나노 구조 비납 압전체의 최근 연구

DOI: 10.3938/PhiT.22.004

정 종 훈

Recent Research Results for Lead-free Piezoelectric Nanostructures

JongHoon JUNG

This article briefly summarizes the recent research results for lead-free piezoelectric nanostructures. Scientifically, the quantum size effect gives rise to significant modifications of the Curie temperature, domain structure, and piezoelectric constant. Technically, piezoelectricity, as well as ferroelectricity, provides the useful building blocks for nano-actuators, ultra-high-density memories, energy-harvesting devices, and hydrogen-generating devices. Due to the recent significant progress in synthesis techniques, the area of lead-free piezoelectric nanostructures has become one of the hottest research fields in condensed matter physics.

서 론

최근 나노 과학의 발전과 더불어, 나노 사이즈를 갖는 비납 압전체에 대한 연구 또한 비약적인 발전을 이루고 있다. 실리콘(Si), 산화 아연(ZnO)과 같이 하나 혹은 두 가지 원소로 이루어진 화합물의 나노 구조에 대해서 지난 10여 년 동안 매우 활발한 연구가 진행되었지만, 비납 압전체처럼 세 가지 혹은 그 이상의 원소로 이루어진 화합물의 나노 구조에 대해서는 합성의 어려움으로 인하여 많은 연구가 진행되지 않았다. 하지만 최근 몇 년 동안 나노 구조 합성에 대한 비약적인 발전이 일어났고, 컴퓨터 계산의 획기적인 발전에 의해 새로운

물성의 예측이 가능하고 또한 정밀한 실험 방법이 개발되어 예측된 이론을 검증할 수 있게 되었다. 페로브스카이트(perovskite) 구조를 기반으로 하는 비납 압전체는 양자 역학적 사이즈 효과에 의해 전이 온도, 압전 계수의 감소와 강유전/압전 도메인의 변화가 유도되고, 매우 큰 부피 대 표면적의 비에 의해 벌크와 박막에서 보이지 않던 새로운 물리적 현상을 보인다. 이와 같은 새로운 양자 역학적 현상을 관측하고 설명하기 위해 많은 물리학자들이 이론과 실험의 상호 보완 하에 활발히 연구하고 있다.

한편, 위험 물질 사용 제한(RoHS: Restriction of Hazardous Substances) 규제에 의해 현재까지 마이크로 전기역학 시스템(MEMS: micro electromechanical system)과 나노 전기역학 시스템(NEMS: nano electromechanical system)에 사용되어 온 액추에이터, 트랜스듀서와 같은 디바이스를 앞으로는 Pb(Zr,Ti)O₃ 물질 대신 Pb가 들어가지 않은 비납 물질을 이용하여야 한다. 이와 더불어, 비납 압전체는 이 물질이 가지고 있는 압전과 강유전성에 의해 나노 구조의 액추에이터, 초고 집적 메모리, 에너지 수확, 그리고 수소 생산과 관련된 응용에 사용할 수 있다. 이와 같은 환경적인 이유와 경제적 필요에 의해 물리뿐만 아니라 재료공학, 기계 공학 등 여러 학문 분야에서 상호 협력 하에 매우 활발히 연구를 진행 중에 있다.

본 글에서는, 현재 진행되고 있는 비납 압전체 나노 구조의 중요한 연구 결과를 나노 구조의 합성, 나노 사이즈에 의한 물리적 성질의 변화, 그리고 나노 구조의 응용을 중심으로 간략히 소개하고자 한다.

