



## 전기방사로 제조된 유기 반도체 나노섬유의 전자 및 광자 소자로의 응용

글 \_ 조희찬, 민성용, 이태우  
포항공과대학교(POSTECH)

### 1. 서론

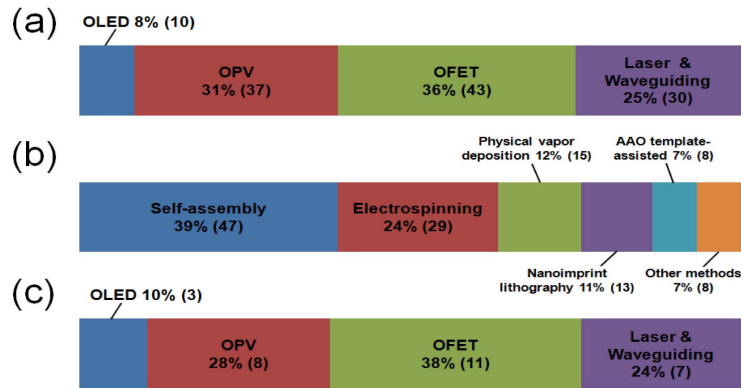
유기 반도체(organic semiconductor)는 재료 및 공정의 저렴함, 많은 처리량(throughput), 대면적 용액 공정의 가능성, 재료 특성 조절의 용이성 및 플렉서블(flexible) 기판과의 친화성(compatibility) 등의 고유한 장점들을 가지기 때문에 기존 무기 반도체(inorganic semiconductor)의 영역이었던 전자<sup>1-3)</sup> 및 광자 소자<sup>4-6)</sup>의 분야에서 많은 관심을 불러일으키며 광범위하게 연구되어 왔다. 지금까지 유기 반도체를 이용한 대부분의 연구들은 적층 구조를 가지는 3차원 벌크(bulk) 소재 및 소자에 주로 초점이 맞춰져서 진행되었으나, 유기 반도체 나노섬유(organic semiconductor nanofiber)와 같은 유기 반도체의 1차원 나노 구조에서의 고유한 전기적, 광학적, 열적 특성들이 알려짐에 따라 1차원 상의 시스템에 대한 연구도 점점 더 활발해지고 있다.<sup>7,8)</sup>

유기 반도체 나노섬유는 3차원 구조와는 달리 두 방향이 나노미터 스케일(nanometer scale)로 한정된 1차원 구조를 가지기 때문에, 박막 구조에 비해  $\pi$ -공액 구조( $\pi$ -conjugated structure)의 방향성이 좋아 더 높은 전하 이동도(charge carrier mobility)를 가지고 있다.<sup>7-9)</sup> 또, 부피에 대한 표면적의 비율(surface-to-volume ratio)이 커서 에너지 하베스팅(energy harvesting)<sup>10-12)</sup> 및 센서(sensor)<sup>13,14)</sup> 기술에 있어 응용 가능성이 높다. 또한 발광(light-emitting) 유기 반도체 나노섬유는 발광 다이오드(light-emitting diode),<sup>15,16)</sup> 레이저(laser)<sup>17,18)</sup> 및 광도파(waveguide)<sup>18-23)</sup>

기술에 응용될 수 있고 추후 초소형 광전 회로나 랩온어칩(lab-on-a-chip) 소자에서 1차원 광원(light source)으로서 유용하게 사용될 수 있을 것으로 예상된다. 더욱이, 이러한 1차원 나노 구조는 3차원 구조에서 나타나는 여러 재료적 특성들을 가지지 않는다는 점에서 유기 반도체의 기초적인 전기적, 광학적, 열적 특성을 연구하기에 매우 적합한 구조라고 할 수 있다.

유기 반도체 나노섬유의 제작 방법은 전기방사(electrospinning),<sup>24-26)</sup> 주형법(templating method),<sup>27)</sup> 자기조립(self-assembly),<sup>28)</sup> 직접 팁드로잉(direct tip-drawing),<sup>29)</sup> 나노임프린트 리쓰그래피(nanoimprint lithography),<sup>30)</sup> 기상법(physical vapor transport),<sup>31)</sup> 주사탐침 리쓰그래피(scanning probe lithography),<sup>32)</sup> 나노플루이딕스(nanofluidics)<sup>33)</sup> 등으로 매우 다양하다. 그 중에서 전기방사는 간단한 공정을 통해 다양한 종류 및 형태(morphology)의 나노섬유를 제조할 수 있기 때문에 유/무기 나노섬유를 제작하는데 있어 매우 유용하게 사용되고 있으며 그 연구 규모 및 범위가 점점 확대되고 있는 추세이다.

Isiknowledge 사의 web of science 검색 엔진을 토대로 조사된 Fig. 1의 세 가지 통계 자료는 유기 반도체 나노섬유 연구의 동향을 잘 나타내어 준다. Fig. 1(a)는 유기 반도체 나노섬유를 이용한 전자 및 광자 소자 분야의 연구 동향을 나타내어 주는 자료이다. 통계 대상이 된 논문은 총 120 편으로, 유기 반도체 나노섬유를 이용한 전자 및 광자 소자 분야의 연구가 아직 초기 단계에 있음을 보여준다.<sup>8)</sup> Fig. 1(b)는 전자 및 광자 소자 분야에서 사용



**Fig. 1.** (a) 유기 반도체 나노섬유를 이용한 전자 및 광자 소자 분야의 연구 동향. (b) 전자 및 광자 소자 분야에서 사용된 유기 반도체 나노섬유 제조 방법의 동향. (c) 전기방사를 통해 제조된 유기 반도체 나노섬유를 이용한 전자 및 광자 소자 분야의 연구 동향.<sup>8)</sup>

된 유기 반도체 나노섬유 제조 방법의 동향을 나타낸 것으로, 자기조립(38%)과 전기방사(24%) 방법이 가장 널리 사용되고 있음을 보여준다. 그러나 자기조립 방법은 주로 유기 태양전지(organic photovoltaics) 분야로 그 사용이 국한되고 있는 것에 비해, 전기방사 방법은 Fig. 1(c)에서 볼 수 있는 것처럼 다양한 분야에서 고루 사용되고 있었다.

본 원고의 총론에서는 최근의 참고문헌 8을 주로 참고하여 전기방사로 제조된 유기 반도체 나노섬유의 전자 및 광자 소자 분야에서의 연구 결과를 분석하고 그 가능성과 전망에 대해 고찰한다.<sup>8)</sup> 전기방사의 원리와 공정 변수에 대하여 먼저 언급한 뒤, 전기방사로 제조된 유기 반도체 나노섬유가 유기 발광 다이오드, 유기 태양전지, 유기 전계효과 트랜지스터, 유기 레이저 및 광도파 분야에 어떻게 연구되고 있는지 소개한다.<sup>8)</sup> 마지막으로 유기 반도체 나노섬유 기반 전자 및 광자 소자의 전망을 제시하고 여러 한계점들을 극복하기 위해 어떠한 측면에서 연구가 더 진행되어야 하는지 제안한다.<sup>8)</sup>

## 2. 본론

### 2.1. 전기방사의 원리 및 공정 변수<sup>8)</sup>

#### 2.1.1. 전기방사의 원리<sup>8)</sup>

전기방사 장치는 크게 방적돌기(spinneret), 접지된 집진판(grounded collector), 고전압 전원 장치(high-voltage power supply)로 구성된다. 전기방사로 나노섬유가 제조되는 과정은 다음과 같다. 우선, 준비된 용액을 담은 주사기(syringe)에 방적돌기 역할을 하는 노즐(nozzle)을 연결시켜 적절한 높이에 고정시킨다. 그리고 노즐에 고전압을 가하면서 펌프(pump)를 이용해 일정한 속도로 용액을 펌핑(pumping)하면 노즐 팁(nozzle tip)에 양전하로 하전된 용액 방울이 맺히게 된다. 이 때 용액 방울 표면의 양전하 간의 정전기적 척력(electrostatic repulsion)과 외부 전기장에 의한 전기력(electric force)이 반구형 용액 방울을 원뿔 모양(conical shape)으로 만드는데, 이를 Taylor cone이라 지칭한다. 이 Taylor cone에 가해지는 전기력이 용액의 표면 장력을 넘어설 때, Taylor cone 끝에서 jet이 분출되어 나오게 되고, 방출된 jet은 초기에는 곧게 신장되며 떨어지다가 특정 지점부터 whipping motion을 취하며 떨어지게 된다(Fig. 2). 떨어지는 jet은 용매가 휘발됨에 따라 점점 가늘어지고, 결국 jet이 집진판에 닿을 때에는 용매가 모두 증발된 상태의 나노섬유가 무작위적인 방향으로 받아들여서 논우븐 매트(nonwoven mat) 형태를 가지게 된다.

