



(12) 发明专利申请

(10) 申请公布号 CN 113206649 A

(43) 申请公布日 2021.08.03

(21) 申请号 202110485670.7

(22) 申请日 2021.04.30

(71) 申请人 清华大学

地址 100084 北京市海淀区清华园

(72) 发明人 黄汝田 何永成 何楷泳 耿霄

余晴 戴根婷 赵昌昊 刘建设

陈炜

(74) 专利代理机构 北京安信方达知识产权代理

有限公司 11262

代理人 李丹 栗若木

(51) Int. Cl.

H03F 19/00 (2006.01)

G06N 10/00 (2019.01)

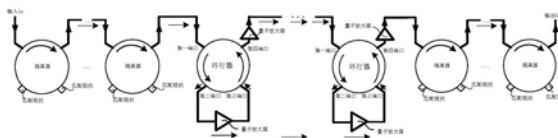
权利要求书2页 说明书11页 附图5页

(54) 发明名称

一种具有强隔离功能的片上非反射型量子放大器

(57) 摘要

本申请公开了一种具有强隔离功能的片上非反射型量子放大器,本申请实施例提供的片上量子放大器为具有强隔离功能、环行功能和放大功能的两端口片上器件,体积小、耗散低,具有非互易性。本申请实施例提供的具有强隔离功能的片上量子放大器,不仅增加了放大器的增益带宽积,还具有强隔离功能,同时可取代HEMT,极大地降低了超导量子计算机及其测试系统的成本。本申请实施例提供的具有强隔离功能的片上量子放大器能与量子芯片直接相连,保护量子芯片免受后续电路的反作用干扰。基于本申请实施例提供的片上量子放大器,不仅简化了超导量子测试系统,而且显著缩小了超导量子测试系统的体积,有利于超导量子计算机的规模化发展。



1. 一种具有强隔离功能的片上非反射型量子放大器,包括:集成在一颗芯片上的一个以上环行器、一个以上量子放大器;其中,

环行器为多端口的片上超导环行器,其中,一个输入端口,用于输入量子信息或者与相邻环行器的输出端口连接;一个输出端口,用于与相邻环行器的输入端口连接或者输出放大后的量子信息;剩余端口包括至少两个,用于连接负载;

隔离器为二端口的器件,其中一个端口用于级联环行器或隔离器,其中一个端口用于作为片上量子放大器的一个输入/输出端口或者用于级联隔离器或环行器,隔离器用于对输入信号进行转换输出;

其中,负载包括非反射型量子放大器或预设阻值的电阻,且至少一个负载为非反射型量子放大器。

2. 根据权利要求1所述的片上非反射型量子放大器,其中,所述剩余端口包括两个端口;

所述剩余端口中的一个端口和所述剩余端口中的另一个端口之间连接一个以上级联的非反射型量子放大器,用于对来自所述环行器的信号进行逐级放大后送回所述环行器。

3. 根据权利要求1所述的片上非反射型量子放大器,其中,所述剩余端口包括两个端口;

剩余端口中的一个端口连接一反射型量子放大器,剩余端口中的另一个端口连接一反射型量子放大器。

4. 根据权利要求1所述的片上非反射型量子放大器,其中,所述剩余端口包括至少三个奇数个端口;其中,

所述剩余端口包括的一对以上剩余端口中,每对剩余端口中的一个端口和该对剩余端口中的另一个端口之间连接一个以上级联的量子放大器,用于对来自所述环行器的信号进行逐级放大后送回所述环行器;其余的剩余端口连接所述电阻。

5. 根据权利要求1所述的片上非反射型量子放大器,其中,所述剩余端口包括至少三个奇数个端口;其中,

所述剩余端口包括的一对以上剩余端口中,一部分成对的剩余端口,每对剩余端口中的一个端口和该对剩余端口中的另一个端口之间连接一个以上级联的非反射型量子放大器,用于对来自所述环行器的信号进行逐级放大后送回所述环行器;另一部分成对的剩余端口,每对剩余端口中的一个端口连接一反射型量子放大器,另一个端口连接一反射型量子放大器;其余的剩余端口连接所述电阻。

6. 根据权利要求2~5任一项所述的片上非反射型量子放大器,所述输出端口还连接一个以上级联的非反射型量子放大器,用于将所述输出端口输出的信号逐级放大后输出。

7. 根据权利要求2所述的片上非反射型量子放大器,其中,所述环行器包括一个并连接有第一量子放大器和第二量子放大器两个非反射型量子放大器,所述剩余端口间连接第一量子放大器;所述输出端口连接第二量子放大器,所述隔离器包括第一隔离器和第二隔离器;所述第一隔离器的输入端口为所述片上量子放大器的输入端口,所述第一隔离器的输出端口连接所述环行器的输入端口;所述环行器的输出端口连接所述第二隔离器的输入端口,所述第二隔离器的输出端口为所述片上量子放大器的输出端口。

8. 根据权利要求1所述的片上非反射型量子放大器,其中,所述环行器包括 N_c 个四端口

的片上超导环行器,所述非反射型量子放大器包括二的倍数个以上非反射型量子放大器, $N_c \geq 2$;其中,

所述环行器的剩余端口包括两个端口;所述剩余端口中的一个端口和所述剩余端口中的另一个端口之间连接第一量子放大器;所述环行器的输出端口连接第二量子放大器,第一量子放大器和第二量子放大器为所述非反射型量子放大器;

第一环行器的输入端口为所述片上量子放大器的输入端口,第一环行器的输出端口与第二环行器的输入端口连接,第二环行器的输出端口与第三环行器的输入端口连接,……以此类推,第 $(N_c - 1)$ 环行器的输出端口与第 N_c 环行器的输入端口连接,第 N_c 环行器的输出端口为所述片上量子放大器的输出端口。

9. 根据权利要求8所述的片上非反射型量子放大器,所述环形器之间还设置一个或多个所述隔离器。

10. 根据权利要求1~9任一项所述的片上非反射型量子放大器,其中,所述非反射型量子放大器为:行波参量放大器TWPA。

11. 根据权利要求1~9任一项所述的片上非反射型量子放大器,其中,当所述连接负载包括预设阻值的电阻时,所述预设阻值为50欧姆。

12. 根据权利要求1所述的片上非反射型量子放大器,其中,所述隔离器由多端口的片上超导环行器构成;

其中一个端口用于级联环行器或隔离器,其中一个端口用于作为片上量子放大器的一个输入/输出端口或者用于级联隔离器或环行器,剩余端口阻抗匹配负载,分别连接预设阻值的电阻。

13. 根据权利要求7所述的片上非反射型量子放大器,其中,所述隔离器为三端口的片上超导环行器或四端口的片上超导环行器。

一种具有强隔离功能的片上非反射型量子放大器

技术领域

[0001] 本申请涉及但不限于量子计算技术领域,尤指一种具有强隔离功能的片上非反射型量子放大器。

背景技术

[0002] 在超导量子测试系统中,量子信息的传输不仅需要放大,还需要隔离外界信号的反作用。相关技术中,一方面,隔离器、环行器和量子放大器均为独立器件,体积大、热损耗严重,不利于超导量子计算机的规模化发展;另一方面,量子放大器增益带宽积(GBP, Gain-Bandwidth Product)较小,也就是说,对于同一量子放大器,GBP是确定的,如果需要得到较大的增益,那么其只能在更窄的带宽范围内工作,如果要在更宽的带宽范围内工作,增益就会降低,否则会造成放大后的输入信号的失真。其中,GBP是带宽和增益的乘积,用于简单衡量放大器的性能的一个参数。

发明内容

[0003] 本申请提供一种具有强隔离功能的片上非反射型量子放大器,具有隔离功能和放大功能,体积小、热损耗低,有利于超导量子计算机的规模化发展。

[0004] 本发明实施例提供了一种具有强隔离功能的片上非反射型量子放大器,包括:集成在一颗芯片上的一个以上环行器、一个以上量子放大器;其中,

[0005] 环行器为多端口的片上超导环行器,其中,一个输入端口,用于输入量子信息或者与相邻环行器的输出端口连接;一个输出端口,用于与相邻环行器的输入端口连接或者输出放大后的量子信息;剩余端口包括至少两个,用于连接负载;

[0006] 隔离器为二端口的器件,其中一个端口用于级联环行器或隔离器,其中一个端口用于作为片上量子放大器的一个输入/输出端口或者用于级联隔离器或环行器,隔离器用于对输入信号进行转换输出;

