

과제계획요청서

PROJECT PROPOSAL REQUEST (PPR)

새로운 자성체, 교자성의 쓸모를 입증하는 연구
(ALTER: Exploring the practical potentials of altermagnetic materials)

PPR No. ASTRA01_2403PPR1

공모유형: 분야공모

보안과제여부: 일반



과학기술정보통신부



한국연구재단

한계도전전략센터

Advanced Science & Technology Research Agency (ASTRA)

1. 과제 개요

한국연구재단 한계도전전략센터는 새롭게 발견된 자화 상태인 ‘교자성¹⁾’에 대한 글로벌 선단 기술을 확보하기 위해, 이론적 제안을 실험적으로 입증하는 소재와 공정 기술, 나아가 응용의 관점에서 그 쓸모를 입증하는 혁신적 스핀트로닉스 기술 개발 프로젝트를 추진합니다.

제3의 자성으로 주목받는 교자성은 이론물리학자들과 측정전문가 중심의 연구그룹들이 주로 활동했던 과학적 발견의 초창기에 있는 연구 분야입니다. 최근 소재와 소자 실험 논문들이 보고되면서 반도체와 양자 기술 분야의 혁신적 기술 창출을 기대하며 과학기술 선진국들의 경쟁이 본격적으로 시작되고 있습니다. 그러나 교자성 연구가 실제 활용 가치가 높은 응용 기술로 이어지기 위해서는 고품질의 박막 성장, 자화 특성 제어, 스핀트로닉스²⁾ 소자 제조 등 다양한 기술적 장애물들이 존재합니다.

본 ALTER 프로젝트의 주요 목표는 새로운 교자성 물질의 설계와 실험적 구현을 통해 스핀트로닉스 소재로서의 기능성을 실현하고, 소자 구조에서 교자성 물질의 고유한 특성을 발현하고 교자성 기반의 혁신형 스핀트로닉스 소자의 개념을 제안·실증하는 데 있습니다. 교자성 연구에 대한 이러한 소자 중심적 접근 방식은 기초 응집물질 물리학과 실제 스핀트로닉스 응용 사이의 격차를 해소하는 데 도움이 될 수 있으며, 에너지 효율과 성능 한계를 뛰어넘는 차세대 스핀트로닉스 소자 개발의 새로운 길을 열어줄 것으로 기대합니다.

2. 추진 배경

자성 소재는 지난 수십 년간 정보기술(IT)의 보급과 혁신에 중요한 역할을 했습니다. 앞으로도 빅데이터 기반 AI 기술의 확장과 자율주행차 및 로봇 등 전동화 시스템의 확대에 따라, 자성 소재와 이를 이용한 스핀트로닉스 기술의 중요성은 점점 더 커질 것입니다. 스핀트로닉스 기술은 전자의 전하뿐만 아니라 스핀 특성을 활용하여 정보를 처리하고 저장하는 혁신적인 접

1) 교자성(altermagnet): 총자화량이 ‘0’으로 반강자성과 같지만, 시간 역전 대칭성이 깨져 있는 강자성의 특성을 동시에 지닌 것으로 확인된 새로운 자화 상태

2) '스핀(Spin)'과 '전자공학(Electronics)'의 합성어로, 전자의 전하(Charge)뿐만 아니라 스핀(Spin) 자유도를 활용하여 정보를 저장, 처리, 전송하는 기술

근 방식을 제공합니다. 이 기술을 적용한 대표적인 예가 자기 메모리(MRAM³⁾)입니다. MRAM은 전자의 스핀을 이용하여 빠르고 효율적이며 비휘발성을 갖춘 차세대 메모리 솔루션으로 주목받고 있습니다. 이는 기존의 DRAM과 플래시 메모리의 한계를 극복하고, 전력 손실을 최소화하면서도 빠른 속도와 높은 신뢰성을 제공할 수 있어, 모바일 기기, 사물인터넷(IoT) 디바이스, 전기차 등 다양한 분야에서 적용이 확대될 것입니다.

현재 상용화되어 있는 MRAM 제품들은 강자성(ferromagnet) 소재 기반의 소자입니다. 강자성체/절연체/강자성체 구조를 가진 스핀 전달 토크(STT, spin transfer torque)-MRAM 기술은 스핀 분극된 전류를 이용하여 자화 반전을 유도하는 방식의 메모리입니다. STT-MRAM 기술은 누설 자기장에 의한 간섭 현상, 집적도와 동작 속도의 한계, 높은 쓰기 전류 등 기술적 한계를 지니고 있습니다. 이를 극복하기 위해 새로운 자화 반전 방식인 스핀 궤도 토크(SOT, spin orbit torque)-MRAM 기술이 제안되었으나 아직 연구 개발 단계에 머물러 있습니다. 한편, 자기 모멘트의 총합이 '0'인 반강자성(antiferromagnet) 소재를 이용한 스핀트로닉스 연구도 진행되고 있습니다. 누설 자기장이 없고, THz 영역의 초고속 동작이 가능하지만, 반강자성 소재는 스핀 분극이 없으므로 스핀 전류 생성이 어려워 자기 메모리의 데이터 읽기/쓰기 동작을 위한 자기저항(MR, magnetoresistance) 확보가 어려운 단점이 있습니다.

