

멀티페로익스(Multiferroics)

멀티페로익스 기술의 실용화를 위한 기술적 과제

| 정태희, 동향정보분석팀



미래선도기술 이슈분석보고서는 혁신형 중소기업 정보분석 지원사업의 일환으로 작성된 보고서로서, 유망 기술에 대한 이슈분석을 통해 국내 기업들이 자사에 적합한 사업아이템 발굴 기회를 극대화 하는데 목적이 있다. 이슈 분석 대상은 글로벌 동향 브리핑(GTB) 사업에서 축적한 약 10년간의 글로벌 모니터링 정보를 키워드 빈도분석 후 수요 조사를 통해 정하였다. 또한 국내외 연구개발동향, 산업동향 및 기술/실용화/과급효과 등의 측면에서의 이슈제기 및 분석을 해당분야 전문가와 공동으로 수행함으로써 수요자 중심의 보고서가 되도록 노력하였다.

2006 미래선도기술 이슈분석보고서

• 나노셀룰로오즈 보강 복합재료	• 광촉매 박막제조기술
• 차세대 하드디스크 HAMR	• 산업용 무선 필드버스
• 멀티페로익스(Multiferroics)	• P2P 네트워크
• 탄소나노튜브	• 센서네트워크 기술
• 휴대용 연료전지	• 온라인 게임
• 칩내장형 임베디드 기술	• 임베디드 기술
• 유전자 치료	• 심진 부동산소수점 연산기
• 열화학적 복합전환 공정	• 게임산업
• 자기 냉장고	• 나노소재를 이용한 전자소자
• 유기 반도체 태양전지	• 유기반도체(Organic Semiconductors)
• 충전기기용 나노절연재료	• 공기오염센서
• 무선 통신망간의 간섭	• 위성항법시스템 시험장(GATE)
• 이동통신-무선랜 통합망의 보안	• 위성항법시스템 소프트웨어 수신기
• 해외선진국 반도체장비 기술동향	• 광촉매의 성능 및 응용 기술 현황
• 동유럽의 VoIP 사업현황	• 해외 선진국의 DMB/DAB 기술동향
• 지능형 자동차에 사용되는 텔레매틱스 기술동향	• 신약개발을 위한 RNAi 제품 현황
• 주요 선진국의 냉동·공조 기술 현황	• 해외 선진국의 위성항법 시스템 기술 동향
• 영상진단기기 및 초음파영상진단기기 제품 현황	• 최근의 게임시장 동향
• 해외 주요국의 디지털 전자제품 동향	• 해외 주요국의 디지털 전자제품 동향

Contents

1 | 서론

멀티페로익스 기술의 개표	05
멀티페로익스 기술의 특성	07
이슈 분석의 필요성	08

2 | 국내외 연구개발 동향

국내외 연구개발 동향 및 전망	10
멀티페로익스 기술의 응용 분야 및 파급효과	13
국내외 기술비교 개발	14

3 | 이슈 분석 및 제기

멀티페로익스 기술의 실현을 위한 문제점 분석	16
멀티페로익스 기술에서 최근 또는 향후에 이슈가 되는 내용	18
멀티페로익스 기술의 경제적 파급 효과	21

참고 문헌	22
-------	----

서론

1

| 멀티페로익스 기술의 개요

| 멀티페로익스 기술의 특성

| 이슈 분석의 필요성

1 서론

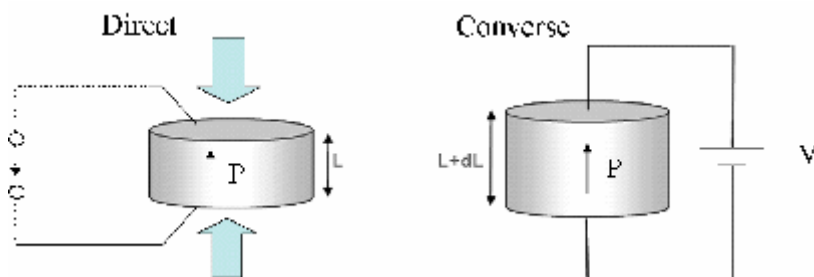
| 멀티페로익스 기술의 개요

가. 멀티페로익스의 정의

- 두가지 이상의 "강(ferro)"특성을 갖는 물질 또는 구조를 멀티페로익스(Multiferroics)라고 한다. 즉, 강자성(ferromagnetics)과 강유전성(Ferroelectronics), 강유전성과 강탄성(Ferro elastics), 또는 강자성과 강탄성의 특성을 함께 갖는 물질 또는 구조를 말한다.(참고문헌4)
- 강자성체(ferromagnetics)는 자발 자기 분극(spontaneous magnetic polarization)을 가지는 물질로, 가해지는 자기장(magnetic field)의 방향에 따라 자화 방향(magnetic direction)이 변환될 수 있다.
- 강유전성 물질들(Ferro electronics)은 자발 전기 분극(spontaneous electric polarization)을 가지는 물질들로, 가해지는 전기장(electric field)의 방향에 따라 전기 분극의 방향은 변할 수 있다.

