

Nanopiezotronics 기술

Nanopiezotronics Technology

스마트 & 그린 융합부품소재기술 특집

이수재 (S.J. Lee)	산화물TFT연구팀 책임연구원
유인규 (I.K. You)	유연인터페이스연구팀 책임연구원
추혜용 (H.Y. Chu)	차세대디스플레이연구단 단장

목 차

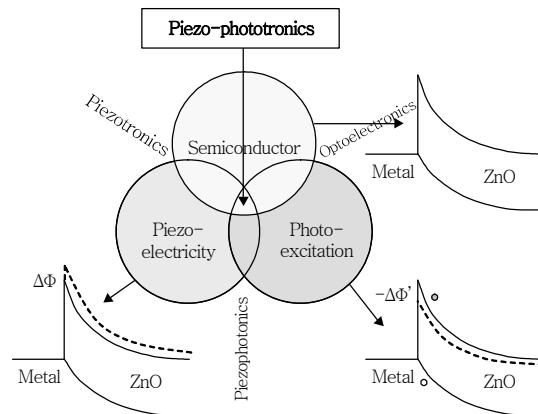
-
- I. 서론
 - II. 압전 나노선 기반의 나노 소자 기술
 - III. 압전 나노섬유 기반의 나노 소자 기술
 - IV. 결론

미래 사회는 나노기술(NT)을 바탕으로 IT-ET-BT 기술이 융합된 유비쿼터스 사회로 진화하고 있으며, 미래 산업 사회로의 전환을 위해서는 성능개선이 아닌 성능한계 돌파의 패러다임 전환이 가능한 임계성능의 나노 소재/신소자의 개발이 절실히 요구되고 있다. 또한 차세대 단말기는 휴대성의 편리함, 융복합화/다기능화, 인간 친화형이 요구되고, flexible/stretchable/bendable한 형태로 발전하고 있는 상황이다. 나노 피에조트로닉스(nanopiezotronics) 기술은 역학적 에너지를 전기적 에너지로 변환하는 나노 발전 소자(nanogenerator)의 원리를 기반으로 하며 나노선, 나노벨트와 같은 1차원적 나노구조 소재의 압전성과 반전도성이 결합된 특성을 이용한 신기능의 미래 IT 융합 나노 전자/에너지 소자를 구현하는 기술로서 미래 유망 기술로 부각되고 있다. 현재 기술 수준은 압전 전계 효과 트랜지스터, 압전-다이오드, 압전 센서, 압전 나노 발전 소자 등과 같은 prototype 소자를 제작하는 수준에 머무르고 있으나 향후 초고감도 압전 센서, 자가발전 MEMS/NEMS 및 나노 시스템, 스마트 웨어러블 시스템, 건강 모니터링 시스템, 인체 삽입형 소자, portable 및 투명 유연 전자소자 등의 다양한 미래 융합 나노 소자 및 시스템에 광범위한 활용이 가능하며, 향후 신기능의 소자/부품/시스템 창출을 위한 기술로 자리매김할 것으로 전망된다. 본고에서는 압전 나노선, 나노튜브, 나노섬유 등의 1차원적 나노구조체 기반의 nanopiezotronics 기술과 최근의 연구결과들을 소개한다.

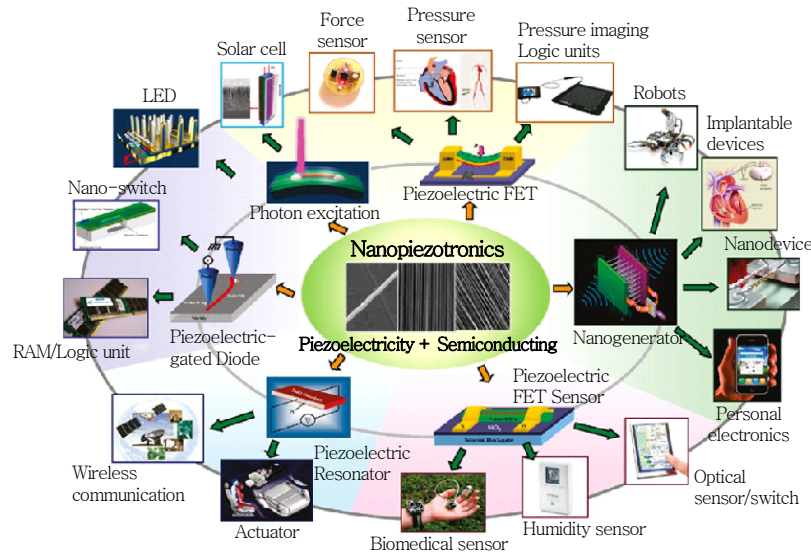
1. 서론

미래 사회는 나노기술(NT)을 바탕으로 IT-ET-BT 기술이 융합된 유비쿼터스 사회로 진화하고 있으며, 미래 산업 사회로의 전환을 위해서는 성능개선이 아닌 성능한계 돌파의 패러다임 전환이 가능한 임계 성능의 나노 소재/신소자의 개발이 절실히 요구되고 있다. 또한 차세대 단말기는 휴대성의 편리함, 용복합화/다기능화, 인간 친화형이 요구되고, flexible/stretchable/bendable한 형태로 발전하고 있는 상황이다. 이러한 차세대 단말기를 구성하기 위한 유연 소재 및 부품 기술과 더불어 유연 독립 전원 기술이 절실히 요구되고 있다. 1차원적 나노구조체(양자선, 나노선, 나노섬유, 나노막대, 나노튜브 등) 또는 2차원적 나노구조체(나노시트, 나노플레이트, 나노박막 등) 기반의 나노 일렉트로닉스(nanoelectronics)는 반도체 나노소재 내의 전하 캐리어의 축적(accumulate)과 운동을 제어함으로써 트랜지스터와 다이오드와 같은 신기능의 IT 나노 소자를 구현하는 기술로 발전되어 오고 있다. 또한 spintronics는 전자 스핀의 검출과 조작을 통하여 센서, 메모리와 같은 전자소자를 구현하는 이머징 기술이며, molecular electronics(moltronics)는 분자 제어를 통하여 전자소자를 구현하는 기술로 발전되어 오고 있다. 최근 nanopiezotronics 기술이 출현하여 새로운 전자 소자 구현을 위한 많은 연구가 진행되고 있다. Nanopiezotronics는 1차원적 압전 나노 재료의 기본적인 성질을 이용하여 구부리거나 압력을 가하여 전하 캐리어의 축적과 운동을 제어함으로써 압전 전자소자, 센서 또는 전압/전류를 발생시키는 나노 발전 소자 등과 같은 새로운 소자를 구현하는 기술이다. 즉, nanopiezotronics 기술은 역학적 에너지를 전기적 에너지로 변환하는 나노 발전 소자(nanogenerator)의 원리를

기반으로 하며 나노선/나노벨트와 같은 1차원적 압전 소재의 압전성과 반전도성의 성질이 결합된 특성을 이용한 신기능의 미래 융합 나노 전자/에너지 소자를 구현하는 기술로 정의된다. Nanopiezotronics 기술은 2001년 미국의 조지아 공대 Z. L. Wang 교수 그룹에서 1차원 ZnO 나노벨트에 대한 논문이 발표되면서 태동하였다고 볼 수 있다. 산화아연(ZnO)의 반전도성과 압전성의 특성이 결합된 새로운 전자 소자를 제작함으로써 다양한 분야에 적용이 가능할 것으로 여겼고, “Nanopiezotronics”라고 명명하였다[1]. (그림 1)은 압전성과 반전도성의 coupling에 의한 piezotronics, 압전성과 포톤 여기의 coupling에 의한 piezo-photonics, optoelectronics, 그리고 압전성-반전도성-포톤 여기의 coupling에 의한 piezophototronics의 개념도를 나타낸 것이다. 이들 coupling의 정도는 압전 효과에 의해 발생된 압전 전위(piezopotential)에 의존하며, 압전성과 반전도성 특성을 갖는 산화아연은 nanopiezotronic 소자 응용을 위한 대표적인 소재이다. 현재까지 ZnO, CdS, GaN, BaTiO₃, PZT 등의 1차원적 나노구조체를 이용한 압전 전계 효과 트랜지스터(FET), 압전-다이오드, 압전 나노 발전 소자, 센서 개발에 대한 많은 연구 결과



(그림 1) 압전성과 반전도성의 coupling에 의한 nanopiezotronics의 개념도



(그림 2) Nanopiezotronics 소자의 응용 분야[2]

가 발표되고 있다.