[0007] 其中,负载包括非反射型量子放大器或预设阻值的电阻,且至少一个负载为非反射型量子放大器。

[0008] 在一种示例性实例中,所述剩余端口包括两个端口;

[0009] 所述剩余端口中的一个端口和所述剩余端口中的另一个端口之间连接一个以上级联的非反射型量子放大器,用于对来自所述环行器的信号进行逐级放大后送回所述环行器。

[0010] 在一种示例性实例中,所述剩余端口包括两个端口;

[0011] 剩余端口中的一个端口连接一反射型量子放大器,剩余端口中的另一个端口连接一反射型量子放大器。

[0012] 在一种示例性实例中,所述剩余端口包括至少三个奇数个端口;其中,

[0013] 所述剩余端口包括的一对以上剩余端口中,每对剩余端口中的一个端口和该对剩余端口中的另一个端口之间连接一个以上级联的量子放大器,用于对来自所述环行器的信

号进行逐级放大后送回所述环行器;其余的剩余端口连接所述电阻。

[0014] 在一种示例性实例中,所述剩余端口包括至少三个奇数个端口;其中,

[0015] 所述剩余端口包括的一对以上剩余端口中,一部分成对的剩余端口,每对剩余端口中的一个端口和该对剩余端口中的另一个端口之间连接一个以上级联的非反射型量子放大器,用于对来自所述环行器的信号进行逐级放大后送回所述环行器;另一部分成对的剩余端口,每对剩余端口中的一个端口连接一反射型量子放大器,另一个端口连接一反射型量子放大器;其余的剩余端口连接所述电阻。

[0016] 在一种示例性实例中,所述输出端口还连接一个以上级联的非反射型量子放大器,用于将所述输出端口输出的信号逐级放大后输出。

[0017] 在一种示例性实例中,所述环行器包括一个并连接有第一量子放大器和第二量子放大器两个非反射型量子放大器,所述剩余端口间连接第一量子放大器;所述输出端口连接第二量子放大器,所述隔离器包括第一隔离器和第二隔离器;所述第一隔离器的输入端口为所述片上量子放大器的输入端口,所述第一隔离器的输出端口连接所述环行器的输入端口;所述环行器的输出端口连接所述第二隔离器的输入端口,所述第二隔离器的输出端口为所述片上量子放大器的输出端口。

[0018] 在一种示例性实例中,所述环行器包括 N_c 个四端口的片上超导环行器,所述非反射型量子放大器包括二的倍数个以上非反射型量子放大器, $N_c \geq 2$;其中,

[0019] 所述环行器的剩余端口包括两个端口;所述剩余端口中的一个端口和所述剩余端口中的另一个端口之间连接第一量子放大器;所述环行器的输出端口连接第二量子放大器,第一量子放大器和第二量子放大器为所述非反射型量子放大器;

[0020] 第一环行器的输入端口为所述片上量子放大器的输入端口,第一环行器的输出端口与第二环行器的输入端口连接,第二环行器的输出端口与第三环行器的输入端口连接,……以此类推,第 $(N_c - 1)$ 环行器的输出端口与第 N_c 环行器的输入端口连接,第 N_c 环行器的输出端口为所述片上量子放大器的输出端口。

[0021] 在一种示例性实例中,所述环形器之间还设置一个或多个所述隔离器。

[0022] 在一种示例性实例中,所述非反射型量子放大器为:行波参量放大器TWPA。

[0023] 在一种示例性实例中,当所述连接负载包括预设阻值的电阻时,所述预设阻值为50欧姆。

[0024] 在一种示例性实例中,所述隔离器由多端口的片上超导环行器构成;

[0025] 其中一个端口用于级联环行器或隔离器,其中一个端口用于作为片上量子放大器的一个输入/输出端口或者用于级联隔离器或环行器,剩余端口阻抗匹配负载,分别连接预设阻值的电阻。

[0026] 在一种示例性实例中,所述隔离器为三端口的片上超导环行器或四端口的片上超导环行器。

[0027] 本申请实施例提供的片上量子放大器为具有强隔离功能、环行功能和放大功能的两端口片上器件,体积小、耗散低,具有非互易性。本申请实施例提供的具有强隔离功能的片上量子放大器,不仅增加了放大器的增益带宽积,还具有强隔离功能,同时可取代HEMT,极大的降低了超导量子计算机及其测试系统的成本。本申请实施例提供的具有强隔离功能的片上量子放大器能与量子芯片直接相连,保护量子芯片免受后续电路的反作用干扰。基

于本申请实施例提供的具有强隔离功能的片上量子放大器,不仅简化了超导量子测试系统,而且显著缩小了超导量子测试系统的体积,有利于超导量子计算机的规模化发展。

[0028] 本发明的其它特征和优点将在随后的说明书中阐述,并且,部分地从说明书中变得显而易见,或者通过实施本发明而了解。本发明的目的和其他优点可通过在说明书、权利要求书以及附图中所特别指出的结构来实现和获得。

附图说明

[0029] 附图用来提供对本申请技术方案的进一步理解,并且构成说明书的一部分,与本申请的实施例一起用于解释本申请的技术方案,并不构成对本申请技术方案的限制。

[0030] 图1为本申请实施例中片上量子放大器的组成结构示意图;

[0031] 图2(a)为本申请实施例中片上量子放大器的一种实施例的组成结构示意图;

[0032] 图2(b)为本申请实施例中片上量子放大器的另一种实施例的组成结构示意图;

[0033] 图2(c)为本申请实施例中片上量子放大器的又一种实施例的组成结构示意图;

[0034] 图2(d)为本申请实施例中片上量子放大器的再一种实施例的组成结构示意图;

[0035] 图3(a)为本申请实施例中一种四端口片上超导环行器构成的片上量子放大器的组成结构示意图;

[0036] 图3(b)为本申请实施例中另一种四端口片上超导环行器构成的片上量子放大器的组成结构示意图;

[0037] 图4(a)为本申请中一种片上量子放大器的实施例的组成结构示意图;

[0038] 图4(b)为本申请中另一种片上量子放大器的实施例的组成结构示意图;

[0039] 图5为本申请又一种片上量子放大器的实施例的组成结构示意图;

[0040] 图6为本申请再一种片上量子放大器的实施例的组成结构示意图。

具体实施方式

[0041] 为使本申请的目的、技术方案和优点更加清楚明白,下文中将结合附图对本申请的实施例进行详细说明。需要说明的是,在不冲突的情况下,本申请中的实施例及实施例中的特征可以相互任意组合。

[0042] 图1为本申请实施例中具有强隔离功能的片上非反射型量子放大器(本文中可以简称为片上量子放大器)的组成结构示意图,如图1所示,本申请实施例中的片上量子放大器包括:集成在一颗芯片上的一个以上环行器、两个以上隔离器、一个以上非反射型量子放大器;其中,

[0043] 环行器为多端口的片上超导环行器(图1中为了试图简洁仅以四端口的片上超导环行器为例),其中,一个输入端口,用于输入量子信息或者与相邻环行器的输出端口连接;一个输出端口,用于与相邻环行器的输入端口连接或者输出放大后的量子信息;剩余端口包括至少两个,用于连接负载;

[0044] 隔离器为二端口的器件,其中一个端口用于级联环行器或隔离器,其中一个端口用于作为片上量子放大器的一个输入/输出端口或者用于级联隔离器或环行器,隔离器用于对输入信号进行转换输出;

[0045] 其中,负载包括非反射型量子放大器或预设阻值的电阻,且至少一个负载为非反

射型量子放大器。

[0046] 在一种示例性实例中,当剩余端口包括两个端口时,剩余端口中的一个端口和剩余端口中的另一个端口之间连接一个以上级联的非反射型量子放大器,用于对来自环行器的信号进行逐级放大后送回环行器。这种情况下,进一步地,输出端口还可以进一步连接一个以上级联的非反射型量子放大器,用于将输出端口输出的信号逐级放大后输出。

[0047] 在一种示例性实例中,当剩余端口包括两个端口时,剩余端口中的一个端口可以连接一反射型量子放大器,剩余端口中的另一个端口可以连接一反射型量子放大器。这种情况下,进一步地,输出端口还可以进一步连接一个以上级联的非反射型量子放大器,用于将输出端口输出的信号逐级放大后输出。

[0048] 在一种示例性实例中,当剩余端口包括至少三个奇数个端口时,剩余端口包括的一对以上剩余端口中,每对剩余端口中的一个端口和该对剩余端口中的另一个端口之间连接一个以上级联的非反射型量子放大器,用于对来自环行器的信号进行逐级放大后送回环行器;其余的剩余端口连接预设阻值的电阻。这种情况下,进一步地,输出端口还可以进一步连接一个以上级联的非反射型量子放大器,用于将输出端口输出的信号逐级放大后输出。

