清华大学凝聚态物理学科的发展历史和最新研究进展

段文晖*, 陈曦*

清华大学物理系, 北京 100084

*联系人, E-mail: duanw@mail.tsinghua.edu.cn; xc@mail.tsinghua.edu.cn

收稿日期: 2011-01-20; 接受日期: 2011-02-21

摘要 本文首先回顾了清华大学物理系的凝聚态物理学科的发展历程, 然后简短介绍了目前学科点的主要研究方向. 最后, 着重讨论了最近十年中凝聚态物理学科老师在纳米物理、表面物理、超导材料及应用、理论和计算凝聚态物理等几个方面取得的研究进展.

关键词 低维量子体系, 纳米物理, 表面物理, 超导材料, 电子结构

PACS: 68.65.-k, 68.37.-d, 74.70.-b, 73.21.-b

1973 年, 清华大学开办了“固体物理研究班”, 从而正式开始了对凝聚态物理学的研究. 通过近 40 年的努力, 凝聚态物理学科经历了初创阶段、稳定发展和成长壮大等几个时期, 逐渐发展成为物理系的优势学科之一. 在注重理论与实验、基础与应用之间的配合与关联的同时, 重点增强了学科的整体实验研究能力. 凝聚态物理学科理论和实验研究基本平衡, 研究特色明显, 在一些主要研究方向(如纳米物理、表面物理、凝聚态理论、计算凝聚态物理)的研究成果在国内外已有相当影响. 本文将在简要回顾这一段发展历程的基础上, 介绍清华大学物理系凝聚态物理学科的一些主要的研究方向, 以及近几年的一些重要进展.

1 凝聚态物理学科的发展历程

1972 年 7 月, 杨振宁先生向周恩来总理建议, 希

望“倡导一下基础理论的学习和研究”. 周总理很重视这一意见, 立即指示有关部门和领导, 要把我国基础科学研究搞上去. 1973 年为贯彻周恩来总理关于加强科学理论研究的指示, 清华大学开办了“固体物理研究班”, 招收了 13 名学员, 旨在发展这一专业方向. 尽管其间由于种种原因研究班中断, 但于 1978 年再次恢复, 并招收了新一届 4 名学员. 1980 年第一批研究生答辩结束后, 以固体物理研究班毕业的学员和老师为骨干的固体物理教研组才宣告正式成立. 固体物理教研组则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(后来改称凝聚态物理)学科的任务.

从固体物理组建立初期开始, 教研组的老师们勇于探索新的科研方向, 注重理论和实验的均衡发展, 尽可能把本学科基础研究同面向国家需求结合起来, 逐步形成了有特色的学科优势. 最早开展的理

引用格式: 段文晖, 陈曦. 清华大学凝聚态物理学科的发展历史和最新研究进展. 中国科学: 物理学 力学 天文学, 2011, 41: 493-500

Duan W H, Chen X. History and recent research progress of Condensed Matter Physics at Tsinghua University (in Chinese). Sci Sin Phys Mech Astron, 2011, 41: 493-500, doi: 10.1360/132011-85

论研究方向包括: 低维物理(顾秉林、朱嘉麟)、材料微观结构设计与性能预测(熊家炯、顾秉林、朱嘉麟). 随着王崇愚、陈难先、朱邦芬等杰出教授的引进以及青年科研人员的成长, 之后陆续增加的理论凝聚态物理研究方向包括: 半导体物理和小量子体系、固体和界面及缺陷的电子结构、凝聚态物理中的逆问题、计算凝聚态物理、强关联物理、自旋电子学等. 主要的实验研究有: 金属有机物化学气相沉积、高温超导、扫描隧道显微学、分子束外延、正电子湮灭技术和 Mössbauer 谱. 之后陆续增加的实验凝聚态物理研究方向还有纳米材料、表面物理、量子输运、高温超导线材、氧化物和磁性材料等. 通过人才的培养和引进, 同时注重发展一些充满活力的新研究方向, 清华大学物理系的凝聚态物理学科已形成了鲜明特色.

2 凝聚态物理学科的人员和主要研究领域

清华大学物理系凝聚态物理学科现有教师 27 人(包括 6 名中国科学院院士: 王崇愚、陈难先、顾秉林、朱邦芬、范守善、薛其坤). 其中有教授(含研究员)21 人、副教授(含副研究员)6 人. 有 5 人获聘教育部长江特聘教授、7 人获国家杰出青年科学基金, 9 人入选教育部跨(新)世纪人才.