차세대 유비쿼터스 기술들이 급격히 발달하고 있는 상황에서 나노스케일 머신, 웨어러블 컴퓨터, 디스플레이의 전원 공급에 관련된 이슈는 미래 유비쿼터스 산업 발전에 있어 가장 중요한 문제들 중의 하나이다. 1차원적 나노구조체 기반의 나노 발전 소자는 자체 발전 전원을 가지고 지속적으로 구동할 수 있는 나노 소자/시스템의 기술적 한계를 극복시켜줄 획기적인 기술로 부각되고 있으며, 차세대 그린 에너지원으로서 새롭게 주목 받는 분야라 할 수 있다. 압전 나노 발전 소자는 자연에 존재하는 바람, 조류, 소음, 진동, 인체 움직임으로부터 발생된 소모성의 기계적 에너지를 전기에너지로 무한히 추출할 수 있는 새로운 개념의 친환경 에너지 수확 소자로서 기존의 벌크 및 박막형 압전 소재보다 에너지 변환 효율이 수십~수백 배 이상 크고, 저주파수의 아주 작은 힘에도 구동이 가능하며, 소형/경량/유연한 소자의 제작이 가능하다는 장점을 가진다. 이들 nanopiezotronics 소자는 초고감도 압전 센서, 자가발전 MEMS/NEMS 및 나노 소자, 압전 섬유로 textile을 만든 스마트 웨어

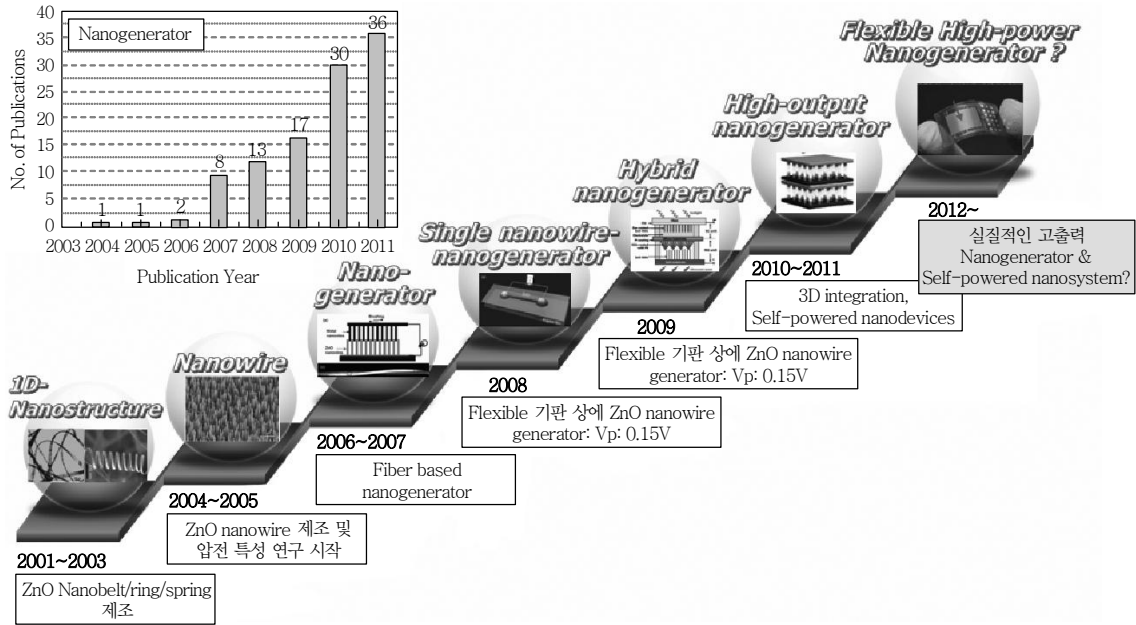
러블 시스템, 건강 모니터링 시스템, 전력을 발생하는 인공피부, 투명 유연 소자, 자가발전 촉각 센서, 에너지 발생 터치 스크린 소자, 인체 삽입형 소자, portable 전자소자 등의 다양한 미래 융합 소자 및 시스템에 광범위하게 활용될 것으로 전망된다(그림 2) 참조).

본고에서는 유·무기 압전 나노선, 나노튜브, 나노섬유 등의 1차원적 나노구조체 기반의 nanopiezotronics 소자 기술과 최근의 연구 결과들을 소개한다.

II. 압전 나노선 기반의 나노 소자 기술

1. 개요

최근 나노기술(NT)을 바탕으로 IT-ET-BT 기술이 융합되는 유비쿼터스 기술들이 등장하고 있으며, 유비쿼터스 세상이 실현되려면 우선 사용되는 전원 공급 문제가 해결되어야 한다. 자연에 존재하는 진동, 열, 빛 등의 에너지를 변환 소재를 통하여 전기에너지



(그림 3) 나노 발전 소자 기술의 발전 추세 및 연도별 발표 논문

로 변환하는 기술은 전 세계적으로 많은 연구가 진행되고 있다. 빛 에너지를 이용하는 기술은 상당한 연구가 진행되어 상용화에 이르렀으며, 열에너지를 이용한 기술은 에너지 변환 효율이 너무 낮아 실용성에 문제점이 제기되고 있다. 반면에 진동을 이용하는 기술은 에너지 변환 효율도 높고, 초소형화가 가능한 매우 유망한 기술로서 고효율 압전 발전 소자 개발을 위한 많은 연구가 진행되고 있다. 산화물 반도체인 산화아연은 압전성과 반전도성 특성을 동시에 갖는 다기능성 소재로서 나노선과 나노벨트와 같은 1차원 나노 구조의 성장제어가 비교적 쉽기 때문에 압전 나노 소자 개발에 대한 많은 연구가 진행되고 있다. (그림 3)은 현재까지의 나노선 기반의 나노 발전 소자 기술의 발전 추세와 연도별 발표 논문 수를 도식화하여 나타낸 것이다. 압전 나노구조체 기반의 나노 발전 소자에 대한 연구 논문은 2011년까지 108건이 발표되었으며, 나노구조체 제조 기술이 발전함에 따라 2006년 이후 매년 크게 증가하였으며, 전 세계적으로 많은

연구가 진행되고 있음을 알 수 있다. 나노압전 소자에 대한 연구는 2001년 미국의 조지아 공대 Z. L. Wang 교수 그룹에서 1차원 ZnO 나노벨트에 대한 논문이 발표되면서 시작되었다고 볼 수 있다. 현재까지 나노 발전 소자 개발과 관련하여 Z. L. Wang 교수 그룹이 선도적인 연구 결과들을 발표하고 있으며, 지난 2005년 세계 최초로 나노 발전 소자에 대한 개념이 제시된 이래 많은 대학과 연구소에서 연구가 이루어졌으며, 괄목할 만한 연구 결과들이 보고되고 있다. 2006년에는 산화아연 나노선(zinc-oxide nanowires)을 이용하여 진동을 전기로 전환시키는 나노 발전 소자를 최초로 개발하고[3], 2007년에는 초음파 진동(ultrasonic vibrations)으로 직접 전기를 생산하는 산화아연 나노선 어레이까지 개발하였으며, nanopiezotronics 개념이 출현하게 되었다[4]. 이후 2008년에는 좀 더 실용적인 입는 컴퓨터에 적용하여, 옷에 공급하는 에너지의 순화/배기를 위한 마이크로섬유-나노선의 복합구조를 개발해 나노선 기반

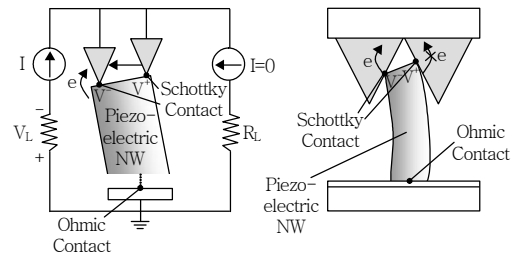
의 마이크로 전기 섬유를 보고하였다[5]. 현재에는 실질적인 고출력 나노 발전 소자 개발에 대한 연구가 진행되고 있으며, 가장 최근에는 나노선 어레이의 집적화 기술의 향상으로 높은 전력 출력 특성을 갖는 나노 발전 소자 개발에 대한 연구 결과가 보고되고 있다. Z. L. Wang 교수 그룹은 나노선 센서(nanowire sensor)를 나노선 어레이가 집적된 고출력 나노 발전 소자와 결합하여 동력을 공급하는 최초의 자가 발전 pH 센서와 UV 센서[6], Hg^{2+} 이온 센서[7] 및 자가발전 무선 데이터 전송 시스템[8] 등의 나노 소자가 작동되는 것을 보였다. 현재까지 나노 발전 소자를 제작해 실제로 측정된 출력 전류 값은 수 $\mu A/cm^2$ 에 불과하여 대면적 고효율 소자 구현을 위해서는 더 높고 안정적인 전력 생산이 반드시 필요한 상황이다. 나노선 기반의 나노 발전 소자의 본격적인 상용화를 위해서는 아직 극복해야 할 기술적 장애물들이 산적해 있는 상황이며, 구체적으로는 고효율의 압전 나노 소재 및 대면적 정렬기술 개발에서부터 각각의 소자의 명확한 구동 메커니즘, 출력의 안정성 확보, 반영구성을 보장할 수 있는 신뢰성 확보 등이 해결되어야 한다. 향후 압전 나노 발전 소자 연구는 개별 나노 소자의 집적화가 가장 큰 이슈로 발전할 것이며, 압전 성질을 요구하는 나노-피에조트로닉 소자는 다양한 집적 회로에 응용이 될 것으로 전망된다.

본 장에서는 압전 나노선 기반의 nanopiezotronics 기술에 대한 최근의 연구 결과만을 간략히 소개한다.

