

전기-광 변환소자 응용을 위한 적색 유기 EL 소자의 광변조 특성

Optical Modulation Characteristics of Red Organic Light Emitting Diodes for the Application on the Electro-optical Conversion Device

김주승¹, 구할본^{2,a}
(Ju-Seung Kim¹ and Hal-Bon Gu^{2,a})

Abstract

We fabricated red organic light emitting diodes(OLEDs) utilizing tris(8-hydroxyquinoline) aluminum (Alq₃) doped with 5 % of (4-(dicyanomethylene)-2-i-propyl-6-(1,1,7,7-tetramethyljulolidyl-9-enyl)-4H-pyran) (DCJTI) and investigated the driving and modulation characteristics for applying to the electro-optical conversion device. To improve the driving characteristics of red OLEDs, 3 V of offset voltage, which is equal to the turn on voltage, is applied to the device. Offset voltage enhanced the optical EL output and reduced the rise time of EL waveforms of red OLEDs, and hence the cutoff frequency is increased with increasing applied voltage. The optical pulse of 100 MHz has been obtained from red OLEDs. Therefore, we confirmed that the red OLEDs can be applied to the fields of optical communication as an electro-optical conversion device.

Key Words : OLEDs, Electro-optical conversion device, Optical pulse

1. 서론

현재 발광 다이오드는 독립된 광원뿐만 아니라 광센서 등의 여러 가지 전기-광 변환소자로서 이용되고 있다. 대표적인 전기-광 변환소자로는 발광 다이오드(light emitting diode)와 레이저 다이오드(laser diode)의 두 종류가 있다. 발광 다이오드는 레이저 다이오드에 비해 광출력은 작지만 제작비용이 저렴하기 때문에 단거리의 홈 네트워크와 차량의 근거리 통신 (LAN)용의 광접속용 전기-광 변환소자로서의 응용이 기대되고 있고, DVD와 오디오 등의 광 디지털 출력단자 등에 이용되고 있다[1].

새로운 평판형 디스플레이로 연구되고 있는 유

기 EL 소자는 박막, 경량이며 면광원으로 자기발광이 가능하다는 장점을 가지고 있다. 또한, 유기 EL 소자를 구성하는 유기층은 일반적으로 비정질이기 때문에 기판과의 격자정합이 문제가 되지 않고, 저온 프로세스에서 제작할 수 있기 때문에 PET(polyethylene terephthalate)기판과 같은 구부릴 수 있는 고분자 기판 위에 소자를 제작하는 것이 가능하다. 현재 유기 EL 소자는 두루마리 TV와 같은 구부릴 수 있는 디스플레이나 조명 광원으로 사용하기 위하여 연구 개발이 진행되고 있다 [2-5].

또한, 유기 EL 소자가 가지는 고속응답 특성을 이용한 면발광 광원으로 응용하기 위하여 광 접속용 발광 소자를 포함하는 광센서 등의 전기-광 변환 소자로서의 응용 가능성에 대한 연구도 진행되고 있다. 유연한 디스플레이와 스마트카드로 대표되는 휴대형 소자의 광 송수신 부분에 유기 수광 및 발광 소자 적용이 가능하며, 저온 프로세스에서 제작이 가능하고 저렴한 가격으로 양산할 수 있는 고분자 광도파로에 유기 수광 및 발광 소자를 모듈

1. Center for Advanced Science and Innovation, Osaka University, Japan

2. 전남대학교 전기공학과
(광주시 북구 용봉동 300)

a. Corresponding Author : hbg@chonnam.ac.kr

접수일자 : 2005. 3. 29

1차 심사 : 2005. 4. 11

심사완료 : 2005. 5. 9

화 하면, 소형, 경량이면서 유연성을 갖는 광 집적 소자 및 회로의 실현이 가능할 것으로 기대되고 있다.

