



Overview of the Current Development Status of RSFQ Circuits

快速单通量量子电路研究概览

2023 年 10 月 23 日



中国科学院计算技术研究所

INSTITUTE OF COMPUTING TECHNOLOGY, CHINESE ACADEMY OF SCIENCES



Table of Contents

1 Introduction

► Introduction

SFQ 单通量量子

RSFQ 快速单通量量子

超导集成电路

Josephson Junction 约瑟夫森结

SFQ 电路工作原理

► 研究和挑战

基于 RSFQ 的微处理器系统结构设计

与神经网络相结合

EDA 工具的设计



Single Flux Quantum

1 Introduction

- SFQ 是一种基于超导材料的电子技术，其基本思想是利用超导电流量子化的性质来实现数字信号的处理和存储。
- 超导材料在超低温下（通常接近绝对零度）能够无电阻地传导电流，而且电流以电子的个数（量子）为单位进行流动，这被称为单通量量子。



Rapid Single Flux Quantum

1 Introduction

- 快速单通量量子（rapid single flux quantum，缩写 RSFQ；也称快单磁通量子）是一种使用超导设备的数字产品，也称约瑟夫森结，用来处理数字信号。在 RSFQ 逻辑中，信息以磁通量量子的形式存储，并以单通量量子电压脉冲的形式传递。
- 与一般计算机使用的 CMOS 晶体管技术有很大差异：
 - 超导设备需要低温；
 - 约瑟夫森结产生的皮秒级 SFQ 电压脉冲被用于编码、处理和传输数字信息，这代替半导体电子器件中晶体管产生的电压电平
 - SFQ 电压脉冲在超导传输线上的进程非常小，并且如果脉冲的频谱分量不超过超导体能隙的频率，通常可以忽略不计；
 - 在 1ps 的 SFQ 脉冲情况下，电路计时可能达到 100 GHz 频率（每 10 皮秒一次脉冲）



Rapid Single Flux Quantum

1 Introduction

- 共同点

- RSFQ 和 SFQ 都利用了超导电子学的原理，其中电流以量子的形式流动，这使得它们在高速和低功耗方面具有潜在的优势。
- 两者都用于数字逻辑电路和量子计算，可以实现逻辑门、存储器和计算单元等数字电子元件。

- 区别

- 速度和功耗：RSFQ 通常比 SFQ 更快，因为它们使用了更短的脉冲和更高的电流。这使得 RSFQ 适用于需要极高速度的应用，如超导量子计算。
- 电流量子化：SFQ 电路的电流量子化是严格的，电荷以单通量量子的整数倍传递。在 RSFQ 中，电荷的量子化可以更灵活，允许非整数的电荷传输，这在某些情况下可以提供更大的设计自由度。
- 应用领域：RSFQ 通常更常见于量子计算，因为其速度和灵活性使其成为量子比特的候选。SFQ 则更广泛用于超导数字电路中，包括高性能计算和通信领域。



超导集成电路

1 Introduction

- 超导集成电路的三个特别的要素: 材料, 器件, 逻辑
- 1985 年, 三位莫斯科国立大学的科学家提出了一种新的逻辑形式——SFQ 逻辑门。它虽然还是用约瑟夫森结作为开关, 但是它的数据形式从电压电平逻辑变成了电压脉冲的逻辑, 这样怎么进行计算呢? 还是以“与”门为例, CMOS 的“与”门, 是通过判断两个输入是高还是低来决定输出是高还是低, 但是 SFQ 的“与”门, 比它多加了一个时钟信号, 这是因为两个脉冲很难同时到达, 所以我们允许它有一点时间间隔。我们在判断逻辑输出的时候, 当某一个时钟到来, 我们就通过观察距离上一个时钟的时钟周期内, 是否又来了一个脉冲, 如果有, “与”门就输出 1, 如果没有, 那就输出 0。在 SFQ 逻辑里, 其他的门都是类似的。



约瑟夫森结

1 Introduction

- **库珀对**: 在低温超导体中, 电子并不是单个地进行运动, 而是以弱耦合形式形成配对, 一般称之为库珀对. 形成库珀对的两个电子, 一个自旋向上, 另一个自旋向下。
- **隧道效应**: 隧道效应由微观粒子波动性所确定的量子效应。又称势垒贯穿。考虑粒子运动遇到一个高于粒子能量的势垒, 按照经典力学, 粒子是不可能越过势垒的; 按照量子力学可以解出除了在势垒处的反射外, 还有透过势垒的波函数, 这表明在势垒的另一边, 粒子具有一定的概率, 粒子贯穿势垒。
- 约瑟夫森结实际上是一种电子电路, 由两个超导层和一个非超导层紧密连接, 非超导层厚度为纳米级别
- 这个非超导层对于电子来说就是‘势垒’, 温度足够低的时候, 超导体快速通过势垒交换成对电子, 产生量子隧道效应。
- **临界电流**: 环境中无电场磁场时, 结的两端没有电势差, 库珀对发生隧穿现象, 因此约瑟夫森结中出现了直流电流 (超导隧道电流)



SFQ 电路工作原理

1 Introduction

- SFQ 电路中的信息以单通量量子的形式传输，这意味着电荷以量子的整数倍进行传递。
- 一个典型的 SFQ 电路包括超导环，超导电流在其中以量子的形式流动，以表示数字信息
- SFQ 电路可以用于实现逻辑门、存储器和计算单元等数字电子元件，具有极低的能耗和高速的特性。
- 例如一个基于 SFQ 的 D 触发器