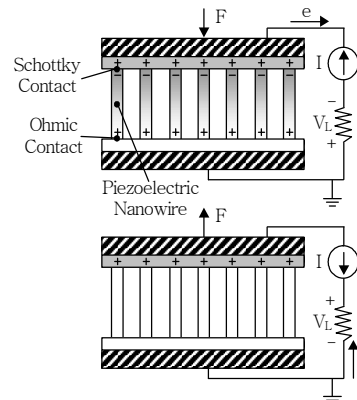
2. ZnO 나노선 기반의 나노 발전 소자 기술

Nanopiezotronics 소자의 기본 원리는 압전 재료로부터 만든 나노선과 나노벨트의 기본적인 성질을 이용하여 구부리거나 압력을 가하여 전하를 분리시

켜서 한쪽은 양의 전하를 가지고 다른 쪽은 음의 전하를 가지게 만든 것이다. 또한 구부린 부분과 전하가 발생하는 연결 부위에서는 나노 발전기가 되어서 측정 가능한 전류를 만들 수도 있게 된다. 일반적으로 나노선은 기판 면에 수직인 방향으로 성장되어지며, 이를 이용한 발전 소자의 작동은 나노선의 성장 방향에 대해 수직하게 또는 평행하게 힘이 가해져서 전압이 발생하는 두 경우로 설명할 수 있다. (그림 4)는 나노선의 성장 방향에 수직하게 그리고 평행하게 힘을 가했을 때의 나노 발전 소자의 작동원리를 나타낸 것이다. 기판 상에 수직하게 성장된 나노선에 AFM 팁을 사용하여 나노선의 성장 방향과 수직하게 외부 힘이 가해지는 경우 나노선이 변형되고, 나노선 내에서 양이온과 음이온의 상대적 변위에 의한 전기장(또는 압전 전위)이 생성되어 전압이 발생하게 된다. 나노선



(a) 나노선의 성장 방향에 수직하게 힘을 받을 때의 나노 발전 소자의 작동 원리



(b) 나노선의 성장 방향과 평행하게 힘을 받을 때의 나노 발전 소자의 작동 원리

(그림 4) 나노 발전 소자의 작동 원리

내에 발생된 최대 전압은 다음과 같이 계산된다[9].

$$V_{\max} = \pm \frac{3}{4(\kappa_0 + \kappa)} [e_{33} - 2(1 + \nu)e_{15} - 2\nu e_{31}] \frac{a^3}{l^3} v_{\max}$$

여기서 κ_0 는 진공 중의 permittivity, κ 는 유전상수, e_{33} 와 e_{31} 은 나노선의 압전계수, ν 는 Poisson's ratio, a 는 나노선의 반경, l 은 나노선의 길이, v_{\max} 는 나노선의 최대 편향도(deflection)이다. 또한 (그림 4b)와 같이 나노선의 성장방향과 평행하게 힘이 가해지는 경우, 즉, 나노선에 단축으로 압축력이 가해짐으로써, 압전효과에 의해 나노선의 양 끝(tip)에는 압전 전위가 형성되며, 전압이 발생하게 된다. 힘이 가해지지 않은 경우 압전효과는 사라지게 된다. 이 경우는 교류 전류 출력 신호가 발생된다.

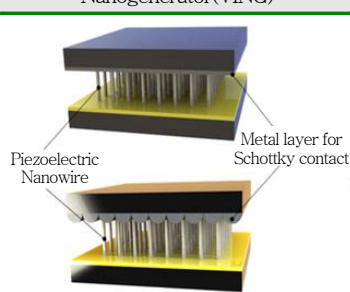
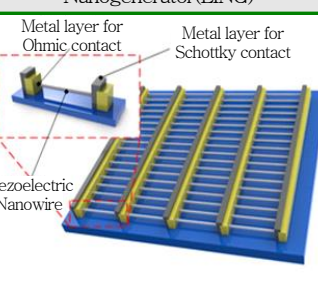
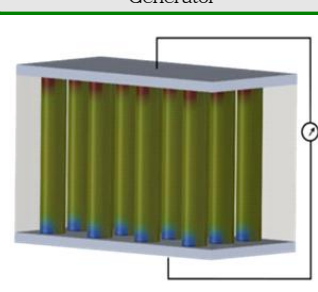
나노 발전 소자는 나노선의 배열 방법에 따라 일반적으로 VING, LING, NEG의 세 가지 구조로 분류할 수 있으며, <표 1>은 ZnO 나노선 기반의 나노 발전 소자의 구조와 특징을 요약 정리한 것이다.

① VING: VING는 일반적으로 기저전극, 기판에 수직하게 성장된 나노선, 상부전극(counter elec-

trode)의 3층으로 구성된 3차원 배열 구조이다. 나노선은 CVD, PVD, wet-chemical법 등의 여러 가지 제조 기술을 사용하여 기저전극 상에 성장할 수 있다. 조시아 공대 Z. L. Wang 교수팀이 수직 성장된 단일 ZnO 나노선의 변형을 일으키기 위해 AFM 팁을 사용하여 VING의 기본 개념을 도입한 이후 2007년에 처음으로 VING가 발표되었다[4]. 최근 국내에서도 삼성종합기술원과 성균관대학교의 공동 그룹은 습식 화학 합성법으로 저온(90°C)에서 플렉시블 기판(PES) 상에 수직으로 잘 정렬된 ZnO 나노로드를 직접 성장하여, 대면적 투명 플렉시블 나노 발전 소자를 구현하는데 성공하였다[10].

② LING: LING는 하부전극, laterally 배열된 압전 나노선, schottky 접촉을 위한 금속 전극(또는 counter 전극)으로 구성된 2차원 배열 구조이다. 이 경우 나노선은 플렉시블 기판 상에 형성되며, 나노선은 tensile strain을 받게 된다. LING는 나노선과 counter 전극이 완전한 접촉을 하고 있기 때문에 AC 전기 신호가 발생된다. 또한 단위 LING를 직렬로 배

<표 1> 나노선 기반의 나노 발전 소자 구조와 특징

분류	Vertical nanowire Integrated Nanogenerator(VING)	Lateral nanowire Integrated Nanogenerator(LING)	Nanocomposite Electrical Generator
나노 발전 소자의 구조			
특징	<ul style="list-style-type: none"> - 3D 배열 구조 - 낮은 출력 파워(pW급) - 유연 기판 상에 부적합 - 나노선이 부서지기 쉬움 - 장기 안정성이 문제 - 균일한 나노선의 성장이 필요 	<ul style="list-style-type: none"> - 2D 배열 구조 - VING에 비해 고출력 전압 - 공정 복잡: 나노선의 균일한 배열 공정 필요 - 큰 규모의 파워 활용에 적합 - 유연기판 상에 적합 - 나노선이 부서지기 쉬움 - 장기 안정성이 문제 	<ul style="list-style-type: none"> - ZnO 나노선 사이에 폴리머가 채워진 3D 배열 구조 - 낮은 출력 파워(pW급) - 유연기판 상에 부적합 - 장기 안정성이 문제

열함으로서 출력 전압을 증폭시킬 수 있고, 바람, 파도와 같은 큰 에너지를 활용한 실제적인 응용이 가능하다.

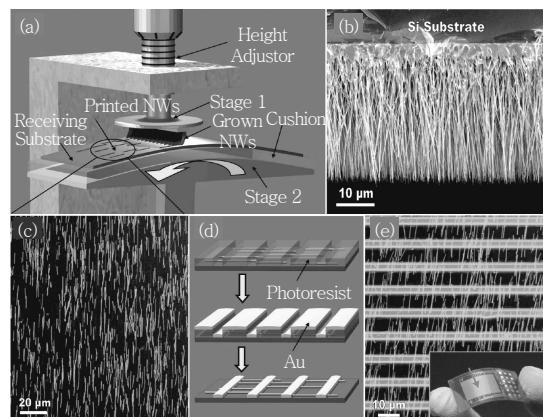
③ NEG: NEG는 금속판 전극, 수직으로 성장된 나노선, 나노선 사이에 채워진 폴리머 matrix, 상부 전극으로 구성된 3차원 배열 구조이다. NEG는 Momeni 등에 의해 처음 도입되었으며, ZnO 나노선의 bending에 의한 나노 발전 소자에 비해 보다 효율적이고, 보다 안정적인 에너지원으로 활용될 수 있다[11].

상기 VING, LING, NEG 이외에도 더 실용적인 입는 컴퓨터에 적용하기 위하여, 옷에 공급하는 에너지의 순화/배기를 위한 마이크로 섬유-나노선의 복합구조를 개발해 나노선 베이스의 마이크로 전기 섬유 개발에 대한 연구 결과도 보고되고 있다[5]. 현재까지 압전체 물질 중에 ZnO, CdS[12], GaN[13]과 같은 wurtzite 구조의 나노선은 hydrothermal synthesis법으로 100°C 이하의 낮은 온도에서 쉽게 성장할 수 있기 때문에 많은 연구가 진행되어 오고 있으나, 반도체 산화물인 ZnO(압전계수(d)≈약 12pC/N) 나노선은 압전 특성이 매우 낮아서 발전 출력(약 pW 급)이 낮고, 주전원으로 사용하기 어려운 한계를 가지고 있다. ZnO 나노선 기반의 나노 발전 소자의 본격적인 상용화를 위해서는 고효율의 압전 나노소재 및 대면적 정렬 기술 개발에서부터 각각의 소자의 명확한 구동 메커니즘, 출력의 안정성 확보, 반영구성을 보장할 수 있는 신뢰성 확보, 집적화 등의 기술적 문제가 해결되어야 한다.

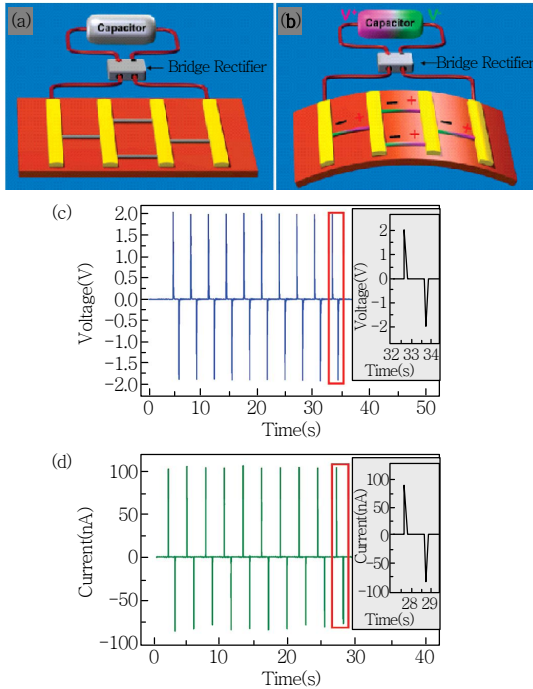
가장 최근에는 실제적인 소자의 전력원으로 사용할 수 있는 고효율 유연 나노 발전 소자 및 나노 시스템 활용에 대한 새로운 연구 결과들이 발표되고 있으며, 그 결과를 간략히 소개하고자 한다. (그림 5)는 고효율 유연 나노 발전 소자의 제작 공정과 구조를 나타낸 것이다[14]. PVD법으로 길이가 50μm, 직경이

약 200nm인 ZnO 나노선을 Si 기판 상에 수직인 방향으로 성장시킨 후, 기판으로부터 ZnO 나노선을 떼어 낸 후 scalable sweeping-printing법으로 유연 기판 상에 한 방향으로 배열하고, 배열된 나노선 위에 전극을 형성함으로써 제작하였다. 제작된 나노 발전 소자는 단일 LING가 직렬로 연결된 구조로서 고효율 파워를 얻을 수 있다. 출력전압 2.03V, 피크 출력 전력 밀도는 약 11mW/cm²를 보였다(그림 6) 참조. 발생된 전기 에너지는 축전기를 사용하여 저장되고, 저장된 에너지를 사용하여 LED의 작동시키는 데 성공하였으며, 이것은 자가발전 나노 시스템에 활용할 수 있는 나노 발전 소자의 실제적인 활용 가능성을 보인 것이다.

