

量子计算机的发展现状与趋势

郭光灿 周正威 郭国平 涂 涛

(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)

摘要 量子计算机是一种新型的运算工具,它具有强大的并行处理数据的能力,可解决现有计算机难以运算的数学问题,因此,它成为世界各国战略竞争的焦点。本文综述了量子计算机目前的发展状况和可扩展、可容错的量子计算机物理体系的实验研究进展,并分析了美国最近启动研制量子芯片的微型曼哈顿计划对我国构成的严峻挑战。

关键词 量子信息,量子计算机,量子芯片,微型曼哈顿计划

DOI:10.3969/j.issn.1000-3045.2010.05.006



郭光灿院士

1 量子计算机的研究概况

量子信息科学是利用量子体系的独特性质对计算、编码、信息处理和传输过程给予新的诠释,开发新的、更为高效的信息处理

功能的一门学科,它是现代科学技术发展的必然结果。量子信息科学的研究为物理学、信息科学、材料科学乃至整个科学注入了新的生命力,同时对推动相关高新技术的发展以及人类社会的进步具有深远的意义。

量子信息科学的核心目标是实现真正意义上的量子计算机和实现绝对安全的、可实用化的长程量子通信。目前,量子密码技

术正从实验室研究走向实际应用,研究实用系统的安全性以及提高实用性能成为该方向的主要课题;量子计算机的研究尚在起步阶段,但它以其独特的魅力正吸引着越来越多的科学家和工程技术人员加入这个研究阵营。

量子计算机与现有的电子计算机以及正在研究的光计算机、生物计算机等的根本区别在于,其信息单元不是比特(bit,两个状态分别用 0 或 1 表示),而是量子比特(qubit),即两个状态是 0 和 1 的相应量子态叠加,因此单个量子 CPU 具有强大的平行处理数据的能力,而且,其运算能力随量子处理器数目的增加呈指数增强。这将为人类处理海量数据提供无比强大的运算工具。作为一个应用例子,Shor 业已证明,运用量子并行算法可以轻而易举地攻破现在广泛使用的 RSA 公钥体系。

1985 年,英国牛津大学的 Deutsch 建立

* 收稿日期:2010 年 8 月 15 日

了量子图灵机的模型。随后,他把建立一个普适量子计算机的任务转化为建立由量子逻辑门所构成的逻辑网络。1995年,人们发现量子计算机的逻辑网络可以由结构更为简单的逻辑门集构成,即采用单量子比特的任意旋转和双量子比特的受控非门,就可以搭建任意的量子电路。这就是所谓的量子计算机标准模型。

如果要在真实的物理体系中实现量子计算的功能,该物理体系必须满足所谓的 Divincenzo。鉴于很难找到某个物理系统能同时满足这个判据,科学家提出若干个替代标准模型的量子计算方案。

1.1 拓扑量子计算

该方案最初由数学物理学家 Kitaev 于 1997 年提出。他利用特殊系统不受小扰动影响的拓扑量子性质来构造量子计算机,从而可以实现容错的量子计算。目前,这一领域在国际学术界得到很大的重视,哈佛大学、哥伦比亚大学、芝加哥大学、加州理工学院等一流学校已开始了理论和实验方面的研究。

二维空间系统存在具有分数统计的准粒子,被称为任意子,任意子的统计包含阿贝尔和非阿贝尔两种,非阿贝尔任意子的拓扑性质能够用来做拓扑量子计算。用于做拓扑量子计算的任意子具有以下特点:

(1) 有一系列不同类型的准粒子,用于信息的初始化。

(2) 任意子的交换和旋转满足群论中的辫群规则,可以实现拓扑量子门,用来处理信息。

(3) 拓扑量子计算中信息编码是非局域的,基本上不受周围环境的影响,因此错误率很低,具有自动容错的功能。

(4) 满足干涉测量中的 Bunching 规则,可用于信息读取。

目前的研究表明,二维系统的非阿贝尔统计的任意子态最有可能在填充因子为 $5/2$ 的分数量子霍尔效应中实现。2009年,美国哈佛大学和以色列 Weizmann 研究所同时报道在实验上证实了这类态的存在,并在此态上构建了基本的量子位。

