

# 量子计算的物理实现\*

薛飞<sup>†</sup> 杜江峰 周先意 韩荣典

(中国科学技术大学近代物理系 合肥 230026)

**摘要** 与经典计算相比,量子计算对信息的处理和计算有很大的优越性.在量子计算研究中,其物理实现方法的研究是一个重要部分.文章首先介绍了 DiVincenzo 关于量子计算的物理实现技术的 7 个判据,然后简要介绍了目前实现量子计算的 10 种物理实现方法,包括离子阱、中性原子、光学、超导约瑟夫森结、腔量子电动力学、液体核磁共振、Kane 的硅基半导体方案、富勒球、量子点和液氦表面电子,基本上涵盖了目前的量子计算物理实现的进展情况.

**关键词** 量子计算 物理实现

## Physical implementations of quantum computation

XUE Fei<sup>†</sup> DU Jiang-Feng ZHOU Xian-Yi HAN Rong-Dian

(Department of Modern Physics, University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China)

**Abstract** Compared with classical computation, quantum computation has great advantages, hence the importance of its experimental realization. In this paper seven DiVincenzo criteria are introduced, followed by a brief survey of various current physical implementations of quantum computation. These include: ion traps, neutral atoms, optical methods, Josephson junctions, cavity-QED, liquid nuclear magnetic resonance, Kane's Si-based methods, Fullerene balls, quantum dots, and electrons floating on the surface of liquid helium.

**Key words** quantum computation, physical implementation

## 1 引言

量子计算机是一类遵循量子力学规律进行存储、运算及读出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,它所进行的就是量子计算.量子信息采用量子比特(qubit)作为信息基本单元.量子比特在物理上可以用两态量子系统来实现,例如两种偏振态的光子(水平和垂直偏振).与经典比特不同,一个量子比特的状态可以处于逻辑态 0 和 1 的任意叠加状态.与经典计算类似,量子计算中也有通用量子逻辑门,通过通用量子逻辑门的组合能够完成任意复杂的量子运算.利用态叠加原理,量子计算机可以使非常多的计算同时进行,理论上它比任何现在的甚至将来

的经典计算机强大得多.例如对于大数的质因子分解,我们现在还找不到有效的经典算法,然而利用“量子并行性”我们可以设计出有效的量子算法解决这个问题.由于大数的质因子分解是目前广泛使用的保密通信的基础,这个结果极大地激发了量子计算的理论和实验实现研究.

建造量子计算机的困难在于要找到一个可以编码量子比特,并且能够有效地被外界控制,但又与环境有很好的隔离,不致使系统很快消相干失去量子特性的物理系统.在介绍量子计算的各种物理实现技术之前,下面先介绍一下 DiVincenzo 关于量子计

\* 国家自然科学基金(批准号:10075041,10075044)资助项目;国家重点基础研究发展计划(批准号:2001CB309300)资助项目  
2004-03-23 收到初稿 2004-06-09 修回

<sup>†</sup> 通讯联系人. E-mail: Feixue@ustc.edu

算的物理实现技术的 7 个判据<sup>[1]</sup>.

对于任何一种可行的量子计算实现技术,以下条件是必要的:

- (1)可扩展的具有良好特性的量子比特系统.
- (2)能够制备量子比特到某个基准态.
- (3)具有足够长的相干时间来完成量子逻辑门操作.
- (4)能够实现一套通用量子逻辑门操作.
- (5)能够测量量子比特.
- (6)能够使飞行量子比特和静止量子比特互相转化.
- (7)能够使飞行量子比特准确地在不同的地方之间传送.

虽然目前的科学和技术条件距离实现一个实用的量子计算机还有很大距离,但是已经有一些科学技术手段可以实现对几个量子比特的控制操作. 本文将简单介绍目前已经提出的各种量子计算的实现技术和方案,包括离子阱、中性原子、光学、超导约瑟夫森结、腔量子电动力学、液体核磁共振、Kane 的硅基半导体方案、富勒球、量子点和液氦表面电子,其中有些实现技术已经成功地实现了简单的量子算法.