나. 멀티페로익스의 응용예

- 그림1은 압전체의 작동원리를 설명하고 있다. 압전체는 전기적인 특성을 기계적인 특성으로 변환시키거나 그 기계적인 특성을 전기적인 특성으로 변환시킨다.
- 산업체에서 사용되는 센서들(sensors)은 주로 강유전성(Ferro electronics)을 갖는 물질로 만들어진다. 많은 강유전체 물질들은 또한 강탄성체(Ferro elastics)이기도 하다. 즉, 전기분극의 변화는 모양(shape)의 변화를 동반한다. 이러한 물질들은 초음파 검출기(sonic detector)에서 음파(sound waves)를 전기적인 신호로 변화하는 데에 사용되고 있다. 또한, 전기적인 충격(electric impulse)은 액추에이터(actuator)의 동작(motion)으로 바꾸기도 한다.(참고문헌4)



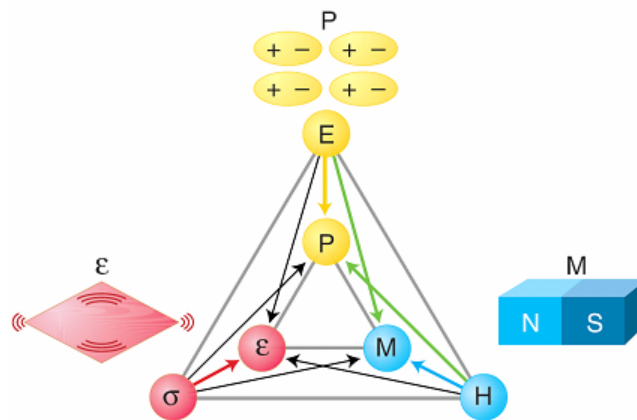
[그림 1] 압전체 (piezoelectrics)

자료 출처: 참고문헌 6

다. 멀티페로익스의 변환가능 상태

- ①분극(polarization)
- ②자화(magnetization)
- ③스트레인(strain)

- 그림2은 전기적인 분극(Electric polarization, P), 자화(Magnetization, M), 그리고 스트레인(strain,)이 전기장과 자기장, 스트레스에 의해 직접적으로 영향을 받는 것을 보여준다. 그렇지만, 물질이나 구조에 따라 전기장이 자화나 스트레인에 영향을 줄 수도 있고, 스트레스가 분극과 자화에 영향을 줄 수도 있다.
- 멀티페로익스(Multiferroics)는 둘 또는 그 이상의 변환가능한 상태(state), 즉, 분극(polarization), 자화(magnetization), 또는 스트레인(strain)을 갖는다.
- 멀티페로익스내에서의 스핀-격자간의 상호작용(spin-lattice coupling)은 다양한 형태로 나타난다. 예를 들어 자전기 효과(Magnetoelectric effect), 분극 변화를 통한 상전이(polarization change through field-induced phase transition), 자기-유전 효과(magneto-dielectric effect), 그리고 자기 전이온도에서의 비정상 유전특성(dielectric anomalies at magnetic transition temperatures)등이다(참고문헌4).



[그림 2] 전기장(Electric field), 자기장(Magnetic field) H, 그리고 스트레스(stress)의 상호작용

자료 출처: 참고문헌4

1 서론

| 멀티페로익스 기술의 특성

- 전기적 분극(Electric polarization), 자화(Magnetization), 스트레인(strain)의 조합에 따라 다양한 형태의 멀티페로익스 효과 (Multiferroics effect)가 가능하지만, 가장 주로 연구되는 것은 전기적 분극과 자화의 특성을 동시에 이용하는 자전기 효과 (Magnetoelectric effect)이다.

가. 자전기 효과 (Magnetoelectric effect)의 정의

- 이것은 전기장(electric field)와 자기장(magnetic field)의 상호작용(interaction)에 의해 새로운 특성을 얻는 것을 의미이다. 즉, 전기장을 인가해서 자화 (magnetization)를 얻거나, 자기장을 인가해서 전기적 분극(polarization)을 얻는 것이다.
- 전자기학(electromagnetics)은 전기장(electric field)과 자기장(magnetic field)이 일반적으로 서로 독립적이지 않고, 상호의존(coupling)한다는 사실에서 발생하였다. 자기장의 변화는 전기장(전자기 유도, electromagnetic induction)을 만들어 내고, 반면에 전기적인 극성을 띤 입자(electronic charge)의 움직임이나 전류는 자기장을 발생시킨다.

나. 자전기 효과 (Magnetoelectric effect)의 응용가능성

- 멀티 페로닉스, 즉 강자성과 강유전성을 모두 갖는 물질들은 큰 자전기 효과 (Magnetoelectric effect)를 나타낼 가능성이 있다. 만약 자기적 특성과 전기적 특성이 매우 밀접하게 연관(coupling)된다면, 큰 자전기 효과(Magnetoelectric effect)가 약한 전기장 또는 자기장에서도 유도될 수 있을 것이다.
- 기존의 기술들이 전기장을 이용해서 분극 특성을 얻거나 자기장을 이용해서 자화를 얻는 것에 기초한 것이라면, 자전기 효과를 이용한 기술은 새로운 분야로의 응용가능성이 높다.