본 론

1. 나노 구조체의 합성

(1) 탑-다운(top-down) 방법에 의한 나노 구조체 합성

나노 구조의 비납 압전체를 합성하는 방법 중의 하나는 반도체 나노 구조를 만드는데 전통적으로 사용하였던 탑-다운

저자약력

정종훈 교수는 서울대학교 이학 박사(2000)로서 2004년부터 인하대학교 물리학과에 재직 중이다. 현재 정렬된 비납 압전체 나노 구조를 이용하여 에너지 수확과 관련된 연구를 진행 중이다. (jhjung@inha.ac.kr)

Fig. 1. Nano-structures of lead-free piezoelectric materials (a) nano-cubes, (b) nanowires grown by template-assisted methods and (c) by template-free methods. (d) Growth mechanism of oriented attachments [Refer to P. M. Rorvik *et al.*, *Adv. Mater.* **23**, 4007 (2011)].

방법을 이용하는 것이다. 즉, 전자 빔(electron beam), 집속 이온빔(focused ion beam) 등을 이용하여 벌크 혹은 박막 형태의 비납 압전체를 에칭 혹은 밀링 과정을 거쳐 나노 사이즈로 줄여 나가는 방법이다. 이러한 방법은 우리가 원하는 나노 구조를 정확히 구현할 수 있다는 장점이 있는 반면 고가의 장비를 사용하여야 한다는 점, 대량 생산을 할 수 없다는 점, 그리고 다양한 시료에 같은 방법을 적용할 수 없다는 단점이 있다.

(2) 바텀-업(bottom-up) 방법에 의한 나노 구조체 합성

탑-다운 방법에 의한 나노 구조체의 합성보다 최근에 관심을 끌고 있는 방법은 바텀-업 방법에 의한 나노 구조체의 합성이다. 자기 조립법(self assembly)을 이용하는 바텀-업 방법은 거의 대부분 고가의 장비를 사용하지 않아도 되고 대량 생산에 적용할 수 있다는 장점이 있다. 입방(cubic) 혹은 유사 입방(pseudo-cubic)의 페로브스카이트 구조에 의해 비납 압전체는 거의 대부분 육면체(cube)로 합성된다 [그림 1(a)].

한편 일차원 구조의 비납 압전체를 구현하는 것은 상대적으로 매우 어렵다. 일례로, 일차원 구조의 실리콘, 산화아연을 합성하기 위해 널리 사용되어온 VLS(vapor-liquid-solid)와 SLS (solution-liquid-solid) 방법이 잘 적용되지 않는다고 알려져 있다. VLS와 SLS 방법은 기본적으로 금속 촉매와 과포화된 증기/용액을 이용하여 단결정의 일차원 나노 구조를 기판의 수직으로 성장시킬 수 있는 방법이다.^[1] 비납 압전체와 같이 세 가지 혹은 그 이상의 원소로 이루어져 있는 화합물은 두 가지 이상의 금속 양이온(metal cation)을 사용하여야 하는데, 이들 사이의 용해도가 너무 달라 적당한 온도와 압력을 찾기 어렵고, 합성이 되더라도 우리가 원하는 화학식을 제대로 맞

추기가 매우 힘들다. 더욱이, 두 가지 이상의 금속 양이온이 동시에 용액 상태로 존재할 수 있는 공용 용액(eutectic solution)을 만들 수 있는 촉매(catalyst)가 현재까지 제대로 알려지지 않았다.

① 틀(template) 도움 합성 방법

일차원의 비납 나노 구조체를 구현하는 가장 손쉬운 방법 중의 하나는 나노 사이즈의 틀(template)을 이용하는 것이다. 틀을 이용하여 합성된 일차원의 나노 구조들은 거의 대부분 다결정이라는 단점은 있지만, 틀을 비교적 자유롭게 제어할 수 있어, 우리가 원하는 형태의 일차원 나노 구조를 구현할 수 있는 장점이 있다. 다공성의 산화 알루미늄, 에칭한 폴리머를 이용하거나(음의 틀: negative template), 손쉽게 성장시킬 수 있는 나노 와이어를 틀로 이용하거나(양의 틀: positive template), 혹은 나노 사이즈의 지름을 갖는 노즐에 강한 전기장을 인가하여 나노 와이어를 만들 수 있는 전기 방적(electro-spinning) 방법이 대표적인 예이다 [그림 1(b)]. 그중에서도 가장 많이 사용되는 산화알루미늄 방법은 알루미늄을 화학적으로 산화시키고 다공성 틀로 만들어, 이 틀에 용액이 침투해 들어가 결정을 형성한 후, 틀을 녹여내어 우리가 원하는 일차원의 구조를 만들 수 있는 방법이다.^[2]