1.2 单向量子计算

单向量子计算是 R. Raussendorf 和 H. Briegel 在 2000 年提出的一种新的途径。其思想是利用量子纠缠态以及局域操作和经典通信过程,可以传递非局域的相互作用,从而等价地实现非局域哈密顿量的功能。因此,可建立一种高度纠缠的状态(至少是二维的),称为图态,只需要通过对相邻的几个量子比特进行 LOCC 过程,测量结束之后,可以等效地实现对出发端的量子比特的普适逻辑门操作。这样一来,图态就像是一个面包板,我们将有待实施的量子电路设计出来,将每个原件插上去就可以实现相应的量子操作。显然,量子计算标准模型的难度在这里就转化为如何高效而精确地实现一个超大量子比特数目的图态上。

1.3 绝热量子计算

绝热量子计算最先是由 MIT 的 Golbstone 等人提出,其核心思想是通过绝热演化的特性来等效地实现量子么正变换。我们知道,在绝对零度时,如果系统的初态处于基态,那么绝热地变换系统哈密顿量的参数,只要不出现基态和激发态的能级交叉,原则上体系始终处于基态。然而,系统演化前后的基态之间必然有一个么正变换联系。如果这个么正变换恰恰就是我们所需要的么正变换,那么量子计算也就可以通过这个绝热过程完成。

该方案的优点在于,在理想情况下,系统始终处于基态,从而不存在退相干问题;其缺点是绝热的条件依赖于基态和第一激



中国科学院

发态的能隙,能隙越小,所需要的绝热演化的时间就越长,如果随计算量的变大,绝热演化时间指数相应地变长,那么就失去了量子计算的意义。

近十多年来,著名刊物 *Nature* 和 *Science* 平均每个月发表一篇量子计算机研究的论文,但至今量子计算仍然未有突破性的进展。在少数量子比特的物理系统中,人们成功地演示了量子计算的原理、逻辑门操作、量子编码和量子算法等,证实量子计算的实现不存在原则性困难。但真正要研制出量子计算机,存在两大主要障碍,其一是物理可扩展性问题,即如何实现成千上万个量子比特,并能有效地进行相干操控;其二是容错计算问题,即量子操作的出错率如何能减少到低于阈值,确保计算结果的可靠性。

当前,人们一方面寻找可扩展可容错的量子计算体系,另一方面着手研究技术难度较低的量子仿真。

量子仿真的目的就是发展出一套多体系统相干操控的手段,通过实验直接操控、观测人工多体系统的

演化行为,为强关联物理学等提供

完美的检测场所。量子仿真的研究很可能带来全新的科学发现(如新物质态的发现)。

2 具有可集成性的量子计算体系的实验进展

目前,国际学术界主流较为认可的量子计算物理体系是:量子点、超导、腔电动力学、离子或原子体系。

2.1 量子点体系

半导体量子点借鉴成熟的微加工方法,

在半导体二维电子气上制备成单电子晶体管,其电子服从量子力学规律,可以将电子自旋的向上和向下作为量子信息单元 1 和 0。这种利用半导体器件上的电子自旋进行量子信息处理的量子点体系被认为是最有希望成为未来量子计算机的方向之一。

从 1998 年 D. Loss 和 D. P. Divincenzo 提出利用量子点中的电子自旋作固态量子计算开始,国际上多个著名研究机构在半导体量子点作为未来可扩展的量子计算器件的实验研究中取得一系列重大进展。半导体量子点作为量子芯片应具备的基本条件:量子比特的制备、量子逻辑门操作、量子测量和量子相干性。这些基本条件在实验中都已成功实现。著名量子信息专家、美国 IBM 公司资深研究员 D. P. Divincenzo 在 *Science* 杂志专门发表评论,认为半导体量子点作为未来量子计算的元器件——量子芯片是一条真实可行的路(图 1)。

