

Research Group Status of Magnetism and Magnetic Materials in China

Guangduo Lu¹ and Hong-Guang Piao^{1,2*}

¹Research Institute for Magnetolectronics & Weak Magnetic-field Detection, College of Science, China Three Gorges University 443002, Yichang, China

²Department of Physics, Chungbuk National University, Cheongju 28644, Korea

(Received 17 October 2017, Received in final form 14 November 2017, Accepted 20 November 2017)

Recently, one of adjacent countries, China, is poised to grow rapidly in the field of economics and science technology. In this article, by the introduction of major research groups in the field of magnetism and magnetic materials, the current situation of magnetic research in China are analyzed to promote academic exchange and cooperation between China and Korea.

Keywords : China development, science and technology, magnetism research, magnetic materials

중국의 자성 및 자성재료 연구그룹 현황

Guangduo Lu¹ · 박홍광^{1,2*}

¹삼협대학교 물리학과, 자기전자학 및 약자기장 탐측기술연구소, 이창 443002 중국

²충북대학교 물리학과, 충북 청주시 서원구 충대로 1, 28644

(2017년 10월 17일 받음, 2017년 11월 14일 최종수정본 받음, 2017년 11월 20일 게재확정)

최근 이웃나라인 중국이 경제 및 과학기술 분야에서 놀라운 속도로 성장하는 태세를 보이고 있다. 본문은 주로 자성 및 자성 재료 연구분야에서 중국의 발전 현황을 소개 함으로써 중한 교류와 공동 연구 및 협력을 촉진하고자 중국의 자성에 관한 주요 연구그룹들의 분포 및 연구 현황에 대하여 정리해 보았다.

주제어 : 중국발전, 과학기술, 자성연구, 자성재료

I. 서 론

중국은 5천년의 유구한 역사와 문명을 갖고 있는 고대 문명국의 하나로서 4대 발명을 위주로 세계 과학기술 발전에 많은 기여를 해왔었다. 특히 나침반(司南, sinan) 발명은 자성 및 자성재료 연구 및 기술 응용의 시작이라고 해도 과언이 아니다. 근대에 들어서 비록 몰락 된 봉건 왕조와 수많은 전쟁에 인하여 중국 발전이 아주 큰 영향을 받았었지만 20세기 들어서 동방 아시아에서 강력한 태세로 서서히 일어서고 있는 모습을 보이고 있다. 자성 및 자성 재료는 스마트 기술, 자동화 생산, 인공지능개발 및 정보통신기술 등 분야에서 중요한 역할을 하고 있으며 인류사회발전 및 경제발전에서도 아주 큰 기여를 하고 있다. 중국도 자성 및 자성재료 연구의 중요성을 인지하고 21

세기에 들어서서 자성 및 자성재료연구에 많은 인력과 물력을 투입하였으며 인재 교육 방면에서도 많은 투자하고 있는 중이다. 최근에 들어서서 중국경제실력의 빠른 성장과 함께 과학연구 및 교육 방면의 지원도 크게 늘이므로 하여 중국내의 많은 자성 및 자성재료 연구그룹들로 기술 장비 방면으로나 연구 인원 방면에서 아주 큰 변화를 가져왔으며 자성관련기술 연구 영역도 기타 학과로 빠른 속도로 폭을 넓히고 있는 추세를 보이고 있다. 뿐만 아니라 중국 내에서 자성전공을 개설한 대학교도 초기에 오직 베이징대학교(北京大学, Peking University), 난징대학교(南京大学, Nanjing University), 랴닝대학교(兰州大学, Lanzhou University), 산둥대학교(山东大学, Shandong University), 지린대학교(吉林大学, Jilin University), 중국과학기술대학교(中国科技大学, University of Science and Technology of China), 전자과학기술대학교(电子科技大学, University of Electronic Science and Technology of China), 텐진대학교(天津大学, Tianjin University), 베이징과학기술대

학교(北京科技大学, University of Science and Technology Beijing) 등 십여 개 대학교 밖에 없었지만 지금에 이르러 전국 많은 대학교에서 자성에 관한 전업 및 연구그룹을 개설함으로써 각종 연구분야에서 가장 큰 영향력을 가지게 되었다. 중국물리학회(Chinese Society of Physics, CPS) 2017년 가을학술총회를 예로 들면, 학회참가인원수가 3천여명에 이르렀으며 그중 자기분회 참가비율이 1/4에 도달하게 되었으며, 중국 자성 및 자성재료학회도 천여명 규모를 갖춘 학술회로서 중국학술계 및 기술업계에서도 큰 영향력을 가지고 있으며, 점차적으로 미국 MMM(Annual Magnetism and Magnetic Materials)과 비슷한 세계적 영향력을 갖춘 자성학회로 발전하려고 노력하고 있다. 중국에서 자성에 관한 학술적인 연구 뿐만 아니라 많은 기술 특허 및 기술 이전을 통하여 20세기 90년대로부터 글로벌 전자성 재료 생산이 점차 중국으로 집중 되어 중국내에 이미 200여개 일정한 규모를 갖춘 전자성재료기업들이 나타나게 되었으며 그 총 생산량이 2000년부터 세계 1위로 2007년부터 전세계의 50% 이상 차지하게 되었다. 이처럼 중국은 30여년 동안의 쾌속 발전을 통하여 자성 및 자성재료 학술적인 연구 뿐만 아니라 자성관련 기술 및 생산 실력도 빠른 성장을 이루게 되었다[1-5]. 본 문장은 주로 자성 및 자성재료 연구분야에서 중국의 발전 현황을 간략히 소개 함으로서 학술적 중한교류와 공동협력을 촉진하고자 중국 국내의 자성 및 자성 재료에 관한 주요 연구그룹들의 분포와 연구현황들에 대하여 정리해 보았다.