[0049] 在一种示例性实例中,当剩余端口包括至少三个奇数个端口时,剩余端口包括的一对以上剩余端口中,对于部分成对的剩余端口,每对剩余端口中的一个端口和该对剩余端口中的另一个端口之间连接一个以上级联的非反射型量子放大器,用于对来自环行器的信号进行逐级放大后送回环行器;对于另一部分成对的剩余端口,每对剩余端口中的一个端口可以连接一反射型量子放大器,另一个端口可以连接一反射型量子放大器;其余的剩余端口连接预设阻值的电阻。这种情况下,进一步地,输出端口还可以进一步连接一个以上级联的非反射型量子放大器,用于将输出端口输出的信号逐级放大后输出。

[0050] 在一种示例性实例中,隔离器可以由多端口的片上超导环行器构成,其中一个端口用于级联环行器或隔离器,其中一个端口用于作为片上量子放大器的一个输入/输出端口或者用于级联隔离器或环行器,剩余端口阻抗匹配负载,分别连接预设阻值的电阻。

[0051] 在一种示例性实例中,隔离器为三端口的片上超导环行器,其中一个端口用于级联环行器或隔离器,其中一个端口用于作为片上量子放大器的一个输入/输出端口或者用于级联隔离器或环行器,一个端口阻抗匹配负载;在一种示例性实例中,隔离器为四端口的片上超导环行器,其中一个端口用于级联环行器或隔离器,其中一个端口用于作为片上量子放大器的一个输入/输出端口或者用于级联隔离器或环行器,另外两个端口分别阻抗匹配负载。

[0052] 图2(a)为本申请实施例中片上量子放大器的一种实施例的组成结构示意图,本实施例以片上量子放大器包括一个连接有非反射型量子放大器的环行器和两个隔离器构成为例,如图2(a)所示,以四端口片上超导环行器为例,按照逆时针方向,四端口片上超导环行器的四个端口分别包括第一端口、第二端口、第三端口和第四端口,其中,第二端口和第三端口之间连接至少一个非反射型量子放大器,第一端口连接第一隔离器,第四端口连接第二隔离器,第一隔离器的输入端口为本实施例中片上量子放大器的输入端口,第二隔离器的输出端口为本实施例中片上量子放大器的输出端口。

[0053] 图2(b)为本申请实施例中片上量子放大器的另一种实施例的组成结构示意图,本

实施例以片上量子放大器包括一个连接有非反射型量子放大器的环行器和两个隔离器构成为例,如图2(b)所示,以四端口片上超导环行器为例,按照逆时针方向,四端口片上超导环行器的四个端口分别包括第一端口、第二端口、第三端口和第四端口,其中,第二端口和第三端口之间连接至少一个非反射型量子放大器,第四端口连接至少一个非反射型量子放大器;第一端口连接第一隔离器,第四端口上连接的非反射型量子放大器中最后一个非反射型量子放大器的输出端口连接第二隔离器,第一隔离器的输入端口为本实施例中片上量子放大器的输入端口,第二隔离器的输出端口为本实施例中片上量子放大器的输出端口。

[0054] 经过匹配阻抗的端口的信号会被阻抗吸收,因此,为了保证信号能经过本申请片上量子放大器的放大后输出,如果剩余端口中包括一个连接阻抗的端口,那么,这个端口为多端口环行器上按照逆时针方向排列的最后一个端口,如果剩余端口中包括两个以上连接阻抗的端口,这两个以上端口依次包括多端口环行器上按照逆时针方向排列的最后一个端口和倒数第二个端口、倒数第三个端口...,以此类推。图2(c)为本申请实施例中片上量子放大器的又一种实施例的组成结构示意图,本实施例以片上量子放大器包括一个连接有非反射型量子放大器的环行器和两个隔离器构成为例,如图2(c)所示,为了示意简单,以五端口环行器为例,按照逆时针方向,该五端口环行器的五个端口分别包括第一端口、第二端口、第三端口、第四端口和第五端口,其中,第一端口连接第一隔离器,第一隔离器的输入端口为本实施例中片上量子放大器的输入端口,第四端口连接第二隔离器,第二隔离器的输出端口为本实施例中片上量子放大器的输出端口;第二端口和第三端口为一对剩余端口,在第二端口和第三端口之间连接至少一个非反射型量子放大器;第五端口连接一预设阻值的电阻,且这个连接阻抗的第五端口为环行器上按照逆时针方向排列的最后一个端口。

[0055] 图2(d)为本申请实施例中片上量子放大器的再一种实施例的组成结构示意图,本实施例以片上量子放大器包括一个连接有非反射型量子放大器的环行器和两个隔离器构成为例,如图2(d)所示,为了示意简单,以五端口环行器为例,按照逆时针方向,该五端口环行器的五个端口分别包括第一端口、第二端口、第三端口、第四端口和第五端口,其中,第一端口连接第一隔离器,第一隔离器的输入端口为本实施例中片上量子放大器的输入端口,第四端口上连接有至少一个非反射型量子放大器,这些与第四端口连接的非反射型量子放大器中最后一个非反射型量子放大器的输出端口连接第二隔离器,第二隔离器的输出端口为本实施例中片上量子放大器的输出端口;第二端口和第三端口为一对剩余端口,在第二端口和第三端口之间连接至少一个非反射型量子放大器;第五端口连接一预设阻值的电阻,且这个连接阻抗的第五端口为环行器上按照逆时针方向排列的最后一个端口。图2(d)与图2(c)的区别仅在于:图2(d)中,在环行器的第四端口上连接有至少一个非反射型量子放大器,这些与第四端口连接的非反射型量子放大器中最后一个非反射型量子放大器的输出端口连接第二隔离器,第二隔离器的输出端口为本实施例中片上量子放大器的输出端口。

[0056] 本申请实施例提供的具有强隔离功能的片上量子放大器可以包括多级,通过输入端口和输出端口级联组成,下文将结合图5所示实施例介绍。

[0057] 在一种示例性实例中,预设阻值可以为50欧姆。在其他一些实施例中,用户可根据实际情况自行设置该阻值。

[0058] 在一种示例性实例中,非反射型量子放大器可以包括如:行波参量放大器(TWPA,

Traveling Wave Parametric Amplifier),或其他非反射型放大器等。

[0059] 在一种示例性实例中,当非反射型量子放大器包括两个以上时,不同的非反射型量子放大器的放大倍数可以相同,也可以不同,也可以是部分相同,还可以是部分不相同。

[0060] 在一种示例性实例中,当非反射型量子放大器包括两个以上时,不同的非反射型量子放大器的带宽可以相同,也可以不同,也可以是部分相同,还可以是部分不相同。

[0061] 本申请实施例提供的具有强隔离功能的片上量子放大器可取代HEMT。如果100万个Qubits,10个一组测试,一组需要一个HEMT,一个HEMT是5万元,那么,对100万个Qubits的测试需要10万组共50亿元,而采用本申请实施例提供的片上量子放大器,由于可以不需要HEMT,因此,可以直接省掉50亿元,大大节省了量子计算机以及超导量子测试系统的成本。

[0062] 本申请实施例提供的具有强隔离功能的片上量子放大器为具有强隔离功能、环形功能和放大功能的两端口片上器件,体积小、耗散低,具有非互易性。本申请实施例提供的具有强隔离功能的片上量子放大器,不仅增加了放大器的增益带宽积,还具有强隔离功能,同时可取代HEMT,极大的降低了超导量子计算机及其测试系统的成本。本申请实施例提供的具有强隔离功能的片上量子放大器能与量子芯片直接相连,保护量子芯片免受后续电路的反作用干扰。基于本申请实施例提供的具有强隔离功能的片上量子放大器,不仅简化了超导量子测试系统,而且显著缩小了超导量子测试系统的体积,有利于超导量子计算机的规模化发展。

[0063] 本申请实施例提供的具有强隔离功能的片上量子放大器(QA, Quantum Amplifier)是一个两端口器件,第一个环形器的输入端口为QA的输入端口,最后一个环形器的输出端口为QA的输出端口。