## 2 量子计算的物理实现技术简介

### 2.1 离子阱

利用离子阱技术实现量子计算是 Cirac 和 Zoller 在 1995 年首次提出来的<sup>[2]</sup>. 离子阱技术本身的发展可以追溯到更早,1980 年科学家首次观测到了阱中的单个离子,1986 年做到了对离子不同塞曼能级的区分,即具备了制备一个量子比特的能力,1996 年利用拉比振荡(Rabi flops)实现了单个量子比特的控制,并进一步实现了对离子链中某个离子的选择性操作. 利用激光能够以接近于 1 的成功率测量离子的状态<sup>[3]</sup>. 2003 年,奥地利因斯布鲁克大学的 Blatt 研究小组利用离子阱技术成功地实现了 Cirac-Zoller 控制非门<sup>[4]</sup>,同一年同一研究小组利用离子阱技术第一次成功地演示了 Deutsch-Jozsa 算法<sup>[5]</sup>. 离子阱技术的优点是具有较长的相干时间(可达 10min),有较高的制备和读出量子比特的效率,目前已经有人提出建造大规模离子阱量子计算装置的设计方案<sup>[6]</sup>. 有待解决的问题是引起离子运动消相干的电场波动的来源目前并不十分清楚,能储存多条离子链的离子阱在实验上很难实现,离子的自发辐射会导致消相干,激光的相位和强度的波

动会影响对离子的操作,也会导致消相干. 量子信息和量子计算研究的一个重要目的就是把信息的特性和物理规律联系起来,离子阱量子计算为研究这种联系提供了具体和完整的研究途径.

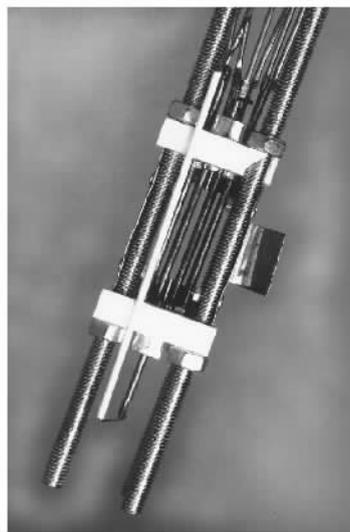


图 1 离子阱电极装置实物图

### 2.2 中性原子

2000 年,Deutsch 等人提出了利用光格子中的中性原子进行量子计算的方案<sup>[7]</sup>. 利用激光冷却技术可以把原子冷却到运动基态,并使其被俘获在光格子中,如图 2<sup>[8]</sup>所示. 与离子阱技术类似,处于光格子中的中性原子有很多内部状态,例如塞曼能级或精细能级,它们都可以被利用来编码量子比特. 1998 年,研究人员成功地把大约 100 万个原子俘获在一个三维光格子中. 2002 年,研究人员做到了每个格子中只有一个原子<sup>[9]</sup>. 通过调节激光可以使原子靠近发生相互作用,从而完成两量子比特操作,如图 3<sup>[8]</sup>所示. 这种方法的优点是每个原子都与外界有很好的隔离,具有较长的消相干时间,并且可以把很多原子俘获在光格子中,有实现规模化的量子计算的潜力. 利用中性原子进行量子计算在理论和实验上都不如离子阱成熟,不过中性原子有离子不能比拟的特点,而且除了用于量子计算,还是目前进行玻色-爱因斯坦凝聚实验研究的一种重要手段,因此中性原子量子计算仍然是十分重要和有潜力的一个研究方向. 最近研究人员实现了光格子中原子间的纠缠<sup>[10]</sup>,这个结果对量子信息的存储有十分重要的意义.

