基于半导体量子点的量子计算

张鑫, 李海欧*, 王柯, 曹刚, 郭国平*

中国科学技术大学中国科学院量子信息重点实验室, 合肥 230026

* 通信作者. E-mail: haiouli@ustc.edu.cn, gpguo@ustc.edu.cn

收稿日期: 2017-05-20; 接受日期: 2017-06-30; 网络出版日期: 2017-10-16

国家重点研发计划 (批准号: 2016YFA0301700)、国家自然科学基金 (批准号: 61674132, 11674300)、国家杰出青年基金 (批准号: 11625419)、中国科学院战略性先导科技专项 (B) (批准号: XDB01030100) 和中央高校基本科研业务费专项资金资助项目

摘要 量子计算是半导体芯片尺寸突破经典物理极限的必然产物, 是后摩尔时代具有标志性的技术. 利用半导体量子点中电子的量子特性编码量子比特, 被认为是最有可能实现量子计算的候选者之一, 近年来在量子比特制备、读取和逻辑门操控上取得了一系列的重大突破. 本文首先介绍了半导体量子点量子计算研究的背景与意义, 随后回顾了基于半导体量子点的电子自旋量子比特、电荷量子比特、新型编码量子比特和量子比特的长程耦合等方面的研究进展, 最后讨论了半导体量子点量子计算的发展方向.

关键词 量子计算, 半导体量子点, 量子比特, 量子逻辑门, 长程耦合

1 引言

半导体芯片已经成为我们日常生活中必不可少的一部分, 无论是苹果手机还是小米、华为手机, 无论它们内置的是苹果 A9 芯片、高通芯片, 还是海思芯片, 它们都是半导体芯片. 以半导体芯片为核心的计算机发明成就了现代信息技术产业 (硬件、软件、网络、通信等) 的高速发展, 深刻地改变了人类的社会活动形式, 甚至是国防安全 and 国家核心竞争力. 半导体集成电路芯片几十年以来一直沿着“摩尔定律”发展, 单位芯片上晶体管数目越来越多, 集成度越来越高. 截止到目前, 集成电路芯片制造工艺处于 14 nm 和 10 nm 技术代量产阶段, 更小尺寸的技术代 (7 nm 和 5 nm) 处于研发阶段. 在可预见的未来将达到控制电子的物理极限, 当单个晶体管缩小到只能容纳一个或几个电子, 就会出现单电子晶体管, 量子隧穿效应将不可避免地影响电子元器件的正常工作. 尽管科研人员正在努力通过各种手段进一步延续晶体管的制程尺寸并同时开发多核芯片技术, 但相关技术只能在有限范围内优化传统芯片性能, 无法阻止“摩尔定律”必将被打破的历史趋势.

当现代计算机芯片在经典物理领域内无法进一步提升结构性能时, 可以研究探索有别于当前计算机架构的新型结构和多核芯片, 或者研究量子力学规律开发量子计算. 新型结构需要抛弃当前计算机

引用格式: 张鑫, 李海欧, 王柯, 等. 基于半导体量子点的量子计算. 中国科学: 信息科学, 2017, 47: 1255–1276, doi: 10.1360/N112017-00118
Zhang X, Li H-O, Wang K, et al. Quantum computation based on semiconductor quantum dots (in Chinese). Sci Sin Inform, 2017, 47: 1255–1276, doi: 10.1360/N112017-00118

所遵循的 von Neumann 架构, 而量子计算则需要改变现有半导体芯片的基本结构, 利用量子叠加和量子纠缠来实现逻辑运算. 国际半导体技术发展路线图认为多核芯片等技术只能短期延续摩尔定律, 中长期必然要发展以量子物理为基础的量子计算等颠覆性、革命性新型器件来超越摩尔定律, 信息的量子化趋势将不可避免. 近年来, 科学家利用量子效应在单电子晶体管上开展量子计算与量子信息技术研究, 期待能够研制出实用化的量子计算机. 量子计算机 (quantum computer) 是一类遵循量子力学规律进行高速数学和逻辑运算、存储及处理量子信息的物理装置. 当某个装置处理和计算的是量子信息, 运行的是量子算法时, 他就是量子计算机. 现在或许还无法准确预测“量子计算时代”何时到来, 但在科学家看来, 已经没有什么原理性的困难可以阻挡这种革命性产品的诞生. 我们所研究的利用半导体量子点制备的量子芯片, 就是能够进行逻辑运算和处理量子信息过程的量子处理器, 是研制量子计算机的核心器件, 类比于经典计算机全电控的半导体中央处理器 (CPU).

对于现代计算机而言, 通过控制晶体管电压的高低电平, 从而决定一个数据到底是“1”还是“0”, 采用“1”或“0”的二进制数据模式, 称为经典比特, 其在工作时将所有数据排列为一个比特序列, 对其进行串行处理. 而量子计算机使用的是量子比特, 量子计算机能秒杀传统计算机得益于两个独特的量子效应: 量子叠加和量子纠缠. 量子叠加能够让一个量子比特同时具备 0 和 1 的两种状态, 量子纠缠能让一个量子比特与空间上独立的其他量子比特共享自身状态, 创造出一种超级叠加, 实现量子并行计算, 其计算能力可随着量子比特位数的增加呈指数增长. 理论上对某些特定算法, 拥有 50 个量子比特的量子计算机性能就能超过目前世界上最先进的超级计算机“神威·太湖之光”, 拥有 300 个量子比特的量子计算机就能支持比宇宙中原子数量更多的并行计算, 量子计算机能够将某些经典计算机需要数万年来处理的复杂问题的运行时间缩短至几秒钟. 这一特性让量子计算机拥有超强的计算能力, 为密码分析、气象预报、石油勘探、药物设计等所需的大规模计算难题提供了解决方案, 并可揭示高温超导、量子霍尔效应等复杂物理机制, 为先进材料制造和新能源开发等奠定科学基础. 此外, 量子计算的信息处理过程是么正变换, 么正变换的可逆性使得量子信息处理过程中的能耗较低, 能够从原理上解决现代信息处理的另一个关键技术——高能耗的问题.

基于半导体量子点的量子计算由于可以结合现代半导体微电子制造工艺, 被认为是最有可能实现量子计算的候选者之一, 越来越受到各国政府、国际学术界和企业界的广泛关注和投入. 全世界有包括 Harvard University, Princeton University, Grenoble Alps University, Delft University of Technology, University of Tokyo, Hughes Research Laboratories, Center for Quantum Computation and Communication Technology 在内的美国、法国、荷兰、日本、澳大利亚和国内相关科研单位在内的 30 多个科研团队在从事半导体量子点芯片的量子计算研究. 在量子退相干、量子比特操控与耦合、量子态的操控、读取等方面取得了众多突破性的研究成果, 并吸引了包括 IBM, Microsoft, Google, Intel 公司等在内的多个国际企业巨头的加入, 目标就是在不久的将来能够实现量子计算机原型机, 掌握半导体量子芯片制造与操控的核心工艺技术.

2 国际研究进展

1998 年, Loss 和 DiVincenzo^[1] 提出可以用量子点中电子的自旋作为量子比特载体来实现量子计算, 被认为是半导体量子点进行量子计算研究的开端. 2000 年, DiVincenzo^[2] 对量子计算的物理实现提出了五点要求, 我们称之为 DiVincenzo 判据: (1) 系统要有能力很好地表征量子信息的基本单元——量子比特 (qubit); (2) 在计算开始时, 我们要能够对系统进行有效的初态制备, 将每一个量子比特制备到 0 态; (3) 要有能力对系统的量子比特实施普适量子逻辑门的操作, 具体而言, 要能够对单个

量子比特实施任意的操作, 以及对任意两个量子比特实施受控非门操作; (4) 要能够对量子计算机幺正演化的终态实施有效的量子测量; (5) 系统要有长的相干时间, 能够使得量子操作 (包含纠错) 和测量在相干时间内完成. 半导体量子点量子计算的研究主要就围绕这五点进行. 前面四点都已经在实验上得到验证, 第五点需要有足够长的量子相干时间, 才能获得容错量子计算要求的极高保真度的量子逻辑门操控^[3~11]. 在量子相干时间内完成尽可能多的量子比特门操作, 提高量子比特的品质性能参数 S (量子相干时间与量子比特操控周期的比值) 是实现高保真度逻辑门操控的基础, 也是未来相当长一段时间内半导体量子点量子计算研究的核心任务.