II. 중국내 주요 연구그룹 및 연구방향

1. 중국과학원

중국에서 과학기술연구 방면 가장 큰 기여를 하고 있는 연구기구로서는 중국과학원(中国科学院, CAS, Chinese Academy of Sciences)이 아닐 수 없다. 그 중에서 자성 및 자성재료 연구와 관련 국립실험실을 갖고 있는 주요 연구부문으로는 물리연구소, 재료기술공정연구소, 물질과학연구원, 반도체연구소, 금속연구소 등이 있으며, 자성을 기반으로 여러가지 연구를 진행하고 있고 또한 중국의 자성 및 자성재료 연구방향을 이끌고 나가는 핵심적 역할을 하고 있다. 아래 중국과학원계열 국가실험실에 대하여 소개하도록 하겠다.

1) 중국과학원 물리연구소의 국립자성실험실[6]

중국 베이징(北京)에 자리 잡고 있는 중국과학원 물리연구소(Institute of Physics, CAS)의 국립자성실험실은 1934년에 설립된 중앙연구원 물리연구소 현재자성연구실을 기반으로 1995년부터 정식으로 국립실험실로 건립 되었으며, 주로 스핀전자학(spintronics) 및 자성물질을 기반으로 하는 자기-전

기-온도-광 사이의 각종 물리현상 연구, 그리고 중대한 기술 응용가치를 갖고 있는 각종 구조의 신소재 개발 및 각종 신형 재료 연구를 진행하고 있다[7]. 구체적 연구방향 및 연구팀 주요 책임자는 아래와 같다. M02연구팀 팀장 한수봉(韩秀峰, Han Xiufeng) 주요 연구방향은 스핀전자물리학을 기반으로 한 재료 및 소자개발, M03연구팀 팀장 호봉하(胡凤霞, Hu Fengxia) 주요 연구방향은 신형자성재료개발 및 멀티필드(multi-field) 제어, M04연구팀 팀장 성소화(成昭华, Cheng Zhaohua) 주요 연구방향은 나노자성구조 및 펄스자성, M05연구팀 팀장 왕문홍(王文洪, Wang Wenhong) 주요 연구방향은 기능성금속자성재료, M06연구팀 팀장 손양(孙阳, Sun Yang) 주요 연구방향은 다중강성 재료와 멀티필드 결합 효과, M07연구팀 팀장 채건왕(蔡建旺, Cai Jianwang) 주요 연구방향은 자성박막에서의 인공스핀구조 제어 등. 현재 국립자성실험실의 연구인력은 중국과학원 원사 2명, 연구원 9명, 부연구원 11명 및 기타 기술 인원과 대학원생으로 구성 되어 있다.

2) 중국과학원 재료기술 및 공정연구소의 자성재료 및 소자실험실[6]

중국 Ningbo(宁波)에 자리 잡고 있는 중국과학원 재료기술 및 공정연구소(Ningbo Institute of Industrial Technology, CAS)의 자성재료 및 소자실험실은 2007년에 건립 되어 주로 신형 자성재료 및 소자 응용에 관한 기초연구와 기술개발을 진행하고 있다. 특히 자성재료 방면에서 주로 기능성 희토류 자성재료, 비정질 전자성재료, 나노구조 자성재료, 자전기소자 및 관련 응용기술에 대하여 연구를 진행하고 있다[8]. 구체적 연구방향 및 연구팀 주요 책임자는 아래와 같다. 희토류 재료기술 연구팀장 유평(刘平, Liu Ping), 자전기재료 및 소자 기술 연구팀장 이윤위(李润伟, Li Runwei), 전자성재료 및 응용기술 연구팀장 왕신민(王新敏, Wang Xinmin), 낮은 차원 기능성 양자재료 연구팀장 하소용(何少龙, He Shaolong), 각종 재료가공기술 연구팀장 장문무(张文武, Zhang Wenwu) 등. 현재 중국과학원 재료기술 및 공정연구소의 자성 관련 연구 인력은 중국과학원 원사 1명, 연구원 7명, 부연구원 10여명 및 기타 기술 인원과 대학원생으로 구성 되어 있다.

3) 중국과학원 금속연구소의 국립재료과학실험실[6]

중국 선양(沈阳)에 자리 잡고 있는 중국과학원 금속연구소(Institute of Metal Research, CAS)의 국립재료과학실험실은 2000년에 건립 되어 주로 기초재료과학연구 및 응용에 관한 기초연구를 진행하고 있으며 주로 자성 및 신형자성재료 연구부에서 희토류 영구자석재료, 거대 자기저항재료(giant magnetoresistance), 자왜재료(magnetostrictive materials), 자성박막재료, 자성나노캡슐 등 자성관련 연구를 진행하고 있다[9]. 구체적 연구방향 및 연구팀 주요 책임자는 아래와 같다. 영구자성재료 및 이론연구팀장(주임 연구원) 장지동(张志东,

Zhang Zhidong), 희토류 영구자성 연구 책임연구원 유위(刘伟, Liu Wei), 자성재료제작 및 응용기술개발 책임연구원 경전우(耿殿禹, Geng Dianyu), 낮은 차원 양자자성이론연구 프로젝트연구원 양조신(梁兆新, Liang Zhaoxin), 나노결정질 금속 재료제작기술연구 프로젝트연구원 왕승강(王胜刚, Wang Shenggang) 등. 현재 중국과학원 금속연구소의 국립재료과학 실험실 자성재료 및 자성연구부는 연구원 6명, 부연구원 7명 및 기타 기술 인원과 대학원생으로 구성 되어 있다.

4) 중국과학원 물질과학연구원[6]

중국 허페이(合肥)에 자리 잡고 있는 중국과학원 소속인 물질과학연구원(Hefei Institute of Physical Science, CAS)은 2001년에 건립 되었으며 광학정밀기계연구소, 플라즈마 물리 연구소, 고체물리연구소, 지능기계연구소, 강자장과학센터, 선진제작기술연구소, 응용기술연구소 등 10개의 연구원 소속 전문연구소를 설립하였다. 그중 2008년에 설립된 강자장과학센터는 여러 과학연구분야의 선진적 강자장하의 실험을 진행할 수 있도록 노력하고 있다[10]. 현재 상온 조건하에 40 T 강자장실험조건을 제공할 수 있으며 32 mm, 50 mm, 200 mm 전자석 간격에서 27.5 T까지 안정한 강자장환경을 제공할 수 있다.

