

清华大学优秀博士学位论文丛书



tsinghua
theses

透射电镜中电子磁手性 二向色性技术的研究

宋东升 著 Song Dongsheng

Research on
the Electron Magnetic Chiral Dichroism Technique
in the Transmission Electron Microscope

清华大学出版社
TSINGHUA UNIVERSITY PRESS

清华大学优秀博士学位论文丛书

透射电镜中电子磁手性 二向色性技术的研究

宋东升 著 Song Dongsheng

Research on
the Electron Magnetic Chiral Dichroism Technique
in the Transmission Electron Microscope



清华大学出版社
北 京

内 容 简 介

本书从基础理论和实验方法两方面对 EMCD 技术进行了深入研究和创新,主要包括三个方面:(1)发展了纳米尺度上 EMCD 技术定量磁参数测量的一般方法;(2)提出和实现了面内 EMCD 技术,实现了样品面内本征磁信号的测量,打破了传统 EMCD 技术单一面外方向磁性测量的局限性;(3)利用发展的理论和方法,定量测量了自旋流器件 $\text{Y}_3\text{Fe}_5\text{O}_{12}/\text{Pt}$ 界面铁的磁性参数的变化和 $\text{La}_{0.7}\text{Sr}_{0.3}\text{MnO}_3$ 中锰的磁参数。

本书是作者在清华大学材料学院攻读博士学位期间研究成果的总结,可供透射电镜相关领域的研究人员参考。

版权所有,侵权必究。侵权举报电话:010-62782989 13701121933

图书在版编目(CIP)数据

透射电镜中电子磁手性二向色性技术的研究/宋东升著. —北京:清华大学出版社,2019

(清华大学优秀博士学位论文丛书)

ISBN 978-7-302-52091-7

I. ①透… II. ①宋… III. ①电子显微镜分析—二向色性—研究 IV. ①O657.99

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2019)第 010404 号

责任编辑:黎 强 戚 亚

封面设计:傅瑞学

责任校对:赵丽敏

责任印制:宋 林

出版发行:清华大学出版社

网 址: <http://www.tup.com.cn>, <http://www.wqbook.com>

地 址:北京清华大学学研大厦 A 座 邮编:100084

社 总 机:010-62770175 邮 购:010-62786544

投稿与读者服务:010-62776969, c-service@tup.tsinghua.edu.cn

质量反馈:010-62772015, zhiliang@tup.tsinghua.edu.cn

印 装 者:三河市铭诚印务有限公司

经 销:全国新华书店

开 本:155mm×235mm 印 张:9.5 字 数:160 千字

版 次:2019 年 6 月第 1 版 印 次:2019 年 6 月第 1 次印刷

定 价:79.00 元

产品编号:080947-01

一流博士生教育 体现一流大学人才培养的高度(代丛书序)^①

人才培养是大学的根本任务。只有培养出一流人才的高校,才能够成为世界一流大学。本科教育是培养一流人才最重要的基础,是一流大学的底色,体现了学校的传统和特色。博士生教育是学历教育的最高层次,体现出一所大学人才培养的高度,代表着一个国家的人才培养水平。清华大学正在全面推进综合改革,深化教育教学改革,探索建立完善的博士生选拔培养机制,不断提升博士生培养质量。

学术精神的培养是博士生教育的根本

学术精神是大学精神的重要组成部分,是学者与学术群体在学术活动中坚守的价值准则。大学对学术精神的追求,反映了一所大学对学术的重视、对真理的热爱和对功利性目标的摒弃。博士生教育要培养有志于追求学术的人,其根本在于学术精神的培养。

无论古今中外,博士这一称号都是和学问、学术紧密联系在一起,和知识探索密切相关。我国的博士一词起源于2000多年前的战国时期,是一种学官名。博士任职者负责保管文献档案、编撰著述,须知识渊博并负有传授学问的职责。东汉学者应劭在《汉官仪》中写道:“博者,通博古今;士者,辩于然否。”后来,人们逐渐把精通某种职业的专门人才称为博士。博士作为一种学位,最早产生于12世纪,最初它是加入教师行会的一种资格证书。19世纪初,德国柏林大学成立,其哲学院取代了以往神学院在大学中的地位,在大学发展的历史上首次产生了由哲学院授予的哲学博士学位,并赋予了哲学博士深层次的教育内涵,即推崇学术自由、创造新知识。哲学博士的设立标志着现代博士生教育的开端,博士则被定义为独立从事学术研究、具备创造新知识能力的人,是学术精神的传承者和光大者。