Table of Contents

2 研究和挑战

► Introduction

SFQ 单通量量子

RSFQ 快速单通量量子

超导集成电路

Josephson Junction 约瑟夫森结

SFQ 电路工作原理

► 研究和挑战

基于 RSFQ 的微处理器系统结构设计

与神经网络相结合

EDA 工具的设计



相关研究

2 研究和挑战

- 基于 RSFQ 的微处理器系统结构设计
- 与神经网络相结合
- EDA 工具的设计



基于 RSFQ 的微处理器系统结构设计

2 研究和挑战

- 基于 RSFQ 的 8-bit 并行微处理器¹, 8-bit 串行微处理器 CORE e4², 提出基于 RSFQ 的移位寄存器内存的设计和实现³
- **量子化的行为:** 磁通量在超导回路中的变化是量子化的, 意味着它的变化是离散的, 具有确定的最小值 (即单通量量子)。这种离散的量子化行为使得 SFQ 的传播变得非常稳定, 不容易受到外界干扰。整个电路的操作是非常协调的, 减少了不必要的能量损耗。
- 在 RSFQ 技术中, 信息是通过磁通量量子的传播来表示和处理的, 而不是通过电荷的积累或放电。因此, 与 CMOS 技术中的电荷充放电相比, SFQ 的传播过程中几乎没有能量损失。

¹Pei-Yao Qu et al. "Design of an 8-bit Bit-Parallel RSFQ Microprocessor". In: *IEEE Transactions on Applied Superconductivity* 30.7 (2020), pp. 1-6. DOI: 10.1109/TASC.2020.3017527.

²Yuki Ando et al. "Design and Demonstration of an 8-bit Bit-Serial RSFQ Microprocessor: CORE e4". In: *IEEE Transactions on Applied Superconductivity* 26.5 (2016), pp. 1-5. DOI: 10.1109/TASC.2016.2565609.

³Wanning Xu et al. "Design and implementation of bit-parallel RSFQ shift register memories". In: *Superconductor Science and Technology* 34.8 (2021), p. 085002. DOI: 10.1088/1361-6668/ac086e. URL: <https://dx.doi.org/10.1088/1361-6668/ac086e>.



与神经网络相结合

2 研究和挑战

- 设计基于 SFQ 的神经处理单元 (NPU), 具有更高性能和高功率⁴
- SFQ 电路能够提高卷积神经网络的性能, 但 SFQ 电路的一个缺点是它需要大量的 RAM, 于是作者提出了一个新的 Max Pooling 运算电路设计⁵

⁴Koki Ishida et al. "Superconductor Computing for Neural Networks". In: *IEEE Micro* 41.3 (2021), pp. 19–26. DOI: 10.1109/MM.2021.3070488.

⁵Zeyu Han et al. "Design of Max Pooling Operation Circuit for Binarized Neural Networks Using Single-Flux-Quantum Circuit". In: *IEEE Transactions on Applied Superconductivity* 33.5 (2023), pp. 1–5. DOI: 10.1109/TASC.2023.3241144.



EDA 工具的设计

2 研究和挑战

- 开发 SFQ 单元库, 基于 PCM 的实验数据的电路仿真, 在超导测试设备上对单元库进行了设计、制造和测试; 使用自动化的 OCTOPUX 设备在低频下进行测试。⁶
- 使用同步器 IP 设计 SFQ 逻辑电路的局部优化方法⁷
-

⁶Amol Inamdar et al. "Development of Superconductor Advanced Integrated Circuit Design Flow Using Synopsys Tools". In: *IEEE Transactions on Applied Superconductivity* 31.5 (2021), pp. 1–7. DOI: 10.1109/TASC.2021.3058088.

⁷Ruoting Yang et al. "A Local Optimization Method for Single Flux Quantum Logic Circuits Design Utilizing Synchronizer IPs". In: *IEEE Transactions on Applied Superconductivity* 33.3 (2023), pp. 1–8. DOI: 10.1109/TASC.2023.3242084.



问题与挑战

2 研究和挑战

- 问题 1: 目前大多数研究都是基于一些 EDA 辅助工具和某些仿真环境条件下进行的, 对开发工具的依赖性比较强, 例如基于 SIMTNO3 工艺对提出的 8×8 register 进行了实际实现⁸
- 问题 2: 超导电路的可靠性和稳定性容易受到外部环境因素影响, 如磁场和温度变化
- 问题 3: 超导电路的一些元件, 如约瑟夫森结, 可能有固有尺寸限制, 导致超导电路的集成度与传统的 CMOS 相比较低
- 问题 4: 从论文来看, 超导电路的基本结构与传统的 CMOS 结构似乎没有什么差别, 而实现高频低耗的条件是 RSFQ 其本身的量子化特性, 可能需要根据 RSFQ 的特性来开发新的结构
- 问题 5: 如何解决 SFQ 技术与传统 CMOS 技术的兼容性问题

⁸Wanning Xu et al. "Design and implementation of bit-parallel RSFQ shift register memories". In: *Superconductor Science and Technology* 34.8 (2021), p. 085002. DOI: 10.1088/1361-6668/ac086e. URL: <https://dx.doi.org/10.1088/1361-6668/ac086e>.



Overview of the Current Development Status of RSFQ Circuits

Thank you for listening!
Any questions?