### 2.3 光学方法

光学方法不仅在量子信息研究中非常重要,在

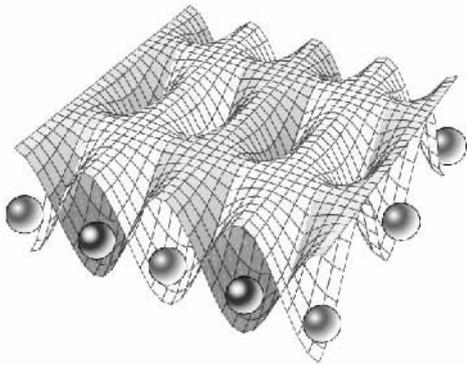


图2 通过激光冷却和俘获技术把原子约束在光格子中,它们与外界之间具有很好的隔离,原子的内部状态可用来编码量子比特

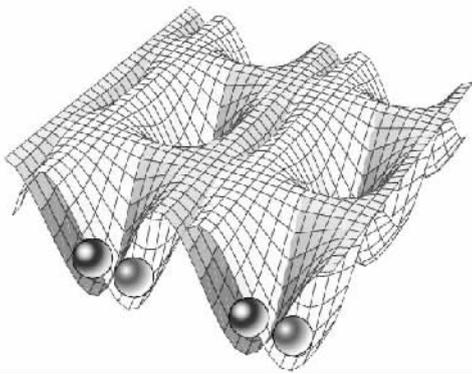


图3 通过调节激光使原子靠近,发生相互作用,从而完成两量子比特操作

量子计算领域光学方法也是一个十分重要的手段和研究方向。差不多在量子信息研究的每一个领域光学方法都有贡献,其中包括量子远程传态、量子密码、多粒子量子纠缠、量子态和量子过程的重建以及简单量子算法的实现等等。事实上光子是一种十分理想的量子比特的载体:光子的偏振和光子的路径信息都可以用来编码量子比特;用各种半波片和半透镜等光学器件就可以完成对量子比特的单比特操作;而且目前的单光子探测技术可以对光子进行令人满意的测量。

光子与环境相互作用很小,具有很好的相干性,但同时也带来一个问题,光子之间几乎没有相互作用,没有办法实现两量子比特直接的逻辑门操作。虽然基于线性光学器件和单光子源的量子计算方案在2001年就被提出来了<sup>[11]</sup>,2003年研究人员才首次通过光学方法利用纠缠光子对明确地实现了两量子比特的逻辑门——控制非门<sup>[12]</sup>,但这种实现是概率性的。图4是一个通过事后选择实现的控制非门的

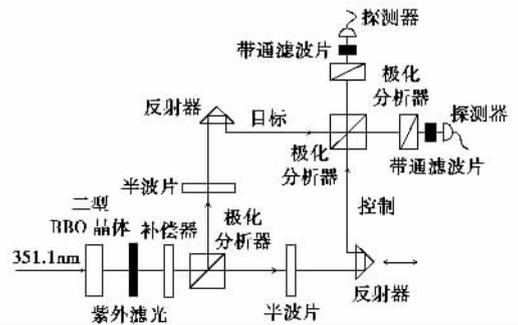


图4 一个通过事后选择实现的CNOT门的光学方法(量子比特由光子的不同偏振态编码,光子之间的相互作用由事先制备的纠缠提供)

光学方案示意图<sup>[13]</sup>。

光学方法有很多其他方法所不能比拟的优点:光子是飞行比特,天然适合于分布式量子计算,精确的单比特操作;光学中有许多相当成熟的技术可以利用;与量子通信直接兼容;目前最成熟的纠缠源就是参量下转换过程(parametric down-conversion)所产生的纠缠光子源。

2.4 超导约瑟夫森结

约瑟夫森效应即超导隧道效应。在玻璃衬板上镀一层超导金属膜,使其上形成厚度很薄的绝缘氧化层,在氧化层上再镀上一层超导金属膜,就得到一个超导-绝缘-超导结,称为约瑟夫森结。理论和实验都证明,当绝缘层厚度在100nm左右时,由于隧道效应,库柏对穿过势垒后仍保持配对状态,因此绝缘层中出现少量超导电子而具有了弱超导电性。1999年,日本NEC基础研究实验室的Nakamura等人在实验中观测到了约瑟夫森结中相干的量子振荡,这是研究人员首次观测到固体中的宏观量子相干<sup>[14]</sup>。此后,研究人员利用射频超导量子干涉器(SQUID)中的磁通(flux),直流超导量子干涉器中不同方向的电流和磁通量子等,分别实现了量子比特的编码。2003年,NEC基础研究实验室首次利用超导约瑟夫森效应成功地实现了一个两比特的条件逻辑门操作,他们用两个约瑟夫森结间的电荷编码量子比特<sup>[15]</sup>。图5是一个超导量子比特的原理图<sup>[14]</sup>。超导约瑟夫森结量子计算是目前进展最快最好的一种固体量子计算实现方法。