[0064] 图3(a)为本申请实施例中一种四端口片上超导环形器构成的具有强隔离功能的片上量子放大器的组成结构示意图,本实施例以片上量子放大器包括一个连接有非反射型量子放大器的四端口环形器和两个隔离器构成为例,在一种实施例中,以四端口片上超导环形器为例,如图3(a)所示,按照逆时针方向,本申请实施例中的片上超导环形器的四个端口分别包括第一端口、第二端口、第三端口和第四端口,其中,第二端口和第三端口之间连接一非反射型量子放大器,第四端口上连接有一非反射型量子放大器,第一端口连接第一隔离器,第四端口连接第二隔离器,第一隔离器的输入端口为本实施例中片上量子放大器的输入端口,第二隔离器的输出端口为本实施例中片上量子放大器的输出端口。

[0065] 图3(b)为本申请实施例中另一种四端口片上超导环形器构成的具有强隔离功能的片上量子放大器的组成结构示意图,本实施例以片上量子放大器包括一个连接有非反射型量子放大器的四端口环形器和两个隔离器构成为例,在一种实施例中,以五端口环形器为例,如图3(b)所示,按照逆时针方向,本申请实施例中的片上超导环形器的五个端口分别包括第一端口、第二端口、第三端口、第四端口和第五端口,其中,第二端口和第三端口之间连接一非反射型量子放大器,第五端口连接一阻抗,第四端口上连接有一非反射型量子放大器,第一端口连接第一隔离器,第四端口上连接的非反射型量子放大器的输出端口连接第二隔离器,第一隔离器的输入端口为本实施例中片上量子放大器的输入端口,第二隔离器的输出端口为本实施例中片上量子放大器的输出端口。

[0066] 图4(a)为本申请中一种片上量子放大器的实施例的组成结构示意图,如图4(a)所示,片上量子放大器包括集成在一颗芯片上的一个环形器、两个分别位于环形器左右两侧

的第一隔离器和第二隔离器、两个非反射型量子放大器,其中,以环行器为四端口的片上超导环行器为例,按照逆时针方向,本申请实施例中的片上超导环行器的四个端口分别包括第一端口、第二端口、第三端口、第四端口。环行器连接有两个非反射型量子放大器(如图4(a)中的第一量子放大器和第二量子放大器),第一量子放大器连接在环行器的用于连接负载的第二端口和第三端口之间,第二量子放大器连接在环行器的第四端口上;第一隔离器的一个端口为输入In端口,另一个端口用于连接环行器的第一端口,第二隔离器的一个端口用于连接环行器的第四端口上的第二量子放大器的输出端口,另一个端口为输出Out端口。图4(a)所示的片上量子放大器可以称为片上具有两级隔离的两级量子放大器(TQATI, Two-stage Quantum Amplifier with Two-stage Isolation),TQATI是一个两端口器件,第一隔离器的输入端口为TQATI的输入端口,第二隔离器的输出端口为TQATI的输出端口。

[0067] 图4(b)为本申请中另一种片上量子放大器的实施例的组成结构示意图,如图4(b)所示,片上量子放大器包括集成在一颗芯片上的一个环行器、两个分别位于环行器左右两侧的第一隔离器和第二隔离器、两个反射型量子放大器和一个非反射型量子放大器,其中,以环行器为四端口的片上超导环行器为例,按照逆时针方向,本申请实施例中的片上超导环行器的四个端口分别包括第一端口、第二端口、第三端口、第四端口。环行器连接有两个反射型量子放大器(如图4(b)中的第I量子放大器和第II量子放大器)和一个非反射型量子放大器(如图4(b)中的第III量子放大器),其中,第I量子放大器连接在环行器的用于连接负载的第二端口上,第II量子放大器连接在环行器的用于连接负载的第三端口上,第III量子放大器连接在环行器的第四端口上;第一隔离器的一个端口为输入In端口,另一个端口用于连接环行器的第一端口,第二隔离器的一个端口用于连接环行器的第四端口上的第二量子放大器的输出端口,另一个端口为输出Out端口。图4(b)所示的片上量子放大器可以称为片上具有两级隔离的两级量子放大器(TQATI, Two-stage Quantum Amplifier with Two-stage Isolation),TQATI是一个两端口器件,第一隔离器的输入端口为TQATI的输入端口,第二隔离器的输出端口为TQATI的输出端口。

[0068] 相关技术中的量子放大器,如果想要较大的增益,只能在更窄的带宽范围内工作,如果想要在更宽的带宽范围内工作,那么,增益就会降低,否则会造成放大后的输入信号的失真。而本申请实施例提供的具有强隔离功能的片上量子放大器,不需要担心增益和带宽问题,实现了按照所需的带宽和增益随意调节。

[0069] 以图4(a)所示的一种片上量子放大器为例,也就是以包括一个环行器和两个非反射型量子放大器的集成在一颗芯片上的片上量子放大器为例:

[0070] 假设两个非反射型量子放大器即第一量子放大器和第二量子放大器的带宽相同时,放大倍数分别为 a_1 和 a_2 。如图4(a)所示,量子信号从量子芯片输出至TQATI,量子信息通过第11端口进入第一个隔离器,从第12端口输出,从第一端口进入环行器,再通过第二端口进入至第一量子放大器;量子信号经过第一个量子放大器放大 a_1 倍,再通过第三端口返回环行器,通过第三端口再次进入环行器,再经过第四端口进入到第二个量子放大器,经第二量子放大器放大后输出,此时量子信号经过了两次放大,量子信号被放大了 $a_1 a_2$ 倍,也即增益变为之前的 $a_1 a_2$ 倍,将增益取对数即为 $10[\lg(a_1) + \lg(a_2)]$ 分贝(dB),同时增益带宽积也变为之前的 $a_1 a_2$ 倍,将增益带宽积取对数即为 $10[\lg(a_1) + \lg(a_2)]$ dB;之后,量子信号通过第21端口进入第二个隔离器,再从第22端口最终输出TQATI。

[0071] 如果连接在第二端口和第三端口的第一量子放大器包括多个串联的量子放大器如包括p个(如图2(b)所示的情况),放大倍数分别为 a_{11} 、 a_{12} ... a_{1p} ,那么, $a_1 = a_{11} \times a_{12} \times \dots \times a_{1p}$,和/或,如果连接在第四端口上的第二量子放大器包括多个串联的量子放大器如包括q个(如图2(b)所示的情况),放大倍数分别为 a_{21} 、 a_{22} ... a_{2q} ,那么, $a_2 = a_{21} \times a_{22} \times \dots \times a_{2q}$ 。这种情况下的片上量子放大器可以称为是一种片上具有非互易性的具有多级隔离度的多级量子放大器(MQAMI, Multistage quantum amplifier with multilevel isolation)。

[0072] 假设两个非反射型量子放大器的放大倍数相同,均放大m倍,也即增益相同时,以第一个量子放大器带宽范围为 $f_1^{low} \sim f_1^{high}$ GHz,第二个量子放大器带宽范围为 $f_2^{low} \sim f_2^{high}$ GHz,量子信号从量子芯片输出至TQATI,量子信号第11端口进入第一个隔离器,从第12端口输出,通过第一端口进入环行器,再通过第二端口进入至第一个量子放大器;量子信号经过第一量子放大器放大m倍,带宽范围为 $f_1^{low} \sim f_1^{high}$ GHz,带宽为 $\Delta f_1 = f_1^{high} - f_1^{low}$ GHz,再通过第三端口返回环行器,通过第三端口再次进入环行器,再经过第四端口进入到第二量子放大器,此时量子信号经过了两次放大,带宽范围变为 $f_1^{low} \sim f_1^{high}$, $f_2^{low} \sim f_2^{high}$ GHz,带宽为 $\Delta f = \Delta f_1 + \Delta f_2$,其中, $\Delta f_2 = f_2^{high} - f_2^{low}$, $\Delta f_1 = f_1^{high} - f_1^{low}$ GHz,同时增益带宽积也变为之前的 $m \Delta f$ GHz,将增益带宽积取对数即为 $10 \Delta f \lg(m)$ dB;之后,量子信号通过第21端口进入第二个隔离器,再从第22端口最终输出TQATI。

[0073] 相关技术中的一级独立器件的量子放大器,其GBP是一个定值。当带宽增加时,增益变小,当带宽减少时,增益变大。而本申请实施例提供的TQATI,当带宽一定时,增益变为之前的 $a_1 a_2$ 倍,也即增益带宽积变为之前的 $a_1 a_2$ 倍;当增益一定时,也即放大倍数一定时,带宽变为 Δf GHz,增益带宽积也变为之前的 $m \Delta f$ GHz,将增益带宽积取对数即为 $10 \Delta f \lg(m)$ dB。从上述分析可见,无论是带宽一定的方式还是增益一定的方式,带宽增益积都变大了,也就是说提升了量子放大器的性能,不仅如此,由于级联了隔离器,该片上量子放大器还具有强隔离功能,连接在左侧的隔离器用于避免量子放大器对输入量子信号的反作用干扰,连接在右侧的隔离器用于防止输出端的外电路的干扰。而且,本申请实施例提供的TQATI的带宽和增益实现了按需调整,更加灵活,更加有利于超导量子计算机的规模化发展。

