(12) 按照专利合作条约所公布的国际申请

(19) 世界知识产权组织
国 际 局

(43) 国际公布日
2023 年 12 月 28 日 (28.12.2023)

WIPO | PCT

(10) 国际公布号
WO 2023/246271 A1

(51) 国际专利分类号:
G06N 10/20 (2022.01) *G06N 10/40* (2022.01)

(21) 国际申请号: PCT/CN2023/089663

(22) 国际申请日: 2023 年 4 月 21 日 (21.04.2023)

(25) 申请语言: 中文

(26) 公布语言: 中文

(30) 优先权:
202210723073.8 2022年6月24日 (24.06.2022) CN

(71) 申请人:深圳国际量子研究院(**SHENZHEN INTERNATIONAL QUANTUM ACADEMY**) [CN/CN]; 中国广东省深圳市福田区福保街道福田保税区槟榔道10号, Guangdong 518045 (CN)。

(72) 发明人:钟有鹏(**ZHONG, Youpeng**); 中国广东省深圳市福田区福保街道福田保税区槟榔道10号, Guangdong 518045 (CN)。 刘松(**LIU, Song**); 中国广东省深圳市福田区福保街道福田保税区槟榔道10号, Guangdong 518045 (CN)。 俞大鹏(**YU, Dapeng**); 中国广东省深圳市福田区福保街道福田保税区槟榔道10号, Guangdong 518045 (CN)。 牛晶晶(**NIU, Jingjing**); 中国广东省深圳市福田区福保街道福田保税区槟榔道10号, Guangdong 518045 (CN)。 张礼博(**ZHANG, Libo**); 中国广东省深圳市福田区福保街道福田保税区槟榔道10号, Guangdong 518045 (CN)。

(74) 代理人: 北京纪凯知识产权代理有限公司等 (**JEEKAI & PARTNERS** et al.); 中国北京市丰台区广安路9号国投财富广场5号楼15A, Beijing 100055 (CN)。

(81) 指定国(除另有指明，要求每一种可提供的国家保护): AE, AG, AL, AM, AO, AT, AU, AZ, BA, BB, BG, BH, BN, BR, BW, BY, BZ, CA, CH, CL, CN, CO, CR, CU, CV, CZ, DE, DJ, DK, DM, DO, DZ, EC, EE, EG, ES, FI, GB, GD, GE, GH, GM, GT, HN, HR, HU, ID, IL, IN, IQ, IR, IS, IT, JM, JO, JP, KE, KG, KH, KN, KP, KR, KW, KZ, LA, LC, LK, LR, LS, LU, LY, MA, MD, MG, MK, MN, MU, MW, MX, MY, MZ, NA, NG, NI, NO, NZ, OM, PA,

(54) **Title:** SUPERCONDUCTING QUANTUM CHIP CONNECTION STRUCTURE, AND CONNECTION METHOD THEREOF

(54) 发明名称: 一种超导量子芯片连接结构及连接方法

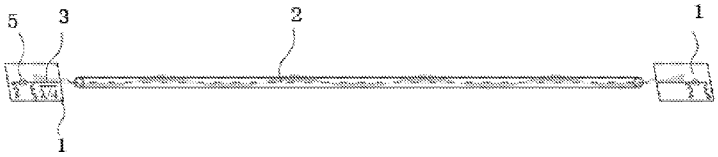


图 1

(57) **Abstract:** The present invention relates to a superconducting quantum chip connection structure which is used for connection between superconducting quantum chips. The superconducting quantum chip comprises a quantum substrate and a quantum circuit. The connection structure comprises: a connecting portion, which is used for connecting the superconducting quantum chips; and a current conversion portion, which is arranged on the quantum substrate and used for connecting the quantum circuit and the connecting portion such that a standing wave current of a standing wave mode for communication is close to zero at a bonding interface . The present invention not only significantly reduces channel losses and realizes high-intensity coupling, but also significantly lowers the energy loss at the bonding interface, thereby reducing the impact on the efficiency of quantum state transmission.

(57) 摘要: 本发明涉及一种超导量子芯片连接结构，用于超导量子芯片之间的连接，所述超导量子芯片包括量子基片和量子线路，该连接结构包括：连接部，用于连接超导量子芯片；电流转换部，设置在量子基片上，用于连接量子线路和连接部，使得用于通信的驻波模式在键合界面处的驻波电流接近于零。本发明不仅能够使得信道损耗大幅度降低，实现了较大强度的耦合，而且能够显著降低键合连接界面处的能量损耗，从而减少对量子态传输效率的影响。

WO 2023/246271 A1

[见续页]

PE, PG, PH, PL, PT, QA, RO, RS, RU, RW, SA, SC, SD, SE, SG, SK, SL, ST, SV, SY, TH, TJ, TM, TN, TR, TT, TZ, UA, UG, US, UZ, VC, VN, WS, ZA, ZM, ZW。

(84) 指定国(除另有指明，要求每一种可提供的地区保护): ARIPO (BW, CV, GH, GM, KE, LR, LS, MW, MZ, NA, RW, SC, SD, SL, ST, SZ, TZ, UG, ZM, ZW), 欧亚 (AM, AZ, BY, KG, KZ, RU, TJ, TM), 欧洲 (AL, AT, BE, BG, CH, CY, CZ, DE, DK, EE, ES, FI, FR, GB, GR, HR, HU, IE, IS, IT, LT, LU, LV, MC, ME, MK, MT, NL, NO, PL, PT, RO, RS, SE, SI, SK, SM, TR), OAPI (BF, BJ, CF, CG, CI, CM, GA, GN, GQ, GW, KM, ML, MR, NE, SN, TD, TG)。

本国际公布:

— 包括国际检索报告(条约第21条(3))。

一种超导量子芯片连接结构及连接方法

技术领域

本发明是关于一种超导量子芯片连接结构及连接方法，涉及超导量子芯片技术领域。

背景技术

随着超导量子芯片技术逐渐发展，超导量子芯片集成的量子比特数越来越多，然而受限于晶圆面积、良率、控制线扇出等条件，在单个芯片上集成更多的比特变得越来越困难。要进一步集成更多的超导量子比特，可以通过模块化的方式，把多个超导量子芯片连接起来，构成一个更大规模的分布式量子处理器。超导量子芯片之间的连接需要使用低损耗信道以避免退相干，在这个过程中需要选择合适的连接方式，以降低信道损耗的同时，实现较大强度的耦合。

现有超导量子芯片互联技术通常使用铌钛合金制作的超导同轴线与超导量子芯片进行键合连接或者压合连接，这种连接方式的信道损耗较大，单光子能量水平的品质因子较低（如：5.1×10^4），而且压合连接的电容耦合较弱（如：1MHz 左右），此外，不同金属键合连接界面处的接触电阻还会造成一定的能量损耗。