2.5 腔量子电动力学

腔量子电动力学方法利用里德伯原子能级和光子的偏振或腔场中的光子数编码量子比特,量子比特之间的耦合通过原子与微腔之间的相互作用或光

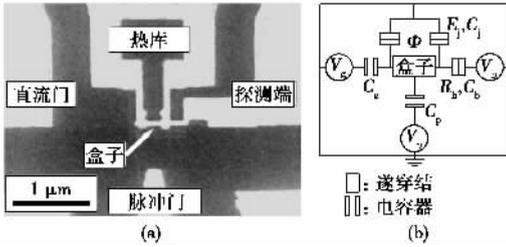


图5 一个量子比特结构的显微照片(a)及原理图(b) [量子比特用盒子(box)里的电荷量来代表.在超导态下,电子处于基态,当盒子中有多余的电子时,处于激发态,于是可以编码量子比特]

子与微腔之间的相互作用实现.1995年, Kimble 的研究小组首次实现了一个条件动力学演化,实质上实现了一个两量子比特的异或门<sup>[16]</sup>.图6是腔量子电动力学方法的原理示意图.

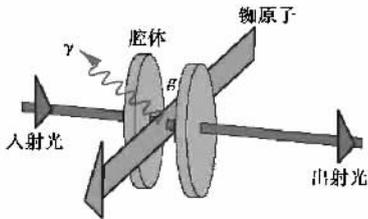


图6 腔量子电动力学方法的原理示意图(微腔中的原子和腔场分别作为量子比特)

腔量子电动力学方法的优点是作用所需时间短,而且可以实现原子和光子之间的信息交换,有利于在量子计算和量子通信之间建立联系.它的主要问题是很难实现量子门之间的连接,需要极低的温度.最近段路明等人提出了一个对温度要求相对宽松的基于腔量子电动力学方法的量子计算方案<sup>[17]</sup>,有望降低实验实现量子计算的难度.腔量子电动力学方法最重要价值在于它能把光子和原子联系起来,在量子通信领域会有广泛的应用前景.

## 2.6 液体核磁共振

1997年, Gershenfeld 和 Chuang 首次利用液体核磁共振技术实验实现了量子计算<sup>[18]</sup>.液体核磁共振技术利用液体中分子中的自旋 $1/2$ 的原子核的核自旋作为量子比特.利用分子中不同的原子核可以实现多个量子比特(图7).分子中不同原子的核自旋及其状态由于其在磁场中共振频率不同可以被分别辨认和区分,并且可以利用射频脉冲和核自旋之间的相互耦合对核自旋进行操纵控制.但由于单个分子中原子的核自旋的信号十分微弱,目前的技术

还不易检测,因此实验上利用大量分子的溶液(量级约为 $0.1\text{mmol}$ ,约 $10^{19}$ 个分子)进行量子计算,所以核磁共振量子计算也称为集合自旋共振(bulk spin-resonance)量子计算.液体核磁共振方法是目前实现量子计算用得最多的一种技术,在量子信息和量子计算的很多领域都能找到应用液体核磁共振量子计算技术的例子,例如,量子算法的实现<sup>[19-21]</sup>、量子模拟<sup>[22]</sup>、量子博弈<sup>[23]</sup>、量子远程传态<sup>[24]</sup>及几何相量子计算研究<sup>[25]</sup>.液体核磁共振量子计算也是目前实现量子计算比特数最多的一种方法<sup>[21]</sup>.

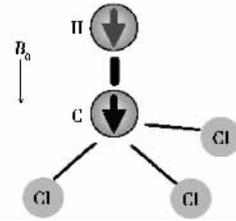


图7 碳<sup>13</sup>标记的氯仿分子结构式,氢和碳的原子核分别充当一个量子比特.自旋向上(取外磁场 $B_0$ 向下) $| \uparrow \rangle$ 表示 $| 1 \rangle$ ,自旋向下 $| \downarrow \rangle$ 表示 $| 0 \rangle$ .它们之间的相互作用由原子核之间的自旋耦合实现

液体核磁共振方法的优点是原子核处于电子的包围之中,受到了很好的屏蔽,处于近独立的状态,几乎不受电子和分子热运动的干扰,因此外部环境对它的影响较小,具有较长的消相干时间,而且实验可在室温下进行.但是它不能实现很多量子位,随着量子位的增多,分子的选择、量子位的寻址、信号的读出都将发生困难.