目前凝聚态物理学科教师的主要研究领域和方向包括:

(i) 纳米物理, 特别与碳纳米管相关的物理问题及其应用的实验研究;

(ii) 表面和低维物理的实验研究;

(iii) 氧化物磁性薄膜和纳米磁性材料的制备和物性;

(iv) 量子输运、低维强关联电子体系和高温超导电性的实验研究(输运测量和扫描隧道显微镜);

(v) 计算凝聚态物理, 特别是凝聚态体系及低维纳米体系的电子结构和输运性质研究;

(vi) 材料设计和材料物理, 特别是金属结构材料中的缺陷和跨尺度关联、数论反演变换及其原子间相互作用势的发展;

(vii) 半导体物理、受限小量子系统物理和半导体自旋电子学的理论研究;

(viii) 强关联电子体系理论.

3 近年的部分重要学术进展

3.1 碳纳米管的生长机理、物性及应用

范守善及其领导的研究团队围绕碳纳米管的生长机理、物性及应用这一中心内容开展了系统的长达 16 年的研究^[1-9]. 注重从科研实践中提炼基本问题, 以深入机理研究, 推动和提升应用研究, 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.

一个典型的例子是超顺排碳纳米管阵列的研究. 实验室于 2002 年在国际上首次合成出来超顺排碳纳米管阵列^[2], 取得了一系列相关专利, 拥有自主知识产权的创新成果. 近五年来, 继续深入研究生长机理, 发展出新的可控生长方法. 于 2005 年将合成规模扩大到 4 英寸, 于 2007 年在国际上首次实现 4 英寸阵列的批量合成, 随后 2008 年实现 8 英寸超顺排阵列的可控合成, 2009 年实现工业化生产. 在该过程中, 同时开展了超顺排碳纳米管的宏观应用研究, 取得了一系列独创性的科研成果. 例如:

(i) 国际上首次应用超顺排碳纳米管线实现了大电流密度的场发射体的批量制备^[3], 电流密度高于 100 A/cm^2 , 以其为基础可以构建更多具有实用价值的器件, 如像素管、鞍场规、X 射线管等. 论文[3]被 *Nature Nanotechnology* 作为研究亮点作了报道. 在此基础上, 发展了一种激光辅助真空熔断超顺排碳纳米管长线的方法^[4], 制备了端部只有一根碳纳米管的场发射体, 其电子的相干性非常高, 可以用于场发射高分辨电镜的电子源. 论文[4]发表后即被 *Nature China* 作为研究亮点作了报道.

(ii) 国际上首次发现碳纳米管超顺排薄膜极强的热声效应, 并用超顺排薄膜研制出透明、柔性、可拉伸的薄膜扬声器^[5]. 该科研成果已于 2008 年 4 月申请了国际和国内专利. 论文[5]发表后, 立即得到了国际上的广泛关注, 被 *Nature* 和 *Physics Today* 等众多科学媒体报道. 美国伊利诺伊大学香槟分校 Rogers 教授称碳纳米薄膜管扬声器是一项具有独创性的发明, 认为该项发明标志着 2008 年是纳米技术研究获得重大进展的一年.

(iii) 由于超顺排碳纳米管薄膜非常小的单位面积热容、较大的辐射系数以及极大的比表面积, 其可

以有非常快速的热响应,可以应用在多种需要快速升温降温的场合.通过丝网印刷及激光切割的技术,制备了一个采用碳纳米管膜作为“灯丝”的白炽光平面显示器,可以动态显示汉字字符^[6].文章发表在 *Advanced Materials* 上后,被 *Nature Asia Materials*, *Chemistry World* 和 *Advances on Advance* 等多家媒体报道.国际纳米领域著名科学家 Cees Dekker 教授对这项工作做出了高度评价,称赞其为“very original work”,认为其会“opened up an array of possible applications”.

(iv) 界面间的热输运和纳米材料的热传导研究有着深刻的科学意义和重要的应用背景.通过对排列有序且两端露头的碳纳米管的复合材料的深入研究,创新性地制备出了界面热阻非常低的高导热材料,同时发展了一系列碳管顶端修饰和剪裁、切片、金属集热层等新技术^[7].鉴于研究的重要性和创新性, *Nature* 的 *Materials Update* 专栏以“Nanotube forests take off the heat”为题对该工作进行了报道和评论.

(v) 研制了基于碳纳米管场发射的电子荧光灯管^[8],以消除现有荧光灯管内部的汞蒸气对人体和环境的危害.由于它的制造与传统的工业生产完全兼容,可以实现批量低成本生产.论文^[8]发表在后被 *Nature China* 作为研究亮点报道.

