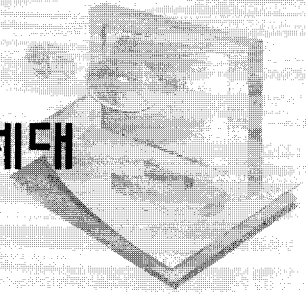


산화이연 1차원 나노구조물 기반 차세대 에너지 하베스팅 소자 기술개발 동향



김상우 교수 (금오공대 신소재시스템공학부)

1. 서론

산화이연 (ZnO)은 상온에서 넓은 밴드갭 (3.37 eV)을 가지며 60 meV의 매우 큰 Exciton 결합에너지 및 15 meV의 Bi-Exciton 결합에너지를 갖는 직접 천이형 반도체로서 차세대 발광다이오드, 레이저 다이오드, 광검출기 등 광전소자용 화합물 반도체 재료로서 주목 받고 있다 [1]. 그동안 안정한 p-형 ZnO 개발의 어려움으로 인해 광전소자 응용에 한계를 겪고 있었으나 최근 p-형 ZnO 구현 및 이를 통한 pn 접합형 발광소자 개발에 관한 연구결과 등이 속속 보고되고 있는 상황으로 ZnO 기반 차세대 광전소자의 구현을 가시화 시키고 있는 상황이다 [2]. 또한 ZnO는 자체의 반도체 특성뿐만 아니라 이종원소 도핑 기술을 통해 금속과 필적할 만한 전도성 및 반도체 특성을 나타낼 수 있으며 투명하기 때문에 최근 들어 ITO 대체용 ZnO 기반 투명전극 개발에 관한 연구가 활발히 이루어지고 있다. TCO 계열의 물질로서 Sensor 및 Saw Device용 재료로 널리 연구가 되어오던 ZnO계의 산화막에 대한 연구가 1980년대 이후 미국 하버드 대학을 중심으로 활발히 진행되어 ZnO에 Al, Ga, F 또는 휘트류 원소의 첨가에 의한 TCO 박막의 개발이 어느 정도의 성과를 나타내기 시작하여 현재 ITO에 필적하는 비저항을 얻는 연구결과가

최근 2~3년간에 걸쳐 발표되기 시작하였다. 이러한 비저항 값은 아직 하강곡선 상에 있어 향후 ITO를 대체할 고품위 TCO 재료로서 주목받기 시작하고 있다. 최근 Nakahara 등은 캐리어농도 $8.1 \times 10^{20} \text{ cm}^{-3}$ 의 캐리어농도 및 $1.9 \times 10^{-4} \Omega \cdot \text{cm}$ 의 비저항 값을 갖는 Ga이 도핑된 ZnO 박막을 제조하여 p-GaN에 대한 오믹 컨택을 구현하여 고효율의 청색 LED를 제작하였음을 발표하였다 [3]. 또한 ZnO 기반 박막은 비정질 유리 및 플라스틱 기판과 같은 다양한 기판에 비교적 낮은 프로세스온도에서 결정성을 갖는 박막을 제작할 수 있으며 넓은 에너지 밴드갭의 특성상 가시광에 노출되더라도 활성층의 특성이 저하되지 않기 때문에 구조가 간편하며 대면적 제작이 가능한 투명 트랜지스터의 제조연구가 활발히 진행되고 있다 [4].

박막 제작 및 소자 응용 연구와 달리하여 2000년에 들어 미국 UC 버클리의 Yang교수 그룹이 열화학 기상증착법 (Thermal Chemical Vapor Deposition : Thermal CVD)을 통해 제작된 ZnO 나노와이어로부터 상온 레이징 특성을 확인한 연구결과 및 미국 조지아텍의 Wang교수 그룹이 동일방식을 통해 ZnO 나노벨트, 나노와이어 제작 및 물성평가 관련연구를 보고한 이래로 ZnO 나노와이어, 나노로드, 나노벨트, 나노튜브 등의 1차원 나노구조물 제작, 특성평가 및 소자응용에 관한 연구가 활발히 진행되고 있다

[5-7]. 짧은 연구기간임에도 불구하고 그동안 관련연구에서 수많은 논문 및 연구보고 등이 발표되고 있으나 아직까지 ZnO 1차원 나노구조물을 적용한 상업화된 실제 소자응용에 관련해서는 많은 어려움을 겪고 있다. CVD 방식을 통한 ZnO 나노와이어 및 나노로드 등의 1차원 나노구조물 제작 및 이를 이용한 소자응용 예로서 전계방출소자, 헤테로 정션 발광다이오드, 전계효과 트랜지스터, 광검출기, 가스-바이오센서 제작 및 특성평가에 관한 연구결과 및 리뷰 논문들이 다양하게 발표되고 있으나 [8-12], 본 리뷰에서는 CVD 방식 및 최근 들어 활발히 보고되고 있는 습식화합법(Wet Chemical Method : WCM)을 이용한 ZnO 1차원 나노구조 제작기술에 대한 소개와 ZnO 1차원 나노구조를 적용시킨 차세대 신재생에너지원으로서 각광받고 있는 염료감응·유무기 하이브리드 태양전지 및 나노발전기 개발에 관한 관련 연구동향을 소개하고자 한다.

2. ZnO 1차원 나노구조물 제작 기술 동향

최근에 들어 전 세계적으로 신개념 나노스케일 디바이스 구현에 대한 커다란 관심 및 노력 때문에 ZnO 나노와이어, 나노벨트 및 나노튜브 등과 같은 1차원 나노구조물의 제작 및 특성평가에 관한 매우

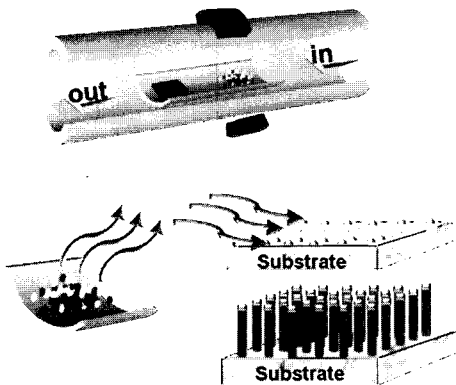
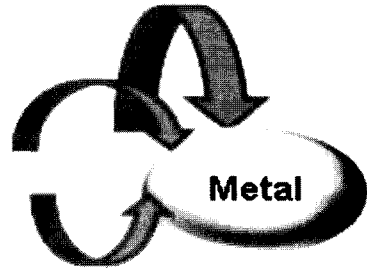
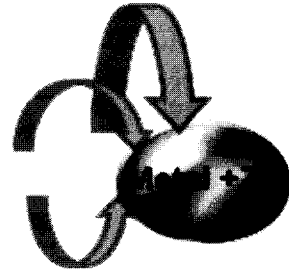