② 틀(template) 도움 없이 합성하는 방법

틀을 사용하지 않고 일차원의 나노 구조체를 합성하는 방법은 틀을 사용하는 방법에 비해 시행 착오(trial-and-error)적인 접근법이다. 하지만 단결정의 나노 구조를 얻을 수 있기 때문에 최근 들어 많이 이용하고 있다. 용해 염 방법(molten salt synthesis), 수열 합성법(hydrothermal synthesis), 열분해(thermal decomposition synthesis) 등의 대표적인 방법인데, 압전체의 단위 세포(unit cell) 자체가 비등방적이지 않은 경우 전구체(precursor), 용제(solvent), 계면 활성제(surfactant), 그리고 첨가제(additive)를 잘 선택하고 온도와 압력을 조절하여 일차원의 구조체를 합성하는 방법이다 [그림 1(c)]. 특히, 비납 압전체와 같이 입방(cubic) 혹은 유사 입방(pseudo-cubic) 구조의 경우에는 아세트산비닐(PVA: polyvinyl acetate)과 같은 폴리머 계면 활성제가 많이 사용된다. 계면 활성제는 단위 세포 각 면의 표면 에너지(surface energy)를 바꿀 수 있어 특정한 방향으로만 나노 와이어가 성장할 수 있도록 유도할 수 있다. 이 방법을 이용하여, 대표적인 비납 압전체인 BaTiO_3 뿐만

REFERENCES

- [1] A. M. Morales and C. M. Lieber, *Science* **279**, 208 (1998).
- [2] W. Lee *et al.*, *Nature Mater.* **5**, 741 (2006).

Fig. 2. Quantum size effects of lead-free nano-structures. (a) T_c of BaTiO_3 ,^[7] (b) low-temperature structure of KNbO_3 ,^[10] and (c) domain structure of BaTiO_3 .^[12]

아니라 층상 산화물인 $(\text{Bi,Nd})_4\text{Ti}_3\text{O}_{12}$ 또한 합성될 수 있음을 보였다.^[3,4] 이와 더불어 다양한 방법으로 일차원 구조를 갖는 비납 압전체의 성공을 보고하고 있는데, 최근 연구 결과에 의하면 나노 육면체들이 방향성을 가지고 흡착하여 정렬된 일차원 구조를 가지는 방향의존 부착(oriented attachment)^[5] 성장 메커니즘이 자주 보고되고 있다 [그림 1(d)].

2. 나노 사이즈에 의한 물성의 변화

(1) 상전이 온도 및 구조의 변화

비납 압전체는 큐리 온도(T_c)에서 고온의 상유전성에서 저온의 강유전성으로 상전이를 한다. 이때 큐리 온도는 전기 분극의 장거리 질서(long-range order)와 매우 밀접한 관련이 있으므로, 일반적으로 사이즈가 작아지면 전이 온도 또한 급격히 줄어들다가 어느 크기 이하에서는 사라진다. 상전이 온도가 사라지는 특정한 크기를 임계 크기(critical size)라고 하는데, 이 임계 크기에 대한 많은 연구들이 진행되어 왔다. 예를 들어, Fong 등은 PbTiO_3 초박막에서 두께에 따른 강유전 전이 온도를 연구하였고, 박막의 두께가 3단위 세포(unit cell)까지 강유전성이 유지된다고 보고하였다.^[6] Spanier 등은 BaTiO_3 나노 와이어에서 나노 와이어의 지름에 따른 전이 온도를 연구하여, 나노 와이어의 지름이 0.8 nm까지 강유전성이 유지된다고 보고하였다.^[7] 특히, Spanier 등은 강유전 전이 온도 T_c 가 BaTiO_3 나노 와이어의 지름(d_{nw})에 따라 $-1/d_{nw}$ 으로 피팅됨을 밝혀내었고, 이 결과로부터 상온에서 강유전성을 보일 수 있는 최소 지름이 3 nm임을 제시하였다 [그림 2(a)]. 한편, Ma 등은 이론 계산을 통해 일차원 나노 와이어의 경우 강유전 전이 온도가 분극의 방향에 따라 다를 수 있음을 보고하였다.^[8] 즉, 표면 장력은 나노 와이어 내부의 압력을 유도하