(vi) 发明了一种简单碾压高质量高纯度的碳纳米管阵列的方法^[9],特别适合制备高质量的碳纳米管厚膜,在很多方面都有重要应用,并申请了美国专利.论文^[9]发表后,被 *Physics World*(<http://physicsworld.com/cws/article/news/33187>)和 IOP Nanotech Web 网站作为研究亮点报道.

这一系列的创新成果中,有 10 项工作被国际著名科学媒体作为研究亮点报道,在国际上产生了很大的影响,许多国际著名学者慕名到实验室来参观指导,受到学术界的广泛关注.范守善院士作为大会主席成功主办了 Nanotube 2009 国际会议,在国际碳纳米管领域产生了巨大的反响.国际纳米领域著名刊物 *Nature Nanotechnology* 特别发表 Feature 专栏文章,介绍了有关的科研工作.

3.2 高温超导材料的器件应用

由于高温超导材料电阻几乎为零,超导滤波器插入损耗极小,带边陡峭,带外抑制非常高,具有近于理想的滤波特性.超导滤波系统具有极低的噪声

系数,可以大幅度地提高各种无线通信设备灵敏度、通信距离和抗干扰能力,是一项突破传统微波器件性能极限的高新技术,市场规模巨大.世界上只有美国已在民用和军事领域得到了规模应用,但其技术对我国严密封锁.

曹必松领导的团队,历经近 20 年努力,在基础理论和核心技术方面,系统地提出了专门针对高性能超导滤波器和低温前置放大器的设计原理、研制方法、制备和调试工艺等,建立了高温超导滤波技术完整的技术发明体系.在超导滤波系统的基础理论、制备技术以及工程化应用方面取得了一系列有重要意义的进展,并得到国际上的高度认可.

(i) 研制成功了第一台适合于我国 CDMA 移动通信应用的超导滤波系统,性能指标处于国际先进水平.该系统成功应用于中国联通的 CDMA 移动通信基站,其覆盖面积增加一倍.这是继美国之后,我国成为第二个将超导滤波技术应用于移动通信的国家.超导接收前端与美国摩托罗拉公司 CDMA 移动通信基站的常规前端比较,滤波器的插入损耗从 1.14 dB 降低到 0.20 dB,噪声从 4.0 dB 降低到 0.48 dB.经鉴定,其技术指标处于国际领先水平.

(ii) 在国际上首次研制成功性能指标达到 GSM1800 移动通信基站要求的超导滤波器系统,这些指标分别达到国内领先水平和国际先进水平.

(iii) 首次研制成功适合于某型号预警雷达用的超导滤波系统,将其安装于雷达.在强干扰下,已失去探测能力的雷达立刻恢复正常工作;在中强干扰下,雷达的探测距离增加了近 100 公里.总装备部已正式下文批准用超导滤波系统加装该型号雷达.该成果可以用于解决我国军事和民用通信装备许多亟待解决的技术难题,大幅提高装备的灵敏度、抗干扰能力和在干扰条件下的作战和应用性能,对于我国国防建设和民用通信都具有重要意义.

该研究成果被评为 2007 年信息产业部十项信息产业重大技术发明之一,2009 年获国家技术发明奖二等奖,并被评为中国高等学校十大科技进展.获授权发明专利 11 项,其中 1 项美国发明专利.例如,2006 年 5 月日本《日经新闻》刊登文章,纪念高温超导发现 20 周年.在总结国际上超导滤波系统的研究成果时,将美国 STI 公司放在第一位,将曹必松团队成果放在第二位,将日本富士通公司放在第三位.

3.3 表面物理

薛其坤院士领导的表面物理研究团队几年来取得了一系列重要研究成果^[10-19]。主要有:

(i) 拓扑绝缘体. 拓扑绝缘体是物理学近几年刚刚发展起来的一个国际前沿研究方向. 拓扑绝缘体是一种新的量子物态, 它的体内是有能隙的绝缘体, 而它的表面是能导电的金属. 与一般材料中的导电金属态不同, 拓扑绝缘体中能导电的金属表面态受到拓扑性质的保护. 这些表面态具有线性色散关系, 由无质量的 Dirac 方程描述. 这类拥有奇异拓扑性质的材料被认为有可能成为新型自旋电子学器件和量子计算器件的物质基础. 他们发展了高质量拓扑绝缘体薄膜的分子束外延生长动力学^[10,11]. 用分子束外延生长的拓扑绝缘体的费米面位于体的能隙中, 因而是真正的体绝缘体. 通过对生长的精确控制, 他们得到不同厚度的拓扑绝缘体薄膜, 并对其进行了角分辨光电子谱的测量, 观察到拓扑绝缘体材料从两维到三维过渡过程中电子结构的变化^[12]. 他们还利用杂质散射证明了拓扑量子态受时间反演不变性保护的这一基本性质^[13], 直接观察到了拓扑绝缘体表面态的朗道量子化^[14]. 这些工作很快在国际上产生重要影响. 美国物理学会的“Physics”栏目发表了“Viewpoint”专栏文章, 对朗道量子化的工作进行了介绍.