고분자 광도파로와 결합하는 전기-광 변환소자로 응용하기 위해 Alq₃ (tris(8-hydroxyquinoline)aluminum)를 발광층으로 사용한 유기 EL 소자에서는 수십 MHz 정도의 광펄스 응답을 얻을 수 있음이 보고 되었다[6]. 그러나 Alq₃의 형광수명이 약 20 ns이기 때문에 Alq₃를 발광층으로 사용한 유기 EL 소자는 100 MHz 이상의 응답특성을 얻는 것이 불가능하다. 소자의 광출력 주파수를 향상시키고 저손실 전송장이 적의 및 적색 영역인 고분자 도파로에 사용이 가능한 소자를 제작하기 위해서는 형광수명이 짧고 적색영역에서 발광하는 발광 재료를 사용해야 한다. 적색 발광재료인 rubrene을 Alq₃에 도핑하여 발광층으로 사용한 소자에서 기존의 결과보다 향상된 광변조 특성을 얻을 수 있음이 보고 되었다[7]. 하지만, 유기 EL 소자를 광접속용 전기-광 변환소자로 응용하기 위해서는 보다 더 향상된 소자 효율과 광응답 특성이 요구되고 있다. 따라서 본 연구에서는 형광수명이 약 0.7 ns[8] 정도이고, 형광효율이 90 % 이상인 대표적 적색 발광재료 DCJTI (4-(dicyanomethylene)-2-*i*-propyl-6-(1,1,7,7-tetramethyljulolidyl-9-enyl)-4H-pyran)를 Alq₃에 도핑, 발광층으로 사용하여 유기 EL 소자를 제작하였다. 제작한 적색 유기 EL 소자의 전기-광 변환소자로의 응용 가능성을 판단하기 위하여 소자의 구동특성 및 광변조 특성에 대하여 연구하였다.

2. 실험

소자 제작을 위한 유기재료는 정공수송층 α -NPD (N,N'-di-[(1-naphthyl)-N,N'-diphenyl]-(1,1'-biphenyl)-4,4-diamine), 발광층으로 DCJTI 를 도핑한 Alq₃, 캐리어 차단층 BCP (2,9-dimethyl-4,7-diphenyl-1,10-phenanthroline) 및 전자수송층 Alq₃를 사용하였다. 그림 1에 발광층으로 사용한 Alq₃와 DCJTI 의 분자구조와 본 연구에서 제작한 ITO/ α -NPD(50 nm)/Alq₃:DCJTI(30 nm)/BCP(10 nm)/Alq₃(20 nm)/LiF(0.5 nm)/Al(100 nm) 소자의 구조를 나타내었다. 소자는 ITO(indium-tin-oxide)가 코팅된 유리기판을 클로로포름, 에탄올 및 아세톤의 순서로 초음파 세척기에서 세척하고 UV-O₃ 처리를 행한 후, 유기 분자증착법을 사용하여 유기층

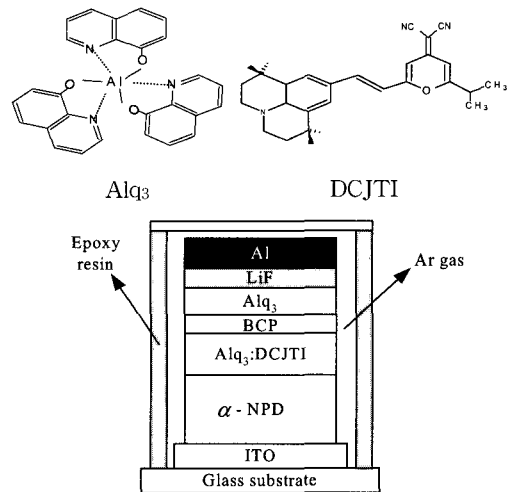


그림 1. 발광재료의 분자구조 및 본 연구에서 사용한 소자구조.

Fig. 1. Molecular structures of Alq₃ and DCJTI and device configuration used in this study.

을 증착하였다. 유기층 증착후 lithium fluoride (LiF)와 Al 전극을 진공증착하여 제작하였다.

적색 진동자를 이용하여 DCJTI의 도핑비를 Alq₃에 대해 5 v/v%로 제어하여 발광층을 제작하였으며, 유기층과 금속전극 증착은 터보 분자펌프가 장착된 증착기를 이용하여 진공도를 각각 약 5×10^{-7} 과 1.5×10^{-6} torr로 유지하였다. 소자 구동중 발생하는 전극의 급속한 산화 등을 방지하기 위하여 아르곤가스가 채워진 글로브 박스에서 유리기판과 에폭시 수지를 이용하여 봉인하였다.

소자의 응답특성을 측정하기 위해 전원으로 펄스발생기(Agilent 8114A)를 사용하고 광검출기 및 광전자 증배관(Hamamatsu Photonics)을 이용하여 유기 EL 소자로부터의 발광을 검출하였다. 소자에 인가한 전압과 발광파형은 디지털 오실로스코프(Tektroniks TDS3054)를 이용하여 동시에 측정하였다.