5) 중국과학원 반도체연구소[6]

중국 베이징(北京)에 자리 잡고 있는 중국과학원 반도체연구소(Institute of Semiconductors, CAS)은 1960년에 건립 되었으며 현재 국립 광전자 가공기술센터(光电子工艺中心)와 국립 광전자소재 공정연구센터(光电子器件工程研究中心) 그리고 국립 반도체초격자 실험실(半导体超晶格国家重点实验室), 국립 집적광전자학 연합실험실(集成光电子学国家重点联合实验室) 및 표면물리 실험실(表面物理国家重点实验室) 등 국가급 연구기구를 갖고 있다. 그중 구체적으로 국립 반도체 초격자 실험실에서 주로 반도체 스핀전자학을 기반으로 하는 자성반도체재료와 자성금속/반쪽금속(half-metal)재료 및 기능성소재에 관한 연구들을 진행하고 있으며 주요 연구방향 및 연구팀 주요 책임자는 아래와 같다[11]. 반도체 스핀전자학 및 스핀제어 연구팀 정후식(郑厚植, Zheng Houzhi), 반도체 스핀전자학 이론연구팀 하건백(夏建白, Xia Jianbai) 원사, 자성반도체재료 및 자성금속/반쪽금속(half-metal) 재료제작기술 연구팀 조건화(赵建华, Zhao Jianhua), 반도체 스핀전자학 및 자성반도체소재 연구팀 회양(姬扬, Ji Yang), 스핀전자학 및 마이크로/나노 스케일 기능성소재 연구팀 왕개우(王开友, Wang Kaiyou), 반도체 스핀전자학 및 기능성 소재 디자인 연구팀 상개(常凯, Chang Kai) 등. 현재 중국과학원 반도체 연구소의 국립 반도체초격자 실험실에 자성재료 및 자성연구 관련 연구인원은 주로 원사 2명, 연구원 5명, 부연구원 5명 및 기타 기술인원과 대학원생으로 구성되어 있다.

2. 란저우대학교 - 중국 교육부 자성 및 자성재료 중점 실험실[12]

중국 란저우(兰州)에 자리 잡고 있는 란저우대학교(兰州大学)는 1945에 건립된 중국 일류의 종합성 연구형 국립대학교 중의 하나로서 세계적으로도 유명한 대학교이다. 란저우대학교는 1955년부터 물리학과에 자성전공방향을 설립하고 중국 국방건설 및 과학기술발전을 위하여 많은 자성전공 우수 기술인재들을 양성해 왔으며 이를 기반으로 2000년에 중국 교육부 자성 및 자성재료 중점실험실을 건립하게 되었고 주로 자성 및 신형자성재료를 기반으로 하는 응용기초연구를 진행하고 있다. 실험실은 주로 자기기록기술 및 물리화학, 재료의 미시적 전자기특성연구, 자성박막의 자기전자학(magnetoelectronics) 연구, 자성전자구조 이론연구, 신형 기능성재료연구 및 응용 등 방면을 둘러싸고 아래와 같은 구체적인 연구방향 및 연구팀을 조성하고 있다. 재료의 미시적 전자기특성 연구팀 설덕승(薛德胜, Xue Desheng)과 왕건파(王建波, Wang Jianbo), 자기기록기술 및 물리적 원리 연구팀 팡용(彭勇, Peng Yong)과 백건민(白建民, Bai Jianmin), 자성박막의 자기전자학 연구팀 사이경(谢二庆, Xie Erqing)과 하덕연(贺德衍, He Deyan), 자성전자구조 및 응집물리이론 연구팀 라홍강(罗洪刚, Luo Honggang)과 가성룡(贾成龙, Jia Chenglong), 신형 기능성재료 및 응용기초 연구팀 왕유화(王育华, Wang Yuhua)와 이건공(李建功, Li Jianguong). 현재 란저우대학교 - 중국 교육부 자성 및 자성재료 중점실험실은 주로 교수 23명, 부교수 25명 및 기타 기술인원과 대학원생으로 구성되어 있다.

3. 베이징대학교

중국 베이징(北京)에 자리 잡고 있는 베이징대학교(北京大学)는 1912에 최초로 건립된 연구형 대학교로서 중국 2개 최고급 명문대학교 중 하나로서 세계적으로 유명한 대학교 중의 하나이다. 100여년의 역사를 갖고 있는 종합성 연구형 대학교로서 기초물리학을 기반으로 자성 및 자성재료 연구에 관한 이론연구와 응용기초연구를 진행해 왔으면 2006년 재료과학 및 공정과학을 설립 함으로서 마이크로/나노 스케일 자성재료 및 자기소재연구, 기능성 자기복합재료연구, 자기에너지 전환재료연구 등 많은 분야의 실용성 연구를 진행하게 되었으며 현재에 이르러 세계 자성 및 자성재료 연구영역에서도 큰 영향력을 보이고 있다. 주요 연구방향 및 연구팀 주요 책임자는 아래와 같다. 양응창(杨应昌, Yang Yingchang) 원사 연구팀[13] 주로 신형 영구자석재료 및 희토류 화합물 자성재료 등 연구를 진행하고 있고, 후양용(侯仰龙, Hou Yanglong) 연구팀[14] 주로 자성재료와 기타 이형복합재료의 합성, 증착 및 자기조립(self-assembly) 원리연구 그리고 자성재료 기반으로 새물학적소재 및 기능성 에너지재료 등 연구를 진행하고

있으며, 양금파(杨金波, Yang Jinbo) 연구팀[13] 주로 신형 영구자석재료, 에너지원천재료, 기능성 나노자성재료 및 각종 자기현상에 관한 실험 및 이론연구를 진행하고 있다.