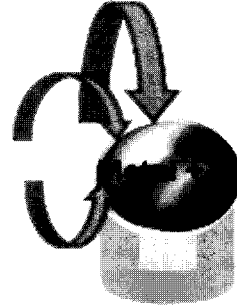
그림 1. Thermal CVD법을 이용한 ZnO 1차원 나노구조물 제작 프로세스.



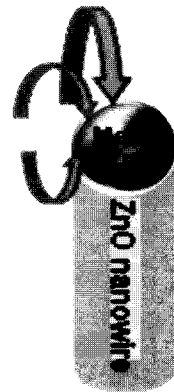
(a) Liquid catalytic nanocluster



(b) Supersaturating



(c) Nucleation of Nanowires



(d) Growth of Nanowires

그림 2. VLS법에 의한 ZnO 나노와이어 성장 모식도.



집중적인 연구가 진행되고 있으며 나노구조물 제작에 필요한 핵심기술에 대해 미국 조지아텍의 Z. L. Wang 교수, UC버클리의 P. Yang 교수 등의 여러 그룹들이 가장 선도적인 연구결과를 보여주고 있다. 최근 국내에서도 다양한 방식을 이용한 ZnO 기반 저차원 나노구조물 합성에 관한 연구가 수행되고 있으며 그에 따른 저차원 나노구조물의 특성평가 및 소자응용에 대한 연구결과물의 발표가 점차 증가하고 있는 상황이다. ZnO 1차원 나노구조물 제작에 널리 사용되고 있는 Thermal CVD법은 MOCVD나 MBE 등의 고가의 공정장비에 비해 가격적으로 매우 저렴한 메리트가 있으며 산화물인 ZnO 나노구조물의 제작의 경우 특별한 진공장비 없이도 고품질의 나노구조물 제작이 가능하기 때문에 대부분의 그룹에서 Thermal CVD 방식을 채택하고 있다.

그림 1은 Thermal CVD법을 이용한 ZnO 1차원 나노구조물 제작 프로세스 모식도를 보여주고 있다. 장치의 반응로 내부에 Carbothermal 반응을 위해 일

반적으로 ZnO-흑연 혼합 파우더를 사용하며 Zn 파우더가 원료 물질로 사용되기도 한다. 고온(일반적으로 800도 이상)에서 Vapor화된 원료 물질은 Ar 등의 캐리어 가스에 의해 기판 쪽으로 이동되고 기판에 1-3 nm 두께로 증착되어 있는 촉매금속(일반적으로 Au)과의 공정반응 (Eutectic Reaction)을 통해 나노와이어 등의 1차원 나노구조물이 성장하게 된다. 이때 촉매금속을 상부로 밀어 올리면서 기판과 결정구조에 따라 성장하게 되는 방식을 vapor-liquid-solid (VLS) 방식이라 부르며, 가장 널리 사용되고 있는 방식이다.

그림 2는 ZnO 나노와이어 성장을 위한 VLS 프로세스 모식도이며, 그림 3은 본 저자의 연구그룹에서 다양한 기판 상에 VLS법을 이용하여 제작한 ZnO 나노와이어의 FE-SEM 및 실제 시편의 포토 이미지를 보여주고 있다 [13]. 그림 4(a)(b)는 c-Al₂O₃ 기판 위에 성장된 단일 ZnO 나노와이어의 TEM 결과로 Tip 끝에 Au-Zn 합금 Tip이 존재하는 것은 본 나노와이어가 전형적인 VLS 방식을 통해 성장되었음을 의미한

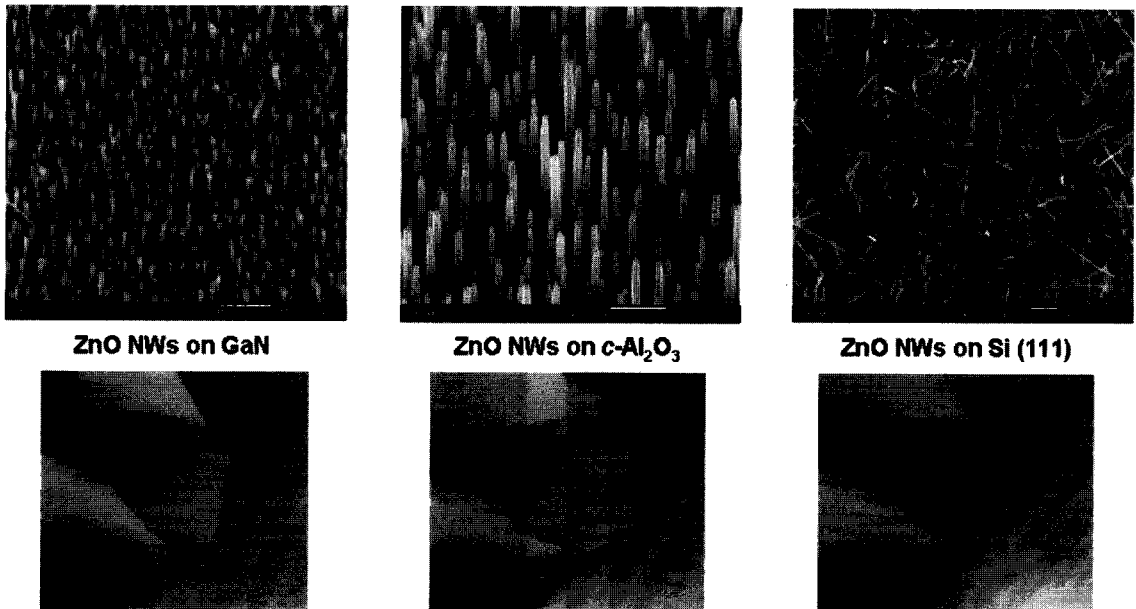


그림 3. GaN, c-Al₂O₃ 및 Si (111) 기판 상에 성장된 ZnO 나노와이어의 FE-SEM 이미지 및 실제 시편의 포토 이미지.