## 2.7 Kane 的硅基半导体方案<sup>[26]</sup>

Kane 的硅基半导体方案中量子比特由磷<sup>31</sup>原子的核自旋编码.装置需要处于极低温条件下,但是量子比特的数目没有限制,可以制成大规模的量子比特系统,从而实现实用的量子计算机.方案的基本原理如图8所示,将磷<sup>31</sup>原子有规律地嵌入半导体Si晶体表面之下,在Si晶体表面上加一绝缘薄层隔离,薄层上是金属电极(A门和J门),外加纵向的静磁场和横向的射频场.静磁场使磷<sup>31</sup>原子的核自旋能级分裂,从而形成二能级系统作为量子比特,而射频场可以翻转核自旋,从而控制量子比特的状态.金属电极分为A门和J门两种,A门位于各个磷<sup>31</sup>原子上方,用来寻址;J门位于两个A门之间,用来控制量子比特之间的耦合.

由于天然硅中含有 $4.7\%$ 的硅<sup>29</sup>,而硅<sup>29</sup>的核自旋也是 $1/2$ ,会与磷<sup>31</sup>的核自旋作用而引起消

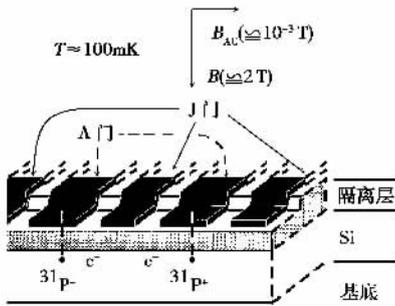


图8 Kane方法的原理图(硅晶体中嵌入一维磷31原子链,磷31和表面的金属门之间由一绝缘层隔开;A门控制原子核自旋;J门控制相邻原子核自旋量子比特之间的耦合)

相干,因此Kane的硅基半导体方案在技术上的一个主要困难是如何制造超纯的硅28晶体.此外,将磷31原子有规律地镶嵌在硅28晶体中,将A门电极刚好做在磷31原子上方,也是此方案在技术上遇到的重要挑战.

Kane的硅基半导体方案基于目前半导体加工技术,是目前实现大规模量子计算机的最诱人的方案之一.关于Kane的硅基半导体方案理论计算也在不断完善之中,一旦得到实验的支持,找到克服实验技术上困难的方法,就有希望制造出可以实用的大规模量子计算机.

### 2.8 富勒球(Fullerene ball)

Kane的硅基半导体方案是个诱人的方案,但目前在材料制备技术方面还无法实现,而以液体核磁共振为代表的基于核自旋的量子计算被实验证明是十分成功的,另外,富勒球的制备技术和研究目前相对成熟一些,于是结合核磁共振、kane方案和富勒球的制备技术,研究人员提出了一种新的量子计算实现方案<sup>[27,28]</sup>,其原理如图9所示<sup>[27]</sup>.

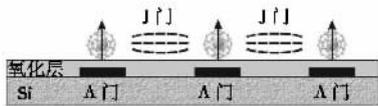


图9 富勒球量子计算原理图(在硅晶体表面放置一串掺杂富勒球,掺杂富勒球和控制用的金属电极之间由一绝缘层隔开.电极A控制原子核自旋,利用相邻原子核自旋量子比特之间的耦合完成量子比特间的操作)

量子比特由富勒球中掺杂的自旋为1/2的原子核编码,掺杂的自旋为1/2的原子核之间的相互作用通过J耦合实现.这种方案结合了核磁共振和kane方案的优点,放置在富勒球中的原子核受到了

很好的屏蔽,处于近独立的状态,几乎不受电子和分子热运动的干扰,因此外部环境对它的影响较小,具有较长的消相干时间;与Kane的硅基半导体方案相比,其装置的制造在目前的技术能力之内.