소자의 발광면적이 감소하면 정전용량의 감소 때문에 유기 EL 소자의 응답특성은 크게 개선된다. 따라서 유기 EL 소자의 응답특성을 정확하게 측정하기 위해 지름이 100 μ m인 원형 발광면적을 갖는 소자를 제작하여 유기 EL 소자에 의한 전기-광 변환소자에의 응용 가능성을 검사하였다.

3. 결과 및 고찰

그림 2는 지름이 100 μm 인 원형의 발광면적을 가진 ITO/ α -NPD/ Alq_3 :DCJTI/BCP/ Alq_3 /LiF/Al 소자에서 측정된 전압-전류-휘도 특성과 EL 발광 스펙트럼을 나타내었다. 제작한 소자는 약 3 V의 인가전압부터 발광이 관측되어 전류밀도 0.01 A/cm^2 에서 약 600 cd/m^2 의 휘도가 얻어지고 최종적으로 12 V에서 약 9200 cd/m^2 의 높은 광출력이 얻어졌다.

이 결과는 발광면적이 $2 \times 2 \text{ mm}^2$ 인 소자에서 측정된 결과인 3000 cd/m^2 보다 약 3배 정도 향상된 것이다. 소자의 발광면적이 감소하여 소자 구동시 발생하는 주열이 감소하는 등의 원인으로 소자의 발광특성이 향상된 것으로 생각된다[9]. 또한, 그림 2에 나타난 소자의 EL 스펙트럼에서는 호스트 물질로 사용한 Alq_3 로부터 발생하는 발광파장인 520 nm 부근의 발광이 관측되지 않았으며, 중심파장이 634 nm인 적색발광을 나타내었다. 이는 호스트 물질인 Alq_3 로부터 발광 재료인 DCJTI로 Förster형태의 에너지 전달이 완전하게 이루어졌음을 의미한다[10].

무기 발광 다이오드에서 고속변조를 실현하기 위해서는 고속의 펄스전류를 발광영역에 주입할 수 있어야 한다. 이를 위해 PN접합의 공핍층을 충전할 필요가 있기 때문에 문턱 전압에 해당하는 오프셋 전압을 인가하여 소자를 구동하는 방법을 사용하여 고속변조를 실현하고 있다. 본 연구에서는 무기 발광 다이오드의 문턱 전압에 상당하는 유기 EL 소자의 턴온 전압을 오프셋 전압으로 인가하여 소자를 구동하고, 오프셋 전압인가에 대한 소자의 응답특성 변화에 대하여 조사하였다. 그림 3은 오프셋 전압 0 V 및 3 V에 대한 피크전압이 10 V인 펄스전압을 인가한 경우의 EL 신호 응답특성을 나타낸다. 구형 펄스전압 폭이 500 ns, 듀티비가 50 %인 1 MHz 주파수의 입력전압을 인가하였다. 소자의 전압-전류-휘도 특성에서 EL 발광이 개시되는 전압인 3 V를 오프셋 전압으로 설정하였다.

오프셋 전압을 인가하여 소자를 구동하는 경우에는 오프셋 전압을 설정하지 않은 경우보다 EL 신호의 상승시간이 짧아지는 것을 알 수 있었으며, EL 출력 신호 강도도 오프셋 전압을 인가한 경우가 인가하지 않은 경우보다 증가함을 알 수 있었다. 무기 발광다이오드와 발광 기구 및 전도기구가 다른 유기 EL 소자에서도 오프셋 전압 인가시 출력신호 증가 및 상승시간 감소 현상이 나타나는

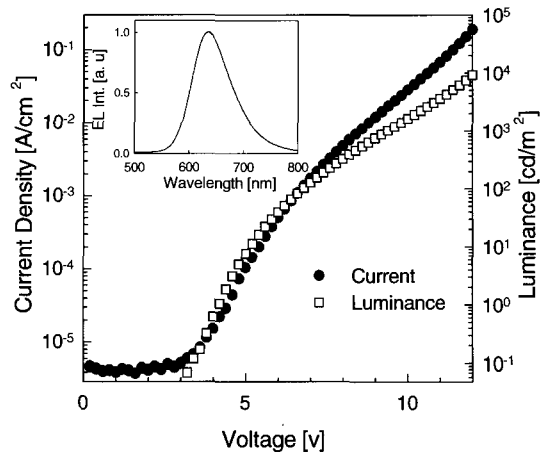


그림 2. 적색 유기 EL 소자의 전압-전류-휘도 특성 및 EL 스펙트럼.
 Fig. 2. Voltage-current-luminance characteristics and EL spectrum of organic EL device.