^① 本文首发于《光明日报》,2017年12月5日。

博士生学习期间是培养学术精神最重要的阶段。博士生需要接受严谨的学术训练,开展深入的学术研究,并通过发表学术论文、参与学术活动及博士论文答辩等环节,证明自身的学术能力。更重要的是,博士生要培养学术志趣,把对学术的热爱融入生命之中,把捍卫真理作为毕生的追求。博士生更要学会如何面对干扰和诱惑,远离功利,保持安静、从容的心态。学术精神特别是其中所蕴含的科学理性精神、学术奉献精神不仅对博士生未来的学术事业至关重要,对博士生一生的发展都大有裨益。

独创性和批判性思维是博士生最重要的素质

博士生需要具备很多素质,包括逻辑推理、言语表达、沟通协作等,但是最重要的素质是独创性和批判性思维。

学术重视传承,但更看重突破和创新。博士生作为学术事业的后备力量,要立志于追求独创性。独创意味着独立和创造,没有独立精神,往往很难产生创造性的成果。1929年6月3日,在清华大学国学院导师王国维逝世二周年之际,国学院师生为纪念这位杰出的学者,募款修造“海宁王静安先生纪念碑”,同为国学院导师的陈寅恪先生撰写了碑铭,其中写道:“先生之著述,或有时而不章;先生之学说,或有时而可商;惟此独立之精神,自由之思想,历千万祀,与天壤而同久,共三光而永光。”这是对于一位学者的极高评价。中国著名的史学家、文学家司马迁所讲的“究天人之际,通古今之变,成一家之言”也是强调要在古今贯通中形成自己独立的见解,并努力达到新的高度。博士生应该以“独立之精神、自由之思想”来要求自己,不断创造新的学术成果。

诺贝尔物理学奖获得者杨振宁先生曾在20世纪80年代初对到访纽约州立大学石溪分校的90多名中国学生、学者提出:“独创性是科学工作者最重要的素质。”杨先生主张做研究的人一定要有独创的精神、独到的见解和独立研究的能力。在科技如此发达的今天,学术上的独创性变得越来越难,也愈加珍贵和重要。博士生要树立敢为天下先的志向,在独创性上下功夫,勇于挑战最前沿的科学问题。

批判性思维是一种遵循逻辑规则、不断质疑和反省的思维方式,具有批判性思维的人勇于挑战自己、敢于挑战权威。批判性思维的缺乏往往被认为是中国学生特有的弱项,也是我们在博士生培养方面存在的一个普遍问题。2001年,美国卡内基基金会开展了一项“卡内基博士生教育创新计划”,针对博士生教育进行调研,并发布了研究报告。该报告指出:在美国和

欧洲,培养学生保持批判而质疑的眼光看待自己、同行和导师的观点同样非常不容易,批判性思维的培养必须要成为博士生培养项目的组成部分。

对于博士生而言,批判性思维的养成要从如何面对权威开始。为了鼓励学生质疑学术权威、挑战现有学术范式,培养学生的挑战精神和创新能力,清华大学在2013年发起“巅峰对话”,由学生自主邀请各学科领域具有国际影响力的学术大师与清华学生同台对话。该活动迄今已经举办了21期,先后邀请17位诺贝尔奖、3位图灵奖、1位菲尔兹奖获得者参与对话。诺贝尔化学奖得主巴里·夏普莱斯(Barry Sharpless)在2013年11月来清华参加“巅峰对话”时,对于清华学生的质疑精神印象深刻。他在接受媒体采访时谈道:“清华的学生无所畏惧,请原谅我的措辞,但他们真的很有胆量。”这是我听到的对清华学生的最高评价,博士生就应该具备这样的勇气和能力。培养批判性思维更难的一层是要有勇气不断否定自己,有一种不断超越自己的精神。爱因斯坦说:“在真理的认识方面,任何以权威自居的人,必将在上帝的嬉笑中垮台。”这句名言应该成为每一位从事学术研究的博士生的箴言。

