

# 超导数字计算机\*

官伯然

(西安电子科技大学微波电信工程系 西安 710071)

**摘要** 超导数字计算机是下世纪超级计算机的发展方向之一,它在计算机科学发展的历史上将具有十分重要的意义.文章简要介绍了快速单磁通量子(RSFQ)超导计算机研究的发展历史、RSFQ逻辑电路的基本原理、超导计算机的基本结构以及超导数字计算机的展望.

**关键词** 超导,计算机,单磁量子

## SUPERCONDUCTING DIGITAL COMPUTERS

GUAN Bo Ran

(Department of Microwave Telecommunications Engineer, Xidian University, Xi'an 710071)

**Abstract** Superconducting digital computers may be one of the most important supercomputers in the next century. A short introduction to the history of research on the RSFQ superconducting computer, the principle of RSFQ logic circuits, the basic structure of superconducting computers, and future prospects is presented.

**Key words** superconducting, computer, single flux quantum

### 1 引言

随着现代科学技术的飞速发展,在国民经济建设、国防建设以及科学研究各个领域对于超级计算机的需求将不可避免地日益增长.超级计算机具有高速、大容量地进行信息处理的能力,是信息高速公路数据库、中长期天气预报、大型工程计算、国防安全、雷达信号处理、模拟核试验、密码破译、生物基因分析、科学研究以及航空航天等领域的重要核心设备.超级计算机的装备程序已成为衡量一个国家的现代化水平、科研能力、综合国力以及国防能力的重要标志之一.

当前,IBM研制的世界上最快的超级计算机的运算能力已达到每秒3万9千亿次.但是,就它的基本结构来说,现有超级计算机所采用的处理器芯片与一般个人计算机中所采用的相类似,仍然是硅半导体集成电路.为达到这样高的指令处理速度,它采用最多能使5800个微型处理机并行运算的并行处理方式.

然而,半导体处理器处理速度的进一步提高依然受到硅集成电路器件基本特性的制约:其一,超大规模集成电路的进一步细微化、高度集成化,虽然对提高集成度、减少信号延迟、减小分布参数影响、降低功耗以及提高时钟频率有益,但器件在高速运行

下发热引起的误动作亦随之日益严重.这也是目前高速芯片试图采用铜材的原因,但在常温下它始终是无法回避的问题;其二,细微化的结果使芯片上各元件之间距离不断缩小,必将引起信号间的相互干扰而使误码率加大;其三,由于载流子在门电路中的漂移速率有限,半导体芯片逻辑电路难以突破它的开关速率壁垒.对并行处理计算机来说,并行处理器的数目大幅度增大亦会使得并行效率迅速下降.

但由于计算机的处理速度已成为制约发展的关键因素,仍然亟需大幅度提高计算机运算速度.要改善超级计算机系统的性能,特别是标量运算性能,最主要的是要提高处理器的主频.超导RSFQ数字计算机正是这种可以实现大大高于硅器件速度的新型计算机,它能够实现每秒数百万亿次以上的浮点运算能力.也就是说,在现有的超导芯片制造工艺水平下,超导RSFQ计算机能够比IBM最快的“海蓝”计算机还要快数百倍.这种计算机同时具有超高速、高集成度和低功耗的特点.更为重要的是,它能够进行与现有计算机体系相同的二进制运算,并且可以在现有硅半导体集成电路设备基础上进行生产,是极具潜力的新一代超级计算机.图1为超导RS双稳态触发器的版图电路,从图中可以看出,它与常规硅

