

· 科学论坛 ·

新奇量子体系的设计、制备和物性操控*

姜向伟¹ 倪培根^{1**} 董国轩¹ 王健² 姚宏³ 张浩³

1. 国家自然科学基金委员会 数理科学部, 北京 100085
2. 北京大学, 北京 100871
3. 清华大学, 北京 100084

[摘要] 第211期双清论坛“新奇量子体系的设计、制备和物性操控”总结了我国新奇量子体系的研究进展及进一步发展所面临的机遇与挑战,梳理了该领域未来主要研究方向和关键科学问题,并探讨了前沿研究方向和科学基金资助战略。论坛凝练出了新奇量子体系研究领域未来5~10年的重大关键科学问题,主要包括:(1)高质量关键功能材料的可控制备和体系构筑;(2)科学问题导向的实验技术革新与理论方法突破;(3)量子计算;(4)低维超导和磁性中量子态的多手段调控及其在未来信息技术中的应用探索;(5)拓扑超导和马约拉纳的确定性判据等。论坛基于新奇量子体系及其应用研究领域的现状分析和未来展望,提出了进一步发展的建议。

[关键词] 新奇量子体系;量子调控;量子计算;量子材料;基础研究

2018年10月29—30日,国家自然科学基金委员会数学物理科学部、工程与材料科学部、信息科学部、政策局共同主办了主题为“新奇量子体系的设计、制备和物性操控”的第211期双清论坛,来自国内高校、科研院所和企业的42名专家学者应邀参加了本次论坛。与会专家对新奇量子体系的发展现状与趋势、未来主要研究方向和科学问题进行了探讨与梳理,并提出了相关的国家自然科学基金资助策略建议。

1 新奇量子体系研究背景和发展现状

上世纪凝聚态物理的重大发现和创新孕育并支撑了当代的信息科技。新奇量子体系及应用研究是当前基础科学的最前沿研究领域之一,是抢占战略制高点的基础,是我国实现超越和引领的关键领域。经过我国凝聚态物理学家们几十年的积累,在该领域已发展出一支具有良好科研基础、雄厚科研实力及较强国际竞争力的科研队伍,同时也是众多高校和科研单位的重点研究方向。因与应用结合较为紧密,该领域是最有条件承担和完成国家战略需求与任务的方向之一。新奇量子体系的研究内容包括量



倪培根 博士,国家自然科学基金委员会数理科学部物理科学一处处长,研究员。



姜向伟 博士,国家自然科学基金委员会数理科学部物理科学一处项目主任,副研究员。

子态的构筑、特性及其精密探测,量子态与环境以及量子态之间的相互作用等。因其研究对象包括电子和光子等信息技术和能源技术的基本载体,新奇量子体系的研究会给信息技术和能源技术等提供新的原理和方法,对未来的信息技术和能源技术等具有关键的推动作用。要构筑新奇量子体系并精确实现单量子态调控,对材料制备也提出了非常苛刻的要求。因此该研究领域是一个以物理学为主,涉及化学、材料

收稿日期:2019-04-28;修回日期:2019-08-16

* 本文根据第211期“双清论坛”的研讨整理。

** 通信作者,Email:nipg@nsfc.gov.cn

科学和信息科学与技术等多学科的交叉研究领域。

根据新奇量子体系的研究特点和近几十年的重大科学突破,本文从以下三方面总结该领域的研究背景和现状。

1.1 新量子材料的发现和制备极大影响着新奇量子体系的发展

在新奇量子体系的研究中,毫不夸张地说,谁掌握了材料,谁就掌握了研究的主动权。凝聚态物理相关的诺贝尔物理学奖中有相当一部分颁发给了新型量子材料的发现,可以充分说明这一点。高温超导体的发现就是一个典型的例子。自1911年超导电性被发现以来,作为最有趣的宏观量子体系之一,超导研究一个最重要的方向就是如何提高其转变温度。1986年,IBM苏黎世实验室的Muller和Bednorz博士在所制备的铜氧化物中发现较高转变温度的超导^[1],随后国际上的一系列相关样品的制备和测试更是将超导转变温度首次提升到超过液氮温度,Muller和Bednorz博士因此在第二年即1987年就获得了诺贝尔物理学奖。这一发现不但使超导的大规模应用变得更加现实,而且极大地推动了强关联量子物理的发展。相关的高温超导机理研究导致了理论方法和实验技术的巨大进步,比如角分辨光电子能谱技术、自旋分辨角分辨光电子能谱以及超快角分辨光电子能谱的发展和运用就是其中的杰出例子^[2]。新的高温超导材料的发现和高温超导机理的研究在很大程度上主导了强关联量子物理在过去三十年的发展,其新奇的物理特性和巨大的应用前景直接催生了物理学领域的一个重大研究方向并活跃至今。