#### 2.1.2. 전기방사의 공정 변수<sup>8)</sup>

전기방사 기술은 그 공정은 매우 간단하지만 공정에서

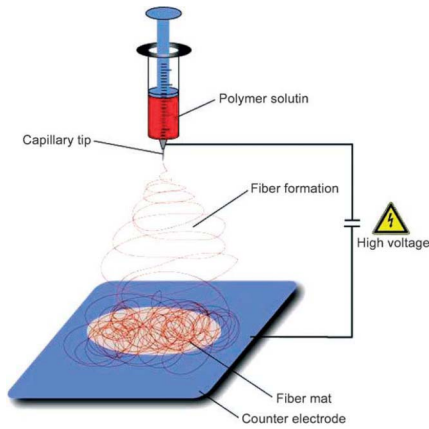


Fig. 2. 일반적인 전기방사 장치의 개념도.<sup>24)</sup>

고려해야할 변수들은 매우 다양하고 복잡하다. 그 변수들은 크게 용액 변수(농도, 분자량 등)와 동적 변수(전압, 펄핑 속도, 높이, 용매 휘발성, 용액의 전기 전도도, 온도, 습도 등)로 나눌 수 있는데, 나노섬유를 연속성 있고 균일하게 제조하고 그 형태와 직경을 조절하기 위해서는 위 변수들을 항상 모두 고려하여야만 한다.<sup>24-26,34,35)</sup>

특히, 고분자 용액은 농도와 분자량이 클수록 더 큰 사슬 엉킴(chain entanglement)을 가지고, 충분히 큰 사슬 엉킴은 전기방사 시 노즐 팁에서 형성된 jet이 끊어지지 않도록 해주는 분자 간 인력을 제공한다. 즉, 고분자 용액에서 사슬 엉킴이 부족하여 분자 간 인력이 충분하지 못할 시에는 떨어지는 jet이 표면 에너지를 최소화하기 위해 여러 개의 방울로 쪼개지게 된다(Rayleigh instability). 그러므로 전기방사 시 연속성 있는 나노섬유의 형성

을 위해서는 사용되는 고분자 용액의 농도와 분자량이 충분히 커야만 한다. 그러나 반대로 용액의 너무 농도가 높을 경우에는 응력완화 시간(stress relaxation time)이 너무 길어져 같은 응력(stress)에도 더 쉽게 파괴(fracture)가 일어나 jet이 잘 끊어지게 된다.<sup>34)</sup> 또한 용해도(solubility)가 상대적으로 낮은 고분자를 사용할 경우, 농도가 너무 높을 시 용매 증발 과정에서 석출된 고분자에 의해 노즐 팁이 쉽게 막히기 때문에 원활한 전기방사가 힘들어진다.

따라서 전기방사 시 사용되는 고분자 용액은 적절한 농도 범위에 있어야 한다. 고분자의 분자량이나 사슬의 유연성(flexibility)이 클 경우 더 큰 사슬 엉킴을 만들 수 있기 때문에 더 낮은 농도에서도 원활한 전기방사가 가능해진다. 또한 분자량의 분포(molecular weight distribution)가 좁을(narrow) 경우에도 더 낮은 농도에서 전기방사가 가능해지는데 이는 분자량의 분포가 넓을(broad) 경우 분자량이 작은, 즉, 유체역학적 반경(hydrodynamic radii)이 작은 사슬들이 사슬 엉킴에 있어서 약한 이음새(weak link)로 작용하여 jet의 끊어짐을 야기하기 때문이다.<sup>35)</sup> 전기방사 시 분자량과 분자량 분포가 변함에 따라 달라지는 나노섬유의 제조 양상은 Fig. 3에 잘 나타나 있다.<sup>35)</sup> Fig. 3은 전기방사로 제조된 poly(methyl methacrylate)(PMMA) 나노섬유의 주사전자현미경(scanning electron microscope, SEM) 사진이다. Fig. 3(a)-(c)을 보면 같은 농도일 때 분자량(Mw)이 커질수록 나노섬유 상의 비즈(beads)의 수와 크기가 줄어들고 연속적인 나노섬유가

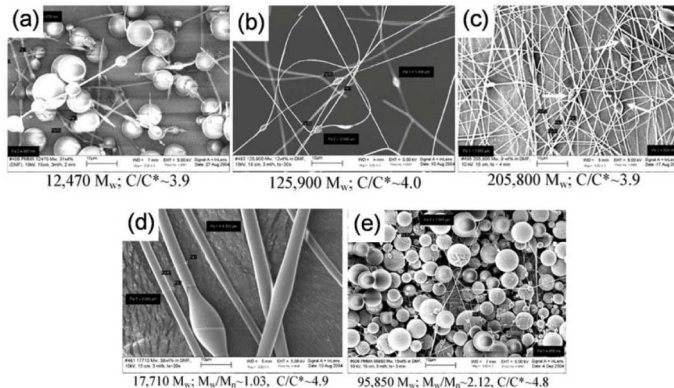


Fig. 3. 전기방사로 제조된 PMMA 나노섬유의 SEM 사진. (a)-(c) 분자량 변화에 따른 비교. (d)-(e) 분자량 분포 변화에 따른 비교.<sup>34)</sup>



형성되는 것을 알 수 있다. 마찬가지로, Fig. 3(d)-(e)는 같은 농도일 경우 분자량 분포가 좁을(Mw/Mn~1.03) 때 비즈의 수와 크기가 훨씬 작다는 것을 보여준다.

Poly(3-hexylthiophene)(P3HT)는 고분자 기반 일렉트로닉스 분야에서 가장 흔히 사용되는 고분자 반도체(semiconducting polymer) 재료들 중 하나이다.<sup>28,30,36-44)</sup> 그러나 P3HT는 일반적으로 경직된(rigid) 사슬 구조<sup>36)</sup>와 상대적으로 낮은 분자량(19.4 kDa ≤ Mw ≤ 87 kDa)<sup>39-44)</sup>으로 인해 사슬 엉킴이 강하지 못하고, 따라서 전기방사 시 Rayleigh instability로 인해 jet이 쉽게 끊어진다. 높은 분자량(Mw ≥ 87 kDa)과 좁은 분자량 분포를 가지는 P3HT를 사용한다면 충분한 사슬 엉킴을 가질 수 있을지 모르나, 그러한 P3HT는 합성이 어렵고,<sup>45)</sup> 용해도가 낮으며, 낮은 분자량의 P3HT보다 전기적 특성(전하 이동도 및 광전 변환 효율)이 떨어지기 때문에<sup>46-48)</sup> 실질적인 사용 빈도는 매우 낮다.

그러므로, P3HT와 같은 재료들을 전기방사를 이용하여 나노섬유로 제조하기 위해서는 분자량이 큰 다른 고분자를 섞어서 사슬 엉킴을 강화시켜야만 한다. 이러한 매트릭스(matrix) 역할로 사용되는 고분자로는 poly(vinyl pyrrolidone)(PVP),<sup>36,44,49-51)</sup> polystyrene(PS),<sup>15)</sup> poly(ε-caprolactone)(PCL),<sup>40,41)</sup> PMMA,<sup>43)</sup> poly(ethylene oxide)(PEO)<sup>15,52)</sup> 등이 있다.

또한, 이중구조 노즐을 사용한 동축 전기방사(coaxial electrospinning)도 안쪽과 바깥쪽 노즐에 물질을 각각 따로 공급할 수 있다는 점에서 나노섬유 형성에 있어 매우 효과적이다.<sup>16,36,40,43,44)</sup> 매트릭스 고분자를 대상 물질에 섞어서 나노섬유의 형성을 돕는 방법은 두 물질이 같은 용매에 동시에 녹아야 하고 그 용매의 특성이 전기방사 조건에 잘 맞아야만 하나, 동축 전기방사를 사용할 경우 각 물질에 서로 다른 용매를 사용할 수 있으므로 이러한 제한 조건에서 비교적 자유롭다. Li 등은 동축 전기방사를 이용하여 poly(2-methoxy-5-(2-ethylhexoxy)-p-phenylenevinylene) (MEH-PPV)/P3HT 블렌드(blend) 나노섬유를 제조한 바 있다.<sup>44)</sup> 안쪽 노즐에 들어간 MEH-PPV/P3HT 블렌드는 그 자체만으로는 전기방사로 나노섬유를 형성하기에 사슬 엉킴이 부족하나, 바깥쪽 노즐의 분자량이

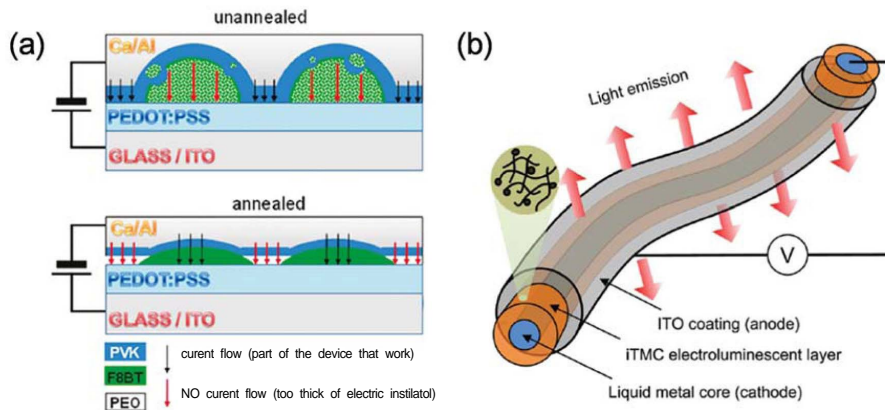
큰 PVP에 의해 균일한 연속성 나노섬유의 형성이 가능해졌다. 더욱이, 동축 전기방사에서는 바깥쪽 노즐에 삽입된 물질 특성에 의해서만 나노섬유의 형성 여부가 결정되므로, 안쪽 노즐에 다양한 재료들을 넣어 나노섬유로 제조할 수 있다는 점이 이 방법의 또 다른 장점이다.

