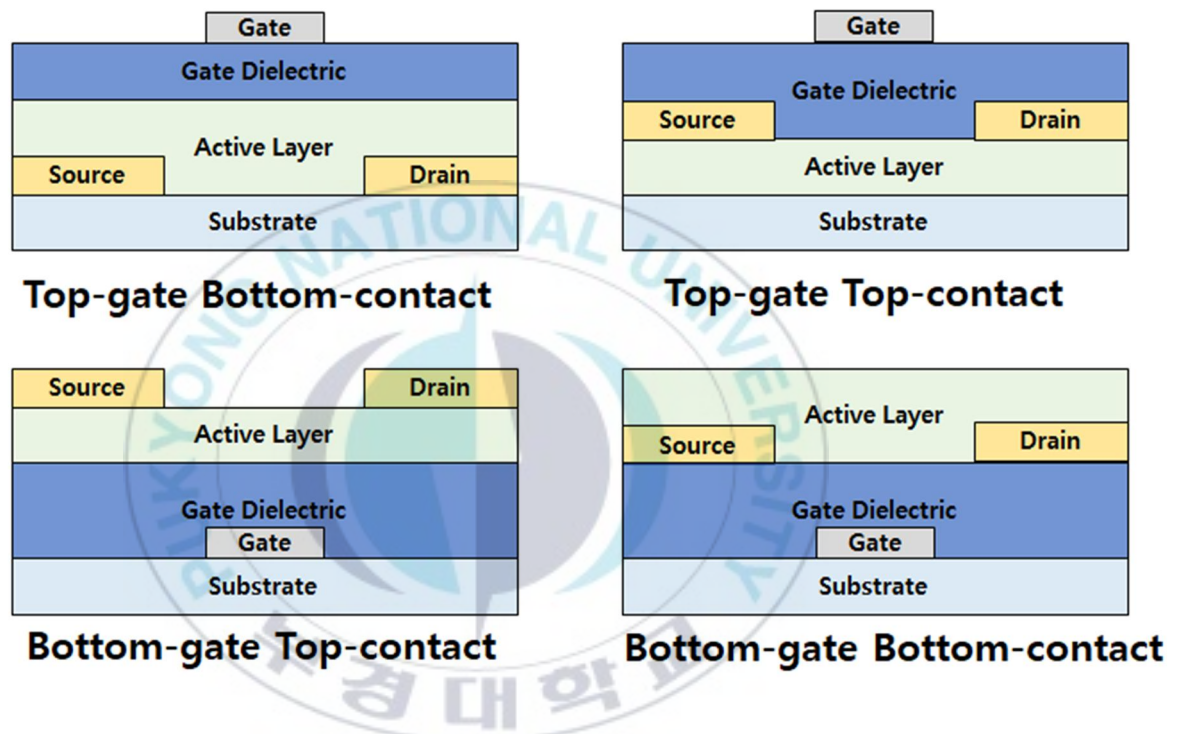


Figure 3. OFET device structure

OFET 의 게이트 전극에 전압이 인가되지 않았을 때, 매우 적은 양의 전류가 흐르는데 이를 'Off-state'라고 정의하며, 게이트 전압을 인가하면 유기반도체층과 절연체의 계면에 캐리어가 축적되며 채널이 형성되며 더 높은 전류가 흐르게 되고, 이를 'On-state'로 정의한다. N 형 유기

반도체의 경우 전자를, P 형 유기반도체의 경우 정공을 캐리어로 작동한다. OFET 의 성능을 평가하는 주요 파라미터는 전계효과 이동도(Field-effect Mobility), 점멸비(On/Off ratio), 문턱전압(Threshold Voltage) 그리고 SS(Subthreshold swing) 등이 있다. 전계효과 이동도(Field-effect Mobility)는 전기장에 의해 나타나는 전하의 드리프트량을 정량화할수 있고, 점멸비(On/Off ratio)는 온/오프 상태에서 흐르는 전류의 비율로 정의되며, OFET 의 스위칭 기능을 특성화할 수 있다. 또한 문턱전압 (Threshold voltage, V_{th})이란 디바이스가 작동하는데 필요한 최소 게이트 전압을 뜻한다. 이상적인 소자에서는 0 이 아닌 게이트 전압이 인가되면 전하가 축적되어 소자가 작동하지만, 대부분의 유기 전계효과트랜지스터의 경우 트랩과 같은 요소들로 인해 추가 전압의 적용을 필요로 한다. 문턱전압을 통해 트랩의 양을 가늠할 수 있으며, 이 또한 소자의 스위칭 기능을 나타낸다. 아래의 식은 드레인 전류(ID)의 게이트 전극에 인가되는 전압(V_g)와 드레인 전극에 인가되는 전압(V_d)를 통하여 나타내었다. 각 식을 통하여 주요 지표들을 구할 수 있다. L 과 W 는 각각 채널의 길이와 폭을 나타내며, C_i 는 절연층의 정전용량이다. 또한 V_{th} 는 소자의 문턱 전압을 나타내며 μ 는 전계 효과 이동도를 나타낸다.

$$I_{D,lin} = \frac{W\mu_{lin}C_i}{L}(V_G - V_{Th} - \frac{V_d}{2})V_D \quad \text{Linear region}$$

$$I_{D,sat} = \frac{W\mu_{sat}C_i}{L}(V_G - V_{Th})^2 \quad \text{Saturation region}$$

유기 전계 효과 트랜지스터는 주로 전달곡선 (Transfer curve), 출력곡선 (Output curve) 두 가지의 곡선을 이용하여 전기적 특성을 평가한다. 전달곡선은 소스-드레인 전압을 일정하게 고정하고 게이트 전압을 조절하여 특성을 나타내고, 출력곡선은 게이트 전압을 일정하게 고정한 뒤 드레인 전압을 조절하여 특성을 나타낸다. OFET의 전달곡선은 유기반도체와 절연체 계면에 전하가 축적되기 시작하여 그래프가 선형적으로 증가하는 선형 영역(Linear region)과 전하의 축적이 포화되어 전류가 증가하지 않고 최대값에 수렴하는 포화 영역(Saturation region)으로 이루어진다.

III. 실험 및 측정

1. 실험 재료

가. IT-4F, PTO2

억셉터 물질로 사용된 IT-4F 저분자 물질은 비폴러렌 억셉터로 태양전지 분야에서 많이 쓰이고 있는 ITIC 저분자 물질의 말단 페닐헥실기가 불소로 치환되어진 형태의 물질이다. IT-4F의 HOMO/LUMO level은 $-5.66\text{eV}/-4.14\text{eV}$ 이고 밴드갭은 1.52eV 로 불소원자가 가지는 높은 전자를 끌어당기는 힘으로 인해 ITIC에 비해 낮은 HOMO/LUMO 에너지 수준을 보여주었다. 이는 IT-4F가 가지는 우수한 화학안정성과 낮은 에너지수준으로 인해 억셉터-도너의 계면에서 엑시톤의 해리를 돕는다^[18]. 도너 물질로 사용된 PTO2는 전자 주개(Donor)인 BDT와 전자 받개(Acceptor)인 싸이오펜 카복실레이트를 주쇄로 가지는 넓은 밴드갭을 가지고 있는 공중합체(D-A copolymer) 물질이다^[19]. IT-4F 억셉터 물질과 HOMO 에너지 준위의 차이는 0.07eV 로 차이가 매우 낮은 수준이지만, 두 물질간의 매우 큰 분자 정전기 전위(ESP)의 차이로 인해 유도된 분자간 전기장(IEF)이 엑시톤의 해리를 도와 효율적인 물질 조합을 이룬다[20].

각각의 물질은 P-xylene 유기용매에 5mg/ml 의 농도로 용해되어 사용하였다.