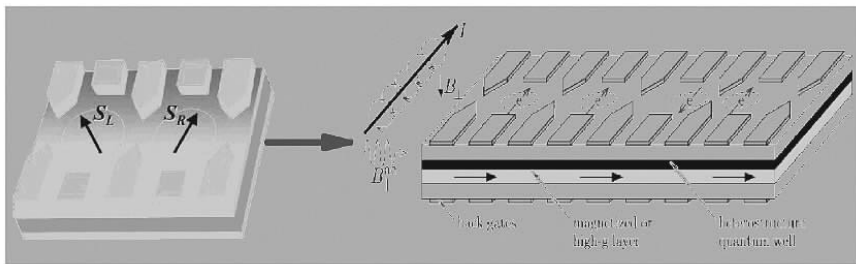


图 1 两个自旋量子比特到量子芯片的示意图

尽管利用半导体量子点和自旋进行量子信息处理已获得许多令人瞩目的进展,但是要成为真正实用的量子芯片还有很多困难需要解决。量子芯片本质上利用了量子相干性,而半导体量子点体系受周边环境的影响比较严重,控制和维持其量子相干状态遇到了更大的挑战。

2.2 超导量子电路

超导量子计算的核心单元是一种被称为 Josephson 结的电子器件。按照表征量子

比特的不同, Josephson 量子电路大致可划分为电荷、磁通和相位 3 大类型。与原子和光子之类的天然量子体系相比, Josephson 量子电路这种人工量子体系具有以下特点:

(1) Josephson 量子电路中的能级结构可以通过对电路的设计来制定,也可以通过外加的电磁信号进行调控。

(2) 基于现有的微电子制造工艺, Josephson 量子电路具有良好的可扩展性,这种可扩展性既包括 Josephson 量子电路之间的级联,也包括 Josephson 量子电路与其他量子体系之间的耦合。

量子信息领域内的多数学者认为,这些优点使得超导量子电路是最具潜力、也最有可能率先实现有实用价值的大规模量子信息处理器的物理方案之一。目前,单量子比特逻辑门操作已在不同种类的 Josephson 器件上实现,而双量子比特逻辑门也陆续在不同的超导量子电路中完成。最近,人们在超导传输线腔、SQUID 谐振子和纳米机械谐振子等介观谐振子器件方面取得了很有意义的进展。由于这些介观谐振子体系的本征频率都在 GHz 范围,与超导量子比特在同一量级,因此,将不同类型的超导量子电路和各种谐振子器件耦合,以实现量子逻辑门或模拟各种量子光学现象得到了相当的关注(图 2,图 3)。