## 2.2. 전기방사로 제조된 유기 반도체 나노섬유의 응용<sup>8)</sup>

### 2.2.1. 유기 발광 다이오드<sup>8)</sup>

최근 유기 발광 다이오드를 이용한 디스플레이의 상업화 성공 및 관련 산업 발달, 수요 증가에 따라 유기 발광 다이오드에 대한 연구들이 매우 활발하게 진행되고 있다.<sup>53-58)</sup> 그러나 그러한 연구들은 주로 2차원 박막 소자에 집중되어 있고, 1차원 유기 발광 나노섬유를 응용한 발광 다이오드에 관련된 연구는 몇몇 단점들로 인해 아직 초기 단계에 있다. 첫째로, 유기 발광 다이오드의 평면적층 구조에서는 나노섬유 자체의 형태로 인해 균일한 전하 주입이 힘들다.<sup>7)</sup> 또한, 일반적으로 사용되는 금속 증착을 통한 전기 접촉(electrical contact) 방식으로는 두 전극 간에 단락이 발생하기 쉽다. 더욱이, 산소 및 습기에 대한 노출에 취약한 유기 발광 다이오드 소자 특성상, 부피에 대한 표면적의 비율이 큰 나노섬유 구조의 발광층은 안정적인 소자 구동에 있어 단점이 될 수 있다. 이러한 단점들을 극복하기 위해서는 추후 1차원 발광 구조에 적합한 새로운 소자 구조와 더 발전된 패시베이션(passivation) 방법의 개발이 절실히 요구된다. 그럼에도 불구하고, 나노섬유 기반의 유기 발광 다이오드 기술은 추후 구현될 나노 사이즈(nano size)의 광전 회로나 랩온어칩 소자 등에서 사용될 수 있는 1차원 발광을 전기적으로 구동시킬 수 있다는 점에서 그 학문적 중요성이 매우 크다.<sup>7,59-61)</sup>

Vohra 등은 poly[(9,9-di-n-octylfluorenyl-2,7-diyl)-alt-(benzo[2,1,3]thiadiazol-4,8-diyl)] (F8BT)/PEO 블렌드 나노섬유를 전기방사를 통해 제조하고, 이를 최초로 유기 발광 다이오드의 발광층으로 사용하여 그 특성을 평가하였다.<sup>15)</sup> Fig. 4(a)에서 볼 수 있듯이, F8BT 나노섬유 방향으로도 선택적으로 전류가 흐른 것은 열처리 시



**Fig. 4.** (a) 어닐링 전후의 소자 구조 개념도<sup>14)</sup> (b) iTMC 기반 발광 나노섬유의 구조 개념도.<sup>15)</sup>

F8BT/PEO 블렌드 나노섬유에서 PEO가 밖으로 빠져 나가 F8BT 나노섬유 사이에서 절연층을 형성하였기 때문이다. 또, 열처리 과정은 F8BT 나노섬유의 형태를 보다 편평하게 하여 균일한 전하 수송이 이루어지도록 하였다. 제작된 소자는 1.1 %의 외부 양자 효율을 보였으며 6 V에서 2300 cd m<sup>-2</sup>의 휘도를 보였다.

또, Yang 등은 동축 전기방사를 통해 다중 구조를 가지는 단일 섬유 형태의 발광 다이오드를 제작한 바 있다.<sup>16)</sup> 전기방사 시 코어 물질로는 환원전극(cathode)으로서 액체 금속인 갈린스탄(galinstan)이 사용되었고, 외부 물질로는 이온성 전이금속 착체(ionic transition-metal complex, iTMC) ([Ru(bpy)<sub>3</sub>]<sup>2+</sup>(PF<sub>6</sub>)<sub>2</sub>)와 PEO의 블렌드 용액이 사용되었으며 전기방사 공정 후 ITO(indium tin oxide)가 증착되어 산화전극(anode)으로 사용되었다(Fig. 4(b)).

### 2.2.2. 유기 태양전지<sup>8)</sup>

유기 태양전지 분야에서 유기 반도체 나노섬유는 태양전지 소자의 광전 변환 효율을 높이기 위해 다양한 방법들을 통해 제조되어 사용되어지고 있다.<sup>28,30,36,37,62,63)</sup> 유기 반도체 나노섬유는 부피에 대한 표면적의 비율이 크고, 엑시톤(exciton)의 확산 거리가 길며, 높은 전하 이동도를 가질 뿐만 아니라 형태의 조절이 쉽기 때문에 유기 태양전지 소자에서 활성층(active layer)로 사용되기 적합하다.<sup>7,64,65)</sup> 그러나 그 제조 방법은 주로 자기 조립 방법에

집중되어 있고 전기방사로 제조된 유기 반도체 나노섬유가 유기 태양전지에 직접적으로 사용된 예는 드문데, 이는 유기 태양전지에서 일반적으로 사용되는 도너(donor)-억셉터(acceptor) 블렌드 시스템(예를 들어, P3HT와 풀러렌(fullerene) 유도체들)이 낮은 분자량과 경직된 분자 구조로 인해 전기방사 시 나노섬유가 형성되기에 충분한 사슬 엉킴을 제공하지 못하기 때문이다.<sup>36,37)</sup> 그러나 앞서 언급한 동축 전기방사 방법을 이용한다면 이러한 문제를 해결할 수 있을 것이라 기대가 모아지고 있고 실제로 이를 이용한 연구 결과들도 발표된 바 있다.<sup>36,37)</sup>

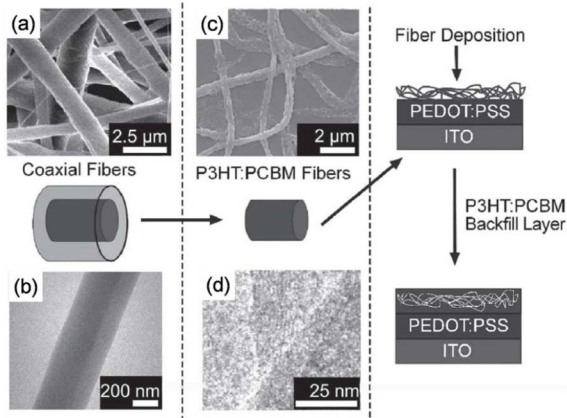
Sundarrajan 등은 동축 전기방사 방법으로 P3HT/phenyl-C<sub>61</sub>-butyric acid methyl ester (PCBM) 블렌드 나노섬유를 제조하고 그 광발전 특성을 평가하였다.<sup>36)</sup> 제조된 나노섬유 매트는 8.7 × 10<sup>-6</sup>%의 낮은 광전 변환 효율을 보여주었다. 이와 같이 나노섬유 매트의 광전변환 특성이 좋지 못한 것은, 활성층인 P3HT/PCBM의 총 부피와 표면적이 일반적으로 사용되는 벌크 이종접합(bulk heterojunction)의 경우보다 작아서 전하 생성이 잘 일어나지 못하고, 정렬되지 못한 나노섬유 매트의 형태가 전하 수송에 방해가 되기 때문으로 생각된다. 또한 나노섬유 매트와 전극 사이의 전기 접촉이 균일하지 못한 것도 전극으로의 전하 추출의 효율을 낮추는 요인이 될 수 있다.

최근 Bedford 등은 P3HT/PCBM 나노섬유에 P3HT/PCBM 용액을 다시 스펀코팅(spin-coating)함으로써 광전 변환 효율을 4.0 %로 크게 개선하였음을 보고하였다(Fig. 5).<sup>37)</sup> 이



는 이전에 발표된 P3HT/PCBM 나노섬유의 광전 변환 효율 값을 크게 웃돌 뿐만 아니라, 같은 구조의 박막 소자(3.2 %)보다도 더 개선된 값이다. 이는 전기방사 과정에서 P3HT 사슬이 평면 방향으로 더 정렬되어 광흡수 효율이 개선된 까닭이라고 설명하였다.

한편, 전기방사로 제조된 무기 나노섬유를 소자에 이용하는 것도 유/무기 복합 태양전지 분야의 주된 테마 중 하나이다.<sup>49-51,66)</sup>  $\text{TiO}_2$ ,<sup>49)</sup>  $\text{ZnO}$ <sup>50,51)</sup>  $\text{CdS}$ <sup>66)</sup>와 같은 금속 산화물 반도체 재료들은 전자 억셉터로서 저렴한 비용, 높은 전하 이동도, 우수한 기계적, 화학적 안정성 및 크기와 모양 조절의 용이성 등의 많은 장점들을 가지고 있어 태양전지 소자에도 빈번하게 사용된다.



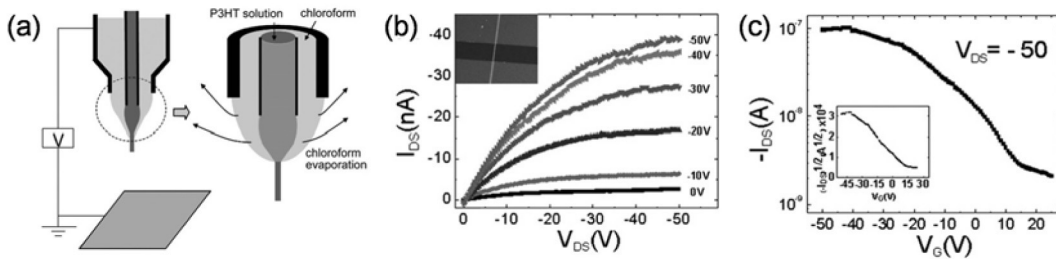
**Fig. 5.** P3HT/PCBM 나노섬유 기반 태양전지 소자 제작 과정의 개념도. P3HT/PCBM과 PCL의 동축 나노섬유의 (a) SEM 사진과 (b) TEM 사진. PCL 제거 후의 P3HT/PCBM 나노섬유의 (c) SEM 사진과 (d) TEM 사진.