[0074] 量子放大器是超导量子计算中极低温区量子比特读出电路的关键器件。但是,当相关技术中的一级独立器件的量子放大器用于更大规模的量子算法和容错量子计算时,其带宽和增益受到了极大限制。而本申请实施例提供的具有强隔离功能的片上两级量子放大器,具有更大的带宽和增益,而且本申请实施例提供的片上量子放大器甚至可以连同代替将相关技术超导量子测试系统中的高电子迁移率晶体管(HEMT, High-Electron Mobility Transistor)放大器,也就是说,采用本申请实施例提供的片上量子放大器的超导量子测试系统中不需要HEMT放大器,更加有利于超导量子计算机的规模化发展。

[0075] 如果100万个Qubits,10个一组测试,一组需要一个HEMT,一个HEMT是5万元,那么,

对100万个Qubits的测试需要10万组共50亿元,而采用本申请实施例提供的片上量子放大器,由于可以不需要HEMT,因此,可以直接省掉50亿元,大大节省了量子计算机以及超导量子测试系统的成本。

[0076] 图5为本申请中另一种片上量子放大器的实施例的组成结构示意图,如图5所示,本实施例中的片上量子放大器包括两个以上环行器、两个以上隔离器、二的倍数个以上非反射型量子放大器集成在一颗芯片上的片上量子放大器,每个环行器连接有两个非反射型量子放大器。图5所示的片上量子放大器是另一种形式的片上具有多级隔离度的多级量子放大器(MQAMI, Multistage quantum amplifier with multilevel isolation)。仍以四端口环行器为例,按照逆时针方向,本申请实施例中的片上超导环行器的四个端口分别包括第一端口、第二端口、第三端口、第四端口,如图4所示,包括: N_{IL} 个隔离器、 N_C 个环行器、 N_A 个非反射型量子放大器、 N_{IR} 个隔离器,其中 N_{IL} 、 N_C 、 N_A 、 N_{IR} 为整数, $N_{IL} \geq 1$ 、 $N_C \geq 2$ 、 $N_A \geq 2$ 、 $N_{IR} \geq 1$ 。

[0077] 图5所示的MQAMI是一个两端口的集成器件,其内部构成包括:位于左半部分的左侧第一隔离器的第11端口作为MQAMI的输入In端口,通过左侧第一隔离器的第12端口实现后面($N_{IL} - 1$)个隔离器依次级联。第 N_{IL} 隔离器的第12端口与第一环行器的端口a相连, N_{IL} 个隔离器的其他两个端口均与匹配阻抗如预设阻值为50欧姆的电阻连接。第一环行器的端口b与端口c之间连接第一量子放大器,第一环行器的端口d上连接第二量子放大器,第二量子放大器的输出端口实现后面($N_C - 1$)个环行器依次级联。第 N_C 个环行器的端口d上连接的第二量子放大器的输出端口与位于右半部分的右侧第一个隔离器的第11端口相连,通过右侧第一个隔离器的第12端口实现后面($N_{IR} - 1$)个隔离器依次级联,第 N_{IR} 隔离器的第12端口作为MQAMI的输出Out端口, N_{IR} 个隔离器的其他两个端口均与匹配阻抗如预设阻值为50欧姆的电阻连接。

[0078] 在一种示例性实例中,进一步地,在不同的环行器之间也可以进一步设置一个或多个隔离器。如图6所示,图6为本申请再一种片上量子放大器的实施例的组成结构示意图,图6所示的MQAMI是一个两端口的集成器件,其内部结构与图5不同的是:在 N_C 个级联的环行器中,在不同的环行器之间还连接有一个以上隔离器,为了图示简洁,图6中仅示出在两个环行器之间连接有一个隔离器,这并不用于限定本申请实施例中隔离器在环行器之间的链接位置,也不用于限定环行器之间连接的隔离器的数量,这里仅仅是一个示例。

[0079] 如图5所示,假设 N_A 个非反射型量子放大器的带宽相同时,放大倍数分别为 a_1 、 a_2 、 \dots 、 a_{N_A} 倍。量子信号从量子芯片输出至MQAMI,通过左侧第一隔离器的第11端口进入左侧第一隔离器,再通过左侧第一隔离器的第12端口实现与后面($N_{IL} - 1$)个隔离器依次传输至第 N_{IL} 隔离器,通过第 N_{IL} 隔离器的第12端口输入至第一环行器的端口a;量子信息从端口a传输到端口b,再通过端口b进入至第一量子放大器;量子信号经过第一量子放大器放大 a_1 倍,再通过端口c返回环行器,通过端口c再次进入环行器,再经过端口d进入到第二量子放大器,此时量子信号经过了两次放大,原量子信号被放大 $a_1 a_2$ 倍;经第二量子放大器放大后进入第二环行器,依次经过第二环行器中的第三放大器和第四放大器后,原量子信号被放大 $a_1 a_2 a_3 a_4$ 倍,就这样一级一级传输下去,当量子信号进入第 N_C 环行器时,依次经过第($N_A - 1$)量子放大器、第 N_A 量子放大器后,原量子信号被放大 $\prod_{i=1}^{N_A} a_i$ 倍,也即增益变为之前的

$\prod_{i=1}^{N_A} a_i$ 倍, 将增益取对数即为 $10 \sum_{i=1}^{N_A} \lg(a_i)$ dB。原量子信号被放大了 $\prod_{i=1}^{N_A} a_i$ 后, 通过第 N_C 环行器的端口 d 传输至位于右半部分的右侧第一隔离器的第 11 端口, 再经过右侧第一隔离器的第 12 端口实现与后面 $(N_{IR}-1)$ 个隔离器依次传输, 最终量子信号从第 N_{IR} 隔离器的第 12 端口输出 MQAMI。

[0080] 以第一环行器为例, 如果连接在端口 b 和端口 c 的第一量子放大器包括多个串联的量子放大器如包括 p 个 (如图 1 (b) 所示的情况), 放大倍数分别为 a_{11} 、 $a_{12} \cdots a_{1p}$, 那么, $a_1 = a_{11} \times a_{12} \times \cdots \times a_{1p}$, 和/或, 如果连接在端口 d 上的第二量子放大器包括多个串联的量子放大器如包括 q 个 (如图 1 (b) 所示的情况), 放大倍数分别为 a_{21} 、 $a_{22} \cdots a_{2q}$, 那么, $a_2 = a_{21} \times a_{22} \times \cdots \times a_{2q}$ 。

[0081] 假设 N_A 个非反射型量子放大器的放大倍数相同, 均放大 m 倍, 也即增益相同时, 带宽范围分别为 $f_1^{low} \sim f_1^{high}$ GHz、 $f_2^{low} \sim f_2^{high}$ GHz、 \dots 、 $f_{N_A}^{low} \sim f_{N_A}^{high}$ GHz。量子信号从量子

芯片输出至 MQAMI, 量子信息通过左侧第一隔离器的第 11 端口进入左侧第一隔离器, 再通过左侧第一隔离器的第 12 端口实现与后面 $(N_{IL}-1)$ 个隔离器依次传输至第 N_{IL} 隔离器, 通过第 N_{IL} 隔离器的第 12 端口输入至第一环行器的端口 a; 量子信息从端口 a 传输到端口 b, 再通过端口 b 进入至第一量子放大器; 量子信号经过第一个量子放大器放大 m 倍, 带宽范围为

$f_1^{low} \sim f_1^{high}$ GHz, 带宽为 $\Delta f_1 = f_1^{high} - f_1^{low}$ GHz, 再通过端口 c 返回环行器, 通过端口 c 再次进入环行器, 再经过端口 d 进入到第二个量子放大器, 此时量子信号经过了两次放大,

原量子信号带宽范围变为 $f_1^{low} \sim f_1^{high}$, $f_2^{low} \sim f_2^{high}$ GHz, 带宽为

$\Delta f_{c_1} = \Delta f_1 + \Delta f_2$ GHz, 其中, $\Delta f_2 = f_2^{high} - f_1^{low}$, $\Delta f_1 = f_1^{high} - f_1^{low}$ GHz。经第二

量子放大器放大后的量子信号进入第二环行器, 依次经过第二环行器中的第三量子放大器和第四量子放大器后, 原量子信号带宽变为 $\Delta f_{c_2} = \Delta f_1 + \Delta f_2 + \Delta f_3 + \Delta f_4$ GHz, 就这