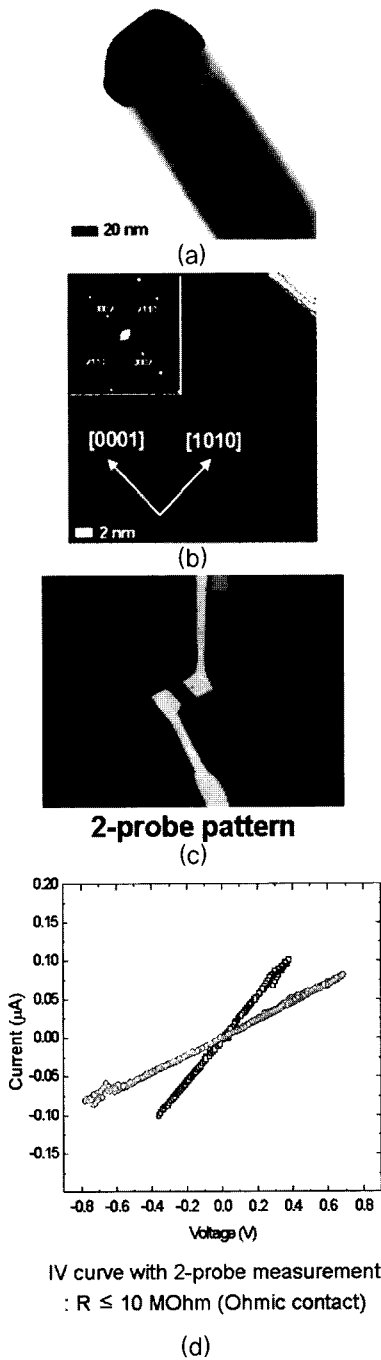


그림 4. (a),(b) c-Al₂O₃ 기판 위에 성장된 단일 ZnO 나노와이어의 TEM 결과. (c) 단일 나노와이어의 two-프로브 측정. (d) 단일 나노와이어의 전류-전압특성.

다. 또한 단일 나노와이어의 전기적 특성 분석결과 two-프로브 측정에서 나노와이어와 금속전극간의 전형적인 옴특성을 보이는 아주 우수한 전류-전압 특성을 보유함을 알 수 있다. 그러나 많은 Thermal CVD 프로세스의 장점에 불구하고 기존의 대부분의 연구그룹에서 나노구조물 제작 시 700도 이상의 고온 공정을 이용하고 있기 때문에 열에 취약한 Glass 및 플렉서블 기판 위에 나노구조물의 직접 성장이 어려운 단점이 있다.

이에 따른 대안으로 습식화학합성법 (Wet Chemical Method : WCM)을 이용한 ZnO 1차원 나노구조물합성에 관한 연구가 각광을 받고 있다. 1990년 최초로 본 방식이 발표된 이래로 10년 이상이 지난 2000년대에 들어서야 활발한 연구가 다시 이루어지고 있다. 2003년 Vayssieres 등은 본 합성방법을 이용하여 전도성 Glass 기판 및 Si 기판 위에 ZnO 나노로드 성장 및 물성평가에 관한 논문을 발표하였다 [14]. 나노로드 성장을 위해 먼저 Zinc Acetate 파우더를 이용하여 ZnO Seed층을 제작 후 메인 나노로드 성장을 위해 원료 물질로 ZnO(NO₃)₂ 및 계면활성제인 Hexamethyltetramine (HMT)를 초순수 또는 에탄올 등의 용매와 혼합한 반응 용액 내에서 화학반응을 이용하여 ZnO 나노로드를 90도 정도의 저온에서 성장시켰다. 반응에 도입된 프로세스는 다음과 같다.

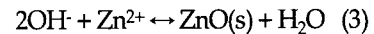
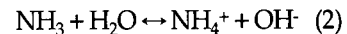
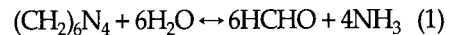


그림 5는 본 저자 연구그룹에서 WCM 합성법을 통해 ITO/glass 기판 상 및 프리 스탠딩 방식의 ZnO 나노로드 제작 프로세스 모식도 및 실제 FE-SEM 이미지를 보여주고 있다. 모식도에서 자세히 나타나 있듯이 본 WCM 합성법은 나노구조물의 합성공정이 매우 간단하며, 공정온도가 100도 이하로 매우 낮아 플렉서블 기판 도입이 가능함으로써 ZnO 나노구조 기반 차세대 플렉서블 소자제작에 있어 매우 유망한 나노구조 제작기술이다. 그러나 WCM법을 통하여 제작된 나노구조물은 Thermal

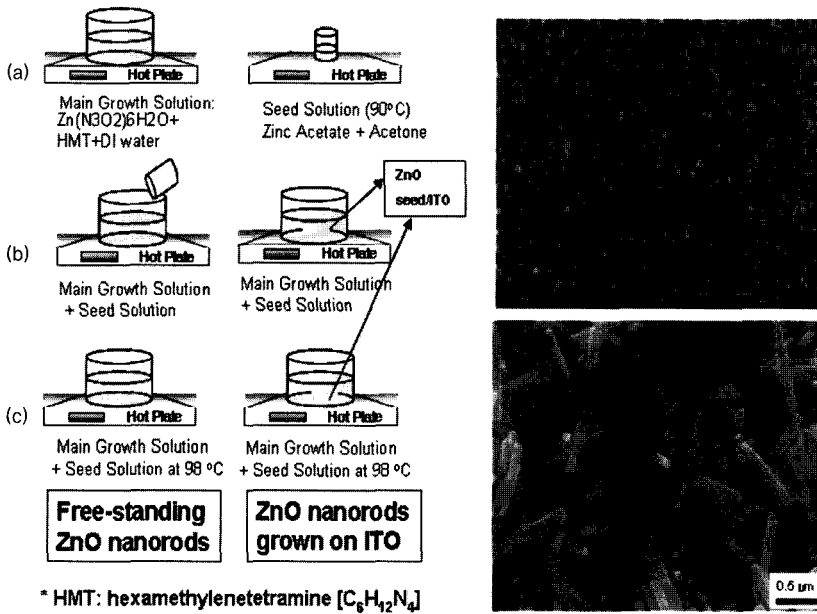


그림 5. WCM 합성법을 통해 ITO/glass 기판 상 및 프리 스탠딩 방식의 ZnO 나노로드 제작 프로세스 모식도 및 실제 성장된 나노로드의 FE-SEM 이미지.