### 2.2.3. 유기 전계효과 트랜지스터<sup>8)</sup>

유기 전계효과 트랜지스터는 저렴한 비용의 대면적 용

액 공정을 통한 대량 생산 가능성과 플렉서블 기관과의 친화성으로 인하여 미래의 디스플레이와 나노전자소자에 있어 핵심 부품이 될 것으로 기대되고 있다.<sup>67-74)</sup> 유기 전계효과 트랜지스터에서의 전기적 특성은 주로 전계효과 이동도(field-effect mobility)와 점멸비(on/off ratio)로 평가되며, 관련된 연구들도 대부분 이 두 가지 특성을 개선하는데 그 초점이 맞추어져 있다. 유기 반도체 나노섬유는  $\pi$ -공액 구조의 패킹(packaging)이 나노섬유의 방향을 따라 이루어져 있기 때문에 전계효과 이동도가 박막보다 더 높고, 따라서 유기 전계효과 트랜지스터의 전기적 특성을 개선하기 위한 방안으로써 활발하게 연구되고 있다.<sup>79,74,75)</sup> 더욱이, 유기 반도체 나노섬유를 기반으로 한 전계효과 트랜지스터는 유기 반도체의 1차원 구조에서의 전기적 특성을 연구할 수 있는 좋은 모델이 될 수 있고, 이러한 기초적 연구들은 미래에 실이나 직물 형태의 전자소자를 구현하고 더 나아가서 입을 컴퓨터(wearable computer)를 실현하는 데 기여할 수 있을 것이다.

Li 등은 동축 전기방사법을 이용해 P3HT 나노섬유를 제조하고 이를 전계효과 트랜지스터에 적용하여 전기적 특성을 분석하였다(Fig. 6).<sup>76)</sup> 바깥쪽 노즐에 매트릭스 고분자인 PCL이나 추가적인 용매를 공급함으로써 P3HT 나노섬유의 제조가 이루어졌다. 제작된 P3HT 나노섬유 기반 전계효과 트랜지스터는  $0.017\text{cm}^2\text{V}^{-1}\text{s}^{-1}$ 의 전계효과 이동도와  $10^2$ 의 점멸비를 보였다. 위 결과를 기반으로, 동일한 group에서 이온 겔(ion gel)이라는 높은 전기 용량(electric capacity)을 가지는 고분자 전해질(polyelectrolyte)을 게이트 유전체(gate dielectric)로 사용하여 트랜지스터의 전기적 특성을 개선시켰음을 보고하였다.<sup>41)</sup> 사



**Fig. 6.** (a) P3HT 나노섬유를 제조하기 위해 사용된 동축 전기방사 장치의 개략도. 제작된 P3HT 나노섬유를 이용한 전계효과 트랜지스터의 (b) output 곡선과 (c) transfer 곡선( $V_D = 100\text{V}$ ).<sup>76)</sup>



용된 이온 겔은 10 Hz에서  $30 \mu\text{F cm}^{-2}$ , 1 MHz에서  $1 \mu\text{F cm}^{-2}$ 의 전기용량을 보였다. 제작된 이온 겔 게이트 유전체 기반 P3HT/PCL 나노섬유 전계효과 트랜지스터는  $\sim 2 \text{ cm}^2 \text{ V}^{-1} \text{ s}^{-1}$ 의 매우 높은 전계효과 이동도를 보였으며 점멸비도  $\sim 10^5$ 로 우수하였을 뿐만 아니라 저전압 구동이 가능하였다.

이와 비슷하게, Chen 등도 PMMA를 외부 물질로 사용한 동축 전기방사법을 이용해 P3HT 나노섬유를 제조하여 트랜지스터에 적용하였다(Fig. 7).<sup>43)</sup> PMMA의 펄핑 속도와 어닐링 온도를 적절하게 조절함으로써 P3HT 사슬의 패킹과 그 방향을 조절하였고, 제작된 P3HT 나노섬유 기반 전계효과 트랜지스터는  $\sim 0.192 \text{ cm}^2 \text{ V}^{-1} \text{ s}^{-1}$ 의 우수한 전계효과 이동도와  $4.45 \times 10^4$ 의 우수한 점멸비를 나타내었다. 또한 이 연구그룹은 새로운 p-형(p-type) 재료로서 2차원 thiophene-acceptor 공액 공중합체(thiophene-acceptor conjugated copolymer)<sup>77)</sup>를 도입하고 용액의 결정성을 증가시킬 수 있는 결정성유도공정(crystalline-induced procedure)<sup>9)</sup>을 사용하여 우수한 전계효과 이동도( $0.305 \text{ cm}^2 \text{ V}^{-1} \text{ s}^{-1}$ )와 점멸비( $1.30 \times 10^5$ )를 구현한 바 있다. 결정성유도공정은 전기방사 전에 용액을  $60^\circ\text{C}$ 에서 10분간 가열한 뒤 초음파 세척기(ultrasonic bath)에 넣고  $10^\circ\text{C}$ 에서 10분간 냉각시킴으로써 용액의 결

정성을 증가시키는 과정이다. 전기방사로 제조된 나노섬유가 향상된  $\pi$ - $\pi$  분자 패킹과 나노섬유 방향으로 정렬된 결정성을 가진다는 것은 편광 자외 및 가시선 분광분석법(polarized UV-vis spectroscopy), 스침각 X-선 회절 분석법(grazing-incidence X-ray diffraction) 및 평면내 X-선 회절 분석법(in-plane X-ray diffraction)과 같은 분석 방법을 통해 증명되었다.<sup>9)</sup>

최근 n-형 고분자 반도체를 이용한 나노섬유 기반 전계효과 트랜지스터도 Canesi 등에 의해 최초로 보고된 바 있다.<sup>78)</sup> 최근에 개발된 n-형 고분자 반도체인 poly{[N,N'-bis(2-octyl-dodecyl)-naphthalene-1,4,5,8-bis(dicarboximide)-2,6-diyl]-alt-5,5'-(2,2'-bithiophene)} (P(NDI2OD-T2))는 PEO와 블렌드되어 동축 전기방사를 통해 나노섬유로 제조되었다. 제작된 P(NDI2OD-T2) 나노섬유 기반 전계효과 트랜지스터는  $0.05\text{-}0.09 \text{ cm}^2 \text{ V}^{-1} \text{ s}^{-1}$ 의 전계효과 이동도를 나타내었고, 이는 박막 구조의 P(NDI2OD-T2) 전계효과 트랜지스터에서의 전계효과 이동도( $0.07\text{-}0.08 \text{ cm}^2 \text{ V}^{-1} \text{ s}^{-1}$ )와 비슷한 수준의 값이었다.

### 2.2.4. 유기 레이저 및 광도파<sup>8)</sup>

레이저(laser)는 “light amplification by stimulated emission of radiation”의 약어로, 유도 방출(stimulated emission)에 의해 증폭(amplification)되어 매우 높은 에너지 집중도와 단색성(monochromaticity), 지향성(directionality)을 가지는 동일 위상의 빛 또는 그 빛을 생산하는 장치를 의미한다. 일반적으로 레이저를 얻기 위해서는 레이저 매질(laser medium), 여기 메커니즘(excitation mechanism)과 양 끝에 거울이 부착된 광학적 공진기(optical resonator)가 필요하다. 유기물을 이용하여 레이저를 구동할 시에는 여기 메커니즘으로 광학적 펌핑(optical pumping)만이 가능하며, 전기적 펌핑(electrical pumping)을 통한 유기 레이저는 아직 구현된 바가 없다. 광학적 펌핑에 의해 매질로 입사된 빛이 공진기를 왕복운동하며 자극 방출에 의해 코히런트하게(coherently) 증폭되다가, 왕복운동 시 얻는 게인(gain)이 손실(loss)을 넘어서는 시점에서 레이징(lasing)이 일어나게 된다.<sup>79-81)</sup>

지난 수십년 동안 유기 반도체는 포토닉스 분야에서

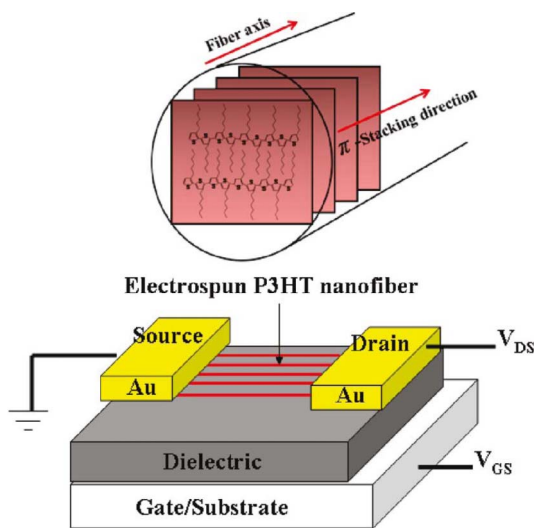


Fig. 7. 전기방사로 제조된 P3HT 나노섬유의 내부 미세구조(위)<sup>43)</sup>와 P3HT 나노섬유 전계효과 트랜지스터(아래)의 개략도.