样一级一级传输下去, 当量子信号进入第 N_C 环行器时, 依次经过第 (N_A-1) 量子放大器、第 N_A

量子放大器, 原量子信号带宽变为 $\Delta f_{c_{N_C}} = \sum_{i=1}^{N_A} \Delta f_i$ GHz, 也即增益带宽积也变为之前的

$m \Delta f_{c_{N_C}}$ GHz, 将增益带宽积取对数即为 $10 \Delta f_{c_{N_C}} \lg(m)$ dB。原量子信号被放大了增益

带宽积变为之前的 $m \Delta f_{c_{N_C}}$ GHz 后, 通过第 N_C 环行器的端口 d 传输至位于右半部分的右侧

第一隔离器的第 11 端口, 再经过右侧第一隔离器的第 12 端口实现与后面 $(N_{IR}-1)$ 个隔离器依次传输, 最终量子信号从第 N_{IR} 隔离器的第 12 端口输出 MQAMI。

[0082] 相关技术中的一级独立器件的量子放大器, 其 GBP 是一个定值。当带宽增加时, 增益变小, 当带宽减少时, 增益变大。而本申请实施例提供的 MQAMI, 当带宽一定时, 增益变为

之前的 $\prod_{i=1}^{N_A} a_i$ 倍,将增益取对数即为 $10 \sum_{i=1}^{N_A} \lg(a_i)$ dB。当增益一定时,也即放大倍数一定时,原量子信号带宽变为 $\Delta f_{c_{N_C}} = \sum_{i=1}^{N_A} \Delta f_i$ GHz,也即增益带宽积也变为之前的 $m \Delta f_{c_{N_C}}$ GHz,将增益带宽积取对数即为 $10 \Delta f_{c_{N_C}} \lg(m)$ dB。从上述分析可见,无论是带宽一定的方式还是增益一定的方式,带宽增益积都变大了,也就是说提升了量子放大器的性能。而且,本申请实施例提供的MQAMI的带宽实现了按需调整,更加灵活,更加有利于超导量子计算机的规模化发展。

[0083] 量子放大器是超导量子计算中极低温区量子比特读出电路的关键器件。但是,当相关技术中的一级独立器件的量子放大器用于更大规模的量子算法和容错量子计算时,其带宽和增益受到了极大限制。而本申请实施例提供的具有强隔离功能的片上多级量子放大器,具有更大的带宽和增益,而且本申请实施例提供的具有强隔离功能的片上量子放大器甚至可以连同代替将相关技术超导量子测试系统中的高电子迁移率晶体管 (HEMT, High-Electron Mobility Transistor) 放大器,也就是说,采用本申请实施例提供的具有强隔离功能的片上量子放大器的超导量子测试系统中不需要HEMT放大器,更加有利于超导量子计算机的规模化发展。

[0084] 虽然本申请所揭露的实施方式如上,但所述的内容仅为便于理解本申请而采用的实施方式,并非用以限定本申请。任何本申请所属领域内的技术人员,在不脱离本申请所揭露的精神和范围的前提下,可以在实施的形式及细节上进行任何的修改与变化,但本申请的专利保护范围,仍须以所附的权利要求书所界定的范围为准。

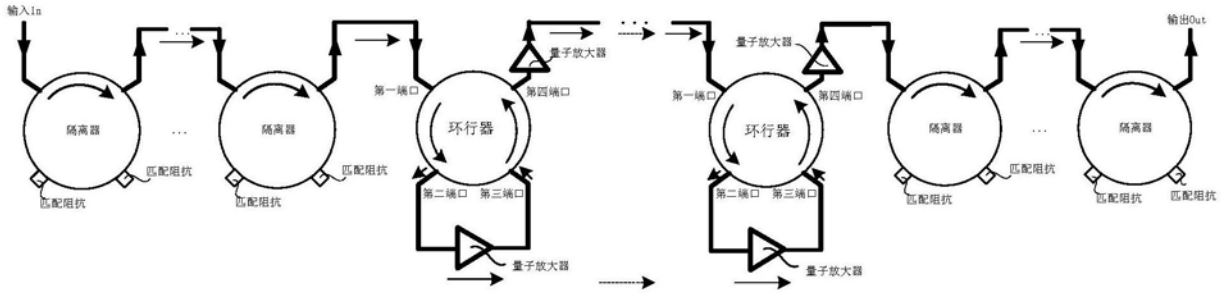


图1

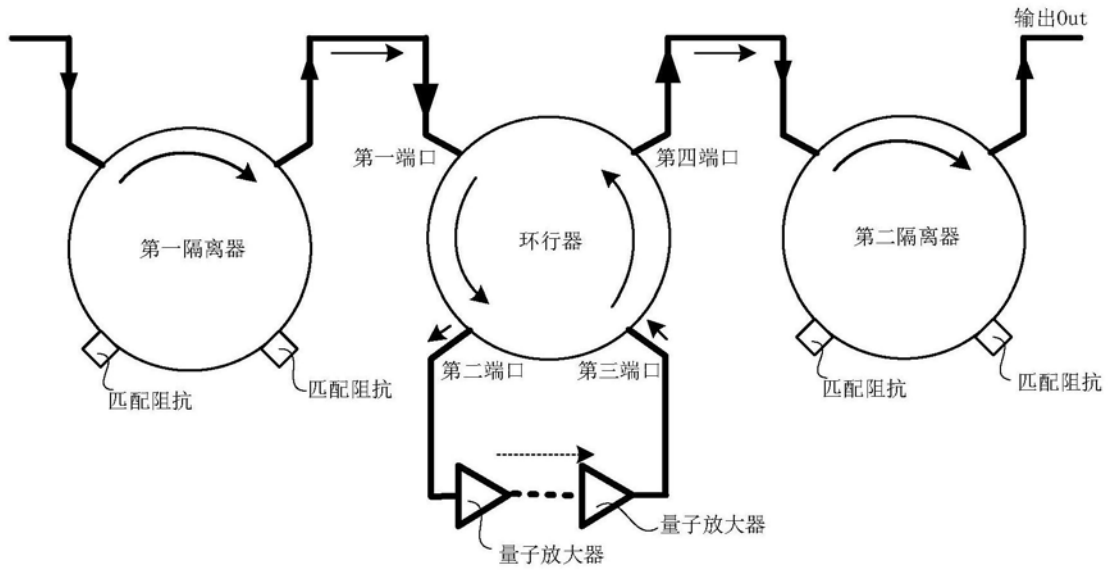


图2 (a)

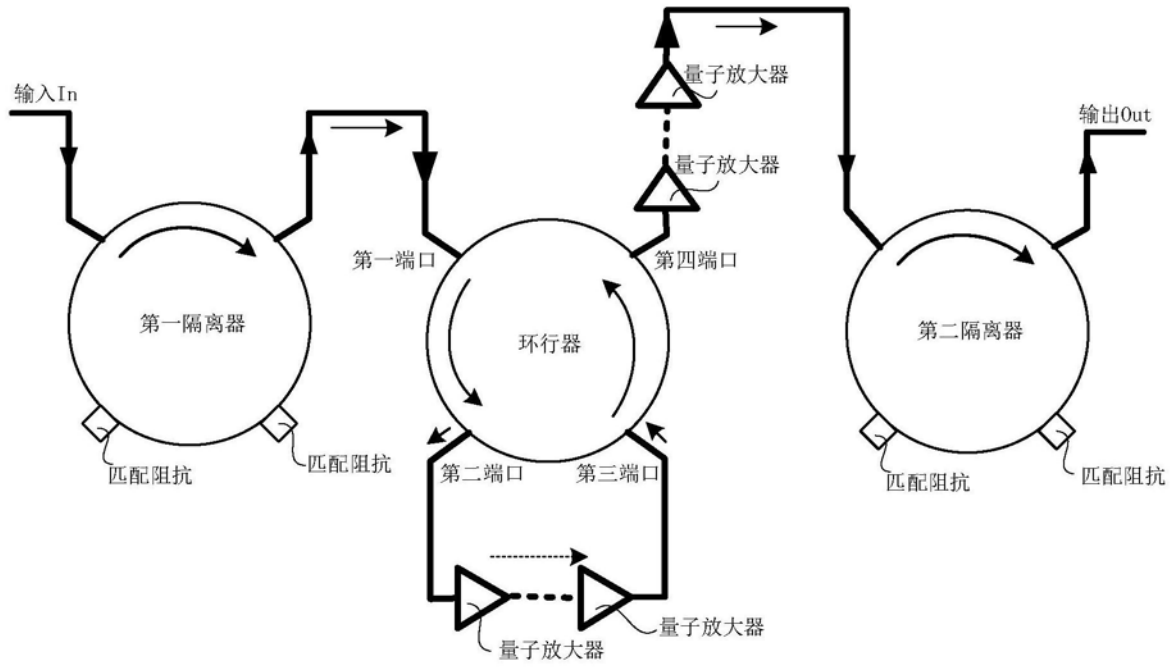


图2 (b)