1 서론

| 이슈 분석의 필요성

가. 디바이스의 초형화/다기능화 추세

- 디바이스(device)의 초형화(miniaturization)의 추세는 전기적 특성과 자기적 특성을 결합한 멀티기능(multifunction)의 물질에 관심을 갖게 하였다. 즉, 하나의 디바이스 부품이 한 가지 이상의 일을 할 수 있는 것이다.
- 최근의 전자제품의 경향은 소형화, 경량화, 다기능화이다. 즉, 크기는 작아지고, 무게는 가벼워지면서도 한 가지 이상의 여러 가지 기능을 가지는 멀티 기능의 제품들이 계속해서 시장에 상품화되고 있다. 따라서, 한 가지 제품에 멀티기능을 갖게 하기 위해 여러 부품을 장착시키는 것보다 하나의 부품이 여러 기능을 갖는 멀티기능의 물질에 커다란 관심이 모아지고 있다.

나. 상호작용에 의한 새로운 기능의 창출

- 강자성(ferromagnetics)과 강유전성(ferroelectrics)의 두 가지 특성을 가지는 멀티페로익스(Multiferroics)가 주목을 받는 이유는 그들이 강자성과 강유전성의 두 가지 특성을 가지고 있기때문만이 아니라, 자기적 분극(magnetic polarization)과 전기적 분극(electric polarization) 사이의 상호작용(interaction)을 통해서 추가적인 기능들을 만들어 내기 때문이다(참고문헌 4).
- 예를 들어, 자전기 효과(Magnetoelectric effect), 즉 전기장에 의해 자화(magnetization)를 만들어내거나, 자기장에 의한 분극(polarization)을 만들어 내는 현상은 전기장에 의해 작동되는 자기 데이터 저장(magnetic data storage)시스템과 같은 완전히 새로운 장치 개념을 만들어 낼 수있다. 따라서 이러한 멀티페로익스 기술에 대해서 그 연구동향 및 기술의 실현가능성에 대해서 조사, 분석해 보는 것은 매우 중요한 일이다.

국내외 연구개발 동향

- 2 | 국내외 연구개발 동향 및 전망
- | 멀티페로익스 기술의 응용 분야 및 파급효과
- | 국내외 기술비교 개발

2 국내외 연구개발 동향

| 국내외 연구개발 동향 및 전망

가. 자전기 효과의 역사

- 고체내의 자전기 효과(Magnetolectric effect), 즉, 전기장에 의한 자화유도와 자기장에 의한 전기적인 분극의 유도에 대한 개념은 19세기에 이미 개발되었다.
- 1960년대 러시아 과학자들에 의해 자전기 효과가 고체내에서 실제로 확인된 이후에, 많은 연구들이 행해졌다.

그렇지만, 관찰된 자전기 효과의 크기는 실제로 응용하기에는 너무 작았다.

나. 최근의 연구 동향

- 최근 자기 및 전기 정렬 공존(coexistence of magnetic and electric ordering)에 대한 이론적인 이해와 박막 성장 기술(thin film growth) 및 자기(magnetic domain) 및 전기 도메인(electric domain)의 실험적인 관찰 방법의 진보를 통해 자전기 멀티페로익스(Magnetolectric Multiferroics)에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다.

다. 자전기 효과를 나타내는 물질

- 페로브스카이트 구조(perovskite structure)의 자성물질에서 자기장을 인가하였을 때 강유전성 상전이(phase transition)를 일으키는 것과 육방정 구조(hexagonal)의 자성물질에서 전기장을 인가하였을 때 강자성 특성을 나타내는 자전기 효과가 많이 관찰되었다.
- 또한 자전기 메모리 효과(Magnetolectric memory effect)와 강유전체 도메인(ferroelectric domain)의 자기 스위칭(magnetic switching)도 보고되었다 (참고문헌4).

① 페로브스카이트 구조(perovskite structure)

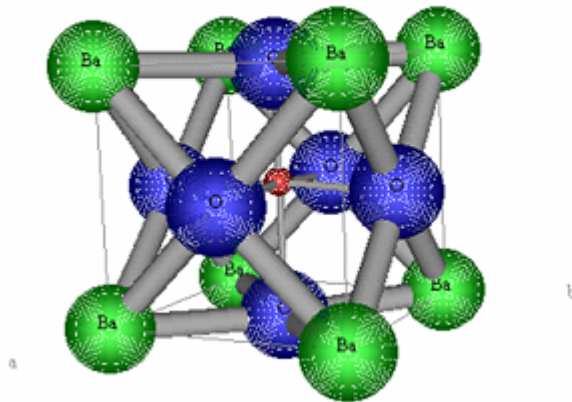
- 최근에 자성 이온(magnetic ions, Fe, Co, Ni)과 Bi, Pb 이온을 동시에 갖는 페로브스카이트 구조(perovskite structure)의 물질들이 강유전성 및 자발자화(spontaneous magnetization)를 갖는 것으로 밝혀졌다. 이러한 물질들은 광학 주파수 (optical wavelength)영역에서 매우 흥미있는 선형(linear) 및 비선형(non-linear) 광학 특성을 보이지만, 전기적으로 기초상태에서의 결합은 여전히 매우 작다 (참고문헌 4, 5).
- 지금까지 자전기 효과(Magnetolectric effect)를 나타내는 페로브스카이트 결정구조(perovskite structure)의 물질로는 BiFeO3 및 BiMnO3등이 알려져 있다.(참고문헌 4,5)