超导量子计算虽然是现今各种量子计算方案中发展最快、可集成电路性最好、潜力最大的方案之一,但是即便如此,现今超导量子计算仍然还处在摇篮阶段,人们最多

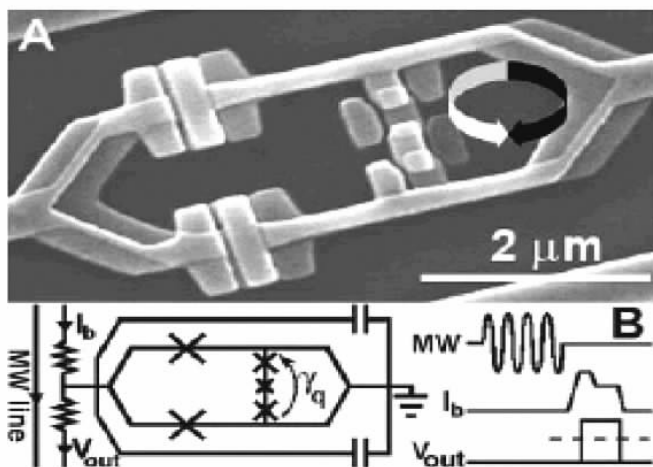


图 2 持久电流的超导量子比特

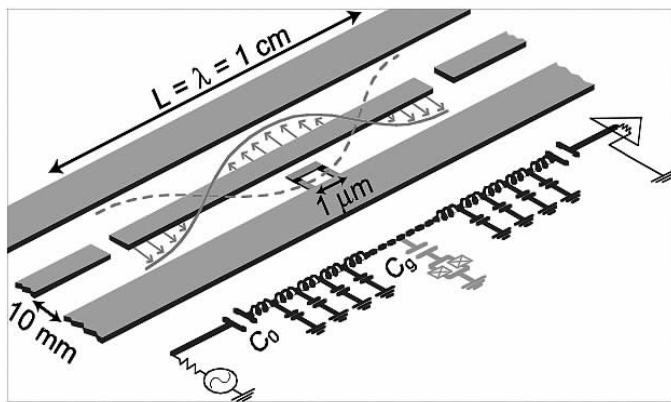


图 3 超导电荷量子比特与平板传输线腔之间耦合的示意图

能够实现的只有 1—4 个量子比特的耦合,而今各种 Josephson 量子电路的消相干时间处在各自的单量子比特操作时间的 10^2 — 10^3 ,距离实现量子纠错编码所需要的 10^4 次单量子比特操作的阈值仍有较大差距。未来的超导量子计算发展必须要解决两个重要问题,其一是延长量子比特的相干时间;其二是改进量子比特之间的耦合方式。

2.3 离子阱体系

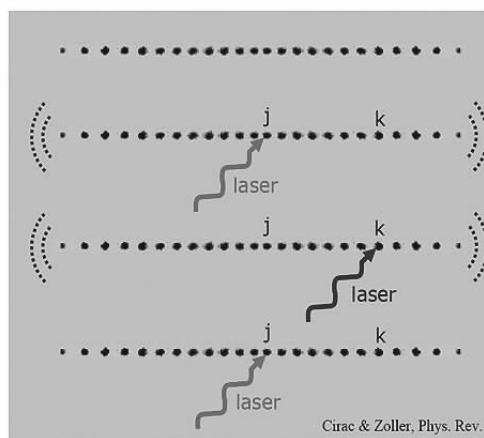
离子阱体系是最早尝试实现量子计算的物理体系。该体系实现量子计算的理论方案最早由 Cirac 和 Zoller 于 1994 年提出,同年,美国国家标准技术局(NIST)的实验组开始了该方向的实验研究。该系统在单、双量子比特的实验进展方面达到了非常高的水



中国科学院

平。目前,主要研究集中在提高量子操控的单元技术,以达到容错量子计算的要求;以及如何扩展该体系,实现多位的量子信息过程两个方面。

离子间的库仑斥力和轴向的谐振子势,使得 N 个离子在轴向形成 N 个振动(声子)模式,这些振动模式成为传导离子内态之间相互作用的“信使”。通过声子—激光—离子三者的作用可实现量子信息的初态制备、操控和读取(图 4)。



N 个离子沿线性阱轴向排布
图 4 离子阱量子操作示意图

目前,科学家已制备出 8 个离子的 W 态,保真度达 72%,制备了 6 个离子的薛定谔猫态,保真度超过 50.9%。为解决离子阱体系的物理可扩展性问题,人们已提出若干有效方案,图 5 是美国 Monroe 组的 T 型分区离子阱示意图。据悉,美国已启动研制 50—80 量子比特的离子阱量子计算的计划,期待有重大突破。

2.4 腔量子电动力学(QED)体系

这种类型的量子计算是基于腔模和偶极子之间的强耦合,有效地提供了光子与两

能级量子体系(原子、量子点等)之间的相互作用,实现两个量子比特的可控操作。这种方案的优势之一是原子作为静止量子比特,适用于存储信息,而光子作为飞行量子比特,适合于传递和交换信息。而且,量子光学理论能够精确处理腔量子电动力学的问题。