\* 国家自然科学基金和陕西省首批高级留学回国人员基金资助项目  
1999-06-28收到初稿,1999-12-01修回

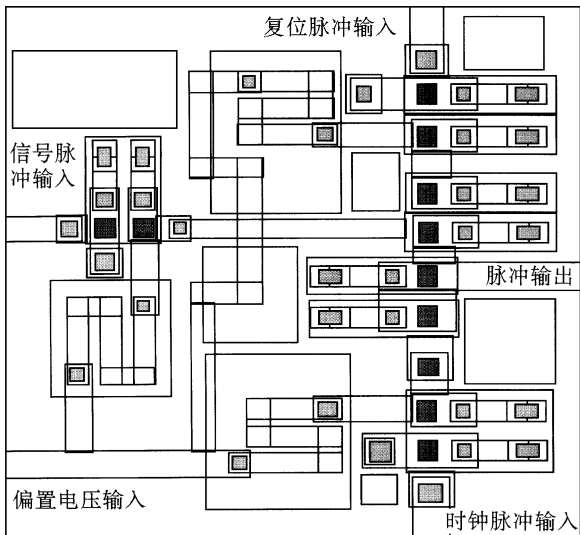


图1 超导 RS 双稳态触发器版图电路

半导体集成电路的版图电路是十分相似的。

## 2 超导 RSFQ 数字电路基本原理

自从 60 年代发现超导约瑟夫森结效应后,人们就很快意识到它的两种状态(超导态和常态)间快速(低于 1 ps)转换特性在超高速计算机中的应用前景。人们期望研制出每秒能执行高达数千亿条指令的超导处理器,这个在超导电子学中占有极为重要位置的约瑟夫森结,是一种在两层超导体间加有一层极薄绝缘材料的极为简单的三层结构。60 年代末,IBM 公司率先开展这一领域的研究,其后日本也展开了相应的研究工作。我国在这一领域也有跟踪报道。超导计算机的早期研究集中于非阻尼约瑟夫森结的栓定结构(latching structure),并采用具有较高转变温度的铅合金超导材料。以后的研究表明,非阻尼约瑟夫森结的栓定结构在高速运行下的过冲效应会阻碍约瑟夫森结的复位速度,而铅合金约瑟夫森结构的热回复特性也不理想。

80 年代末到 90 年代初,国外超导计算机研究在两个领域取得了重要进展:(1)在材料方面采用铌材料取代铅合金,即铌/氧化铝/铌三层约瑟夫森结。采用这种材料制造的芯片在大量使用中已证明具有极好的热回复特性;(2)采用快速单磁通量子(rapid single flux quantum, RSFQ)构成新型数字电路机制。这种机制克服了栓定结构的过冲缺陷,同时保持了超导数字电路的高速开关特性。

由于在这两个方面的突破,超导 RSFQ 计算机的研制步伐不断加快,这种基于超导约瑟夫森结单

磁通量子机制计算机中的 RSFQ 逻辑/存储电路可以实现所有数字电路所需的逻辑功能。已经完成的低温(液氮温度,4.2 K) RSFQ 简单电路每秒钟能执行 500 亿次指令,它比最快的硅器件还要快 100 倍。现有的工艺技术可以使这一速度提高到数千倍。目前美国正在为研制 PetaFlops 超导计算机(每秒千亿次浮点运算)而进行着 EARTH 和 HTMT(混合技术多进程计算机)计划。现在,已经没有人怀疑建立在 RSFQ 机制基础上的超导数字计算机会在 PetaFlops 超级计算机领域取得成功。

RSFQ 数字电路芯片是超导超级计算机的核心。RSFQ 数字电路可产生、传递、记忆和再生出宽度极小的量子化电压脉冲。这种电压脉冲面积为单个磁通量子,亦即

$$\int V(t) dt = \Phi_0 = h/2e,$$

并以此构成二进制逻辑电路。

根据超导电路理论,超导环路内的磁通是量子化的,假如电路设计得能使每次状态翻转所对应的磁通量变化只有一个磁通量子,我们就称其为单磁通量子器件。又由于这时所对应的脉冲宽度很窄,为 ps 量级,所以通常称之为快速单磁通量子器件(RSFQ)。

我们用图 2 来说明单个超导 RSFQ 触发器的工作原理。图 2(a)表示的是一个具有两个超导结的磁量子干涉器回路。假设在初始状态下使欠临界偏置电流流过左边超导结,而此时右边超导结将没有电流流过。当在某一时刻向左超导结注入一适当幅度的窄脉冲电流信号[如图 2(b)]时,左超导结总电流在脉冲持续时间的某一时刻超过该超导结的临界值