레이저와 광도파에 적합한 매질로서 집중적으로 연구되어 왔다. 유기 반도체는 광흡수와 자극 방출에 대한 표면적이 크고, 자체흡수(self-absorption)가 적으며, 다양한 분자 구조의 합성이 용이하여 광학적 특성을 조절하기 쉽다는 장점이 있다.<sup>4,5,59,80-89</sup> 특히, 유기 반도체 나노섬유는 그 고유의 장점들로 인하여 미세한 규모의 광전 집적 논리 회로나 랩온어칩 소자에서 중요 구성 요소로서 사용될 것이라 생각되며, 따라서 미래에 구현될 광학적 신호(optical signal)를 포함한 논리 연산 체계(logical operation system), 나노미터 스케일의 분광학(spectroscopy) 및 생물 의학(biomedicine) 실험에 기여할 수 있을 것이라 전망된다.<sup>59,81-83</sup>

유기 반도체 나노섬유는 마이크로미터 이하의 직경을 가지며 그 자체로 레이저 매질과 광학적 공진기로서의 역할을 할 수 있기 때문에 미세한 규모에서의 빛의 전파(propagation)와 증폭을 가능하게 한다.<sup>81</sup> 단, 광학적 공진기로서의 역할을 하기 위해서는 나노섬유 표면이 매끈하여 표면에서의 빛의 산란(scattering)을 최소화하고 반사(reflection)를 증가시킴으로서 나노섬유 내에서 진동(oscillation)하는 빛을 효과적으로 가둘 수 있어야 한다. 또, 양 끝단의 단면이 편평하여 거울로서의 역할을 할 수 있어야 한다. 나노섬유 내부의 결함(defect)도 빛의 산란을 야기할 수 있으므로, 나노섬유의 결정성(crystallinity)이 크고 결함이 적을수록 광학적 공진기로서의 역할을 더 잘 수행할 수 있게 된다. 또한 유기 반도체 나노섬유는 여러 간단한 공정들을 통해 쉽게 제조되어 광학적 공진기로서 사용될 수 있으므로, 전자 빔 리소그래피(electron beam lithography)와 같이 복잡하고 값비싼 공정이 필요하지 않다.<sup>4,59</sup>

더욱이, 유기 반도체 나노섬유의 1차원 구조는 유기 반도체의 1차원에서의 광학적 특성들에 대한 기초 연구를 수행할 수 있도록 해준다. 특히, 고분자 반도체는 1차원 구조에서 벌크 형태와는 다른 특수한 광학적 특성을 가진다. Martini 등은 고분자 반도체 내의 1차원 사슬 정렬(chain alignment)이 자연 증폭 방출(amplified spontaneous emission)의 문턱 값(threshold)을 낮추며 편광된 빛이 방출되도록 한다는 것을 증명하였다.<sup>90</sup> 1차원 사슬

정렬은 정렬된 나노포어(nanopore)를 가지는 실리카 박막 틀(silica template film) 내에 고분자 용액이 스며들게 함으로써 이루어졌다.

전기방사로 제조된 유기 반도체 나노섬유는 나노미터 스케일의 직경과 제조 과정에서의 강한 신장력(stretching force)으로 인해 박막에 비해 더 향상된  $\pi$ -공액 분자 적층(stack)의 방향성을 가진다.<sup>9,91</sup> 이는 광자(photon)와 결정 격자(crystal lattice) 간의 상호 작용을 증가시켜 나노섬유 내에 빛을 더 효과적으로 가둘 수 있게 만들고, 빛의 전파를 더 용이하게 한다.<sup>81</sup> 또한, 전기방사에서는 제조될 나노섬유의 직경과 형태를 쉽게 조절할 수 있기 때문에 나노섬유의 광학적 특성을 조절하기 용이하며, 레이징 거동을 관찰하기 위한 조건을 쉽게 만족시킬 수 있다. 일반적으로, 나노섬유에서 레이징에 대한 문턱 계인 값(threshold gain)은 나노섬유의 길이와 직경에 따라 결정된다. Zimmerler 등은 나노섬유에서 레이징 거동을 보기 위해서는 나노섬유의 직경이 200 nm 이상이어야만 한다는 것을 설명한 바 있다.<sup>79</sup> 이러한 측면에서 볼 때, 전기방사는 나노섬유의 레이징 거동 및 광도파 특성에 대한 연구에서의 나노섬유 제조 방법으로서 매우 적합하다고 할 수 있다.

이러한 전기방사의 장점들은 전기방사로 제조된 유기 반도체 나노섬유의 광학적 응용에 대한 연구에 대한 동기(motivation)를 제공해주었다. 그러나 그러한 광학적 응용 연구들은 아직 초기 단계에 있고 그 주제는 레이징,<sup>17,18</sup> 광도파 특성,<sup>18-23</sup> 광학적 비등방성(optical anisotropy)<sup>92,93</sup> 등으로 다소 한정되어 있다. 전기방사로 제조된 유기 반도체 나노섬유에서의 광도파 특성은 고분자,<sup>19,20</sup> 저분자 고분자 블렌드,<sup>21</sup> 유/무기 복합체(organic/inorganic composite)<sup>22</sup> 등 다양한 재료에 대해 연구되었으며 그 분석 방법으로는 광발광 강도(photoluminescence intensity)를 나노섬유 길이 방향으로 이미징(imaging)하여 분석하는 방법이 주로 사용되었다. 또한 전기방사로 제조된 나노섬유는 비등방성  $\pi$ - $\pi$  분자 패킹으로 인해 편광된 광발광 특성을 가진다고 보고된 바 있다.<sup>92</sup> 이러한 광학적 비등방성은 나노 스케일의 패턴닝(patterning) 방법인 상온 나노임프린트 리소그래피(room-temperature nanoimprint





lithography)에 의해 더 강화될 수 있다.<sup>93)</sup>

전기방사로 제조된 유기 반도체 나노섬유의 광학적 펄핑에 의한 레이징 거동은 Camposeo 등에 의해 처음으로 보고되었다.<sup>18)</sup> Fig. 8에서 볼 수 있듯이, 유기 형광 염료(organic fluorescence dye)인 Rhodamine 6G가 도핑(doping)된 단일 PMMA 나노 섬유는 광도와 특성과 함께 585 nm에서 0.3 nm의 반치폭(full width at half maximum)을 가지는 레이징 거동을 나타냈다. 이 group은 공액 고분자 나노섬유에 대해서도 광도와 특성을 분석하였다.<sup>23)</sup> 또, 최근 Das 등은 전기방사로 제조된 염료가 도핑된 PS 마이크로섬유에서 3차원 멀티모드(multimode) 레이징 거동을 관찰한 바 있다.<sup>17)</sup>

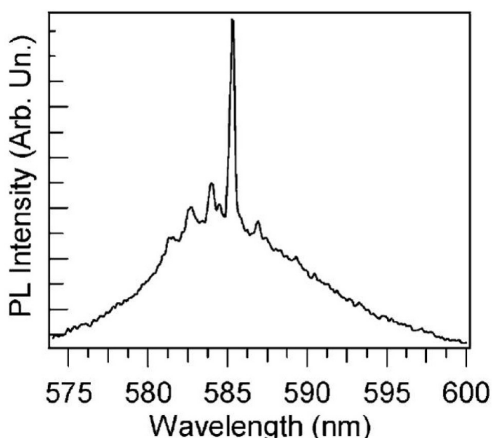


Fig. 8. 단일 PMMA/Rhodamine 6G 나노섬유의  $150 \mu\text{J cm}^{-2}$ 의 펄핑 플루언스(pumping fluence)에서의 광발광 스펙트럼.<sup>17)</sup>

### 3. 결론 및 전망과 제언

#### 3.1.1. 결론

앞서 전기방사로 제조된 유기 반도체 나노섬유의 전자 및 광학소자로의 응용에 대한 연구 결과를 총괄적으로 고찰하고 그 가능성을 각 분야 별로 살펴보았다. 유기 반도체 나노섬유는 유기 반도체의 전기적, 광학적 특성에 대한 연구에 있어 좋은 모델이 되었고, 이를 소자에 응용하여 유기 반도체 나노섬유 기반 발광 다이오드, 태양전지, 전계효과 트랜지스터, 레이저를 제작함으로써 기

존 박막 형태의 소자에서 얻을 수 없었던 결과를 도출할 수 있었다. 또한, 전기방사는 나노섬유를 매우 간단하게 제조할 수 있고, 다양한 종류의 재료를 사용할 수 있으며, 그 직경과 형태를 쉽게 조절할 수 있을 뿐만 아니라 저렴한 비용으로 구현 가능한 방법이기 때문에 그 응용 분야가 매우 다양하다. 그러나 실질적으로 현재까지는 유기 반도체 나노섬유의 제조 방법에 대한 연구가 주로 이루어지고 있고, 유기 반도체 나노섬유 기반 고성능 응용 소자로의 연구는 재료 및 공정상의 한계로 인하여 초기 단계에 머물러 있다. 이러한 한계를 극복하기 위해서는 유기 재료 자체의 성능을 개선해야 하고, 재료 선택의 폭을 확장해야 하며, 나노섬유의 각 응용 분야에 알맞은 새로운 전기방사 공정을 개발하여야 한다. 그 뿐만 아니라 유기 반도체 나노섬유의 기초적인 특성들이 보다 더 깊이 연구되어야 한다.