发明内容

针对上述问题，本发明的目的是提供一种不仅能够使得信道损耗大幅度降低，而且能够降低键合连接界面处能量损耗的超导量子芯片连接结构及连接方法。

为了实现上述发明目的，本发明提出的技术方案为：

第一方面，本发明提供一种超导量子芯片连接结构，用于超导量子芯片之间的连接，所述超导量子芯片包括量子基片和量子线路，该连接结构包括：

连接部，用于连接所述超导量子芯片；

电流转换部，设置在所述量子基片上，用于键合连接所述量子线路和连接部，使得用于通信的驻波模式在键合界面处的驻波电流接近于零。

所述的超导量子芯片连接结构，进一步地，所述连接部采用共面波导传输线，所述共面波导传输线设置在所述超导量子芯片上，所述共面波导传输线包括金属导带和接地导带，当不同的超导量子芯片连接时，位于不同超导量子芯片上的金属导带相应连接，两条接地导带相应连接。

所述的超导量子芯片连接结构，进一步地，所述连接部采用铝同轴线缆，所述铝同轴线缆从内到外依次包括内导体层、绝缘层和外导体层，所述外导体层与内导体层同轴设置，所述内导体层用于传送高电平，所述外导体层用于传输低电平，同时起到屏蔽作用，其中，所述内导体层和外导体层均采用纯铝或铝合金制作。

所述的超导量子芯片连接结构，进一步地，该连接结构还包括连接件，所述连接件包括第一连接线、第二连接线和第三连接线；

所述第一连接线连接所述量子线路的接地层和所述外导体层或所述接地导带；

所述第二连接线连接所述电流转换部和所述内导体层或所述金属导带；

所述第三连接线连接所述量子线路的接地层和所述外导体层或所述接地导带，其中：

所述第一连接线和第三连接线分别连接所述量子线路的接地层和所述外导体层或所述接地导带，形成共地连接回路。

所述的超导量子芯片连接结构，进一步地，所述电流转换部采用设置在所述量子芯片上的共面波导传输线。

所述的超导量子芯片连接结构，进一步地，当超导量子比特和信道的耦合为电

感耦合时，所述电流转换部采用四分之一波长共面波导传输线，实现共面波导阻抗转换的作用；

当超导量子比特和信道之间为电容耦合时，所述电流转换部采用二分之一波长的共面波导传输线。

所述的超导量子芯片连接结构，进一步地，该连接结构还包括设置在所述超导量子芯片上的耦合器，所述耦合器一端连接所述量子线路，所述耦合器的另一端连接所述电流转换部，所述耦合器用于打开或者关闭量子线路和驻波模式的耦合强度，从而控制超导量子芯片之间的量子态传输。

第二方面，本发明还提供一种超导量子芯片连接方法，包括：

选择用于连接超导量子芯片的连接部；

基于用于通信的驻波模式频率和超导量子比特和信道之间耦合方式，选择电流转换部；

使用连接部将不同的超导量子芯片进行键合连接；

将电流转换部设置在超导量子芯片耦合器和键合连接处，使得用于通信的驻波模式在键合界面处的驻波电流接近于零。

所述的超导量子芯片连接方法，进一步地，选择用于连接超导量子芯片的连接部为铝同轴线缆，包括：

选择铝同轴线缆材质为纯铝或铝合金；

基于驻波模式频率和自由谱范围，选择铝同轴线缆的长度。

所述的超导量子芯片连接方法，进一步地，选择用于连接超导量子芯片的连接部为共面波导传输线。

所述的超导量子芯片连接方法，进一步地，选择电流转换部为设置在超导量子

芯片上的共面波导传输线。

所述的超导量子芯片连接方法，进一步地，当超导量子比特和信道的耦合为电感耦合时，所述电流转换部采用四分之一波长共面波导传输线，实现共面波导阻抗转换的作用；当超导量子比特和信道之间为电容耦合时，所述电流转换部采用二分之一波长的共面波导传输线。

本发明由于采取以上技术方案，其具有以下优点：

1、本发明提出的超导量子芯片连接结构设置的连接部可以为铝同轴线缆，将铝同轴线缆通过连接件键合连接于量子线路，最终能够达到1.2×10^6的本征品质因子，比同类型的铌钛合金超导同轴线缆要高数十倍。

2、本发明提出的同为铝材质的键合连接要比现有技术中不同金属间的键合连接更加牢固，从而使得信道损耗大幅度降低，实现了较大强度的耦合。

综上，本发明可以广泛应用于超导量子芯片连接中。

附图说明

通过阅读下文优选实施方式的详细描述，各种其他的优点和益处对于本领域普通技术人员将变得清楚明了。附图仅用于示出优选实施方式的目的，而并不认为是对本发明的限制。在整个附图中，用相同的附图标记表示相同的部件。在附图中：

图 1 为本发明实施例 1 的两个超导量子芯片连接结构示意图；

图 2 为本发明实施例 1 的超导量子芯片连接结构示意图；

图 3 为本发明实施例 1 的超导量子芯片连接结构的示意图；

图 4 为本发明实施例 1 的电流转换部的效果图；

图 5 为本发明实施例 2 的两个超导量子芯片连接结构示意图；

图 6 为本发明实施例 3 的超导量子芯片连接方法的流程图。

具体实施方式

应理解的是，文中使用的术语仅出于描述特定示例实施方式的目的，而无意于进行限制。除非上下文另外明确地指出，否则如文中使用的单数形式“一”、“一个”以及“所述”也可以表示包括复数形式。术语“包括”、“包含”、“含有”以及“具有”是包含性的，并且因此指明所陈述的特征、步骤、操作、元件和/或部件的存在，但并不排除存在或者添加一个或多个其它特征、步骤、操作、元件、部件、和/或它们的组合。文中描述的方法步骤、过程、以及操作不解释为必须要求它们以所描述或说明的特定顺序执行，除非明确指出执行顺序。还应当理解，可以使用另外或者替代的步骤。

在本申请中，除非另有明确的规定或限定，术语“安装”、“相连”、“连接”、“固定”等术语应做广义理解，例如，可以是固定连接，也可以是可拆卸连接，或成一体；可以是机械连接，也可以是电连接；可以是直接相连，也可以通过中间媒介间接相连，还可以是两个元件内部的连通或两个元件的相互作用关系，除非另有明确的限定。对于本领域的普通技术人员而言，可以根据具体情况理解上述术语在本申请中的具体含义。

尽管可以在文中使用术语第一、第二、第三等来描述多个元件、部件、区域、层和/或部段，但是，这些元件、部件、区域、层和/或部段不应被这些术语所限制。这些术语可以仅用来将一个元件、部件、区域、层或部段与另一区域、层或部段区分开。除非上下文明确地指出，否则诸如“第一”、“第二”之类的术语以及其它数字术语在文中使用时并不暗示顺序或者次序。因此，以下讨论的第一元件、部件、区域、层或部段在不脱离示例实施方式的教导的情况下可以被称作第二元件、部件、区域、层或部段。

为了便于描述，可以在文中使用空间相对关系术语来描述如图中示出的一个元件或者特征相对于另一元件或者特征的关系，这些相对关系术语例如为“内部”、“外部”、“内侧”、“外侧”、“下面”、“上面”等。这种空间相对关系术语意于包括除图中描绘的方位之外的在使用或者操作中装置的不同方位。