半导体量子点量子计算研究已经先后在 III-V 族和 IV 族半导体材料体系中开展超过十年, 主要集中在 III-V 族的砷化镓 (GaAs/AlGaAs)^[12, 13]、IV 族的硅锗 (Si/SiGe) 异质结材料以及硅基金属氧化物半导体 (metal-oxide-semiconductor, MOS) 结构^[14~17], 还包括各种纳米线^[18~21] 和碳纳米管^[22~24]. 除了利用单电子的自旋作为量子比特, 研究者们同时开发出了如空穴编码量子比特^[25~27]、电荷量子比特^[28~32] 等新的比特形式, 并且利用多电子操控开发出了包括杂化量子比特^[33, 34]、自旋单态 - 三重态量子比特^[35~37]、交换量子比特^[38, 39] 等新型编码量子比特, 研究者们同时尝试进行多量子比特的扩展与长程耦合^[40~43], 为未来做出可以实用化的量子计算机的研制打下了坚实的基础. 下面从自旋量子比特、电荷量子比特、新型编码量子比特和多量子比特的长程耦合 4 个方面介绍半导体量子点量子计算的最新研究进展.

2.1 自旋量子比特

Loss 和 DiVincenzo 在 1998 年指出半导体量子点中的单电子自旋可以用来制备量子比特, 单个电子的自旋向上和向下的两个状态可以用于编码量子比特的 0 和 1. 近十年来, 来自世界各国的科研团队先后开发了砷化镓基自旋量子比特、硅基自旋量子比特和空穴编码的自旋量子比特.

2.1.1 砷化镓基自旋量子比特

基于传统掺杂型砷化镓异质结二维电子气上的栅型量子点, 由于微纳米加工工艺方法成熟和电子输运性能优越, 是最早成为开展量子比特研究的材料体系, 近十年来取得一系列重大突破. 半导体量子点的结构示意图如图 1(a) 所示, 在 AlGaAs 和 GaAs 两层材料界面中间形成的二维电子气 (2-dimensional electron gas, 2DEG) 可以将电子限制在二维平面上, 进一步通过图中深灰色表示的金属顶栅施加的静电场可以形成一个准零维结构, 即半导体单量子点, 再通过连续改变施加在金属栅极上的电压, 将电子耗尽到最后一个电子, 并施加外磁场使电子的自旋简并解除, 能级劈裂, 利用最后一个电子的不同的自旋状态进行量子比特编码, 完成自旋量子比特的制备^[5].

为了得到可以编码的量子比特, 首先需要在量子点中获得单个电子, 并实现电子自旋读出. 2003 年, 荷兰 Delft University of Technology 的 Kouwenhoven 研究组首次在侧向量子点器件中集成量子点接触 (quantum point contact, QPC) —— 一种高灵敏度的电信号读出结构, 获得了单个电子, 意味着向操控单个电子的自旋迈出坚实的一步^[44]. 他们的装置如图 1(b), QPC-L 和 QPC-R 分别是左右两边的量子点接触, 可以探测量子点中电荷的变化, 实现高灵敏度的测量. 第二年, 利用如图 2 所示的自旋 - 电荷转换机制, 实现了单电子自旋的单次读出^[45].

自旋 - 电荷转换机制利用的是自旋向上和自旋向下的能级高度不同. 在一定磁场条件下, 自旋发生劈裂, 自旋向下的能级高于自旋向上的能级. 调整量子点中能级的高度, 使源漏的费米面在自旋向上和自旋向下的能级中间, 当进入量子点的电子自旋向上时, 它能够进入漏中形成电流; 当进入量子

图 1 (网络版彩图) 半导体量子点器件结构示意图

Figure 1 (Color online) The schematic view of a semiconductor quantum dot. (a) Surface gates are used to deplete electrons and define a double quantum dot in the 2DEG formed in the AlGaAs/GaAs heterostructure; (b) scanning electron microscope (SEM) image of a GaAs/AlGaAs double quantum dots integrated with two quantum point contacts

图 2 (网络版彩图) 自旋 - 电荷转换机制读出自旋示意图

Figure 2 (Color online) Schematic diagrams for spin-charge conversion. In the magnetic field, the spin-down electron has a higher energy than spin-up electron. If we put the Fermi level in between the spin-up level and the spin-down level, the spin-down electron can tunnel back to reservoir while the spin-up one cannot. As a result, we can read out the spin direction by discriminating whether there is a current

点的电子自旋向下时, 它不能够进入漏中形成电流. 根据这种选择机制就实现了自旋的读出. 还有另外一种自旋 - 电荷转换机制利用的是不同自旋方向隧穿到漏电极的速率不同, 也是一种较为有效的实现单次读出的机制. 在双量子点中, 又发展出一种常用的读出机制 —— 自旋阻塞^[46] (Spin Blockade). 如图 3, 当双量子点中占据的两个电子自旋方向相同时, 由于泡利不相容原理, 其中一个量子点中的电子不能隧穿到另外一个量子点中, 这样就可以用一个量子点读出另外一个量子点的自旋状态.

在能够读出自旋状态后, 还需要解决的问题就是自旋的操控. 自旋的操控利用的主要是电子自旋共振技术 (Electron spin resonance, ESR), 如图 3, 当外加变化磁场的振动频率与自旋劈裂的能级差相等时, 就会产生电子自旋的共振. 2006 年, Kouwenhoven 组通过变化的磁场, 利用电子自旋共振技术和自旋阻塞现象实现了电子自旋的操控和读出^[46], 量子退相干时间在 100 ns 左右, 量子比特保真度

图 3 (网络版彩图) 电子自旋共振及自旋阻塞示意图 (修改自文献 [48])

Figure 3 (Color online) The sequential flow of electrons at spinblockade using ESR (modified from [48]). This cycle can be described via the occupations (NL, NR) of the left and right dots as (1,0)-(1,1)-(2,0)-(1,0). Starting from (1,0), an electron tunnels from the source to form the (1,1)T+ triplet state. The electron in the right dot cannot tunnel to the left dot because of the Pauli exclusion principle and transport is blocked. With ESR, the electron on the right dot can tunnel to the left dot to form the (2,0) state. One of the two electrons then tunnels out to the drain to complete the cycle, yielding a finite leakage current

图 4 (网络版彩图) SWAP 门的理论和实验真值表 (修改自文献 [48])

Figure 4 (Color online) Visualized theoretical and experimental truth tables for a SWAP gate by Vandersypen's group (modified from [48]). The SWAP gate means the information of two input qubits are exchanged after the gate operation, and the experimental data shows that the spins are only partly exchanged, which is due to local nuclear fields

是 73%; 2007 年, 荷兰 Delft University of Technology 的 Vandersypen 组^[47] 利用自旋-轨道耦合机制通过振荡的电场也实现了电子自旋共振, 这种方法常被称为电偶极自旋共振 (Electron dipole spin resonance, EDSR); 2008 年, 日本理化研究所的 Tarucha 研究组^[48] 通过在量子点旁边集成一个微米级别的小磁块的方法通过电场实现了电偶极自旋共振. 上述方法都实现了砷化镓量子点中电子自旋的单比特门操控, 但是由于核自旋的影响, 其自旋弛豫时间和量子退相干时间都非常短, 因此其量子逻辑门操控的保真度均不高.

在电子自旋单量子比特操控的基础上, 研究者们进一步致力于两量子逻辑门的操控. 2005 年, Harvard University 的 Petta 等^[35] 利用交换耦合相互作用实现了 $\sqrt{\text{SWAP}}$ 门; 2011 年, Vandersypen 组^[49] 通过对两个自旋高达 86% 保真度的独立读出 (自旋-电荷转换机制) 实现了 SWAP 门, 其实验结果的真值表如图 4 所示.

图 5 (网络版彩图) 掺杂型和非掺杂型硅锗量子点纵向剖面图 (修改自文献 [53])

Figure 5 (Color online) Schematics of (a) a doped heterostructure and (b) an undoped heterostructure. In the doped heterostructure, the electrons come from the doping layer and in low temperature, current can be formed automatically, while in the undoped heterostructure, a top gate is needed to form 2DEG (modified from [53])

上述成果显示, 基于砷化镓半导体量子点的单电子自旋可以实现基本的单比特和两比特逻辑门的操控, 为未来实现容错量子计算铺平了道路. 现在主要的困难是其核自旋、自旋轨道耦合带来的退相干使得其逻辑门的保真度还远不能达到容错量子计算的要求 [3, 4, 35], 需要进一步研究解决这个问题, 比如提出新的比特形式减小噪声延长量子退相干时间或者寻找拥有长量子相干特性的新材料体系.