표 1. WCM법을 ZnO 1차원 나노구조물 제작에 적용한 연구결과 [15].

성장용액	모폴로지	연구포커스
Zinc nitrate, HMT	나노로드, 마이크로 튜브	Si 및 전도성 glass 기판 도입, 저온성장
Zinc nitrate, HMT	나노로드, 나노튜브	기판 및 seed 층 영향
Zinc nitrate, HMT, citrate	나노기둥, 나노플레이트	중형비 조절, citrate 첨가에 의한 중형비 조절
Zinc nitrate, HCl, triethanolamine	수직배열 나노로드	기판 및 성장용액 내 카운터 이온의 영향
Zinc nitrate, thiourea, ammonium chloride, ammonia	나노와이어, 나노타워, 나노플라워, 나노튜브	환원제 영향, 기판 전처리 및 성장시간-온도 영향
Zinc acetate, citric acid, sodium hydroxide	디스크, 플라워 형태 나노로드	성장용액의 pH 영향

CVD법으로 합성된 나노구조물에 비해 나노구조 내 결함농도가 높으며 사이즈 및 밀도 조절이 어려운 단점을 지니고 있어 소자로의 응용 시 고효율 소자 제작에 제한이 따르고 있는 상황이다. 본 WCM법을 ZnO 1차원 나노구조물 제작에 적용한 연구결과들을 표 1에 정리하였다 [15]. 또한 그림 6에 ZnO 나노구조물 제작에 있어 활발하게 도입되고 있는 Thermal CVD법과 WCM법의 기술수준 및 문제점을 나타내었다.

이 외에 ZnO 나노구조에 안정한 이종원소의 도

핑에 따른 전도성 제어, p-형 ZnO 나노구조물 제작, 코어셸 또는 초격자 구조의 헤테로 나노구조합성, 나노구조물 선택성장기술, 자기조립방식의 나노구조물 정렬기술 등의 핵심기술관련 연구결과는 전세계적으로도 일부 연구그룹에서만 보고되고 있는 상황이며 플렉서블 기판 상에 대면적으로 배향 및 밀도 조절된 ZnO 1차원 나노구조물 제작에 관한 연구도 극히 미비한 상황으로 ZnO 나노구조 기반 차세대 나노소자 구현을 위해서 해결해야 할 문제는 산적해 있는 상황이다.

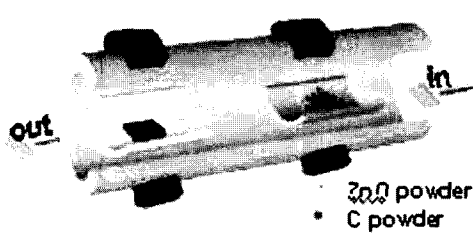
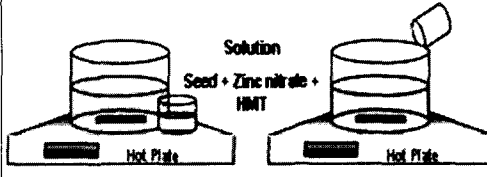
	열화학 기상 증착법	습식 화학 합성법
나노 구조물 형성방법	 <p>• ZnO powder • C powder</p>	 <p>Solution Seed + Zinc nitrate + HMT Hot Plate</p>
사용 물질계	<ul style="list-style-type: none"> • 무기물 반도체, CNT 등의 나노 구조물 	<ul style="list-style-type: none"> • 산화물 반도체 기반 나노 구조물
기술수준 및 문제점	<ul style="list-style-type: none"> • 반도체 나노 구조물 구조에서 가장 활발하게 연구가 진행 • 기초 물리화 분야와 소자응용 분야에 다양하게 연구가 진행 • 도핑 및 양질의 나노 구조물 제작이 가능 • 다차원의 나노 구조물 형성가능 • 공정 변로 인해 불균일성 및 재연성의 한계 • 고온공정으로 플렉시블 기판 상에 직접 소자제작이 불가능 • 대면적 배양기술의 한계 	<ul style="list-style-type: none"> • 산화물 반도체 나노 구조물 제작에 있어 최근 연구가 진행 • 나노 구조물 제작 시 저온성장 가능 • 대면적 제작 및 대량화 가능 • 다차원의 나노 구조물 형성가능 • 간단한 방법으로 쉽게 나노 구조물 형성 • 결합에 기인한 물리적 특성의 급격적 저하 • 도핑 및 양질의 나노 구조물 제작의 한계 • 나노 구조물 제작시 형사/제어가 힘들

그림 6. Thermal CVD법과 WCM법의 기술수준 및 문제점.

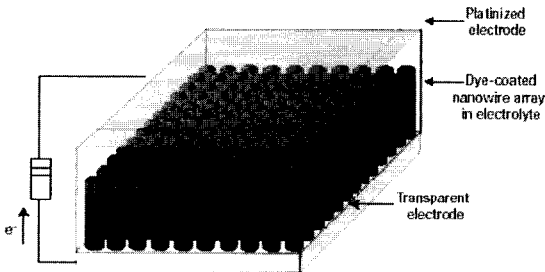
3. ZnO 1차원 나노구조물 기반 염료감응 및 유무기 하이브리드 태양전지 개발 기술동향