② 육방정 구조(hexagonal)

- 육방정(hexagonal) 구조로 자전기 효과를 나타내는 물질로는 $R\text{MnO}_3$ (R은 희토류 이온(rare earth))가 알려져 있다(참고문헌 4, 5).

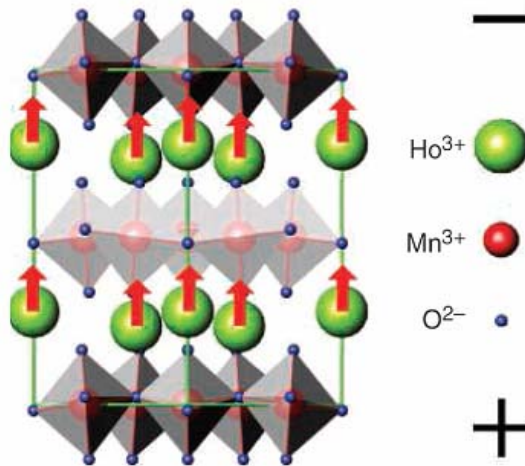
③ 기타 자전기 효과를 나타내는 물질

- 페로브스카이트 및 육방정 이외에 지금까지 자전기 효과(Magnetoelectric effect)를 나타내는 물질로는 boracite, BaMF_4 (M은 2가 전이금속이온(divalent transition metal ion)), 그리고 희토류 몰리브덴(rare-earth molybdates) 등이 알려져 있다 (참고문헌 4, 5).



[그림 3] 페로브스카이트 결정구조 - BaTiO_3

자료출처: 참고문헌6



[그림 4] 페로브스카이트 구조(perovskite structure)에서의 자전기 효과(Magnetoelectric effect) - 육방정 HoMnO_3

자료 출처: 참고문헌 1

라. 향후 전망

①단일상의 한계

- 단일상(single phase) 멀티페로익스는 단기간에 응용하기에는 좋지 않다. 왜냐하면, 실온(room temperature)에서 큰 전기적 분극과 자기적 분극을 동시에 갖는 물질이 현재까지는 개발되지 못했다. 이에 대한 이유로 최근에 자화를 갖는 이온들이 전기적 분극을 최소화 한다는 연구결과가 발표되었다(참고문헌 3).

②복합체의 등장

- 전기적 정렬(electric ordering)과 자기적 정렬(magnetic ordering)을 단일상 에서 결합(coupling)하는 것에 있어서의 어려움은 두 개의 서로 다른 물질, 즉 강유전성 물질과 강자성 물질을 결합한 멀티페로익스 구조가 제안되었다.

③2가지 복합체의 접근 방법

- 복합체적인 접근 방법은 실제로 크게 두 가지로 다시 나눌 수 있다. 즉, 강자성체와 강유전체를 서로 혼합해서 단일층을 만드는 것과 강자성체와 강유전체 각각을 층상으로 쌓아 다층막을 만드는 방법이다.

④복합체에서의 탄성 요소들간의 상호작용

- 이같은 복합체(composite)에서는, 강자성 물질과 강유전성 물질의 탄성요소들(elastic components)간의 상호작용(coupling)에 의해 자전기 효과(Magnetoelectric effect)가 발생한다.
- 강유전성 물질내에서 전기장은 스트레인(strain)을 유도한다. 이 스트레인은 강자성물질에 전달되고, 거기에서 자화(magnetization)가 일어난다. 만약에 인터페이스(interface)에서의 상호작용(coupling)이 크다면, 이 자전기 효과도 클 것이다. 그러므로, 넓은 표면적(surface area)(다층박막(multilayered thin film)과 같은 강탄성 요소(Ferro elastic components)들이 요구된다 (참고문헌1).

$$ME \text{ effect} = \frac{\text{magnetization}}{\text{strain}} \times \frac{\text{strain}}{\text{electricfield}}$$

2 국내외 연구개발 동향

| 멀티페로익스 기술의 응용 분야 및 파급효과

- 자전기 멀티페로닉스(Magnetoelectric Multiferroics)는 여러 분야에 응용할 수 있을 것이다. 예를 들어 자기장과 전기장을 서로 변환시켜주는 변환기(transducers), 감쇠기(attenuators), 필터(filters), 자화의 전기 조절(electric control of magnetization)를 기반으로 한 데이터 기록 장치(data recording devices) 등이다.
- 예를 들어, 전자기석(electromagnet)은 전기선을 코일(coil)의 형태로 감거나 단순한 루프(loop)의 형태인 데, 크기가 크고, 제조하기가 어렵다. 간단히 전기장이나 전류를 가했을 때 작동되는 전자기석을 나노나 마이크로 미터 크기의 물질(코일의 형태가 아닌)로 만들 수 있다면, 여러 전자제품들에 이용할 수 있을 것으로 산업적 파급 효과가 무척 클 것이다.