최근 발견된 교자성체는 강자성체와 반강자성체의 특성을 모두 가지는 새로운 자성 물질입니다.⁴⁾⁵⁾ 반강자성체처럼 자기 모멘트의 총합이 '0'이지만, 결정 대칭과 스핀 대칭의 상호작용으로 특정 운동량 공간(k-space)에서 강자성체처럼 스핀 분리(spin splitting)가 발생합니다. 2022년 프라하대학의 Libor Šmejkal 박사가 교자성에 대한 이론을 제안한 후⁶⁾, 체코와 독일을 중심으로 관련 연구가 본격적으로 진행되었습니다. 2024년 초, 교자성 물질의 실험측정 결과들이 Nature⁷⁾⁸⁾, PRL⁹⁾ 등에 보고되기 시작했으며, 중국과 일본 등의 자성 분야 대표적인 연구자들이 arXiv사이트¹⁰⁾에 매우 활발히 연구

3) MRAM: Magnetic Random Access Memory

4) Phys. Rev. X 12, 040002 (2022)

5) Phys. Rev. X 12, 040501 (2022)

6) Phys. Rev. X 12, 011028 (2022); Phys. Rev. X 12, 031042 (2022)

7) Nature 626, 517 (2024)

8) Nature 626, 523 (2024)

9) Phys. Rev. Lett. 132, 036702 (2024)

결과를 올리고 있으며 관련 학회에서도 응집물리학 분야 연구자의 관심이 집중되고 있습니다.

○ 교자성 물질의 연구 동향

이 주제에 대한 최초의 논문이 발표된 이후¹¹⁾, 교자성의 특징을 탐구하기 위한 많은 이론적, 실험적 연구가 수행되었습니다. 그러나 교자성 물질에 대한 결정적이고 재현할 수 있는 실험적 검증은 여전히 어려운 상황입니다. 특히 다수의 실험이 금속 루타일 산화물인 RuO₂에서 수행되었습니다. 초기 중성자 회절 실험을 통해 상자성(paramagnet) 물질로 인식되던 RuO₂에서 약 0.05 μ_B 의 자기 모멘트가 관측되어 기존에 알려지지 않았던 자기적 성질이 있음이 보고되었습니다.¹²⁾ 이후 RuO₂ 박막에서 비정상 홀 효과(AHE, anomalous Hall effect)를 실험적으로 관측한 연구¹³⁾¹⁴⁾, 결정 방향에 따라 스핀 분극(spin splitting)이 다름을 보여준 연구¹⁵⁾ 등, RuO₂가 교자성 소재로서의 활용 가능성이 높은 물질이라고 제안되었습니다. 하지만 최근 중성자 회절 실험과 muon spin spectroscopy 측정을 통해 RuO₂가 자성이 없음을 밝힌 논문이 보고되어¹⁶⁾¹⁷⁾, 이 물질의 교자성에 대한 기존 통념에 의문이 제기되기 시작하였습니다. 이는 교자성 연구에서 RuO₂가 model system으로서 적절하지 않을 수 있음을 보여줍니다. 아직 RuO₂ 자성의 본질에 대한 명확한 결론을 내리기에는 이른 상황이며, 특히 계면이나 결함 등에서 자성이 발현될 가능성도 배제할 수 없습니다. 앞으로 더욱 심도 있는 실험과 이론 연구를 통해 진정한 교자성 물질을 규명하는 것이 중요할 것으로 보입니다.

2024년 초, Nature저널에 또 다른 교자성 물질군인 MnTe과 MnTe₂의 연구 결과가 보고되었습니다. 스핀 분해 ARPES 측정을 통해 저자들은 MnTe의 운동량 공간에서의 밴드 구조를 측정하고, 이를 제1원리 계산 결과와 비교함으로써 교자성체의 강한 LKSD¹⁸⁾에 의한 특이한 스핀 분극 현상을 관측하

10) <https://arxiv.org/>

11) Science Advances 6, eaaz8809 (2020)

12) Phys. Rev. Lett. 118, 077201 (2017)

13) Nature Electronics 5, 735 (2022)

14) APL Materials 11, 101103 (2023)

15) Advanced Science 2400967, 1 (2024)

16) Phys. Rev. Lett. 132, 166702 (2024)

17) arXiv:2405.10820 [cond-mat.mtrl-sci]