然而,从量子计算的可扩展性出发,现在的传统光学腔也面临很多困难,比如其品质因数很难进一步提高,扩展多个比特需要更多的光腔,使体系变得很复杂,也无法做到集成。为此,国际上很多著名的研究小组开始将目光转移到寻找新的光学微型腔体系(如图 6)。现在研究最为热门的光学微腔主要有回音壁模式微腔和光子晶体缺陷微腔。以回音壁模式微腔为例,这种腔具有极高的品质因数和较小的模式体积,可以提供更强的原子光场相干强度。此外回音壁模式的微腔加工工艺是基于传统的半导体刻蚀技术,很容易集成。目前,利用回音壁模式微腔进行量子电动力学和量子信息的研究已经成为国际上研究的一个热点。

光学微腔和光学 F-P 腔一样,首先要实现的是单个原子和腔模的强耦合,这涉及到如何将单个粒子放入腔中和调谐腔模如何与粒子共振这两个技术。迄今这两个技术尚未获得完满解决。

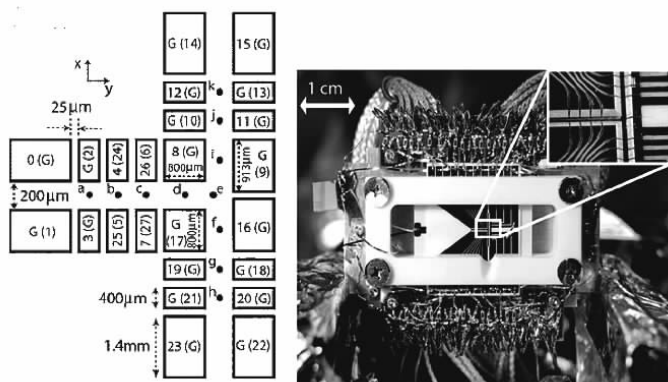


图 5 Monroe 组的 T 型分区离子阱的示意图。
左图为俯视的结构图,右图为实物图的照片



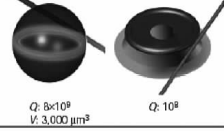

	Fabry-Pérot	Whispering gallery	Photonic crystal
High Q	 Q: 2,000 V: 5 (fJ/m³)	 Q: 12,000 V: 6 (fJ/m³) Q _{avg} : 7,000 Q _{avg} : 1.3x10 ⁵	 Q: 13,000 V: 1.2 (fJ/m³)
Ultra-high Q	 F: 4.8x10 ⁶ V: 1,690 μm³	 Q: 8x10 ⁸ V: 3,000 μm³	 Q: 10 ⁸

图6 目前常见的几种微腔的比较

目前,光学微腔的飞速发展以及微腔与量子点的结合,有可能在一块硅芯片上集成固态微腔阵列,其中每个微腔里面都有与微腔强耦合的原子(量子点等其他粒子)作为量子比特,而由光波导中传输的光子构成了系统的总线(如图7)。

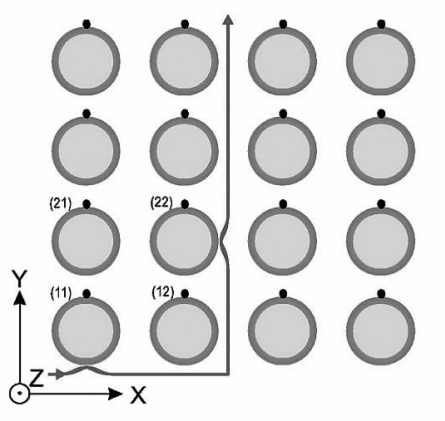


图7 基于回音壁模式微腔芯片的可扩展量子计算设想

3 “微型曼哈顿计划”的挑战

近几年,美国启动了一个研究量子芯片的计划。该计划势必加快量子计算机的研究进程,并将触动国际上新一轮的激烈竞争。半导体芯片几十年来一直沿着摩尔定律发展,而单位芯片上晶体管数目越来越多,而每个晶体管的尺寸越来越小,目前已经小到如图8所示的一个流感病毒的大小!