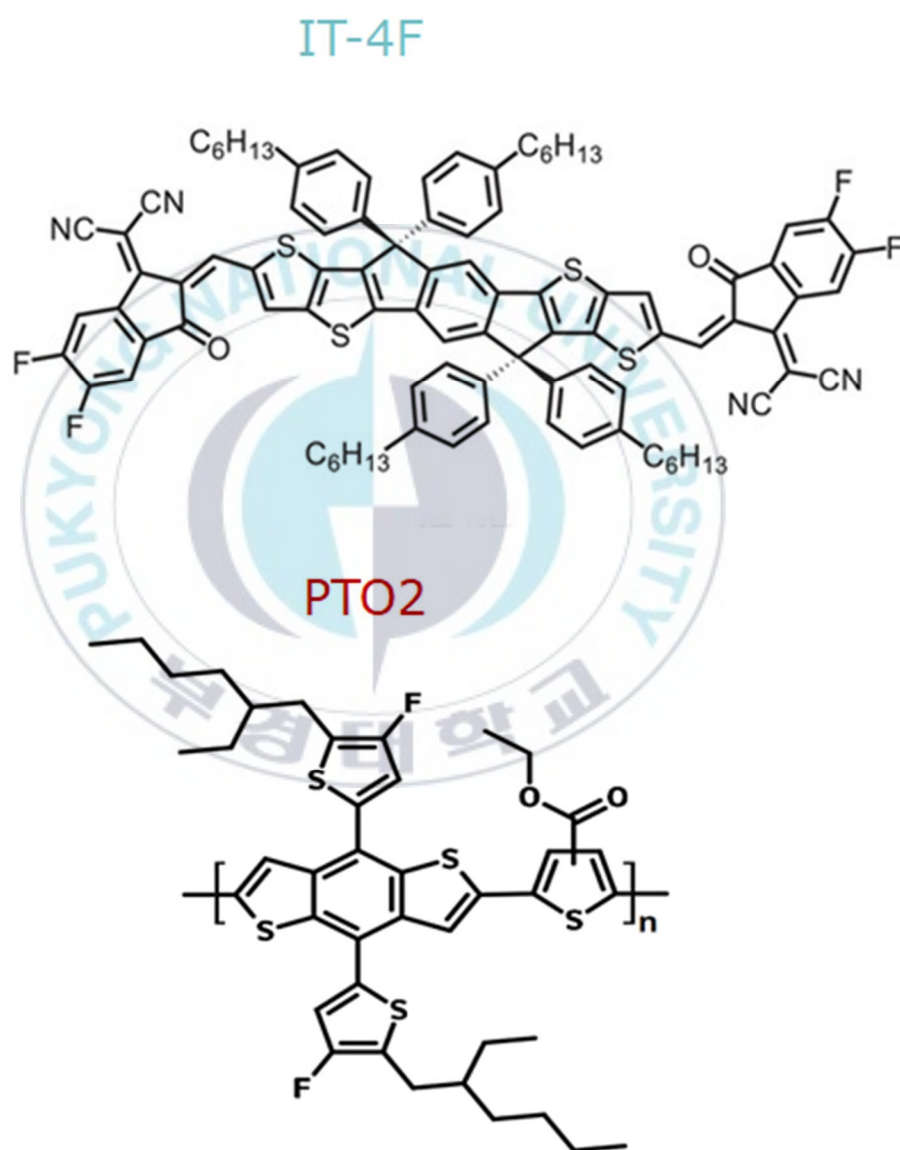


Figure 4. Molecular structure of IT-4F PTO2

나. CYTOP

본 실험에서는 CYTOP 을 OPT 의 게이트 절연막으로 사용하였다. CYTOP 은 비정질 불소계 고분자로써 우수한 화학적, 열적, 전기적 특성을 가지고 있으며 용액 공정을 통해 매우 우수한 광학 투과도를 가진 박막을 제작할 수 있다. 저유전율 불소계 고분자인 CTYOP 은 표면에 하이드록실기를 포함하지 않고 매우 소수성의 표면을 가지고 있어 높은 동작 안정성을 가지고 있어 박막 트랜지스터의 게이트 절연층이나 높은 투습방지특성을 가지고 있어 패시베이션 층으로 주로 사용되어 왔다. CYTOP 불소계 고분자의 경우, base 용액이 매우 높은 점도를 가지고 있어 스핀코팅과 같은 용액공정을 진행할때 균일한 박막을 형성하기 힘들다. 따라서 불소계 용매와 혼합하여 사용한다. 본 실험에 사용한 CYTOP(809-M)의 경우 2.0 의 유전상수를 가지며 2:1 비율로 불소계 용매와 혼합하여 사용하였다.

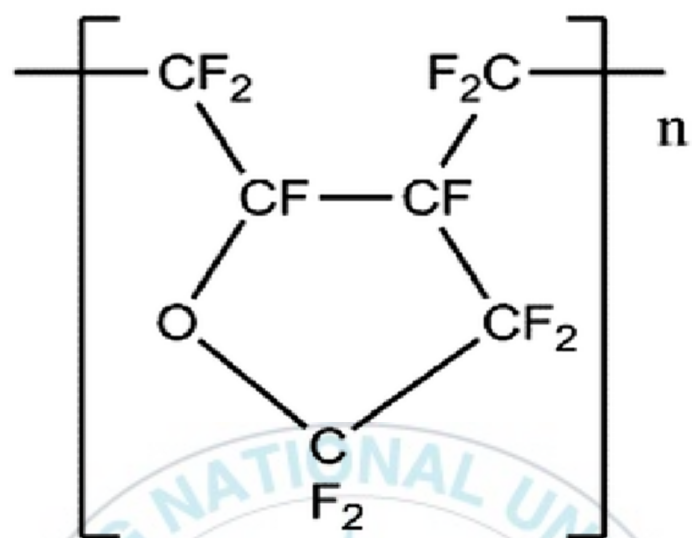


Figure 5. Molecular structure of CYTOP

2. 실험 방법

가. 기판 제작 및 세척

본 실험에서는 스태거드(staggered) 박막 트랜지스터의 제작을 위하여 포토-리소그래피(photo-lithography) 공정으로 패터닝하여 소스-드레인 전극을 형성하였다. 소스-드레인 전극은 기판과의 접착력을 향상시키기 위하여 3nm 의 니켈과 15nm 의 금을 열 진공 증착방법을 통하여 형성하였다. 형성된 기판은 아세톤과 IPA 가 담긴 비커에 넣고 각각 20 분씩 초음파 세척을 진행한 후, 질소 블로잉과 30 분의 오븐 건조로 잔여 용매를 완전건조 시켰다. 이후 30 분의 UV/O₃ 처리를 통해 표면의 잔류 유기물을 완벽히 제거해주었다.

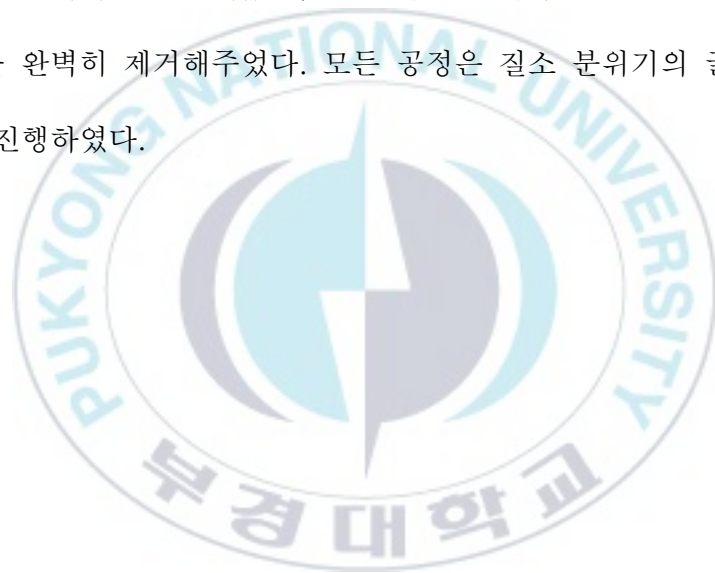
나. 고분자 반도체와 고분자 절연체의 박막 형성

(1) IT-4F,PTO2 혼합 용액 제작 및 박막 형성

IT-4F 와 PTO2 물질은 각각 5mg/ml 의 농도로 P-xylene 용매에 65 도의 온도에서 하루동안 magnetic stirring 방법을 통해 용해되었다. 각 용액이 완벽히 용해된 다음 비율에 따라 용액을 혼합한 뒤 3 시간 이상 magnetic stirring 방법을 통해 용액이 고르게 섞일수 있도록 하였다. 혼합된 용액은 용액공정인 스핀코팅(spin-coating)방법을 통하여 기판 위에 증착되었다. 스핀코팅 방법은 원심력을 통해 짧은 시간안에 균일한 박막을 형성할 수 있으며, 엑셉터 물질과 도너 물질의 과도한 상분리를 일으키지 않고 고르게 분포할 수 있는 방법이다. 각 비율 별 완전히 혼합된 용액을 기판에 도포한 후 2000rpm, 60s 조건에서 스핀코팅을 진행하여 박막을 형성한 후에, 150℃의 핫 플레이트에서 1 시간의 어닐링단계를 통해 적절한 상분리를 형성하며 잔류용매를 제거해주었다. 모든 공정은 질소 분위기의 글러브박스 내부에서 진행하였다.