#### 3.1.2. 전망 및 제언

먼저, 재료적인 측면에서 보았을 때, 유기 반도체 나노섬유 기반 응용 소자의 성능을 개선하기 위해서는 더 좋은 전기적, 광학적 특성을 가지는 새로운 유기 반도체 재료의 개발이 필요하다. 또, 전기방사를 통해 제조할 수 있는 유기 반도체 나노섬유 재료의 폭을 넓히기 위해서는 사슬 엉킴을 효과적으로 만들어 낼 수 있는 분자량 및 분자 구조를 가지면서 각 소자의 응용 측면에서 기능성이 뛰어난 공액 고분자의 합성이 요구된다.

또한 유기 반도체 나노섬유의 응용 가능성을 높이기 위해서는 전기방사 공정에서 나노섬유의 방향과 위치에 대한 세밀한 조절이 가능해야 한다. 현재 나노섬유를 한 방향으로 정렬할 수 있는 여러 방법들이 개발되어 사용되고 있기는 하나, 대부분이 특정 장치에 정렬시킨 뒤 전사(transfer)시키는 간접적인 방법을 사용하고 있고 그 정렬이 완벽하지 않다는 한계가 있어 실질적으로 높은 수준의 패터닝 기술이 요구되는 소자의 제작에 바로 적용하기에는 어려움이 있다. 그러므로 나노섬유의 방향과 위치를 완벽하게 조절하여 직접적으로 나노섬유를 패터닝할 수 있는 전기방사 공정이 개발된다면, 유기 반도체 나노섬유의 전자 및 광자 소자로의 실질적인 응용 가능



성이 크게 늘어날 것으로 전망된다.

더욱이, 유기 반도체 나노섬유 기반 전자 및 광자 소자의 작동 메커니즘(operational mechanism)을 이해하고 그 성능을 개선하기 위해서는 유기 반도체의 1차원 나노구조에서의 전기적, 광학적 특성들에 대한 연구가 수반되어야 한다. 특히, 전자 및 광학 소자 분야로의 응용을 위해서는 유기 반도체 나노섬유 내의  $\pi$ -공액 분자 패킹의 정도와 그 방향성에 따라 전하 수송 및 광도파 메커니즘이 어떻게 변화하는지 관찰하는 연구가 필요하다.

현재 시점에서 전기 방사를 이용한 유기 반도체 나노섬유의 응용에 대한 연구는 아직 많이 진행되지 않았고 해결해야 할 문제가 많다. 그러나 추후 새로운 재료와 공정들이 개발되고 관련된 이론적 배경의 확립이 수반된다면 유기 반도체 나노섬유 기반 전자 및 광자 소자는 미래에 구현될 입는 컴퓨터(wearable computer)나 플렉서블 디스플레이(flexible display)에 대한 연구를 수행하는 데 적합한 모델로서 많은 공헌을 할 수 있을 것이라 전망된다.

### 감사의 글

본 연구는 한국연구재단을 통해 교육과학기술부의 미래융합 융합기술 파이오니어사업(2012-0009460)과 신기술융합형 성장동력사업(2012K001322), 포항공과대학교 기초과학연구소로부터 지원을 받아 수행이 되었습니다.

### 참고문헌

1. Z. Bao, J. A. Rogers, and H. E. Katz, "Printable Organic and Polymeric Semiconducting Materials and Devices," *J. Mater. Chem.*, **9** 1895-904 (1999).
2. T. Sekitani and T. Someya, "Stretchable, Large-Area Organic Electronics," *Adv. Mater.*, **22** [20] 2228-46 (2010).
3. J. A. Rogers, T. Someya, and Y. Huang, "Materials and Mechanics for Stretchable Electronics," *Science*, **327** 1603-37 (2010).
4. I. D. W. Samuel and G. A. Tumbull, "Organic Semiconductor Laser," *Chem. Rev.*, **107** [4] 1272-95 (2007).
5. F. Hide, M. A. Díaz-García, B. J. Schwartz, and A. J. Heeger, "New Developments in the Photonic Applications of Conjugated Polymers," *Acc. Chem. Res.*, **30** [10] 430-36

- (1997).
6. J. Clark and G. Lanzani, "Organic Photonics for Communications," *Nat. Photon.*, **4** [7] 438-46 (2010).
7. F. S. Kim, G. Ren, and S. A. Jenekhe, "One-Dimensional Nanostructures of  $\pi$ -Conjugated Molecular Systems: Assembly, Properties, and Applications from Photovoltaics, Sensors, and Nanophotonics to Nanoelectronics," *Chem. Mater.*, **23** [3] 682-732 (2011).
8. H. Cho, S.-Y. Min, and T.-W. Lee, "Electrospun Organic Nanofiber Electronics and Photonics," *Macromol. Mater. Eng.*, DOI =10.1002/mame.201200364 (2013).
9. C. J. Lin, J. C. Hsu, J. H. Tsai, C. C. Kuo, W. Y. Lee, and W. C. Chen, "High-Performance FETs Prepared from Electrospun Aligned P4TDPP Nanofibers," *Macromol. Chem. Phys.*, **212** [22] 2452-58 (2011).
10. V. Thavasi, G. Singh, and S. Ramakrishna, "Electrospun Nanofibers in Energy and Environmental Applications," *Energy Environ. Sci.*, **1** [2] 205-21 (2008).
11. M. Yu, Y.-Z. Long, B. Sun, and Z. Fan, "Recent Advances in Solar Cells Based on One-Dimensional Nanostructure Arrays," *Nanoscale*, **4** [9] 2783-96 (2012).
12. S. Cavaliere, S. Subianto, I. Savych, D. J. Jones, and J. Rozière, "Electrospinning: Designed Architectures for Energy Conversion and Storage Devices," *Energy Environ. Sci.*, **4** [12] 4761-85 (2011).
13. B. Ding, M. Wang, X. Wang, J. Yu, and G. Sun, "Electrospun Nanomaterials for Ultrasensitive Sensors," *Mater. Today*, **13** [11] 16-27 (2010).
14. Y. Wang, A. La, Y. Ding, Y. Liu, and Y. Lei, "Novel Signal-Amplifying Fluorescent Nanofibers for Naked-Eye-Based Ultrasensitive Detection of Buried Explosives and Explosive Vapors," *Adv. Funct. Mater.*, **22** [17] 3547-55 (2012).
15. V. Vohra, U. Giovanella, R. Tubino, H. Murata, and C. Botta, "Electroluminescence from Conjugated Polymer Electrospun Nanofibers in Solution Processable Organic Light-Emitting Diodes," *ACS Nano*, **5** [7] 5572-78 (2011).
16. H. Yang, C. R. Lightner, and L. Dong, "Light-Emitting Coaxial Nanofibers," *ACS Nano*, **6** [1] 622-8 (2012).
17. A. J. Das, C. Larfargue, M. Lebental, J. Zyss, and K. S. Narayan, "Three-Dimensional Microlasers Based on Polymer Fibers Fabricated by Electrospinning," *Appl. Phys. Lett.*, **99** [26] 263303 (2011).
18. A. Camposeo, F. Di Benedetto, R. Stabile, A. A. R. Neves, R. Cingolani, and D. Pisignano, "Laser