(ii) 单原子层薄膜超导体的发现. 低维超导电性是凝聚态物理领域中一个被长期关注的重要科学问题. 尽管超导电性已经在只有几个原子层厚的超薄金属膜中被观测到, 但一个仍然悬而未决的问题是: 一个超导体到底可以有多薄? 他们在硅表面上制备了铅和铟的单原子层薄膜, 并利用极低温强磁场 STM 观察到超导能隙和磁通涡旋. 这表明这些只有一个原子层厚的薄膜具有超导电性. 这是自发现超导现象近一百年来从实验上报道的最薄的超导体. 该工作直接展示了在非常接近二维的体系中存在超导电性, 并为探索界面效应在超导机制中的作用提供了一个新的途径. 相关研究成果刊登在 *Nature Physics*^[15]. *Nature Physics* 专门为该工作配发了由日本东京大学 Hasegawa 教授撰写的评述, 题目为“The thinnest superconductor”, 评述称此工作达到了超导体厚度的极限.

(iii) 在 STM 的稳定性、噪音水平和能量分辨率

等方面达到了国际上同类仪器的最好水平之列, 成为目前世界上少数的几个能够将 STM 技术发展到有单自旋灵敏度的实验室之一. 利用这种高性能的仪器, 取得了以下成果: 实现了单分子自旋近藤效应的量子调控^[16]; 实现自旋翻转非弹性隧道谱^[17,18]; 实现了对自旋在超导能隙中诱导的多重束缚态的探测^[19].

3.4 低维结构的量子特性

顾秉林院士领导的研究团队围绕低维结构的量子特性及其在功能材料方面应用开展了广泛的理论和计算研究, 取得了一系列重要研究成果^[20-27]. 例如:

(i) 量子点、量子阱等低维结构的电子结构、激子、声子和杂质态. 开创性地发展了级数解法, 首次求得了二维磁杂质态、量子点中施主态和两电子能谱的精确解^[20-22]. 在国际上率先研究量子点中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, 提出了 D 态分解(“磁蒸发”)、量子点的“磁指纹”和“不完全限制激子”等新概念. 有关论文已成为标准引文. 论文[20]已被引用超过 180 次, 论文[21]被引用超过 100 次. 对量子阱中不对称 δ 掺杂导致“磁蒸发”的预言, 获得实验证实. 这些重要结果已被 Jaskolski^[28]在权威性刊物 *Physics Reports* (1996) 上撰写的综述文章所收集, 包括方法、公式和插图在内, 引用篇幅达两页. 该项成果获得 2000 年国家自然科学奖二等奖.

(ii) 石墨烯物理. 石墨烯是一个属于无质量 Dirac 费米子的二维量子体系, 呈现很多新奇的量子现象, 并被认为是平面电子器件的理想候选材料. 从 2006 年开始, 针对这一国际前沿科学领域开展了系统的研究工作^[23-25]. 发现了石墨烯纳米带中边缘态引起的独特输运性质^[24], 率先提出基于单层石墨片构筑具有同质结构功能器件单元的方案^[23], 阐明了石墨烯边缘稳定性和边缘应力中奇特的量子效应^[25]. 这项研究成果得到了国际同行的广泛关注, 在国际上产生了重要学术影响. 论文[24]已成为这一领域的一篇重要文献, 至今被引用 115 次. 提出的双极和 n 型场效应石墨烯晶体管、金属-半导体结、n 型掺杂的实现方案为后来的实验工作所证实或实现. Abergel 等加拿大、美国和德国科学家在物理学权威性刊物 *Advances in Physics* 上联合撰写的综述文章中^[29],

大篇幅引用和肯定以上的理论工作, 其中包括三张主要结果图和相关讨论. 论文[25]被选为该期的编辑推荐论文(Editor Suggestion).