는데, 이 표면 장력이 분극 방향과 연관이 있어 만일 분극이 나노 와이어의 축과 평행하면 나노 와이어의 지름이 작아질수록 전이 온도가 어느 특정 두께까지 증가하다가 급격히 감소하는데 비해 분극이 나노 와이어의 축과 수직하면 나노 와이어의 지름이 작아질수록 T_c 가 지속적으로 감소하는 것을 예측하였다.

상전이 온도 전후에 페로브스카이트 구조의 압전체는 구조 상전이를 동반한다.^[9] 낮은 온도에서 높은 온도로 올라갈수록 순서대로 마름모계(rhombohedral), 직방정계(orthorhombic), 정방정계(tetragonal), 입방계(cubic)의 구조 상전이를 하는 것으로 널리 알려져 있다. 하지만 최근 일차원의 나노 구조에 대한 연구로부터,^[10] KNbO_3 , BaTiO_3 나노 와이어와 나노 막대에서는 저온에서의 구조가 마름모계(rhombohedral)가 아니고 단사정계(monoclinic)를 가진다는 것이 밝혀졌다 [그림 2(b)]. 현재까지 그 원인에 대해서는 잘 알려져 있지 않지만, 새롭게 발견된 단사정계(monoclinic)에서 분극 방향이 나노 구조의 크기와 잔류 분극 소거장(depolarization field)에 의해 변할 수 있음이 밝혀져 새로운 연구 주제로 관심을 받고 있다.

(2) 도메인, 전기 분극의 변화

압전체에서의 도메인은 정전 에너지(electrostatic energy)를 줄이기 위해서 작은 도메인을 가지는 것이 일반적이다. 하지만, 작은 도메인의 형성은 필수적으로 도메인과 도메인 사이의 벽을 만들어 에너지를 높이므로 특정한 크기와 모양의 도메인이 형성된다. 특히, 결정 대칭성(crystal symmetry), 결함 구조(defect structure), 분극 크기(polarization magnitude), 열처리 과정(thermal history), 그리고 시료 합성 방법에 따라 도메인의 크기와 모양이 의존한다고 알려져 있다. 앞서 나노 구조 합성에서 설명한 바와 같이 단결정의 나노 구조는 자기 조립법에 의해서 낮은 온도에서 ($< 300^\circ\text{C}$) 주로 합성되기 때문에, 높은 온도 ($> 500^\circ\text{C}$)에서 합성된 벌크, 박막의 도메인 패턴과 많이 다를 수밖에 없다. 특히, 수열합성법을 이용하여

REFERENCES

- [3] U. A. Joshi and J. S. Lee, *Small* **1**, 1172 (2005).
- [4] Z. Hu *et al.*, *Mater. Chem. Phys.* **113**, 42 (2009).
- [5] R. L. Penn and J. F. Banfield, *Science* **281**, 969 (1998).
- [6] D. D. Fong *et al.*, *Science* **304**, 1650 (2004).
- [7] J. E. Spanier *et al.*, *Nano Lett.* **6**, 735 (2006).
- [8] W. Ma, *Appl. Phys. A* **96**, 915 (2009).
- [9] C. Kittel, *Introduction to Solid State Physics* (8th Ed. John Wiley & Sons, Inc.).
- [10] L. Louis *et al.*, *Nano Lett.* **10**, 1177 (2010).