2.1.2 硅基自旋量子比特

砷化镓材料由于其具有较高的电子迁移率可以获得性能优异的量子点而被广泛研究, 早期的硅量子点由于硅基材料本身迁移率低, 并且有较多的缺陷很难形成好的量子点而较少被研究. 近年来随着科学技术的进步以及材料生长工艺技术的大幅提高, 硅基材料拥有了更好的性质, 同时硅具有较弱的核自旋和电子自旋轨道耦合强度, 尤其是同位素纯化后的硅可以消除核自旋的影响, 预期会获得较长的自旋弛豫时间和量子退相干时间 [50], 因而硅作为替代砷化镓量子点的优良选择而广受关注.

硅基自旋量子比特主要有两种, 一种基于硅锗异质结, 另外一种基于硅 MOS 结构. 最早在实验上实现单电子占据的是硅锗异质结量子点. 2007 年, 美国 University of Wisconsin-Madison 的 Eriksson 教授研究组 [51] 利用量子点接触首先在掺杂型 Si/SiGe 异质结量子点中实现了单电子的占据; 2008 年, 他们在同样的结构中观察到了自旋阻塞现象 [52]; 掺杂型 Si/SiGe 异质结中掺杂层的 P 原子形成的随机的充电过程导致其物理过程特别复杂, 拥有更大的噪声来源, 直接影响到量子退相干过程. 2011 年, 美国 Hughes Research Laboratories 的 Maune 等 [36] 利用非掺杂型的硅锗异质结得到了自旋单态和三重态的量子相干振荡, 获得了接近微秒量级的量子退相干时间, 使得基于非掺杂硅锗异质结自旋量子比特的研究受到更为广泛的关注. 如图 5 所示为掺杂和非掺杂型硅锗量子点纵向结构图 [53].

针对非掺杂型硅锗异质结量子点, 2014 年, Vandersypen 研究组 [54] 利用如图 6(a) 所示的在量子点旁集成的小磁块获得了退相干时间长达 840 ns 的自旋量子比特, 比一般的砷化镓量子点的退相干时间提高约两个数量级, 最高的操作速率达到 5 MHz, 最高的量子比特保真度达到 99%; 2016 年, 他们对相同结构的自旋量子比特进行了多种量子比特操作 [8], 得到了平均保真度达到 99% 的单自旋量子比特. 同年, Tarucha 研究组 [9] 利用如图 6(b) 所示的硅锗量子点进行自旋量子比特操控, 获得了退相

图 6 (网络版彩图) Vandersypen 组 (a) 和 Tarucha 组 (b) 实现的 99% 保真度的硅锗异质结量子点样品图 (修改自文献 [8,9])

Figure 6 (Color online) False color image of the two devices whose single qubit fidelity reaches 99% by (a) Vandersypen's group (modified from [8]) and (b) Tarucha's group (modified from [9]). Both devices were fabricated on undoped Si/SiGe heterostructure with splitting gates, the locations of the dots are denoted by the circles in the image, respectively

干时间长达 $1.8 \mu\text{s}$ 、操作速率为 10 MHz 的自旋量子比特, 其品质性能参数 S 达到 140.

对于硅 MOS 量子点, 2009 年, 澳大利亚量子计算和通信技术研究中心的 Dzurak 组^[55] 首先实现了单电子的占据; 2011 年, 他们在双量子点中观察到了自旋阻塞现象^[56]; 2014 年, 他们通过引入传输线获得振荡的磁场, 实现了电子自旋共振测量, 获得了退相干时间高达 $120 \mu\text{s}$ 、保真度高达 99.6% 的自旋量子比特^[6]; 2015 年, 他们在硅 MOS 量子点中实现了两比特量子逻辑门, 通过相位控制操作演示了控制非逻辑门^[57], 被评选为当年的世界十大科技进展. 值得一提的是, 他们采用的是新型的交叠型栅极 (overlapping gate), 如图 7 所示, 与传统分立栅极相比, 这种栅极要求更高的套刻精度, 但是这种栅极能更加容易地调控量子点中电子的占据, 被其他研究组广泛采用^[39].

硅基半导体自旋量子比特由于其退相干时间长的特点, 解决了砷化镓量子点长时间面临的难题, 虽然离满足可容错量子计算的要求还有距离, 但是已经走上了进一步接近的正确道路上. 以此为基础, 国际上多个研究组已经开始研究如何构建硅基量子计算机^[7,10,11], 向实用化量子计算研制迈出了坚实的一步. 硅基量子比特在扩展时的难点主要是电极很难在二维平面上排布, 解决方案主要是将芯片进行立体扩展. 图 8 介绍了两种不同的硅基量子计算方案, 图 8(a) 利用倒装芯片工艺, 利用倒装的经典线路控制下面的量子点电路, 进而实现可扩展的半导体量子点量子比特; 图 8(b) 利用了底部电极控制量子点量子比特 (数据比特) 和掺杂的施主量子比特 (读出比特) 的相互作用, 实现了可用于容错量子计算的比特操控和读出.

2.1.3 空穴编码的自旋量子比特

虽然硅基自旋量子比特的退相干时间较长, 但是自旋的操控却非常复杂, 需要引入小磁体或者传输线, 而且操控速率较低, 只有 MHz 级别^[6,8,9,17,54,57], 难以达到高保真度量子逻辑门的要求. 2009 年, Princeton University 的 Petta 等^[26] 提出利用空穴的自旋编码量子比特, 其波函数受核自旋影响较小, 退相干时间较长; 自旋轨道耦合较强, 可以用于电偶极自旋操控, 从而实现长量子相干和快逻辑门操控的全电操控空穴自旋量子比特.

图 7 (网络版彩图) 硅基两量子比特逻辑门示意图 (修改自文献 [57])

Figure 7 (Color online) Silicon two-qubit logic device fabricated by Dzurak's group, incorporating single electron transistor (SET) readout and selective qubit control (modified from [57]). Schematic (a) and SEM colored image (b) of the device; (c) stability diagram of the double quantum dot obtained by monitoring the current I_{SET} through the capacitively coupled SET; (d) clear Rabi oscillations for both qubits are observed

图 8 (网络版彩图) 两种实现容错量子计算的硅基量子计算机方案 (修改自文献 [10, 11])

Figure 8 (Color online) Two different proposals for silicon based quantum computing. (a) Physical architecture to operate one unit module (modified from [11]), this device starts with an SOI wafer, where the top layers host the classical circuitry with bit lines and word lines, the isotopically enriched silicon-28 bottom layer holds the quantum circuit, and these are interconnected via floating gates. (b) Schematic diagram of the donor-dot array structure (modified from [10]). The combination of top gates and holes in the depletion gate form the quantum dots, half of which are occupied with data qubit electrons. These electrons can be moved to dots positioned above the donor measurement qubits, each with a back gate to control the exchange coupling between the donor electron and the electron in the quantum dot

图 9 (网络版彩图) 空穴量子比特实验装置示意图 (修改自文献 [27, 63])

Figure 9 (Color online) Two devices for hole spin qubits. (a) Simplified schematic of a silicon-on-insulator nanowire field-effect transistor with two gates by Franceschi's group (modified from [27]); (b) top view of an ambipolar silicon quantum dot device with its two different working modes: electron mode and hole mode (modified from [63])

关于空穴自旋比特的研究主要分为砷化镓和硅基两种材料. 在砷化镓材料方面, 2014 年, 美国桑迪亚国家实验室的 Reno 等^[58]首次在非掺杂型砷化镓异质结量子点中实现了少空穴的双量子点, 获得了单个空穴; 2016 年, 澳大利亚 University of New South Wales 的 Hamilton 组^[59]首次在空穴量子点中观察到了各向异性的自旋阻塞现象. 在砷化镓上, 对空穴自旋比特的操控还有待进一步的研究.

在硅基空穴自旋比特方面, 2013 年, 荷兰 Twente University Zwanenburg 组^[60]和澳大利亚 University of New South Wales 的 Hamilton 组^[61]均在硅 MOS 量子点中实现了空穴的输运, 达到少空穴区; 2015 年, Hamilton 组^[62]在硅 MOS 量子点中观察到了重空穴的自旋阻塞现象; 2016 年, 法国 Grenoble Alps University Franceschi 组^[27]在标准工业流程制备的硅 MOS 量子点中制备一个空穴自旋量子比特, 如图 9(a) 所示, 利用自旋轨道耦合相互作用进行操控和自旋阻塞效应进行自旋比特读出, 退相干时间达到 60 ns, 操作速率最高可达到 40 MHz, 其比特操控速率已经有较大提高, 只是退相干时间还需要随着样品质量进一步加强而得到进一步的提升.

值得一提的是, 2015 年, Zwanenburg 组^[63]在同一个硅基双极型量子点中实现了空穴和电子两种模式, 如图 9(b) 所示, 即通过简单电极的调控就可以获得不同的工作模式, 为未来硅基量子计算提供了更加丰富的应用前景. 空穴编码的量子比特到现在为止还是一个新兴领域, 我们希望看到未来空穴编码的单自旋量子比特可以达到容错量子计算的要求, 进而实现两量子比特逻辑门和普适量子逻辑门, 为实现量子计算机增添新的活力.