另一个重要例子是石墨烯这一由碳原子组成的单个原子层材料的发现。2004年,英国两位物理学家Geim和Novoselov从高定向石墨中制备出了石墨烯,并在该材料体系中发现了半整数量子霍尔效应^[3]。两位物理学家因此于2010年获得诺贝尔物理学奖。石墨烯不但机械性能好、廉价、制备容易,而且在室温下的载流子迁移率可高达 $15\,000\text{ cm}^2/(\text{V}\cdot\text{s})$,这一数值超过了硅材料的10倍,是此前已知具有最高室温载流子迁移率锑化铟(InSb)的两倍以上。石墨烯的发现还促进了一系列二维层状量子材料的发现和研究,不仅有着重要的基础研究价值,而且在移动设备、航空航天、新能源电池等领域也有广泛的应用前景。石墨烯是过去十多年来主导新奇量子体系研究发展方向的一个明星材料。

第三个例子是应用于蓝光二极管的p型氮化镓材料的成功制备。发展氮化镓材料并研制出蓝光二极管和激光器的三位科学家获得了2014年的诺贝尔物理学奖。蓝光二极管的实现使得人类得以用发光

二极管产生足够亮的白光,其能量转换效率比白炽灯大幅提高,并进一步促成了各种发光二极管显示屏的发明,也推动了照明效率的提高,大幅提高了人类的能源利用效率。氮化镓等宽禁带半导体的研究基本上主导了整个半导体物理过去二十多年的研究方向。

1.2 新的实验技术和理论工具的发展推动着新奇量子体系的研究

物理学是实验主导的科学,新的实验装置的发展,实验技术的改进,可拓展人类的认知边界,让人类触摸到曾经无法达到的地方(空间维度、时间维度、能量维度、动量维度、自旋维度等),进而带来新的科学发现与应用。以1981年Binnig和Rohrer博士发明的扫描隧道显微镜为例(获得1986年诺贝尔物理学奖),它大大提高了人类的空间测量精度,使得直接观测、定位直至操控单个原子和分子成为现实。扫描隧道显微镜的发明和基于扫描隧道显微镜的原子操控大大推进了纳米科学技术在上世纪九十年代的发展。1996年基于扫描隧道显微镜的非弹性隧道谱的发展使得对单个分子同时进行实空间成像和化学识别成为现实^[4],而2001年自旋极化扫描隧道显微镜的发展则使得人们可以在实空间对单个原子的自旋态进行观测^[5]。这些实验技术的发展大大推进了新奇量子体系的研究进程。

第二个例子是离子阱囚禁技术的发展(获得1997年诺贝尔物理学奖)使得人类可以用激光来操控和冷却原子,进而在此技术平台上实现了玻色-爱因斯坦凝聚等一系列有重大科学意义的基础量子物理实验^[6],为量子模拟等有重大应用价值的研究探索奠定了基础。特别是基于该技术发展出来的光钟,使时间测量精度达到几亿年且误差不到一秒,使得GPS定位达到厘米甚至更高水平,这无疑会大大提高新奇量子体系的研究精度。

第三个例子是重整化群理论方法的发展(获1982年诺贝尔物理学奖)使得物理学家能解决关联体系中许多重要的物理问题^[7],包括相变的临界特性,并一定程度上促成了近二十多年来密度矩阵重整化群和张量重整化群等数值方法的发展,显著增强了研究关联量子体系的解析和数值能力。