针对现有超导量子芯片连接技术中的信道本征损耗以及键合连接界面处能量损耗的问题。本发明提供一种超导量子芯片连接结构及连接方法，用于具有量子基片和量子线路的超导量子芯片的连接，该连接结构包括：连接部，用于连接超导量子芯片；电流转换部，设置在量子基片上，用于键合连接量子线路和连接部，使得用于通信的驻波模式在键合界面处的驻波电流接近于零。因此，本发明不仅能够使得信道损耗大幅度降低，实现了较大强度的耦合，而且能够显著降低键合连接界面处的能量损耗，从而减少对量子态传输效率的影响。

下面将参照附图更详细地描述本发明的示例性实施方式。虽然附图中显示了本发明的示例性实施方式，然而应当理解，可以以各种形式实现本发明而不应被这里阐述的实施方式所限制。相反，提供这些实施方式是为了能够更透彻地理解本发明，并且能够将本发明的范围完整的传达给本领域的技术人员。

实施例 1：如图 1～图 3 所示，本实施例提供的超导量子芯片连接结构，用于超导量子芯片 1 之间的连接，超导量子芯片 1 包括量子基片和量子线路，量子基片上集成设置有量子线路，超导量子芯片连接结构包括连接部 2 和电流转换部 3。

连接部 2，用于连接不同的超导量子芯片 1；

电流转换部 3 设置在量子基片上，用于连接量子线路和连接部 2，使得用于通信的驻波模式在键合界面处的驻波电流接近于零。

在一个优选的实施例中，如图 2 所示，连接部 2 可以采用铝同轴线缆 21，以朝

向铝同轴线缆 21 的中心为向内，以远离铝同轴线缆 21 的中心为向外，铝同轴线缆 21 从内到外依次包括内导体层 211、绝缘层 212 和外导体层 213，外导体层 213 与内导体层 211 同轴设置，内导体层 211 和外导体层 213 均为纯铝或铝合金制作。绝缘层 212 包裹设置在内导体层 211 的外侧，外导体层 213 包裹设置在绝缘层 212 的外侧。内导体层 211 用于传送高电平，外导体层 213 用于传输低电平，同时起到屏蔽作用。一些实现中，绝缘层 212 可采用低密度聚四氟乙烯（ldPTFE）。

本实施例制作的铝同轴线缆 21 在 10mK 左右的极低温下，在 5GHz 左右的频率时，在单光子能量级别的极低功率下，能够实现高达1.2×10^6的本征品质因子，比铌钛合金超导同轴线缆的本征品质因子要高出约两个数量级。铝同轴线缆 21 两端连接两个超导量子芯片 1，在连接两个超导量子芯片 1 的铝同轴线缆 21 较短，例如一米以内的时候，信道相当于一个多模谐振腔，具有一系列频率等间距分布的驻波模式，其自由谱范围在百兆赫兹量级。由于不同驻波模式间的频率间隔足够大，可以通过其中一个驻波模式进行通信，相邻驻波模式的影响较小，可以忽略。

在一个优选的实施例中，如图 3 所示，该超导量子芯片连接结构还包括连接件 4，连接件 4 的一端连接铝同轴线缆 21，连接件 4 的另一端连接电流转换部 3 的一端，电流转换部 3 的另一端连接量子线路。因此，本实施例通过使用连接件 4 将超导量子芯片 1 与铝同轴线缆 21 进行键合连接。

进一步地，连接件 4 可以采用任何金属连接件，在此不做限制。连接件 4 包括第一连接线 41、第二连接线 42 和第三连接线 43。第一连接线 41 连接量子线路的接地层和外导体层 213；第二连接线 42 连接电流转换部 3 和内导体层 211；第三连接线 43 连接量子线路的接地层和外导体层 213，第一连接线 41 和第三连接线 43 分别连接量子线路的接地层和外导体层 213，并形成共地连接回路。由于内导体层 211

为纯铝或铝合金制作，量子线路通常为铝制作，为了使得连接更容易且更加牢固，本实施例的连接件也可以采用铝合金连接件 4。因此，铝同轴线缆 21 和超导量子芯片 1 之间通过铝合金的连接件 4 可以很容易形成较强的键合连接。

在一个优选实施例中，如图 1 所示，超导量子芯片 1 上还设置有耦合器 5，耦合器 5 一端连接量子线路，耦合器 5 的另一端连接电流转换部 3，耦合器 5 用于打开或者关闭量子线路和驻波模式的耦合强度，从而控制超导量子芯片之间的量子态传输，如果没有耦合器 5，驻波模式会一直和量子线路耦合，对量子线路造成干扰，设置有耦合器 5，平时将耦合器 5 关闭，驻波模式不会干扰量子线路，需要进行跨芯片量子态传输的时候打开耦合器 5。

在一个优选的实施例中，电流转换部 3 可以采用设置在量子芯片上的共面波导传输线，用于实现共面波导阻抗转换的作用，如图 2 所示，量子基片上设置有共面波导传输线 31，共面波导传输线 31 一端连接耦合器 5，另一端连接连接件 4 的键合连接处。

进一步地，当超导量子比特和信道的耦合是电感耦合时（电感耦合的特点是在耦合处电压极小，电流极大），可以采用四分之一波长共面波导传输线 31。当共面波导传输线的长度刚好等于波长的四分之一，且连接于耦合器 5 和键合点之间时，共面波导传输线相当于一个四分之一波长转换器。共面波导传输线 31 的特点是可以把电感耦合的高电流低电压转换成高电压低电流。共面波导传输线 31 是根据工作频率计算其长度的，它的长度等于设计频率对应波长的四分之一，可以看作是四分之一波长（λ/4）阻抗转换器。通过一个四分之一波长共面波导阻抗转换器连接耦合器 5 和键合连接处。超导量子芯片 1 采用驻波模式传输量子态，可以通过其中一个驻波模式进行芯片间的量子态传输，当驻波模式的波长与电流转换部 3 长度的四

倍相等时（也就是四分之一波长），共面波导阻抗转换使得键合界面处的驻波电流接近于零，能够显著降低键合界面的电阻从而降低损耗，因此减小了对量子态传输的影响。 如图 4 所示，在 4.89GHz 左右时，驻波模式的波长与共面波导阻抗转换器长度的四倍相等，此时它的品质因子最高，可达到6×10^5。

更进一步地，当超导量子比特和信道之间是通过电容耦合时（电容耦合的特点是耦合处电压极大，电流极小），电流转换部 3 可以采用二分之一波长的共面波导传输线。

在一个优选实施例中，超导量子芯片利用约瑟夫森结构成的超导电路来实现二能级系统，所用材质是铝，通过在铝膜上刻蚀相应的电路形状，进而用微波信号对其进行控制。将本实施例的连接部 2 和电流转换部 3 应用于超导量子芯片，能够实现超导量子芯片连接通道高达8.1×10^5的单光子能量水平品质因子，较现有技术提高了一个数量级以上，达到了超导量子芯片上频率可调量子比特的水平，实现了 99%以上的跨芯片量子态传输保真度。因此，镀铝膜的超导量子芯片 1 的量子线路、铝合金材质的连接件 4 与纯铝材质的铝同轴线缆 21，形成一个相同材质的连接，更有利于实现键合连接，也使得键合连接更加牢固。