18) Lifting of Kramers spin degeneracy

였습니다.⁷⁾ 저자들은 이처럼 큰 스핀 분극이 스핀-궤도 결합(SOC, spin-orbit coupling)이 아닌 교자성 질서 자체에서 기인한다는 점을 강조합니다. 일반적으로 큰 스핀 분극을 얻기 위해서는 무거운 원소에 의한 강한 스핀-궤도 결합이 필요한데, MnTe의 경우 상대적으로 가벼운 Mn과 Te로 이루어져 있음에도 교환 상호작용(exchange coupling)만으로도 수백 meV에 이르는 스핀 분극이 가능합니다. MnTe는 망간 원자의 스핀이 서로 반대 방향을 가리키지만, 같은 축을 따라 배향되어 있어 공선형(collinear) 교자성체입니다. 그러나 비공선형(noncollinear) 교자성체도 존재합니다. Zhu 등은 스핀 분해 ARPES 분석법을 사용하여 비공선형 교자성 MnTe₂를 연구했습니다.⁸⁾ 두 그룹은 서로 다른 실험적 접근 방식을 사용했지만, 두 연구 모두 교자성체의 스핀 분할에 대한 이해에 중요한 진전을 이루었으며, 이러한 물질의 자기 구조에 내재된 복잡성을 밝혀냈습니다.

CrSb는 높은 Néel 온도(~700K)와 유효 자기 모멘트를 나타내는 교자성 금속으로, 더 높은 수준의 전도성과 스핀 토크 전도율을 가질 수 있어 스핀트로닉스 응용의 관점에서 최근 더욱 관심이 집중되고 있습니다. 독일 Mainz 대학 연구팀은 박막 형태의 CrSb 소재에 soft-X선 ARPES 분석을 통해 CrSb 에피층의 전자구조를 관측하여 대략 0.6 eV 크기의 스핀 분극을 실험적으로 확인한 바 있습니다.¹⁹⁾ 2024년 5월 arXiv에 등록된 보고에서 중국 SUSTech 연구팀은 단결정 성장시킨 CrSb 시료에 대한 synchrotron 기반 ARPES 정밀분석을 통해 비대칭 운동량 지점에서 최대 0.8 eV의 스핀 분극을 보고하였습니다.²⁰⁾ 비슷한 시점에 또 다른 중국 연구팀은 운동량 공간의 3차원 맵핑을 통해 CrSb의 전자구조에서 준강자성 대칭성과 nodal plane의 존재를 분명히 보여주는 연구 결과를 보고합니다.²¹⁾

교자성은 결정학적 대칭성과 관련이 있으며, 교자성이 나타나는 특정한 결정학적 대칭성을 얻기 위한 핵심은 비자성 원자들과 이들이 자기 대칭성에 영향을 미치는 방식에 있습니다. 이 비자성 원자들의 역할은 고체 물리학에서 오랫동안 무시되어 왔으며 이제야 본격적으로 고려되고 있습니다. 이러한 대칭성은 광범위하므로 반강자성체의 상당 부분이 교자성체로 분류될 수 있다고 추측됩니다. 반강자성은 강자성보다 더 넓은 범위의 물질에서 발생하기 때문에, 위에서 제시한 대표적인 물질(RuO₂,

19) Nat. Commun 15, 2116 (2024)

20) arXiv:2405.12679 [cond-mat.mtrl-sci]

21) arXiv:2405.12575 [cond-mat.mtrl-sci]

MnTe, CrSb) 이외의 교자성체에 관한 탐색 연구는 계속될 것입니다. 그와 더불어 고품질의 결정성장과 epitaxial 박막 성장, 도핑, 조성 조절 등을 통한 물성 제어 연구도 깊이 있게 진행되어야 할 것입니다.

○ 교자성 스핀소자 응용 연구

교자성 연구에 있어 고품질의 시료 확보가 어려워 실험에 제한이 있으나, 응용 측면에서 다양한 가능성이 제시되고 있습니다. 교자성 연구를 주도하고 있는 체코와 독일 연구그룹은 초기 논문에서 비전통적 반강자성체(즉, 교자성체)가 강자성체와 유사한 거대 자기저항(GMR)과 터널링 자기저항(TMR) 효과를 나타낼 수 있다고 제안하였습니다.²²⁾ 제1원리 계산에 따르면 비상대론적 교대 스핀-운동량 결합을 보이는 RuO₂와 Mn₅Si₃에서 약 100%에 이르는 GMR과 TMR 효과가 예측된다고 보고하였습니다. 유사한 시기에 RuO₂/TiO₂/RuO₂구조의 반강자성 터널 접합(MTJ)에서 스핀 편극된 전도 채널에 의해 약 500% 수준의 TMR이 예측된다는 보고가 있었습니다.²³⁾

RuO₂ 박막에서 새로운 매커니즘의 스핀 분리 토크(spin splitter torque, SST)를 실험적으로 관측하였고²⁴⁾, 이를 이용한 무자기장(magnetic field-free) 스위칭을 상온에서 시연한 바 있습니다.²⁵⁾ 실험실 수준의 기초적인 소자에서 교자성의 스핀 분극 효과를 이용한 효율적인 스핀-전하 변환 현상을 발견하는 등 유망한 결과들이 제시되고 있습니다.²⁶⁾