2.2 电荷量子比特

除了利用电子自旋来编码量子比特之外, 研究者在研究量子点的过程中发现可以通过编码电荷在双量子点中的位置来获得电荷量子比特, 由于其操控速度由电压脉冲决定, 这种比特的操控速度可以比自旋量子比特快两个量级以上.

图 10 (网络版彩图) 电荷量子比特实验装置图 (修改自文献 [28, 64~66])

Figure 10 (Color online) SEM image of milestones of the DQD devices for electron charge qubits. (a) The device by Hirayama's first realized few-electron qubits (modified from [64]); (b) the device by Petta's group first realized single electron charge qubits (modified from [65]); (c) the device made by Petta's group first estimated T_2 as high as 7 ns (modified from [66]); (d) the device fabricated by Guo's group for universal manipulation of single charge qubits (modified from [28])

2003 年, 日本电信电话株式会社研究所的 Hayashi 等^[64] 在砷化镓双量子点中实现了对电荷态的操控, 如图 10(a) 所示, 多余的电子占据左边量子点或者右边量子点可以看成是比特的 0 和 1, 这个系统就可以看成是一个二能级系统; 2004 年, 美国 Harvard University 的 Petta 等^[65] 用微波操控实现了对双量子点中单个电子的操控; 2010 年, Princeton University 的 Petersson 等^[66] 又测量得到电荷量子比特的退相干时间最高可达 7 ns 左右; 2013 年, 中国科学技术大学的郭国平教授研究组^[28] 首先利用 LZS (Landau-Zener-Stückelberg interference) 干涉获得了对电荷量子比特的普适意义上的全电操控, 其操控速度可以达到 20 GHz, 退相干时间最高可达 4 ns. 如图 10 所示为上述各个研究组的量子点结构图.

关于用电荷量子比特构建两量子逻辑门, 研究者们主要利用的是电容耦合. 2009 年, 英国卡文迪许实验室的 Petersson 等^[67] 和日本电信电话株式会社研究所的 Shinkai 等^[68] 都实现了两个电荷量子比特的电容耦合, 但是均没有实现逻辑门操控, 直到 2015 年, 中国科学技术大学的郭国平教授研究组利用电容耦合的两个电荷量子比特首次实现了两电荷量子比特的控制非 (Control-NOT, CNOT) 的逻辑操作^[29], 测量保真度达到 68%, 操作速度达到 6 GHz. 如图 11 为两电荷量子比特实验装置示意图. 紧接着 2016 年, 该研究组利用电容耦合的三个电荷量子比特首次实现了三电荷量子比特的控制非 (Toffli gate) 的逻辑操作^[32], 为多量子比特的扩展和长程耦合奠定基础.

在掺杂型的硅锗异质结量子点中同样也实现了电荷量子比特的相关逻辑门操控. 2013 年, 美国 University of Wisconsin-Madison 的 Eriksson 组^[69] 实现了电荷量子比特的全电操控, 其退相干时间最

图 11 (网络版彩图) 两电荷量子比特实验装置图 (修改自文献 [29,31])

Figure 11 (Color online) Schematics of the devices for two charge qubit gate. (a) and (b) are the device fabricated by Guo's group on GaAs quantum dot and the CNOT gate illustration on it (modified from [29]); (c) the two-qubit device made by Eriksson's group on Si/SiGe quantum dot (modified from [31])

高可以达到 2.1 ns; 2014 年, 他们用微波操控电荷获得了保真度高达 86% 的电荷量子比特^[30], 退相干时间平均超过 1 ns, 操纵速度达到 1 GHz; 2016 年, 他们在四量子点样品中实现了两比特操控^[31], 操控速度最高达到 12.5 GHz.

与自旋量子比特相比, 电荷量子比特的操控速度一般会高 3 个数量级, 但同时, 由于电荷噪声的影响, 使得电荷量子比特的退相干时间非常短, 这是电荷量子比特提高保真度的主要障碍. 未来电荷量子比特将主要集中在对电荷噪声的分析和减小上, 在保证超快比特操控的基础上, 进一步延长量子退相干时间以获得高保真度的电荷量子比特体系.

2.3 新型编码量子比特

无论是电子自旋、空穴, 还是电荷编码的量子比特, 它们利用的都是单个电子某一个自由度来编码量子比特. 还有一类量子点量子比特是采用多个电子的一个或两个自由度来编码量子比特, 它们往往能结合多个自由度的优点, 获得退相干时间更长、操作速度更快、操作方式更简单的新型编码量子比特. 下面着重介绍 3 种非常有应用前景的新型编码量子比特: 自旋单态-三重态量子比特、交换量子比特和杂化量子比特.

图 12 (网络版彩图) 自旋单态 – 三重态量子比特示意图 (修改自文献 [35])

Figure 12 (Color online) The control cycle for Singlet-Triplet qubits (modified from [35]). Experiments generally consists of preparation, singlet separation, evolution of various kinds, and projection onto the (0,2) singlet state (measurement). Projective measurement is based on the spin-blockaded transition of T states onto (0,2)S, whereas S states proceed freely, allowing S to be distinguished from T by the charge sensor during the measurement step

2.3.1 自旋单态 – 三重态量子比特

最早将自旋单态和三重态作为量子比特的是美国 Harvard University 的 Petta 等^[35], 2005 年, 他们首次在砷化镓量子点中对自旋单态和三重态进行了相干操作, 利用自旋阻塞效应进行读出^[70, 71], 量子退相干时间为 10 ns 左右, 其较短的退相干时间主要是受到核磁场的限制^[72, 73]. 原理如图 12 所示, 初始时两个电子都在右侧量子点中, 处于自旋单态, 然后调节中间势垒高度, 使得右侧有一个电子隧穿到左侧, 这时该量子比特就会在核磁场作用下在自旋单态和自旋三重态之间相干振荡, 操作结束后改变势垒高度, 利用自旋阻塞效应进行测量, 就完成了一次比特操作. 整个过程无需外加小磁块或用振荡的磁场调控, 只需要全电学操控即可, 比单电子自旋量子比特更加容易操控.

2009 年, Harvard University 的 Yacoby 研究组^[74] 通过核自旋极化, 在砷化镓量子点中实现了对自旋单态 – 三重态比特的普适操控. 2011 年, 美国 Hughes Research Laboratories^[36, 75] 在非掺杂型硅锗量子点上实现了同样的自旋单态 – 三重态的相干振荡, 如图 13 所示量子点结构, 其退相干时间长达 360 ns, 比砷化镓量子点体系高出约两个数量级; 2014 年, 通过引入小磁块, 美国 University of Wisconsin-Madison 的 Eriksson 研究组^[76] 在非掺杂硅锗量子点中实现对自旋单态和三重态的普适操控, 退相干时间约为 200 ns.

基于自旋单态 – 三重态量子比特, 研究者们还研究了两比特的纠缠. 2012 年, Harvard University 的 Yacoby 组^[37] 在砷化镓量子点上通过控制两比特操作获得了 Bell 态, 其保真度达到了 72%. 说明自旋单态 – 三重态量子比特也是一种有着非常大的应用前景的量子比特形式.

2.3.2 交换量子比特

单自旋量子比特和自旋单态 – 三重态量子比特都需要引入外加的非均匀磁场才能实现普适的比特操控, 而一种由三个量子点构成的三自旋比特可以实现无需外加非均匀磁场的完全操控, 其依赖的主要是交换相互作用. 2010 年, 美国 Harvard University 的 Laird 等^[77] 提出了这一比特形式, 他称之为交换量子比特. 交换量子比特的原理如图 14 所示, 只考虑三个量子点 (2, 0, 1)-(1, 1, 1)-(1, 0, 2) 中电子态之间的 S-T₀ 能级关系, 然后将其拆分为左侧和中间量子点之间的 S-T₀ 态, 以及中间和右侧量子点之间的 S-T₀ 态, 比特就会在图中的 |0⟩ 态和 |1⟩ 态之间进行相干振荡.

2013 年, 美国 Harvard University 的 Marcus 研究组^[38] 率先在砷化镓量子点中实现了交换量子比特的初始化、普适操控和单次读出, 如图 15(a) 所示的量子比特结构, 比特操作速度非常快, 达到了 37.5 GHz, 退相干时间为 16 ns, 平均保真度为 80%.