또한 최근 VING 구조의 고효율 유연 발전 소자 개발과 이를 이용한 자가발전 무선 데이터 전송 시스템에 대한 연구 결과도 발표되고 있다[8]. 나노 발전 소자는 유연 기판 상에 수직 성장된 ZnO 나노선을 사용한 단층 VING 구조가 5층이 적층된 즉, VING 구조가 직렬로 연결된 구조로서 고효율을 얻을 수 있음을 보였다(그림 7) 참조. ZnO 나노선은 직경 150nm, 길이 2μm였고, 유연 polyester(PS) 기판(1cm×1cm) 상에 치밀하게 수직 성장되었다. 0.12%의 strain하



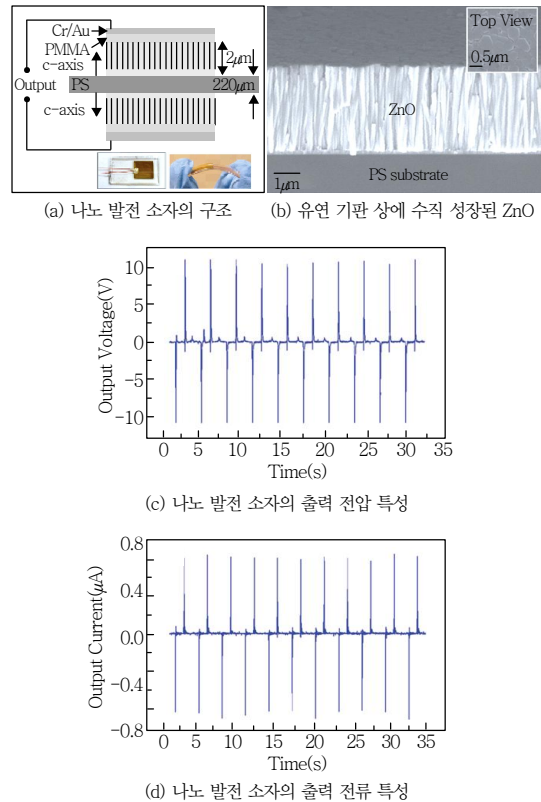
(그림 5) ZnO 나노선 기반의 고효율 유연 나노 발전 소자의 제작 공정과 구조



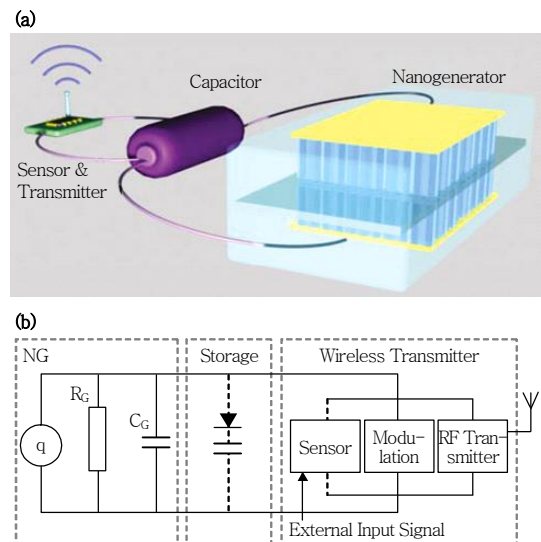
(그림 6) 고효율 유연 나노 발전 소자의 동작 원리와 출력 전압/전류 특성

에서 측정된 출력전압은 10V, 출력전류는 $0.6\mu\text{A}$ 였으며, 파워밀도는 $10\text{mW}/\text{cm}^3$ 였다. 고효율 나노 발전 소자에 의해 수확된 전력을 사용하여 자가발전 무선 데이터 전송 시스템을 작동시키는 데 성공하였다. 이 시스템은 나노 발전 소자, 저손실 전파(full-wave) 정류기, 에너지 저장을 위한 축전기, IR 광검출기, 무선 데이터 송신기로 구성된다(그림 8) 참조). 자가 발전 시스템에서 보내진 무선 신호는 5~10m에서 검출하였으며, 장거리 데이터 전송을 할 수 있는 가능성을 보였으며, 무선 바이오 센싱, 환경 모니터링, 무선 센서 네트워크, 퍼스널 일렉트로닉스 등에 잠재적 응용성을 보여준 결과라 할 수 있다.

또한 PZT, BaTiO₃와 같은 perovskite 구조의 압전 물질은 wurtzite 구조의 물질에 비해 우수한 압전 특성을 가지며, 최근 이들 물질의 나노선, 나노리본, 나노튜브 등과 같은 나노구조를 이용한 나노 발전 소



(그림 7) VING 구조가 적용된 고효율 유연 나노 발전 소자의 구조와 출력 특성



(그림 8) ZnO 나노선 나노 발전 소자를 사용한 자가 발전 무선 데이터 전송 시스템과 회로의 개략도

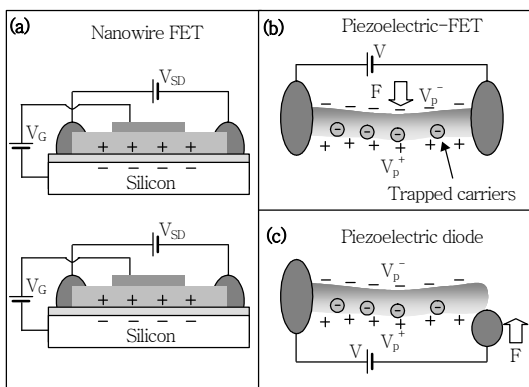
자에 대한 연구 결과들도 보고되고 있으며, 실제 ZnO 나노선 기반의 나노 발전 소자에 비해 16배 이상의 출력전압을 얻은 새로운 연구가 발표되고 있다[15],[16].

3. 압전 나노선 FET와 Diode 소자 기술

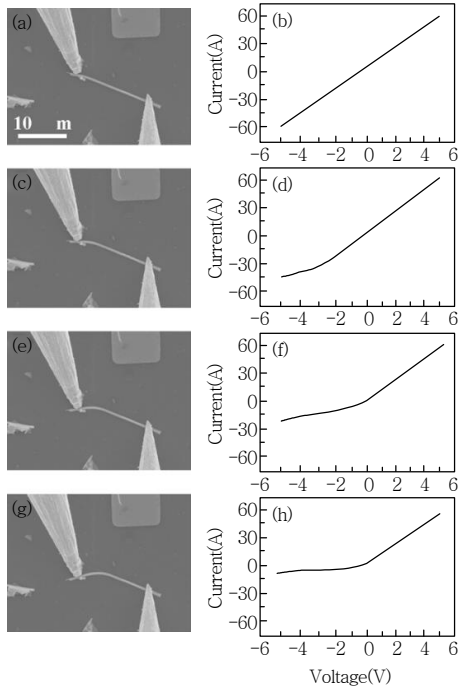
Nanopiezotronics 기술은 1차원적인 압전 나노 구조 소재를 구부리거나 압력을 가하여 나노구조 내의 전하의 분포를 변형시켜 전류의 흐름을 제어함으로써 압전 전자소자(FET) 및 센서, 다이오드 등과 같은 새로운 전자소자를 구현할 수 있는 기술이다 [1]. 나노선 또는 나노튜브를 이용한 FET는 일반적으로 가장 많은 연구가 되고 있는 나노 소자로서 반도체성 나노선, 소스와 드레인 전극, 게이트 유전체, 게이트 전극으로 구성된다. 나노선의 소스-드레인 출력 전류는 게이트 전압으로 제어된다(그림 9a) 참조). 만약 두 전극 사이에 놓인 압전 나노선에 압력을 가하여 구부리게 될 경우 압전효과에 의해 발생한 전기장은 나노선을 통하여 흐르는 전류를 제어할 수 있는 gate로서 작용한다. 외부 힘(F)에 의해 변형될 때, 휘어진 나노선 내에 압전 전위(piezoelectric potential)가 형성되어 전하가 이동하게 되고, 축적(accumulation)과 고갈(depletion)층이 형성된다. 즉 전자

는 양(positive) 전위 면에 trap되고, 음(negative) 전위 면에서는 음전위에 의해 반발하게 되어 압축된 면의 표면에 전하 고갈층을 형성하게 된다. 나노선의 bending이 증가함에 따라 압전 나노선 내의 전도 채널의 폭은 점점 더 좁아지게 되고, 고갈층은 더 커지게 된다. 나노선에 가해진 압력에 의해 형성된 압전 전위는 일반적인 나노선 FET의 경우와 같이 gate 전압에 의해 형성된 전기장의 경우와 유사하다(그림 9b) 참조). 즉 압전-FET는 압전 나노선 또는 나노벨트에 기계적 힘/압력을 가함으로써 전류의 흐름을 “on” 또는 “off” 시킬 수 있는 스위칭 소자이다. 또한 나노피에조트로닉 센서는 나노 뉴톤에서 피코 뉴톤 수준의 작은 압력까지 측정할 수 있으며, 최근 압전 FET의 원리를 기반으로 한 zero-powered 센서와 피에조트로닉 로직 나노 소자의 구현이 가능함을 보였다[17],[18].

