유기반도체와 금속의 하이브리드 나노구조체 특성 및 응용

DOI: 10.3938/PhiT.19.063

주진수

Characteristics and Applications of Organic Semiconductor/Metal Hybrid Nanostructures

Jinsoo JOO

Organic semiconductors have been used as optoelectronic and bio-sensing materials because of the efficient light emission or absorption properties and p -type charge transport. The hybrid nanostructures of organic semiconductors with nanoscale metals offer surface plasmon (SP)-enhanced luminescence, which can be applied to organic-based optoelectronics, photonics, plasmonics and sensing. Various hybrid nanostructures using light-emitting organic semiconductors with nanoscale metals have been fabricated and have shown considerable enhancement of photoluminescence efficiency due to energy and charge transfer effects in SP resonance coupling. In this paper, recent conceptual and technological achievements in organic semiconductors-based hybrid nanostructures are described.

서론

유기 반도체(organic semiconductors)는 구성 탄소원자 간의 단일결합과 이중결합이 교대로 반복되는 π -공액(π -conjugated) 구조를 갖는 특징이 있다.^[1-3] 대표적인 π -공액 구조의 고분자(polymer) 물질로는 polyacetylene, polypyrrole, polyaniline, polythiophene(PTh), poly(p -phenylenevinylene, PPV) 등과 이들의 유도체(derivative)가 있으며, π -공액 구조 단분자(small molecule)의 예로는 pentacene, perylene, ru-

Fig. 1. Applications of flexible devices using organic semiconductors: (a) Organic light-emitting diode (OLED). (b) Organic field-effect transistor (OFET). (c) OLED display driven by OFET. (d) Organic photovoltaic cell (OPVC).

brene, 및 phthalocyanine 등이 있다.^[4] 이들 유기 반도체는 경량성, 유연성, 가공성, 및 대면적 처리특성 등이 우수할 뿐만 아니라 도핑(doping)에 의해 구조적, 광학적, 전기적 특성을 조절할 수 있으므로^[5] 유기 발광 다이오드(organic light-emitting diode, OLED), 유기 전계효과 트랜지스터(organic field-effect transistor, OFET), 유기 태양 전지(organic photovoltaic cell, OPVC), 및 전기변색(electrochromic) 소자 등과 같은 광전자(optoelectronic) 소자의 활성층(active layer)으로 사용되고 있다 (그림 1 참고).^[6]

실리콘에 기반한 나노과학 및 나노기술의 급격한 발전과 함께, 유기물 나노입자(nanoparticle, NP), 나노선(nanowire, NW), 및 나노튜브(nanotube, NT) 등과 같은 다양한 나노구

저자약력

주진수 교수는 미국 Ohio State University(1988-1994)에서 응집물질물리학 전공으로 박사학위를 취득하였다. 1995년부터 현재까지 고려대학교 물리학과에서 교수로 재직 중이며, 국제학술저널인 Synthetic Metals의 지역 편집장으로 활동하고 있다. 연구분야는 유기 반도체 기반 나노구조체 및 유기/무기 하이브리드 나노구조체의 합성, 나노규모 물성 연구 및 이를 이용한 광전자 소자 및 바이오 소자에 대한 응용 등이다. (jjoo@korea.ac.kr)

REFERENCES

- [1] A. J. Heeger, Rev. Mod. Phys. **73**, 681 (2001).
- [2] A. G. MacDiarmid, Rev. Mod. Phys. **73**, 701 (2001).
- [3] H. Shirakawa, Rev. Mod. Phys. **73**, 713 (2001).
- [4] A. J. Heeger, Synth. Met. **125**, 23 (2002).
- [5] A. J. Heeger, S. Kivelson, J. R. Schrieffer and W. P. Su, Rev. Mod. Phys. **60**, 781 (1988).
- [6] C. Reese and Z. Bao, Mater. Today **10**, 20 (2007).