### 2.9 量子点

从广义上说,Kane的硅基半导体方案和富勒球量子计算方案都属于量子点范畴.下面介绍的量子点是一种狭义说法,主要是指利用半导体制备技术制造的一种砷化镓量子点(GaAs QDs),如图10所示.量子点中的电子自旋可以作为量子比特,在一个典型条件下(300mK,5T),平衡态的量子点中的电子自旋向上的概率为99%.利用电子的泡利不相容原理,通过自旋和电荷之间的关联,可以通过普通的电子开关(门)对电子自旋进行控制.原理上可以通过电子的电荷及电子的库仑相互作用完成对电子自旋编码的量子比特的各种操作,包括单量子比特操作和两量子比特操作及结果的读出<sup>[29]</sup>.

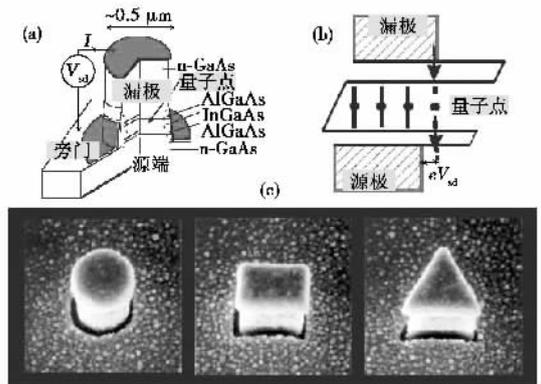


图10 量子点结构原理图及显微照片(电子的自旋作为量子比特)

目前的量子点量子计算处于装置结构的制造和基本性质的研究的阶段,距离达到量子计算的7个条件的实现还有很多工作要做.但作为一种固体量子计算实现技术,它可以借助很多现在的半导体制造技术和经典电子技术.

### 2.10 液氦表面电子

1999年,Platzman和Dykman提出了一个利用液氦表面电子进行量子计算的方案<sup>[30]</sup>.该方案利用俘获在液氦薄膜和真空界面的准二维电子体系作为量子比特,如图11所示.在 $10^{-2}\text{K}$ 温度下,电子最低的两个类氢能级可以用来编码量子比特,利用拉比振荡,单量子比特操作的频率可达 $10^9$ .通过控制液氦背后金属电极上的电压,可以调节相邻电子间的相互作用,进而控制相邻量子比特之间的耦合,实

现两量子位逻辑门操作. 该方案的优点是可规模化, 易控制, 具有可接受的消相干时间, 不存在实验技术上的障碍.

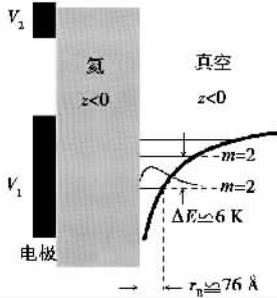


图 11 俘获在液氦和真空界面的电子及其能级示意图(量子比特由不同的里德伯能级编码. 对量子比特的控制通过液氦背后的金属电极实现)

表 1<sup>[31]</sup> 10 种量子计算物理实现方法 DiVincenzo 判据\*

实现技术	#1	#2	#3	#4	#5	#6	#7
离子阱	■	★	■	★	★	■	■
中性原子	■	★	■	■	■	■	■
光学	★	■	★	■	■	■	★
超导约瑟夫森结	■	★	■	■	■	▲	▲
腔量子电动力学	▲	★	■	★	★	■	■
液体核磁共振	▲	■	■	★	■	▲	▲
Kane 方案	■	■	■	■	■	▲	▲
富勒球	■	■	■	■	■	▲	▲
量子点	■	■	■	■	■	▲	▲
液氦表面电子	■	★	■	■	■	▲	▲

\* #1—#7 分别对应前面介绍的 7 个 DiVincenzo 判据, ▲ 暂无方案, ■ 原理上可行, ★ 可行性得到了比较充分的证实

### 3 结束语

迄今为止世界上还没有实现真正实用的量子计算机, 但是世界各地的许多科研人员正在以巨大的热情追寻着这个目标. 目前实现量子计算的技术和方案并不少, 我们也能够做到很好满足 DiVincenzo 的 7 个判据的任何一个单独的要求, 问题在于实验上同时很好的满足 DiVincenzo 的 7 个判据非常困难. 目前已经提出的这 10 种方案现在还很难说哪一种方案更有前景, 只是量子点的方案和超导约瑟夫森结方案等基于固体器件的方法更适合集成化和小型化, 比较被看好. 也许将来实现实用量子计算的不在现有的方案中, 最后脱颖而出的是一种全新的设计, 而这种新设计又是以某种新材料为基础, 就像半导体材料对于电子计算机一样. 研究量子计算的目

的不是要用它来取代现有的经典计算, 实现量子计算的意义作用也远不止是解决一些经典计算机无法解决的问题, 量子信息和量子计算研究对于我们加深对信息科学和物理世界的理解有着重要意义.