同时,每个晶体管电子数目越来越少,量子效应越来越明显,按照传统模式,人们将到达控制电子的物理极限!当每个晶体管缩小到只容纳一个电子,即单电子晶体管

(量子点)(图9),其中的电子必然满足量子力学的物理规律,因此芯片的可持续发展必然依赖于新一代基于量子力学的计算芯片!

量子计算是芯片突破现有半导体微电子技术物理极限的必然产物,将成为后摩尔时代具有标志性的新技术和未来信息的战略制高点。美国前总统布什于2006年1月31日的国情咨文中宣布了“美国竞争力计划”,在这项富有进取心的长期举措中,第四条为“突破技术障碍,实现量子信息处理技术的实际应用”。2009年,由美国总统科技顾问牵头的美国科学技术委员会发布了关于量子信息科学的联邦报告,呼吁国家安全局、DARPA、NSF、NIST、Los Alamos 和 Sandia 国家实验室等多个军事机构一起协调开展量子计算的研究。

基于量子芯片在下一代产业和国家安全等方面的重要性,美国 DARPA 负责人 Tether 博士在向美国众议院军事委员会做报告时,将半导体量子芯片科技列为未来9大战略研究计划的第二位,并仿照当年曼哈顿工程制造原子弹的成功先例,投巨资启动“mini- Manhattan project”(微型曼哈顿计划),集中了包括 Intel、IBM 公司等半导体界巨头以及哈佛大学、普林斯顿大学、Sandia 国家实验室等著名研究机构,在国家层面上组织各部门跨学科统筹攻关,以期占领未来量子计算技术的战略制高点。众所周知, DARPA 常常提出意义十分重大,但富有风险性和挑战性的项目。这些看似不可能的计划,一旦突破将产生巨大的效果,大大增强美国的战略竞争能力,例如因特网、卫星定位系统、隐形飞机等就是其成功的例子。现在他们将目光聚焦到量子芯片的研制上,期待在量子计算技术的战略竞争中抢占制高点。

日本和欧共体在美国微型曼哈顿计划的刺激下也紧跟其后启动类似计划,引发了

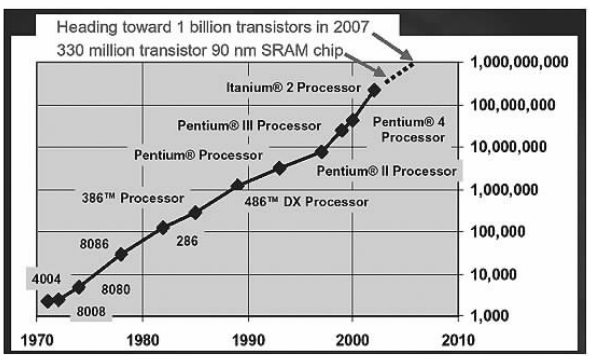


图 8 流感病毒和晶体管的尺寸比较

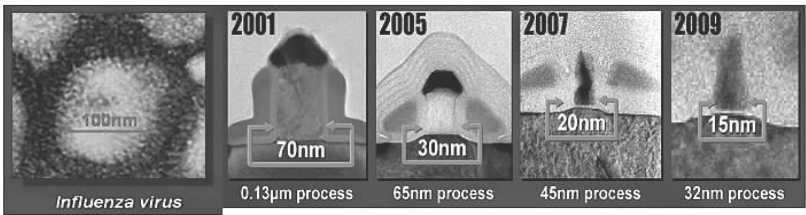


图 9 单电子晶体管

新一轮关于量子计算技术的国际竞争。

虽然中国是世界上电子计算机生产制

造大国,也涌现了像神威、银河、曙光这样的超级计算机,但纵观我国的微电子发展状况,国产半导体芯片无论在性能上,还是数量、品种上都远远不能满足需要,计算机芯片依然主要依赖进口。据 2008 年统计(表 1、表 2),我国半导体芯片进口额已超过石油和农产品位列进口产品第一位!