압전 FET와 압전 다이오드와의 차이는 나노선의 한쪽 끝이 금속 전극으로 고정되어 있고, 다른 끝은 금속 tip으로 인장력(tensile)을 가하여 나노선을 구부린다(그림 9c) 참조). Probe로 나노선의 한쪽 끝에 압력을 가할 경우 나노선이 구부러지고, 압전효과에 의해 양 전위가 나노선의 늘어진 면에 생성된다. 그 결과 압전 장벽(V_p^+)이 팁과 나노선 사이의 표면에 생성되며, 일반적인 p-n 접합 barrier와 같이 작용하여, 전류의 흐름을 한쪽으로만 보내는 정류 특성을 보이게 된다. 압전 장벽의 크기는 나노선의 bending의 정도가 증가함에 따라 증가한다. 최근 압전-게이트 다이오드는 2-probe 기술을 사용하여 측정하였으며, (그림 10)은 압전 diode의 전류-전압(I-V) 특성을 보인 것으로 나노선의 bending 정도가 증가함에 따라 선형 특성에서 정류 특성 거동으로 변화됨을 보였다[19]. 압전-FET와 압전-diode는 대표적인 nanopiezotronics 소자로서 향후 초고감도 센서,



(그림 9) 나노선/나노벨트를 사용한 일반적인 FET(a), 압전-FET(b), 압전-diode(c) 구조의 개략도



(그림 10) ZnO 나노선 기반의 압전 diode의 I-V 특성

액추에이터, triggers, 스위치, MEMS/NEMS 시스템과 같은 다양한 분야에 응용될 것으로 전망된다.

III. 압전 나노섬유 기반의 나노 소자 기술

1. 개요

차세대 단말기는 휴대성의 편리함, 융복합화/다기능화, 인간 친화형이 요구되고, flexible/stretchable/bendable한 형태로 발전하고 있는 상황이다. 따라서 이러한 차세대 단말기를 구성하기 위한 유연 소재 및 부품 기술이 절실히 요구되고 있다. 최근 나노기술의 발전에 힘입어 나노크기의 직경을 갖는 유·무기 나노섬유 기술이 개발되기 시작하였는데 아직 응용분야가 제한적이지만 미래의 전기, 전자, 자동차, 에너지 및 환경 기술을 뒷받침할 중요한 유연 소재로 활용될 것으로 기대되고 있다. 나노섬유 기술은 원자 및

나노 단위에서 물질의 구조와 조성을 제어할 경우 새로운 기계적, 물리적 특성의 발현이 가능한 기술로서 미래 유연 일렉트로닉스 소자의 구현에 적합한 탄성 및 유연성을 갖는 새로운 전도체/반도체/압전체/ferroic 소재 및 신소자 개발을 기대할 수 있다. 유·무기 나노섬유는 전기방사법에 의해 제조할 수 있다. 전기방사(electrospinning)법에 의한 나노섬유(nanofibers) 연구 분야는 1990년 중반 나노기술이 발전함에 따라 2000년 초반부터 많은 연구가 시작되었으며, 전기방사 기술의 연구영역이 고분자 나노섬유에서 최근 무기 나노섬유로 확장됨에 따라 전기방사에 의한 나노섬유 기술은 고분자, 세라믹, 금속을 포함하여 전 소재 분야에 급속히 확장되고 있는 추세이다. 전기방사 기술은 저가로 쉽고 간단하게 나노 크기의 직경을 갖는 연속적인 긴 파이버, 나노선, 나노튜브 등과 같은 1차원적 나노구조체를 제조할 수 있는 매우 실용적인 기술로서, 폴리머, 산화물, CNT, 금속 등의 연속적인 1차원 나노소재를 제조하기 위한 빠르고 효율적인 방법으로 개발되어 오고 있다. 나노섬유 소재는 나노사이즈 크기, 초고비표면적, 초분자배열 효과와 같은 유일한 특성을 갖기 때문에 차세대 전자부품/소자 응용을 위해서 전 세계적으로 관심이 증대되고 있으며, 이제 막 연구가 시작된 영역이라 할 수 있다.

특히 압전 나노섬유에 대한 연구는 최근 시작되어 나노섬유의 특성상 휘거나 구부렸을 때 박막에 비해 구조적 손상이 훨씬 덜 하므로, 쉽게 foldable 전자소자의 구현이 가능하다. 또한 나노섬유의 특성상 휘어진 형태로 전극에 놓이기 때문에, 나노섬유를 연신 가능한 천에 받아서 소자를 만들 경우 stretchable 전자소자의 제작까지 가능할 수 있다. 그리고 최근에는 근접장 전기방사법이 개발되고 있어 전기방사된 나노섬유를 원하는 위치와 형태로 기판 위에 쓸 수가 있어 나노섬유 기반의 전자소자 개발을 위한 새로운

가능성을 제시하고 있다. 현재 기술 수준이 일부 소자를 제작하는 수준에 머무르고 있으나 나노섬유 소재 기술이 개발됨에 따라 향후 다양한 분야에 적용될 것으로 예상되며, 궁극적으로 신기능의 소재/소자 창출을 위한 기술로 자리매김 할 것으로 예상된다.

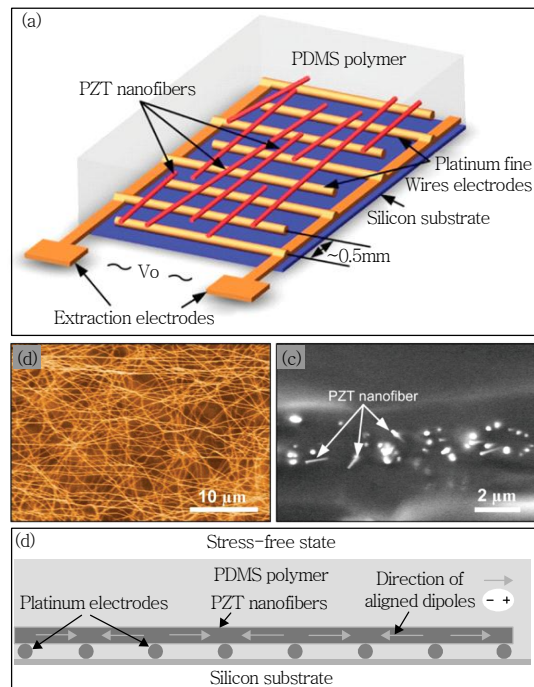
본 장에서는 압전 유·무기 나노섬유 기반의 nanopiezotronics 기술에 대한 최근의 연구 결과만을 간략히 소개한다.

2. 산화물 압전 나노섬유 기반의 나노 소자 기술

압전 재료는 무기 압전 소재(PZT, BaTiO₃, Pb-TiO₃, ZnO, AlN 등)와 유기 압전 소재(PVDF 등)로 분류된다. 그 중 PZT는 고유전성, 강유전성, 압전성, 초전성, 전기광학효과와 같은 다양한 특성을 가지며, 특히 기계적 에너지를 전기 에너지로 변환시키는 이상적인 압전 물질로서 광범위하게 사용되어 오고 있다. 현재까지 ZnO, CdS, GaN과 같은 1차원적인 나노선 기반의 나노 발전 소자는 저주파수 진동과 생체 역학 에너지를 전기적 에너지로 변환하는 데 있어 잠재적 응용 가능성을 보였다. 그러나 압전 나노 물질의 압전 전압 상수와 나노 발전 소자의 출력전압과 파워는 여전히 실제적인 응용을 위해서 개선할 필요가 있다. 더구나 기존의 반도체 압전 나노물질의 제조 방법은 나노 발전 소자의 출력 특성에 큰 영향을 끼칠 수 있으며, 직경이 100nm보다 작고, 50 μ m보다 길고 유연한 나노선을 제조하는 것은 어렵고, 짧은 나노선은 출력전압을 향상시키는 데 한계점을 가질 수 있다.

최근 반도체 나노선 기반의 발전 소자의 단점을 극복하기 위해 PZT 압전 나노섬유를 기반으로 한 고 출력 나노 발전 소자 개발에 대한 연구 결과가 보고되고 있다. 전기방사법으로 제조된 PZT 나노섬유는 높은 굽힘성과 기계적 강도를 가지며, 같은 압력이 인

가될 경우 산화이연 나노선 발전 소자보다 훨씬 더 큰 전압과 전력을 얻을 수 있다는 것을 보였다. 또한 PZT 세라믹과 박막은 반복적인 외부 힘을 받을 때 아주 쉽게 깨어질 수 있고, 또한 고주파수 진동에서 작동하기 때문에 주변 환경의 저주파수 에너지를 활용한 에너지 수확은 어렵다. 그러나 전기방사법에 의해 제조된 PZT 나노섬유의 압전 전압 상수는 PZT 벌크(0.25V · m/N)나 microrfiber composite(0.59V · m/N)보다 훨씬 큰 압전 전압 상수(g_{33} : 0.79V · m/N)와 우수한 유연성과 기계적 강도를 가짐을 보였다[20]. (그림 11)은 PZT 나노섬유 기반의 나노 발전 소자의 개략도와 나노섬유 mat의 SEM 사진, 나노 발전 소자의 단면도를 보인 것이다[21]. PZT 나노섬유 나노 발전 소자는 Si 기판 상에 interdigitated Pt(직경: 50 μ m, 인접한 전극의 간격: 500 μ m) 전극