최근에도 교자성/절연체/강자성(RuO₂/TiO₂/CrO₂) 터널 접합(MTJ)에서 전류의 방향에 따라 TMR이 크게 달라지는 현상이 보고되었습니다.²⁷⁾ RuO₂의 momentum에 따른 스핀 분극 특성에 기인하여, [001] 방향에서는 스핀 업/다운 에너지 밴드가 동일한 모양을 가져 TMR이 거의 0%에 가깝지만, [110] 방향에서는 완전히 달라지기 때문에 마치 강자성체처럼 작용하게 되어 강자성 CrO₂와 결합했을 때 두 층의 자화 방향에 따라 TMR이 매우 크게 변한다고 예측(6100%)하였습니다.

상기 이론 논문들은 계산을 통해 교자성을 이용한 스핀트로닉스 분야에서의 새로운 가능성을 제시하고 있지만, 실제 실험을 통한 확정적 검증은 충

22) Phys. Rev. X 12, 011028 (2022)

23) Nat Commun 12, 7061 (2021)

24) Nat. Electron. 5, 267 (2022); Phys. Rev. Lett. 128, 197202 (2022)

25) Phys. Rev. Lett. 129, 137201 (2022)

26) Phys. Rev. Lett. 130, 216701 (2023)

27) Phys. Rev. Applied 21, 034038 (2024)

분히 이루어지지 않았습니다. 그러나, 최근 CrSb에서 스위칭 특성이 실험적으로 입증되었습니다.²⁸⁾ Al₂O₃기판 위에 W 버퍼층을 성장시킨 후 CrSb(1120) 박막을 증착한 cross bar 구조를 제작하여 스위칭 특성을 측정한 결과, 상온 비정상 Hall 효과와 자기장 없이 전류 구동만으로 100%의 스위칭이 구현된다는 획기적 실험 결과가 보고되었습니다. 이는 고집적/저전력 스핀트로닉스 소자 개발에 매우 유용할 것입니다.

이상의 결과들은 교차성 물질을 이용하면 Pt 등 기존 스핀-궤도 결합(10-100 meV)에 기반한 스핀 전류 생성 물질에 비해 훨씬 큰 스핀 전류 생성이 가능하고, 효율적인 스핀 전류 생성과 제어 기술을 확보할 수 있을 것이라는 가능성을 제시합니다. 이는 기존 STT 혹은 SOT 기반의 MRAM 기술의 한계를 극복하는 유망한 기술이 될 수 있습니다.

그 외에도 전문가들은 교차성체가 강자성체 기반의 스핀트로닉스 기술의 한계를 극복하는 6G급 이상의 고속 THz 소자, 초전도, 양자 기술 등에 새로운 혁신을 가져올 수 있을 것으로 기대합니다.

교차성 기술의 잠재력은 새로운 스핀트로닉스 소재와 소자를 개발하기 위한 연구자들의 노력을 지속해서 촉발하고 있습니다. 그러나 이러한 노력은 종종 실험적 구현을 고려하지 않은 이론적 제안, 혹은 좁은 범위의 물성에 대한 기초적 물질 연구에만 머무르는 경우가 있습니다. ‘과학적 발견’이 ‘기술적 혁신’으로 이어지기 위해서는 궁극적 활용처를 타겟팅한 재료의 선택과 제조 호환성, 소자 수준의 확장성과 통합성을 고려한 전략적 접근이 필요합니다.

이러한 배경에서, 본 ALTER 프로젝트에서는 교차성 물질 기초 연구와 소자 수준의 실증 연구를 병행·통합하는 대안적 접근 방식을 시도합니다. 한계도전 R&D사업은 혁신기술에 도전하는 속도감 있는 연구개발을 지원 대상으로 합니다. 비록 교차성이 새롭게 발견된 물리 현상이지만 물질 설계와 자화 특성에 관한 이론적 연구보다는 실험적 연구와 스핀트로닉스 소자 제작과 실증에 중점을 두고자 합니다. 이러한 접근 방식은 교차성체의 독립된 특성뿐만 아니라 스핀트로닉스 소자 혹은 시스템 내에서 교차성 효과를 활용, 조정 또는 향상하기 위해 제안된 재료의 응용 가능성을 결정하는 여러 요인(박막 제조공정, 표면/계면 제어, 터널접합 등)에 대한 이해를 높일 것

28) arXiv:2403.07396 [cond-mat.mtrl-sci]

으로 기대됩니다. 이를 통해 비휘발성 메모리, 신경모방 컴퓨팅, 양자 정보 처리와 같은 스핀트로닉스 기술의 응용 분야에서 선도적 기술 혁신을 가속할 수 있을 것입니다.

3. 과제 목표, 범위 및 구조

본 ALTER 프로젝트는 실용성있는 새로운 교자성 물질의 설계와 스핀트로닉스 소재로서의 기능성을 입증하고, 단위소자 구조에서 교자성 동작 특성을 발현하고, 나아가 교자성에 기반한 신개념의 스핀트로닉스 소자를 디자인하고 실증하는 것을 목표로 합니다.