可以预见,只要一个新的科学研究工具或技术出现,不管是能量和动量还是时间和空间分辨能力得到提高,都会推动对新奇量子体系的研究进入一个新阶段。

1.3 重大科学问题和重大应用需求是新奇量子体系研究的主要动力

目前人类已经知道的、尚未解决的科学难题是科学研究的巨大动力,这在新奇量子体系的研究中表现

尤为显著。在高温超导被发现三十年后,其背后的物理机理仍不被人类所理解,因此在 2005 年被 *Science* 杂志评选为困扰人类的 125 个科学难题之一^[8]。彻底理解高温超导背后的机理不仅能解决这一重大科学问题,而且可以为环温、室温超导体的探索及其在能源和信息领域的广泛应用提供基础,并由超导体驱动的科技革命奠定基础。这个难题一直强烈地吸引着量子物理的科学家利用和发展各种可能的技术和理论,并主导着相关方向的发展。第二个例子是量子计算^[9]。量子计算是从单个量子比特出发,通过主动操控量子态,可以解决当前经典计算机无法有效计算的某些重要计算问题,因此得到当前国际上的广泛关注和重视。更进一步,真正意义上的通用量子计算机一旦实现,将会在“硬技术”层面彻底变革人类的信息社会。这一巨大应用前景激励着世界科技巨头和高技术公司,如谷歌、IBM、微软、英特尔、阿里巴巴、腾讯、百度和许多初创企业均投入巨资对其进行研发。欧盟启动 10 亿欧元的量子旗舰计划^[10],美国、英国、德国、日本等国家也在量子信息科学领域做了重要战略布局^[11],全球已经进入了所谓的“量子超越(Supremacy)”^[12, 13]时代。目前,实现量子计算的方案有若干种,尚不明确哪个方案会最终胜出。因此对包括超导^[14, 15]、拓扑^[16]、离子阱^[17]、NV 中心^[18]、冷原子^[19]、半导体量子点^[20, 21]等在内的量子计算不同体系和路径的探索,将大大促进相关基础量子物理问题的理解和技术的发展,这些研究基本上都涉及到对新奇量子体系的探索。最后一个例子是拓扑超导和马约拉纳费米子的证明^[22]。其确凿证明不但是科学上的重大突破,而且因其优越的拓扑性质可以从根本上解决量子计算中核心的退相干问题,有望实现可容错可扩展的真正意义上的拓扑量子计算机。零能马约拉纳费米子除了这一巨大的应用价值外,更因其理论预言具有非阿贝尔统计这一新奇的量子现象而极具基础科研价值。寻找马约拉纳费米子存在的确凿性证据并成功地对马约拉纳费米子进行“编织操作”,可直接为拓扑量子比特的构建铺平道路。这些重大科学问题和需求驱动,吸引着科学家,使拓扑超导和马约拉纳零能模的相关研究成为新奇量子体系领域最前沿的一个研究方向。

2 我国在新奇量子体系领域取得的成绩和面临的不足

2.1 我国在新奇量子体系研究中取得的成绩

近些年来,我国凝聚态物理学家在量子材料的可控制备,精密实验技术的发展,理论方法的拓展,以及重大科学问题的解决等方面都取得了长足的进

步。在新奇量子体系的研究中,我国在几个方向上都实现了引领,甚至主导了这些方向的发展。

2.1.1 铁基超导材料和拓扑绝缘体等量子材料的制备和构筑

尽管铁基超导材料和拓扑绝缘体不是我国科学家首先发现的,但是在后续的研究中,我国迎头赶上,在过去五年基本上代表着国际的最好水平。铁基超导领域引用最多的 10 篇文章有 6 篇是中国科学家的工作。我国科学家首次观测到铁基超导突破麦克米兰极限($T_c > 40$ K),证实其为新一类非常规高温超导体^[23]。我国率先制备出单层铁硒薄膜并发现高温超导^[24],这开拓了高温超导的新方向,引领了国际高温超导领域的发展。在拓扑绝缘体材料方面,我国制备出的材料达到国际最高的质量。由于我们在材料研究方面的进步,我国已经成为铁基超导和拓扑量子材料的科学研究中心之一。在与铁基超导和拓扑材料有关的所有重要国际会议上通常都会有我国科学家的大会特邀报告,这些报告充分说明我国在该领域的学术地位和影响力。