提高博士生培养质量有赖于构建全方位的博士生教育体系

一流的博士生教育要有一流的教育理念,需要构建全方位的教育体系,把教育理念落实到博士生培养的各个环节中。

在博士生选拔方面,不能简单按考分录取,而是要侧重评价学术志趣和创新潜力。知识结构固然重要,但学术志趣和创新潜力更关键,考分不能完全反映学生的学术潜质。清华大学在经过多年试点探索的基础上,于2016年开始全面实行博士生招生“申请-审核”制,从原来的按照考试分数招收博士生转变为按科研创新能力、专业学术潜质招收,并给予院系、学科、导师更大的自主权。《清华大学“申请-审核”制实施办法》明晰了导师和院系在考核、遴选和推荐上的权力和职责,同时确定了规范的流程及监管要求。

在博士生指导教师资格确认方面,不能论资排辈,要更看重教师的学术活力及研究工作的前沿性。博士生教育质量的提升关键在于教师,要让更多、更优秀的教师参与到博士生教育中来。清华大学从2009年开始探索将博士生导师评定权下放到各学位评定分委员会,允许评聘一部分优秀副教授担任博士生导师。近年来学校在推进教师人事制度改革过程中,明确教科研系列助理教授可以独立指导博士生,让富有创造活力的青年教师指导优秀的青年学生,师生相互促进、共同成长。

在促进博士生交流方面,要努力突破学科领域的界限,注重搭建跨学科的平台。跨学科交流是激发博士生学术创造力的重要途径,博士生要努力提升在交叉学科领域开展科研工作的能力。清华大学于2014年创办了“微沙龙”平台,同学们可以通过微信平台随时发布学术话题、寻觅学术伙伴。3年来,博士生参与和发起“微沙龙”12 000多场,参与博士生达38 000多人次。“微沙龙”促进了不同学科学生之间的思想碰撞,激发了同学们的学术志趣。清华于2002年创办了博士生论坛,论坛由同学自己组织,师生共同参与。博士生论坛持续举办了500期,开展了18 000多场学术报告,切实起到了师生互动、教学相长、学科交融、促进交流的作用。学校积极资助博士生到世界一流大学开展交流与合作研究,超过60%的博士生有海外访学经历。清华于2011年设立了发展中国家博士生项目,鼓励学生到发展中国家亲身体验和调研,在全球化背景下研究发展中国家的各类问题。

在博士学位评定方面,权力要进一步下放,学术判断应该由各领域的学者来负责。院系二级学术单位应该在评定博士论文水平上拥有更多的权力,也应担负更多的责任。清华大学从2015年开始把学位论文的评审职责授权给各学位评定分委员会,学位论文质量和学位评审过程主要由各学位分委员会进行把关,校学位委员会负责学位管理整体工作,负责制度建设和争议事项处理。

全面提高人才培养能力是建设世界一流大学的核心。博士生培养质量的提升是大学办学质量提升的重要标志。我们要高度重视、充分发挥博士生教育的战略性、引领性作用,面向世界、勇于进取,树立自信、保持特色,不断推动一流大学的人才培养迈向新的高度。



清华大学校长

2017年12月5日

丛书序二

以学术型人才培养为主的博士生教育,肩负着培养具有国际竞争力的高层次学术创新人才的重任,是国家发展战略的重要组成部分,是清华大学人才培养的重中之重。

作为首批设立研究生院的高校,清华大学自20世纪80年代初开始,立足国家和社会需要,结合校内实际情况,不断推动博士生教育改革。为了提供适宜博士生成长的学术环境,我校一方面不断地营造浓厚的学术氛围,一方面大力推动培养模式创新探索。我校已多年运行一系列博士生培养专项基金和特色项目,激励博士生潜心学术、锐意创新,提升博士生的国际视野,倡导跨学科研究与交流,不断提升博士生培养质量。

博士生是最具创造力的学术研究新生力量,思维活跃,求真求实。他们在导师的指导下进入本领域研究前沿,吸取本领域最新的研究成果,拓宽人类的认知边界,不断取得创新性成果。这套优秀博士学位论文丛书,不仅是我校博士生研究工作前沿成果的体现,也是我校博士生学术精神传承和光大的体现。

这套丛书的每一篇论文均来自学校新近每年评选的校级优秀博士学位论文。为了鼓励创新,激励优秀的博士生脱颖而出,同时激励导师悉心指导,我校评选校级优秀博士学位论文已有20多年。评选出的优秀博士学位论文代表了我校各学科最优秀的博士学位论文的水平。为了传播优秀的博士学位论文成果,更好地推动学术交流与学科建设,促进博士生未来发展和成长,清华大学研究生院与清华大学出版社合作出版这些优秀的博士学位论文。