이를 위해 제안자는 재료 선택과 설계, 자화 메커니즘의 이해, 특성 평가, 스핀트로닉스 소자 제작과 동역학 해석 등에 관한 철저한 고민을 통해, 현재 글로벌 연구 커뮤니티의 최선단에 있는 연구 수준을 뛰어넘을 수 있는 새로운 도전 전략을 제시해야 합니다.

ALTER 프로젝트는 아래와 같이 2개의 기술트랙으로 진행됩니다.

	기술트랙 1 [Theory to Materials]	기술트랙 2 [Materials to Devices]
연구목표	새로운 교자성 물질의 설계와 스핀트로닉스 소재로서의 기능성 실현	스핀트로닉스 소자 구조에서 교자성 물질의 특성 발현, 교자성 벤치마킹 모델 디자인/실증
연구기간	3년4개월 (1단계 16개월, 2단계 1년, 3단계 1년)	
조건	제안된 소재 및 소자 구조는 반도체 제작 공정기술과 호환될 것	
연구범위	물질설계 및 해석 (제1원리 계산 등), 결정성장 및 박막합성, 자화 특성 제어	스핀 소자 제조 및 특성화, 소자 동역학 모델링, 계면/표면 제어
특성지표 (예시)	임계온도, 스핀 홀 전도도, 상온 AHE 구현, 자구(magnetic domain) 정렬도/크기, ...	자기저항비(magnetoresistance ratio), 무자기장 스위칭, 전하-스핀 변환 비율, ...

표 1. ALTER 프로젝트의 목표 및 연구 범위

과제 제안자는 기술트랙 중 하나를 선택하고 같은 또는 다른 기관의 책임자급 연구자(참여연구원)와 팀을 이루어 과제 제안을 할 수 있습니다. 팀 단위 제안의 경우, 각 연구자의 역할과 책임을 명확히 제시해야 합니다. 책임

PM은 ALTER 프로젝트의 궁극적 목표를 위해 기술트랙 1과 기술트랙 2의 연구진들이 제시한 연구 부분을 독립적으로 진행할지 혹은 통합 진행할지 조정할 수 있습니다.

○ 기술트랙 1 [Theory to Materials]

기술트랙 1은 응용의 가치 측면에서 실용성을 확보할 수 있는 새로운 교자성 물질을 개발하고 스핀트로닉스 소재로서의 기능성을 입증하는 것을 목표로 합니다.

기술트랙 1에서는 실제 응용 관점에서 적합한 물질계를 선정하고, 교자성 특성 발현을 위한 물질 설계와 해석을 수행합니다. 이를 바탕으로 제안된 물질을 결정성장 혹은 박막 합성을 통해 제조하고, 그 특성 평가를 통해 교자성을 입증합니다 (그림 1). 이 연구는 이론-실험-평가의 순환적 연구가 절대적으로 요구될 것이며, 그 과정에 대한 기록 역시 큰 의미가 있을 것입니다. 1, 2단계를 통해 새롭게 개발되는 교자성 물질은 3단계에서 기술트랙 2의 연구팀과의 협업을 통해 소자에 적용되어 스핀트로닉스 소재로서의 가치를 검증해야 합니다.

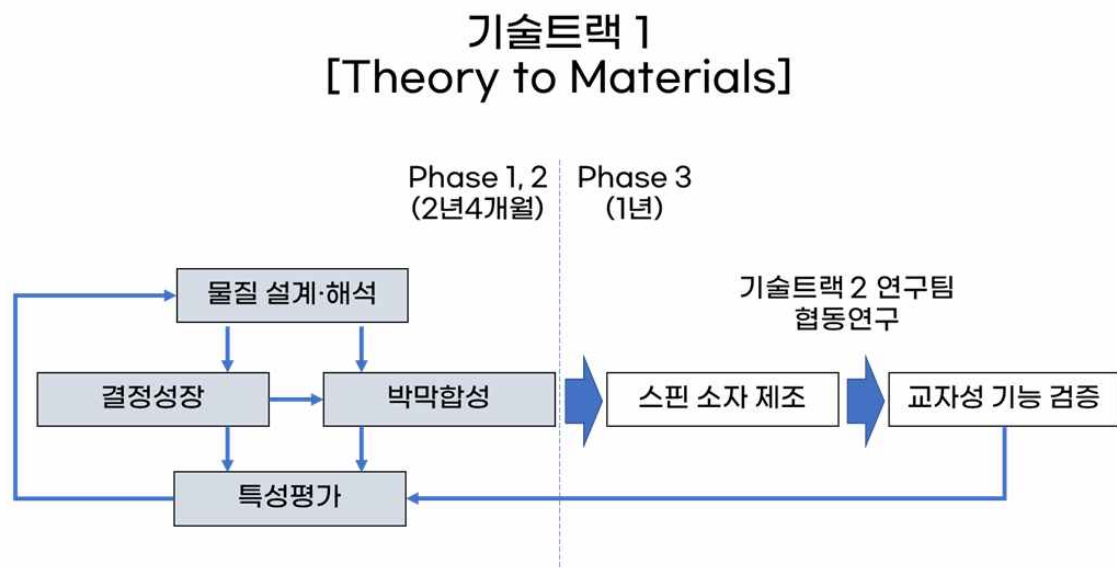


그림 1. 기술트랙 1의 연구개발 영역 및 체계

기술트랙 1을 제안할 경우, 만족해야 하는 조건은 아래와 같습니다.