실리콘 및 화합물 반도체를 이용한 고효율 태양 전지의 상업화가 점차 가속화되어 가고 있으나 고가의 제작비용, 제작공정 시 파생되는 환경오염 및 플렉서블 태양전지 구현이 어려운 관계로 새로운 형태의 고효율 플렉서블 태양전지를 구현하기 위한 신소재개발 및 공정구현에 많은 관심이 모아지고 있다. 유기물 태양전지의 경우 현재 상용화 중인 실리콘 기반 태양전지와는 다르게 저가의 생산단가와 더불어 플렉서블한 고분자 기판의 도입이 가능하며 프린터블 공정이 가능하여 태양전지의 적용범위를 다양화 할 수 있는 장점이 있는 관계로 최근에 왕성한 연구가 진행되고 있으나 기초연구 수준의 단계로 상용화 수준의 단계까지 끌어올리기 위해서는 그 효율이나 안정성측면에서 해결해야할 문제들이 산적해 있다. 또 다른 태양전지 유형으로 1991년 스위스

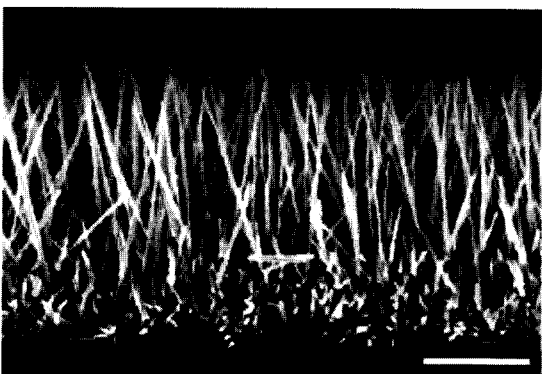
Gratzel 그룹에서 보고한 염료감응형 태양전지의 경우 에너지 변환효율, 제조공정, 제조단가 측면에서 매우 경쟁력이 있는 태양전지 중의 하나로 현재까지 11%의 비교적 높은 에너지변환효율을 기록하고 있으며 이론적으로 33% 정도까지 변환효율을 낼 수 있는 것으로 보고되고 있다. 염료감응형 태양전지는 표면에 염료분자가 흡착된 n-형 산화물 반도체 기반 전극에 태양광이 흡수되면, 염료분자는 전자-정공쌍인 Exciton을 생성하며, 이때 Exciton에서 분리된 전자는 n-형 산화물 반도체 전도대로 주입되게 된다. 이 주입된 전자가 산화물 반도체 및 염료 간 계면을 통해 투명 전도막으로 전달되어 전류를 발생시키게 된다.

염료감응형 태양전지에 도입되는 n-형 산화물 반도체 물질로서 주로 TiO₂ 나노파티클이 사용되고 있다. 아나타제 구조를 갖는 TiO₂ 나노파티클의 경우 주로 수열합성법 (Hydrothermal Method)을 통해 제작되며 수~수십 나노직경의 파티클 형태로 제작함으로써 많은 양의 염료분자가 흡착될 수 있는 비표면적 증가를 도모할 수 있다. 그러나 반대로 사이

즈를 지나치게 감소시키게 되면, 표면적은 증가하나 표면에서의 표면재결합 (Surface Recombination)도 급격하게 증가하여 전자전달 속도에 제한을 주어 광전변환효율의 감소를 초래할 수 있다. 최근 TiO₂와 유사한 전도대 에너지레벨을 갖고 있어 루테늄 (Ru) 계 염료와 잘 작동할 수 있으며, TiO₂에 비해 전자전송이 더욱 용이한 넓은 전도대를 갖는 ZnO 물질에 대한 관심이 점차 증폭되고 있다. 특히 TiO₂에 비해 나노구조 모폴로지 제어가 손쉬운 장점 때문에 ZnO 나노와이어 및 나노로드 등과 같은 1차원 나노구조물을 이용하여 고효율 염료감응형 태양전지 구현을



(a)



(b)

그림 7. ZnO 나노와이어 기반 염료감응 태양전지 모식도 (a). FTO 기판 위에 WCM 방식으로 성장된 ZnO 나노와이어 (b) [16].

위한 연구들이 활발히 진행되고 있다. 특히 TiO₂ 나노파티클의 경우, 파티클간 계면에서의 캐리어 Scattering 효과에 의해 전자수송 특성이 감소되는 반면, ZnO 기반 1차원 나노구조물의 경우 완벽한 단결정의 결정성을 가지게 되므로 전자수송특성의 급격한 향상을 도모할 수 있다. 최근 미국 UC 버클리의 P. Yang 교수 그룹에서 n-형 산화물 반도체 기반 전극물질로서 ZnO 나노와이어를 도입하여 제작한 고효율 염료감응형 태양전지 구현 및 특성평가에 관한 연구결과를 발표하였다 [16]. FTO 기판 위에 개량된 WCM 방식을 통해 최대 20 μm 수준의 ZnO 나노와이어 성장을 구현하였으며 (그림 7), 나노와이어 필름에 대해 상대적으로 매우 적은 양의 염료를 사용했음에도 구현된 태양전지 셀의 외부양자효율이 염료 최대 흡수치의 40 ~ 43 % 수준을 나타내었다. 또한 AM 1.5 표준조건(100 ± 3 mW/cm²)에서 J_{sc} = 5.3 ~ 5.85 mA/cm², V_{oc} = 0.61 ~ 0.71 V, FF (Fill Factor) = 0.36 ~ 0.38 및 1.2 ~ 1.5 %의 광전 변환효율을 보고하였다. 본 연구에서 특히 주목할 내용은 아직 연구 초기 단계임에도 불구하고 n-형 산화물 반도체 기반 애노드 물질로 ZnO 나노와이어를 도입했을 시 기존의 TiO₂ 나노파티클 기반 태양전지 셀의 J_{sc}값과 상응할 만한 결과를 얻을 수 있었다는 점이다 (그림 8).

염료감응형 태양전지의 많은 장점에도 불구하고 고상의 전해질 개발의 어려움 및 급할 가능한 플라

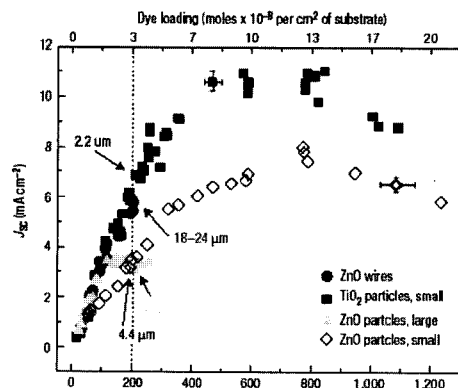


그림 8. ZnO 나노와이어, 나노파티클 및 TiO₂ 나노파티클 기반 염료감응 태양전지 특성 비교 [16].