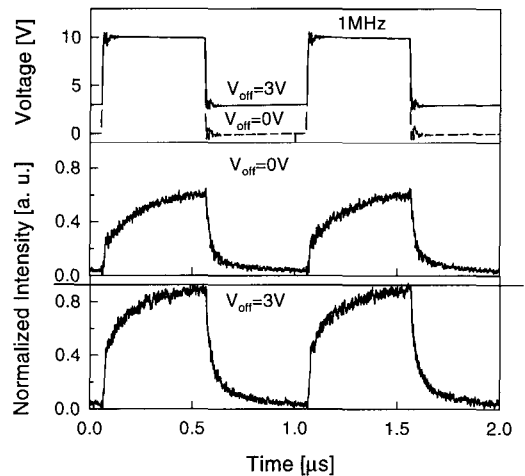


그림 3. 오프셋 전압 0 V 및 3 V에 대하여 피크 전압이 10 V인 펄스 전압을 인가하는 경우의 EL 신호 응답특성.
 Fig. 3. EL response characteristics of device driven at 10 V with the offset voltage of 0 and 3 V.

원인은 오프셋 전압 인가시 유기 EL 소자의 정전 용량을 감소시키고 초기의 공간전하를 형성시켜 소자에 흐르는 전류를 증가시키기 때문으로 생각된다[11].

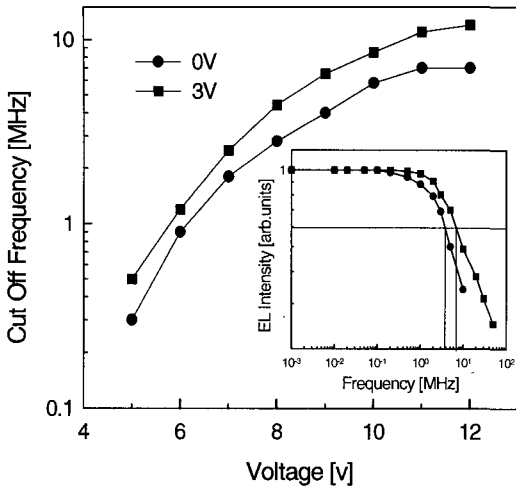


그림 4. 발광소자 차단주파수의 인가전압 의존성 및 주파수에 대한 발광강도 특성.

Fig. 4. Applied voltage dependency to the cutoff frequency. Inset shows the EL intensity-frequency characteristics at 9 V.

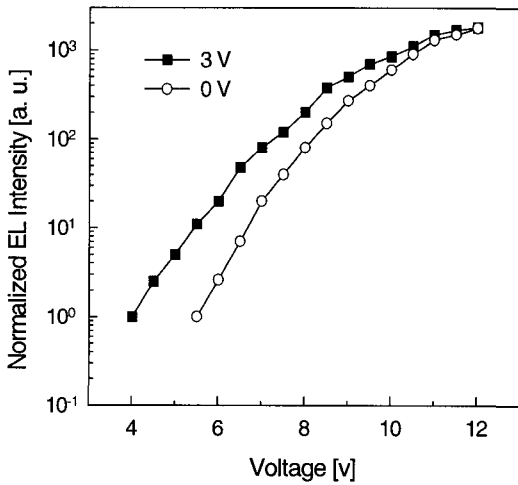
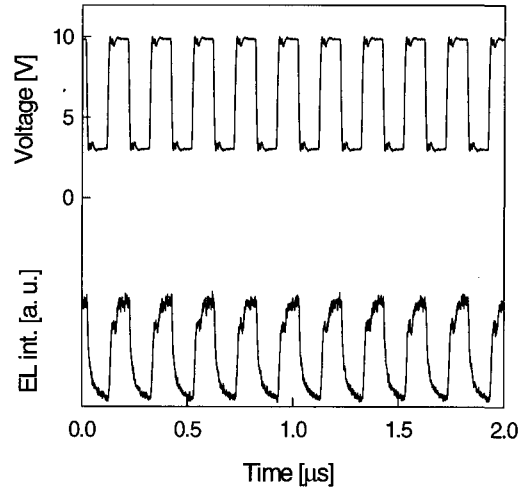