综上所述，本发明经过大量的实验测试，不断优化实验参数，选择使用纯铝材质的同轴线缆实现超导量子芯片之间的连接。由于超导量子芯片 1 工作在 10mK 左右的极低温环境，而铝的超导转变温度是 1.2K，远高于 10mK，且铝同轴线缆在 10mK 左右的极低温下，在 5GHz 左右的频率范围，在单光子能量级别的极低功率下，可具有高达1.2×10^6的本征品质因子，比铌钛合金超导同轴线缆高出约两个数量级。并且，超导量子芯片的量子线路以及连接件均为铝材质，同材质金属间的键合连接更加牢固，能够显著降低信道损耗，实现较大强度的耦合。

实施例 2：本实施例 2 与实施例 1 基本相同，不同之处在于，如图 5 所示，本实施例的连接部 2 还可以采用共面波导传输线 6，共面波导传输线 6 具有体积小、重量轻和平面结构等优点，使其便于获得线极化、圆极化、双极化和多频段工作等优点。超导量子芯片上形成有共面波导传输线 6，共面波导传输线 6 包括介质基片和三条导带，中间为金属导带，两侧为接地导带，当两个超导量子芯片 1 连接时，位于不同超导量子芯片 1 上的金属导带相应连接，其他两条接地导带相应连接。

实施例 3：如图 6 所示，本实施例还提出一种超导量子芯片连接方法，具体是以铝同轴线缆作为实施例进行详细说明，包括步骤：

S1、基于超导量子芯片的工作温度以及金属的超导转变温度，选择用于连接超导量子芯片 1 的连接部 2。

S11、选择铝材质的同轴线缆

现有技术中因为铌钛合金制作的超导同轴线缆的超导转变温度达到 9.7K，铌钛合金制作的超导同轴线缆可以在液氦温区工作良好。然而实际的超导量子芯片工作在 10mK 左右的极低温环境，远远低于液氦温区，因此根据较低的超导转变温度，需要选择合适材质的连接部使得键合连接更加容易实现且更加牢固。

具体地，本实施例采用铝材质的同轴线缆。由于铝的超导转变温度是 1.2K，远高于 10mK，纯铝制作的超导同轴线缆在 10mK 左右的极低温下，以及在 5GHz 左右的频率时，在单光子能量级别的极低功率下，具有高达1.2×10^6的本征品质因子，远远高于铌钛合金超导同轴线缆。另外，超导量子芯片的量子线路为铝材质，因此选择铝材质的同轴线缆可以更好实现相同材质间的连接。

S12、基于驻波模式频率和自由谱范围，选择铝同轴线缆 21 的长度。

具体地，超导量子芯片 1 采用驻波模式传输量子态，根据驻波模式的频率和自

由谐范围决定铝同轴线缆 21 的长度 L，铝同轴线缆 21 的长度 L 是驻波模式的半波长的整数倍$L=\frac{N}{2}\lambda$，其中，N 是一个整数。光速除以驻波模式的频率等于驻波模式的波长：$\lambda=\frac{c}{f}$，其中，f是频率，c 是电磁波在铝同轴线的传播速度。因此$L=\frac{Nc}{2f}$。

因此，需要选择一个合适的整数 N 来确定同轴线的长度 L，可以得到$f=\frac{Nc}{2L}$，所以相邻两个驻波模式的频率差，也就是自由谐范围$\Delta f=\frac{1c}{2L}=\frac{f}{N}$，例如$f$=5GHz 左右，选取 N=10 左右，可以得到$\Delta f=500$ MHz 左右，对应的 L=0.2 m 左右，以此为例进行说明，不限于此，可以根据实际需要进行确定。

S13、根据超导量子芯片电路的材质和铝同轴线缆的材质，选择相应材质的连接件。

具体地，由于超导量子芯片电路的材质为铝材质，同轴线缆也为纯铝材质，选择铝合金材质的连接件 4，可以使得连接更容易，且更加牢固。

S2、基于用于通信的驻波模式频率和超导量子比特和信道之间耦合方式，选择电流转换部 3。

具体地，由于本实施例超导量子比特和信道之间耦合为电感耦合，本实施例选择对应长度的共面波导传输线实现阻抗转换。基于用于通信的驻波模式频率，当通信的驻波模式的波长与共面波导传输线的长度的四倍相等时，该共面波导传输线使得用于通信的驻波模式在键合界面处的驻波电流接近于零，从而显著降低键合界面的电阻导致的损耗，进而降低键合连接界面的损耗对量子态传输的影响。

S3、将铝同轴线缆 21 和超导量子芯片使用连接件 4 进行键合连接。

具体地，使用连接件 4 将铝同轴线缆 21 和超导量子芯片进行键合连接，由于

铝材质非常适合键合连接，同样材质的同轴线缆和超导量子芯片很容易在铝材质连接件的作用下，形成很牢固的键合连接，铝合金连接件键合界面处的电阻要比使用铌钛合金的界面电阻小一个数量级。此外，键合连接更加牢固的同时，还能降低产生的信道损耗。

进一步地，将共面波导传输线 31 连接于耦合器 5 和连接件 4 的第二连接线 42，具体为：将四分之一波长共面波导传输线 31 连接于耦合器 5 和第二连接线 42，进而与铝同轴线缆 21 的内导体层 211 连接。

更进一步地，为了使得损耗更少，将键合连接界面的目标损耗设定为零损耗，本申请采用驻波模式传输量子态，通过其中一个驻波模式进行芯片间量子态传输，通过一个四分之一波长（λ/4）共面波导传输线 13 连接在耦合器 5 和键合连接处，当驻波模式的波长与共面波导传输线长度的四倍相等时，使得用于通信的驻波模式在键合界面处的驻波电流接近于零，达到目标损耗，从而显著降低键合界面处电阻导致的损耗。

综上所述，本发明提出的超导量子芯片连接结构及连接方法，实现高达 1.2×10^{6}的本征品质因子，比同类型的铌钛合金超导同轴线缆要高数十倍；同时，相同材质间更有利于实现较为牢固的键合连接，能够显著降低信道损耗，从而实现较大强度的耦合；此外，当驻波模式的波长与阻抗转换部长度的四倍相等时，能够降低键合连接界面处的损耗，从而减少对量子态传输的影响。该方法解决了现有超导量子芯片连接技术中信道损耗以及键合连接界面处能量损耗的问题。

本说明书中的各个实施例均采用递进的方式描述，各个实施例之间相同相似的部分互相参见即可，每个实施例重点说明的都是与其他实施例的不同之处。在本说明书的描述中，参考术语“一个实施例”、“一些实现”等的描述意指结合该实施例或