4. 칭화대학교

중국 베이징(北京)에 자리 잡고 있는 칭화대학교(清华大学, Tsinghua University)는 1928에 건립된 각종 공정기술 특색을 갖고 있는 기술연구형 대학교로서 중국 2개 최고급 명문대학교 중 하나로서 세계적으로도 유명한 대학교중의 하나이다. 비록 기타 대학교 또는 연구기구처럼 자성에 관한 국립시험실을 설립하지 않았고 게다가 자성 및 자성재료 연구가 주요 연구방향은 아니지만 주로 스핀전자학, 자성 위상 절연체(magnetic topological insulator), 자성반도체, 전기적자기제어, 자기논리소재, 마이크로자성학 등 자성관련 연구분야에서 세계적인 영향력을 보이고 있으며 주요 연구방향 및 연구팀 주요 책임자는 아래와 같다. 설기곤(薛其坤, Xue Qikun) 원사 연구팀[15] 주로 스핀전자학을 기반으로 하는 양자효과, 자성 토폴로지절연체(topological insulator), 자성반도체, 표면물리현상 및 초전도현상 등 연구를 진행하고 있고, 장효중(章晓中, Zhang Xiaozhong) 연구팀[16] 반도체재료를 기반으로 하는 거대 자전기효과, 자기적 논리소자 및 메모리소자 등에 관하여 연구를 진행하고 있으며, 조영강(赵永刚, Zhao Yonggang) 연구팀[15] 주로 신형 자전기학적재료, 기능성소재 및 다중강성 복합 박막재료 등에 관하여 연구를 진행하고 있으며, 송성(宋成, Song Cheng) 연구팀[16] 주로 자성 박막재료를 기반으로 전기적자기제어와 자성메모리 및 반자성재료를 기반으로 하는 스핀전자학소자 및 멀티제어기술에 관하여 연구를 진행하고 있으며, 위단(韦丹, Wei Dan) 연구팀[16] 주로 마이크로자성학 및 마이크로자성 시뮬레이션연구를 기반으로 하드디스크의 헤드와 리더의 디자인 및 자기적분석, 자기력형미경(magnetic force microscopy) 측정에 관한 이론분석들을 진행하고 있다.

5. 복단대학교

중국 상하이(上海)에 자리 잡고 있는 복단대학교(复旦大学, Fudan University)는 1905에 건립된 중국에서 100여년 발전 역사를 갖고 있는 연구형 대학교로서 세계적으로 유명한 명문대학교 중의 하나이다. 비록 자성분야는 복단대학교의 주요한 연구 방향은 아니지만 물리학을 기반으로 자성재료의 원자구조 및 전자구조, 스핀전자학, 나노자성 및 스핀제어 등 자성관련 이론연구와 기초과학 실험연구들을 많이 진행하고 있으며 세계적으로도 비교적 큰 영향을 보이고 있다[17]. 주요 연구방향 및 연구팀 주요 책임자는 아래와 같다. 김효봉(金晓峰, Jin Xiaofeng) 연구팀은 주로 3d 전이금속 및 합금

의 준안정성 위상상태, 자성과 원자/전자구조사이의 초박막층 자기구조 등 방면의 이론과 기초과학 실험연구를 진행하고 있으며, 심건(沈健, Shen Jian) 연구팀은 주로 스핀전자학을 기반으로 한 스핀 메모리와 논리소자, 전자스핀 및 스핀편극화 전류에 대한 공간적/시간적 고분해능 이미징 기술, 전기/자기장을 이용한 자성재료 표면/계면 자기화제어 등 방면의 연구들을 진행하고 있으며, 초강(肖江, Xiao Jiang) 연구팀은 주로 각종 자성재료에서의 스핀거동(spin behaviors) 및 제어현상들을 연구 함으로서 이리 기반으로 각종 스핀전자학 기능소자들을 연구하고 있다.

6. 난징대학교-국립 고체미세구조 물리실험실

중국 난징(南京)에 자리 잡고 있는 난징대학교(南京大学)는 1950에 건립된 중국 일류의 연구형 대학교 중의 하나로서 세계적으로도 유명한 대학교이다. 난징대학교는 물리학과를 기반으로 1984년에 국립 고체미세구조 물리실험실(State Key Laboratory of Solid State Microstructures)을 건립하게 되었고 주로 유전체 미세구조 및 물리특성, 나노구조재료 및 물리특성, 연응집물질물리학, 불균형상태물질 응집현상 및 자가조립행위 제어 등 자성관련 이론연구 및 실험연구를 진행하고 있으며 자성 및 자성재료에 관한 연구방향 및 연구팀 주요 책임자는 아래와 같다[18]. 도유위(都有为, Du Youwei) 원사 연구팀은 주로 화합물 자성재료내부의 원소조합 및 미세구조사이의 연관성, 자기열현상, 초전도현상, 거대 자기-열-광사이 물리현상, 그리고 나노구조재료의 자성 및 스핀거동에 대하여 연구하고 있으며, 형정옥(邢定钰, Xing Dingyu) 원사 연구팀은 주로 전자와 스핀들의 전이현상, 자성 나노구조의 양자효과, 초전도현상 중 전자와 스핀거동, 자성 다층박막에서의 자전기현상 등에 관한 이론연구를 진행하고 있으며, 정해봉(丁海峰, Ding Haifeng) 연구팀은 주로 자성 나노구조에서의 소용돌이(vortex) 및 스커미온(Skyrmion)의 동역학적 거동 및 제어, 편극화 스핀 주사형 터널 형미경(spin polarization scanning tunneling microscope)을 이용한 자구벽구조연구 등에 관한 연구를 진행하고 있으며, 양일(杨燧, Yang Yi) 연구팀은 주로 자성재료 및 마이크로파 흡수재료, 자성박막에서의 마이크로파 현상연구 및 관련 응용기술 등에 대한 연구를 진행하고 있으며, 왕학봉(王学峰, Wang Xuefeng) 연구팀은 주로 반도체스핀전자학, 이형질구조산화물 박막재료 및 기능소재, 자성박막 증착기술, 자성 위상 절연체(magnetic topological insulator) 등에 관한 연구를 진행하고 있다.