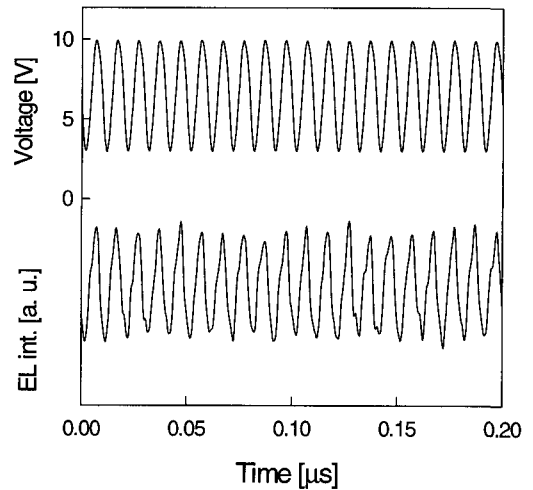
그림 5. 오프셋 전압 0 V 및 3 V에서의 인가전압에 대한 EL 신호 강도(주파: 20 MHz).

Fig. 5. The EL intensity-applied voltage characteristics with the offset voltage of 0 and 3 V at 20 MHz.

그림 4는 오프셋 전압 0 V 및 3 V에 대한 발광소자 구동시 차단주파수의 인가전압에 대한 의존성을 나타낸다. 변조주파수의 변화에 의해 얻어지



(a)



(b)

그림 6. 적색 발광소자의 주파수 변조 특성 (a) 10 MHz, (b) 100 MHz.

Fig. 6. Frequency modulation characteristics of red OLEDs (a) 10 MHz, (b) 100 MHz.

는 변조도를 계산하기 위해 신호강도의 최대치와 최소치의 피크 간 강도를 EL 신호 강도로 정의하고 10 kHz 구동시의 EL 신호강도에 대해 규격화하여 신호 강도를 표시하였다. 또한, 차단주파수는 발광강도가 초기값보다 3 dB 감소한 주파수로 정의하였다. 첨가된 그림은 피크 전압이 9 V인 펄스

전압을 인가한 경우의 EL 신호 강도에 대한 주파수 의존성을 나타낸다. 인가전압 9 V에서의 차단주파수는 오프셋이 인가되지 않은 경우 약 4 MHz, 3 V의 오프셋이 인가된 경우에는 약 7 MHz를 나타내었다. 인가전압에 대한 차단주파수는 모든 전압영역에서 오프셋 전압을 인가시에 증가함을 알 수 있었으며, 특히 고전압 영역인 12 V에서 측정된 차단주파수는 각각 7, 12 MHz로 오프셋 전압을 인가함에 따라 약 5 MHz의 차단주파수가 증가함을 알 수 있었다.

그림 5는 펄스 전압의 주기를 20 MHz로 고정하고 3 V의 오프셋 전압을 적용한 경우와 적용하지 않은 경우에 얻어진 EL 신호 강도의 펄스 인가전압 의존성을 나타낸다. 오프셋 전압을 인가하지 않은 경우보다 3 V의 오프셋 전압을 인가한 경우에 저전압 영역에서 발광강도가 증가함을 알 수 있다. 오프셋 전압에 의한 유기 EL 소자의 캐패시턴스 충전이 고전압 영역보다 저전압 영역에서 소자구동에 효과적인 것으로 생각된다. 이상의 결과에서 유기 EL 소자의 경우도 오프셋 전압을 인가한 상태에서 소자를 구동하면 저전압 영역에서 수십 MHz의 변조를 이용한 전기-광 변환소자로서 이용이 가능함을 알 수 있다.

그림 6은 적색발광 유기 EL 소자에 펄스전압 10 V, 오프셋 전압 3 V를 인가하고 듀티비를 50%로 유지하여 얻은 주파수 변조 특성을 나타내었다. 주파수가 10 MHz인 그림 6(a)에서 입력 전압 펄스와 출력되는 EL 파형은 구형파의 형태를 유지하고 있음을 알 수 있다. 주파수가 증가함에 따라 인가전압의 유지시간이 감소하고, 그 결과로 그림 6(b)에 나타난 것과 같이 100 MHz의 주파수에서 광 펄스 응답을 얻을 수 있음을 나타내었다. 입력 전압과 광출력 파형은 오프셋 전압인 최저 3 V와 최대 10 V를 나타내고 있지만 유지 시간이 감소하여 사인과 형태의 파형으로 변화되었음을 알 수 있었다. 이상의 결과에서 유기 EL 소자도 100 MHz 이상의 디지털 신호를 전송하기 위한 전기-광 변환소자로서 사용이 가능함을 알 수 있었다.