2 국내외 연구개발 동향

| 국내외 기술비교 개발

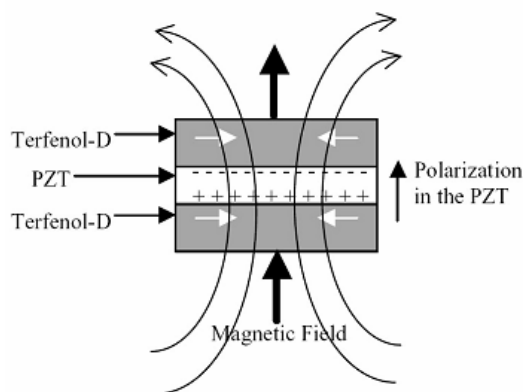
- 멀티페로닉스에 대한 연구는 아직까지는 주로 학교에서 이루어지고 있으며, 산업계에서는 아직까지 연구를 시작하고 있지 않다. 많은 연구들이 기존에 강유전체나 강자성체를 연구하던 곳에서 그것의 응용선상에서 연구를 진행하고 있다.

가. 단일상에 대한 연구 현황

- 단일상에 대한 연구는 주로 펜실베이니아 주립대학에서 주로 하고 있는 데, 이 곳은 기존의 강유전체에 대해서 가장 활발한 연구가 진행되고 있는 곳이다.

나. 복합체에 대한 연구 현황

- 복합체를 단일층으로 만들기 위해서는 강자성체 물질(Ni, Co, Fe, CoFe2O3 등)과 강유전체 물질((PbZr1-xTixO3, PZT)을 서로 섞은 후에 혼합을 위해서 열을 가해야 한다. 복합체를 다층 구조로 만드는 것은 강유전체 물질(PbZr1-xTixO3, PZT)과 강자성 물질(Tb1-xDyxFe2, Terfenol-D)을 각각 제조한 후에 중간에 도전성 접착제를 이용해서 2가지 물질을 결합시키는 것이다. 이것에 대한 많은 연구들이 중국에서 발표되었다 (참고문헌 9,10).
- 특별히, 수 cm크기의 복합체에 대한 연구는 미국의 버지니아 기술 대학과 중국 베이징의 칭화 대학교에서 활발히 연구 결과를 발표하고 있다 (참고문헌 8,9,10).
- 또한 다층박막기술(multilayer thin film technology)을 이용하여 자기 저장(magnetic storage)을 위한 새로운 개념의 복합체에 대한 연구가 미국 피츠버그에 위치한 카네기 멜론 대학교에서 진행중인 데, 이곳은 강자성체에 대해서 많은 연구를 하고 있는 곳이다.



[그림 5] Terfenol-D와 PZT를 적층시킨 멀티페로익스

자료 출처: 참고문헌1

이슈 분석 및 제기

3

|멀티페로익스 기술의 실현을 위한 문제점 분석

|멀티페로익스 기술에서 최근 또는 향후에 이슈가 되는 내용

|멀티페로익스 기술의 경제적 파급 효과

3 이슈 분석 및 제기

| 멀티페로익스 기술의 실현을 위한 문제점 분석

가. 단일상(single phase) 멀티페로닉스

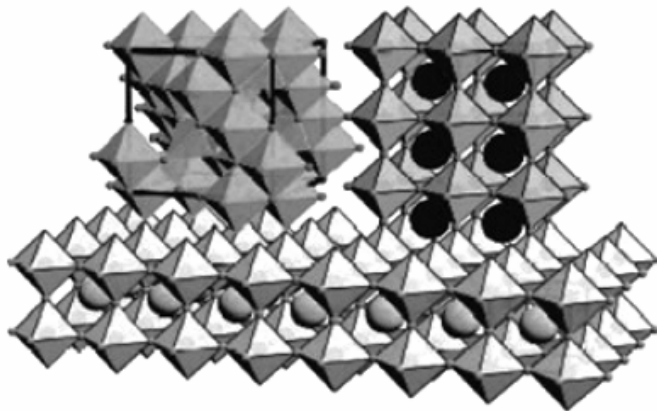
- 강자성과 강유전성을 결합한 멀티페로닉스를 설계하려는 시도들은 예상치 못했던 어려움들에 봉착해 있다.
- 일반적으로 자기장을 인가하면 자발 분극 (spontaneous polarization)의 작은 변화 (modulation)가 관찰된다. 자기장에 의한 강유전체 도메인(ferroelectric domain)의 완전한회전 (complete rotation)(비가역적인 변화(non-reversible))은 거의 관찰되지 않는다. 따라서, 큰 상호작용(large coupling)이 일어날 수 있는 원인과 조건을 찾아야만 한다.
- 단일상 멀티페로익스의 문제는 비록 강유전성과 강자성을 모두 갖는 많은 물질들이 있지만, 이들 사이의 커다란 상호작용(coupling)을 갖는 물질은 없다는 것이다. 또한, 저온에서는 큰 상호작용을 보이던 물질들도 온도를 높여서 실온까지 오면, 상호작용이 거의 사라지고 자전기 효과가 실용화하기에는 극히 작다는 것이다. 이를 해결하기 위해서는 단일상 멀티페로익스에서는 강유전성의 기원에 대해서 기본적인 연구가 필요하다. 또한, 실온에서 강자성 및 강유전성을 동시에 가지면서, 충분히 큰 절연특성을 가지고 있어서, 전기적인 분극을 유지할 수 있는 물질에 대한 탐색이 필수적이다.