- 글로벌 선단 그룹이 이미 결과를 발표한 대표적인 교자성 물질(RuO_2 , MnTe , CrSb)에 대한 후행적 연구는 제외하나, 지식재산권 확보가 가능한 차별화된 혁신 기술에 대한 더 높은 수준의 연구는 고려함. (예, 다성분계 조성 제어, 도핑 등)
- 제안하는 물질은 교자성의 critical 온도가 상온(300K) 이상이고, spin splitting 에너지는 300 meV 이상일 것.
- MRAM분야의 적용을 타겟팅한 경우, 제안하는 재료의 반도체 CMOS 공정에 대한 호환성을 반드시 고려할 것.
- 제1원리 계산을 통한 전자구조 해석뿐만 아니라, 인공지능 기계학습과 조합실험 등을 통한 효율적 물질 탐색 연구개발을 장려함.
- 실험 연구는 단결정 성장과 박막 합성을 모두 혹은 일부만 고려할 수 있으나, 3단계 소자화 연구 진입을 위해 2단계 종료 전까지 박막 제조 기술을 확보할 것.
- 표 1을 참고하여, 제안자는 특성 지표를 설정하고 그 목표치를 도전적으로 제시하여야 함. 예시로 제시된 특성 지표는 전체 목록이 아닐 수 있으며, 제안자는 새롭게 조정하거나 향상할 수 있는 지표를 제안할 수 있음. 이 경우 해당 지표와 목표치에 대한 과학기술적 근거와 도전성을 제시할 것.

이 기술트랙을 선택한 제안자는 실험적 구현, 나아가 실용적 가치를 고려하지 않은 이론적 연구에만 머무르지 않아야 합니다. 재료의 특성, 제조 호환성, 소자 수준의 확장성과 통합성을 고려하여 교자성 물질을 설계하여야 할 것입니다. 이를 위해 응집물리 이론 전문가와 재료 합성 전문가가 한 팀을 이루어 제안하기를 적극 권장합니다.

○ 기술트랙 2 [Materials to Devices]

기술트랙 2는 스핀트로닉스 단위소자 구조에서 교자성 동작 특성을 발현하고, 교자성에 기반한 신개념의 스핀트로닉스 소자를 디자인하고 실증하는 것을 목표로 합니다.

기술트랙 2에서는 스핀트로닉스 응용 분야를 선정하고, 교자성 동작 특성을 시현하는 단위소자를 제작합니다. 교자성의 쓸모를 증명하는 스핀트로닉스

소자의 제작은 ALTER 프로그램 내에서 재료 특성화를 위한 테스트베드 역할을 할 뿐만 아니라 소자 아키텍처 내에서 이러한 재료의 호환성을 전체적으로 평가할 수 있어야 합니다. 소자 제작을 위해서는 교자성 박막 제조 기술을 확보해야 할 것이며, 그와 더불어 소자를 구성하는 요소(전극, 절연체 등)를 적절히 선택해야 합니다.

기술트랙 2의 연구자는 1단계에서는 기존에 알려진 교자성 물질, 혹은 새로운 교자성 물질을 채택하여 스핀 소자 제조공정 기술을 확보합니다. 소자 단위의 특성 평가와 동역학 해석을 통해 교자성 물질과 다른 구성 요소의 최적화 연구를 수행합니다 (그림 2). 이 과정을 통해 축적하는 소자 기술은 기술트랙 1에서 개발되는 새로운 교자성 물질을 실증하는 2단계 이후 연구의 기반이 됩니다. 기술트랙 2의 연구진은 기술트랙 1의 연구진과의 협동 연구를 필수적으로 수행해야 합니다.