感谢清华大学出版社,悉心地为每位作者提供专业、细致的写作和出版指导,使这些博士论文以专著方式呈现在读者面前,促进了这些最新的优秀研究成果的快速广泛传播。相信本套丛书的出版可以为国内外各相关领域或交叉领域的在读研究生和科研人员提供有益的参考,为相关学科领域的发展和优秀科研成果的转化起到积极的推动作用。

感谢丛书作者的导师们。这些优秀的博士学位论文,从选题、研究到成文,离不开导师的精心指导。我校优秀的师生导学传统,成就了一项项优秀的研究成果,成就了一大批青年学者,也成就了清华的学术研究。感谢导师们为每篇论文精心撰写序言,帮助读者更好地理解论文。

感谢丛书的作者们。他们优秀的学术成果,连同鲜活的思想、创新的精神、严谨的学风,都为致力于学术研究的后来者树立了榜样。他们本着精益求精的精神,对论文进行了细致的修改完善,使之在具备科学性、前沿性的同时,更具系统性和可读性。

这套丛书涵盖清华众多学科,从论文的选题能够感受到作者们积极参与国家重大战略、社会发展问题、新兴产业创新等的研究热情,能够感受到作者们的国际视野和人文情怀。相信这些年轻作者们勇于承担学术创新重任的社会责任感能够感染和带动越来越多的博士生,将论文书写在祖国的大地上。

祝愿丛书的作者们、读者们和所有从事学术研究的同行们在未来的道路上坚持梦想,百折不挠!在服务国家、奉献社会和造福人类的事业中不断创新,做新时代的引领者。

相信每一位读者在阅读这一本本学术著作的时候,在吸取学术创新成果、享受学术之美的同时,能够将其中所蕴含的科学理性精神和学术奉献精神传播和发扬出去。



清华大学研究生院院长

2018年1月5日

导师序言

纳米尺度上材料局域磁性质的测量一直是一个具有挑战性的难题。传统的磁性测量手段只能给出材料块体的磁性质,分辨率也较低,在一定程度上限制了人们从更小的尺度和更微观的层次去研究材料的磁性质。因此,基于具有高空间分辨能力的设备,发展新的高空间分辨磁性表征技术就十分必要。2006年,奥地利科学家 Peter Schattschneider 发明了电子磁手性二向色性(electron magnetic chiral dichroism, EMCD)技术,首次在透射电镜中实现了对磁性材料 EMCD 信号的测量。2013年,我们研究组提出了占位分辨的 EMCD 技术,实现了尖晶石结构 NiFe_2O_4 中定量磁参数的测量,具有占位分辨、元素分辨和轨道自旋分辨的特点。然而,EMCD 技术中仍旧存在一些问题需要解决,比如低的信噪比、衍射几何的对称性和局限性、定量磁参数测量方法的普适性、高空间分辨 EMCD 技术、EMCD 技术本征磁性的测量等。因此,将 EMCD 技术发展成为一种完善的定量磁性测量技术,并与透射电镜中其他先进的原子结构、电子结构和化学成分等手段协同使用,解决材料中存在的实际问题,具有十分重要的意义。

本书在之前工作的基础上,进一步从基础理论和实验方法两方面,深入研究了 EMCD 技术中存在的问题,发展和应用了定量 EMCD 技术。同时,也探索和创新出了本征磁性测量的面内 EMCD 技术新方法,促进了 EMCD 技术的发展。学术价值主要体现在三个方面:(1)提出和实现了面内 EMCD 技术,实现了样品面内本征磁信号的测量,打破了传统 EMCD 技术单一面外方向磁性测量的局限性。这既是对传统面外 EMCD 技术的一个创新和突破,也是继占位分辨 EMCD 技术之后,相比 XMCD 技术的又一个新优势。面内 EMCD 技术的工作是原创性的,受到了国内外学者的好评,在博士论文的匿名评审中被认为是世界水平的工作。(2)发展了纳米尺度上 EMCD 技术定量磁参数测量的一般方法。充分利用了衍射动力学效应,提高了 EMCD 信号的信噪比,为定量测量奠定了基础。同时,一般方法的建立也打破了原有的占位分辨 EMCD 技术对晶体结构的依赖性。此外,指