(2) 불소계 고분자 절연체(CYTOP) 박막 형성

절연체로 사용된 불소계 고분자인 CTYOP(809-M)은 매우 높은 점도를 가지고 있어 용액공정시 균일한 박막 형성이 힘들다. 따라서 불소계 용매인 CYTOP-Solvent 와 2:1 비율로 혼합하여 용액공정을 진행하였다. CYTOP 절연체 박막을 형성시키기 위해 2000rpm, 60s 조건으로 박막을 형성하였고, 80 도의 온도에서 1 시간 열처리를 통해 잔류용매를 완벽히 제거해주었다. 모든 공정은 질소 분위기의 글러브박스 내부에서 진행하였다.



다. 게이트 전극 증착

Top-gate Bottom-contact 구조의 상단 게이트 전극을 형성하기 위해서 물리적 기상 증착법(Physical Vapor Deposition)의 종류 중 하나인 열진공 증착법(Thermal Evaporation)을 사용하였다. 챔버 내부를 10^{-7} Torr 정도의 고진공으로 만든 후, 알루미늄 (Al) 금속을 보트(Boat)에 올려놓고 전류를 가해 증발시켜 금속으로된 마스크 패턴모양으로 35nm 두께를 가진 게이트 전극을 증착하였다.



3. 측정 방법

가. Vacuum Probe Station & Energy Meter

본 실험에서 제작한 유기 포토트랜지스터(OPTs)의 전기적 특성을 확인하기 위하여 질소 분위기의 글러브 박스 내부에 있는 Probe-station 장비를 사용하여 소자의 전달곡선과 출력곡선을 확인하였다. 측정법은 3 개의 전극인 게이트,소스,드레인 전극에 프로브 팁을 접지한 후 게이트전극과 드레인전극에 일정 전압을 가하여 측정한다. 전달 곡선의 경우 V_d 를 +10V,+50V 로 고정한 뒤, 게이트 전압을 -60V 부터 60V 까지 1V 간격으로 전압을 가해주었다. 출력 곡선의 경우 V_g 를 10V 부터 60V 까지 10V 간격으로 고정하였으며, V_d 를 0V~60V 범위에서 1V 간격으로 상승시키며 전압을 가해주었다. 또한 3d 프린터로 자체 제작한 Bottom-Light 용 지그와 광센서 및 450nm,488nm,532nm 의 파장대를 가진 레이저 다이오드를 사용하여 광센서 특성을 확인하였다. 레이저 다이오드는 Power-supply 장비를 통해 전력을 조절하여 밝기를 조절하였다. 아래의 사진은 측정에 사용한 Probe-station 장비와 BL 용 Zig 의 사진이다.

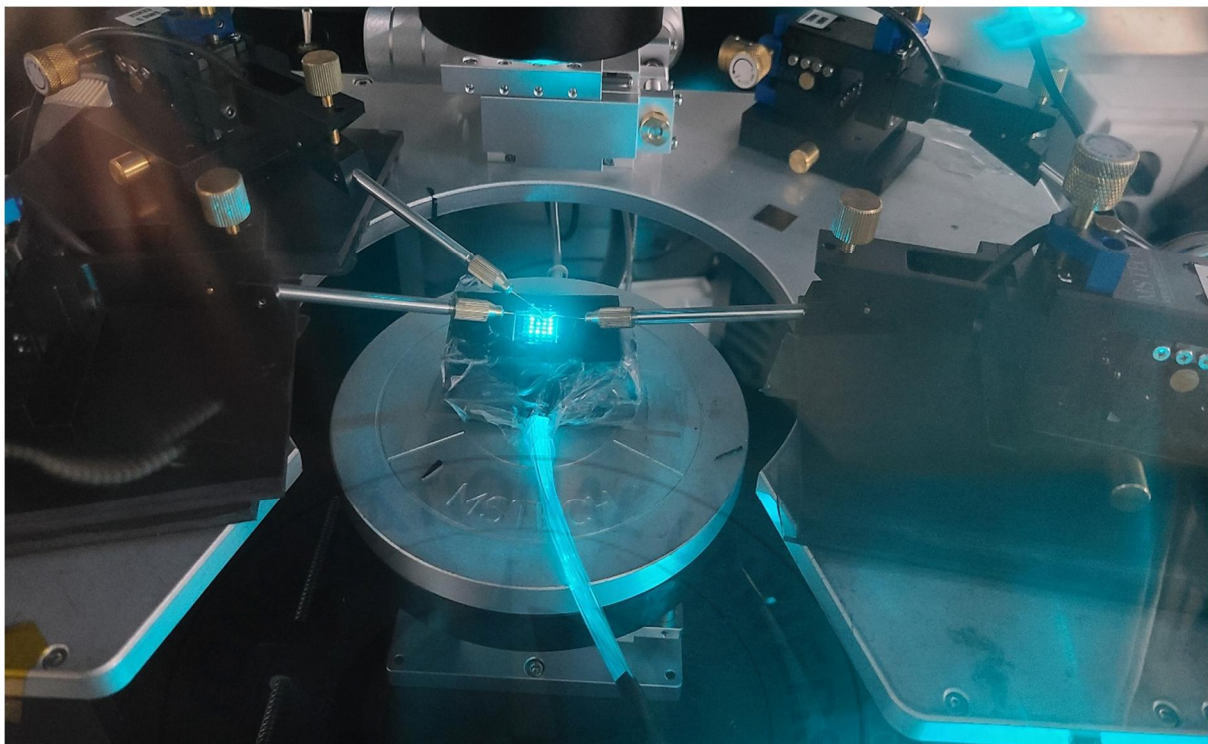


Figure 6. Vacuum probe station in our lab

나. Atomic Force Microscope (AFM)

Scanning Probe Microscope(SPM)의 종류 중 하나인 AFM은 Cantilever 탐침을 이용하여 표면을 스캔하여 박막의 표면 모폴로지를 확인할 수 있는 장비이다. Scanning Tunneling Microscope(STM)과 다르게 비전도성 시료의 표면도 관찰할 수 있다. 탐침과 박막 사이의 간격 또는 상호작용에 의하여 반데르발스 힘(Van Der Waals Force)이 달라지며, 이에 따라 탐침이 움직이게 된다. AFM 장비의 측정 방식은 접촉식(Contact-mode), 비접촉식(Non-Contact mode)과 태핑 방식(Tapping mode)으로 나뉘어진다.

다. UV-Visible spectroscopy

UV-VIS spectroscopy 장비는 시료 또는 박막에 빛을 조사하여 흡광도, 투과율, 반사율 등을 측정하는 장비이다. 기본적인 장비의 원리는 광원에서 나온 빛이 시료 또는 박막을 통과하거나 반사되어 옵틱(optic)에 도달하고, 그 빛은 여러 파장별로 분산되어 검출기(detector)에서 검출된다. 원자나 분자가 빛 에너지를 받으면 오비탈에 있는 전자들이 전이를 일으킨다. 이때 전이에 필요한 에너지와 동일한 크기를 가진 파장대의 빛만을 흡수하기 때문에 UV-VIS 장비를 통하여 시료가 흡수하는 빛의 파장대 및 세기를 측정할 수 있다.

IV. 실험 결과

1. 결과 및 고찰

가. 엑셉터 - 도너 비율에 따른 광 흡수 파장대 측정

IT-4F 저분자 엑셉터 물질과 PTO2 고분자 도너 물질의 혼합 비율에 따라 흡수되는 가시광 영역의 파장대를 확인하기 위하여 UV-Visible spectroscopy 장비를 사용하여 광 흡수 파장대를 측정하였다. 세척과 UV 오존 처리된 유리기판에 스핀코팅으로 형성한 박막을 사용하였으며, 파장대는 유리기판이 흡수하지 않는 400nm~1200nm 에서 진행하였다.