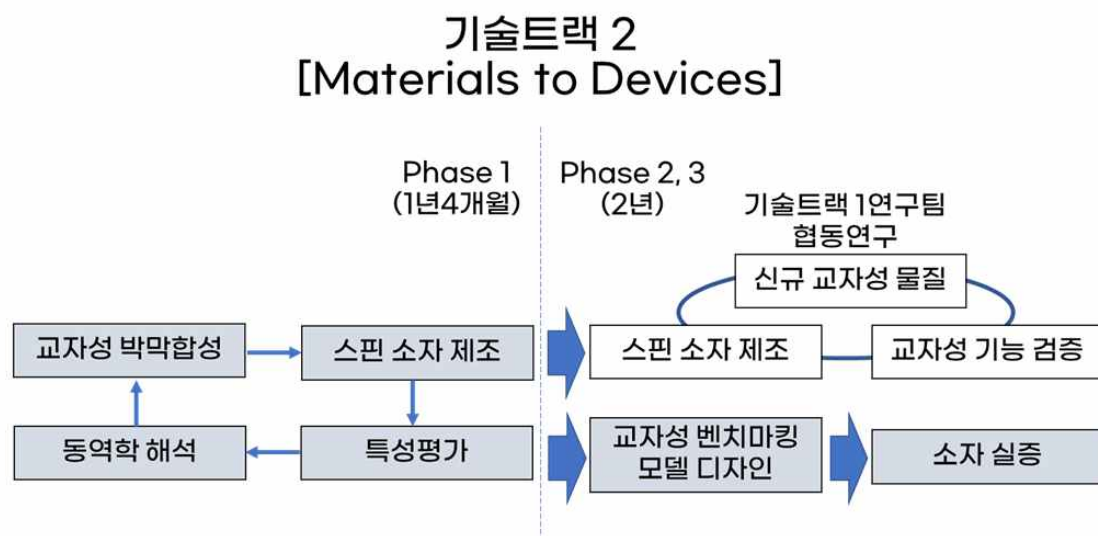


그림 2. 기술트랙 2의 연구개발 영역 및 체계

기술트랙 2를 제안할 경우, 만족해야 하는 조건은 아래와 같습니다.

- 글로벌 선단 그룹이 이미 결과를 발표한 교자성 물질(RuO_2 , MnTe , CrSb)을 이용한 소자 특성 발현에 대한 개선적 연구는 지양함. 다만, 지식재산권 확보가 가능한 차별화된 혁신 기술에 대한 더 높은 수준의 연구는 고려함.
- MRAM분야의 적용을 타겟팅한 경우, 반도체 CMOS 공정에 대한 호환성을 반드시 고려할 것.

- MRAM분야 이외 응용 분야를 타겟팅할 경우, 해당 적용 기술을 구체적으로 명시하고 궁극적 목표 달성 시 그 사회적·경제적 가치와 임팩트를 충분히 제시할 것.
- 실험 연구는 다양한 박막 합성 공정(스퍼터링, PLD, MBE, ALD 등) 기술을 고려할 수 있으나, 재현 가능성과 확장성을 고려할 것을 권장함.
- 표 1을 참고하여, 제안자는 특성 지표를 설정하고 그 목표치를 도전적으로 제시하여야 함. 예시로 제시된 특성 지표는 전체 목록이 아닐 수 있으며, 제안자는 새롭게 조정하거나 향상할 수 있는 지표를 제안할 수 있음. 이 경우 해당 지표와 목표치에 대한 과학기술적 근거와 도전성을 제시할 것.

이 기술트랙을 선택한 제안자는 실험적 구현이 쉬운 간단한 소자 구조를 플랫폼으로 하여 교자성 물질의 동작 특성 확인하는 연구를 수행할 수 있습니다. 그러나 교자성 박막 공정의 개선과 소자 최적화 연구에만 머물러서는 안 됩니다. 교자성 기술의 글로벌 기술 패권을 확보하기 위해서는, **교자성 물질뿐만 아니라 교자성의 고유한 동작 원리를 이용한 새로운 개념의 소자 모델을 제시하고 이를 실증하여 지식재산권을 확보해야 할 것입니다.** 기술 제안 시점에서는 이에 대한 구체적인 아이디어 제안이 어려울 수 있으나, 1단계 종료 시점의 마일스톤 점검에서 이에 대한 제안과 평가가 있을 예정이며, 2단계 이후 과제 수행 최종단계에 이르기까지 그 연구가 중심이 되어야 합니다.

연구개발 계획서 작성을 위해 참고할 중요한 내용은 아래와 같습니다.

- 1) 제안자는 이 프로젝트의 기획 의도에 부합하는 연구 목표와 이의 달성을 위해 교자성 물질 후보와 스핀트로닉스 소자에 대한 자세한 설명을 제공해야 합니다. 이는 자신의 접근 방식의 타당성, 제안된 소재/소자가 ALTER 프로젝트의 목표를 충족시킬 수 있는 실험적 실행 가능성, 그리고 이를 통해 어떻게 스핀트로닉스 기술에 혁신을 가져올 것이라는 명확한 설명을 포함해야 합니다.
- 2) 제안자는 해당 분야에서 현재까지 연구되어 온 소재와 소자에 대한 글로벌 최선단 기술과의 비교를 포함해야 합니다. 이는 제안자의 접근 방식이

왜 혁신적이고 차별화된 것인지는 설명하는 것입니다. 이론적 분석을 기반으로 소재와 소자의 모델링, 또는 개념 증명 데이터를 포함할 수 있습니다.