조체(nanostructure)에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다. 최근, 유기 반도체와 무기 금속을 이용한 하이브리드(hybrid) 나노구조체에서 광발광(photoluminescence, PL) 증가 현상이 보고되고 있다. 이는 표면 플라즈몬 공명(surface Plasmon resonance, SPR) 현상을 통한 에너지 전달(energy transfer) 또는 전하 전달(charge transfer) 현상으로 해석된다.^[7] 표면 플라즈몬은 유전체(dielectrics)와 금속의 경계면에 입사된 전자기파와 금속 내부의 자유 전자(free electron)의 상호작용에 의해서 생성된 자유 전자의 결맞은 여기(coherent excitation)로 정의되며, 경계면을 따라 전파되는 표면 플라즈몬-폴라리톤(polariton)을 유발한다. 표면 플라즈몬 공명 현상은 하이브리드 나노구조체를 형성하는 나노규모(nanoscale) 금속의 표면 플라즈몬 에너지와 발광(light-emitting) 유기 반도체의 포톤(photon) 에너지가 적절히 정합(match)되는 경우 관찰되는데, 금속과 유기 반도체 사이에 에너지 전달(transfer)이 이루어지며, 하이브리드 나노구조체의 광발광 효율이 증가한다.

이어지는 글에서는 다양한 유기 반도체와 금속의 하이브리드 나노구조체 제작 및 물리적 특성 변화와 이를 이용한 응용 분야를 소개한다.

유기 반도체/금속 하이브리드 나노구조체의 제작 및 물성

유기 반도체 고분자와 금속을 이용한 다양한 형태의 하이브리드 나노구조체를 그림 2에 도식하였다.^[8] 그림 2(a)에서 볼 수 있듯이, 동축 이중벽 구조(coaxial bi-layered type)의 하이브리드 나노튜브는 유기 반도체 나노선이나 나노튜브의 바깥 쪽을 나노 두께의 금속이 감싸고 있는 형태이다. 직렬형(serial-type) 하이브리드 나노선은 서로 다른 유기 반도체 나노선이 교대로 성장된 구조를 가지고 있으며, 직렬형 하이브리드 나노선의 바깥 쪽에 금속 나노튜브로 형성시킬 수도 있다. (그림 2(b), 2(c) 참고) 그림 2(d)와 2(e)에서는 금속 나노입자를 유기 반도체 나노선과 나노입자에 흡착시킨 하이브리드 나노구조체를 도식하였다.

1. 동축 이중벽 하이브리드 나노튜브^[9]

유기 반도체 고분자/금속 동축 이중벽 하이브리드 나노튜브의 제작 방법은 다음과 같다. 먼저, 전기화학중합(electrochemical polymerization) 방법으로 나노다공성 알루미늄 템플레이트(nanoporous alumina template)의 나노기공(nanopore) 내부에 발광고분자인 PTh를 나노튜브의 형태로 합성한 후, 전기증착(electrodeposition) 방법으로 구리(Cu), 니켈(Ni), 코발트(Co), 금(Au)과 같은 금속 나노튜브를 연속적으로 형성하

Fig. 2. Schematic illustrations of various hybrid nanostructures using organic semiconductor: (a) Coaxial bi-layered type hybrid organic semiconductor/metal NTs. (b) Serial-type hybrid NW. (c) Serial-type hybrid NW coated with metal NT. (d) Hybrid nanostructure of organic semiconductor-NW/metal-NPs. (e) Hybrid organic semiconductor/metal NPs.^[8]

였다. 금속 나노튜브는 소수성(hydroporbic)을 띠는 PTh 나노튜브와 친수성(hydrophilic)을 띠는 알루미늄 나노기공 사이에 빈 공간에서 형성된다.^[10] 그림 3은 PTh/Cu, PTh/Ni, PTh/Co 동축 이중벽 하이브리드 나노튜브의 주사전자현미경(scanning electron microscope, SEM), 투과전자현미경(transmission electron microscope, TEM) 및 고분해능(high resolution, HR) 투과전자현미경 이미지이다. 하이브리드 나노튜브의 내부에서 유기 반도체 고분자인 PTh가 관찰되며, 그 바깥 부분을 금속 나노튜브가 감싸고 있는 것을 확인할 수 있다. 하이브리드 나노튜브의 외경(outer diameter)은 ~200 nm, 길이는 10~30 μ m, PTh 나노튜브와 Cu, Ni, Co 나노튜브의 벽 두께는 각각 5~10 nm로 확인되었다.