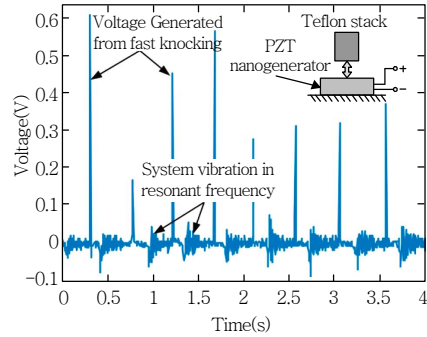
(그림 11) PZT 나노섬유 발전 소자의 개략도(a), 나노섬유 mat의 SEM 사진(b), PDMS matrix 내의 PZT 나노섬유의 SEM 단면 사진(c), Poling된 PZT 나노섬유 발전 소자의 단면도(d)

상에 전기방사법으로 연속성의 PZT 나노섬유(직경: 약 60nm)를 형성하고, 제조된 PZT 나노섬유 상부에는 polymer(polydimethylsiloxane, PDMS)로 패키징하여 제작하였다. PZT 나노섬유는 다결정성을 가지므로 압전성을 갖게 하기 위해 $4V/\mu m$ 의 전기장으로 $140^{\circ}C$ 에서 24시간 동안 분극처리 하였다. PZT 나노섬유 나노 발전 소자는 상부에서 교류 압력이 인가되는 횡 모드(longitudinal mode)로 작동되는 LING 구조이다. 인가 압력은 PDMS matrix를 통하여 PZT 나노섬유에 transfer되고, PZT 나노섬유는 tensile 과 bending stress를 받게 되어 전압이 발생하게 된다. 인접한 전극 사이의 압전 나노섬유는 단위 셀로 생각할 수 있고, 이들 단위 셀이 직렬로 연결된 구조이기 때문에 출력 파워를 증가시킬 수 있다. 손가락으로 압력을 인가했을 때 최대 출력전압이 1.63V, 출력 파워는 6M Ω 의 부하저항에 대해 0.03 μW 를 보였다 ((그림 12) 참조). 나노 발전 소자의 출력 전압은 외부 압력의 세기와 나노섬유의 압전 전압 상수에 의존하며, 외부 압력에 의해 횡 모드로 작동할 때의 최대 출력 전압은 다음과 같다[21].

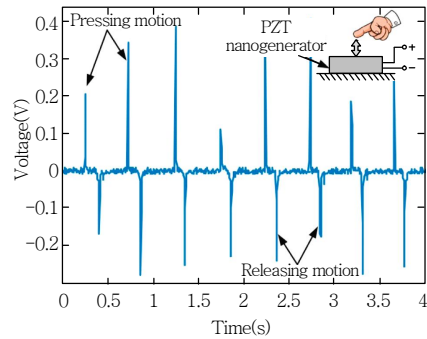
$$\Delta V = \int_0^l g_{33} \sigma(l) dl$$

$$= \int_0^l g_{33} \cdot E_p \left(\frac{\sigma_{xx}}{E_{11}} - \frac{\sigma_{yy}}{E_{11}} \cdot \nu - \frac{\sigma_{zz}}{E_{11}} \cdot \nu \right) dl$$

여기서 g_{33} 는 PZT 나노섬유의 압전 전압 상수, E_p 는 PZT 나노섬유의 modulus, σ_{xx} , σ_{yy} 와 σ_{zz} 는 나노섬유의 세 축 방향으로의 stress, l 은 두 인접한 전극 사이에 놓인 나노섬유의 길이, E_{11} 은 횡방향의 modulus, ν 는 나노섬유 matrix의 Poisson's ratio이다. PZT 나노섬유의 압전 전압 상수는 PZT 벌크나 micorfiber 복합체보다 훨씬 큰 압전 전압 상수(g_{33} : 0.79V · m/N)를 가지므로 같은 길이와 부하저항 조건 하에서 훨씬 큰 전압출력을 얻을 수 있다. 또한 전기방사된 PZT 나노섬유를 기판으로부터 떼어내어 유연 기판



(a) Teflon stack을 사용하여 압력을 인가했을 때의 출력전압



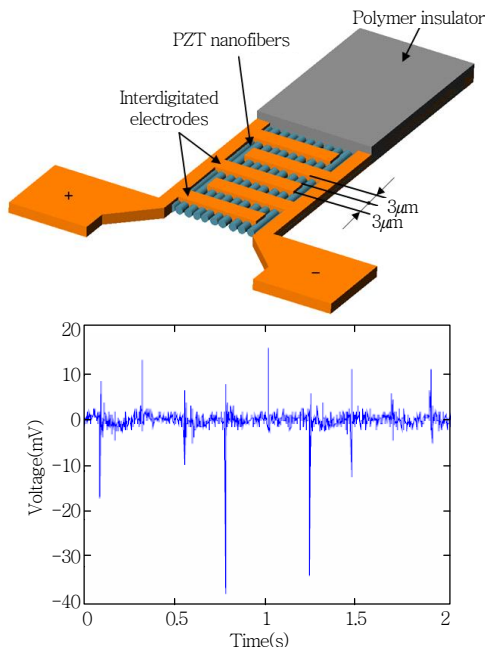
(b) 손가락을 사용하여 압력을 인가했을 때의 출력전압

(그림 12) PZT 나노섬유 발전 소자의 출력 특성

상에 전사하여 유연 나노 발전 소자의 제작이 가능할 뿐만 아니라 전기방사 동안 전기장 분포를 제어함으로써 한 방향으로 배열된 PZT 나노섬유, 또는 fabric으로 된 woven 형태, 복합체 나노섬유 등의 다양한 구조의 나노섬유 제조가 가능하기 때문에 저주파수 진동으로 작동하는 휴대할 수 있는 고효율 유연 발전 소자, 초고감도 센서, 액추에이터 등의 소자 개발이 가능할 것으로 전망된다.

현재 압전 나노섬유를 이용한 응용 소자의 개발은 이제 막 연구가 시작된 연구 분야로서 최근 압전 나노섬유를 이용한 압전 나노 소자 개발에 대한 연구 결과들도 보고되고 있다. 일례로 PZT 나노섬유 기반의 acoustic emission(AE) 센서 개발에 대한 연구 결과를 간략히 소개한다. 압전 나노섬유는 벌크 및 박막 소재에 비해 큰 압전 전압 상수와 유연성과 큰 기

계적 강도, 큰 종횡비 등의 우수한 특성을 가지기 때문에 초고감도의 AE 센서 제조를 가능케 한다. PZT 나노섬유 기반의 AE 센서는 벌크 및 박막 기반의 기존 AE 센서에 비해, 고민감도, 저가격, 나노스케일의 소형 경량, 유연성 등의 많은 장점을 가진다. PZT 압전 나노섬유 기반의 고감도 AE 센서는 실리콘 기판 상에 잘 정렬된 나노섬유, interdigitated 전극, 폴리머 matrix로 구성된다(그림 13) 참조. 제조 방법은 전기방사법에 의해 실리콘 기판 상에 잘 배열되게 나노섬유를 제조한 후, interdigitated 전극을 형성하고, 센서의 상부에 얇은 폴리머층으로 패키징하여 제조한다. PZT 나노섬유는 d_{33} 모드로 작동하여 전형적인 히스테리시스를 보이는 강유전체 특성을 보였으며, AE 센서의 출력 신호 전압은 35mV를 보였다[22]. 압전 나노섬유 기반의 소형 경량의 유연 초고감도 AE 센서는 다리, 땀, 도로 등과 같은 건축물 안전 모니터링을 위한 초고감도 센서로의 활용이 기대된다.



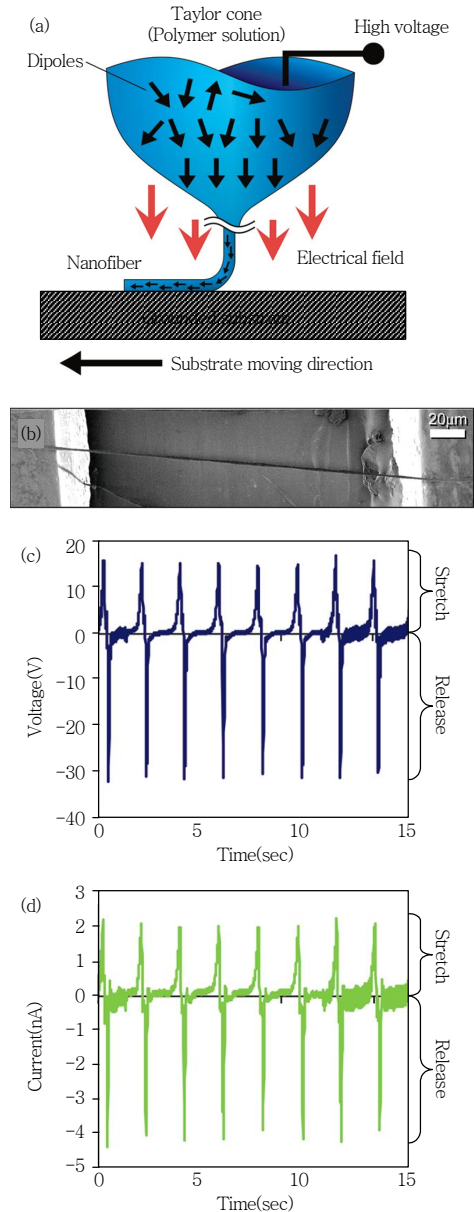
(그림 13) PZT 나노섬유 AE 센서의 개략도와 출력 신호 (전압) 특성

