

参考文献

- [1] 朱邦芬. 清华物理八十年. 北京: 清华大学出版社, 2006
[2] 阮东. 物理与工程, 2020, 30(1): 3
[3] 阮东, 尚仁成, 熊家炯等. 物理与工程, 2020, 30(1): 10
[4] 朱邦芬. 物理与工程, 2018, 28(5): 5
[5] 李师群, 朱邦芬. 物理与工程, 2018, 28(6): 3
[6] 阮东, 王青, 徐湛. 物理与工程, 2018, 28(6): 15
[7] 阮东. 大学物理, 2018, 37(5): 7
[8] 王青. 物理与工程, 2018, 28(4): 20

清华大学物理系复系40年以来 凝聚态物理学的发展

何珂[†] 熊家炯

(清华大学物理系 凝聚态物理研究所 北京 100084)

2022-07-12收到

[†] email: kehe@tsinghua.edu.cn

DOI: 10.7693/wl20220804

清华大学物理系复系后的凝聚态物理学科, 其前身可以追溯到1973年开办的固体物理研究班。当时在一些知名科学家的建议和周恩来总理的指示下, 清华大学决定开办4个与基础科学相关的研究班, 分别是固体物理、激光、物质结构和催化。固体物理研究班于1973年初正式成立, 教师是校内各系调入的熊家炯、张宏涛、赵南明、张继盛、蔡纬及新教师王喜坤。招收了13名学员, 他们是张秀芳、隋森芳、陈皓明、顾秉林、范守善、何元金、吴秉芬、瞿振元、马铁良、陈培毅、孙永明、邬鸿彦、郁伟中。然而比较正规的学习安排只进行了半年多时间就被迫中断。1978年, 固体物理研究班得以复班, 教师成员新增了高乃飞、朱嘉麟。研究班又通过当年恢复的研究生统考招收了朱邦芬、林梅梅、曹必松、李仲明4人。固体物理研究班除了由本组教师及相关教研组的教师授课外, 还请了本校的张礼、北京大学的甘子钊和戴道生、中国科学院物理研究所的蒲富恪等老师讲授量子力学、固体物理和群论等课程。诺贝尔物理学奖获得者、著名凝聚态物理学家P. W. Anderson在1980年访问清华, 并向清华师生和校外的研究人员系统讲授了他当时尚未出版的专著《对称性破缺》。以固体物理研究班为基础, 形成了固体物理教研组的初步建制, 肩负着在清华大学开办固体物理专业, 建立和发展固体物理

学科的任务。1980年学校决定招收固体物理专业本科生, 1981年固体物理专业获得硕士学位授予权。1982年物理系恢复后, 固体物理教研组成为新物理系的一部分。固体物理(即后来的凝聚态物理)学科一直是学校重点支持和优先发展的学科。

1970年代末起, 顾秉林、陈皓明、赵南明、熊家炯、何元金、范守善、曹必松等固体物理教研组成员相继出国到国际顶尖大学研究组学习, 固体物理教研组也接纳多名归国留学生来教研组工作。学校从世界银行贷款中拨给教研组专款, 购买了穆斯堡尔(Mössbauer)谱仪和正电子湮没谱仪, 改善了培养研究生和早期开展科研的条件, 使教研组在把核技术应用于材料科学与固体物理交叉学科研究这个小领域里, 做出了一些有特色的理论和实验工作, 在国内产生了良好影响。



图1 2003年固体物理研究班成立三十周年合影

1980年代后期,国家高技术发展计划(“863计划”)开始实施。熊家炯、顾秉林、陈皓明等人意识到凝聚态物理学与材料科学研究之间的密切联系,认识到要尽可能把本学科基础研究与面向国家需求结合起来,努力在国家“863计划”中争取课题与经费支持。这一阶段固体物理教研组多位教师从国外学习访问归来,使得他们选择科研方向和课题的起点比较高。经过几年探索,逐步形成了几个有特色的科学研究方向,为物理系凝聚态物理后来的发展奠定了基础。