유기 반도체 고분자/금속 하이브리드 나노튜브의 광학적

REFERENCES

- [7] W. L. Barnes, A. Dereux and T. W. Ebbesen, *Nature* **424**, 824 (2003).
- [8] D. H. Park, M. S. Kim and J. Joo, *Chem. Soc. Rev.* **39**, 2439 (2010).
- [9] J. Joo, D. H. Park, M. Y. Jeong, Y. B. Lee, H. S. Kim, W. J. Choi, Q. H. Park, H. J. Kim, D. C. Kim and J. Kim, *Adv. Mater.* **19**, 2824 (2007).
- [10] D. H. Park, Y. B. Lee, M. Y. Cho, B. H. Kim, S. H. Lee, Y. K. Hong, J. Joo, H. C. Cheong and S. R. Lee, *Appl. Phys. Lett.* **90**, 093122 (2007).

Fig. 3. SEM and TEM images of the hybrid coaxial NTs: (a) Hybrid PTh/Cu NTs. Inset: Schematic chemical structure of PTh unit. (b) Hybrid PTh/Ni NTs. (c) Hybrid PTh/Co NTs. (d) TEM image of hybrid PTh/Cu single NT. (e) Magnification of HR-TEM image of hybrid PTh/Cu single NT.^[9]

특성을 그림 4에 나타내었다. 하이브리드 나노튜브 한 가닥의 PL 이미지와 세기는 레이저 공초점 현미경(laser confocal microscope, LCM)을 이용하여 전압의 단위로 측정하였다. 나노규모의 금속을 코팅하지 않은 PTh 나노튜브의 PL 세기는 8~12 mV로 측정되었으며, 하이브리드 PTh/Cu, PTh/Ni, 및 PTh/Co 나노튜브의 PL 세기는 각각 0.3~0.6, 0.7~0.8, 0.4~0.45 V로 측정되었다. 발광고분자인 PTh 나노튜브의 PL 세기가 나노규모 금속의 코팅에 의한 하이브리드 나노튜브 형성 후 약 25~100배 증가하였다(그림 4(a) 참고). 정량적인 분석을 위해 측정된 LCM PL 스펙트럼은 삼차원(three-dimensional, 3-D) LCM PL 이미지 결과와 일치함을 확인할 수 있으며, 하이브리드 나노튜브 형성 전과 후의 PL 스펙트럼의 모양과 최대 크기가 변화하였다(그림 4(b) 참고). 하이브리드 나노튜브의 PL 피크는 ~630 nm와 ~670 nm에서 관찰되며, 최대 PL 피크 세기의 비율로 계산할 경우, 하이브리드 PTh/Ni 나노튜브는 PTh 나노튜브보다 약 70배 PL 효율이 증가하였다.

이와 같은 거대 PL 증가 현상을 해석하기 위해 PTh 나노튜브와 하이브리드 나노튜브의 자외선-가시광(ultraviolet-visible, UV-Vis) 흡수 스펙트럼을 측정하였다. PTh 나노튜브의 $\pi-\pi^*$ 전이 피크(transition peak)는 ~430 nm에서 관찰된다. 나노규모 금속 코팅 후, $\pi-\pi^*$ 전이 피크의 위치는 크게 변하지 않으나, ~610 nm에서 새로운 피크가 형성되었음을 확인할 수 있다(그림 4(c) 참고). 새로운 피크는 나노규모 금속 코팅에 의해 광 흡수와 방출에 기여하는 새로운 에너지 레벨