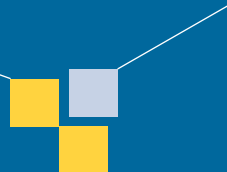
- Emission from Electrospun Polymer Nanofibers,” *Small*, **5** [5] 562-66 (2009).
19. F. D. Benedetto, A. Camposeo, S. Pagliara, E. Mele, L. Persano, R. Stabile, R. Cingolani, and D. Pisignano, “Patterning of Light-Emitting Conjugated Polymer Nanofibers,” *Nat. Nanotechnol.*, **3** 614-19 (2008).
  20. L. Li, X. Yang, and L. Yuan, “One-Dimensional Optical Materials of Microfibers by Electrospinning,” *Mater. Lett.*, **66** [1] 292-25 (2012).
  21. K. P. Dhakal, H. Lee, J. W. Lee, J. Joo, M. Guthold, and J. Kim, “Electrospinning and Optical Characterization of Organic Rubrene Nanofibers,” *J. Appl. Phys.*, **111** [12] 123504 (2012).
  22. H. Liu, J. B. Edel, L. M. Bellan, and H. G. Craighead, “Electrospun Polymer Nanofibers as Subwavelength Optical Waveguides Incorporating Quantum Dots,” *Small*, **2** [4] 495-99 (2006).
  23. S. Pagliara, A. Camposeo, F. D. Benedetto, A. Polini, E. Mele, L. Persano, R. Cingolani, and D. Pisignano, “Study of Optical Properties of Electrospun Light-Emitting Polymer Fibers,” *Superlattice. Microst.*, **47** [1] 145-49 (2010).
  24. D. Li and Y. Xia, “Electrospinning of Nanofibers: Reinventing the Wheel?,” *Adv. Mater.*, **16** [14] 1151-70 (2004).
  25. A. Greiner and J. H. Wendorff, “Electrospinning: a Fascinating Method for the Preparation of Ultrathin Fibers,” *Angew. Chem. Int. Ed.*, **46** [30] 5670-703 (2007).
  26. W. E. Teo and S. Ramakrishna, “A Review on Electrospinning Design and Nanofibre Assemblies,” *Nanotechnology*, **17** [14] R89-106 (2006).
  27. D. O’Carroll, I. Lieberwirth, and G. Redmond, “Microcavity Effects and Optically Pumped Lasing in Single Conjugated Polymer Nanowires,” *Nat. Nanotechnol.*, **2** [3] 180-84 (2007).
  28. B.-G. Kim, M.-S. Kim, and J. Kim, “Ultrasonic-Assisted Nanodimensional Self-Assembly of Poly-3-hexylthiophene for Organic Photovoltaic Cells,” *ACS Nano*, **4** [4] 2160-66 (2010).
  29. F. Gu, H. Yu, P. Wang, Z. Yang, and L. Tong, “Light-Emitting Polymer Single Nanofibers via Waveguiding Excitation,” *ACS Nano*, **4** [9] 5332-38 (2010).
  30. M. Aryal, K. Trivedi, and W. Hu, “Nano-Confinement Induced Chain Alignment in Ordered P3HT Nanostructures Defined by Nanoimprint Lithography,” *ACS Nano*, **3** [10] 3085-90 (2009).
  31. Q. Tang, Y. Tong, W. Hu, Q. Wan, and T. Björnmholm, “Assembly of Nanoscale Organic Single-Crystal Cross-Wire Circuits,” *Adv. Mater.*, **21** [42] 4234-37 (2009).
  32. O. Fenwick, L. Bozec, D. Credgington, A. Hammiche, G. M. Lazzerini, Y. R. Silberberg, and F. Cacialli, “Thermochemical Nanopatterning of Organic Semiconductors,” *Nat. Nanotechnol.*, **4** [10] 664-68 (2009).
  33. C. D. Marco, E. Mele, A. Camposeo, R. Stabile, R. Cingolani, and D. Pisignano, “Organic Light-Emitting Nanofibers by Solvent-Resistant Nanofluidics,” *Adv. Mater.*, **20** [21] 4158-62 (2008).
  34. S. L. Shenoy, W. D. Bates, H. L. Frisch, and G. E. Wnek, “Role of Chain Entanglements on Fiber Formation during Electrospinning of Polymer Solutions: Good Solvent, Non-Specific Polymer-Polymer Interaction Limit,” *Polymer*, **46** [10] 3372-84 (2005).
  35. P. Gupta, C. Elkins, T. E. Long, and G. L. Wilkes, “Electrospinning of Linear Homopolymers of Poly(methyl methacrylate): Exploring Relationships Between Fiber Formation, Viscosity, Molecular Weight and Concentration in a Good Solvent,” *Polymer*, **46** [13] 4799-810 (2005).
  36. S. Sundarrajan, R. Murugan, A. S. Nair, and S. Ramakrishna, “Fabrication of P3HT/PCBM Solar Cloth by Electrospinning Technique,” *Mater. Lett.*, **64** [21] 2369-72 (2010).
  37. N. M. Bedford., M. B. Dickerson, L. F. Drummy, H. Koerner, K. M. Singh, M. C. Vasudev, M. F. Durstock, R. R. Naik, and A. J. Steckl, “Nanofiber-Based Bulk-Heterojunction Organic Solar Cells Using Coaxial Electrospinning,” *Adv. Energy Mater.*, **2** [9] 1136-44 (2012).
  38. R. González, and N. J. Pinto, “Electrospun Poly(3-hexylthiophene-2,5-diyl) Fiber Field Effect Transistor,” *Synthetic Metals*, **151** [3] 275-78 (2005).
  39. H. Liu, C. H. Reccius, and H. G. Craighead, “Single Electrospun Regioregular Poly(3-hexylthiophene) Nanofiber Field-Effect Transistor,” *Appl. Phys. Lett.*, **87** [25] 253106 (2005).
  40. S. Lee, G. D. Moon, and U. Jeong, “Continuous Production of Uniform Poly(3-hexylthiophene) (P3HT) Nanofibers by Electrospinning and their Electrical Properties,” *J. Mater. Chem.*, **19** [6] 743-48 (2009).
  41. S. W. Lee, H. J. Lee, J. H. Choi, W. G. Koh, J. M. Myoung, J. H. Hur, J. J. Park, J. H. Cho, and U. Jeong, “Periodic Array of Polyelectrolyte-Gated Organic Transistors from Electrospun Poly(3-hexylthiophene) Nanofibers,” *Nano Lett.*, **10** [1] 347-51 (2010).
  42. A. Babel, D. Li, Y. Xia, and S. A. Jenekhe, “Electrospun Nanofibers of Blends of Conjugated Polymers: Morphology, Optical Properties, and Field-Effect



- Transistors," *Macromolecules*, **38** [11] 4705-11 (2005).
43. J.-Y. Chen, C.-C. Kuo, C.-S. Lai, W.-C. Chen, and H.-L. Chen, "Manipulation on the Morphology and Electrical Properties of Aligned Electrospun Nanofibers of Poly(3-hexylthiophene) for Field-Effect Transistor Applications," *Macromolecules*, **44** [8] 2883-92 (2011).
  44. D. Li, A. Babel, S. A. Jenekhe, and Y. Xia, "Nanofibers of Conjugated Polymers Prepared by Electrospinning with a Two-Capillary Spinneret," *Adv. Mater.*, **16** [22] 2062-66 (2004).
  45. H. A. Bronstein and C. K. Luscombe, "Externally Initiated Regioregular P3HT with Controlled Molecular Weight and Narrow Polydispersity," *J. Am. Chem. Soc.*, **131** [36] 12894-95 (2009).
  46. R. J. Kline, M. D. McGehee, E. N. Kadnikova, J. Liu, J. M. J. Fréchet, and M. F. Toney, "Dependence of Regioregular Poly(3-hexylthiophene) Film Morphology and Field-Effect Mobility on Molecular Weight," *Macromolecules*, **38** [8] 3312-19 (2005).
  47. A. M. Ballantyne, L. Chen, J. Dane, T. Hammant, F. M. Braun, M. Heeney, W. Duffy, I. McCulloch, and D. D. C. Bradley, J. Nelson, "The Effect of Poly(3-hexylthiophene) Molecular Weight on Charge Transport and the Performance of Polymer:Fullerene Solar Cells," *Adv. Funct. Mater.*, **18** [16] 2373-80 (2008).
  48. W. Ma, J. Y. Kim, K. Lee, and A. J. Heeger, "Effect of the Molecular Weight of Poly(3-hexylthiophene) on the Morphology and Performance of Polymer Bulk Heterojunction Solar Cells," *Macromol. Rapid Commun.*, **28** [17] 1776-80 (2007).
  49. H.-S. Shim, S.-I. Na, S. H. Nam, H.-J. Ahn, H. J. Kim, D.-Y. Kim, and W. B. Kim, "Efficient Photovoltaic Device Fashioned of Highly Aligned Multilayers of Electrospun TiO<sub>2</sub> Nanowire Array with Conjugated Polymer," *Appl. Phys. Lett.*, **92** [18] 183107 (2008).
  50. S. Wu, Q. Tai, and F. Yan, "Hybrid Photovoltaic Devices Based on Poly(3-hexylthiophene) and Ordered Electrospun ZnO Nanofibers," *J. Phys. Chem. C*, **114** [13] 6197-200 (2010).
  51. M. Tanveer, A. Habib, and M. B. Khan, "Improved Efficiency of Organic/Inorganic Photovoltaic Devices by Electrospun ZnO Nanofibers," *Mater. Sci. Eng. B*, **177** [13] 1144-48 (2012).
  52. N. J. Pinto, A. T. Johnson, Jr. A. G. MacDiarmid, C. H. Mueller, N. Theofylaktos, D. C. Robinson, and F. A. Miranda, "Electrospun Polyaniline/Polyethylene Oxide Nanofiber Field-Effect Transistor," *Appl. Phys. Lett.*, **83** [20] 4244-46 (2003).
  53. A. Dodabalapur, "Organic Light-Emitting Diodes," *Solid State Communication*, **102** [2-3] 259-67 (1997).
  54. C.-T. Chen, "Evolution of Red Organic Light-Emitting Diodes: Materials and Devices," *Chem. Mater.*, **16** [23] 4389-400 (2004).
  55. S. Chen, L. Deng, J. Xie, L. Peng, L. Xie, Q. Fan, and W. Huang, "Recent Developments in Top-Emitting Organic Light-Emitting Diodes," *Adv. Mater.*, **22** [46] 5227-39 (2010).
  56. M. C. Gather, A. Köhnen, and K. Meerholz, "White Organic Light-Emitting Diodes," *Adv. Mater.*, **23** [2] 233-48 (2011).
  57. T.-H. Han, Y. Lee, M.-R. Choi, S.-H. Woo, S.-H. Bae, B. H. Hong, J.-H. Ahn, and T.-W. Lee, "Extremely Efficient Flexible Organic Light-Emitting Diodes with Modified Graphene Anode," *Nat. Photon.*, **6** 105-10 (2012).
  58. T.-H. Han, M.-R. Choi, S.-H. Woo, S.-Y. Min, C.-L. Lee, and T.-W. Lee, "Molecularly Controlled Interfacial Layer Strategy toward Highly Efficient Simple-Structured Organic Light-Emitting Diodes," *Adv. Mater.*, **24** [11] 1487-93 (2012).
  59. A. Camposeo, L. Persano, and D. Pisignano, "Light-Emitting Electrospun Nanofibers for Nanophotonics and Optoelectronics," *Macromol. Mater. Eng.*, DOI =10.1002/mame.201200277 (2012).
  60. T.-W. Lee, S. Jeon, J. Maria, J. Zaumseil, J. W. P. Hsu, and J. A. Rogers, "Soft-Contact Optical Lithography Using Transparent Elastomeric Stamps and Application to Nanopatterned Organic Light-Emitting Devices," *Adv. Funct. Mater.*, **15** [9] 1435-39 (2005).
  61. T.-W. Lee, J. Zaumseil, Z. Bao, J. W. P. Hsu, and J. A. Rogers, "Organic Light-Emitting Diodes Formed by Soft Contact Lamination," *Proc. Natl. Acad. Sci. USA*, **101** [2] 429-33 (2004).
  62. H.-S. Wang, L.-H. Lin, S.-Y. Chen, Y.-L. Wang, K.-H. Wei, "Ordered Polythiophene/Fullerene Composite Core-Shell Nanorod Arrays for Solar Cell Applications," *Nanotechnology*, **20** [7] 075201 (2009).
  63. Q. H. Cui, L. Jiang, C. Zhang, Y. S. Zhao, W. Hu, J. Yao, "Coaxial Organic p-n Heterojunction Nanowire Arrays: One-Step Synthesis and Photoelectric Properties," *Adv. Mater.*, **24** [17] 2332-6 (2012).
  64. C. J. Brabec, "Organic Photovoltaics: Technology and Market," *Sol. Energ. Mater. Sol. Cells*, **83** [2-3] 273-92 (2004).
  65. B. Kippelen and J.-L. Brédas, "Organic Photovoltaics," *Energ. Environ. Sci.*, **2** [3] 251-61 (2009).