2.1.2 若干量子检测技术代表着国际的最好水平

我国在过去几年里设计和发展了多项新的针对单量子态的精密检测技术,为发现新的量子体系和量子效应奠定了基础。这些精密检测技术主要包括:(1) 亚纳米分辨的单分子拉曼成像技术^[25]。这项技术突破了光学成像手段中衍射极限的瓶颈,将具有化学识别能力的空间成像分辨率提高到亚纳米水平,对研究微观催化反应机制、分子纳米器件的微观构造等问题有重要的科学价值;(2) 单分子磁共振的探测技术^[26]。通过选取金刚石 NV 色心单自旋作为磁量子探针,把探针灵敏度提高两个量级,解决了高精度量子操控和读出问题,并率先实现了单分子磁共振的探测,把磁共振探测的灵敏度从百亿分子提高到了单分子水平、分辨率从毫米提高到纳米水平,该技术有望在不久的将来实现产业化,在人们的日常生活如医疗检测中得以广泛应用;(3) 超高分辨的分子束散射探测技术^[27]。这项技术的分辨率和灵敏度比传统的分子束散射技术高两个量级,为探测单个量子的反应产物、研究反应过渡态和共振态提供了实验基础;(4) 真空紫外激光自旋分辨角分辨光电子能谱技术。其能量分辨率(约 2 毫电子伏特)达到国际先进水平,利用该能谱技术首次在实验上证实了拓扑绝缘体中的自旋-轨道锁定现象^[28]。

2.1.3 在以科学问题为导向的研究中实现重大突破:量子反常霍尔效应的实验发现

众所周知,1980、1982 和 2005 年分别在硅、砷化镓和石墨烯中发现不同版本的量子霍尔效应,分

别获得了1985、1998和2010年的诺贝尔物理学奖,大大促进了量子物理学的发展。这三种量子霍尔效应均需要外加磁场,而量子反常霍尔效应是一种关于电子运动规律的全新原理的量子效应,它不需要外加磁场。量子反常霍尔效应的实现要求制备出兼顾铁磁性和能带拓扑结构的高质量二维绝缘体材料,这种苛刻要求可以说是现阶段下挑战材料制备和物性测量极限的一个标志性实验。我国团队团结一致,奋力攻关,在反常霍尔效应被发现130多年后,于2013年首先观测到了量子反常霍尔效应^[29]。在我国报道这个效应一年半后,国外四五个研究组才陆续验证了我国的结果,这充分显示了实验的难度和挑战性。该实验发现被2016年诺贝尔物理学奖评奖委员会列为近三十年拓扑物质领域最重要的实验发现之一,这也是建国以来我国科学家发现的最重要科学效应之一,是我国对物理学发展的重大贡献。

2.2 我国目前在新奇量子体系研究中的短板和不足

我国在材料制备方面人员众多,但原创成果不够多,缺少高水平人才。主要原因在于过分追求研究热点,不肯啃硬骨头坐冷板凳,在高质量材料制备本身方面下功夫不够,比如高质量单晶超导体和二维单晶材料等。在材料上把质量和技术做到极致看似科学意义不大,也比较难以在高影响因子期刊上发表论文,但却是科学和技术突破的一种主要实现形式,急需建立稳定的支持政策,需要科研人员极大的耐心和精力投入,以及得到持续的经费支持。以高质量高稳定性的p型氧化锌为例,这种透明氧化物材料的实现极其困难,并因难以发表高影响因子的文章而使科研人员望而却步,但如果能实现,它将会促进整个半导体领域的发展,导致光电领域和能源领域的变革。像这类极具挑战性的关键量子功能材料的高质量制备瓶颈是目前我国新奇量子体系研究的主要问题之一。亟需政策和经费的持续支持,使科研人员愿意沉下心来长期攻关,以补齐我国在这类问题上的短板。

我国当前科研体制在机制设计、评价体系等方面对潜心研发实验技术的人员的支持不够。新的实验装置和技术的研发是促进科学突破的另一个主要途径,但从事实验装置开发的工程技术人员由于其本身工作性质不易出成果,在现行的国内评价体系中其待遇和职称往往得不到有效保障,不利于工作的持续开展。如何在机制设计上鼓励科研人员深挖技术,甘于坐“冷板凳”,发扬“十年磨一剑”的“钉钉子”精神,是我国的科研体制接下来必须要解决的关键问题。