(iii) 纳米管等准一维量子体系的电子结构、输运行为和应用^[26,27,30,31]. 明确揭示了碳纳米管的顶端局域电子结构在场发射过程中的重要影响^[26], 发现电子效应起决定性作用, 其基本特点是外加电场作用使得量子化能级上的束缚电子借助于共振隧穿效应发射, 与传统金属电极的发射机制完全不同. 首次发现金属型碳纳米管在外应力下将发生金属-半导体转变, 其物理机制是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^[27]. 美国宾州州立大学 Romero 等人^[32]根据该理论解释了其碳纳米管电阻实验结果. 美国麻省理工学院的 Pantano 等人^[33]在对碳纳米管机电性质的研究中, 通过与文献[27]的理论结果作比较, 确定其理论模型和计算结果的正确性. 首次发现, 由于“共轭”深能隙缺陷态的存在, 完全由 sp 电子组成的开口 BN 纳米管会呈现巨自旋分裂效应(>1 eV), 管口出现局域磁矩和显著的自旋极化率^[28].

3.5 半导体物理和自旋电子学

朱邦芬院士与黄昆先生一起确立了半导体超晶格光学声子模式的理论, 被国际学术界命名为“黄朱模型”^[34,35]. 黄朱模型被广泛用于研究低维半导体物理、材料与器件研究. 该模型建立了量子阱中激子旋量态波理论; 建立了一个系统的量子阱中拉曼散射的微观理论, 解决了宏观对称性分析不能解释的疑难问题; 提出半导体中动力学 Fano 共振原理, 预言激子稳化现象^[36,37]. 近年来朱邦芬院士提出了一种直接测量和操控半导体中自旋流的新理论^[38]. 该理论提出在凝聚态物质中光子可以等效地用自旋 1/2 来描述, 光也是一种“自旋流”. 研究发现同为二阶张量的自旋流和光流之间可以产生耦合, 这种耦合可以用直接带隙半导体光学虚跃迁的微观模型描述. 测量入射光的法拉第旋转即可以探测自旋流. 发表的论文[38]被 *Nature China* 选为 Research Highlights. 评论人写道: “测量‘自旋流’而不影响电子自旋的运动对于自旋电子学非常重要”. 研究者“提出了第一个非侵入性方法用偏振光来测量纯自旋流”. 他们“从安培定律(电流可以通过运动的电荷进行测量)发现线索, 提出可以通过表现为‘光子自旋流’的偏振光

来测量半导体中的纯自旋流.” 朱邦芬还在非线性光学框架内, 运用对称性分析, 进一步提出用双光子和频信号来测量纯自旋流的理论. 通过计算, 他们预言, 直接带隙半导体 GaAs 中可以得到较大的可观测的二阶非线性光学系数^[39], 并推动实验物理学家证实了该理论.

3.6 计算凝聚态物理和材料设计

王崇愚院士、陈难先院士、顾秉林院士领导的研究团队在计算凝聚态物理和材料设计方面做出了大量开创性的工作. 王崇愚院士主要研究方向为电子结构缺陷和动力学模拟、多尺度模型与物性跨尺度耦合计算^[40-44]. 基于量子理论及经典理论构造缺陷体系电子结构研究的理论研究框架, 发展缺陷能量学表述及相关的理论处理模式; 以及杂质效应的第一原理研究; 提出位错体系电子结构与可测参量间的关联模式, 用于探索微观-宏观间的跨尺度关联. 研究重点为杂质-缺陷复合体系量子效应; 揭示化学因素及结构因素的电子效应机制, 建立缺陷体系组分选择规则. 近年来重点研究方向为建立多层次-跨尺度理论模型及相关算法, 探索多尺度耦合机制; 发展第一原理大尺度计算方法和相关软件. 在材料科学及电子结构研究方面获两项国家发明奖、5 项部级科学技术进步奖. 陈难先院士建立了比热逆问题的普遍解, 推广和统一了爱因斯坦解与德拜的解; 在国际上开创用数论方法由结合能曲线得出原子间对势的简捷而严格的公式, 并结合虚拟结构设计解决了一系列原子间、离子间和原子与离子间相互作用势的建立问题; 针对我国稀土资源丰富, 建立了国际上未曾解决的稀土原子相关的原子间相互作用势; 建立了第一原理离子相互作用势的系统方法; 建立了以第一原理计算与数论反演为基础的界面两侧离子-原子间相互作用势的公式^[45-48]. 曾获国家自然科学二等奖. 顾秉林院士领导的研究团队在铁电材料和半导体材料等的电子结构和功能性质方面开展了系统的研究工作^[49-51]. 例如: 首次提出通过人工组分调制形成铁电超晶格材料, 可以在准同型相界附近诱导出新的铁电相, 使得 PZT 可以获得比以前高一个量级的压电性能^[49]. 阐明了在铁电超薄膜材料中铁电和介电性质的演化行为, 预言了铁电畴在电场下的自组织行为, 由此提出了利用电场进行操纵的方案, 并获得了相关国际发明专利(美国和日本专利).