出了三束衍射几何的不对称性,并且提出了正带轴的 EMCD 技术衍射几何。(3)利用发展的理论和方法,定量测量了自旋流器件 $\text{Y}_3\text{Fe}_5\text{O}_{12}/\text{Pt}$ 界面铁的磁参数的变化和 $\text{SrTiO}_3/\text{La}_{0.7}\text{Sr}_{0.3}\text{MnO}_3$ 中锰的磁参数。

最近,利用物镜球差矫正器和色差矫正器,同时结合电子能量损失谱中的纵剖成像方法,我们已经发展出了具有原子层空间分辨能力的 EMCD 技术,成功地实现了 $\text{Sr}_2\text{FeMoO}_6$ 中不同原子层 Fe 原子的磁性测量,具有重要的意义。然而,以上 EMCD 技术的发展都是基于常规电子束,在特定的衍射几何下晶体充当分束器,最终实现手性 EMCD 信号的探测。近些年来发展的具有轨道角动量的涡旋电子束,结合 EMCD 技术实现二维原子分辨的磁性测量,也受到了极大的关注。利用涡旋电子束来实现 EMCD 技术的磁性测量,对于传统 EMCD 技术既是一个挑战,也是一个进步。目前理论和实验方面的研究都已经取得了很多突破,怎样获得可控的具有特殊性质的电子束,并且在实验上获得高信噪比的能用于定量测量的 EMCD 信号仍然是一个需要解决的问题。

朱 静

清华大学材料学院

2018 年 6 月

摘 要

在透射电子显微镜中,实现纳米尺度上定量磁参数的测量一直是一个具有挑战性的难题。电子磁手性二向色性技术的发明,实现了利用透射电子实现材料磁性测量的新方法,也是继洛伦兹技术和电子全息技术之后,透射电镜中又一种新的磁性表征手段。但是 EMCD 技术仍然是一门发展中的技术,在使用过程中还存在一些问题需要解决、完善,对透射电镜中纳米尺度上的磁性表征具有重要的意义。

本书首先建立了一套 EMCD 技术定量磁参数测量的一般方法,以石榴石结构的 $\text{Y}_3\text{Fe}_5\text{O}_{12}$ (YIG) 为例,实现了定量磁参数测量。主要包括以下三个方面:建立了一套寻找衍射动力学条件的一般方法,打破了占位分辨 EMCD 技术对晶体结构的限制;指出了三束衍射几何中的不对称性,为实验中信号采集位置的选择提供了指导;通过信号模拟,优化了实验中信号采集光阑的位置,提高了信噪比。并且,针对一些特殊的体系,提出了正带轴衍射几何,结合理论模拟,在实验上实现了正带轴下 EMCD 信号的探测。

其次,发展了面内 EMCD 磁性测量技术,将 EMCD 技术测量从平行于电子束方向拓宽到垂直于电子束方向,实现了材料本征状态下磁性质的测量。并且利用 Co 纳米片,结合理论模拟和实验设计,在洛伦兹模式下,首次实现了面内 EMCD 信号的探测。

此外,将会聚束衍射与 EMCD 技术结合,实现了高空间分辨的磁性测量,同时结合透射电镜中其他先进的结构表征手段,实现了协同表征。研究了 YIG-Pt 界面的原子、电子结构,化学成分和磁性质,从微观结构上揭示界面自旋流下降的微观机制。

最后,利用洛伦兹和电子全息技术研究了 skyrmion 纳米条带中边缘磁组态在外界温度场和磁场下的变化过程,揭示了边缘态的磁结构,解释了

skyrmion 在边缘形核和消失的微观机制。并且将透射电镜中三种磁性表征技术进行了对比分析,讨论了它们在结合使用表征磁性材料的过程中可能存在的问题及解决的方案。

关键词: EMCD 技术; 动力学效应; 衍射几何; 磁参数测量; 本征磁性测量

Abstract

One of the most challenging issues when characterizing magnetic materials in the transmission electron microscope is to obtain quantitative magnetic parameters at the nanometer scale. Electron magnetic chiral dichroism is a new technique that allows the local magnetic properties of materials to be quantitatively measured with close-to-atomic spatial resolution and element specificity in the TEM, following the Lorentz microscopy and off-axis electron holography. However, there are still many problems to be addressed and much room to be developed before it becomes a more general and powerful technique for magnetic characterization in the TEM.