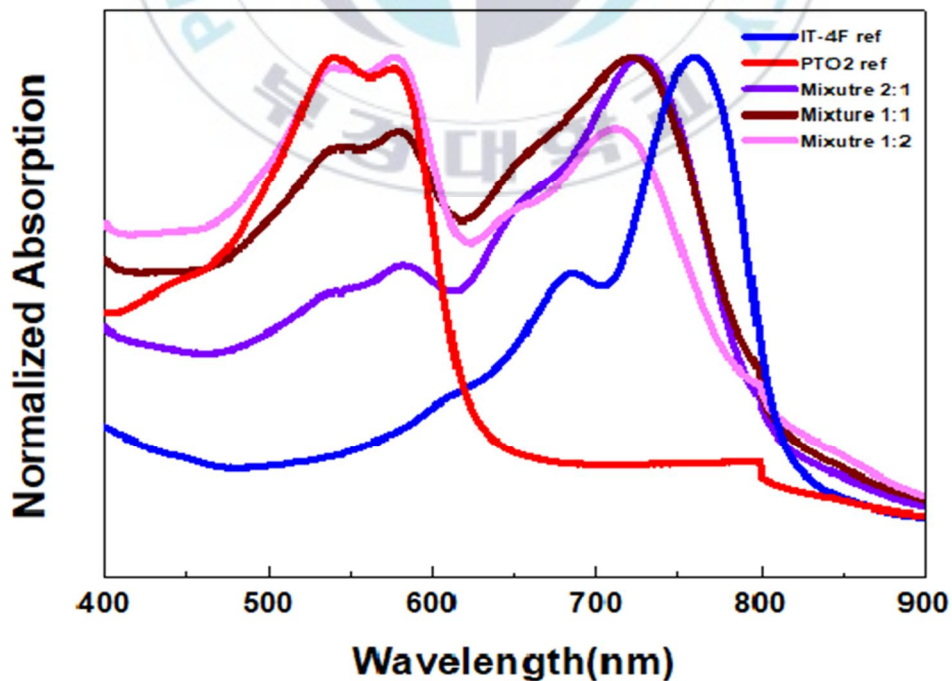


Figure 7. UV-Visible absorption data of film IT-4F, PTO2 and its mixture

Figure 7 는 UV-Visible spectroscopy 측정 결과이다. IT-4F 저분자 엑셉터 필름의 경우 적색영역과 낮은 근적외선 영역에서 가장 높은 피크를 보여주었고, PTO2 고분자 도너 필름의 경우에는 녹색영역에서 넓은 피크를 보여주었다. 또한 IT-4F 와 PTO2 의 혼합 필름의 경우 IT-4F 엑셉터와 PTO2 도너가 가지는 흡수 파장 피크를 모두 가지는 모습을 보여주었다. 또한 도너 물질의 비율이 늘어날수록 녹색영역에서 높은 피크를 보여주었으며, 도너물질의 비율이 매우 낮을 때도 약간의 넓은 피크가 나타났다. 이는 본 실험에 사용된 엑셉터-도너 조합이 응집이나 상분리와 같은 별도의 방해요소를 형성하지 않으며 엑셉터-도너 박막이 고르게 분포된 형태라고 추측된다. 벌크 이중접합 구조에서 엑셉터-도너의 비율은 매우 중요하다. 도너의 비율이 늘어나 녹색 영역의 흡수가 늘었다고 해도 전기적 특성에서는 과도한 상극 캐리어의 축적으로 전하 이동의 방해요소가 될 수 있다^[10]. 이 후 적절한 엑셉터-도너 비율을 설정하기 위하여 전기적 특성 및 박막 표면 특성 파악을 진행하였다.

나. 혼합 비율에 따른 박막의 모폴로지 변화

Atomic Force Microscopy (AFM) 장비를 통해 엑셉터-도너 혼합 필름의 표면 특성을 확인하였다. **Figure 8** 는 5um 의 사이즈로 스캔한 혼합 박막의 표면이다. IT-4F 박막의 경우 큰 입자 크기를 가진 저분자 물질들이 확인되었고, PTO2 박막의 경우 매우 평평하고 고른 박막이 형성된 것을 확인할 수 있었다. 이에 따라 엑셉터-도너 2:1 비율의 박막은 큰 입자를 가진 IT-4F 엑셉터 물질과 고른 박막을 가진 PTO2 도너 물질이 나노미터단위로 고르게 분포되어있는 것을 확인할 수 있었다. 이는 물질간의 응집이 일어나지 않고 벌크이종접합 구조의 박막이 잘 형성된 것으로 확인되었다

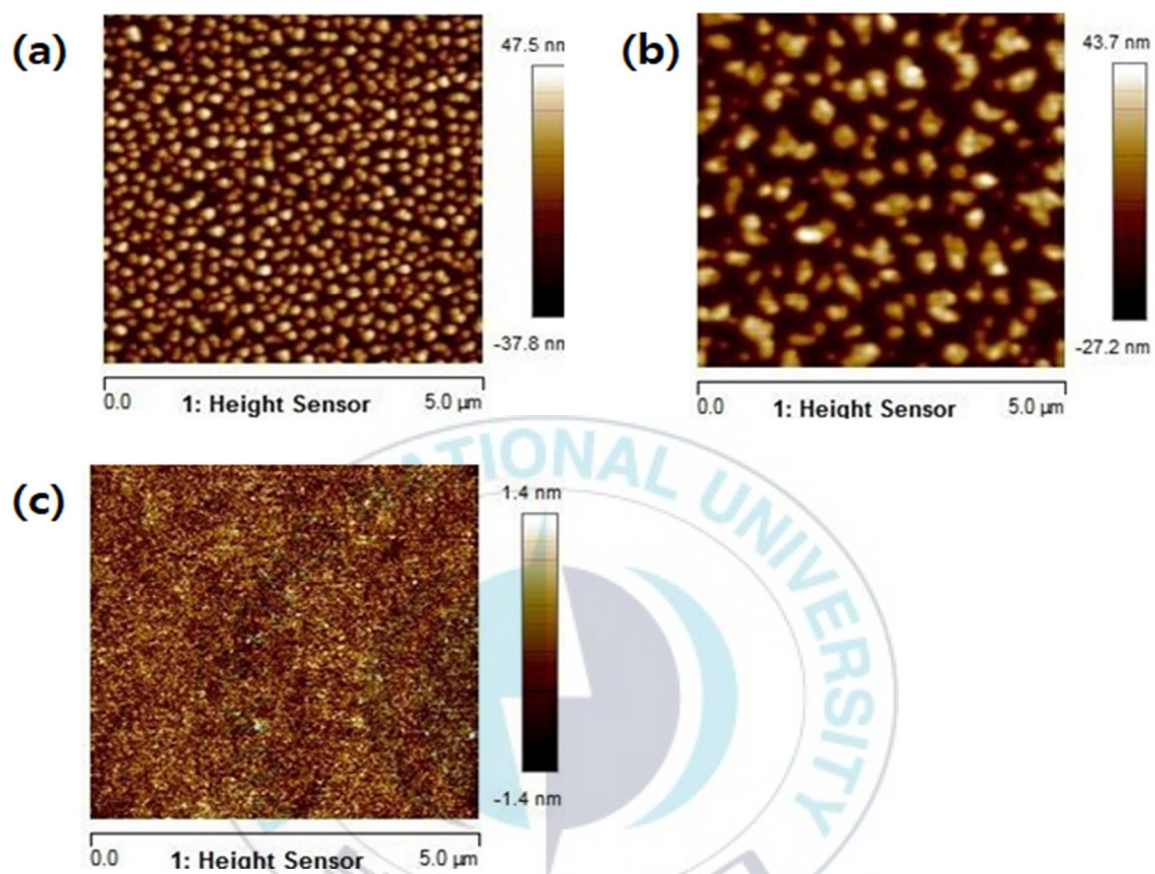


Figure 8. AFM images of (a) IT-4F, (b) 2:1 blended (c) PTO2

다. 포토트랜지스터의 전기적 특성 평가

PTO2 도너 물질의 비율이 늘어나 청록광 영역의 흡수도가 늘어난다고 해도 과도한 상극 캐리어의 축적으로 인하여 전하 이동의 방해요소로 작용할 수 있다. 따라서 제작한 포토 트랜지스터의 전기적 특성을 평가하기 위하여 Probe station 장비와 3D 프린터 장비로 직접 제작한 지그를 사용하여 전달곡선 및 출력곡선을 확인하였다. 반도체 소자 채널의 길이와 넓이는 각각 5um, 1mm 이며 혼합된 반도체 용액의 농도는 0.5wt%로 고정하였다. 각 프로브를 소스,드레인,게이트 전극에 접지시키고 드레인전극과 게이트 전극에 전압을 인가하여 소스전극과 드레인 전극 사이에 흐르는 전류를 측정하여 전기적 특성을 확인하였다. 전달 곡선은 게이트 전압을 -60V 부터 60V 까지 1V 간격으로 전압을 인가하였고, 드레인 전압은 10V 선형 영역과 50V 포화영역으로 고정하였다. 또한 3D 프린터로 제작한 지그와 레이저 다이오드를 Probe station 과 결합하여 Blue(450nm), Cyan-Blue(488nm), Green(532nm) 영역의 빛을 조사해 포토 트랜지스터의 광센서 특징을 확인하였다. 제작된 포토트랜지스터는 상단 게이트전극과 하단 소스-드레인 전극을 가지며, 아래쪽에서 빛을 조사하는 BL-TGBC 구조이고 전송 곡선의 전기적 특성을 통하여 광-센서로써의 성능을 확인하였다.