示例描述的具体特征、结构、材料或者特点包含于本说明书实施例的至少一个实施例或示例中。在本说明书中，对上述术语的示意性表述不必须针对的是相同的实施例或示例。而且，描述的具体特征、结构、材料或者特点可以在任一个或多个实施例或示例中以合适的方式结合。此外，在不相互矛盾的情况下，本领域的技术人员可以将本说明书中描述的不同实施例或示例以及不同实施例或示例的特征进行结合和组合。

最后应说明的是：以上实施例仅用以说明本发明的技术方案，而非对其限制；尽管参照前述实施例对本发明进行了详细的说明，本领域的普通技术人员应当理解：其依然可以对前述各实施例所记载的技术方案进行修改，或者对其中部分技术特征进行等同替换；而这些修改或者替换，并不使相应技术方案的本质脱离本发明各实施例技术方案的精神和范围。

权利要求

1、一种超导量子芯片连接结构，用于超导量子芯片之间的连接，所述超导量子芯片包括量子基片和量子线路，其特征在于，该连接结构包括：

连接部，用于连接所述超导量子芯片；

电流转换部，设置在所述量子基片上，用于键合连接所述量子线路和连接部，使得用于通信的驻波模式在键合界面处的驻波电流接近于零。

2、根据权利要求 1 所述的超导量子芯片连接结构，其特征在于，所述连接部采用共面波导传输线，所述共面波导传输线设置在所述超导量子芯片上，所述共面波导传输线包括金属导带和接地导带，当不同的超导量子芯片连接时，位于不同超导量子芯片上的金属导带相应连接，两条接地导带相应连接。

3、根据权利要求 1 所述的超导量子芯片连接结构，其特征在于，所述连接部采用铝同轴线缆，所述铝同轴线缆从内到外依次包括内导体层、绝缘层和外导体层，所述外导体层与内导体层同轴设置，所述内导体层用于传送高电平，所述外导体层用于传输低电平，同时起到屏蔽作用，其中，所述内导体层和外导体层均采用纯铝或铝合金制作。

4、根据权利要求 2 或 3 所述的超导量子芯片连接结构，其特征在于，该连接结构还包括连接件，所述连接件包括第一连接线、第二连接线和第三连接线；

所述第一连接线连接所述量子线路的接地层和所述外导体层或所述接地导带；

所述第二连接线连接所述电流转换部和所述内导体层或所述金属导带；

所述第三连接线连接所述量子线路的接地层和所述外导体层或所述接地导带，其中：

所述第一连接线和第三连接线分别连接所述量子线路的接地层和所述外导体

层或所述接地导带，形成共地连接回路。

5、根据权利要求 1～3 任一项所述的超导量子芯片连接结构，其特征在于，所述电流转换部采用设置在所述量子芯片上的共面波导传输线。

6、根据权利要求 5 所述的超导量子芯片连接结构，其特征在于，当超导量子比特和信道的耦合为电感耦合时，所述电流转换部采用四分之一波长共面波导传输线，实现共面波导阻抗转换的作用；

当超导量子比特和信道之间为电容耦合时，所述电流转换部采用二分之一波长的共面波导传输线。

7、根据权利要求 1～3 任一项所述的超导量子芯片连接结构，其特征在于，该连接结构还包括设置在所述超导量子芯片上的耦合器，所述耦合器一端连接所述量子线路，所述耦合器的另一端连接所述电流转换部，所述耦合器用于打开或者关闭量子线路和驻波模式的耦合强度，从而控制超导量子芯片之间的量子态传输。

8、一种超导量子芯片连接方法，其特征在于包括：

选择用于连接超导量子芯片的连接部；

基于用于通信的驻波模式频率和超导量子比特和信道之间耦合方式，选择电流转换部；

使用连接部将不同的超导量子芯片进行键合连接；

将电流转换部设置在超导量子芯片的量子线路和键合连接处，使得用于通信的驻波模式在键合界面处的驻波电流接近于零。

9、根据权利要求 8 所述的超导量子芯片连接方法，其特征在于，选择用于连接超导量子芯片的连接部为铝同轴线缆，包括：

选择铝同轴线缆材质为纯铝或铝合金；

基于驻波模式频率和自由谱范围，选择铝同轴线缆的长度。

10、根据权利要求 8 所述的超导量子芯片连接方法，其特征在于，选择用于连接超导量子芯片的连接部为共面波导传输线。

11、根据权利要求 8～10 任一项所述的超导量子芯片连接方法，其特征在于，选择电流转换部为设置在超导量子芯片上的共面波导传输线。

12、根据权利要求 11 所述的超导量子芯片连接方法，其特征在于，当超导量子比特和信道的耦合为电感耦合时，所述电流转换部采用四分之一波长共面波导传输线，实现共面波导阻抗转换的作用；当超导量子比特和信道之间为电容耦合时，所述电流转换部采用二分之一波长的共面波导传输线。