3.7 强关联体系、低维磁系统和异质结构的理论和实验

张广铭、赵永刚等人长期从事关联电子体系、氧化物和磁性材料薄膜等方面的理论和实验研究^[52-56]. 例如, 系统研究了可用于拓扑量子计算的二维量子自旋 1/2 的多体系统 Kitaev 模型, 完整求解了系统的基态能谱, 得到了丰富的相图, 并发现了一系列的拓扑量子相变, 丰富了传统的 Landau 对称性破缺的相变理论^[54]. 提出凝聚态系统中描述分数化准粒子的一个普适原理, 统一了一维和二维量子系统中的量子分数化理论, 为实现可容错的拓扑量子计算提供了理论基础^[55]. 通过生长缓冲层的方法, 在硅上生长了高质量的锰氧化物庞磁电阻薄膜形成 p-i-n 结, 该结显示很好的整流特性及磁场调控; 在 $\text{La}_{0.67}\text{Ca}_{0.33}\text{MnO}_{3-\delta}/\text{Nb-SrTiO}_3$ 的 p-n 结中得到巨电致电阻

及电流对薄膜磁阻的调控, 提出了分流模型^[56]. 利用磁力显微镜观察到 $\text{La}_{0.67}\text{Sr}_{0.33}\text{MnO}_3$ 死层的磁不均匀性, 从而给出了死层中存在相分离的直接证据, 这是第一个有关锰氧化物死层中存在相分离的直接证据^[57].

4 总结

经过近 40 年的努力, 清华大学凝聚态物理学科从无到有、从小到大, 已经发展成为具有很强科研创新能力的研究所和人才培养基地, 已经形成了一支精干的、年龄结构合理、以中青年学术骨干为主体的高水平学术队伍, 做出了一批具有国际影响的研究工作, 形成了一套培养优秀高层次人才的体制, 而且正在继续着蓬勃发展的势头.

参考文献

- 1 Han W Q, Fan S S, Li Q Q, et al. Synthesis of gallium nitride nanorods through a carbon nanotube-confined reaction. *Science*, 1997, 277: 1287-1289
- 2 Jiang K L, Li Q Q, Fan S S. Spinning continuous carbon nanotube yarns. *Nature*, 2002, 419: 801
- 3 Wei Y, Weng D, Yang Y C, et al. Efficient fabrication of field electron emitters from the multiwalled carbon nanotube yarns. *Appl Phys Lett*, 2005, 89: 063101
- 4 Zhang L, Feng C, Chen Z, et al. Superaligned carbon nanotube grid for high resolution transmission electron microscopy of nanomaterials. *Nano Lett*, 2008, 8: 2564-2569
- 5 Xiao L, Chen Z, Feng C, et al. Flexible, stretchable, transparent carbon nanotube thin film loudspeakers. *Nano Lett*, 2008, 8: 4539-4545
- 6 Liu P, Liu L, Wei Y, et al. Fast high-temperature response of carbon nanotube film and its application as an incandescent display. *Adv Mater*, 2009, 21: 3563
- 7 Huang H, Liu C H, Wu Y, et al. Aligned carbon nanotube composite films for thermal management. *Adv Mater*, 2005, 17: 1652-1656
- 8 Wei Y, Xiao L, Zhu F, et al. Cold linear cathodes with carbon nanotube emitters and their application in luminescent tubes. *Nanotechnology*, 2007, 18: 325702
- 9 Wang D, Song P C, Liu C H, et al. Highly oriented carbon nanotube papers made of aligned carbon nanotubes. *Nanotechnology*, 2008, 19: 075609
- 10 Li Y Y, Wang G, Zhu X G, et al. Intrinsic topological insulator Bi_2Te_3 thin films on Si and their thickness limit. *Adv Mater*, 2010, 22: 4002-4007
- 11 Song C L, Wang Y L, Jiang Y P, et al. Topological insulator Bi_2Se_3 thin films grown on double-layer graphene by molecular beam epitaxy. *Appl Phys Lett*, 2010, 97: 143118
- 12 Zhang Y, He K, Chang C Z, et al. Crossover of the three-dimensional topological insulator Bi_2Se_3 to the two-dimensional limit. *Nat Phys*, 2010, 6: 584-588
- 13 Zhang T, Cheng P, Chen X, et al. Experimental demonstration of topological surface states protected by time-reversal symmetry. *Phys Rev Lett*, 2009, 103: 266803
- 14 Cheng P, Song C L, Zhang T, et al. Landau quantization of topological surface states in Bi_2Se_3 . *Phys Rev Lett*, 2010, 105: 076801
- 15 Zhang T, Cheng P, Li W J, et al. Superconductivity in one-atomic-layer metal films grown on Si(111). *Nat Phys*, 2010, 6: 104-108
- 16 Fu Y S, Ji S H, Chen X, et al. Manipulating the Kondo resonance through quantum size effects. *Phys Rev Lett*, 2007, 99: 256601
- 17 Chen X, Fu Y S, Ji S H, et al. Probing superexchange interaction in molecular magnets by spin-flip spectroscopy and microscopy. *Phys Rev*