Figure 10 에 엑셉터-도너의 혼합 비율에 따른 전송곡선과 출력곡선을 나타내었다. 측정 결과 IT-4F,PTO2 단일 박막을 가지는 소자의

경우에는 전형적인 P 형, N 형 소자의 성능을 보여준다. 그러나 IT4F 와 PTO2 를 혼합한 박막의 경우에는 양극성(ambipolar)특성을 나타내며, 1:1 비율 에서는 P 형과 N 형의 전류가 균형을 이룬다. IT-4F:PTO2 가 2:1 의 비율에서 이동도가 $0.0026\text{cm}^2/\text{Vs}$ 로써 가장 높은 이동도를 가진다. 도너 물질인 PTO2 의 비율이 늘어날수록 점멸비(On/off ratio)가 줄어들었으며, 문턱전압이 양으로 편이되는 것을 확인하였다. 이후 488nm 의 파장과 0.2mW 의 광도를 가진 레이저 다이오드를 사용하여 엑셉터-도너 물질의 혼합비율에 따른 광센서 특성을 확인하였을 때, IT-4F,PTO2 단일 소자 및 혼합용액의 소자의 전기적 특성에서 OFF 상태에서 I_d 의 증가를 확인할 수 있었다. 이는 단일 박막을 가진 소자의 경우 전류의 차이가 10 정도로 매우 작은 수치였지만, 혼합용액의 경우 10^3 정도로 큰 수치를 보여주었다. 이는 단일 박막의 경우 반도체 채널에서 생성된 엑시톤이 해리되지 못하고 재결합하여 사라지는 현상에 의한 것으로 파악되며, 혼합 물질의 박막을 가진 소자의 경우 벌크 이중접합 구조가 잘 형성되어 엑시톤이 도너-엑셉터 계면에서 전자와 정공으로 분리가 잘 이루어져 광 전류의 생성을 원활하게 함을 나타낸다. 혼합 박막을 가진 소자는 2:1 비율에서 최대 887mA/W 의 가장 높은 광응답 특성을 얻을 수 있었다. 이는 벌크 이중접합 구조의 특성 상 일정 비율 이상의 도너 물질 포함시에 나타나는 상극 전하 축적으로 인한 광전류 감소 현상으로 판단된다. 수중에서 나타나는 빛의 산란 혹은 감쇠등의 방해요소로 인한 광량 감소로 수중 광통신에 쓰이는 포토-

트랜지스터는 매우 약한 빛에도 반응할 수 있어야 하므로, 0.2mW 의 약한 빛에서도 높은 응답특성을 보이는 결과는 수중 무선통신에 대한 가능성을 제시하였다.

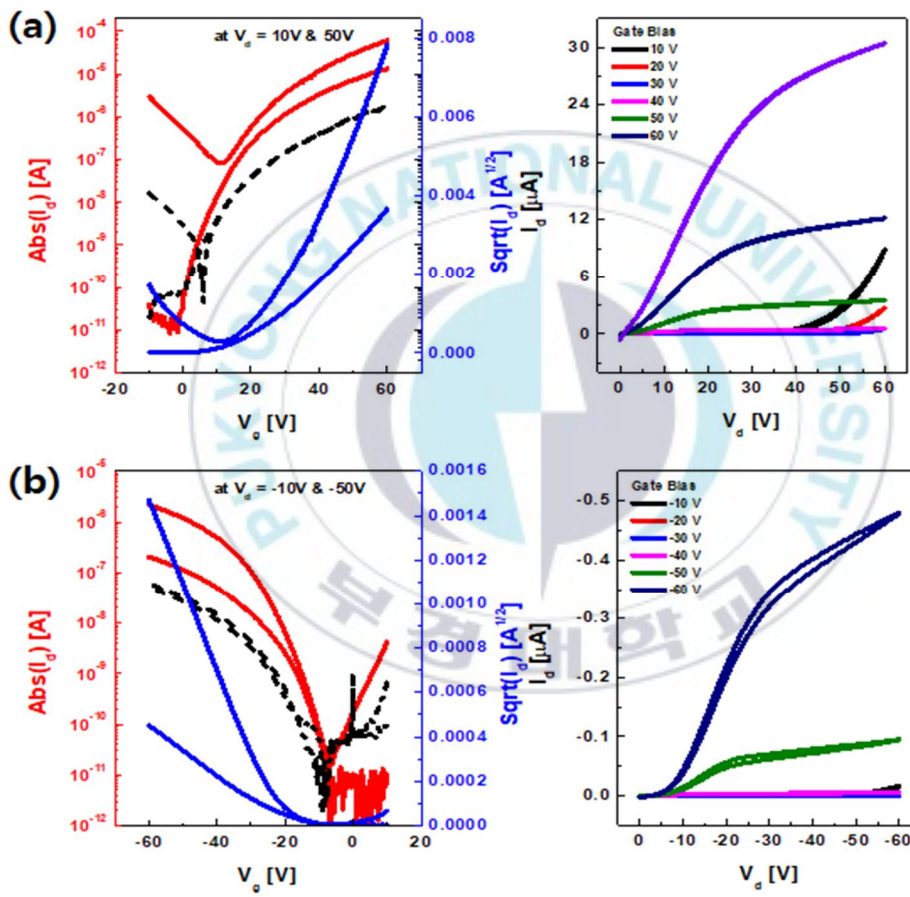


Figure 9. Transfer curve and Output curve of (a) pristine IT-4F,
(b) pristine PTO2

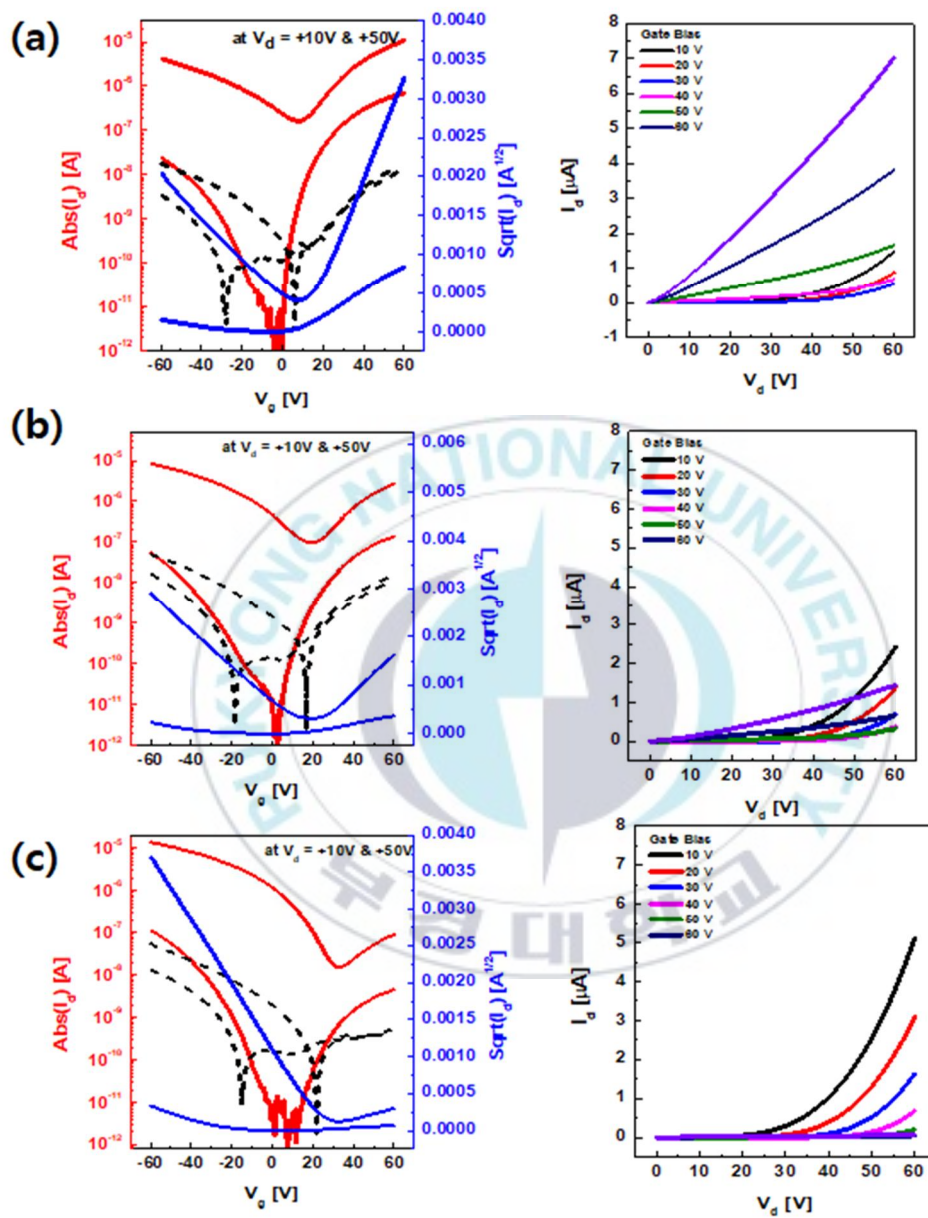


Figure 10. Transfer curve and Output curve of blended device (a) 2:1 blended, (b) 1:1 blended, (c) 1:2 blended (Acceptor:Donor, wt%)