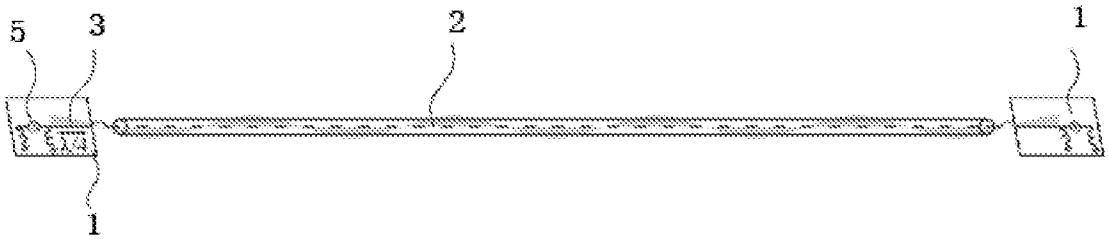


图 1

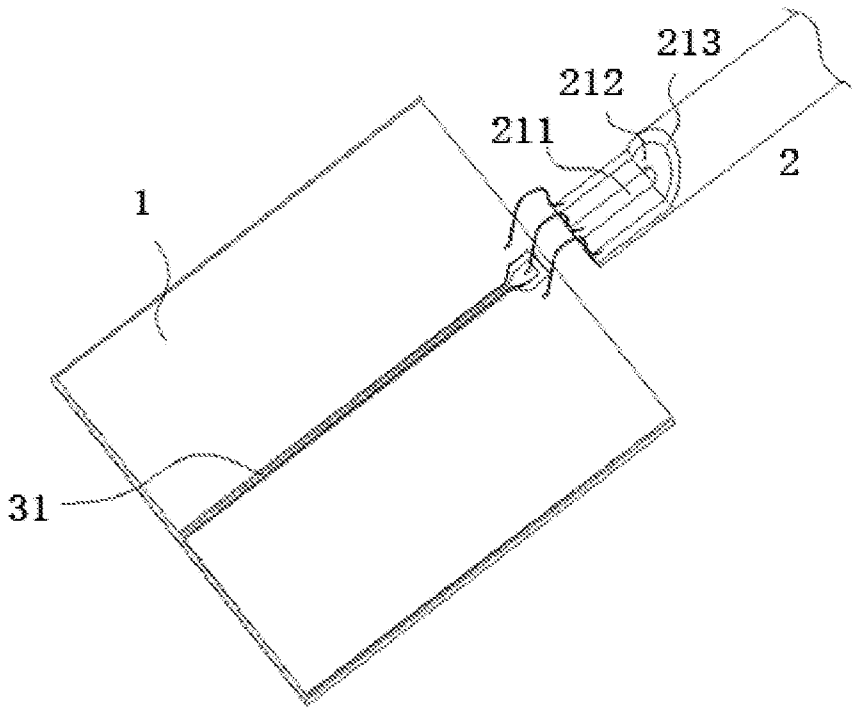


图 2

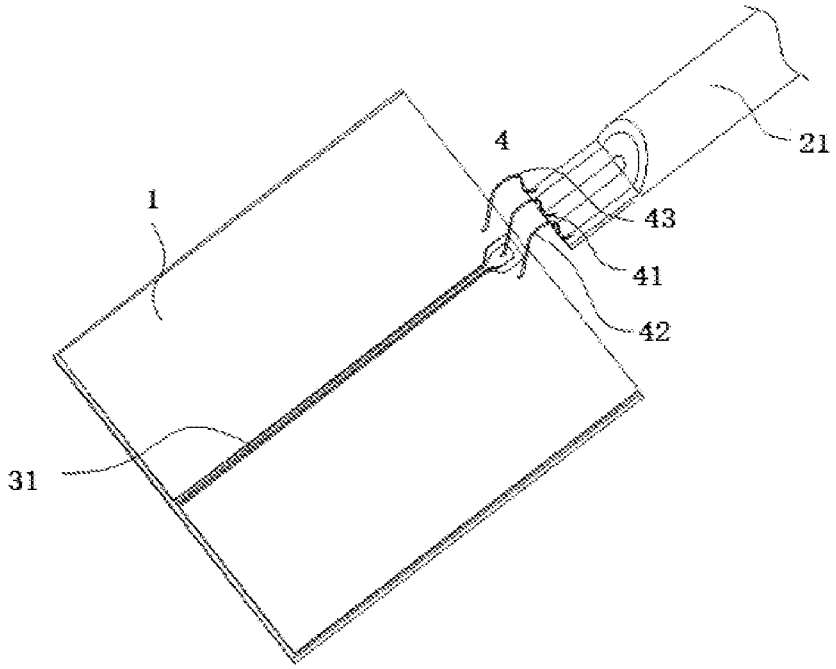


图 3

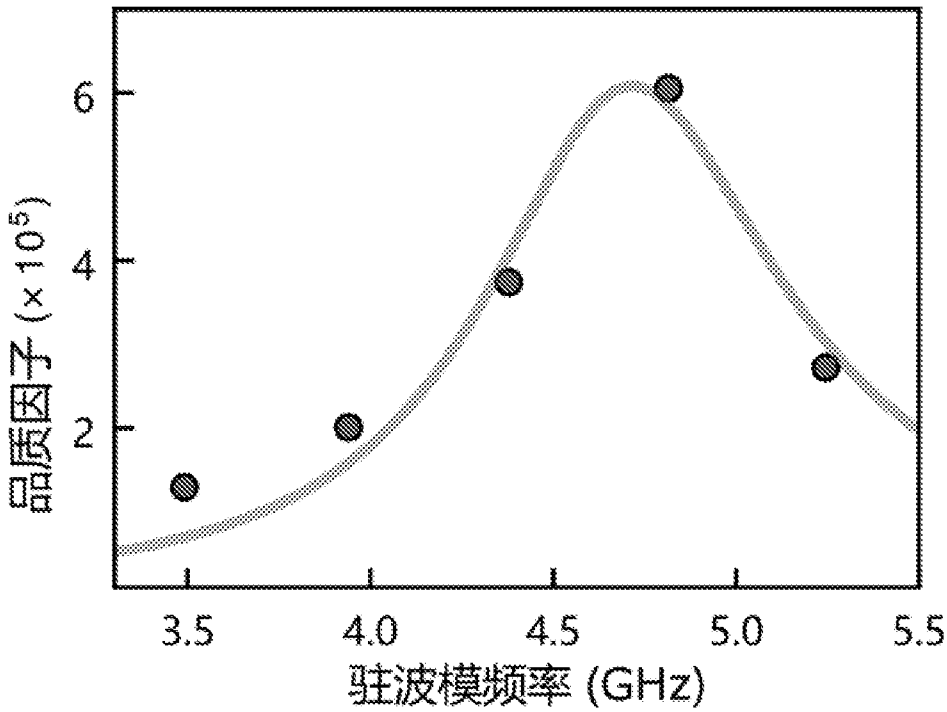


图 4

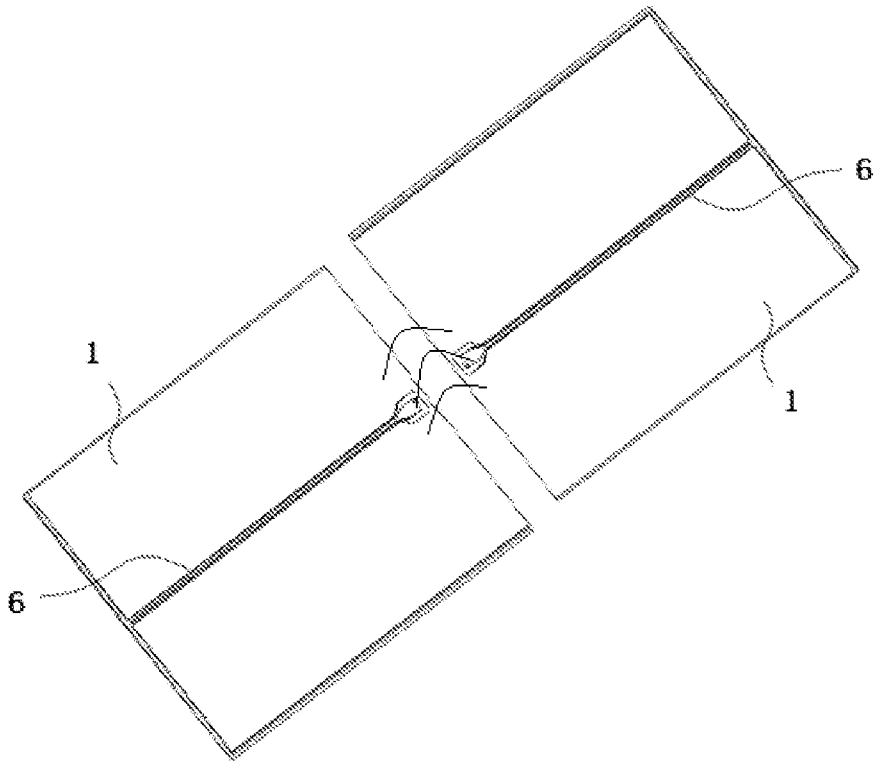


图 5

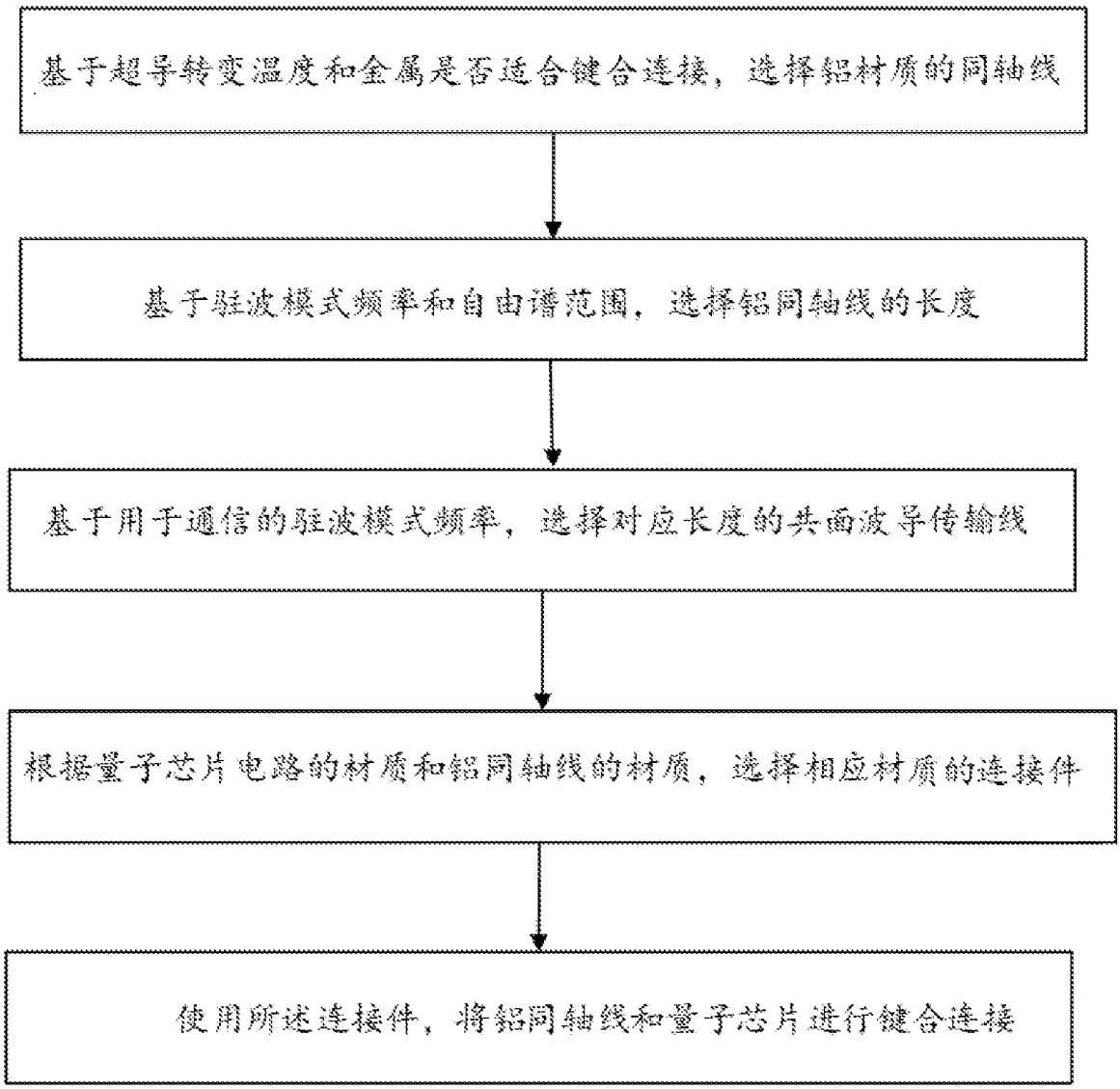

基于超导转变温度和金属是否适合键合连接，选择铝材质的同轴线
基于驻波模式频率和自由谱范围，选择铝同轴线的长度
基于用于通信的驻波模式频率，选择对应长度的共面波导传输线
根据量子芯片电路的材质和铝同轴线的材质，选择相应材质的连接件
使用所述连接件，将铝同轴线和量子芯片进行键合连接

图 6

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.
PCT/CN2023/089663

A. CLASSIFICATION OF SUBJECT MATTER

G06N10/20(2022.01)i; G06N10/40(2022.01)i

According to International Patent Classification (IPC) or to both national classification and IPC

B. FIELDS SEARCHED

Minimum documentation searched (classification system followed by classification symbols)

G06N

Documentation searched other than minimum documentation to the extent that such documents are included in the fields searched

Electronic data base consulted during the international search (name of data base and, where practicable, search terms used)