新一轮国际战略竞争的焦点是

“量子芯片”,这是我国改变目前在微电子工业受制于人的被动局面的新机遇。我们不能再重蹈没有核“芯”技术的旧辙,应当

在起跑线上采取有力措施,参与这场关系到国家重大利益的激烈竞争。我国“中长期科技发展纲要”将“量

表 1 2009 中国高性能计算机前十

排名	厂商	安装地点	应用领域	型号 / 运算核心	处理器核	浮点数 (Gflops)	峰值浮点 数(Gflops)	效率
1	国防科大	国家超算天津中心	科学计算 / 工业	天河一号 /Intel Xeon E5540 2.53GHz	24 576	563 100	1 206 210	0.467
2	曙光	上海超级计算中心	科学计算 / 工业	曙光 5000A/AMD Barcelona 1.9GHz	30 720	180 600	233 472	0.774
3	联想	中科院超级计算中心	科学计算	深腾 7000/Intel Xeon E5450 3.0GHz	12 160	106 500	145 293	0.733
4	IBM	网络公司	工业 / 游戏	BladeCenter HS21 Cluster/ Intel Xeon E5540 2.53GHz	7 168	38 790	72 540	0.535
5	IBM	网络公司	工业 / 游戏	BladeCenter HS21 Cluster/ Intel Xeon E5540 2.53GHz	7 168	38 790	72 540	0.535
6	IBM	网络公司	工业 / 游戏	BladeCenter HS21 Cluster/ Intel Xeon E5540 2.53GHz	7 168	38 790	72 540	0.535
7	IBM	南京大学	科学计算 / 教育	BladeCenter HS21 Cluster/ Intel Xeon E5550 2.66GHz	3 200	31 310	34 048	0.920
8	曙光	计算物理国家重点实验室	科学计算	曙光 5000/ Intel Xeon E5450 3.0GHz	3 360	31 048	40 320	0.770
9	IBM	网络公司	工业 / 游戏	BladeCenter HS21 Cluster/ Intel Xeon E55402.53GHz	5 376	31 030	54 410	0.570
10	IBM	网络公司	工业 / 游戏	BladeCenter HS21 Cluster/ Intel Xeon E5540 2.53GHz	5 376	31 030	54 410	0.570

表 2 2008 年我国集成电路和部分产品的进口额比较

	集成电路	铁矿砂	石油(含原油、成品油)	农产品
进口额(亿美元)	1 193.8	258.4	706.3	412.6
集成电路为所列 产品进口额的倍数	-	4.6	1.7	2.9