2015 年, 美国 Hughes Research Laboratories^[38] 在硅锗量子点上实现了同样的交换量子比特, 如

图 13 (网络版彩图) 美国 Hughes Research Laboratories 制备的演示自旋单态 - 三重态振荡的非掺杂型硅锗量子点结构示意图 (修改自文献 [36])

Figure 13 (Color online) Device design fabricated by Hughes Research Laboratories (modified from [36]). (a) Device cross-section showing undoped heterostructure, dielectric and gate stack; (b) SEM image of actual device before dielectric isolation and field gate deposition, the two-electron (1, 1) state is superimposed on the micrograph

图 14 (网络版彩图) 交换量子比特的能级结构图 (修改自文献 [77])

Figure 14 (Color online) Energy levels as a function of detuning for the lowest energy states for exchange qubit (modified from [77]). The red and blue levels form the logical subspace inside 111, with the logical states $|0\rangle$ and $|1\rangle$ denoted at the detuning at which they are the eigenstates of the system

图 15(b) 所示, 测量得到的退相干时间达到了 $6.4 \mu\text{s}$; 2016 年, Hughes Research Laboratories^[78] 和丹麦 University of Copenhagen Kuemmeth 研究组^[79] 均提出了对称操作的方法, 可以通过降低交换操作对电荷噪声的灵敏度提高退相干时间. 对退相干时间和保真度的提高还有待进一步的实验来证明.

总的来说, 交换量子比特的自旋状态较为复杂, 为实验操控带来了极大的挑战, 但其具有的快操作速率、长退相干时间和无需外加非均匀磁场的优点吸引着非常多的科学家投入其中, 我们期待其进一步的发展.

2.3.3 杂化量子比特

2012 年, 美国 University of Wisconsin-Madison 的 Coppersmith 研究组^[80,81] 首次提出了用双量子点结构制备一种新型的杂化量子比特. 这种杂化量子比特如图 16(a) 所示, 一个量子点中有两个电

图 15 (网络版彩图) 交换量子比特装置图 (修改自文献 [38, 39])

Figure 15 (Color online) Schematics of quantum dots for exchange qubits by (a) Marcus's group (modified from [38]) and (b) Hughes Research Laboratories (modified from [39]). (a) was made by traditional splitting gates in GaAs quantum dots and (b) was made by overlapping gates in Si/SiGe quantum dots

图 16 (网络版彩图) 杂化量子比特示意图 (修改自文献 [80])

Figure 16 (Color online) Schematics for the hybrid qubits (modified from [80]). (a) Introducing tunneling between the dots induces transitions between $|0\rangle$ and $|1\rangle$. Starting from $|0\rangle$, in which the electrons in the left dot are in a singlet, if an electron tunnels from the left dot to the right dot, and then the other electron tunnels back to the left dot, the spins in the left dot will end up in a triplet. The actual process yields transitions between $|0\rangle$ and $|1\rangle$. (b) and (c) are schematics illustrating independent tuning of the coupling between the electron in the singly occupied dot and the singlet and triplet states in the doubly occupied dot via the barrier height and relative energies in the two dots

子, 另外一个量子点中有一个电子, 初始基态 $|0\rangle$ 为左边量子点是自旋单态, 然后用电极调节两个量子点的隧穿耦合, 左边量子点中的电子隧穿到右边量子点中, 然后另外一个电子隧穿到左边, 这样左边量子点最后就是一个自旋三重态, 两个量子点就处于激发态 $|1\rangle$. 这两个能级可以构成一个二能级系统, 实现量子比特的相干振荡.

2014 年, 同在 University of Wisconsin-Madison 的 Eriksson 研究组 [33, 82] 在实验上对这种杂化量子比特进行了操控和读出, 得到了最高保真度达到 94% 的单量子比特操作, 操作速率最高达到 11.5 GHz, 而退相干时间最高达到 10 ns. 2016 年, 他们又通过减弱电荷噪声的影响, 获得了长达 127 ns 的退相干时间 [83].

与这种杂化量子比特类似, 2016 年, 中国科学技术大学的郭国平研究组利用双量子点中的 5 个电子编码了量子比特 [34], 获得了长达 10 ns 的退相干时间, 操作速率达到 2.5 GHz. 可以认为这种杂化量子比特结合了自旋量子比特长退相干时间和电荷量子比特操作速度快的优势. 期待未来进一步的研

究, 实现两杂化量子比特控制非逻辑门, 进一步做出能达到容错量子计算要求的杂化量子比特体系.

2.4 量子比特的长程耦合

为了实现实用化的量子计算机, 还必须考虑多量子比特的扩展和长程耦合问题. 现在常用的长程耦合方式有两种, 一种是谐振腔耦合, 另外一种是非谐振腔耦合.

2.4.1 谐振腔耦合

谐振腔和量子点的耦合不仅可以用于量子比特的长程耦合, 也可以用于对量子点进行非破坏性测量, 同时, 谐振腔和量子点的耦合又是研究费米子-玻色子等凝聚态物理问题的良好平台^[84], 因此一直广受关注.

2012 年, 法国皮埃尔·埃格兰实验室的 Kontos 研究组^[40]首次通过谐振腔耦合两个碳纳米管量子点, 实现了两个单点的长程耦合; 同年, 瑞士 Wallraff 研究组^[85]通过电偶极耦合实现了双量子点和谐振腔的耦合. 单点和双点与谐振腔耦合的实现极大地推动了该领域的发展, 2015 年, 中国科学技术大学郭国平教授研究组^[42, 86]利用谐振腔实现了两个距离长达 60 μm 的石墨烯双量子点的耦合. 关于自旋和谐振腔的耦合, 因为自旋的相干性较好, 其和谐振腔的磁耦合强度较弱, 只有约 50 Hz, 想要实现较强的耦合需要一些辅助手段. 一种方法是通过自旋轨道耦合, 2012 年, 美国 Princeton University 的 Petta 组^[87]通过该方法在 InAs 纳米线量子点上实现了自旋量子比特和谐振腔的耦合, 并演示了用微波谐振腔实现自旋相干操控的读出, 但是该方法依赖于量子点的自旋轨道耦合强度; 另外一种方法是引入小磁块, 2015 年, Kontos 组^[88]用这种方法在碳纳米管量子点上实现了自旋和光子的相干耦合, 其耦合强度达到 MHz 的量级, 可以用于自旋的读出和远距离耦合.

为了进一步实现可靠的远距离耦合, 实现腔和量子点的强耦合是必须实现的一步. 2016 年, Petta 组、Wallraff 组和 Kontos 组分别在硅锗量子点、砷化镓量子点和碳纳米管上实现了和腔的强耦合^[89~91], 为未来进一步实现远距离耦合铺平了道路. 如图 17, 三种实现强耦合的方法不尽相同, Petta 组^[92]通过高质量的硅锗异质结降低了电荷噪声, 提高了量子点的退相干时间, 并通过引入滤波器提高了谐振腔的品质因子, 因而实现了强耦合; 而 Wallraff 组利用 SQUID 阵列提高了谐振腔的阻抗, 从而实现了强耦合; Kontos 组也是通过提高量子点的退相干时间实现了强耦合. 未来可以预见, 结合这 3 种方式的优点, 我们可以实现稳定的量子比特的远距离耦合.

2.4.2 非谐振腔耦合

关于非谐振腔耦合, 主要有几种方案: (1) 表面声波辅助输运; (2) AB 干涉仪; (3) 共振隧穿耦合; (4) 超导媒介.

2011 年, 法国 Grenoble Alps University 的 Hermelin 等^[93]和英国 Cavendish Laboratory 的 McNeil 等^[94]分别提出了用表面声波辅助输运的方法输运单个电子, 该方法利用表面声波作为驱动力, 驱动单个电子在连接两个量子点的一维沟道中输运, 这种方法并不能保持电荷的相干性, 但是有望保持自旋的相干性.

2012 年, 日本理化研究所的 Tarucha 研究组^[95]通过双通道电子干涉 (AB 干涉仪) 的方法, 获得了操作速率达到 100 GHz、相干长度达到 86 μm 的飞行量子比特. 这个飞行量子比特的两个态是通过传输的电子占据双通道中的不同通道来定义的, 这种方式直接传输了量子比特.

图 17 (网络版彩图) 几种实现腔和量子点强耦合的装置图

Figure 17 (Color online) Schematics of different devices by (a) Kontos's group (modified from [89]), (b) Petta's group (modified from [90]) and (c) Wallraff's group (modified from [91]) for realizing the strong coupling between the quantum dot and cavity

2013 年, 荷兰 Delft University of Technology 的 Vandersypen 组^[41] 通过在一个三量子点一维阵列中中间的量子点实现虚占据 —— 即两边的量子点通过中间的量子点实现共隧穿耦合 —— 演示了长距离的相干耦合, 而不再需要连续的邻近耦合操作. 2016 年, 他们通过这种方法获得了超交换相互作用, 首次实现了两个远距离自旋状态的耦合^[43].