- Lett, 2008, 101: 197208
- 18 Fu Y S, Zhang T, Ji S H, et al. Identifying charge states of molecules with spin-flip spectroscopy. *Phys Rev Lett*, 2009, 103: 257202
 - 19 Ji S H, Zhang T, Fu Y S, et al. High-resolution tunneling spectroscopy of magnetic impurity induced bound states in the superconducting gap of Pb thin films. *Phys Rev Lett*, 2008, 100: 226801
 - 20 Zhu J L, Xiong J J, Gu B L. Confined electron and hydrogenic donor states in a spherical quantum dot of GaAs-Ga_{1-x}Al_xAs. *Phys Rev B*, 1990, 41: 6001–6007
 - 21 Zhu J L, Chen X. Spectrum and binding of an off-center donor in a spherical quantum-dot. *Phys Rev B*, 1994, 50: 4497–4502
 - 22 Zhu J L, Chu W D, Dai Z S, et al. Exciton states and their entanglement in coupled quantum dots. *Phys Rev B*, 2005, 72: 165346
 - 23 Yan Q M, Huang B, Yu J, et al. Intrinsic current-voltage characteristics of graphene nanoribbon transistors and effect of edge doping. *Nano Lett*, 2007, 7: 1469–1473
 - 24 Li Z Y, Qian H Y, Wu J, et al. Role of symmetry in the transport properties of grapheme nanoribbons under bias. *Phys Rev Lett*, 2008, 100: 206802
 - 25 Huang B, Liu M, Su N H, et al. Quantum manifestations of graphene edge stress and edge instability: A first-principles study. *Phys Rev Lett*, 2009, 102: 166404
 - 26 Zhou G, Duan W H, Gu B L. Electronic structure and field emission characteristics of open-ended single-walled carbon nanotubes. *Phys Rev Lett*, 2001, 87: 95504
 - 27 Lu J Q, Wu J, Duan W H, et al. Metal-to-semiconductor transition in squashed armchair carbon nanotubes. *Phys Rev Lett*, 2003, 90: 156601
 - 28 Jaskolski W. Confined many-electron systems. *Phys Reports-Rev Sect Phys Lett*, 1996, 271: 1–66
 - 29 Aberger D S L, Apalkov V, Berashevich J, et al. Properties of graphene: A theoretical perspective. *Adv Phys*, 2010, 59: 261–482
 - 30 Hao S G, Zhou G, Duan W H, et al. Tremendous spin-splitting effects in open boron nitride nanotubes: Application to nanoscale spintronic devices. *J Am Chem Soc*, 2006, 128: 8453–8458
 - 31 Hao S G, Zhou G, Duan W H, et al. Transverse pressure induced phase transitions in boron nitride nanotube bundles and the lightest boron nitride crystal. *J Am Chem Soc*, 2008, 130: 5257–5261
 - 32 Romero H E, Bolton K, Rosen A, et al. Atom collision-induced resistivity of carbon nanotubes. *Science*, 2005, 307: 89–93
 - 33 Pantano A, Parks D M, Boyce M C, et al. Mixed finite element-tight-binding electromechanical analysis of carbon nanotubes. *J Appl Phys*, 2004, 96: 6756–6760
 - 34 Huang K, Zhu B F. Long wavelength optic vibrations in a superlattice. *Phys Rev B*, 1988, 38: 2183–2186
 - 35 Huang K, Zhu B F. Dielectric continuum model and fröhlich interaction in superlattices. *Phys Rev B*, 1988, 38: 13377–13386
 - 36 Chen Z Z, Lu R, Zhu B F. Effects of electron-phonon interaction on nonequilibrium transport through a single-molecule transistor. *Phys Rev B*, 2005, 71: 165324
 - 37 Lu H Z, Lu R, Zhu B F. Tunable Fano effect in parallel-coupled double quantum dot system. *Phys Rev B*, 2005, 71: 235320
 - 38 Wang J, Zhu B F, Liu R B. Proposal for direct measurement of a pure spin current by a polarized light beam. *Phys Rev Lett*, 2008, 100: 086603
 - 39 Wang J, Zhu B F, Liu R B. Second-order nonlinear optical effects of spin currents. *Phys Rev Lett*, 2010, 104: 256601
 - 40 熊家炯. 材料设计. 天津: 天津大学出版社, 2000
 - 41 Yan J A, Wang C Y, Wang S Y. Generalized-stacking-fault energy and dislocation properties in bcc Fe: A first-principles study. *Phys Rev B*, 2004, 70: 174105
 - 42 Wang C Y, Zhang X. Multiscale modeling and related hybrid approaches. *Curr Opin Solid State Mater Sci*, 2006, 10: 2–14
 - 43 Zhang X, Wang C Y, Lu G. Electronic structure analysis of self-consistent embedding theory for quantum/molecular mechanics simulations. *Phys Rev B*, 2008, 78: 235119
 - 44 Wang Y J, Wang C Y. A comparison of the ideal strength between L1₂Co₃(Al,W) and Ni₃Al under tension and shear from first-principles calculations. *Appl Phys Lett*, 2009, 94: 261909
 - 45 Chen N X. Modified Mobius inverse formula and its applications in physics. *Phys Rev Lett*, 1990, 64: 1193–1195
 - 46 Chen N X, Shen J, Su X P. Theoretical study on the phase stability, site preference, and lattice parameters for Gd(Fe,Ti)₁₂. *J Phys-Cond Matt*, 2001, 13: 2727–2736
 - 47 Chen N X. Hidden semi-group structure in crystals. *Curr Opin Solid State Mater Sci*, 2006, 10: 15–18
 - 48 Cai J, Chen N X. Microscopic mechanism of the wurtzite-to-rocksalt phase transition of the group-III nitrides from first principles. *Phys Rev B*, 2007, 75: 134109
 - 49 Huang N D, Liu Z R, Wu Z Q, et al. Huge enhancement of electromechanical responses in compositionally modulated Pb(Zr_{1-x}Ti_x)O₃. *Phys*