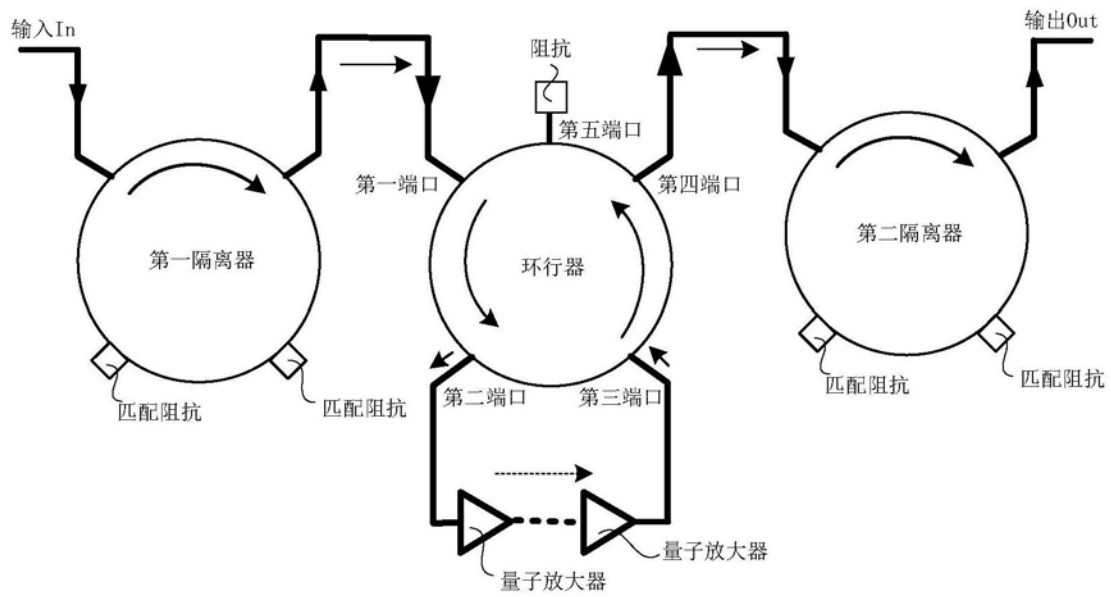


图2 (c)

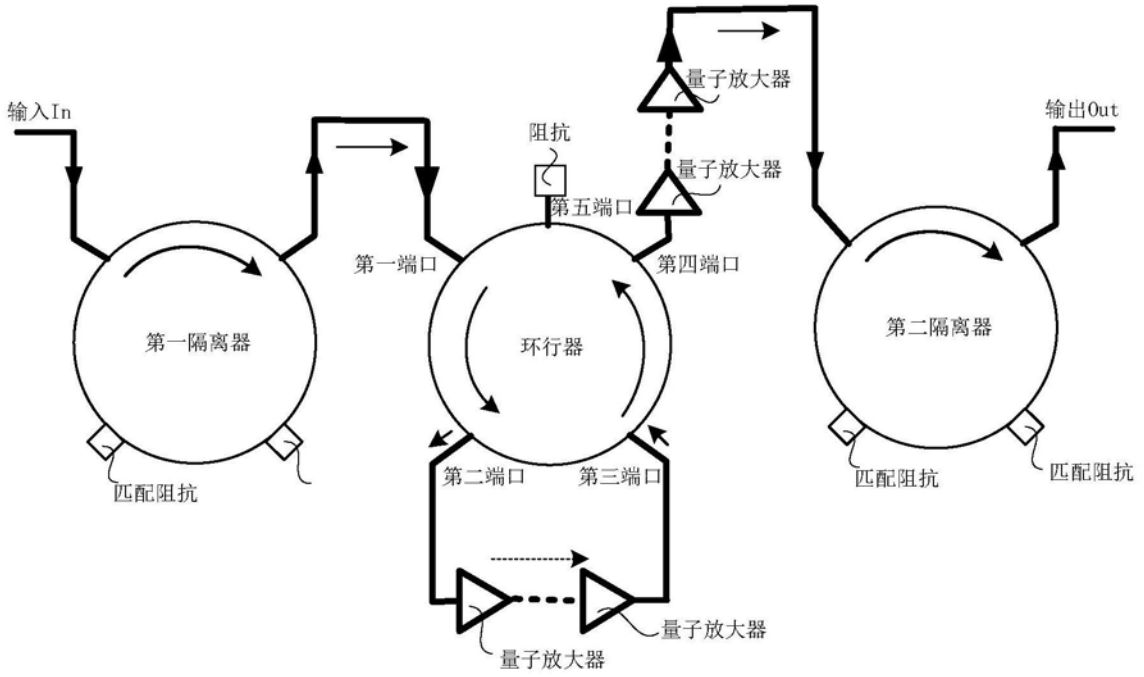


图2 (d)

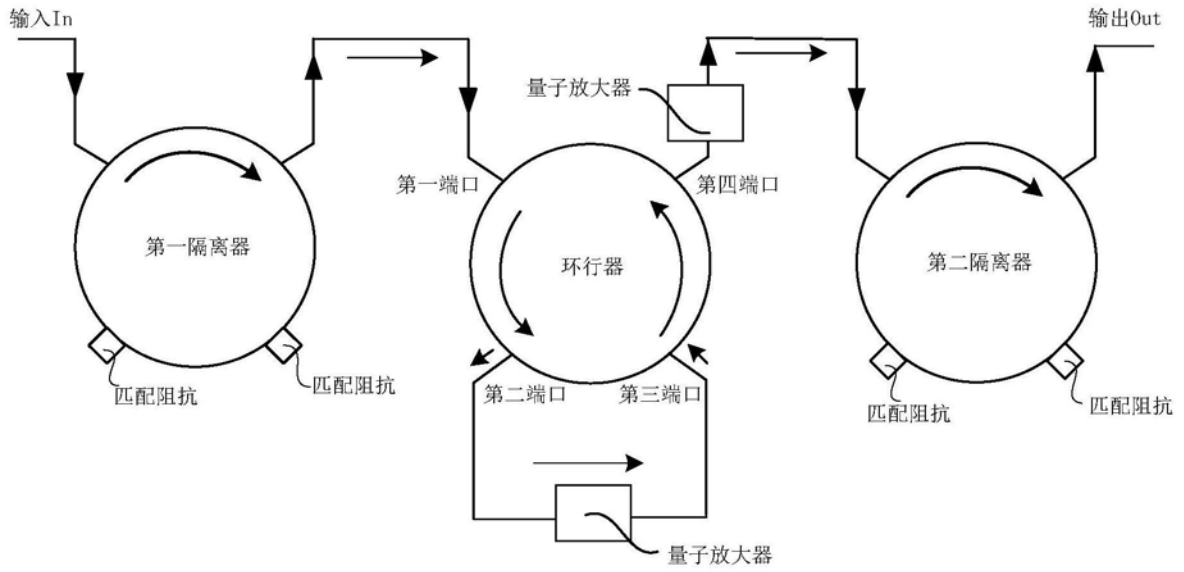


图3 (a)