材料微观结构设计及性能预测:这是熊家炯等人在我国“863计划”中率先提出的,被列为“863计划”材料领域内的一个研究专题。该专题推动了凝聚态物理学与材料科学的结合,得到物理界同行以及材料界的认同。多年来,顾秉林、朱嘉麟等一直是国内这个研究专题的负责人。他们在低维纳米结构量子特性预测、调控和计算设计方面取得了系统的学术成果。例如,朱嘉麟、熊家炯、顾秉林开创性地提出和发展了“分区级数解法”,深入研究了这类低维量子结构的电子特性和输运特性,揭示了其新现象、新效应。在国际上率先研究了量子点中的杂质态,以及两电子能谱对量子点形状、尺寸的依赖关系等问题。因为这一系列工作,朱嘉麟、顾秉林、段文晖、倪军、熊家炯等完成的“低维结构的量子特性及计算设计研究”获2000年度国家自然科学二等奖。

纳米材料与结构的制备及性能研究:范守善等人首先在一维纳米功能材料定位和取向生长机理与技术的研究中取得了重要进展;在单根一维纳米材料的掺杂、发光、拉曼谱和场发射研究中,在利用扫描探针技术制备纳米尺度图形和研究纳米材料性质方面,也获得了创新成果与创新技术。这为后来在碳纳米管方面的研究突破打下了基础。

高温超导电子学:1987年高温超导现象被发现之后,何元金、曹必松等人立即着手进行实验,取得了较好的进展。后来,曹必松等人始终坚持在这一研究阵地上,把重点放在高温超导天线和高温超导滤波器的研发上。这些高温超导器件在航空通信、移动通信和军事通信应用中很有价值,迅速得到国家和应用部门的重视与支持。

这阶段由于科研选题适当,经费相对稳定,科研工作进展较快,多次获得国家教委科技奖项。这些科研进展对教学和研究生培养也带来正面影响,教学质量逐步提高,培养了一些高水平的研究生。1990年固体物理学科获得博士学位授予权。1999年声学物理教研组与固体物理教研组合并,成立凝聚态物理研究所。2001年凝聚态物理学科获准为国家高等学校重点学科。

在“985工程”的支持下,凝聚态物理学科得到了更大的支持,师资力量大大增强。2000年,两位中科院院士王崇愚和陈难先加盟物理系;朱邦芬回到母校工作。顾秉林(1999)、范守善(2003)、朱邦芬(2003)相继当选为中科院院士。多位在凝聚态物理领域有重要国际影响的学者时常回国和物理系的研究人员进行交流合作。2004年后,凝聚态物理方向加强了在实验研究方面的师资引进力度。2005年在表面物理实验方面成果显著的薛其坤团队加入物理系,后来以此为基础成立了量子科学与技术研究中心,成为物理系实验凝聚态物理方面的重要力量。在美国顶尖大学获得博士学位的陈曦、王亚愚、周树云、于浦等相继加入物理系。这使得凝聚态物理学科的阵容和实力得到显著提高,在多方面取得了重要的科研进展。

在凝聚态物理理论研究方面,顾秉林、段文晖、吴健等对低维量子体系及纳米结构和功能材料中的多种物理行为进行了深入研究,在新材料设计、新型纳米结构的第一原理电子结构计算、铁电材料的物性研究上,取得了一系列的研究成果。段文晖等通过第一原理计算,从原子和电子层次研究了低维材料的电学、力学等物理性质和潜在的器件应用,发现新奇输运特性并提出器件构筑方案。吴健等阐明了受压碳纳米管发生金属—半导体转变的机制:受压所造成的镜像对称破缺和两侧管壁原子的成键相互作用,并发现这种金属—半导体转变机制具有普遍性。段文晖、顾秉林、吴健等人的“低维材料中新奇量子现象及其调控的机理研究”项目获得2014年度国家自然科学二等奖。此外,张广铭在强关联多电子体系、低维磁系统和介观体系等方面的理论研究,特别在量子相变、近藤效应和有关的量子杂质问题的