我国科研人员起步晚,进展快,同时也面临着积

累不够的问题。许多国际顶尖实验室取得科学突破是建立在其在相关领域有着几十年深厚的技术、知识等积淀的基础上的。比如日本的p型氮化镓的成功研制依赖于日本半导体工业的深厚技术积累,日本Iwasa教授在发明液态栅极技术前已在此方向深耕了数十年。荷兰代尔夫特理工大学的Kouwenhoven教授研究组能在2012年实验上第一个发现马约拉纳费米子的可能信号^[22],进而在2018年观察到量子化的电导^[30],主要原因也是Kouwenhoven教授本人自大学时代起就从事这方向的研究,1988年在量子点接触实验中观察到量子化的电导平台工作就是他本科期间参与完成的。

3 新奇量子体系的关键科学问题

经过与会专家学者研讨,本次论坛基于以上分析归纳出了该领域在未来5~10年的几个重点研究方向。

3.1 高质量关键功能材料的可控制备和体系构筑

需要重点关注高质量单晶和薄膜的制备和生长。主要包括环温或室温超导体,或者77 K可应用的超导体;在超导和拓扑量子计算体系中,探索比铝超导体更优越的超导材料,或者性能大幅提升的高质量铝膜(譬如用分子束外延方法制备高质量二维晶体);面积更大的单晶量子材料(如石墨烯或者高温超导)等。

3.2 科学问题导向的实验技术革新与理论方法突破

对于高温超导体体系,实验测量手段需要更加灵敏、更加精准、更加系统、更加极端。要重视发展联合测量手段和原位测量技术,比如研发可直接探测电子相互作用的实验装置。理论上提出新的概念思想,探索新的计算方法,包括新型密度矩阵重正化群和张量重正化群方法等。对于马约拉纳费米子系统,实验测量手段需要极低温条件、复杂微纳级样品以及器件的制备和加工手段。应鼓励尝试高难度的实验,鼓励发展新的实验方法,鼓励多手段的联合与合作。应加强资助利用大科学装置开展的特色研究,加强资助独特设备的研制,加强资助目标导向的团队项目。例如角分辨光电子能谱对强光源的重大需求已不能满足我国科研迅速发展的需要,而新一代(第四代)同步辐射光源的研发可解决物理、生物、能源等领域一系列重大科学和应用问题,是中国光源发展的重大机遇。

3.3 量子计算

目前有望成为量子计算的物理载体包括超导、拓扑、金刚石NV中心、冷原子、离子阱、量子点等等,但最终选择哪一个或几个目前尚未有定论。当前量子计算仍然处于基础研究阶段,有许多物理上的基础问

题,如材料物性和量子算法等,仍需要解决和克服。制约量子计算的最主要问题是如何延长量子比特的退相干时间,以及在提高相干量子比特数的同时如何保证每个比特的保真度(fidelity)。超导量子比特在过去二十年的发展大大降低了由于电噪音导致的退相干,下一个突破可以考虑如何降低磁噪音。鉴于量子计算的巨大潜在应用价值,对未来信息技术的走向可能有决定性作用,建议我国可以多方案并行部署并重点支持,鼓励探讨具有原创性的全新方案,走出有中国自己特色的量子计算之路,以避免未来可能的知识产权问题。由于量子算法在量子计算机的应用及实现“量子超越”中具有重要作用,鼓励探索和发展具有基础科学价值和应用前景的高效量子算法。

3.4 低维超导和磁性中量子态的多手段调控及其在未来信息技术中的应用探索

单晶二维超导体中量子相变、量子相以及界面调控高温超导、拓扑超导等新奇超导特性的研究已经成为国际最前沿的科学问题。此外,已知的高温超导体都是层状结构,是准二维的体系,因此二维单晶超导体的研究也有望成为设计新的界面高温超导体以及最终解决高温超导机理问题的契机。我国在单晶二维超导这一领域的部分方向处于国际领先地位,建议进行重点支持,确保我国的相关研究在国际上起到引领作用,产生重大的突破性成果。磁性材料是量子材料里的重要分支之一,最近单原胞层二维材料中磁性的发现引起了国际学术界的广泛关注,其中新的科学突破有望在未来信息和能源领域产生重要的应用,应列为我国未来的重点支持方向之一。