나. 혼합형 복합체(mixed composite) 멀티페로익스

- 단일상의 문제를 극복하기 위한 복합체적인 접근은 구성 요소의 선택, 비율(ratio), 그리고 미세구조(microstructure)에 따라 다양한 자전기 반응을 나타내었다. 저온에서 평균한 단일상(single phase)의 자전기 효과보다 1000배에서 10만배가 큰 자전기 효과를 실온에서 실제로 얻었다.
- 혼합형 복합체 멀티페로익스, 즉 강자성 물질과 강유전성물질을 혼합하는 것은 새로운 문제를 발생시켰다. 일반적인 강자성 물질들은 전기전도성이 매우 높다. 강유전성 물질이 그 특성을 내기 위해서는 전류가 흘러서는 안된다. 왜냐하면 강유전체는 전하(charge)의 분극을 통해서 강유전성을 발휘하는 것이기 때문이다.
- 따라서, 전기전도도를 줄이기 위해서는 강자성 물질의 혼합 비율을 줄여야만 한다. 또한, 대부분의 강자성 물질들은 산화되기 쉽고, 산화되면 그 자기적 특성을 잃거나 크게 감소하게 된다.
- 강유전성 물질들은 대부분이 산화물이다. 이 두 가지 물질들에게서 높은 상호작용을 얻기 위해서는 이들의 결합력을 높여야 하고, 이를 위해서는 열을 가하여 두 물질을 결합시켜야 한다. 그렇지만, 고온에서는 산화반응이 실온에서보다 훨씬 빠른 속도로 일어난다. 이를 해결하기 위해, 강자성 물질이면서도 산화물인 코발트 페라이트를 이용한 연구가 진행되고 있다 (참고문헌 10).

다. 다층막형 (laminated structured) 멀티페로익스

- 다층막형에서는 강자성 물질과 강유전성 물질이 각각 분리되어 있기 때문에 혼합형에서 나타나는 강자성 물질을 통한 전류 흐름에 의한 강유전성의 파괴는 피할 수 있다. 따라서, 서로 다른 두 개의 물질을 접합, 즉, 은산화물과 같은 도전성 접합체를 사용해서 두 개의 층을 접합시킨다(참고문헌 8,9,10).
- 그림6은 스피넬구조의 코발트 페라이트(왼쪽)과 페로브스카이트 구조의 티탄산바륨(오른쪽)이 페로브스카이트 구조의 기관위에 정렬된 모습을 보여준다.
- 복합체 멀티페로익스에서는, 강자성-강유전성-강탄성 상호작용에 대한 좀더 깊이 있는 이해가 필수적이다.
- 기존의 선형 탄성 모델이 원자 단위에서 적용되지 않기 때문에 새로만 이론의 개발이 요구된다. 문제는 어떻게 그러한 멀티페로익스 물질을 설계하느냐 하는 것과 어떻게 강자성과 강유전성의 상호작용을 증가시키느냐 하는 것이다.