研究，倪军对多层薄膜合金的外延生长的有序动力学和三元合金非平衡态到平衡态的演化过程的研究，郭永对自旋电子学及纳米磁学的研究，都取得了不少的重要结果。

范守善领军的研究团队，在氮化镓纳米线和碳纳米管的定向生长研究中取得了突破，1997年和1998年发表于 *Science* 杂志上的两篇论文产生了巨大的国际影响。尤其是前者被列入“*Science* 1997年度十大科技进展”和“1998年中国十大科学新闻”，在几年时间内年度他人引用率超过100次。随后，他们发展了一套与现有的半导体工艺兼容的超顺排碳纳米管阵列的可控制生长技术，并利用这种碳纳米管阵列制备出连续的、宏观尺度的碳纳米管线(图2(a))。这一技术可以实现大规模的生产，具有很好的产业化前景(图2(b), (c))。这一成果发表在2002年 *Nature* 杂志上，并被选为2002年度“中国高等学校十大科技进展”。由于物理系纳米领域研究的出色表现，由富士康企业集团捐资，与清华大学共同设立的清华—富士康纳米科技研究中心大楼于2002年6月破土动工，2003年12月正式启用。纳米中心以信息产业为导向，开展纳米技术的基础研究与应用研究，集纳米材料与器件的制备、测试、研究和开发，以及学术交流等功能为一身，为纳米科技的各个环节提供了一个先进的、开放式的研究环境。纳米中心围绕碳纳米管的生长机理、物性及应用研究这一核心内容，形成了基础研究和应用研究并重的学术特点，取得了一系列具有自主知识产权的新原理、新方法、新工艺、新技术，走出了一条由发现新现象到产业化的自主创新之路。

在应用超导研究方面，曹必松研究组陆续研制成功了适合于GSM、CDMA移动通信系统的超导滤波器和超导滤波器系统。2004年3月由物理系研制的具有完全知识产权的我国第一台CDMA移动通信高温超导滤波器系统，在商业运行中的CDMA移动通信基站试验成功，实现了我国高温超导研究在通信领域的第一次实际应用。继美国之后，我国成为国际上第二个将超导滤波器成功应用于移动通信的国家。2005年12月，多套高温超导滤波器系统在由多个移动通讯基站构成的

用户密集、地形复杂的通讯小区内试验成功，并长期无故障运行。韩征和组研制的Bi系高温超导线材及其产业化技术达到世界先进水平，其参与研制的应用Bi-2223/Ag高温超导线材的高温超导电缆于2004年7月首次在昆明并网成功，这是我国第一组、世界第三组高温超导电缆并网运行，被评为“2004年国内十大科技新闻”。在高温超导强电和弱电应用方面的两项研究成果入选超导领域有显示度的两个“十五”期间“863计划”标志性的重大成果。曹必松、张晓平、魏斌等人完成的项目“微波通信用高温超导前端”获2009年度国家技术发明二等奖；曹必松、魏斌、郭旭波等人完成的“高温超导滤波器技术和应用”获2017年度国家技术发明二等奖。

薛其坤研究团队(包括贾金锋、陈曦和后来加入的马旭村、何珂、王立莉等)结合分子束外延和原位的低温、强磁场扫描隧道显微镜及角分辨光电子能谱技术，在低维量子材料的制备和量子态研究方面取得了一系列研究进展，尤其是他们将超导材料的生长和超导机理的研究推进到单原子层的水平。2009年，团队实现了几种厚度仅单原子层的超导体。随后他们首次把分子束外延技术拓展到铁基超导材料的制备中，在此基础上发现了一种全新的低维高温超导体——钛酸锶基底上的单层FeSe薄膜，使界面高温超导研究成为超导领域一个全新的研究热点，引领了国际学术方