- Rev Lett, 2003, 91: 067602
- 50 Chang H, Wu J, Liu F, et al. Physical origin of hydrogen- adsorption-induced metallization of the SiC surface: *n*-type doping via formation of hydrogen bridge bond. Phys Rev Lett, 2005, 95: 196803
- 51 Liu Z, Wu J, Duan W H, et al. Electronic phase diagram of single-element silicon "strain" superlattices. Phys Rev Lett, 2010, 105: 016802
- 52 Hu H, Zhang G M, Yu L. Mesoscopic kondo screening effect in a single-electron transistor embedded in a metallic ring. Phys Rev Lett, 2001, 86: 5558–5561
- 53 Zhang G M, Hu H, Yu L. Valence-bond spin-liquid state in two-dimensional frustrated spin-1/2 Heisenberg antiferromagnets. Phys Rev Lett, 2003, 91: 067201
- 54 Feng X Y, Zhang G M, Xiang T. Topological characterization of quantum phase transitions in a spin-1/2 model. Phys Rev Lett, 2007, 98: 087204
- 55 Lee D H, Zhang G M, Xiang T. Edge solitons of topological insulators and fractionalized quasiparticles in two dimensions. Phys Rev Lett, 2007, 99: 196805
- 56 Zhao Y G, Wang Y H, Zhang G M, et al. Universal behavior of giant electroresistance in epitaxial $\text{La}_{0.67}\text{Ca}_{0.33}\text{MnO}_3$ thin films. Appl Phys Lett, 2005, 86: 122502
- 57 Sun Y H, Zhao Y G, Tian H F, et al. Electric and magnetic modulation of fully strained dead layers in $\text{La}_{0.67}\text{Sr}_{0.33}\text{MnO}_3$ films. Phys Rev B, 2008, 78: 024412

History and recent research progress of Condensed Matter Physics at Tsinghua University

DUAN WenHui* & CHEN Xi*

Department of Physics, Tsinghua University, Beijing 100084, China

In this review, we will briefly introduce the history and research areas of Institute of Condensed Matter Physics at Tsinghua University. Recent progresses in Nano Physics, Surface Physics, Superconducting Materials, Theoretical and Computational Condensed Matter Physics are discussed in detail.

low-dimensional quantum system, nano physics, surface physics, superconducting materials, electronic structure

PACS: 68.65.-k, 68.37.-d, 74.70.-b, 73.21.-b

doi: 10.1360/132011-85