CNTXT, ENTXTC, ENTXT, IEEE, CNKI: 超导, 量子, 计算, 位元, 比特, 约瑟夫森, 约瑟芬森, 电容, 电感, 耦合, 四分之一, 二分之一, 半波长, 1/4, 1/2, 波长, 频率, 驻波, 电压, 电流, 零, 0, 铝, Al, 共面, 波导, 传输, CPW, 同轴, 电缆, 线缆, superconduct+, quantum, bit+, Josephson, capacit+, induct+, quarter, half, wave, length, frequency, voltage, current, zero, aluminum, coplanar, guid+, cable, coaxial, stand+

C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
PX	CN 115204402 A (SHENZHEN INTERNATIONAL QUANTUM ACADEMY) 18 October 2022 (2022-10-18) claims 1-12, and description, paragraphs [0001]-[0078], and figures 1-6	1-12
Y	CN 113537500 A (SAMSUNG ELECTRONICS CO., LTD.) 22 October 2021 (2021-10-22) description, paragraphs [0068]-[0112], and figures 1-8	1-12
Y	CN 110277969 A (HEFEI ORIGIN QUANTUM COMPUTING TECHNOLOGY CO., LTD.) 24 September 2019 (2019-09-24) claims 1-11, and description, paragraphs [0002]-[0004], [0030] and [0060]-[0068], and figures 1-3	1-12
Y	CN 112074945 A (INTERNATIONAL BUSINESS MACHINES CORP.) 11 December 2020 (2020-12-11) claims 1-25, and description, paragraphs [0001]-[0003] and [0025]-[0045], and figures 1-3 and 5-6	3, 9

☑ Further documents are listed in the continuation of Box C. ☑ See patent family annex.