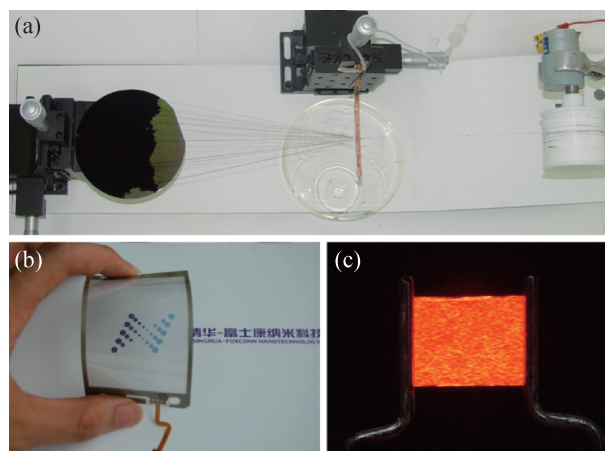


图2 (a)利用超顺排碳纳米管阵列制备出连续的、宏观尺度的碳纳米管线；(b), (c)碳纳米管薄膜在显示屏和极化光源中的应用

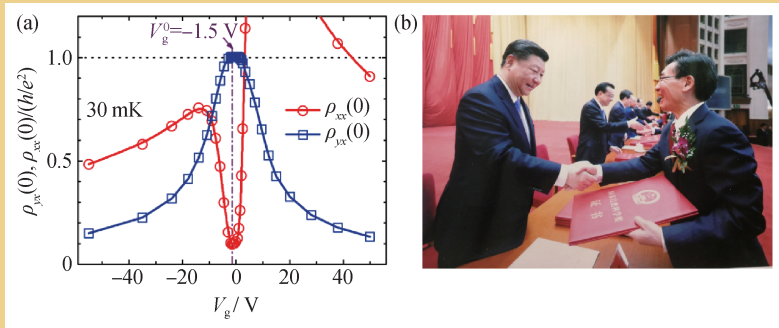


图3 量子反常霍尔效应的实验观测数据(a)和该成果荣获国家自然科学基金一等奖的颁奖典礼照片(b)

向，为高温超导机理问题的解决和新高温超导材料的发现提出了一条新的道路。薛其坤因此受邀在超导领域最重要的学术会议“超导材料与机理国际会议”(M2S 2015)作了大会报告。

从2009年起，薛其坤研究团队与王亚愚研究组及中国科学院物理研究所、斯坦福大学的合作者，在拓扑绝缘体和量子反常霍尔效应的实验研究方面做出了一系列突破。他们在国际上率先建立了拓扑绝缘体薄膜的分子束外延生长动力学机制，制备出高质量的拓扑绝缘体薄膜样品，并利用扫描隧道显微镜和角分辨光电子能谱揭示了拓扑绝缘体表面态的背散射缺失和朗道量子化等独特性质。此后，薛其坤领导的联合研究团队将研究重点集中到拓扑绝缘体领域中最重要、最具挑战性的课题之一——量子反常霍尔效应的实验实现。量子反常霍尔效应是一种不需要外加磁场的量子霍尔效应，早在1988年就在理论上被预言，但20多年来在实验上一直没有观测到。在实验上实现量子反常霍尔效应，一直是凝聚态物理学家追求的目标。经过几年的努力，该联合研究团队终于在2012年底在磁性掺杂拓扑绝缘体薄膜中世界首次实验发现了量子反常霍尔效应(图3(a))。2016年诺贝尔物理学奖授予了在拓扑物态方面做出突出贡献的3名理论物理学家，其中霍尔丹教授在其颁奖演说中回顾其获奖理论贡献时提到“这最终导致了清华大学的薛其坤团队在磁性掺杂的时间反演不变拓扑绝缘体薄膜中实验实现了量子反常霍尔效应”，显示出此实验结果的重要性。此研究成果荣获2018年度国家自然科学基金一等奖(图3

(b))。因为在量子反常霍尔效应及界面高温超导方面的研究成果，薛其坤获得了首届“未来科学大奖物质科学奖”、“弗列兹·伦敦奖”(系获得该奖的首位中国科学家)、“复旦一中植科学奖”、“求是杰出科学家奖”、“何梁何利科学与技术成就奖”等国内外重要奖励。2019年，薛其坤、何珂、段文晖、徐勇、王亚愚、张金松等合作发现了一种内禀磁性拓扑绝缘体

MnBi_2Te_4 ，开启了一个国际热点研究方向，为高温量子反常霍尔效应的探索指出了一条道路。

除此之外，王亚愚研究组在铜氧化物高温超导的微观电子结构，尤其是莫特相关物理的研究中做出了一系列重要进展，持续推动着对高温超导机理的深入理解。周树云研究组在二维材料及异质结构的时间、空间分辨角分辨光电子能谱的研究方面取得了多项有影响力的成果。季帅华、陈曦团队发现在几个原子层厚度具有室温铁电性的SnTe薄膜。于浦研究组首次在单一材料中实现了双离子的电场可控结构相变，并且揭示了基于三态相变过程中，光、电和磁学特性调控的器件应用。此外，江万军研究组在低维磁性方面的研究工作，杨乐仙研究组在拓扑材料电子结构方面的工作，宋灿立、李渭、张定等在非常规超导体方面的研究工作也取得了一定的国际影响。