In this book, a general way to achieve the quantitative measurement of magnetic parameters is firstly developed. $\text{Y}_3\text{Fe}_5\text{O}_{12}$ (YIG) is used to demonstrate the general method and the magnetic parameters with element-specific and site-specific are obtained. Three main parts are involved: the way of seeking diffraction conditions required for quantitative measurement is established to break through the limitation of site-specific EMCD technique; the up-down asymmetry in the present three-beam case is pointed out to guide the experimental design for intrinsic EMCD signals; the simulations are conducted to optimize the detector positions to improve the signal-noise-ratio. Furthermore, the diffraction geometry is extended to the zone axis with higher symmetry. The EMCD signals for YIG are experimentally detected with the assistant of theoretical simulations under the zone axis diffraction condition.

The in-plane EMCD technique is developed under a new specific diffraction geometry, compared to the traditional out-of-plane EMCD technique, making it possible to measure the intrinsic magnetic properties. The

experimental results recorded from a Co nanoplate under the Lorentz mode are consistent with the simulations, demonstrating that an EMCD signal originating from in-plane magnetization can be detected successfully.

In addition, by combining the converged beam electron diffraction with EMCD technique, the magnetic measurement with high-spatial resolution is applied the YIG-Pt interface. Along with the analysis of atomic structure, electron structure and chemical composition by some other advanced techniques in the TEM, the origin of disorder layer at the interface is revealed and the decreased efficiency of spin current transport is attributed to the deteriorated magnetic properties.

At last, the other two magnetic characterization techniques, Lorentz microscopy and off-axis electron holography, are demonstrated to study the evolution of magnetic edge-states in geometrically confined FeGe skyrmion nanostripe. The magnetic vectors of the edge-states are quantitatively measured to explain the underlying mechanism of nucleation and annihilation of skyrmion at the edge of nanostripe under the stimuli of spin polarization current. These three different techniques are together compared, and the possible obstacles and corresponding solutions are addressed during their combination for magnetic characterization.

Key words: EMCD; Dynamical diffraction effects; Diffraction geometry; Quantitative measurement of magnetic parameters; In-plane magnetic measurement

主要符号对照表

ADF	环形暗场(annular dark field)
ALCHEMI	原子位置确定的通道增强微分析(atom location channeling enhanced micro-analysis)
CBED	会聚束电子衍射(converged beam electron diffraction)
CCD	电荷耦合器件(charge coupled device)
DDSCS	二次微分散射界面(double differential scattering cross section)
DM	Dzyaloshinskii-Moriya
DPC	微分相位衬度(differential phase contrast)
EDS	能谱(energy dispersive spectra)
EELS	电子能量损失谱(electron energy-loss spectra)
EFTEM	能量过滤透射电子显微术(energy filtered transmission electron microscopy)
ELCE	电子能量损失的通道效应(electron-energy loss channeling effect)
ELNES	电子能量损失的近边精细结构(electron-energy loss near edge structure)
EMCD	电子的磁手性二向色性(electron magnetic chiral dichroism)
FFT	快速傅里叶变换(fast Fourier transform)
FIB	聚焦离子束(focused ion beam)
HAADF	高角环形暗场(high angle annular dark field)
IFFT	反快速傅里叶变换(inverse fast Fourier transform)
ISHE	逆自旋霍尔效应(inverse spin Hall effect)
Lorentz	洛伦兹
MCR	多元曲线分辨(multivariate curve resolution)
MDF	混合动力学因子(mixed dynamical forming factors)
off-axis EH	离轴电子全息(off-axis electron holography)

SHE	自旋霍尔效应 (spin Hall effect)
SMC	自旋混合电导 (spin mixed conductance)
STEM	扫描透射电子显微术 (scanning transmission electron microscopy)
TEM	透射电子显微镜 (transmission electron microscope)
TIE	强度传递方程 (transport of intensity equation)
XANES	X 射线吸收的近边精细结构 (X-ray absorption near edge structure)
XAS	X 射线吸收谱 (X-ray absorption spectra)
XMCD	X 射线磁圆二向色性 (X-ray magnetic circular dichroism)
YIG	$\text{Y}_3\text{Fe}_5\text{O}_{12}$