[그림 6] 멀티페로익스 BaTiO3/CoFe2O4

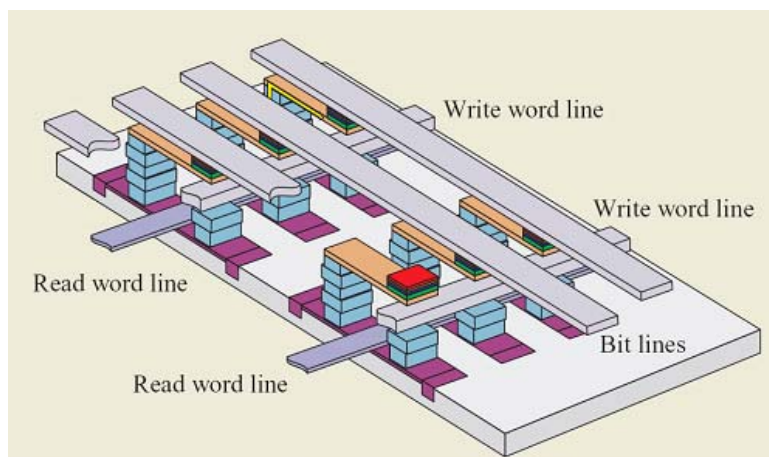
자료 출처: 참고문헌1

3 이슈 분석 및 제기

| 멀티페로익스 기술에서 최근 또는 향후에 이슈가 되는 내용

가. MRAM에의 응용

- 멀티페로익스를 MRAM(magnetic RAM)에 응용하고자 하는 연구가 미국의 여러 대학, 특히 카네기 멜론 대학교에서 진행되고 있다.
- 강유전체(ferroelectrics)의 압전특성(piezoelectric property)과 강자성체의 자기변형(magnetostriction) 특성을 MRAM에 이용하고자 하는 것이다.
- 자기변형이란 자기장을 자성체에 인가하였을 때에 자성체의 모양이 변하는 것을 의미한다. 전기장을 압전체에 인가하면 스트레인(strain)이 발생하고, 이 스트레인은 자기변형특성을 가진 물질의 자기 방향을 바꾼다는 것이다.
- 이러한 현상을 MRAM에 응용할 수 있다. 즉, 전류대신에 펄스된 전압을 동조된 펄스 워드 라인 전류와 함께 가함으로 자화의 방향을 바꿀 수 있다면, 결과적으로 MRAM에서 자화를 변화시키는 데에 요구되는 워드 라인의 전류 크기를 크게 감소시킬 수 있다(참고문헌7).
- 정보를 기록할 때에 워드 라인의 열손실이 자기 메모리에서의 주된 파워 손실이기 때문에, MRAM의 기록밀도를 높일 수록 이러한 파워 손실은 큰 문제가 될 가능성이 있다.
- 따라서 멀티페로익스 물질을 이용해서 전류가 아닌 전압을 통해서 자기방향을 바꿀 수 있다면, 전류에 의한 파워 손실을 크게 줄일 수 있을 것으로 예상된다(참고문헌 7). 그렇지만, 여기에 적합한 멀티페로익스 물질을 설계, 제조하는 것이 근본적인 이슈가 되고 있다.



[그림 7] MRAM 구조

자료 출처: 참고문헌2

나. 물질(재료) 개발

- 이러한 멀티 페로닉스 복합체는 전기적인 특성을 기계적인 특성으로 바꾸고, 이것을 다시 자기적인 특성으로 바꾸는 것이다. 대표적인 압전 특성을 보이는 물질로는 PZT ($PbZr_{1-x}Ti_xO_3$)가 있고, 대표적인 자기변형 특성을 보이는 물질로는 Terfenol-D ($Tb_{1-x}Dy_xFe_2$)가 있다.
- 이 두 물질 모두 매우 강한 이방성(방향에 따라서 물질 특성이 다른 것)을 보이고 있어서, 큰 자전기 효과를 내기 위해서는 특정 방향으로 두 물질의 박막을 성장시켜야 한다.
- 이러한 것을 위해서는 고온에서의 열처리(annealing)가 필수적이다. 그러나 이러한 고온 열처리는 두 물질간의 상호 확산(diffusion)을 일으킬 수 있다. 특히, 산소의 확산은 치명적으로 두 물질의 특성을 떨어뜨린다.
- 또한, 다층박막의 면에 수직방향(perpendicular direction)으로의 자화(magnetization)를 위해서 박막에 압축 스트레스(compressive stress)를 주어야 하는 것도 커다란 과제이다.
- 표1과 2에서는 대표적인 자기 변형 물질들과 강유전성 물질들에 대해서 정리하였다.

[표 1] 실온에서의 자기 변형(magnetostrictive) 물질들

material	$3/2s(10^{-6})$	Tc (°C)
Fe	-14	770
Co	-93	1131
Ni	-50	358
Fe_3O_4	60	585
$CoFe_2O_4$	-165	520
$Y_3Fe_5O_{12}$	-3	275
$SmFe_2$	-2340	415
$GdFe_2$	59	525
$TbFe_2$	2630	431
$DyFe_2$	650	362
$HoFe_2$	120	332
$ErFe_2$	-449	320
$TmFe_2$	-185	287

자료 출처:참고문헌 6

[표 2] 강유전성 물질들(Ferroelectrics)

<i>Material</i>	<i>Structure / Composition</i>	<i>Curie point (°C)</i>	<i>Dielectric Constant (kHz)</i>	<i>Piezoelectric strain constant (10⁻¹² C/N)</i>
Non MPB Based Materials		T _c	ε _r	d ₃₁
BaTiO ₃	Perovskite	120	1500	190
(Na _{0.52} Bi _{0.48})TiO ₃ (NBT)	Perovskite	335	500	74
(Pb,Ba)Nb ₂ O ₇ (PBN)	Tungsten bronze	400	300	85
PbTiO ₃ (modified PT)	Perovskite	470	190	56
SiO ₂ (single crystal)	α-Quartz (Non-ferroelectric)	573 (a-b)	3.5 (ε ₁₁)	(d ₁₁)
Na _{0.5} Bi _{0.5} Ti ₄ O ₁₅	Aurivillius (Bismuth Layer)	>600	140	18
Sr ₂ (Nb _{0.5} Ta _{0.5}) ₂ O ₇	Perovskite Layer Structure (PLS)	820	75 (1MHz)	2.6 (d ₂₄)
LiNbO ₃ (LN - single crystal)	Corundum	1150	27.8	6
ALN (thin film)	(Non-ferroelectric)	>1150	12	5.5