7. 베이징과학기술대학교

중국 베이징(北京)에 자리 잡고 있는 베이징과학기술대학교(北京科技大学)는 1952에 건립된 주로 채광과 야금 공정기술 특

색을 갖고 있는 기술연구형 대학교이며 특히 강철제조 및 응용기술 연구개발 분야에서 중국의 <강철요람>으로 불리우고 있으며 세계적으로도 일정한 지명도를 갖고 있다. 베이징과학기술대학교는 강철에 관한 연구를 기반으로 주로 철족원소 합금 제작, 영구자석재료, 연자석재료, 신형 기능성 자성재료 및 소자, 자기냉동재료 및 기술 등 자성관련 연구들을 진행하고 있으며[19], 주요 연구방향 및 연구팀 주요 책임자는 아래와 같다. 강용(姜勇, Jiang Yong) 연구팀은 주로 강자성나노선 메모리소자, 스핀밸브(spin valve) 및 자기터널접합(magnetic tunnel junction)소자, 자성나노구조에서의 양자효과 등에 관한 연구를 진행하고 있으며, 우광화(于广华, Yu Guanghua) 연구팀 주로 고민감도 자기센서재료, 자기기록재료, 다기능성 자성복합재료, 기능성자전기소자 등 제작 및 응용기술 연구들을 진행하고 있으며, 용의(龙毅, Long Yi) 연구팀 주로 자기냉각 및 자기축열재료, 자기센서용 연자성재료, 신형 영구자석재료, 비정질 연자성재료 등에 관한 연구를 진행하고 있다.

8. 전자과학기술대학교

중국 청두(成都)에 자리 잡고 있는 전자과학기술대학교(电子科技大学)는 1956에 건립된 국방공업기술연구를 기반으로 하는 기술연구형 대학교이며 특히 전자정보과학 기술연구 및 전자정보공업기술 응용개발능력 방면 세계 전자정보업계에서 일정한 지명도를 갖고 있다. 전자과학기술대학교는 전자정보 기술을 기반으로 주로 마이크로파자성소자, 자전기정보재료, 자기동역학소자, 스핀파 및 스핀전자소자, 전자기파 흡수재료, 산화물 연자성체재료 제작 및 응용기술 등 자성 관련 연구들을 진행하고 있다[20]. 주요 연구방향 및 연구팀 주요 책임자는 아래와 같다. 장회무(张怀武, Zhang Huaiwu) 연구팀 주로 자전기정보재료 및 기능소자, 자성나노재료 칩제작, 마이크로파자성재료 및 기능소자, LTCC/LTCC소자제품 개발 등 방면의 연구를 진행해 왔으며, 종지용(钟智勇, Zhong Zhiyong) 연구팀 마이크로파자성소재, 스핀파 및 스핀전자소자, 소형 파워 소스용 자성재료 및 집적형 마이크로/나노소자 등 방면의 연구를 진행해 왔으며, 등용강(邓龙江, Deng Longjiang) 연구팀 주로 전자기파 흡수재료, 마이크로파자성재료 및 기능소자, 전자기메타물질재료, 마이크로자성 시뮬레이션 등 방면의 연구들을 진행해 왔었다.

9. 화중과학기술대학교-국립 펄스 강자기장과학 센터

중국 우한(武汉)에 자리 잡고 있는 화중과학기술대학교(华中科技大学, Huazhong University of Science and Technology)는 2000년에 건립된 주로 기초과학연구와 각종 과학기술연구를 위주로 하는 과학기술연구형 대학교이며 특히 광전기술, 정밀측정기기, 레이저기술, 펄스강자기장기술, 강전자기공정기술

등 방면 세계적으로 일정한 지명도를 갖고 있다. 화중과학기술대학교 국립 펄스 강자기장과학 센터는 2011년에 설립 되어 주로 펄스강자기장을 이용한 물리학, 재료과학, 생화학, 생명과학 등 각종 선진 기초과학분야의 연구들을 진행하고 있으며. 이미 미국과 독일의 뒤를 이어 세번째로 90 T 이상 펄스 자기장세기를 돌파할 수 있는 기술을 갖고 있게 되었다. 국립 펄스 강자기장과학 센터는 주로 자성재료제작기술 및 물성측정, 마이크로파흡수재료, 신형 기능성 전자기재료, 다중강성재료, 자전기센서기술 등 자성관련 연구들을 진행해 왔었으며[21] 주요 연구방향 및 연구팀 주요 책임자는 아래와 같다. 공영주(龚荣洲, Gong Rongzhou) 연구팀은 주로 자성재료 및 기능성 소재, 자성나노구조 제작기술, 다중강성재료, 마이크로파흡수재료 등 연구를 진행하고 있으며, 섭언(聂彦, Nie Yan) 연구팀은 주로 자성마이크로파재료 및 응용기술, 기능성 신형전자기재료, 자성박막재료 및 소재 등 연구를 진행하고 있으며, 장열(张悦, Zhang Yue) 연구팀은 주로 전기장을 이용한 자성재료의 자기특성제어, 전기장을 이용한 자전기센서 및 민감도성능 제어, 스핀전자학 현상에 관한 마이크로자성 시뮬레이션 및 실험 등 방면의 연구들을 진행하고 있다.