66. H. Cortina, C. Martínez-Alonso, M. Castillo-Ortega, and H. Hu, "Cellulose Acetate Fibers Covered by CdS Nanoparticles for Hybrid Solar Cell Applications," *Mater. Sci. Eng. B*, **177** [16] 1491-96 (2012).
67. G. Horowitz, "Organic Field-Effect Transistors," *Adv. Mater.*, **10** [5] 365-77 (1998).
68. A. Dodabalapur, "Organic and Polymer Transistors for Electronics," *Mater. Today*, **9** [4] 24-30 (2006).
69. Y. Cao, M. L. Steigerwald, C. Nuckolls, and X. Guo, "Current Trends in Shrinking the Channel Length of Organic Transistors Down to the Nanoscale," *Adv. Mater.*, **22** [1] 20-32 (2010).
70. Y. Wen and Y. Liu, "Recent Progress in n-Channel Organic Thin-Film Transistors," *Adv. Mater.*, **22** [12] 1331-45 (2010).
71. Y. Guo, G. Yu, Y. Liu, "Functional Organic Field-Effect Transistors," *Adv. Mater.*, **22** [40] 4427-47 (2010).
72. T.-W. Lee, Y. Byun, B.-W. Koo, I.-N. Kang, Y.-Y. Lyu, C. H. Lee, L. Pu, S. Y. Lee, "All-Solution-Processed n-Type Organic Transistors Using a Spinning Metal Process," *Adv. Mater.*, **17** [18] 2180-84 (2005).
73. T.-W. Lee, J. H. Shin, I.-N. Kang, S. Y. Lee, "Photocurable Organic Gate Insulator for the Fabrication of High-Field Effect Mobility Organic Transistors by Low Temperature and Solution Processing," *Adv. Mater.*, **19** [18] 2702-06 (2007).
74. A. L. Briseno, S. C. B. Mannsfeld, S. A. Jenekhe, Z. Bao, and Y. Xia, "Introducing Organic Nanowire Transistors Semiconductors," *Materials Today*, **11** [4] 38-47 (2008).
75. S. B. Jo, W. H. Lee, L. Qiu, and K. Cho, "Polymer Blends with Semiconducting Nanowires for Organic Electronics," *J. Mater. Chem.*, **22** [10] 4244-60 (2012).
76. W.-J. Li, C. T. Laurencin, E. J. Caterson, R. S. Tuan, and F. K. Ko, "Electrospun Nanofibrous Structure: A Novel Scaffold for Tissue Engineering," *J. Biomed. Mater. Res.*, **60** [4] 613-21 (2002).
77. J.-H. Tsai, W.-Y. Lee, W.-C. Chen, C.-Y. Yu, G.-W. Hwang, and C. Ting, "New Two-Dimensional Thiophene-Acceptor Conjugated Copolymers for Field Effect Transistor and Photovoltaic Cell Applications," *Chem. Mater.*, **22** [10] 3290-99 (2010).
78. E. V. Canesi, A. Luzio, B. Saglio, A. Bianco, M. Caironi, and C. Bertarelli, "n-Type Semiconducting Polymer Fibers," *ACS Macro Lett.*, **1** [3] 366-69 (2012).
79. M. A. Zimmler, F. Capasso, S. Müller, C. Ronning, "Optically Pumped Nanowire Lasers: Invited Review," *Semicond. Sci. Technol.*, **25** [2] 024001 (2010).
80. A. J. Heeger, "Light Emission from Semiconducting Polymers: Light-Emitting Diodes, Light-Emitting Electrochemical Cells, Lasers and White Light for the Future," *Solid State Commun.*, **107** [11] 673-79 (1998).
81. Q. H. Cui, Y. S. Zhao, and J. Yao, "Photonic Applications of One-Dimensional Organic Single-Crystalline Nanostructures: Optical Waveguides and Optically Pumped Lasers," *J. Mater. Chem.*, **22** [10] 4136-40 (2012).
82. Y. S. Zhao, H. Fu, A. Peng, Y. Ma, Q. Liao, and J. Yao, "Construction and Optoelectronic Properties of Organic One-Dimensional Nanostructures," *Acc. Chem. Res.*, **43** [3] 409-18 (2010).
83. F. Quochi, "Random Lasers Based on Organic Epitaxial Nanofibers," *J. Opt.*, **12** [2] 024003 (2010).
84. F. Hide, M. A. Díaz-García, B. J. Schwartz, M. R. Anderson, Q. Pei, and A. J. Heeger, "Semiconducting Polymers: A New Class of Solid-State Laser Materials," *Science*, **273** 1833-36 (1996).
85. M. D. McGehee and A. J. Heeger, "Semiconducting (Conjugated) Polymers as Materials for Solid-State Lasers," *Adv. Mater.*, **12** [22] 1655-68 (2000).
86. C. Zhang, Y. S. Zhao, and J. Yao, "Optical Waveguides at Micro/Nanoscale Based on Functional Small Organic Molecules," *Phys. Chem. Phys.*, **13** [20] 9060-73 (2011).
87. Y. C. Kim, T.-W. Lee, O. O. Park, C. Y. Kim, and H. N. Cho, "Low-Threshold Amplified Spontaneous Emission in a Fluorene-Based Liquid Crystalline Polymer Blend," *Adv. Mater.*, **13** [9] 646-49 (2001).
88. T.-W. Lee, O. O. Park, D. H. Choi, H. N. Cho, and Y. C. Kim, "Low-Threshold Blue Amplified Spontaneous Emission in a Statistical Copolymer and Its Blend," *Appl. Phys. Lett.*, **81** [3] 424-26 (2002).
89. T.-W. Lee, O. O. Park, H. N. Cho, D. Y. Kim, and Y. C. Kim, "Low-Threshold Lasing in a Microcavity of Fluorene-Based Liquid-Crystalline Polymer Blends," *J. Appl. Phys.*, **93** [3] 1367-70 (2003).
90. I. B. Martini, I. M. Craig, W. C. Molenkamp, H. Miyata, S. H. Tolbert, and B. J. Schwartz, "Controlling Optical Gain in Semiconducting Polymers with Nanoscale Chain Positioning and Alignment," *Nat. Nanotechnol.*, **2** [10] 647-52 (2007).
91. D. Tu, S. Pagliara, A. Camposeo, L. Persano, R.



## 특 집 ■■■ 조힘찬, 민성용, 이태우

- Cingolani, and D. Pisignano, "Single Light-Emitting Polymer Nanofiber Field-Effect Transistors," *Nanoscale*, **2** [10] 2217-22 (2010).
92. S. Pagliara, M. S. Vitiello, A. Camposeo, A. Polini, R. Cingolani, G. Scamarcio, and D. Pisignano, "Optical Anisotropy in Single Light-Emitting Polymer Nanofibers," *J. Phys. Chem. C*, **115** [42] 20399-405 (2011).
93. S. Pagliara, A. Camposeo, E. Mele, L. Persano, R. Cingolani, and D. Pisignano, "Enhancement of Light Polarization from Electrospun Polymer Fibers by Room Temperature Nanoimprint Lithography," *Nanotechnology*, **21** [21] 215304 (2010).

### ●● 조힘찬



- 2012년 포항공과대학교(POSTECH) 신소재공학과 학사
- 2012년-현재 포항공과대학교(POSTECH) 신소재공학과 석박사통합과정

### ●● 민성용



- 2010년 포항공과대학교(POSTECH) 신소재공학과 학사
- 2010년-현재 포항공과대학교(POSTECH) 신소재공학과 석박사통합과정

### ●● 이태우



- 1997년 KAIST 화학공학과 학사
- 1999년 KAIST 화학공학과 석사
- 2002년 KAIST 생명화학공학과 박사
- 2003년 Bell Laboratories, 박사후 연구원
- 2008년 삼성종합기술원 전문연구원
- 2008년-현재 포항공과대학교(POSTECH) 신소재공학과 부교수