3. 폴리머 압전 나노섬유 기반의 나노 소자 기술

현재까지 ZnO, BaTiO₃, PZT 등의 나노구조체를 이용한 나노 발전 소자 개발에 대한 많은 연구 결과들이 보고 되었으나, 이들 나노소재는 여전히 깨지기 쉬운 성질을 가지고 있으며, 신뢰성 및 안정성의 문제점을 가지고 있어 유연한 소자로의 활용이 어렵고, 무엇보다도 대량생산이 어렵다. 미래 유연 소자에 활용하기 위해서는 압전 특성이 우수하고, 깨지지 않고 자유롭게 구부릴 수 있는 고효율의 유연 압전 나노소재 및 유연 소자 개발이 필요하다. 폴리머 압전 소재는 이러한 유연 소자 구현을 위한 적합한 소재이다. 현재까지 폴리머 PVDF 압전 소재는 벌크 박판형 및 박막형, 마이크로 섬유 형태로 압전 센서, 액추에이터, 에너지 발전 소자 등에 사용되어 오고 있다. 최근 나노섬유를 쉽게 제조할 수 있는 기술이 개발됨에 따라 저렴한 생산비용과 저가격의 우수한 압전 특성을 갖는 폴리머 압전 나노섬유 제조와 이를 이용한 유연 소자 개발이 가능하게 되었다. 최근 미국의 버클리캘리포니아주립대학교(University of California, Berkeley)의 Liwei Lin 그룹은 압전 폴리머(PVDF; 폴리비닐리덴 불소, poly(vinylidene fluoride)) 나노섬유(nanofibers)를 기반으로 한 고효율 나노 발전 소자를 처음으로 선보였다[23]. 폴리머 나노섬유는 유기 물질로부터 제작이 가능하여 낮은 단가로 제작이 가능하여 경제적인 뿐만 아니라 의류 형태로 제작되어 휴대 가능한 전기 장치를 충전할 수 있는 옷과 무선 감지기의 동력원을 만들 수 있을 것으로 예견된다. 압전 소재의 압전성은 쌍극자(dipole) 배열 정도에 크게 의존하며, 벌크 세라믹 및 단결정, 폴리머 등의 압전소재는 무질서(random)한 쌍극자를 가지며, 압전 특성이 나타내지 않는다, 압전 소재의 압전성을 갖게 하기 위해서는 같은 방향으로 쌍극자를 배열시키

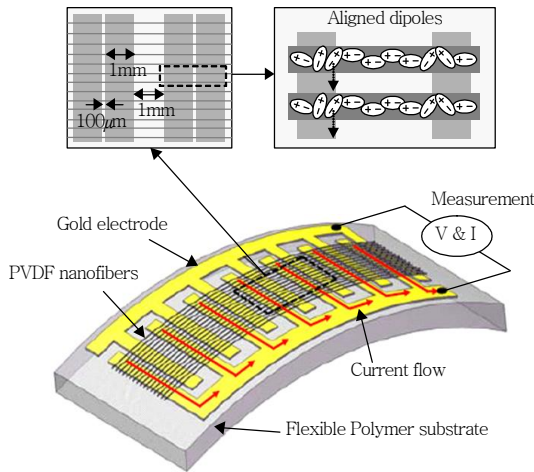
는 부가적인 연신 또는 급랭, 전기적 분극(poling) 공정이 요구된다. 전기방사법으로 나노섬유를 제조할 때 노즐과 집적 전극 사이에 고전압을 걸어주어야 하므로 전기방사 과정에서 전기 쌍극자 배열이 동시에 일어나기 때문에 압전 나노섬유를 제조한 후 부가적인 분극 공정이 필요하지 않다. 즉 전기방사법에 의해 자가 배열된 쌍극자(self-aligned dipoles)를 갖는 나노섬유를 얻을 수 있으며, 이를 이용한 새로운 압전 소자 개발을 가능케 한다. 본 절에서는 폴리머 압전 나노섬유 기반의 나노 발전 소자 기술에 대한 최근의 연구 결과를 간략히 소개한다.

최근 근접장 전기방사 방법이 개발되어 나노섬유를 원하는 위치와 형태로 기관 위에 쓸 수가 있어 전기방사된 나노섬유 기반 압전 소자를 제조할 수 있는 새로운 방법을 제시하고 있다. 근접장 전기방사법은 direct-writing 기술로서 (그림 14)는 폴리머 압전 나노섬유(PVDF)의 제조방법과 나노 발전 소자의 특성을 보인 것이다. (그림 14)에 보인 바와 같이 전극이 패턴된 기관 상에 in-suit 역학적 연신(stretching)과 전기적 poling에 의해 쌍극자가 배열된 나노섬유를 제조할 수 있다[23]. 전기방사 과정에서 인가한 강한 전기장(약 10^7V/m)과 stretching force는 나노섬유 결정 내의 쌍극자를 배열시킨다. 즉 PVDF 나노섬유는 비극성 α -phase(무질서한 쌍극자 방향을 갖는 상)에서 극성 β -phase로 바뀐다. 전기방사된 PVDF 나노섬유는 두 금속 전극 사이의 길이에 따라 500nm에서 $6.5\mu\text{m}$ 까지의 직경을 가진다. PVDF 나노섬유가 형성된 유연 플라스틱 기관을 구부러서 응력을 받게 되는 경우 PVDF 내에는 압전 포텐셜이 생성되어 전압이 발생하게 된다. PVDF 나노섬유 기반의 나노 발전 소자는 출력전압이 5~30mV이고 출력 전류가 0.5~3nA임을 보였다. 폴리머 압전 나노섬유의 최대 에너지 변환 효율은 21.8%였고 평균 12.5%였으며, 압전



(그림 14) 근접장 전기방사에 의한 압전 PVDF 나노섬유의 제조 방법(a), 플라스틱 기관상에 단일 PVDF 나노섬유로 제작된 나노 발전 소자의 SEM 사진 (b), 2Hz의 strain하에서 측정된 출력전압(c), 2Hz의 strain하에서 측정된 출력 전류(d)

PVDF 박막으로 만들어진 전형적인 발전 소자에서 얻은 0.5~4%와 산화아연 나노선으로 만들어진 나노 발전 소자의 6.8%보다 훨씬 큰 특성을 보였다. 또한 선



(그림 15) 유연 기판 상에 배열된 나노섬유 기반의 나노 발전 소자의 개략도

행연구 결과에서 나노섬유의 직경이 작을수록 에너지 효율이 더 좋아지는 경향을 보였고, 향후 효율을 더 증가시킬 수 있을 것으로 기대된다. 또 다른 연구는 플렉시블 기판 상에 한 방향으로 정렬된 PVDF 나노섬유를 제조하여 발전 소자를 제조하였으며, 0.05%의 strain 하에서 35nA의 피크 전류와 0.2mV의 피크 전압 특성을 보였다(그림 15) 참조[24]. 전기방사된 폴리머(PVDF) 압전 나노섬유 기반의 나노 발전 소자는 고에너지 변환 효율을 가지며, 쉽고, 간단하고, 저렴하게 유연 기판 상에 제조가 가능하여 유연 나노 소자, 무선 센서, 또는 자가발전 textile, portable 일렉트로닉스에의 직접 활용될 수 있을 것으로 전망된다.

IV. 결론

미래 유비쿼터스 산업으로의 뉴-패러다임 전환을 위해 전 세계적으로 기존 소재의 성능 개선이 아닌 성능 한계 및 임계성능의 새로운 나노 소재/소자의 개발에 박차를 가하고 있다. 이러한 유비쿼터스 기술

들이 급격히 발달하고 있는 상황에서 MEMS/NEMS 및 나노 소자, 스마트 웨어러블 시스템, portable 전자소자, 디스플레이 등의 미래 융합 소자 및 시스템의 전원 공급에 관련된 이슈는 미래 유비쿼터스 산업 발전에 있어 가장 중요한 문제들 중의 하나이다. 또한 향후 나노기술 연구는 초고감도 나노선 센서, 메모리와 로직 소자, 에너지 발전 소자 등의 소자가 집적된 자가 독립 전원을 갖는 지능형 나노 시스템 연구가 가장 큰 이슈로 발전할 것이며, 압전 성질을 요구하는 nanopiezotronics 소자는 미래 집적 나노 시스템 구현에 활용될 것으로 전망된다. 현재까지 산화이연, 강유전체(PZT, BaTiO₃), 폴리머 등의 압전 나노소재 기반의 nanopiezotronics 소자에 대한 많은 연구 결과들이 보고되었으며, <표 2>는 2011년까지 보고된 유·무기 압전 나노소재를 사용한 나노 발전 소자 기술의 연구 결과를 요약한 것이다. 1차원적 압전 나노구조를 이용한 발전 소자는 아주 미세한 압력과 진동에도 반응하기 때문에 응용 가능성이 높은 장점이 있지만 유·무기 압전 소재는 비저항이 매우 높은 부도체이므로 외부 응력에 의해 발생한 전압에 의해 발생하는 전류의 크기가 매우 작아 큰 출력파워를 얻기에는 근본적인 한계를 가지고 있다. 그러나 가장 최근에는 나노선 어레이를 통한 집적화 기술의 향상으로 높은 전력 출력 특성을 갖는 고효율 나노 발전 소자 개발에 대한 연구 결과가 보고되면서 상용화 가능성에 대한 기대가 한층 높아진 상황이다. 그러나 압전 나노 발전 소자가 실질적인 IT 디바이스에 응용되고, 상용화가 되기 위해서는 아직 극복해야 할 기술적 문제들이 산적해 있는 상황이다. 구체적으로는 고효율의 압전 나노소재 및 대면적 정렬기술 개발에서부터 각각의 소자의 명확한 구동 메커니즘, 출력 특성의 안정성 확보, 반영구성을 보장할 수 있는 신뢰성 확보 등이

해결되어야 한다.