10. 바오터우희토연구원

중국 바오터우(包头)에 자리 잡고 있는 바오터우희토연구원(包头稀土研究院, Baotou Research Institute of Rare Earths)는 1963 년에 건립된 주로 희토정보, 희토류산업 기술지도 및 희토류재료의 분석서비스를 제공 할 뿐만 아니라 희토자원의 종합기술개발 및 응용기술 연구도 진행하는 기업형 종합연구기구로서 희토관련 금속재료연구소, 야금기술연구소, 기능성 희토류재료연구소, 자원 및 환경연구소를 갖고 있으며, 게다가 중국에서 제일 큰 희토류 신재료생산 테스트기지까지 갖고 있어 세계적으로 희토개발기술 및 희토관련 영역에서 큰 영향력을 보이고 있으며 중국 국방건설에 큰 기여를 하고 있다. 바오터우 희토연구원 기능성 희토류재료 연구소에서 주로 자성 및 자성재료에 관한 연구를 진행하고 있으며[22] 주요 연구방향 및 연구팀 주요 책임자는 아래와 같다. 황초굉(黄焦宏, Huang Jiaohong) 연구팀은 주로 희토류금속을 기반으로 영구자성재료 및 소재, 실온 자기냉각재료 및 자기냉각기술 등 기술연구를 진행하고 있으며, 연구제작한 차세대 실온 자기냉각기술은 이미 하이얼(Haier) 그룹 과 메이디(Midea)그룹의 주목을 받고 있다. 학굉파(郝宏波, Hao Hongbo) 연구팀은 주로 자성수축재료, 희토류합금제작, 기능성자기재료 및 소재 등 방면의 연구를 진행하고 있다.

이상은 중국의 기초자성연구, 자성재료연구 및 응용기술연구 방면에 큰 영향력을 갖고 있거나 또는 기술적 특색을 갖고 있는 주요한 연구기구나 연구그룹들 이다. 뿐만 아니라,

중국과학기술대학(中国科学技术大学)의 이효광(李晓光, Li Xiaoguang) 연구팀은 주로 다중강성재료 터널접합기술을 이용한 메모리 소자 및 자성다이오드 등 연구를 진행해 왔고, 주홍(朱弘, Zhu Hong) 연구팀은 주로 전의금속산화물을 기반으로 각종 자성특성, 다중강성, 인공다층박막구조 등에 관한 연구를 진행해 왔다[23]. 동제대학교(同济大学, Tongji University)의 주사명(周仕明, Zhou Shiming) 연구팀으로 금속자성박막을 기반으로 스핀동역학, 기능성 스핀소자, 교환 바이어스현상 등에 관한 연구를 진행하고 있으며, 유요운(刘要稳, Liu Yaowen) 연구팀은 주로 마이크로자성 시뮬레이션을 기반으로 스핀동역학, 스핀자기학 나노소자 작동원리 및 디자인 방면 연구를 진행하고 있다[24]. 산둥대학교(山东大学)의 안세신(颜世申, Yan Shishen) 연구팀은 주로 스핀전자학을 기반으로 자성반도체 및 고효율 스핀전자주입, 스핀배터리 등에 관한 연구를 진행하고 있고, 호계범(胡季帆, Hu Jifan) 연구팀은 주로 자성 및 자성재료, 기능성자기합금, 연자성물질에 관한 이론연구를 진행해 왔다[25]. 서남응용자성연구소(西南应用磁学研究所, Southwest China Institute of Applied Magnetism) [26]은 중국에서 가장 큰 종합성 자성응용기술연구 기지로서 비록 자성 및 자성재료 그리고 많은 응용에 관한 연구를 진행하고 있으나 학술적 교류방면 활발하지 않으므로 널리 알려지지 않고 있는 상황이다. 이 기회를 빌어 삼협대학교(三峡大学, China Three Gorges University)를 간단히 소개하도록 하겠다. 중국 의창(宜昌, Yichang)에 자리 잡고 있는 삼협대학교는 1978년에 건립된 중국 수리전력부(水利电力部) 소속인 8개 대학교 중 하나이며 또한 전력공업부(电力工业部) 소속인 6개 대학교 중 하나인 갈주패수 전공정학원(葛洲坝水电工程学院)으로부터 발전하여 2000년에 새롭게 수리전력기술 특색과 우세가 선명한 종합성 기술형 대학교이다. 2012년 삼협대학교는 의창시의 <중국자기밸리>산업기지 건설전략에 비추어 자기전자학 및 약자기장 탐측기술연구소(Research Institute for Magnetoelectronics & Weak Magnetic-field Detection)[27]을 설립하였으며 주로 스핀전자학재료 및 소자, 자기열효과박막재료, 자성마이크로/나노구조소자제작, 자기전자공학기술 기반한 고민감도 자기센서, 고민감도 약자기장 탐측기술개발 등 방면의 연구들을 진행하고 있다.

III. 결 론

이상 소개한 바와 같이, 중국에서 자성 및 자성재료 방면 연구가 아주 빠른 발전을 가져 왔으며, 이미 거대한 경제적 효과를 보고 있다. 현재 중국에서의 자성관련 연구 현황에 대하여 상세한 분석을 하지만 아주 큰 공정과도 같으므로 본문은 다만 2017년 중국 물리학회 가을 총회 자성분회[28] 및

2015년 중국 자성 및 자성재료 학회[29]에서의 참여도 및 초록제출 상황에 비추어 작성하였으며 중국의 수많은 자성 관련 연구 그룹들 중에서 비교적 큰 영향력과 연구 특색을 갖고 있는 연구팀들을 정리해 보았다. 비록 저자의 능력 및 정력의 제한으로 이상 자성 관련 연구그룹들에 대하여 전면적인 소개를 펼치 못하고 다만 인터넷 사이트나 공식적으로 공개된 서류들을 통하여 정리하였지만 이 문장을 통하여 독자들이 자성 및 자성재료 연구의 현황으로부터 중국을 더 깊게 이해하고 중국과 한국 연구팀들 사이 학술교류 및 공동연구방면에서 도움이 되길 바랄 뿐이다.

감사의 글

이 논문은 the National Natural Science Foundation of China(Grant No. 11474183)의 지원과 DGIST 유천열 교수님의 제안을 받고 수행함.