단결정의 나노 구조는 대체로 200 °C 정도에서 이루어지는데, 이 온도에서 나노 구조체는 정방정계(tetragonal)의 구조를 갖고 이로 인해 합성한 나노 구조를 큐리 온도 이상으로 올린 후 다시 온도를 내려도 처음 만든 나노 구조체와 전혀 다른 도메인 패턴이 형성된다. 예를 들어, 수열 합성법으로 성장한 PbTiO_3 나노 막대의 전기적 분극은 나노 막대의 축과 평행하지만, 이 물질을 T_c 까지 온도를 올린 후 상온까지 내리면 전기적 분극이 나노 막대의 축과 수직으로 바뀐다.^[11] 한편, Shilling 등은 BaTiO_3 단결정 시료의 사이즈를 줄여가면서 도메인 패턴을 연구하였다. 그림 2(c)에 보인 바와 같이 x 축 방향으로의 길이를 고정하고, y 축 방향으로의 길이를 줄였을 때 250 nm의 두께를 전후로 하여, 45°로 이루어져 있는 도메인 벽(wall)이 x - y 평면에서 y - z 평면으로 이동해 간 것을 관측하였고, 이를 y -축 방향으로의 정전에너지 줄이기 위한 것으로 해석하였다.^[12]

나노 입자에서는 전기 분극이 도넛 모양의 토로이드(toroidal) 정렬을 갖는 소용돌이(vortex) 도메인을 갖는다고 알려져 있다.^[13] Wang 등은 이론적 계산을 통해 나노 입자가 한 방향으로 길어져 나노 와이어 혹은 나노 막대의 형태를 가지면, 단일 소용돌이 도메인에서 다중 소용돌이 도메인으로 전환되어 한 방향의 전기 분극을 가질 수 있다는 결과를 발표하였다.^[14]

(3) 압전 특성의 변화

나노 사이즈 압전체의 압전 계수는 일반적으로 벌크 시료에 비해 작다. 특히 Zhang 등은 BaTiO_3 나노 와이어에서 지름이 0.4 nm가 되면 압전 계수가 0이 되고, 지름이 커짐에 따라 압전 계수가 커져 2.4 nm가 되면 압전 계수가 벌크에서의 값과 거의 같아짐을 보고하였다.^[15] 한편, 나노 구조에서는 시료의 모양과 합성 방법에 따라 압전 계수가 많이 달라질 수 있어, 비평형상태의 운동역학(kinetic)을 조절하여 압전 계수를 증대시키기 위한 많은 시도들이 진행 중이다.^[16]

3. 나노 구조체의 응용

(1) 나노 액추에이터와 고집적 메모리

나노 압전체를 이용한 가장 큰 응용 중의 하나는 나노 전기 역학 시스템(NEMS)에 사용되는 액추에이터, 트랜스듀서 디바이스이다[그림 3(a)]. 이는 마이크로 전기역학 시스템(MEMS) 디바이스에 사용되는 액추에이터와 트랜스듀서를 나노 사이즈로 줄인 것으로, 외부의 전압에 의해 디바이스의 역학적 변형을 일으킬 수 있어 나노 로봇 등에 사용될 수 있다. 이와 같은 액추에이터와 트랜스듀서에 사용할 수 있는 나노 사이즈의

Fig. 3. Applications of lead-free nano-structures. (a) actuator, (b) ultra high-density memory,^[17] (c) energy harvesting, and (d) water splitting.^[28]

비납 압전체를 구현하기 위해서는 앞서 이야기한 바와 같이 압전성을 잃어버리지 않는 최소의 크기와 안정적이고 대량 생산이 가능한 기술에 대해 지속적으로 연구가 필요하다.