2015 年, 德国 RWTH Aachen University Bluhm 研究组^[96] 提出通过超导耦合器来耦合两个自旋量子比特. 如图 18(d), 两个量子点通过隧穿耦合与超导薄膜耦合起来, 左边量子点中的电子隧穿到超导薄膜中, 在超导能隙上以准粒子的形式传播, 然后到达右边的量子点, 使得右边量子点中占据了两个电子.

非谐振腔耦合与谐振腔耦合相比, 实现难度小, 已经实现了远距离自旋状态的耦合, 应用前景可观. 以 Vandersypen 组超交换相互作用为例, 基于这种方法甚至可以简化容错量子计算的算法, 提高器件的灵活性, 加快量子计算机的运算速度, 期待未来在这一方向的进一步进展.

3 总结与展望

从 1998 年 Loss 和 DiVincenzo 提出可以用量子点中电子的自旋作为量子比特实现量子计算, 到现在为止已经接近 20 年. 这 20 年间, 半导体量子点量子计算经历了从砷化镓异质结到硅锗异质结再到硅 MOS 和从单比特的操控到两比特逻辑门的演示再到量子比特的长程耦合的飞速的发展, 但是要

图 18 (网络版彩图) 实现长距离耦合的不同方法

Figure 18 (Color online) Schematics of various methods for long distance coupling. (a) The quantum dots are connected by a $4\ \mu\text{m}$ channel and electrons are transported by utilizing surface acoustic waves (modified from [94]); (b) the quantum dots are separated by $6\ \mu\text{m}$, and the coupling is realized by an Aharonov-Bohm ring connected to two-channel wires (modified from [95]); (c) the long distance coupling is realized by virtual occupation of discrete states of quantum dots located between the distant dots (modified from [41, 43]); (d) two semiconducting quantum dots are tunnel coupled to a two-dimensional superconducting film (modified from [96])

真正有效地开展量子信息处理, 仍然有很多关键性科学问题需要解决。

针对上述文中提到的单量子比特和两量子比特的逻辑门操控、延长退相干时间和提高操控速度以及实现少数量子比特的扩展和长程耦合等原理性研究, 其发展所面临的一些不足之处和需要进一步改进的问题如下:

(1) 仍然没有实现达到容错量子计算要求的高保真度两比特量子逻辑门. 这一问题的主要原因是读出方式的保真度不够高, 在澳大利亚的两比特逻辑门中, 其对两比特读出的保真度只有约 50%, 而且结构较复杂. 未来可以通过改用自旋阻塞效应读出信号, 并利用射频方法提高信号的读取速度 [97~99].

(2) 操控方式和布线仍然复杂. 无论是电子自旋共振还是电子偶极自旋共振, 都需要引入外部的传输线或者磁块. 全电操控的方式如空穴自旋量子比特和交换量子比特, 这种方法更加容易拓展、操控速度更快、退相干时间更长, 未来在这一领域可以得到更加有突破性的成果 [100].

(3) 自旋比特之间的长程耦合还没有实现. 这一问题在近期也取得了突破性进展, 特别是已经实现了腔和量子点的强耦合. 而且, 如果考虑电荷量子比特, 那么和腔的耦合可能会提高电荷量子比特的保真度 [90], 有可能更先一步实现容错量子计算.

总的来说, 由于半导体量子点体系本身与周围的环境有相互作用 (如环境中的光子、声子、核自旋等), 使得基于半导体量子点的电荷和自旋量子比特的量子退相干时间仍然不够长, 如何长时间保持和操控量子相干态是量子计算研究的重要挑战. 下一步的核心研究任务是提高量子退相干时间与量子比特操控周期的比值. 在研究过程中的解决方案是, 一方面可以通过延长量子比特的系统退相干时间, 在同样的门操作周期下完成更多的量子比特操控次数, 另一方面可以加快量子比特操控速度, 减少量子比特的操控时间, 在同样的量子退相干时间内进行更多的量子门操控. 由于现有半导体材料生长工艺针对于量子比特器件研究来说还不够完美, 离理论的预期还比较远, 材料性能的不完美极大地降低

了量子比特的退相干时间, 相信随着工艺技术的进步和经过未来科学家的努力, 会获得满足长相干快操控兼备的能够满足容错量子计算的量子比特材料体系, 进而实现半导体量子计算机原型机的研制.

目前, 国际上具有重要影响力的发达国家, 都在量子芯片研究中投入了大量的人力、物力和财力, 比如文章中提到的美国 Hughes Research Laboratories、英国 Cavendish Laboratory、日本 Institute of Physical and Chemical Research、澳大利亚 Center for Quantum Computation and Communication Technology 等等. 近年来, 美国、日本、荷兰、德国、澳大利亚、加拿大等西方重要发达国家也都已经设立了国家级的量子计算研究计划, 同时也取得了非常重要的研究进展. 除了实验室的研究之外, 很多企业也参与到了量子计算机的研制过程中, 如美国的 IBM, Intel 和 Google, 近期美国 Google 公司提出了量子霸权计划, 指出在实现容错量子计算之前可以首先实现量子计算机对经典计算机的超越, 这一超越只需要 50 个量子比特, 因而有望在短期内实现. 这一超越使得量子计算可以辅助现有的经典计算机进行数据的优化处理, 将对互联网、生物制药、金融、机器制造等行业产生广泛而深刻的影响. 近几年来我国开始重视和大力发展基于固态量子比特的量子计算研究, 有望加速我国量子计算方面的基础研究和推动量子计算机研究的实用化进程.

参考文献

- 1 Loss D, DiVincenzo D P. Quantum computation with quantum dots. *Phys Rev A*, 1998, 57: 120–126
- 2 DiVincenzo D P. The physical implementation of quantum computation. *Fortschritte Der Physik*, 2000, 48: 771–783
- 3 Raussendorf R, Harrington J. Fault-tolerant quantum computation with high threshold in two dimensions. *Phys Rev Lett*, 2007, 98: 190504
- 4 Fowler A G, Mariantoni M, Martinis J M, et al. Surface codes: towards practical large-scale quantum computation. *Phys Rev A*, 2012, 86: 032324
- 5 Eriksson M A, Coppersmith S N, Lagally M G. Semiconductor quantum dot qubits. *MRS Bull*, 2013, 38: 794–801
- 6 Veldhorst M, Hwang J C C, Yang C H, et al. An addressable quantum dot qubit with fault-tolerant control-fidelity. *Nat Nanotechnol*, 2014, 9: 981–985
- 7 Hill C D, Peretz E, Hile S J, et al. A surface code quantum computer in silicon. *Sci Adv*, 2015, 1: e1500707
- 8 Kawakami E, Jullien T, Scarlino P, et al. Gate fidelity and coherence of an electron spin in an Si/SiGe quantum dot with micromagnet. *Proc Natl Acad Sci USA*, 2016, 113: 11738–11743
- 9 Takeda K, Kamioka J, Otsuka T, et al. A fault-tolerant addressable spin qubit in a natural silicon quantum dot. *Sci Adv*, 2016, 2: e1600694
- 10 Pica G, Lovett B W, Bhatt R N, et al. Surface code architecture for donors and dots in silicon with imprecise and non-uniform qubit couplings. *Phys Rev B*, 2016, 93: 035306
- 11 Veldhorst M, Eenink H G J, Yang C H, et al. Silicon CMOS architecture for a spin-based quantum computer. *arXiv:1609.09700*
- 12 Elzerman J M, Hanson R, Beveren L H W V, et al. Semiconductor few-electron quantum dots as spin qubits. In: *Quantum Dots: a Doorway to Nanoscale Physics*. Berlin: Springer, 2005. 289–331
- 13 Hanson R, Kouwenhoven L P, Petta J R, et al. Spins in few-electron quantum dots. *Rev Mod Phys*, 2007, 79: 1217–1265
- 14 Eriksson M A, Friesen M, Coppersmith S N, et al. Spin-based quantum dot quantum computing in silicon. *Quantum Inf Process*, 2004, 3: 133–146
- 15 Morton J J L, Mccamey D R, Eriksson M A, et al. Embracing the quantum limit in silicon computing. *Nature*, 2011, 479: 345–353
- 16 Zwanenburg F A, Dzurak A S, Morello A, et al. Silicon quantum electronics. *Rev Mod Phys*, 2013, 85: 961–1019
- 17 Schreiber L R, Bluhm H. Quantum computation: silicon comes back. *Nat Nanotechnol*, 2014, 9: 966–968
- 18 Nadjperge S, Frolov S M, Bakkers E P A M, et al. Spin-orbit qubit in a semiconductor nanowire. *Nature*, 2010, 468: 1084–1087
- 19 Jw V D B, Nadj-Perge S, Pribrig V S, et al. Fast spin-orbit qubit in an indium antimonide nanowire. *Phys Rev*