Fig. 4. Optical characteristics of hybrid coaxial NTs: (a) 3-D LCM PL images and intensities in the units of measured voltages of a single strand of PTh NT and hybrid PTh/Cu, PTh/Ni, and PTh/Co NT, respectively. (b) LCM PL spectra of PTh single NT and hybrid PTh/Cu, PTh/Ni, and PTh/Co NTs. Inset: Magnification of the PL spectrum of the PTh single NT, for reference. (c) Normalized UV-Vis absorption spectra of the PTh NTs and hybrid PTh/Cu, PTh/Ni, and PTh/Co NTs. Inset: Normalized UV-Vis absorption spectra of Cu and Ni NWs.^[9]

이 형성되었음을 의미하며, 이는 표면 플라스몬 공명 현상과 관련된다. 그림 4(c)의 삽입그림은 UV-Vis 흡수 스펙트럼을 통한 Cu와 Ni 나노선의 표면 플라스몬 흡수 밴드를 보여준다. PTh 나노튜브의 UV-Vis 흡수 스펙트럼과 비교하였을 때, 겹치는(overlapping) 영역이 확인된다. 이는 표면 플라스몬 공명에 의해 PTh 나노튜브와 Cu, Ni 사이에 에너지 전달이 가능함을 의미하며, PL 증가 현상을 잘 설명해 준다.

2. 하이브리드 발광고분자/금속 나노입자^[11]

발광고분자 나노입자 및 하이브리드 나노입자는 재침전법(reprecipitation)을 이용하여 제작하였다. 발광고분자인 poly(2-

REFERENCES

- [11] M. S. Kim, D. H. Park, E. H. Cho, K. H. Kim, Q. H. Park, H. Song, D. C. Kim, J. Kim and J. Joo, ACS Nano **3**, 1329 (2009).

Fig. 5. Hybrid light-emitting organic semiconductor/metal NPs: (a) SEM image of MEH-PPV NPs. (b) HR-TEM image of hybrid MEH-PPV/Au single NP. Inset: Magnification of HR-TEM image of MEH-PPV/Au single NP. The dotted circles represent the Au NPs. Color CCD images of the (c) MEH-PPV NPs and (d) hybrid MEH-PPV/Au NPs. 3-D LCM PL images of the (e) MEH-PPV NPs and (f) hybrid MEH-PPV/Au NPs.^[11]

methoxy-5-(2'-ethylhexyloxy)-*p*-phenylenevinylene, MEH-PPV) 을 극성용매와 무극성용매에 잘 용해되는 tetrahydrofuran (THF)에 녹인 용액을 증류수에 점적한 후, 자기교반(magnetic stirring)과 초음파(ultrasonication) 처리를 통해 나노입자로 제작하였다. Au 나노입자를 MEH-PPV 나노입자에 흡착시키기 위해 친수성과 소수성을 동시에 가지는 dodecanethiol을 Au 나노입자의 표면에 부착시켜 사용하였다.

그림 5(a)는 MEH-PPV 나노입자의 주사전자현미경 이미지이다. MEH-PPV 나노입자의 직경은 40~150 nm로 관찰되었으며, 나노입자의 모양이 구(sphere) 형태임을 확인할 수 있다. 그림 5(b)는 하이브리드 MEH-PPV/Au 나노입자의 고분해능투과전자현미경 이미지이다. 직경이 2~4 nm인 Au 나노입자가 MEH-PPV 나노입자에 균일하게 흡착되었음을 확인할 수 있다.

그림 5(c)와 5(d)는 MEH-PPV 나노입자와 하이브리드 MEH-PPV/Au 나노입자의 컬러 전하결합소자(charge-coupled device, CCD) 이미지이다. 하이브리드 MEH-PPV/Au 나노입자

에서 발광 효율이 증가함을 관찰하였다(그림 5(c), 5(d) 참고). 그림 5(e)와 5(f)에서 볼 수 있듯이, 3-D LCM PL 이미지에서도 동일한 결과가 관찰된다. 나노규모 금속의 표면 플라스몬 흡수 밴드는 금속의 크기와 나노구조체의 형태에 따라 변화하며,^[7] Au 나노입자의 표면 플라스몬 흡수 피크는 ~510 nm에서, MEH-PPV 나노입자의 $\pi-\pi^*$ 전이 피크는 ~490 nm에서 각각 형성된다. 하이브리드 MEH-PPV/Au 나노입자의 PL 증가 또한 표면 플라스몬 공명에 의한 에너지 전달 현상을 이용하여 설명할 수 있다.