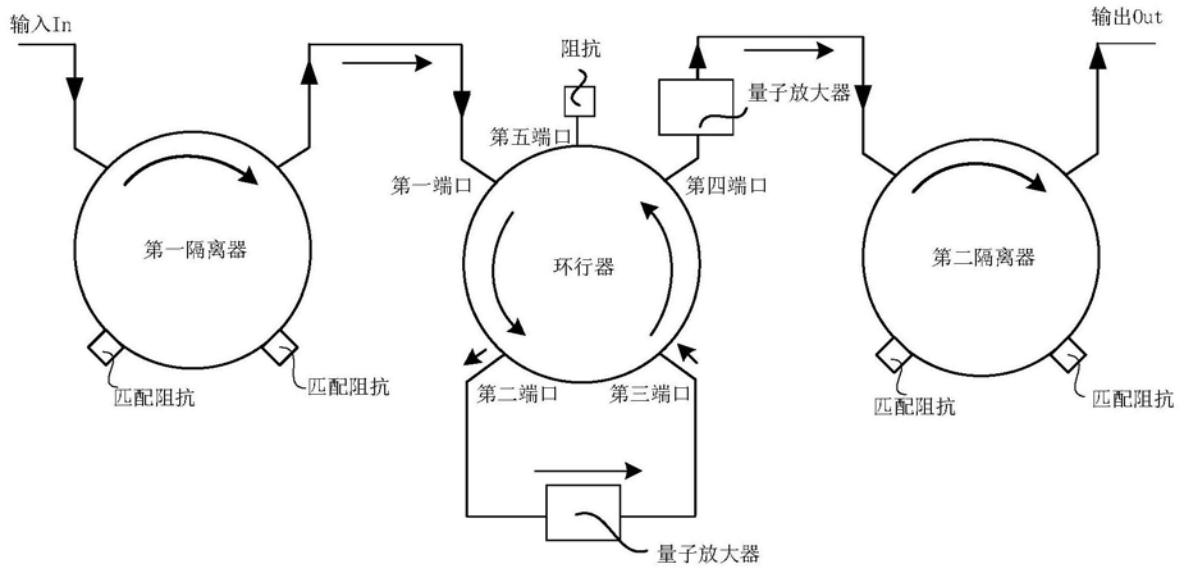


图3 (b)

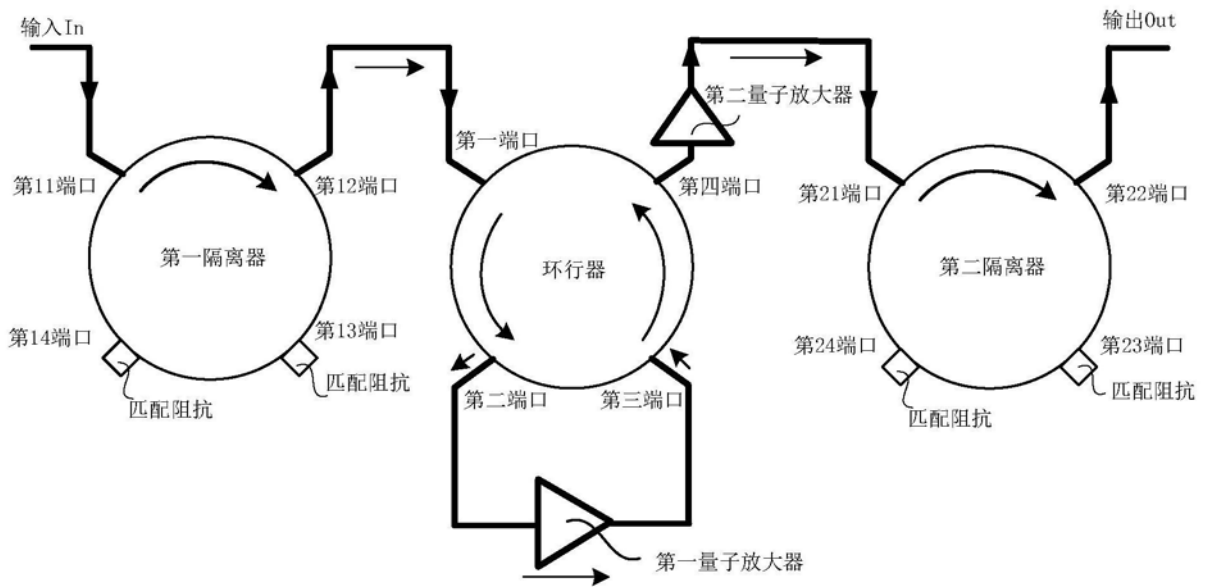


图4 (a)

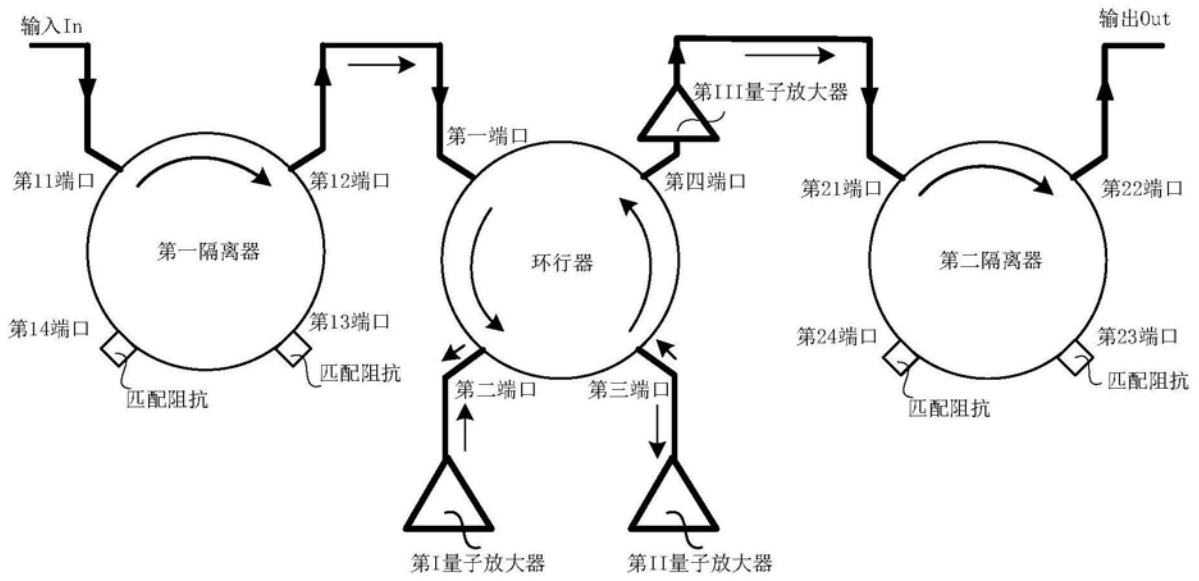


图4 (b)

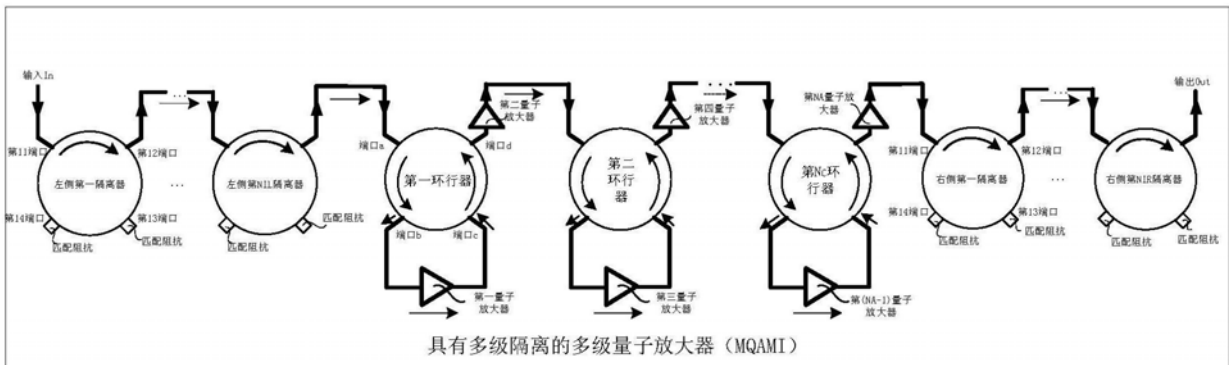


图5

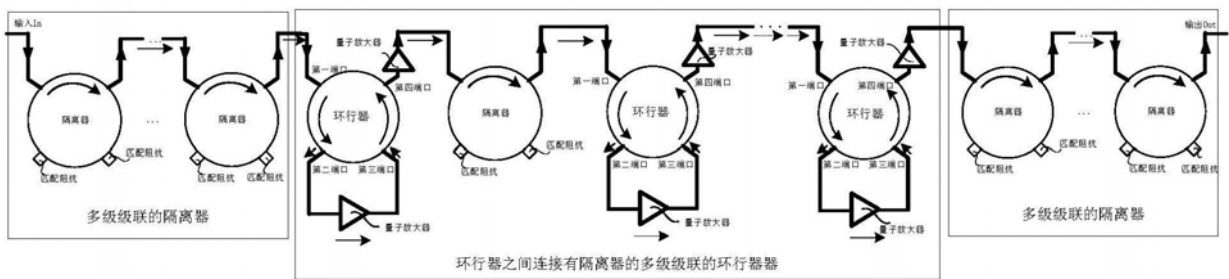


图6