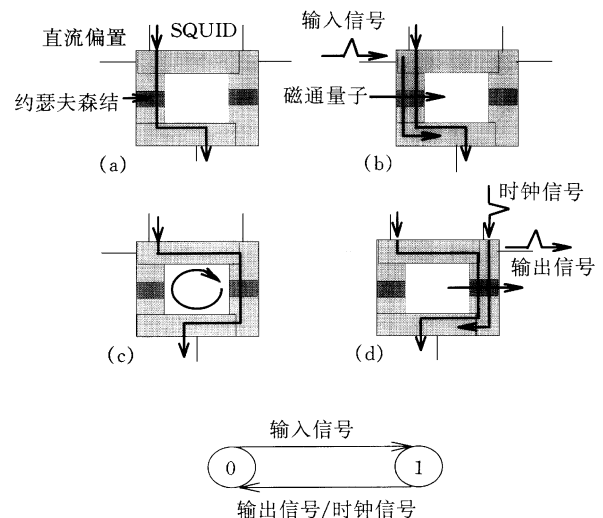


图2 用于写入和读出磁通量子的磁量子干涉器

而转入正常态,电流将转而流过右超导结.由于超导电路的性质,在触发脉冲过后电流流向将依然维持下去,如图 2(c).这种状态相当于存储了数字“1”,当需要读取所存数据时,则向右超导结注入一时钟脉冲触发信号,使脉冲期间右超导结总电流超过临界电流.这时,右超导结将向外电路输出一电流脉冲,且同时使偏置电流回复到初始状态,如图 2(d)所示.适当选取电路参数,可使输出脉冲为单个量子.

### 3 超导数字计算机的基本构成

超导 RSFQ 数字电路不仅有极快的速度,其耗散功率亦极低(每个门功耗只有  $0.1 \mu\text{W}$ ).这一优点一方面便于降低制冷成本,另一方面使密集堆放多个超导芯片成为可能.即实现超导并行计算机.

此外,由于现有超级计算机也要求使计算机处于低温最佳工作环境,所以低温工作条件已不是超导计算机的特殊要求.另一方面,由于制冷技术的不断发展,小体积低价格的低温制冷机将大量进入商业市场.这也为超导数字计算机的发展创造了有利的条件.

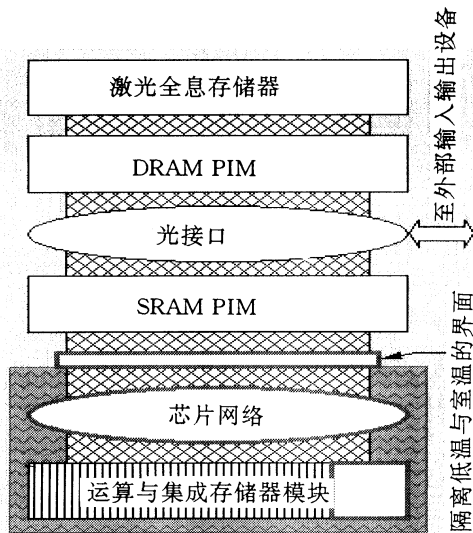


图 3 超导计算机结构

目前美国的 HTMT 计划的超导计算机组成如图 3 所示.其超导处理器及其芯片网络处于液氮温度下,而内置处理器静态存储器(SRAM PIM)、内置处理器动态随机存储器(DRAM PIM)和激光全息存储器则处于液氮温度下.该计算机共有 4000 个工作在  $100\text{GHz}$  的处理器.外部输入输出设备通过光接口与计算机相连接.它的液氮温度工作部分结构如图 4 所示.其中包括连接到低温 - 室温界面的 16000 根导线,每个多芯片模块(CMCM)为  $20 \times 20\text{cm}^2$ ,其上装有 8 个运算与集成存储器芯片(COMMODEs)和 5 个芯片网络芯片.

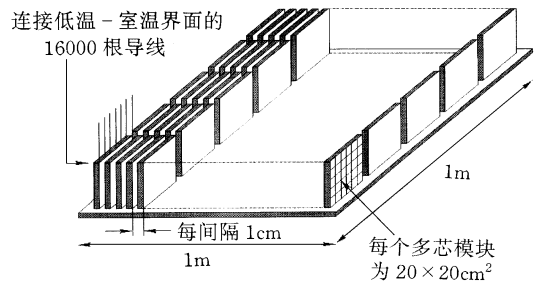


图 4 超导计算机处理器部分结构

### 4 超导数字计算机展望

由于超导数字计算机可以提供极高的运算速度和巨大的运算能力,它在国民经济中有广泛的应用价值,在国防建设上具有重要的战略意义,在信息社会中具有广阔的市场应用前景,且具有较高的科学研究价值.它对新技术的发展具有推动作用,是一个国家科研能力和技术水平的综合标志之一.

因此,发达国家,特别是美国从一开始就对超导计算机的研究和研制给予高度重视.尽管在 80 年代超导计算机的研究曾经遇到一些困难,但他们始终没有放弃这方面的努力.特别是近年来,由于模拟核试验、密码破译、战略防御系统、基因分析、长期天气预报、大型工程计算等领域的迫切需要,更是加快研制步伐.根据目前研制进度和技术水平,预计在 10 年内可以实现超导 HTMT 计算机.