References

- [1] Z.-Q. Han(韩志全), *J. Magn. Mater. Devices* **41**, 1 (2009).
- [2] J. Zhang(张继松), Y. Wang(王燕明), and H. He(何虹), *Magnetic Components and Power Supply* **6**, 101 (2012).
- [3] Q. Yan(晏强), R. Zhu(朱瑞), S. Hu(胡顺), and F. Li(李飞周), *Guide to Business* **12**, 70 (2013).
- [4] X. Wong(翁兴园), *Advanced Materials Industry* **8**, 23 (2017).
- [5] K. Feng(冯凯), *China Science and Technology Reviews* **4**, 136 (2017).
- [6] Institute of Physics, CAS: <http://www.iop.cas.cn/>; Ningbo Institute of Industrial Technology, CAS: <http://www.nimte.ac.cn/>; Institute of metal research, CAS: <http://www.imr.cas.cn/>; Hefei Institute of Physical Science, CAS: <http://www.hfcas.ac.cn/>; Institute of Semiconductors, CAS: <http://www.semi.ac.cn/>.
- [7] Z. Hou, W. Ren, B. Ding, G. Xu, Y. Wang, B. Yang, Q. Zhang, Y. Zhang, E. Liu, F. Xu, W. Wang, G. Wu, X. Zhang, B. Shen, and Z. Zhang, *Adv. Mater.* **29**, 1701144 (2017); C. Fang, C. H. Wan, Z. H. Yuan, L. Huang, X. Zhang, H. Wu, Q. T. Zhang, and X. F. Han, *Phys. Rev. B* **93**, 054420 (2016); K. Zhai, Y. Wu, S. Shen, W. Tian, H. Cao, Y. Chai, B. C. Chakoumakos, D. Shang, L. Yan, F. Wang, and Y. Sun, *Nature Commu.* **8**, 519 (2017).
- [8] S. He, J. He, W. Zhang, L. Zhao, D. Liu, X. Liu, D. Mou, Y.-B. Ou, Q.-Y. Wang, Z. Li, L. Wang, Y. Peng, Y. Liu, C. Chen, L. Yu, G. Liu, X. Dong, J. Zhang, C. Chen, Z. Xu, X. Chen, X. Ma, Q. Xue, and X. J. Zhou, *Nature Mater.* **12**, 605 (2013); J. Shang, W. Xue, Z. Ji, G. Liu, X. Niu, X. Yi, L. Pan, Q. Zhan, X.-H. Xu, and R.-W. Li, *Nanoscale* **9**, 7037 (2017).
- [9] J. Hu, Y. N. Shi, X. Sauvage, G. Sha, and K. Lu, *Science* **355**, 1292 (2017); X. Li and K. Lu, *Nature Mater.* **16**, 700 (2017).