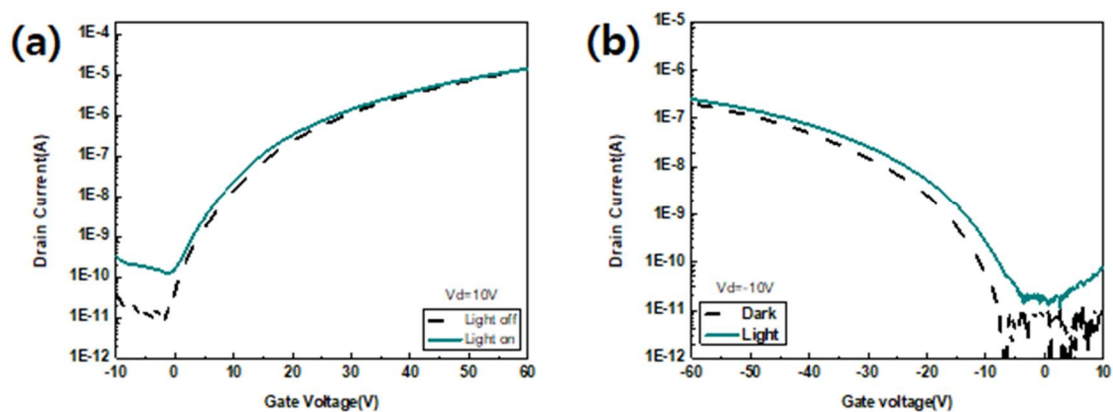


Figure 11. Transfer curve under dark state /light state (a) pristine IT-4F
(b) pristine PTO2

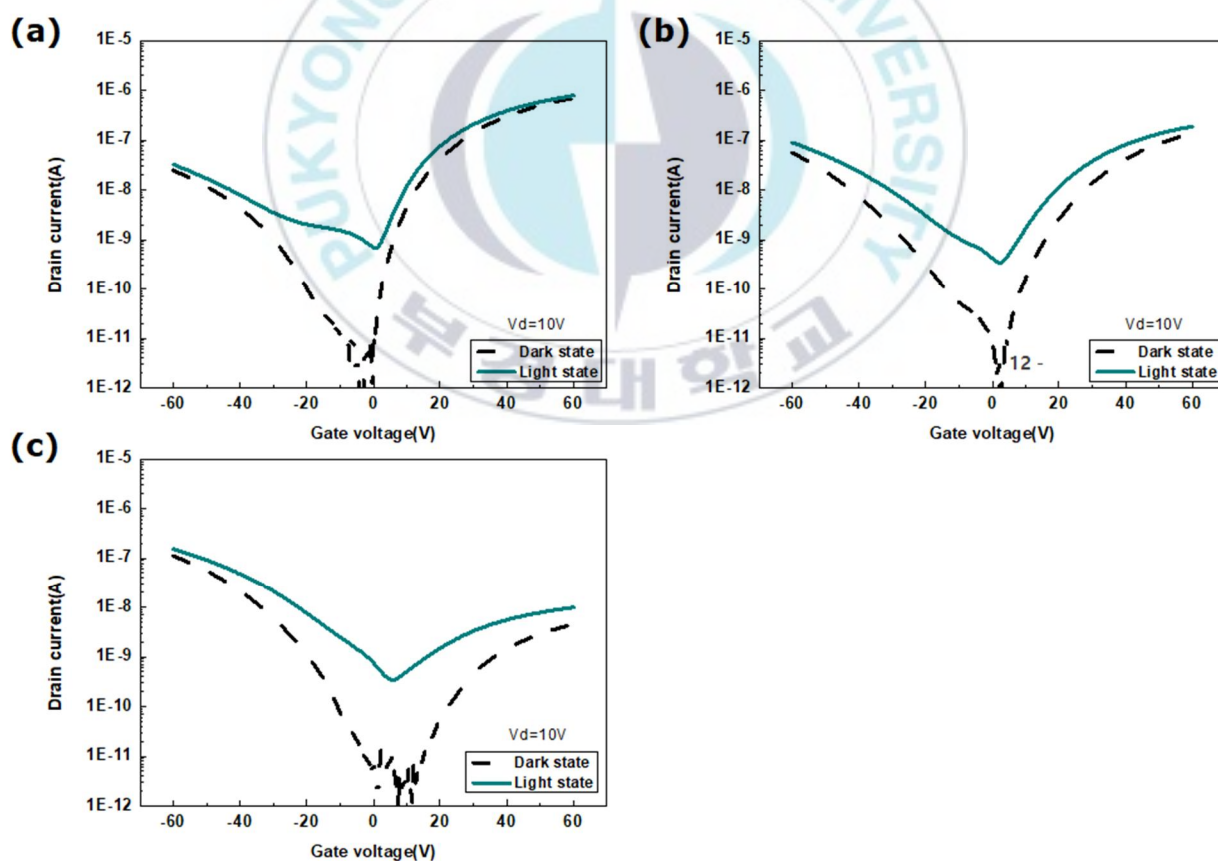


Figure 12. Transfer curve under dark state /light state (a) 2:1 blended, (b) 1:1 blended, (c) 1:2 blended (Acceptor:Donor, wt%) at $V_d=10V$

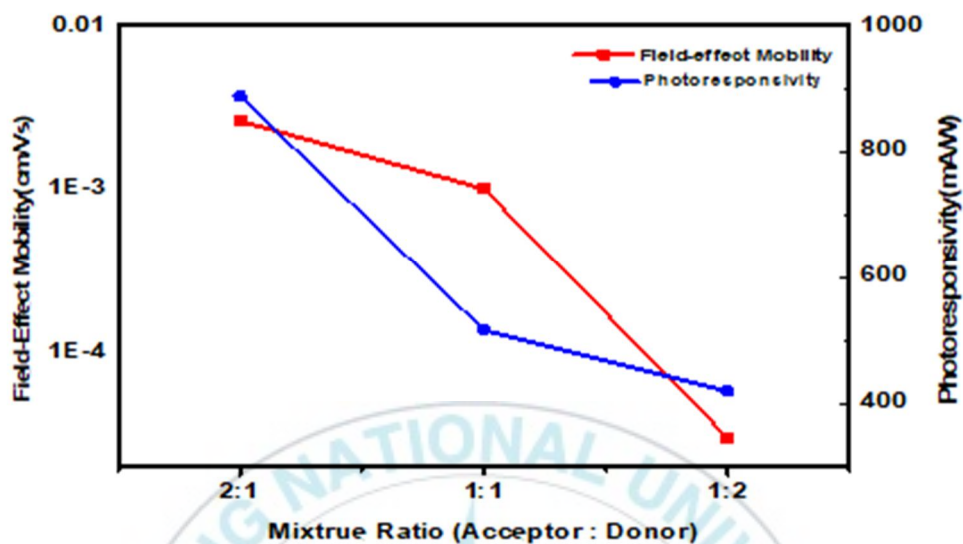


Figure 13. Field-effect Mobility and Photoresponsivity by Acceptor-Donor Ratio

Acceptor/Donor Ratio	2:1	1:1	1:2
Field-Effect Mobility(cm/Vs),Sat.	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
Photosensitivity	6440	978	543
Photoresponsivity(mA/W),max	887	516	419

Table 1. Fundamental device parameters of OPTs using IT-4F and PTO2 blend semiconductors with different blend ratio; 2:1, 1:1, and 1:2 wt%