3. 발광고분자 나노튜브/금속 나노입자의 하이브리드 나노구조체^[12]

발광고분자 나노튜브의 표면에 금속 나노입자가 흡착된 하이브리드 나노구조체는 앞에서 기술한 하이브리드 나노구조체의 제작 방법을 결합하여 제작할 수 있다. 발광고분자인 poly(3-methylthiophene) (P3MT)는 나노다공성 템플레이트에 기반한 전기화학중합 방법을 이용하여 나노튜브의 형태로 제작하였다. 전해질의 농도, 합성 온도 및 시간, 인가전압(applied bias) 또는 전류밀도 등의 중합 조건을 조절하여 나노튜브나 나노선과 같이 나노구조체의 모양을 원하는 대로 제작할 수 있다.^[8] 또한 전기화학중합 방법은 도펀트(dopant)에 의해 중합(polymerization)이 촉진되는 특성을 가지고 있기 때문에, 이 방법으로 제작된 고분자 나노튜브 또는 나노선은 화학적으로 도핑된(doped) 특징을 보여준다.^[13]

그림 6(a)는 P3MT 나노튜브의 주사전자현미경 이미지이다. 나노튜브의 직경과 길이는 각각 ~200 nm와 ~30 μm 이며, 그림 6(a)의 삽입그림을 통해서 나노튜브의 형태로 형성되었음을 확인할 수 있다. 이와 같이 제작된 P3MT 나노튜브가 분산된 용액에 dodecanethiol로 표면 처리된 기능성 Au 나노입자가 분산된 용액을 점적하여 P3MT-나노튜브/Au-나노입자 하이브리드 나노구조체를 제작하였다. 그림 6(b)는 하이브리드 나노구조체의 투과전자현미경 이미지이다. 그림 6(b)의 삽입그림에서 확인할 수 있는 것처럼, 검은색 점으로 관찰되는 Au 나노입자가 P3MT 나노튜브의 표면에 흡착되었다.

그림 6(c)와 6(d)는 P3MT 나노튜브와 표면에 Au 나노입자가 흡착된 하이브리드 P3MT/Au 나노구조체의 컬러 CCD 이미지이다. P3MT 나노튜브의 발광 색은 녹색이며, 밝기가 상대적으로 낮다. 그러나, Au 나노입자의 흡착 후, 발광 색이

REFERENCES

- [12] D. H. Park, Y. K. Hong, M. S. Kim, E. H. Cho, W. J. Choi, K. H. Kim, Q. H. Park, D. C. Kim, H. Song, J. Kim and J. Joo, *Synth. Met.* **160**, 604 (2010).
- [13] S. Sadki, P. Schottland, N. Brodie and G. Sabouraud, *Chem. Soc. Rev.* **29**, 283 (2000).

Fig. 6. Hybrid nanostructure of light-emitting organic semiconductor-NT/Metal-NP: (a) SEM image (side-view) of P3MT NTs. Inset: SEM image (top-view) of P3MT NTs. (b) Magnified HR-TEM image of a single strand of hybrid nanostructure of P3MT-NT/Au-NPs. Inset: Magnified HR-TEM image of hybrid P3MT-NT/Au-NPs. The small black spots represent the Au NPs. Color CCD images of a single strand of (c) the P3MT NT and (d) the hybrid P3MT-NT/Au-NPs. 3-D LCM PL image of a single strand of (e) the P3MT NT and (f) the hybrid P3MT-NT/Au-NPs. (g) LCM PL spectra of a single strand of the P3MT NT and the hybrid P3MT-NT/Au-NPs. Inset: LCM PL spectra of a single strand of the P3MT NT for a reference.^[12]