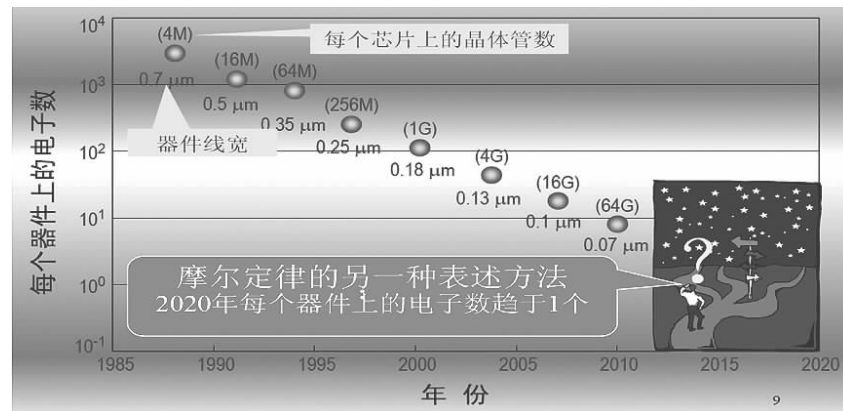


图 10 GeSi 双量子点

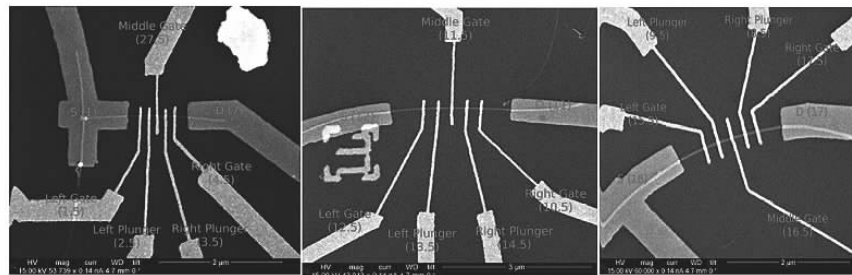


图 11 石墨烯双量子点

子调控”列入重大基础研究计划,这是富有前瞻性的战略布局。这个计划的实施有力推动了量子信息这个新兴高技术在我国的发展。近几年来,我国在量子密码技术、多光子纠缠等方面取得重要进展。图 10 和 11 是中国科技大学中科院量子信息实验室在新型材料 GeSi 和石墨烯上制备的双量子点,这是研制量子芯片的基础。

尽管不断地取得研究进展,但鉴于基础较弱,研究积累较薄,我国在国际主流方向上做出原创性的成果还很少,总体水平明显落后于西方强国,特别是在量子计算机这个学科主流方向上,差距正日益增大。当前美

国启动的“微型曼哈顿计划”对我国是个严峻挑战。因此,在保持“量子调控”重大专项的基础上,迫切需要另一个类似于“微型曼哈顿计划”,有一定冒险性的专项计划,组织国内精锐研究队伍,提供足够强大的支撑,加强相关的基础建设,实实在在去寻求突破,在下一代量子芯片的国际竞争中抢占战略制高点。

主要参考文献

- 1 周正威,涂涛,龚明等.量子计算的进展和展望.物理学进展,2009,29(3):127-165.
- 2 Kitaev A Y.Fault-tolerant quantum computation by anyons. Annals Phys,2003,303(1):2-30.

- 3 Raussendorf R, Briegel H J. A one-way quantum computer. *Phys Rev Lett*, 2001, 86(22): 5188-5191.
- 4 Farhi E, Goldstone J, Gutmann S et al. *arXiv:quant-ph/001106*.
- 5 Loss D, DiVincenzo D P. Quantum computation with quantum dots. *Phys Rev A*, 1998, 57(1): 120-126.
- 6 Makhlin Y, Shnirman A, Schon G. Quantum-state engineering with Josephson-junction devices. *Rev Mod Phys*, 2001, 73(2): 357-400.
- 7 Cirac J I, Zoller P. Quantum computations with cold trapped ions. *Phys Rev Lett*, 1995, 74(20): 4 091-4 094.
- 8 Sleator T, Weinfurter H. Realizable universal quantum logic gates. *Phys Rev Lett*, 1995, 74(20): 4 087-4 090.
- 9 Xiao Y F, Han Z F, Guo G C. Quantum computation without strict strong coupling on a silicon chip. *Phys Rev A*, 2006, 73(5): 052324(1-6).

Present Status and Trends of Development of Quantum Computers

Guo Guangcan Zhou Zhengwei Guo Guoping Tu Tao

(Key Laboratory of Quantum Information, University of Science and Technology of China, CAS 230026 Hefei)

Abstract Based on the peculiar quantum property, quantum computer provides the mankind with a new type of operational tool, which has a powerful capability for parallel processing of data to be able to allow it to tackle problems that are intractable on the existing computers. Therefore, it has become a focus of worldwide strategic competition. This paper gives an overview of the development status of quantum computer and the advances of the experimental researches in the physical system of extendable and fault-tolerant quantum computer. In particular, the paper analyzes the severe challenge presented to China by the recent starting of the development of mini-Manhattan Project on quantum chips supported by US Government and military funding agencies.

Keywords quantum information, quantum computer, quantum chip, mini-Manhattan Project

郭光灿 中国科学院院士, 发展中国家科学院院士, 中国科学技术大学教授。1942 年出生。研究方向: 量子光学, 量子信息。E-mail: gcguo@ustc.edu.cn