나노 압전체는 압전체가 가지고 있는 강유전성에 의해서 초고집적의 메모리로 사용될 수 있다[그림 3(b)]. 강유전성이 유지되는 가장 작은 단위의 나노 압전체를 만들고 각각의 단위 구조체를 전압으로 구동하여 정보를 저장하고 읽을 수 있는 메모리로 사용될 수 있다. 일례로, Lee 등은 $\text{Pb}(\text{Zr},\text{Ti})\text{O}_3$ 나노 점을 산화알루미늄 틀과 펄스 레이저 증착장비를 이용하여 합성하고, 원자 힘 현미경 팁(tip)을 이용하여 나노 점 각각의 우수한 스위칭 특성을 분석하여 176 Gbit/inch²의 정보저장 메모리로 사용될 수 있음을 보였다.^[17]

(2) 에너지 수확

최근 화석 에너지의 급속한 고갈과 지구 온난화의 문제로 인하여, 비납 압전체의 압전 성질을 이용하여 에너지 수확(energy harvesting)을 하고자 하는 연구 결과들이 지속적으로 발표되고 있다[그림 3(c)]. 현재까지 압전에 의한 에너지 수확에 가장 많이 사용된 물질은 산화아연(ZnO) 나노 와이어이다.^[18] ZnO 나노 와이어는 VLS 방법, 수열 합성법 등 다양한 방법에 의해 다양한 기판 위에 성장 가능하다. 특히, 폴리머와 같은 유연한 기판 위에서도 성장이 가능하며, 외부의 미세한

REFERENCES

- [11] R. Sæterli *et al.*, J. Appl. Phys. **108**, 124320 (2010).
- [12] A. Schilling *et al.*, Nano Lett. **7**, 3787 (2007).
- [13] I. I. Naumov *et al.*, Nature **432**, 737 (2004).
- [14] J. Wang *et al.*, Appl. Phys. Lett. **92**, 162905, (2008).
- [15] Y. Zhang *et al.*, Nanotechnology **21**, 015701 (2010).
- [16] C. Burda *et al.*, Chem. Rev. **105**, 1025 (2005).
- [17] W. Lee *et al.*, Nature Nanotech. **3**, 402 (2008).
- [18] Z. L. Wang and J. H. Song, Science **312**, 242 (2006).

진동에 의해서도 큰 전기적 신호를 낼 수 있음이 밝혀졌다. 특히 조지아 텍의 Wang 등은 2006년 ZnO 나노 와이어를 이용하여 약 9 mV의 전기적 신호를 얻을 수 있음을 보고하였고 꾸준히 디바이스 구조를 개선하여 2012년 현재 약 50 V의 전기적 신호를 얻을 수 있음을 보고하였다.^[19]

페로브스카이트 구조의 비납 압전체는 ZnO에 비해서 압전 계수가 매우 크다.^[20] 이와 같은 이유로 인해 최근에는 BaTiO₃, Pb(Zr,Ti)O₃, ANbO₃ (A=K, Na), 그리고 ZnSnO₃를 나노 와이어 형태로 합성하여 이 물질의 압전성에 의한 전기 에너지 수확 디바이스를 구현하고자 하는 연구 결과들이 발표되고 있다. 다양한 형태의 디바이스를 만들어 현재까지 약 1–3 V 정도의 전압을 얻을 수 있음을 보고하였다.^[21–24] 매우 큰 압전 계수에도 불구하고 발생된 전압의 크기가 ZnO에 비해 작은 것에 대해서는 여러 가지 이유가 있을 수 있다. 예를 들어, 페로브스카이트 구조의 비납 압전체는 ZnO에 비해서 일차원의 나노 와이어 형태로 성장이 잘되지 않는다. 뿐만 아니라, 폴리머와 같은 유연한 기판 그리고 SrTiO₃와 같은 단결정 기판 위에서도 기판에 수직으로 잘 성장되지 않는다. 이와 같은 단점이 있기는 하지만, 비납 압전체의 압전 도메인을 외부의 전기장에 의해서 한 방향으로 배열시킬 수 있다는 장점이 있다. 이와 같은 장단점을 보완하고, 디바이스 구조를 개선한다면 향상된 전기적 신호를 얻을 수 있을 것으로 예상된다.