4. 결론

본 연구에서는 Alq₃에 DCJTI를 도핑한 유기층을 발광층으로 사용한 적색 유기 EL 소자를 제작하고, 전기-광 변환소자로서의 응용 가능성을 판단하기 위하여 소자의 구동 특성 및 광변조 특성 등을 조사하였다.

유기 EL 소자 구동 특성을 향상시키기 위해 소자의 턴온전압에 해당하는 3 V의 오프셋 전압을 인가하여 구동한 결과 소자 정전용량의 감소로 인한 전류상승에 의해 EL 신호의 상승시간이 짧아지고 EL 출력 신호강도가 증가하였다. 소자 구동시 오프셋 전압의 영향으로 인가전압에 대한 차단주파수가 증가하였으며, 저전압 구동에서도 수십 MHz의 광펄스 출력을 얻을 수 있었다. 또한, 오프셋 전압 3 V와 최고 전압 10 V를 인가하여 100 MHz의 주파수에서 광펄스 응답을 얻을 수 있었으며, 이 결과로부터 유기 EL 소자도 100 MHz 이상의 디지털 신호를 전송하기 위한 전기-광 변환소자로서의 사용이 가능함을 알 수 있었다.

감사의 글

이 논문은 2002년도 한국학술진흥재단의 지원에 의하여 연구되었음(KRF-2002-041-D00234).

참고 문헌

- [1] P. Modak, D. Delbeke, I. Moerman, R. Baets, P. Van Daele, and P. Demeester, "InAlGaP microcavity LEDs on Ge-substrates", *J. Crystal Growth*, Vol. 221, p. 668, 2000.
- [2] 김주승, 김종욱, 구할본, "Exciplex를 이용한 백색 전계발광소자의 발광특성", *전기전자재료학회논문지*, 14권, 9호, p. 762, 2001.
- [3] C. W. Tang and S. A. Vanslyke, "Organic electroluminescent diodes", *Appl. Phys. Lett.*, Vol. 51, No. 12, p. 913, 1987.
- [4] Y. Ohmori, H. Kajii, T. Sawatan, H. Ueta and K. Yoshino, "Enhancement of electroluminescence utilizing confined energy transfer for red emission", *Thin Solid Films*, Vol. 399, p. 407, 2001.
- [5] 김주승, 구할본, "Poly(3-hexylthiophene)의 PL 발광 메커니즘에 관한 연구", *전기전자재료학회논문지*, 14권, 2호, p. 133, 2001.
- [6] Y. Ohmori, H. Kajii, T. Sawatan, H. Ueta "Realization of polymeric optical intergrated devices utilizing organic light-emitting diodes and photodetectors fabricated on a

- polymeric waveguide”, *IEEE J. Selected Topics in Quantum Electronics*, Vol. 10, No. 1, p. 70, 2004.
- [7] H. Kajii and Y. Ohmori, “Transient properties of organic electroluminescent diode using 8-hydroxyquinoline aluminum doped with rubrene as an electro-optical conversion device for polymeric integrated devices”, *Jpn. J. Appl. Phys., Part 1*, No. 41, p. 2746, 2002.
- [8] C. W. Chang, Y. T. Kao, and E. W. G. Diau, “Fluorescence lifetime and nonradiative relaxation dynamics of DCM in nonpolar solvent”, *Chem. Phys. Lett.*, Vol. 374, p. 110, 2003.
- [9] S. Tokita, H. Tanaka, K. Noda, A. Okada, and Y. Taga, “Thermal stability oligomeric triphenylamine/tris(8-quinolinolato)aluminum electroluminescent devices”, *Appl. Phys. Lett.* 70, p. 1929, 1997.
- [10] J. S. Kim, B. Y. Seo, and H. B. Gu, “Exciplex emission and energy transfer in white light-emitting organic electroluminescent device”, *Synth. Met.*, Vol. 132, p. 285, 2003.
- [11] W. Brütting, H. Riel, T. Beierlein, and W. Riess, “Influence of trapped and interfacial charges in organic multilayer light-emitting devices”, *J. Appl. Phys.*, Vol. 89, p. 1704, 2001.