- Lett, 2013, 110: 066806
- 20 Brauns M, Ridderbos J, Li A, et al. Anisotropic Pauli spin blockade in hole quantum dots. *Phys Rev B*, 2016, 94: 041411
- 21 Li S X, Li Y, Gao F, et al. Measuring hole spin states of single quantum dot in germanium hut wire. *Appl Phys Lett*, 2017, 110: 133105
- 22 Jarillo-Herrero P, Sapmaz S, Dekker C, et al. Electron-hole symmetry in a semiconducting carbon nanotube quantum dot. *Nature*, 2004, 429: 389–392
- 23 Laird E A, Pei F, Kouwenhoven L P. A valley-spin qubit in a carbon nanotube. *Nat Nanotechnol*, 2013, 8: 565–568
- 24 Churchill H O, Kuemmeth F, Harlow J W, et al. Relaxation and dephasing in a two-electron ^{13}C nanotube double quantum dot. *Phys Rev Lett*, 2008, 102: 166802
- 25 Brunner D, Gerardot B D, Dalgarno P A, et al. A coherent single-hole spin in a semiconductor. *Science*, 2009, 325: 70–72
- 26 Kolodrubetz M H, Petta J R. Coherent holes in a semiconductor quantum dot. *Science*, 2009, 325: 42–43
- 27 Maurand R, Jehl X, Kotekarpatil D, et al. A CMOS silicon spin qubit. *Nat Commun*, 2016, 7: 13575
- 28 Cao G, Li H O, Tu T, et al. Ultrafast universal quantum control of a quantum-dot charge qubit using Landau-Zener-Stückelberg interference. *Nat Commun*, 2013, 4: 1401
- 29 Li H O, Cao G, Yu G D, et al. Conditional rotation of two strongly coupled semiconductor charge qubits. *Nat Commun*, 2015, 6: 7681
- 30 Kim D, Ward D R, Simmons C B, et al. Microwave-driven coherent operation of a semiconductor quantum dot charge qubit. *Nat Nanotechnol*, 2015, 10: 243–247
- 31 Ward D R, Kim D, Savage D E, et al. State-conditional coherent charge qubit oscillations in a Si/SiGe quadruple quantum dot. *arXiv:1604.07956*
- 32 Li H O, Cao G, Yu G D, et al. Controlled quantum operations of a semiconductor three-qubit system. *arXiv:1610.06704*
- 33 Kim D, Shi Z, Simmons C B, et al. Quantum control and process tomography of a semiconductor quantum dot hybrid qubit. *Nature*, 2014, 511: 70–74
- 34 Cao G, Li H O, Yu G D, et al. Tunable hybrid qubit in a GaAs double quantum dot. *Phys Rev Lett*, 2016, 116: 086801
- 35 Petta J R, Gossard A C, Taylor J M, et al. Coherent manipulation of coupled electron spins in semiconductor quantum dots. *Science*, 2005, 309: 2180–2184
- 36 Maune B M, Borselli M G, Huang B, et al. Coherent singlet-triplet oscillations in a silicon-based double quantum dot. *Nature*, 2012, 481: 344–347
- 37 Shulman M D, Dial O E, Harvey S P, et al. Demonstration of entanglement of electrostatically coupled singlet-triplet qubits. *Science*, 2012, 336: 202–205
- 38 Medford J, Beil J, Taylor J M, et al. Self-consistent measurement and state tomography of an exchange-only spin qubit. *Nat Nanotechnol*, 2013, 8: 654–659
- 39 Eng K, Ladd T D, Smith A, et al. Isotopically enhanced triple-quantum-dot qubit. *Sci Adv*, 2015, 1: e1500214
- 40 Delbecq M R, Bruhat L E, Viennot J J, et al. Photon-mediated interaction between distant quantum dot circuits. *Nat Commun*, 2013, 4: 1400
- 41 Braakman F R, Barthelémy P, Reichl C, et al. Long-distance coherent coupling in a quantum dot array. *Nat Nanotechnol*, 2013, 8: 432–437
- 42 Deng G W, Wei D, Li S X, et al. Coupling two distant double quantum dots with a microwave resonator. *Nano Lett*, 2015, 15: 6620–6625
- 43 Baart T A, Fujita T, Reichl C, et al. Coherent spin-exchange via a quantum mediator. *Nat Nanotechnol*, 2016, 12: 26–30
- 44 Elzerman J M, Hanson R, Greidanus J S, et al. Few-electron quantum dot circuit with integrated charge read out. *Phys Rev B*, 2003, 67: 161308
- 45 Elzerman J M, Hanson R, Lh W V B, et al. Single-shot read-out of an individual electron spin in a quantum dot. *Nature*, 2004, 430: 431–435
- 46 Koppens F H, Buizert C, Tielrooij K J, et al. Driven coherent oscillations of a single electron spin in a quantum dot.

- Nature, 2006, 442: 766–771
- 47 Nowack K C, Koppens F H L, Nazarov Y V, et al. Coherent control of a single spin with electric fields. *Science*, 2007, 318: 1430–1433
- 48 Pioro-Ladriere M, Obata T, Tokura Y, et al. Electrically driven single-electron spin resonance in a slanting Zeeman field. *Nat Phys*, 2008, 4: 776–779
- 49 Nowack K C, Shafiei M, Laforest M, et al. Single-shot correlations and two-qubit gate of solid-state spins. *Science*, 2011, 333: 1269–1272
- 50 Witzel W M, Carroll M S, Morello A, et al. Electron spin decoherence in isotope-enriched silicon. *Phys Rev Lett*, 2010, 105: 187602
- 51 Simmons C B, Thalakulam M, Shaji N, et al. Single-electron quantum dot in Si/SiGe with integrated charge-sensing. *Appl Phys Lett*, 2007, 91: 213103
- 52 Shaji N, Simmons C B, Thalakulam M, et al. Spin blockade and lifetime-enhanced transport in a few-electron Si/SiGe double quantum dot. *Nat Phys*, 2008, 4: 540–544
- 53 Wu X. Singlet-triplet electron spin qubit in Si/SiGe double quantum dot. Dissertation for Ph.D. Degree. Madison: University of Wisconsin-Madison, 2015. 14–15
- 54 Kawakami E, Scarlino P, Ward D R, et al. Electrical control of a long-lived spin qubit in a Si/SiGe quantum dot. *Nat Nanotechnol*, 2014, 9: 666–670
- 55 Lim W H, Zwanenburg F A, Huebl H, et al. Observation of the single-electron regime in a highly tunable silicon quantum dot. *Appl Phys Lett*, 2009, 95: 242102
- 56 Lai N S, Lim W H, Yang C H, et al. Pauli spin blockade in a highly tunable silicon double quantum dot. *Sci Rep*, 2011, 1: 110
- 57 Veldhorst M, Yang C H, Hwang J C C, et al. A two-qubit logic gate in silicon. *Nature*, 2015, 526: 410–414
- 58 Tracy L A, Hargett T W, Reno J L. Few-hole double quantum dot in an undoped GaAs/AlGaAs heterostructure. *Appl Phys Lett*, 2014, 104: 123101
- 59 Wang D Q, Klochan O, Hung J T, et al. Anisotropic Pauli spin blockade of holes in a GaAs double quantum dot. *Nano Lett*, 2016, 16: 7685–7689
- 60 Spruijtenburg P C, Ridderbos J, Mueller F, et al. Single-hole tunneling through a two-dimensional hole gas in intrinsic silicon. *Appl Phys Lett*, 2013, 102: 192105
- 61 Li R, Hudson F E, Dzurak A S, et al. Single hole transport in a silicon metal-oxide-semiconductor quantum dot. *Appl Phys Lett*, 2013, 103: 163508
- 62 Li R, Hudson F E, Dzurak A S, et al. Pauli spin blockade of heavy holes in a silicon double quantum dot. *Nano Lett*, 2015, 15: 7314–7318
- 63 Mueller F, Konstantaras G, Spruijtenburg P C, et al. Electron-hole confinement symmetry in silicon quantum dots. *Nano Lett*, 2015, 15: 5336–5341
- 64 Hayashi T, Fujisawa T, Cheong H D, et al. Coherent manipulation of electronic states in a double quantum dot. *Phys Rev Lett*, 2003, 91: 226804
- 65 Petta J R, Johnson A C, Marcus C M, et al. Manipulation of a single charge in a double quantum dot. *Phys Rev Lett*, 2004, 93: 186802
- 66 Petersson K D, Petta J R, Lu H, et al. Quantum coherence in a one-electron semiconductor charge qubit. *Phys Rev Lett*, 2010, 105: 246804
- 67 Petersson K D, Smith C G, Anderson D, et al. Microwave-driven transitions in two coupled semiconductor charge qubits. *Phys Rev Lett*, 2009, 103: 016805
- 68 Shinkai G, Hayashi T, Ota T, et al. Correlated coherent oscillations in coupled semiconductor charge qubits. *Phys Rev Lett*, 2009, 103: 056802
- 69 Shi Z, Simmons C B, Ward D R, et al. Coherent quantum oscillations and echo measurements of a Si charge qubit. *Phys Rev B*, 2013, 88: 4192–4198
- 70 Johnson A C, Petta J R, Marcus C M, et al. Singlet-triplet spin blockade and charge sensing in a few-electron double quantum dot. *Phys Rev B*, 2005, 72: 165308
- 71 Petta J R, Johnson A C, Yacoby A, et al. Pulsed-gate measurements of the singlet-triplet relaxation time in a two-electron double quantum dot. *Phys Rev B*, 2005, 72: 161301