압전체는 압전성 이외에 초전성(pyroelectric)과 광전압성(photovoltaic)을 가지고 있다. 초전성은 외부의 열에 의해 그리고 광전압성은 빛에 의해 전기적 신호를 얻을 수 있어[그림 3(b)] 열전소재, 태양광소재를 대체하거나 혹은 보완하는 응용에 적용될 수 있다.^[26,27]

(3) 물 분해 촉매

나노 구조는 매우 큰 부피 대 표면적의 비에 의해서 촉매 디바이스로도 사용할 수 있다. Hong 등은 일차원 구조를 가지고 있는 BaTiO₃를 이용하여, 외부의 역학적 진동에 의해 수소가 생성될 수 있음을 보였다[그림 3(d)]. 이는 초음파와 같은 역학적 진동에 의해 표면에 전하가 유도되고, 유도된 전하

가 물을 H₂와 O₂로 분해하는 산화 환원 반응을 유발하였기 때문으로 설명하였다.^[28]

결론

나노 사이즈의 비납 압전체를 이용하여, 압전, 강유전, 열전, 광전압 성질을 연구하거나 혹은 이를 이용하여 메모리, 에너지 수확 디바이스로 응용을 연구하기 위해서는 선행적으로 해결해야 할 과제들이 있다. 먼저, 나노 구조체 합성 방법의 개선이 필요하다. 양극 산화 알루미늄과 같은 틀을 이용하면 손쉽게 나노 구조를 만들 수 있으나 거의 대부분 다결정이고 반면 수열합성법과 같은 방법을 이용하면 단결정을 얻을 수 있으나 나노 구조의 사이즈, 모양, 종횡비를 제어하는데 어려움이 있다. 여러 가지 시료 합성 방법의 장단점을 고려하여,^[29] 나노 구조를 제어하고 우수한 단결정을 합성할 수 있는 방법이 필요하다. 그리고 나노 구조체의 합성과 더불어 정렬시키는 방법의 개발이 필요하다. 최근에 폴리머를 사용하는 방법,^[30] 씨앗 층(seed-layer)을 사용하는 방법^[31] 등이 제시되고 있으나 재현성과 다른 물질로의 적용가능성이 현재까지는 낮아 보인다. 이를 해결하기 위해서는 물리, 화학, 재료 공학간의 다학제간 공동의 연구가 필요하고 이의 해결은 나노 구조의 비납 압전체에 대한 연구를 현저히 확대시킬 것이다.

REFERENCES

- [19] Z. L. Wang and W. Wu, *Angew. Chem. Int. Ed.* **51**, 2 (2012).
- [20] Y. Qi and M. C. McAlpine, *Energy Environ. Sci.* **3**, 1275 (2010).
- [21] X. Chen *et al.*, *Nano Lett.* **10**, 2133 (2010).
- [22] S. Xu *et al.*, *Nature Comms.* **1**, 93 (2010).
- [23] K.-I. Park *et al.*, *Nano Lett.* **10**, 4939 (2010).
- [24] J. H. Jung *et al.*, *ACS Nano* **5**, 10041 (2011).
- [25] J. M. Wu *et al.*, *ACS Nano* **6**, 4335 (2012).
- [26] Y. Zheng and C. H. Woo, *J. Appl. Phys.* **107**, 104120 (2010).
- [27] A. N. Morozovska *et al.*, *J. Appl. Phys.* **108**, 042009 (2010).
- [28] K.-S. Hong *et al.*, *J. Phys. Chem. Lett.* **1**, 997 (2010).
- [29] F. Teng *et al.*, *Solid State Sci.* **12**, 952 (2010).
- [30] Y. Lin *et al.*, *Appl. Phys. Lett.* **95**, 122901 (2009).
- [31] Y. Xu *et al.*, *J. Mater. Chem.* **22**, 23221 (2012).