3.5 拓扑超导和马约拉纳的确定性判据

拓扑超导因其理论上具有优越的拓扑性质,可以从根本上解决量子计算中核心的退相干问题和量子比特的保真度问题,使得量子比特规模化扩展成量子计算机成为可能。而拓扑量子计算所依赖的马约拉纳零模是一种反粒子即其自身的准粒子。自2012年发现第一个马约拉纳零模的可能证据以来,许多实验都报道了在不同拓扑体系中的可能证据,但能被普遍接受的完全确凿的证据依然欠缺。这可以通过在实验上“编织”马约拉纳零模观测其非阿贝尔统计来实现。不同于费米子和玻色子,交换两个马约拉纳零模不光给整体的波函数带来一个任意的相位(既非0也非 π),甚至会变成另一个完全不同的量子态。这种非阿贝尔统计是自分数量子霍尔效应(5/2霍尔态)开始,凝聚态物理学家几十年来努力追寻的新奇量子现象。

4 总结与展望

总而言之,新奇量子体系及其应用研究领域是

当前基础科学的最前沿,是抢占战略制高点的基础,是我国科技实现超越和引领的关键领域。极端的实验条件和基本的理论内涵决定了新奇量子体系研究具有很大的难度,成为整个科学研究领域中反映人类研究能力最高水平的关键领域之一。我国科学家奋力拼搏,在量子材料的可控制备、精密实验技术的发展、理论方法的拓展,以及重大科学问题的解决上都取得了长足的进步,使得我国在新奇量子体系若干方向实现了引领,甚至主导了这些方向的发展。基于新奇量子体系及其应用研究领域当前的现状分析和未来展望,我们提出未来发展建议如下:

(1) 完善引导机制。对一些重大研究领域,建立明确目标和科学问题引导的研究机制,重点持续地支持创新性强的实验技术和理论方法的发展,重视高质量量子材料的制备、精密加工、精密探测技术方法和设备的研发。

(2) 优化资助模式。针对重大科学问题,加强顶层设计,进行高强度资助,进一步加强对量子材料和量子计算领域的持续资助,保持我国在该领域取得的优势,从政策和资金安排上做长期保障。

(3) 创新评价机制。建立不唯论文数量、不唯影响因子、不唯热点的科学评价体制,通过机制创新,营造潜心研究的科研环境,为原创性研究成果的产生提供土壤和养分。

致谢 本期双清论坛的举办得到国内同行大力支持,在此向参加论坛的各位代表表示衷心感谢。特别感谢薛其坤院士、向涛院士、陈仙辉院士和龚新高院士四位论坛主席的精心谋划、中肯建议以及对综述报告的学术指导。衷心感谢国家自然科学基金委员会政策局、工程与材料科学部、信息科学部对本期论坛的支持!

参 考 文 献

- [1] Bednorz JG, Müller KA. Possible high T_c superconductivity in the Ba-La-Cu-O system. *Zeitschrift für Physik B-Condensed Matter*, 1986, 64(2): 189—193.
- [2] Damascelli A, Hussain Z, Shen ZX. Angle-resolved photoemission studies of the cuprate superconductors. *Reviews of Modern Physics*, 2003, 75(2): 473—541.
- [3] Novoselov KS, Geim AK, Morozov SV, et al. Two-dimensional gas of massless Dirac fermions in graphene. *Nature*, 2005, 438(7065): 197—200.
- [4] Jung TA, Schlittler RR, Gimzewski JK, et al. Controlled room-temperature positioning of individual molecules: molecular flexure and motion. *science*, 1996, 271(5246): 181—184.
- [5] Wortmann D, Heinze S, KurzPh, et al. Resolving complex atomic-scale spin structures by spin-polarized scanning tunneling microscopy. *Physical Review Letters*, 2001, 86(18): 4132—4135.