수중 무선 광통신의 단점은 물이 특정 영역을 제외한 대부분의 파장대의 빛에 대한 높은 흡수도를 가지고 있으며, 플랑크톤과 같은 미세 입자들에

의해 빛의 산란으로 인한 감쇠현상이 일어난다는 점이 있다. 수중의 대부분 파장대의 빛은 바닷물에 의해 흡수된다. 그러나 청색영역(450nm)의 빛부터 녹색영역(532nm)의 빛은 비교적 높은 투과도를 가지고 있으며, 가시광 통신에 사용될 수 있다. 이에 따라 수중 가시광 통신에 쓰일 수 있는 450nm(Blue), 488nm(Cyan-Blue), 532nm(Green) 파장을 가진 빛의 조사에 따른 광-센서 특성을 확인하였다. 빛의 세기는 각각 0.5mW, 1mW, 0.1mW 이며 전송곡선과 출력곡선을 통하여 광응답성과 광민감성을 도출하였다. **Figure.15**의 광 조사에 의한 전기적 특성 변화를 확인해보면, 450nm(0.5mW)의 빛에서는 최대 1A/W, 488nm(1mW)의 빛에서는 0.7A/W, 532nm(0.1mW)에서는 최대 4.7A/W의 높은 응답 특성을 얻을 수 있었다. UV-VIS-NIR 흡광 스펙트럼에서 IT-4F와 PTO2의 혼합 물질의 흡수 파장은 500nm~570nm 영역에서 넓게 나타난 피크를 녹색 영역의 빛에서 4.7A/W의 매우 높은 광 응답성을 나타내었고, 수중 광통신에 주로 사용되는 청색광 영역에서도 0.5mW의 약한 빛에 1A/W 이상의 높은 반응성을 보이는 것을 확인하였다. 이는 PTO2 고분자 도너 물질이 가시광 영역의 넓은 파장대를 흡수하여 엑시톤을 형성하고, 이중접합 구조의 계면에서 효율적으로 전자와 정공으로 분리됨에 따라 광-전류를 효율적으로 생성함을 나타낸다^[21]. 또한 **Figure.17**에 나타낸 빛의 반복적인 On/Off를 통한 광센서 특성을 확인하였을 때, 빠른 응답성과 안정적인 광-센서 특성을 나타내는 것을 확인할 수 있다. 이처럼

수중에서의 빛은 산란 혹은 감쇠 현상으로 인해 매우 낮은 광량을 가지므로, 수중 무선광통신을 위한 OPT 는 매우 약한 빛에서도 높은 반응성을 가져야한다. 본 연구에서 개발한 OPT 는 청색, 녹색 영역에서 $100\mu\text{W}$ 정도의 약한 빛에서 1000mA/W 이상의 높은 반응성을 나타내었으며, 이는 수중 무선 광통신 분야에 충분히 응용할 수 있음을 보여준다



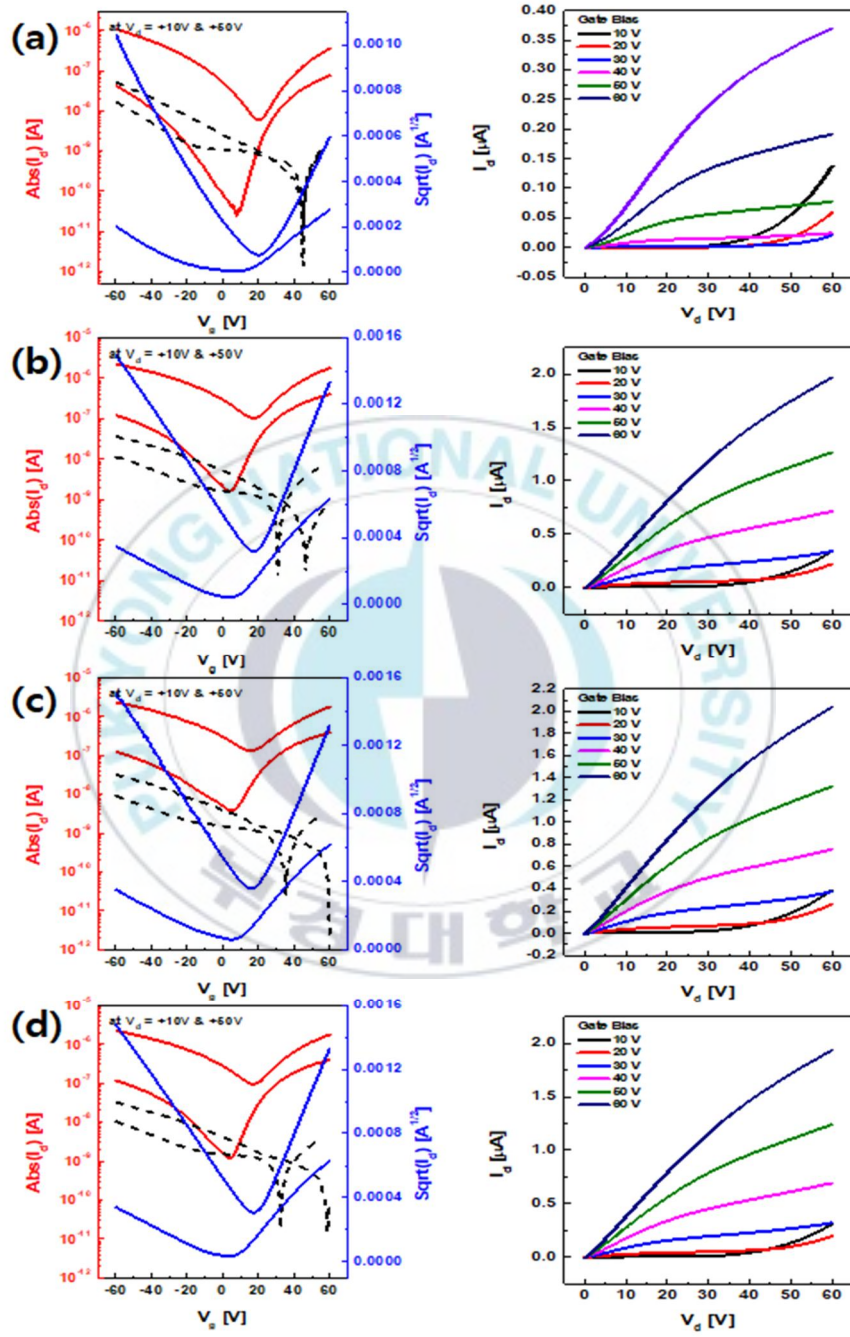


Figure 14. Comparison of Trasfer curves and output curves under (a) Dark state and light illumination of (b) 450nm, (c) 488nm, (d) 532nm

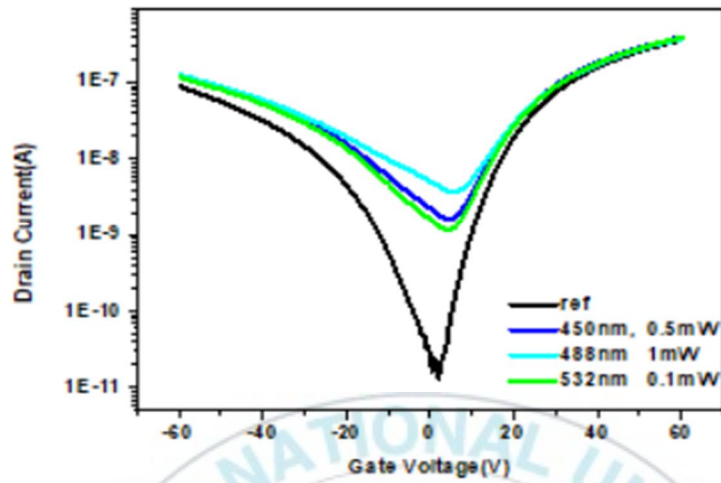


Figure 15. Comparison of Transfer curve at dark state and light illumination ($V_d=+10V$)

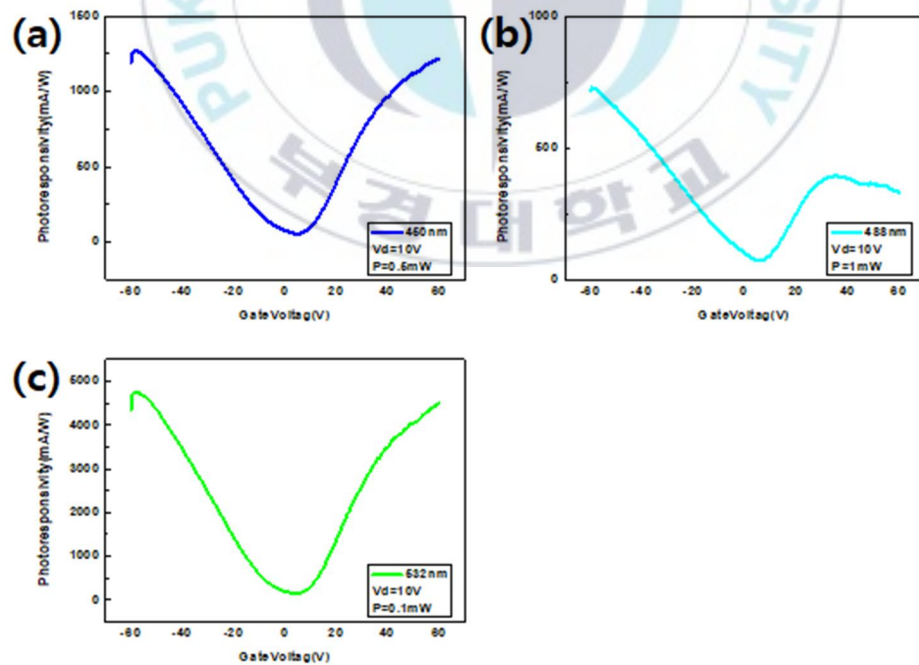


Figure 16. Photoresponsivity under the light illumination at each wavelength
(a) 450nm, (b) 488nm, (c) 532nm