스틱 기관 도입이 어려운 기술적 한계에 봉착해 있다. 또한 전술한 바와 같이 유기물 태양전지는 유기물의 불안정성 및 낮은 전자이동도에 따른 대안으로 최근 유기 하이브리드 형태의 플렉서블 태양전지가 최근 크게 각광 받고 있다. 이는 기존에 전자역셉터로 사용되는 유기 반도체들이 낮은 전자이동도를 가지고 있어 이를 전자 이동도가 큰 무기 반도체 재료와의 하이브리드 형태의 소자구조를 도입함으로써 높은 광전하 생성율을 가지는 유기 반도체의 특성과 무기 반도체의 높은 전자이동도를 이용하여 기존 유기물 태양전지 구현에 있어 큰 난제 중의 하나인 전자의 수송능력을 향상시킬 수 있는 구조이다. 특히 전 공정의 저온공정이 가능하여 플렉서블 소자의 에너지 공급원으로 사용이 가능하기 때문에 그 중요성이 한층 더해지고 있는 상황이다.

그러나 유기 하이브리드 태양전지의 문제점 중의 하나로 이론값에 비해 매우 낮은 광전변환 효율을 들 수 있으며, 낮은 광전변환 효율을 가지는 이유 중 하나는 무기물 층에서의 나노파티클 도입에 기인한다. 유기 하이브리드 태양전지에서 무기물 층의 물질로 주로 사용되는 TiO_2 나노파티클은 유기물 층의 캐리어 이동도를 증가시키기 위해 사용되나, TiO_2 나노파티클 기반 유기 하이브리드 태양전지의 경우 무기물 기반 태양전지 및 염료감응 태양전지에 비해 광전변환 효율이 1.5% 미만으로 아직 매우 낮은 상황이며, 또한 TiO_2 나노파티클의 응집현상이 발생하여 태양전지의 효율저하를 일으키는 커다란 문제점이 지적되고 있다. 2002년 미국 UC 버클리의 A. P. Alivisatos 교수 그룹은 용액 중에서 합성된 CdSe 양자점 및 나노로드와 P3HT 전도성 폴리머와의 중합을 통해 유기 하이브리드 태양전지 제작 및 특성평가에 관한 연구결과를 보고하였다 [17]. 그림 9에 제시된 구조를 이용하여 1.7%의 광전변환 효율을 갖는 유기 하이브리드 태양전지를 보고하였으나, CdSe 양자점과 나노로드가 용액중의 화학합성을 통해 제작된 나노구조물로서 나노구조물의 일방향 정렬 및 수직배향이 어려운 기술적 한계를 보이고 있으며, 상용화에 이르기에는 매우 낮은 광전변환 효율을 보이고 있다.

이에 기존의 다른 물질군에 비해 제작이 간단한

고 모폴로지 제어가 유용한 ZnO 1차원 나노구조물을 유기 하이브리드 태양전지에 도입하고자 하는 시도가 점차 확대되고 있는 상황으로 최근의 연구에서 ZnO 나노파이버와 P3HT 및 PCBM의 고분자 중합체를 하이브리드 시킨 유기 복합체 기반 태양전지 제작을 통해 AM 1.5 표준조건(100

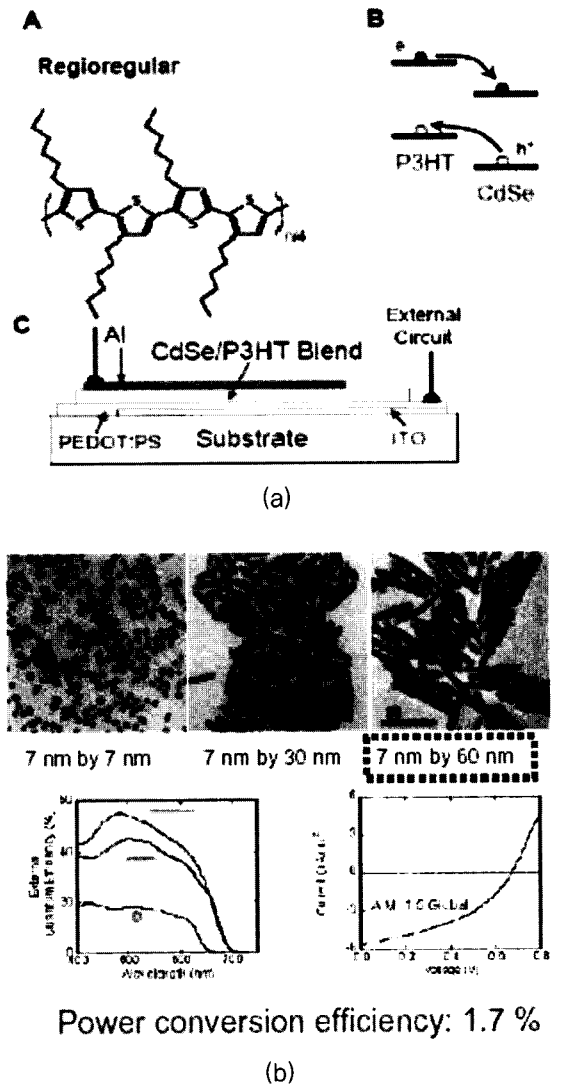
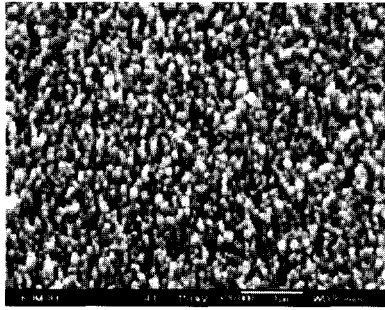
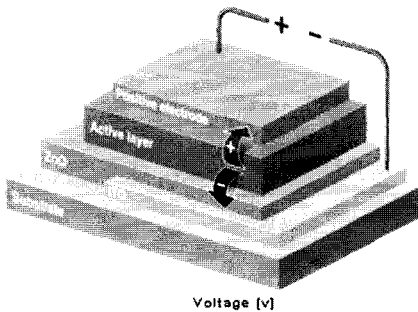


그림 9. CdSe/P3HT 기반 유기 하이브리드 태양전지 [17].