- [6] Anderson MH, Ensher JR, Matthews MR, et al. Observation of bose-einstein condensation in a dilute atomic vapor. *Science*, 1995, 269(5221): 198—201.
- [7] Schollwöck U. The density-matrix renormalization group. *Review of Modern Physics*, 2005, 77: 259.
- [8] Kennedy D, 125, *Science*, 2005, 309:19.
- [9] Steane A. Quantum computing. *Reports on Progress in Physics*, 1998, 61: 117.
- [10] Cartlidge E. Europe's 1 billion quantum flagship announces grants, *Science*, 2018, 362(6414): 512.
- [11] Gabriel P. Update: Quantum physics gets attention-and brighter funding prospects-in Congress. *Science*, 2018, doi: 10.1126/science.aau4688.
- [12] Harrow AW, Montanaro A. Quantum computational supremacy. *Nature*, 2017, 549(7671): 203—209.
- [13] Boixo S, Isakov SV, Smelyanskiy VN, et al. Characterizing quantum supremacy in near-term devices. *Nature Physics*, 2018, 14(6): 595—600.
- [14] Clarke J, Wilhelm FK. Superconducting quantum bits. *Nature*, 2008, 453(7198): 1031—1042.
- [15] Castelvecchi D. IBM's quantum cloud computer goes commercial. *Nature*, 2017, 543(7644): 159.
- [16] Nayak C, Simon SH, Stern A, et al. Non-Abelian anyons and topological quantum computation. *Review of Modern Physics*, 2008, 80(3): 1083—1159.
- [17] Kielpinski D, Monroe C, Wineland DJ. Architecture for a large-scale ion-trap quantum computer. *Nature*, 2002, 417(6890): 709—711.
- [18] Weber JR, Koehl WF, Varley JB, et al. Quantum computing with defects. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2010, 107(19): 8513—8518.
- [19] Monroe C. Quantum information processing with atoms and photons. *Nature*, 2002, 416(6877): 238—246.
- [20] Loss D, DiVincenzo DP. Quantum computation with quantum dots. *Physical Review A*, 1998, 57(1): 120—126.
- [21] Hanson R, Kouwenhoven LP, Petta JR, et al. Spins in few-electron quantum dots. *Reviews of Modern Physics*, 2007, 79(4): 1217—1265.
- [22] Mourik V, Zuo K, Frolov SM, et al. Signatures of majorana fermions in hybrid superconductor-semiconductor nanowire devices. *Science*, 2012, 336(6084): 1003—1007.
- [23] Chen XH, Wu T, Wu G, et al. Superconductivity at 43 K in SmFeAsO_(1-x)F_(x). *Nature*, 2008, 453(7196): 761—762.
- [24] Wang QY, Li Z, Zhang WH, et al. Interface-induced high-temperature superconductivity in single unit-cell FeSe films on SrTiO₃. *Chinese Physics Letters*, 2012, 29(3): 037402.
- [25] Jiang S, Zhang Y, Zhang R, et al. Distinguishing adjacent molecules on a surface using plasmon-enhanced Raman scattering. *Nature Nanotechnology*, 2015, 10(10): 865—869.
- [26] Shi FZ, Zhang Q, Wang PF, et al. Single-protein spin resonance spectroscopy under ambient conditions. *Science*, 2015, 347(6226): 1135—1138.
- [27] Xiao CL, Xu X, Liu S, et al. Experimental and theoretical differential cross sections for a four-atom reaction: HD+OH → H₂O+D. *Science*, 2011, 33(6041): 440—442.
- [28] Xie ZJ, He SL, Chen CY, et al. Orbital-selective spin texture and its manipulation in a topological insulator. *Nature Communications*, 2014, 5: 3382.
- [29] Chang CZ, Zhang JS, Feng X, et al. Experimental observation of the quantum anomalous hall effect in a magnetic topological insulator. *Science*, 2013, 340(6129): 167—170.
- [30] Zhang H, Liu CX, Gazibegovic S, et al. Quantized majorana conductance. *Nature*, 2018, 556(7699): 74—79.

Design, Fabrication and Physical Manipulation of Novel Quantum Systems

Jiang Xiangwei¹ Ni Peigen^{1*} Dong Guoxuan¹ Wang Jian² Yao Hong³ Zhang Hao³

1. Department of Mathematical and Physical Sciences, National Natural Science Foundation of China, Beijing 100085

2. Peking University, Beijing 100871

3. Tsinghua University, Beijing 100084

Abstract In this paper, the overall progress of the novel quantum system research, as well as opportunities and challenges in future development have been summarized. Major research categories and key scientific topics are clarified. Thorough discussions on frontier research directions and scientific funding strategies are provided. Several major key scientific topics of this area have been concluded which should be paid sufficient attention in the next 5~10 years. Based on the detailed analysis of current achievements and the outlook of future development, we provide some advice regarding research planning, funding policy, and scientific evaluation.

Keywords novel quantum system; quantum manipulation; quantum computing; quantum material; basic scientific research

(责任编辑 齐昆鹏)

* Corresponding Author, Email: nipg@nsfc.gov.cn