- [10] W. Gao, N. Hao, F.-W. Zheng, W. Ning, M. Wu, X. Zhu, G. Zheng, J. Zhang, J. Lu, H. Zhang, C. Xi, J. Yang, H. Du, P. Zhang, Y. Zhang, and M. Tian, *Phys. Rev. Lett.* **118**, 256601 (2017); G. Zheng, X. Zhu, Y. Liu, J. Lu, W. Ning, H. Zhang, W. Gao, Y. Han, J. Yang, H. Du, K. Yang, Y. Zhang, and M. Tian, *Phys. Rev. B* **96**, 121401 (2017); L. H. Yin, J. Yang, P. Tong, X. Luo, W. H. Song, J. M. Dai, X. B. Zhu, and Y. P. Sun, *Appl. Phys. Lett.* **110**, 192904 (2017).
- [11] S. H. Nie, Y. Y. Chin, W. Q. Liu, J. C. Tung, J. Lu, H. J. Lin, G. Y. Guo, K. K. Meng, L. Chen, L. J. Zhu, D. Pan, C. T. Chen, Y. B. Xu, W. S. Yan, and J. H. Zhao, *Phys. Rev. Lett.* **111**, 027203 (2013); B. Zhang, K.-K. Meng, M.-Y. Yang, K. W. Edmonds, H. Zhang, K.-M. Cai, Y. Sheng, N. Zhang, Y. Ji, J.-H. Zhao, H.-Z. Zheng, and K.-Y. Wang, *Sci. Reports* **6**, 28458 (2016).
- [12] <http://magnetism.lzu.edu.cn/>; T. Wang, M. Si, D. Yang, Z. Shi, F. Wang, Z. Yang, S. Zhou, and D. Xue, *Nanoscale* **6**, 3978 (2014); D. Yang, F. Wang, Y. Ren, Y. Zuo, Y. Peng, S. Zhou, and D. Xue, *Adv. Funct. Mater.* **23**, 2918 (2013); Z. H. Zhang, Y. S. Gui, L. Fu, X. L. Fan, J. W. Cao, D. S. Xue, P. P. Freitas, D. Houssameddine, S. Hemour, K. Wu, and C.-M. Hu, *Phys. Rev. Lett.* **109**, 037206 (2012).
- [13] <http://www.phy.pku.edu.cn/>.
- [14] <http://nbm.coe.pku.edu.cn/Home.html>; F. Liu, Y. Hou, and S. Gao, *Chem. Soc. Rev.* **43**, 8098 (2014); J. Yu, C. Yang, J. Li, Y. Ding, L. Zhang, M. Z. Yousaf, J. Lin, R. Pang, L. Wei, L. Xu, F. Sheng, C. Li, G. Li, L. Zhao, and Y. Hou, *Adv. Mater.* **26**, 4114 (2014).
- [15] <http://www.tsinghua.edu.cn/publish/phy/>; P. Li, Y. Zhao, S. Zhang, A. Chen, D. Li, J. Ma, Y. Liu, D. T. Pierce, J. Unguris, H.-G. Piao, H. Zhang, M. Zhu, X. Zhang, X. Han, M. Pan, and C.-W. Nan, *ACS Appl. Mater. Interfaces* **9**, 2642 (2017); C.-Z. Chang, J. Zhang, X. Feng, J. Shen, Z. Zhang, M. Guo, K. Li, Y. Ou, P. Wei, L.-L. Wang, Z.-Q. Ji, Y. Feng, S. Ji, X. Chen, J. Jia, X. Dai, Z. Fang, S.-C. Zhang, K. He, Y. Wang, L. Lu, X.-C. Ma, and Q.-K. Xue, *Science* **340**, 167 (2013); C.-L. Song, Y.-L. Wang, Y.-X. Ning, J.-F. Jia, X. Chen, B. Sun, P. Zhang, Q.-K. Xue, and X. Ma, *J. Am. Chem. Soc.* **132**, 1456 (2010).
- [16] <http://www.mse.tsinghua.edu.cn/>; Z. Luo, H.-G. Piao, A. V. Brooks, X. Wang, J. Chen, C. Xiong, F. Yang, X. Wang, X.-G. Zhang, and X. Zhang, *Adv. Electron. Mater.* **3**, 1700186 (2017); Z. Luo, C. Xiong, X. Zhang, Z.-G. Guo, J. Cai, and X. Zhang, *Adv. Mater.* **28**, 2760 (2016); C. Wan, X. Zhang, X. Gao, J. Wang, and X. Tan, *Nature* **477**, 304 (2011).
- [17] <http://phys.fudan.edu.cn/>; Y. Tian, L. Ye, and X.-F. Jin, *Phys. Rev. Lett.* **103**, 087206 (2009); T. Kikkawa, K. Uchida, S. Daimon, Y. Shiomi, H. Adachi, Z. Qiu, D. Hou, X.-F. Jin, S. Maekawa, and E. Saitoh, *Phys. Rev. B* **88**, 214403 (2013).
- [18] <http://vlssm.nju.edu.cn/>; Y.-Y. Gong, D.-H. Wang, Q.-Q. Cao, E.-K. Liu, J. Liu, and Y.-W. Du, *Adv. Mater.* **27**, 801 (2014); Y. Zhang, X. Zhang, B. Quan, G. Ji, X. Liang, W. Liu, and Y. Du, *Nanotechnology* **28**, 115704 (2017); P. Wang, S. W. Jiang, Z. Z. Luan, L. F. Zhou, H. F. Ding, Y. Zhou, X. D. Tao, and D. Wu, *Appl. Phys. Lett.* **109**, 112406 (2016).
- [19] <http://mse.ustb.edu.cn/>; K. K. Meng, J. Miao, X. G. Xu, Y. Wu, X. P. Zhao, J. H. Zhao, and Y. Jiang, *Phys. Rev. B* **94**, 214413 (2016); Z. Xu, L. Yu, X. Xu, J. Miao, and Y. Jiang, *Appl. Phys. Lett.* **104**, 192903 (2014).
- [20] www.me.uestc.edu.cn/; Q. Wang, A. V. Chumak, L. Jin, H. Zhang, B. Hillebrands, and Z. Zhong, *Phys. Rev. B* **95**, 134433 (2017); X. Tang, H. Su, H. Zhang, and N. X. Sun, *Appl. Phys. Lett.* **109**, 202903 (2016).
- [21] <http://whmfc.hust.edu.cn/english/index.htm>; Z. Zhu, J. Wang, H. Zuo, B. Fauqué, R. D. McDonald, Y. Fuseya, and K. Behnia, *Nature Commu.* **8**, 15297 (2017); G. Dai, Z. Zhong, X. Wu, S. Zhan, S. Hu, P. Hu, J. Hu, S. Wu, J. Han, and Y. Liu, *Nanotechnology* **28**, 155702 (2017); Z. Yuan, H. Lu, Y. Liu, J. Wang, and S. Jia, *Phys. Rev. B* **39**, 184405 (2016).
- [22] <http://en.brice.com/>.
- [23] <http://supercond-mag.ustc.edu.cn/>; <http://phys.ustc.edu.cn/>; S. Liang, H. Yang, H. Yang, B. Tao, A. Djeflal, M. Chshiev, W. Huang, X. Li, A. Ferri, R. Desfeux, S. Mangin, D. Lacour, M. Hehn, O. Copie, K. Dumesnil, and Y. Lu, *Adv. Mater.* **28**, 10204 (2016); R. Geng, A. Roy, W. Zhao, R. C. Subedi, X. Li, J. Locklin, and T. D. Nguyen, *Adv. Funct. Mater.* **26**, 3999 (2016).
- [24] <http://physics.tongji.edu.cn/>; H.-H. Chen, C.-M. Lee, Z. Zhang, Y. Liu, J.-C. Wu, L. Horng, and C.-R. Chang, *Phys. Rev. B* **93**, 224410 (2016); L. Ma, H.-A. Zhou, L. Wang, X.-L. Fan, W.-J. Fan, D.-S. Xue, K. Xia, Z. Wang, R.-Q. Wu, G.-Y. Guo, L. Sun, X. Wang, X.-M. Cheng, and S.-M. Zhou, *Adv. Electron. Mater.* **2**, 1600112 (2016).
- [25] <http://www.phy.sdu.edu.cn/>; L. Liu, H. Qin, and J. Hu, *Sci. Reports* **7**, 42410 (2017); G. Wei, L. Wei, D. Wang, Y. Chen, Y. Tian, S. Yan, L. Mei, and J. Jiao, *Appl. Phys. Lett.* **110**, 062404 (2017).
- [26] <http://www.siam.cn/>.
- [27] <http://lxy.ctgu.edu.cn/>; H.-G. Piao, J.-H. Shim, D. Djuhana, and D.-H. Kim, *Appl. Phys. Lett.* **102**, 112405 (2013); M. Liu, L. Pan, H. Piao, H. Sun, X. Huang, C. Peng, and Y. Liu, *ACS Appl. Mater. Interfaces* **7**, 26017 (2015); G. Lu, X. Huang, H. Piao, and L. Pan, *J. Alloy. Compd.* **668**, 107 (2016); D. C. Linh, T. D. Thanh, L. H. Anh, V. D. Dao, H.-G. Piao, and S.-C. Yu, *J. Alloy. Compd.* **725**, 484 (2017).
- [28] 2017 CPS Fall Meeting (Chinese Physical Society), 7-10 Sep. 2017: Chengdu China (<http://www.scu2017.cpsjournals.org/>).
- [29] 16th National conference on Magnetism and Magnetic Materials in China, 21-25 Oct. 2015, Yangzhou China.