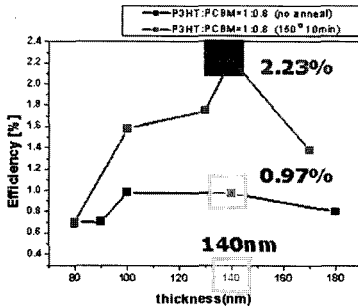


(a)

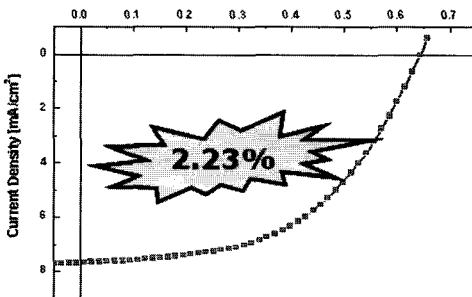


Voltage (v)

(b)



(c)



(d)

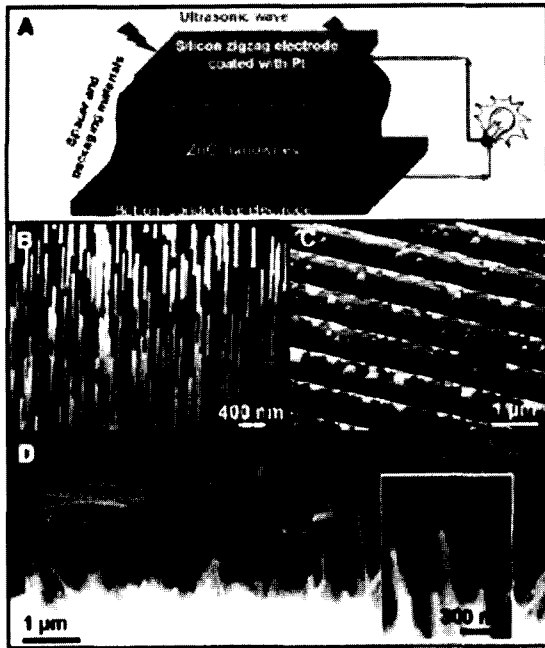
그림 10. ZnO 나노로드/P3HT-PCBM 유무기 복합체 기반 태양전지 모식도 및 특성결과.

mW/cm²)에서 $J_{sc} = 10 \text{ mA/cm}^2$, $V_{oc} = 475 \text{ mV}$, FF (Fill Factor) = 0.43 및 2% 이상의 광전 변환효율을 보고하였다 [18]. 또한 본 저자 연구그룹에서도 한국 전자통신연구원과 공동으로 WCM 성장법 기반으로 Glass 위에 제작된 ZnO 나노로드와 P3HT 및 PCBM의 고분자 중합체를 하이브리드 시킨 유무기 복합체 기반 태양전지 셀 제작을 통해 AM 1.5 표준 조건에서 2% 이상의 광전 변환효율을 보임을 확인할 수 있었다(그림 10).

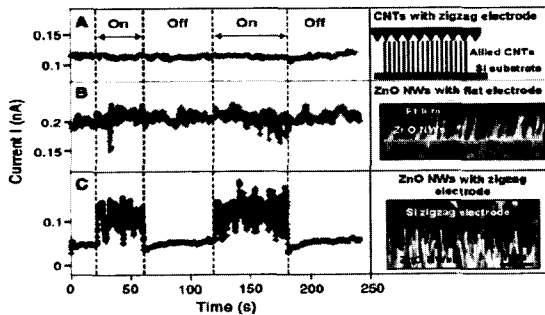
4. ZnO 나노와이어 기반 나노발전기 개발 기술동향

나노기술 (NT)을 바탕으로 정보기술 (IT), 에너지 기술 (ET), 등이 융합되는 유비쿼터스 기술들이 등장하고 있는 지금, 미래 생활 속에 등장하게 될 나노스케일 머신 또는 입는 컴퓨터-디스플레이의 전원 공급에 관련된 이슈가 미래 산업 발전에 있어 중요한 문제로 대두되고 있다. 각각의 나노머신들이 전기선의 연결 없이 자체 발전전원을 가지고 구동해야 하기 때문에 자체적으로 전력을 생산해 낼 수 있는 장치의 개발이 시급한 상황이다. 이에 이러한 문제를 해결하기 위한 방안으로 자체 전력생산이 가능한 압전체 나노구조물을 이용한 나노 발전소자의 제작에 관한 연구가 최근 각광을 받고 있다. 압전체 재료를 이용하여 제작 및 연구 단계에 있는 나노발전소자는 일상생활에서 발생하는 물리·역학적 에너지를 소자에 전달해주는 것만으로도 전력을 생산해 낼 수 있다는 점에서 높은 발전 가능성과 이용 분야를 가지고 있다.

2007년 미국 조지아텍의 Z. L. Wang 교수 그룹은 GaN 기판 위에 성장된 ZnO 나노와이어를 이용하여 초음파 진동을 외부에서 가해 전기를 발생시킬 수 있는 나노발전기 (나노제너레이터) 개발결과를 Science지에 보고한데 이어 [19], 2008년 올해에는 외부에서 초음파 진동과 같은 에너지 공급이 전혀 필요 없는 마이크로 섬유-ZnO 나노와이어 복합구조 나노제너레이터 개발 및 특성평가에 관련한 연구결과를 Nature지에 발표하였다 [20]. 논문에서는 c-



(a)



(b)

그림 11. ZnO 나노와이어 기반 나노제너레이터 모식도 및 소자구조에 따른 전류발생 특성 [19].