近年来，物理系凝聚态物理学科持续引进新人才，向光与物质相互作用、固态量子计算等更多的研究方向进行拓展，初步形成既覆盖较为全面、又特色明显的学科布局。

物理系的凝聚态物理学科还和原子分子光物理学科一起建设了低维量子物理国家重点实验室。该实验室的前身最早可以追溯到1983年，以单原子/分子检测为主要研究方向。2001年，该实验室发展成为教育部重点实验室，研究方向拓展为原子分子物理和纳米科学。2007年，该实验室进一步扩展并更名为“低维量子物理实验室”，研究方向涉及凝聚态物理、原子分子物理和光学三个二级学科。2011年10月获科技部正式批准成为国家

重点实验室，进入建设期，2013年9月顺利通过科技部验收，2015年6月参加科技部评估并被评为“优秀类实验室”。物理系凝聚态物理学科还是“量子物质科学协同创新中心”和教育部“量子信息前沿科学中心”的重要组成部分。

自1982年清华大学物理系复系以来，凝聚态物理学科由小到大，伴随着国家教育和科技事业的前进步伐，取得了较快、较好的发展。现在，本学科已拥有一批在国内外享有知名度的学术带头人和骨干教师，做出了多项具有国际影响的研

究成果，培养了一批优秀的高层次人才。展望未来，凝聚态物理学科将在清华大学物理系建设世界一流的科学研究和人才培养中心的进程中持续贡献力量。

致谢 本文部分内容改编自主要由熊家炯老师撰写的《清华物理八十年》第六章中凝聚态物理研究所的部分。感谢王亚愚、段文晖、魏斌、姜开利等老师对本文的贡献！

清华大学物理系复系40年以来 原子分子光物理学科的发展

尤力[†] 李师群 薛平

(清华大学物理系 原子分子物理与光物理研究所 北京 100084)

2022-08-01收到

[†] email: lyou@mail.tsinghua.edu.cn

DOI: 10.7693/wl20220805

原子分子光物理(atomic, molecular, and optical physics), 简称AMO物理, 是清华大学物理系物理学一级学科的重要支撑方向。经过40年的发展, 目前已覆盖现代原子分子光物理的关键方向, 在精密测量物理和量子信息科学方面拥有国际知名的科研队伍, 是国家在AMO方面的重要人才培养和科学研究基地。为庆祝清华大学物理系复系40周年, 本文简单回顾物理系AMO学科发展过程中的关键时间点、人和事。

国际AMO学科在过去几十年的快速发展主要受益于原子分子物理学科和光物理学科的交汇融合。清华物理系AMO学科的发展历程类似。1982年复系时, AMO方向的研究主要集中在由原物理教研组(当时简称为一部)形成的两个教研组: 原子分子物理教研组和近代光学教研组, 主要研究方向包括激光器物理、激光分离同位素、激光光谱、光信息处理及光学薄膜。由原工程物理系合并到物理系(当时简称二部)的部分老师, 又新发展了如激光单原子探测和电子动量谱学等

研究方向; 1997年李家明院士从中国科学院物理研究所调入清华物理系, 使得物理系在原子分子物理理论方向上了一个新台阶。之后, AMO学科又相继拓展了量子光学与原子光学、近场光学和微区光谱、生物医学光学、生物信息学、精密测量物理、量子信息、量子模拟、冷原子物理等研究方向。1999年10月, 由物理系“原子分子和纳米科学教育部重点实验室”和“近代光学教研组”组成“原子分子物理与光物理研究所”, 简称AMO所, 李师群任第一任所长(1999—2011)。下面简要回顾原子分子物理学科、光学物理学科, 以及合并为系属AMO所这段难忘的发展史。

1 原子分子物理学科

复系初期, 原子分子物理教研组的主任是徐亦庄, 基本力量是复系前徐亦庄教授领导的红外激光教研组, 研究方向是用连续调谐红外激光进