### 参考文献

[ 1 ] DiVincenzo D P. Fortschr. Physik ( Progress of Physics ), 2000, 48 571

[ 2 ] Cirac J I, Zoller P. Phys. Rev. Lett., 1995, 74 4091

[ 3 ] Wineland D, Heinrichs T, Hughes R *et al.* <http://qist.lanl.gov>, 2002, Section 6.2

[ 4 ] Schmidt-Kaler F, Häffner H, Riebe M *et al.* Nature, 2003, 422 408

[ 5 ] Gulde S, Riebe M, Lancaster G P T. Nature, 2003, 421 48

[ 6 ] Kielpinski D, Monroe C, Wineland D J. Nature, 2002, 417: 709

[ 7 ] Deutsch I H, Brennen G K, Jessen P S. Fortschr. Physik ( Progress of Physics ), 2000, 48 925

[ 8 ] Monroe C. Nature 2002, 416 238

[ 9 ] Greiner M, Mandel O, Esslinger T *et al.* Nature 2002, 415: 39

[ 10 ] Mandel O, Greiner M, Widera A *et al.* Nature, 2003, 425: 937

[ 11 ] Knill E, Laflamme R, Milburn G J. Nature, 2001, 409 46

[ 12 ] O'Brien J L, Pryde G J, White A G *et al.* Nature, 2003, 426: 264

[ 13 ] Pittman T B, Jacobs B C, Franson J D. Phys. Rev. Lett., 2002, 88 257902

[ 14 ] Nakamura Y, Pashkin Y A, Tsai J S. Nature, 1999, 398 786

[ 15 ] Yamamoto T, YPashkinu A, Astafiev O *et al.* Nature, 2003, 425 941

[ 16 ] Turchette Q A, Hood C J, Lange W *et al.* Phys. Rev. Lett., 1995, 75 4710

[ 17 ] Duan L M, Kuzmich A, Kimble H J. Phys. Rev. A, 2003, 67 032305

[ 18 ] Gershenfeld N A, Chuang I L. Science, 1997, 275 350

[ 19 ] Kim J, Lee J-S, Lee S. Phys. Rev. A, 2000, 62 :022312

[ 20 ] Jones J A, Mosca M. Phys. Rev. Lett., 1999, 83 :1050

[ 21 ] Shor W, Vandersypen L M K, Steffen M *et al.* Nature, 2001, 414 883

[ 22 ] Du J F, Li H, Xu X D *et al.* Phys. Rev. A, 2003, 67: 042316

[ 23 ] Du J F, Li H, Xu X D *et al.* Phys. Rev. Lett., 2002, 88: 137902

[ 24 ] Nielsen M A, Knill E, Laflamme R. Nature, 1998, 396 52

[ 25 ] Du J F, Zou P, Shi M J *et al.* Phys. Rev. Lett., 2003, 91: 100403

[ 26 ] Kane B E. Nature, 1998, 393 133

[ 27 ] Harnett W. Phys. Rev. A, 2002, 65 032322

[ 28 ] Suter D, Lim K. Phys. Rev. A, 2002, 65 052309

[ 29 ] Awschalom D, Heinrichs T, Hughes R *et al.* <http://qist.lanl.gov>, 2002, Section 6.5

[ 30 ] Platzman P M, Dykman M I. Science, 1999, 284 1967

[ 31 ] Heinrichs T, Hughes R *et al.* <http://qist.lanl.gov>, 2002, Quantum Computing Roadmap Overview

[ 32 ] 徐克尊, 徐春凯. 物理, 1999 28 337 [ Xu K Z, Xu C K. Wuli ( Physics ), 1999 28 337 ( in Chinese ) ]