TEOS (Two Layers of Tetraethoxysilane)를 주입시킨 섬유에 직경 50 nm급 ZnO 나노와이어를 성장시킨 후 금으로 코팅된 다른 ZnO 나노와이어 섬유를 고정시켜 이 섬유에 다른 섬유를 꼬아 잡아당김으로써 마찰을 일으켜 생산되는 전류 시그널을 측정, 1 m²당 80 mW의 전기를 생산해 낼 수 있다고 발표하였다. 이 섬유로 옷을 해 입으면 소매가 접히거나 옷

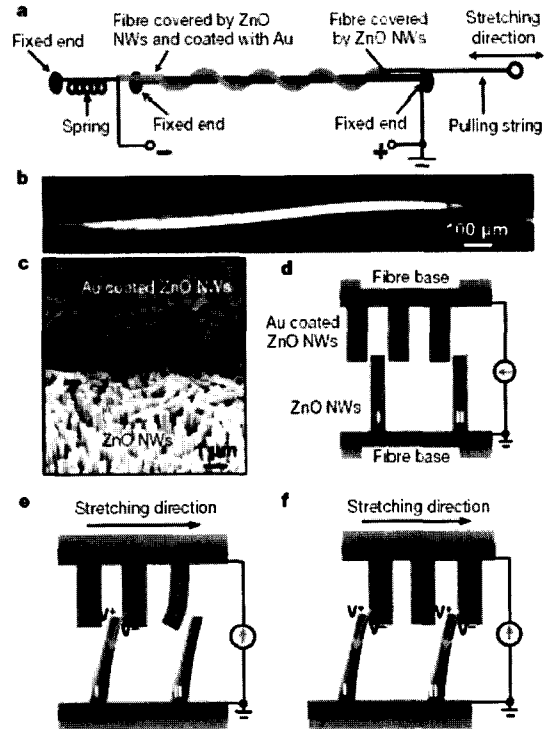


그림 12. ZnO 나노와이어-마이크로파이버 하이브리드 발전섬유 구동 모식도 및 전류발생 메커니즘 [20].

깃이 바람에 날리는 정도의 매우 약한 에너지로도 전기를 발생시킬 수 있으므로, 단지 걷거나, 숨을 쉬거나, 심장의 박동만을 이용해도 차세대 입는 컴퓨터-디스플레이 구동원으로서의 훌륭한 역할을 할 수 있을 것으로 기대되고 있다.

참고 문헌

- [1] U. Ozgur et al., "A compressive review of ZnO materials and devices", J. Appl. Phys., Vol.98, p.041301, 2005.
- [2] J.-H. Lim et al., "UV electroluminescence emission from ZnO light-emitting diodes grown by high-temperature radiofrequency sputtering", Adv. Mater., Vol.18, p.2720, 2006.
- [3] K. Nakahara et al., "Improved external efficiency



InGaN-based light-emitting diodes with transparent conductive Ga-doped ZnO as p-electrodes", *Jpn. J. Appl. Phys., Part 2* Vol.43, p.180, 2004.

[4] K. Nomura et al., "Room temperature fabrication of transparent flexible thin film transistors using amorphous oxide semiconductors", *Nature*, Vol.432, p.488, 2004.

[5] Z. W. Pan et al., "Nanobelts of semiconducting oxides", *Science*, Vol.291, p.1947, 2001.

[6] M. H. Huang et al., "Room-temperature ultraviolet nanowire nanolasers", *Science*, Vol.292, p.1897, 2001.

[7] P. Yang et al., "Controlled growth of ZnO nanowires and their optical properties", *Adv. Funct. Mater.*, Vol.12, p.323, 2002.

[8] C. J. Lee et al., "Field emission from well-aligned zinc oxide nanowires grown at low temperature", *Appl. Phys. Lett.*, Vol.81, p.3648, 2002.

[9] S. J. An et al., "Near ultraviolet light emitting diode composed of n-GaN/ZnO coaxial nanorod heterostructures on a p-GaN layer", *Appl. Phys. Lett.*, Vol.91, p.123109, 2007.

[10] K. Keem et al. "Fabrication and device characterization of omega-shaped-gate ZnO nanowire field-effect transistors", *nano lett.*, Vol.6, p.1454, 2006.

[11] J. B. K. Law et al., "Simple fabrication of a ZnO nanowire photodetector with a fast photoresponse time", *Appl. Phys. Lett.*, Vol.88, p.133114, 2006.

[12] Q. Wan et al., "Fabrication and ethanol sensing characteristics of ZnO nanowire gas sensors", *Appl. Phys. Lett.*, Vol.84, p.3654, 2004.

[13] H.-K. Park et al., "Vertically well-aligned ZnO nanowires on c-Al₂O₃ and GaN substrates by Au catalyst", *ETRI Journal*, Vol.28, p.787, 2006.

[14] L. Vayssieres, "Growth of arrayed nanorods and nanowires of ZnO from aqueous solutions", *Adv. Mater.*, Vol.15, p.464, 2003.

[15] L. Schmidt-Mende et al., "ZnO - nanostructures, defects, and devices", *Mater. Today*, Vol.10, p.40, 2007.

[16] M. Law et al. "Nanowire dye-sensitized solar cells", *Nature Mater.*, Vol.4, p.455, 2005.

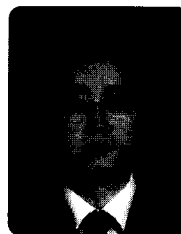
[17] W. U. Huynh et al., "Hybrid nanorod-polymer solar cells", *Science*, Vol.295, p.2425, 2002.

[18] D. C. Olson et al., "Hybrid photovoltaic devices of polymer and ZnO nanofiber composites", *thin solid film*, Vol.496, p.26, 2006.

[19] X. Wang et al., "Direct-current nanogenerator driven by ultrasonic waves", *Science*, Vol.316, p.102, 2007.

[20] Y. Qin et al., "Microfibre-nanowire hybrid structure for energy scavenging", *Nature*, Vol.451, p.809, 2008.

저자|약력



성 명 : 김상우

◆ 학 력

- 1998년 성균관대 금속공학과 공학사
- 2000년 광주과학기술원 신소재공학과 공학 석사
- 2004년 일본 교토대학 전자공학과 공학 박사

◆ 경 력

- 2004년 - 2004년 일본 교토대학 International Innovation Center, 박사 후 연구원
- 2004년 - 2005년 영국 케임브리지대학교 Nanoscience Centre, Research Associate
- 2005년 - 현재 금오공대 신소재시스템공학부 조교수