적색으로 변화하였으며, 밝기가 크게 증가하였다. 이와 같은 결과는 3-D LCM PL 이미지에서도 확인된다(그림 6(e), 6(f) 참고). 8~10 mV로 측정된 P3MT 나노튜브의 PL 세기가 Au 나노입자의 부착 후, 2.1~2.5 V로 측정되었으며 210~310 배의 PL 증가가 관찰되었다. 그림 6(g)는 하이브리드 P3MT/Au 나노구조체의 광학적 특성을 정량적으로 분석하기 위한 LCM PL 스펙트럼이다. ~530 nm에서 P3MT 나노튜브의 PL 피크가 관찰되었고, Au 나노입자가 부착된 하이브리드 나노구조체의 PL 피크는 640 nm와 685 nm에서 각각 관찰되었다. PL 세기의 정량적인 비교를 위해 P3MT 나노튜브의 최대 PL 피크의 세기를 기준으로 하이브리드 P3MT/Au 나노구조체의 PL 스펙트럼을 규격화(normalization)한 결과, PL 세기가 약

220배 증가함을 확인하였다.

표면 플라즈몬 공명 현상에서 에너지 또는 전하 전달을 통한 광학적 특성 변화^[14]

유기 반도체는 도핑 레벨에 따라서 UV-Vis 흡수 스펙트럼과 그에 따른 에너지 밴드 구조가 변화한다. 그림 7(a)에서 P3MT 나노튜브의 서로 다른 네 가지 도핑 레벨에서의 UV-Vis 흡수 스펙트럼을 확인할 수 있다. ~400 nm에서 관찰되는 $\pi-\pi^*$ 전이 피크는 밴드 갭 흡수에 해당하며, ~800 nm에서 관찰되는 피크는 도핑에 의해 형성되는 바이폴라론(bipolaron) 밴드에 대응한다. 그림 7(b)의 P3MT 에너지 밴드 다이어그램에서 확인할 수 있듯이 바이폴라론 밴드는 가전자대(valence band, VB)와 전도대(conduction band, CB) 사이에 위치하며, 포톤 에너지 흡수에 의해 가전자대에서 전도대로 여기된 전자가 다시 에너지를 방출하며 전도대로 떨어지는 PL 과정을 방해하는 특성(quenching)을 가지고 있다. P3MT의 도핑 레벨은 순환 전압-전류법(cyclic voltammetry)을 이용하여 전기화학적 P3MT 나노튜브를 추가적으로 산화-환원(re-dox) 반응시켜 조절하였다. 그림 7(c)와 7(d)는 서로 다른 네 가지 도핑 레벨을 가지는 P3MT 나노튜브와 하이브리드 P3MT/Ni 나노튜브의 LCM PL 스펙트럼이다. 발광의 숫자는 바이폴라론 피크의 상대적인 크기 비 값으로 P3MT 나노튜브의 도핑 레벨을 정량적으로 표현해준다. 도핑 레벨의 변화에 따른 P3MT 나노튜브와 하이브리드 P3MT/Ni 나노튜브의 PL 피크 변화는 정 반대의 거동을 보여준다. P3MT 나노튜브는 도핑 레벨이 증가할수록 quenching이나 산란 효과 때문에 PL 피크의 크기가 감소하며 PL 피크의 위치가 청색전이(blue-shift)하는데 반하여(그림 7(c) 참고), 하이브리드 P3MT/Ni 나노튜브의 PL 피크는 P3MT 나노튜브의 도핑 레벨에 비례하여 증가하며, PL 피크의 위치 변화는 상대적으로 작다(그림 7(d) 참고). 또한, 하이브리드 P3MT/Ni 나노튜브의 UV-Vis 흡수 스펙트럼에서 관찰되는 표면 플라즈몬 흡수 피크의 크기 역시 P3MT 나노튜브의 도핑 레벨과 비례하여 증가하며, 바이폴라론 피크는 크게 감소한다(그림 7(a) 참고).