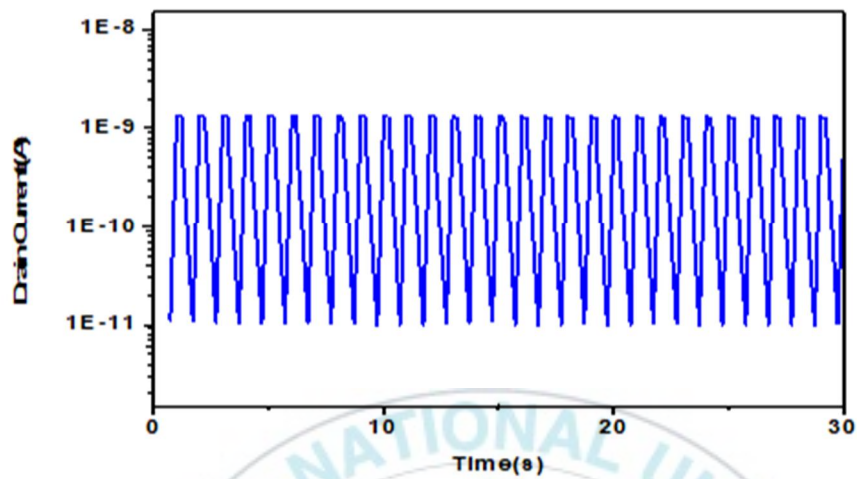


Figure 17. Reproducible light-On/Off switching characteristics of OPTs by irradiation of cyan-blue light

V. 결 론

수중 무선 광-통신 기술은 RF 통신이나 음향 통신보다 훨씬 빠른 통신속도를 가지며 해양의 각종 잡음에도 방해 받지 않는다. 이러한

장점을 가지며 스마트 아쿠아팜, 해양방위산업, 해양 수중드론등 광범위하게 발전하고 있다. 본 논문에서는 수중 가시광 통신용 수신기 모듈에 적용하기 위하여 청색영역과 녹색 영역의 빛에 우수한 반응성을 보이는 유기물 기반의 포토-트랜지스터를 제작하였다. 가시광 영역에서 넓은 영역의 빛에 흡광도를 가지는 P 형 고분자 반도체 PTO2 물질을 저분자 N 형 저분자 엑셉터 물질인 IT-4F 와 일정 비율로 균일하게 혼합하여 벌크-이종접합 광활성층을 가지는 유기물 반도체 기반 포토-트랜지스터 소자를 제작하였다. 엑셉터-도너 물질의 혼합 박막은 500nm~570nm 의 청록색 영역에 매우 높은 흡광도를 보여주었으며, 박막의 표면 모폴로지를 통해 각 물질이 나노스케일로 고르게 분포되어 있는 것을 확인하였다. 또한 포토트랜지스터의 전기적 특성과 광 조사를 통해 광-감응도와 광-민감성을 테스트해보았다. 그 결과 엑셉터-도너 비율이 2:1 혼합 되었을 때, $0.0026\text{cm}^2/\text{Vs}$ 의 가장 높은 전하 이동도를 보여주었으며, 단일 물질로 만들어진 포토트랜지스터에 비해 매우 높은 감응도를 나타내었다. 또한 청록색 영역에서 100W 의 매우 약한 세기의 빛에도 1A/W 이상의 높은 감응도를 보였다. 특히, 녹색영역(532nm)의 빛을 조사하였을 때는 최대 4.7A/W 의 감응도를 보여주었다. 이는 PTO2 도너 물질이 가시광 영역에서 넓은 파장대의 빛을 흡수하여 엑시톤을 형성하고, 고르게 형성된 이종접합 계면에서 엑시톤의 해리를 효율적으로 이끌어냈음을 나타낸다. 이를 통해 본 연구에서 제작된 유기 포토트랜지스터는 용액 공정을 통하여 가시광 영역의 약한 빛에서도 높은

감응도를 나타내며 수중 무선 광통신 기술에 적용될 충분할 가능성을 보여주었다.



참 고 문 헌

- [1] L. Lanbo, Z. Shengli, C. Jun-Hong, Prospects and problems of wireless communication for underwater sensor networks. *Wireless Communications and Mobile Computing*. 8 (2008), or. 977-994.
- [2] Jun-Hong Cui, Jiejun Kong, M. Gerla, Shengli Zhou, The challenges of building scalable mobile underwater wireless sensor networks for aquatic applications. *IEEE Network*. 20 (2006), or. 12-18.
- [3] H. Kaushal, G. Kaddoum, Underwater Optical Wireless Communication. *IEEE Access*. 4 (2016), or. 1518-1547
- [4] G. Schirripa Spagnolo, L. Cozzella, F. Leccese, Underwater Optical Wireless Communications: Overview. *Sensors*. 20 (2020), or. 2261.
- [5] H. Yoo et al., A Review of Phototransistors Using Metal Oxide Semiconductors: Research Progress and Future Directions. *Advanced Materials*. 33 (2021), or. 2006091.

- [6] K.-J. Baeg, M. Binda, D. Natali, M. Caironi, Y.-Y. Noh, Organic Light Detectors: Photodiodes and Phototransistors. *Advanced Materials*. 25 (2013), or. 4267-4295.
- [7] H. Yoo et al., A Review of Phototransistors Using Metal Oxide Semiconductors: Research Progress and Future Directions. *Advanced Materials*. 33 (2021), or. 2006091.
- [8] Y.-C. Lin, W.-C. Yang, Y.-C. Chiang, W.-C. Chen, Recent Advances in Organic Phototransistors: Nonvolatile Memory, Artificial Synapses, and Photodetectors. *Small Science*. 2 (2022), or. 2100109..
- [9] X. Huang, D. Ji, H. Fuchs, W. Hu, T. Li, Recent Progress in Organic Phototransistors: Semiconductor Materials, Device Structures and Optoelectronic Applications. *ChemPhotoChem*. 4 (2019), or. 9-38.

- [10] A. Tavasli, B. Gurunlu, D. Gunturkun, R. Isci, S. Faraji, A Review on Solution-Processed Organic Phototransistors and Their Recent Developments. *Electronics*. 11 (2022), or. 316.
- [11] Y. Guo, G. Yu, Y. Liu, Functional Organic Field-Effect Transistors. *Advanced Materials*. 22 (2010), or. 4427-4447.
- [12] J.-L. Brédas, D. Beljonne, V. Coropceanu, J. Cornil, Charge-Transfer and Energy-Transfer Processes in π -Conjugated Oligomers and Polymers: A Molecular Picture. *Chemical Reviews*. 104 (2004), or. 4971-5004.
- [13] M. A. Ruderer, P. Müller-Buschbaum, Morphology of polymer-based bulk heterojunction films for organic photovoltaics. *Soft Matter*. 7 (2011), or. 5482.
- [14] Y. Li, Molecular Design of Photovoltaic Materials for Polymer Solar Cells: Toward Suitable Electronic Energy Levels and Broad Absorption. *Accounts of Chemical Research*. 45 (2012), or. 723-733.

[15] L. Caranzi, G. Pace, M. Sassi, L. Beverina, M. Caironi, Transparent and Highly Responsive Phototransistors Based on a Solution-Processed, Nanometers-Thick Active Layer, Embedding a High-Mobility Electron-Transporting Polymer and a Hole-Trapping Molecule. ACS Applied Materials & Interfaces. 9 (2017), or. 28785-28794.

[16] G. Horowitz, Organic Field-Effect Transistors. Advanced Materials. 10 (1998), or. 365-377.

[17] H. Sirringhaus, Device Physics of Solution-Processed Organic Field-Effect Transistors. Advanced Materials. 17 (2005), or. 2411-2425.

[18] . Zhao et al., Molecular Optimization Enables over 13% Efficiency in Organic Solar Cells. Journal of the American Chemical Society. 139 (2017), or. 7148-7151.

[19] Y. Cui et al., Achieving Over 15% Efficiency in Organic Photovoltaic Cells via Copolymer Design. *Advanced Materials*. 31 (2019), or. 1808356.

[20] H. Yao et al., 14.7% Efficiency Organic Photovoltaic Cells Enabled by Active Materials with a Large Electrostatic Potential Difference. *Journal of the American Chemical Society*. 141 (2019), or. 7743–7750.

[21] A. Wadsworth, Z. Hamid, J. Kosco, N. Gasparini, I. McCulloch, The Bulk Heterojunction in Organic Photovoltaic, Photodetector, and Photocatalytic Applications. *Advanced Materials*. 32 (2020), or. 2001763.