또한 미래 유연 전자소자에 활용하기 위해서는 압전 특성이 우수하고, 깨지지 않고 자유롭게 구부릴 수 있는 고효율의 유연 압전 나노소재 및 유연 에너지 소자 기술 개발도 필요하다. 이러한 기술적 한계가 극복될 경우 미래 IT 에너지/신소자 분야는 물론 미래 산업 전반에 걸쳐 획기적인 기술 혁신이 이루어질 것

으로 예상되며, 새로운 에너지/소자 분야의 신시장이 형성될 것으로 전망된다. 특히 녹색성장이라는 시대적 패러다임에서, 압전 소자를 이용한 나노 발전 소자 기술은 에너지 활용을 극대화하기 위한 기술이기 때문에 지속적인 연구개발이 이루어질 것이고, 미래 신소재/소자 기술 분야의 기술선도 및 조기 신시장 확보를 위한 조속한 연구가 필요하다.

〈표 2〉 2011년까지 보고된 압전 나노 발전 소자 기술의 연구 결과 요약

압전 소재	나노 소재의 형태 (D: 직경, L: 길이)	나노 발전 소자의 구조	출력 전압 (Vp)	출력 파워	나노 소재의 제조 방법	연구기관	
Wurtzite 구조	ZnO (n-type)	Nanowire (D: 150nm, L: 2 μ m)	5-layer integrated VING using vertically grown ZnO nanowire array	~ 10	~ 10mW/cm ³	Wet chemical method	Georgia Tech. [8]
	ZnO (p-type)	Nanowire (D: 200nm, L: 50 μ m)	LING using laterally aligned ZnO nanowires array	~ 2.03V	~ 11mW/cm ³	PVD	Georgia Tech. [14]
		Nanowire array (D: ~200nm, L: 5 μ m)	LING using laterally grown ZnO nanowire array	~ 1.26V		Wet chemical method	Georgia Tech. [6]
		Single Nanowire (D: 50nm, L: 600nm)	VING using single ZnO nanowire	50~90 mV	5~16.2pW (calculated)	CVD	Georgia Tech. [21]
		Nanowire (D: 100nm, L: 1 μ m)	VING using single CdS nanowire	~ 3mV	Not stated	PVD, Hydrothermal process	Georgia Tech. [12]
GaN	Nanowire (D: 100~500nm, L: 10~20 μ m)	VING Using GaN nanowires array	~ 1.2V	~0.64mW/cm ³ (calculated)	Vapor-liquid-solid(VLS) process	Georgia Tech. [22]	
Perovskite 구조	BaTiO ₃	Nanowire (D: 280nm, L: 15 μ m)	VING using single BaTiO ₃ nanowire	~ 25mV	~ 0.3aJ/cycle (calculated)	High temp. chemical reaction	Univ. of Illinois [15]
	PZT	Nanowire (D: 500nm, L: 5 μ m)	VING using PZT nanowire array	~ 0.7V	~ 2.8mW/cm ³	Hydrothermal decomposition	Georgia Tech. [16]
		Nanofiber (D: 60nm, L: 500 μ m)	LING using PZT nanofiber array	~ 1.63V	~ 0.03mW	Electrospinning	Princeton University [18]
Polymer	PVDF	Nanofiber (D: 0.5~6.5 μ m, L: 0.1~0.6mm)	LING using single PVDF nanofiber	5~30mV	2.5~90pW (calculated)	Near-field Electrospinning	UC Berkely [19]

● 용어해설 ●

Nanopiezotronics: 나노선/나노튜브와 같은 1차원 압전 나노 소재의 압전성과 반도체성의 coupling을 이용한 새로운 나노 전자/에너지 소자 기술

압전 나노 발전 소자(Piezo-nanogenerator): 나노선, 나노튜브, 나노섬유와 같은 1차원 압전 나노 소재를 이용하여 기계적 에너지를 전기적 에너지로 변환하는 소자

압전 전계효과 트랜지스터(Piezo-field-effect transistor): 1차원 압전 나노 소재에 기계적 힘/압력을 가함으로써 전류의 흐름을 “on” 또는 “off”시킬 수 있는, 즉 전류의 흐름을 제어할 수 있는 소자

전기방사(electrospinning): 작은 노즐에서 나오는 높은 점도의 고분자 용액을 전기장으로 연신시키는 공정으로서 나노 크기의 직경을 갖는 유/무기 나노섬유를 제조할 수 있는 방법

약어 정리

AE	acoustic emission
LING	Lateral nanowire Integrated Nanogenerator
NEG	Nanocomposite Electrical Nanogenerator
PDMS	polydimethylsioxance
PS	polyester
PVD	physical vapor deposition
PVDF	poly(vinlydene fluoride)
VING	Vertical nanowire Integrated Nanogenerator

참고 문헌

[1] Z.L. Wang “Nanopiezotronics,” *Adv. Mater.*, vol. 19, 2007, pp. 889-892.
 [2] Z.L. Wang, “Piezotronic and Piezophototronic Effects,” *J. Phys. Chem. Lett.*, vol. 1, 2010, pp. 1388-1393.
 [3] Z.L. Wang and J.H. Song “Piezoelectric Nanogenerators Based on Zinc Oxide Nanowire Arrays,” *Sci.*, vol. 312, 2006, pp. 242-246.
 [4] X. Wang et al., “Direct-Current Nanogenerator Driven by Ultrasonic Waves,” *Sci.*, vol. 316, 2007, pp. 102-105.
 [5] Y. Qin, X. Wang, and Z.L. Wang, “Microfibre-

nanowire Hybrid Structure for Energy Scavenging,” *Nat.*, vol. 451, 2008, pp. 809-813.
 [6] S. Xu et al., “Self-powered Nanowire Devices,” *Nat. Nanotechnol.*, vol. 5, 2010, pp. 366-373.
 [7] M. Lee et al., “Self-powered Environmental Sensor System Driven by Nanogenerators,” *Energy Environ. Sci.*, vol. 4, 2011, pp. 3359-3363.
 [8] Y. Hu et al., “Self-powered System with Wireless Data Transmission,” *Nano Lett.*, vol. 11, 2011, pp. 2572-2577.
 [9] Z.L. Wang et al., “Piezoelectric Nanogenerators for Self-Powered Nanodevices,” *IEEE Pervasive Computing.*, vol. 7, no. 1, 2008, pp. 49-55.
 [10] Y. Choi et al., “Mechanically Powered Transparent Flexible Charge-Generating Nanodevices with Piezoelectric ZnO Nanorods,” *Adv. Mater.*, vol. 21, 2009, pp. 2185-2189.
 [11] K. Momeni, G.M. Odegard, and R.S. Yassar, “Nanocomposite Electrical Generator Based on Piezoelectric Zinc Oxide Nanowires,” *J. Appl. Phys.*, vol. 108, no. 11, 2010, pp. 114303-1-114303-7.
 [12] Y.-F. Lin et al., “Piezoelectric Nanogenerator Using CdS Nanowires,” *Appl. Phys. Lett.*, vol. 92, 2008, pp. 022105-1-022105-3.
 [13] C.-T. Huang et al., “GaN Nanowire Arrays for High-Output Nanogenerators,” *J. Am. Chem. Soc.*, vol. 132, 2010, pp. 4766-4771.
 [14] G. Zhu et al., “Flexible High-Output Nanogenerator Based on Lateral ZnO Nanowire Array,” *Nano Lett.*, vol. 10, 2010, pp. 3151-3155.
 [15] Z. Wang et al., “Voltage Generation from Individual BaTiO3 Nanowires under Periodic Tensile Mechanical Load,” *Nano Lett.*, vol. 7, 2007, pp. 2966-2969.
 [16] S. Xu et al., “Piezoelectric nanowire-enabled power source for driving wireless microelectronics,” *Nat. commun.*, vol. 1, 2010, pp. 1-5.
 [17] X. Wang et al., “Piezoelectric Field Effect Transistor and Nanoforce Sensor Based on a Single ZnO Nanowire,” *Nano Lett.*, vol. 6, no. 12, 2006, pp. 2768-2772.
 [18] W.Z. Wu, Y.G. Wei, and Z.L. Wang, “Strain-gated Piezotronic Logic Nanodevices,” *Adv.*

- Mater.*, vol. 22, 2010, pp. 4711-4715.
- [19] J.H. He et al., "Piezoelectric Gated Diode of a Single ZnO Nanowire," *Adv. Mater.*, vol. 19, 2007, pp. 781-784.
- [20] X. Chen et al., "Potential Measurement Form a Single Lead Zirconate Titanate Nanofiber Using a Nanomanipulator," *Appl. Phys. Lett.*, vol. 94, 2009, pp. 253113-1-253113-3.
- [21] X. Chen et al., "1.6V Nanogenerator for Mechanical Energy Harvesting Using PZT Nanofibers," *Nano Lett.*, vol. 10, 2010, pp. 2133-2137.
- [22] X. Chen and Y. Shi, "A PZT nanofiber composites sensor for structure health monitoring," *Proc. of SPIE*, 7981, 2011, pp.1-7.
- [23] C. Chang et al., "Direct-Write Piezoelectric Polymeric Nanogenerator with High Energy Conversion Efficiency," *Nano Lett.*, vol. 10, 2010, pp. 726-731.
- [24] J. Chang and L. Lin, "Large Array Electrospun PVDF Nanogenerators on a Flexible Substrate," *TRANSDUCERS*, 2011, pp. 747-750.
- [25] M.-P. Lu et al., "Piezoelectric Nanogenerator Using p-Type ZnO Nanowire Arrays," *Nano Lett.*, vol. 9, no. 3, 2009, pp. 1223-1227.
- [26] L. Lin et al., "High Output Nanogenerator Based on Assembly of GaN Nanowires," *Nanotechnol.*, vol. 22, 2011, pp. 475401-1-475401-5.