자료 출처: 참고문헌 6

3 이슈 분석 및 제기

| 멀티페로익스 기술의 경제적 파급효과

가. 산업적 응용분야

- 지금의 전자산업의 추세는 소형화, 경량화, 다기능화이다. 이러한 경향을 나타내는 대표적인 제품이 휴대폰이다.
- 휴대폰의 크기는 1990년대에 비해서 1/3로 크기가 줄었다. 이에 따라, 무게도 1/3-1/4 정도로 줄어들었다. 앞으로의 추세는 멀티기능에 있다. 단순한 전화기가 아니라, 디지털 카메라, 게임, 사진, 계산기, 스케줄러(일정관리), 네비게이션 시스템, 디지털 방송 수신까지 멀티기능의 추가가 가능하다. 이러한 다양한 기능들을 하나의 휴대폰에 모두 집어넣기 위해서는 하나의 부품이 여러 가지 기능을 수행해 낼 수 있는 멀티페로익스 기술이 필수적이다.
- 특히, 전자기 효과(Magnetoelectric effect)를 이용하는 멀티페로익스는 기존의 센서와 데이터 기록 시스템에 커다란 변화를 가져올 것으로 예상된다.
- 현재 수없이 많은 센서들이 산업 전반에 걸쳐서 사용되고 있다. 또한 데이터 기록 시스템은 데스크탑 컴퓨터나 노트북 컴퓨터, PDA, MP3플레이어, 휴대폰 등에 광범위하게 사용되고 있다.

나. 경제적 파급 효과

- 전자기 효과를 이용한 멀티페로익스는 기존의 센서 및 데이터 기록 시스템에 응용될 가능성이 매우 높다. 산업체에서 사용되는 핵심 부품이 센서이고, 포터블 디지털 전자제품의 대부분이 데이터 기록 시스템을 장착하고 있는 것을 고려하면, 멀티페로익스의 산업적인 파급 효과는 무척이나 클 것이다.
- 또한, 멀티페로익스는 전자기 효과에만 한정되지 않는다. 예를 들어 광학적인 특성, 기계적인 특성, 열적인 특성을 전기적인 특성, 자기적인 특성과의 결합을 통해서 새로운 멀티페로익스를 구현할 수도 있을 것이다. 즉, 기존에 없었던 새로운 분야를 창출해 낼 수 있고, 새로운 제품 시장을 형성할 수도 있을 것이다.
- 이것은 우주 공간이나 깊은 땅속과 같은 극한 상황이나, 또는 사람의 몸속과 같은 특수한 분야에서 사용하는 데에 적합한 새로운 물질이나 장치의 개발로 이어질 가능성도 있다. 따라서 멀티페로익스가 실용화되었을 때의 경제적 파급 효과는 상상할 수 없을 정도로 크다고 할 수 있다. 따라서 이에 대한 체계적인 연구가 국내에서도 시작할 필요가 있다.

참고문헌

1. M. Fiebig (2005) "Revival of the Magnetoelectric effect", J. Phys.D: Appl. Phys. Vol.38, p.R123-R152.
2. W. J. Gallagher, S. S. P. Parkin (2006), "Development of the magnetic tunnel junction MRAM at IBM: From first junctions to a 16-Mb MRAM demonstrator chip", IBM, J. RES. & DEV. Vol.50, p. 5-23A
3. N. Hur, S. Park, P. A. Sharma, J. S. Ahn, S. Guha & S-W. Cheong (2004), "Electric polarization reversal and memory in a multiferroic material induced by magnetic fields", Nature, vol.429, p.392-395.
4. N.A. Spaldin, M. Fiebig (2005), "The Renaissance of Magnetoelectric Multiferroics", Science, vol 309, p.391-392.
5. Y. Tokura (2006), "Multiferroics as Quantum Electromagnets", Science, vol 312, p.1481-1482.
6. C. Randall (2006), Classnote of "Dielectric and others", director of CDS(Center of Dielectric Study), Pennsylvania State University.
7. J. Zhu (2006), Classnote of "magnetic materials and devices", director of DSSC(Data Storage System Center), Carnegie Mellon University.
8. S. Dong, J. F. Li, D. Viehland(2005), "Voltage gain effect in a ring-type magnetoelectric laminate", Applied Physics Letters, vol 84, p.4188.
9. C. Nan, N. Cai, Z. Shi, J. Zhai, G. Liu, Y. Lin (2005), "Large magnetoelectric response in multiferroic polymer-based composites", Physical Review B, vol 71, p.014102
10. G. Liu, C. Nan, J. Sun (2006), "Coupling interaction in nanostructured piezoelectric/magnetostrictive multiferroic complex films", Acta Materialia, vol.54, p.917.

저자소개

▶정 태 희

- 공학 석사
- 구, 엘지전자기술원 선임연구원
- 현, 카네기멜론 대학교 전기전자공학과 박사과정

▶한국과학기술정보연구원 동향정보분석팀