- 72 Johnson A C, Petta J R, Taylor J M, et al. Triplet-singlet spin relaxation via nuclei in a double quantum dot. *Nature*, 2005, 435: 925–928
- 73 Koppens F H, Folk J A, Elzerman J M, et al. Control and detection of singlet-triplet mixing in a random nuclear field. *Science*, 2005, 309: 1346–1350
- 74 Foletti S, Bluhm H, Mahalu D, et al. Universal quantum control of two-electron spin quantum bits using dynamic nuclear polarization. *Nat Phys*, 2009, 5: 903–908
- 75 Borselli M G, Eng K, Croke E T, et al. Pauli spin blockade in undoped Si/SiGe two-electron double quantum dots. *Appl Phys Lett*, 2011, 99: 063109
- 76 Wu X, Ward D R, Prance J R, et al. Two-axis control of a singlet-triplet qubit with an integrated micromagnet. *Proc Natl Acad Sci USA*, 2014, 111: 11938–11942
- 77 Laird E A, Taylor J M, DiVincenzo D P, et al. Coherent spin manipulation in an exchange-only qubit. *Phys Rev B*, 2010, 82: 075403
- 78 Reed M D, Maune B M, Andrews R W, et al. Reduced sensitivity to charge noise in semiconductor spin qubits via symmetric operation. *Phys Rev Lett*, 2016, 116: 110402
- 79 Martins F, Malinowski F K, Nissen P D, et al. Noise suppression using symmetric exchange gates in spin qubits. *Phys Rev Lett*, 2016, 116: 116801
- 80 Shi Z, Simmons C B, Prance J R, et al. Fast hybrid silicon double-quantum-dot qubit. *Phys Rev Lett*, 2012, 108: 140503
- 81 Koh T S, Gamble J K, Friesen M, et al. Pulse-gated quantum-dot hybrid qubit. *Phys Rev Lett*, 2012, 109: 250503
- 82 Shi Z, Simmons C B, Ward D R, et al. Fast coherent manipulation of three-electron states in a double quantum dot. *Nat Commun*, 2014, 5: 3020
- 83 Thorgrimsson B, Kim D, Yang Y C, et al. Mitigating the effects of charge noise and improving the coherence of a quantum dot hybrid qubit. *arXiv:1611.04945*
- 84 Viennot J J, Delbecq M R, Bruhat L E, et al. Towards hybrid circuit quantum electrodynamics with quantum dots. *Comptes Rendus Phys*, 2016, 17: 705–717
- 85 Frey T, Leek P J, Beck M, et al. Dipole coupling of a double quantum dot to a microwave resonator. *Phys Rev Lett*, 2012, 108: 046807
- 86 Deng G W, Wei D, Johansson J R, et al. Charge number dependence of the dephasing rates of a graphene double quantum dot in a circuit QED architecture. *Phys Rev Lett*, 2015, 115: 126804
- 87 Petersson K D, McFaul L W, Schroer M D, et al. Circuit quantum electrodynamics with a spin qubit. *Nature*, 2012, 490: 380–383
- 88 Viennot J, Dartiailh M, Cottet A, et al. Coherent coupling of a single spin to microwave cavity photons. *Science*, 2015, 349: 408–411
- 89 Mi X, Cady J V, Zajac D M, et al. Strong coupling of a single electron in silicon to a microwave photon. *Science*, 2017, 355: 156–158
- 90 Stockklauser A, Scarlino P, Koski J, et al. Strong coupling cavity QED with gate-defined double quantum dots enabled by a high impedance resonator. *Phys Rev X*, 2017, 7: 011030
- 91 Bruhat L E, Cubaynes T, Viennot J J, et al. Strong coupling between an electron in a quantum dot circuit and a photon in a cavity. *arXiv:1612.05214*
- 92 Mi X, Cady J V, Zajac D M, et al. Circuit quantum electrodynamics architecture for gate-defined quantum dots in silicon. *Appl Phys Lett*, 2017, 110: 043502
- 93 Hermelin S, Takada S, Yamamoto M, et al. Electrons surfing on a sound wave as a platform for quantum optics with flying electrons. *Nature*, 2011, 477: 435–438
- 94 McNeil R P G, Kataoka M, Ford C J B, et al. On-demand single-electron transfer between distant quantum dots. *Nature*, 2011, 477: 439–442
- 95 Yamamoto M, Takada S, Bäuerle C, et al. Electrical control of a solid-state flying qubit. *Nat Nanotechnol*, 2012, 7: 247–515
- 96 Hassler F, Catelani G, Bluhm H. Exchange-interaction of two spin qubits mediated by a superconductor. *Phys Rev B*, 2015, 92: 235401
- 97 Barthel C, Reilly D J, Marcus C M, et al. Rapid single-shot measurement of a singlet-triplet qubit. *Phys Rev Lett*,

- 2009, 103: 160503
- 98 Hornibrook J M, Colless J I, Mahoney A C, et al. Frequency multiplexing for readout of spin qubits. *Appl Phys Lett*, 2014, 104: 1217
- 99 Gonzalezzalba M F, Barraud S, Ferguson A J, et al. Probing the limits of gate-based charge sensing. *Nat Commun*, 2015, 6: 6084
- 100 Russ M, Burkard G. Three-electron spin qubits. *arXiv:1611.09106*

Quantum computation based on semiconductor quantum dots

Xin ZHANG, Hai-Ou LI*, Ke WANG, Gang CAO & Guo-Ping GUO*

Key Laboratory of Quantum Information, Chinese Academy of Sciences, University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China

* Corresponding author. E-mail: haiouli@ustc.edu.cn, gpguo@ustc.edu.cn

Abstract Quantum computing is the outcome of the size of semiconductor chips breaking the limits of classical physics, and is a landmark technology in the post-Moore's law era. Making use of the quantum properties of electrons in semiconductor quantum dots is believed to be one of the most promising candidates for the realization of quantum computing. In recent years, a series of breakthroughs have been made, including the preparation and readout of qubits, and the manipulation of quantum logic gates. This paper first introduces the background and significance of research on semiconductor quantum dot-based quantum computing and then provides an overview of the developments regarding spin-, charge-, and few-electron-based qubits, as well as the long distance coherent coupling of qubits. Finally, we discuss future trends in semiconductor-based quantum computing.

Keywords quantum computing, semiconductor quantum dot, qubits, quantum logic gates, long distance coupling

Xin ZHANG was born in 1993. He received his B.S. degree from Zhejiang University, Hangzhou, China, in 2016. He is currently a Ph.D. student at the University of Science and Technology of China. He is conducting research on quantum computing based on silicon quantum dots.

dots.

Hai-Ou LI was born in 1985. He received his Ph.D. degree in physics from the University of Science and Technology of China in 2012. He is currently an associate professor at the Key Laboratory of Quantum Information at the Chinese Academy of Sciences of the University of Science and Technology of China. He is a young researcher focusing on experimental quantum computation based on semiconductor quantum

Ke WANG was born in 1991. He will receive his Ph.D. degree in physics from the University of Science and Technology of China, Hefei, in 2019. His research interests include hole transport and spin manipulation in GaAs semiconductor quantum dots.

Guo-Ping GUO was born in 1977. He received his Ph.D. degree in physics from the University of Science and Technology of China in 2005. He is currently a professor and the deputy laboratory director at the Key Laboratory of Quantum Information at the Chinese Academy of Sciences, University of Science and Technology of China. His research interests include spin and charge qubits for quantum computing and circuit quantum electrodynamics with semiconductor quantum dots and superconducting resonators.