그림 7(b)는 위에서 기술한 현상을 설명하기 위한 하이브리드 유기 반도체/금속 나노구조체의 에너지 밴드 다이어그램

REFERENCES

- [14] D. H. Park, H. S. Kim, M. Y. Jeong, Y. B. Lee, H. J. Kim, D. C. Kim, J. Kim and J. Joo, Adv. Funct. Mater. **18**, 2526 (2008).

Fig. 7. Energy or charge transfer in hybrid nanostructures based on the SPR coupling: (a) Normalized UV-Vis absorption spectra of hybrid coaxial NTs (bold curves) of P3MT/Ni with different doping levels, compared to those of doped P3MT-NTs (thin curves). (b) Schematic energy band diagram explaining the enhancement of the PL efficiency of the hybrid nanostructures of light-emitting organic semiconductor NT coated with nanoscale metal through both energy and charge transfer effects in SPR coupling. Comparison of LCM PL spectra of (c) an isolated single strand of doped P3MT NT and (d) hybrid coaxial P3MT/Ni NTs with different doping levels.^[8,14]

이다. 하이브리드 시스템은 유기 반도체와 금속 사이의 접합(junction)에 의해 형성되기 때문에, 두 물질의 페르미 에너지(Fermi energy, E_F)가 정합되며, 경계면(interface)에서 에너지 밴드가 휘게(banding) 된다. 광학 주파수 영역의 전자기파에 대한 전형적인 금속의 침투 깊이(skin depth)는 ~ 10 nm 수준이며, 하이브리드 나노구조체에 사용된 금속 나노튜브나 나노입자의 최대 크기는 이보다 작다. 따라서, 하이브리드 나노구조체로 입사된 빛은 금속 나노튜브나 나노입자를 통과하여 유기 반도체에 도달하게 되며, 하이브리드 나노구조체의 경계면에서 표면 플라즈몬을 생성시키고, 유기 반도체에 흡수된다. 유기 반도체의 에너지 밴드 갭과 금속의 표면 플라즈몬 흡수 밴드가 정합되면, 표면 플라즈몬 공명이 발생하며, 유기 반도체의 바이폴라온 밴드로부터 금속으로의 전하 전달 현상이 일어난다. 또한, 유기 반도체와 금속 사이의 에너지 전달 현상도 유도된다. 이와 같은 전하 및 에너지 전달에 의

Fig. 8 Applications of organic semiconductor/metal hybrid nanostructures: (a) Single NW photo-transistor. (b) Single NW solar cell. (c) Multi-layer type devices using hybrid nanostructures. (d) Multi-layer type solar cell using hybrid nanostructures.

해 발광 고분자에서의 엑시톤(exciton) 수가 증가하여 PL 효율이 거대하게 증가한다.

유기 반도체/금속 하이브리드 나노구조체 응용소자

앞에서 기술한 다양한 형태의 유기 반도체/금속 하이브리드 나노구조체들을 이용하면 광전자 소자의 효율을 증대시킬 수 있으며, 새로운 개념의 plasmonics 및 photonics 소자에 응용 가능하다. 그림 8에 다양한 응용소자들의 개념도를 도식하였다.

맺음말

이상에서 설명한 유기 반도체/금속 하이브리드 나노구조체의 독특한 물리적 성질은 거시규모(bulk-scale)에서는 발생하지 않는 나노효과(nano effect)로서 유기 반도체와 금속의 하이브리드 나노구조체에서 나노 물성 및 이들 사이의 상관관계에 대한 우리의 이해를 증진시킨다. 또한, 하이브리드 구조에 의한 거대 PL 증가 및 PL 색 조절 가능성이 나노광전자 소자 및 생화학(bio-chemical) 검출 분야에 응용될 경우 관련 분야의 기술 향상과 함께 연구 활성화에도 크게 기여할 것으로 기대된다.