3) 제안하는 접근 방식에 대한 설명은 관련 분야의 전문가들이 인정할 수 있는 과학적이고 논리적인 내용이어야 합니다. 과제 수행 기간에 개발 및 시연될 연구 내용과 기술 개발 로드맵, 특성 지표, 성과 이정표(milestone)를 함께 제공해야 합니다.

4) 제안자가 연구개발에 사용할 시뮬레이션 툴, 재료의 수급 혹은 합성 방법, 특성 평가 방법, 소자 제작 및 평가 방안에 대한 설명을 포함합니다.

(제외 대상)

본 프로젝트에서는 아래에 해당하는 기술 개발을 지원 대상으로 하지 않습니다.

- 글로벌 선단 연구팀이 보고한 연구 결과의 답습 또는 점진적 향상 연구
- 실험적 구현을 고려하지 않은 순수한 교자성 물리 이론 연구
- 교자성 특성 평가 방법에 관한 연구
- 실제 응용을 타겟팅하지 않는 물질 탐색 연구

4. 추진 일정

(프로그램 구조, 과제 구성)

한계도전전략센터는 다음과 같이 ALTER 프로젝트의 수행을 계획하고 있습니다.

- 과제 수: 각 기술트랙 별, 2개 내외
- 예산 규모: 과제별 연간 4억 원 내외²⁹⁾
- 연구 기간: 최대 3년 4개월 (40개월)
- 연구 진행 단계: 3단계 (1단계:16개월, 2단계:12개월, 3단계:12개월)

과제 제안자는 센터가 계획하는 자원과 기간의 범위 내에서 본 프로젝트

²⁹⁾ 단계별 예산 규모는 공고문 참고

목표의 달성을 위한 독창적인 아이디어와 새로운 접근 방식, 연구 내용을 자유롭게 제시합니다.

본 과제는 단계별 평가를 통해, 다음 단계 연구 수행에 대한 진행여부(Go/No-Go)가 결정될 것이며, 연구비는 책임PM의 연구 수행 내용 검토를 통해 가감 가능할 것입니다.

(기술 로드맵, 점진 평가 일정)

제안자는 그림 3의 과제 추진 주요 일정을 참고하여, 수행 기간 전체에 걸쳐 연구개발 로드맵과 마일스톤 목표를 구체적으로 명시해야 합니다. 연구 개발 로드맵에는 특정 작업 혹은 과제 수행 중간 단계에서 적용할 수 있는 성과 지표를 인용하여 세부 작업 분할을 제공해야 합니다. 제안자는 전체 프로그램 일정을 준수하고 모든 프로그램 목표, 지표, 중간 단계 및 최종 성과물을 완전히 해결하기 위한 공격적인 계획을 제시해야 합니다.

한계도전 프로젝트에서는 목표 달성을 위해 책임PM이 수시로 연구 수행자와 소통하며 매 분기 현장 방문과 전문가 패널 리뷰 미팅을 통해 연구 과정의 지식화와 진화적 Risk 관리를 계획하고 있습니다. 단계 점진을 통해 연구자가 설정한 마일스톤 목표가 달성되었는지 확인함으로써 다음 단계 연구 과제의 진행 여부를 결정할 수 있습니다. 프로젝트의 파급효과를 최대화하기 위해 도전적인 연구를 시도하는 과제를 선정하여 책임PM 중심의 협력·융합 연구를 추진할 것입니다.

- 주요 일정



그림 3. ALTER 프로젝트의 주요 일정

5. 제공 성과물

연구 책임자는 최소한 다음과 같은 성과물을 제공해야 하며, 책임PM의 요구에 따라 추가 자료, 데이터를 제공해야 합니다.

- 분기별 책임PM과의 회의(현장 방문, 전문가 리뷰)에서 연구 수행의 진척 상황을 파악할 수 있는 실험 데이터 및 결과 요약 자료
- 단계 점검일 2주 전까지 제출되어야 하는 단계 보고서
- 과제 완료 시 최종 결과물의 검증 결과 및 동작 시연
- 연구 수행 과정에서의 의미 있는 성과물 혹은 시행착오 대처 방안 등을 포함한 연구자의 목표 달성을 위한 노력을 입증하는 자료

6. 기타

(협업 관련)

본 프로젝트에서는 연구과제 심사를 통해 상이한 접근 방법으로 제안된 다수의 과제를 선정할 수 있습니다. 책임PM과 한계도전전략센터는 프로젝트의 총괄 목표 달성을 위해 각 과제의 범위, 목표 등을 조정할 수 있으며, 지식재산권 혹은 이해상충의 문제가 없는 조건에서 투명성이 보장된 협업을 추진할 수 있습니다. 각자의 접근 방식이 다를지라도 본 프로젝트의 모든 연구 수행자가 전문성에 기반한 상호 협력과 소통을 통해 목표 달성을 위해 협업이 이루어지도록 운영할 것입니다.