* Special categories of cited documents:
"A" document defining the general state of the art which is not considered to be of particular relevance
"D" document cited by the applicant in the international application
"E" earlier application or patent but published on or after the international filing date
"L" document which may throw doubts on priority claim(s) or which is cited to establish the publication date of another citation or other special reason (as specified)
"O" document referring to an oral disclosure, use, exhibition or other means
"P" document published prior to the international filing date but later than the priority date claimed
"T" later document published after the international filing date or priority date and not in conflict with the application but cited to understand the principle or theory underlying the invention
"X" document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered novel or cannot be considered to involve an inventive step when the document is taken alone
"Y" document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered to involve an inventive step when the document is combined with one or more other such documents, such combination being obvious to a person skilled in the art
"&" document member of the same patent family

Date of the actual completion of the international search	Date of mailing of the international search report
06 June 2023	**12 June 2023**

Name and mailing address of the ISA/CN	Authorized officer
China National Intellectual Property Administration (ISA/CN) **China No. 6, Xitucheng Road, Jimenqiao, Haidian District, Beijing 100088**	Telephone No.

C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
Y	CN 112561067 A (SOUTH CHINA NORMAL UNIVERSITY) 26 March 2021 (2021-03-26) claims 1-10, and description, paragraphs [0044]-[0073], and figure 1	7
A	CN 113242027 A (NANJING UNIVERSITY) 10 August 2021 (2021-08-10) entire document	1-12
A	CN 113394535 A (SHANDONG INSPUR SCIENCE RESEARCH INSTITUTE CO., LTD.) 14 September 2021 (2021-09-14) entire document	1-12
A	JP S63290979 A (FUJITSU LIMITED) 28 November 1988 (1988-11-28) entire document	1-12

INTERNATIONAL SEARCH REPORT
Information on patent family members

International application No.
PCT/CN2023/089663

Patent document cited in search report			Publication date (day/month/year)	Patent family member(s)			Publication date (day/month/year)
CN	115204402	A	18 October 2022	None			
CN	113537500	A	22 October 2021	US	2021328127	A1	21 October 2021
				EP	3910562	A1	17 November 2021
				KR	20210128787	A	27 October 2021
CN	110277969	A	24 September 2019	CN	210327515	U	14 April 2020
CN	112074945	A	11 December 2020	EP	3815134	A1	05 May 2021
				WO	2020002000	A1	02 January 2020
				US	2020006832	A1	02 January 2020
				US	10833384	B2	10 November 2020
				JP	2021528840	A	21 October 2021
CN	112561067	A	26 March 2021	WO	2021190349	A1	30 September 2021
				US	2022222565	A1	14 July 2022
				CN	112561067	B	15 November 2022
CN	113242027	A	10 August 2021	None			
CN	113394535	A	14 September 2021	None			
JP	S63290979	A	28 November 1988	JPH	0785104	B2	13 September 1995

国际检索报告

国际申请号
PCT/CN2023/089663

A. 主题的分类

G06N10/20(2022.01)i； G06N10/40(2022.01)i

按照国际专利分类(IPC)或者同时按照国家分类和IPC两种分类

B. 检索领域

检索的最低限度文献(标明分类系统和分类号)

G06N

包含在检索领域中的除最低限度文献以外的检索文献

在国际检索时查阅的电子数据库(数据库的名称，和使用的检索词（如使用））

CNTXT, ENTXTC, ENTXT, IEEE, CNKI：超导，量子，计算，位元，比特，约瑟夫森，约瑟芬森，电容，电感，耦合，四分之一，二分之一，半波长，1/4，1/2，波长，频率，驻波，电压，电流，零，0，铝，Al，共面，波导，传输，CPW，同轴，电缆，线缆，superconduct+，quantum，bit+，Josephson，capacit+，induct+，quarter，half，wave，length，frequency，voltage，current，zero，aluminum，coplanar，guid+，cable，coaxial，stand+

C. 相关文件

类 型*	引用文件，必要时，指明相关段落	相关的权利要求
PX	CN 115204402 A (深圳国际量子研究院) 2022年10月18日 (2022-10-18) 权利要求第1-12，说明书第[0001]-[0078]段，图1-6	1-12
Y	CN 113537500 A (三星电子株式会社) 2021年10月22日 (2021-10-22) 说明书第[0068]-[0112]段，图1-8	1-12
Y	CN 110277969 A (合肥本源量子计算科技有限责任公司) 2019年9月24日 (2019-09-24) 权利要求第1-11，说明书第[0002]-[0004]、[0030]、[0060]-[0068]段，图1-3	1-12
Y	CN 112074945 A (国际商业机器公司) 2020年12月11日 (2020-12-11) 权利要求第1-25，说明书第[0001]-[0003]、[0025]-[0045]段，图1-3、5-6	3、9
Y	CN 112561067 A (华南师范大学) 2021年3月26日 (2021-03-26) 权利要求第1-10，说明书第[0044]-[0073]段，图1	7
A	CN 113242027 A (南京大学) 2021年8月10日 (2021-08-10) 全文	1-12

☑ 其余文件在C栏的续页中列出。 ☑ 见同族专利附件。

* 引用文件的具体类型：
“A” 认为不特别相关的表示了现有技术一般状态的文件
“D” 申请人在国际申请中引证的文件
“E” 在国际申请日的当天或之后公布的在先申请或专利
“L” 可能对优先权要求构成怀疑的文件，或为确定另一篇引用文件的公布日而引用的或者因其他特殊理由而引用的文件（如具体说明的）
“O” 涉及口头公开、使用、展览或其他方式公开的文件
“P” 公布日先于国际申请日但迟于所要求的优先权日的文件
“T” 在申请日或优先权日之后公布，与申请不相抵触，但为了理解发明之理论或原理的在后文件
“X” 特别相关的文件，单独考虑该文件，认定要求保护的发明不是新颖的或不具有创造性
“Y” 特别相关的文件，当该文件与另一篇或者多篇该类文件结合并且这种结合对于本领域技术人员为显而易见时，要求保护的发明不具有创造性
“&” 同族专利的文件

国际检索实际完成的日期	国际检索报告邮寄日期
2023年6月6日	2023年6月12日
ISA/CN的名称和邮寄地址 中国国家知识产权局 中国北京市海淀区蓟门桥西土城路6号 100088	受权官员 周忠堂 电话号码 (+86) 010-53961222

C. 相关文件

类 型*	引用文件，必要时，指明相关段落	相关的权利要求
A	CN 113394535 A (山东浪潮科学研究院有限公司) 2021年9月14日 (2021 - 09 - 14) 全文	1-12
A	JP S63290979 A (FUJITSU LTD.) 1988年11月28日 (1988 - 11 - 28) 全文	1-12

国际检索报告
关于同族专利的信息

国际申请号
PCT/CN2023/089663

检索报告引用的专利文件			公布日 (年/月/日)	同族专利			公布日 (年/月/日)
CN	115204402	A	2022年10月18日	无			
CN	113537500	A	2021年10月22日	US	2021328127	A1	2021年10月21日
				EP	3910562	A1	2021年11月17日
				KR	20210128787	A	2021年10月27日
CN	110277969	A	2019年9月24日	CN	210327515	U	2020年4月14日
CN	112074945	A	2020年12月11日	EP	3815134	A1	2021年5月5日
				WO	2020002000	A1	2020年1月2日
				US	2020006832	A1	2020年1月2日
				US	10833384	B2	2020年11月10日
				JP	2021528840	A	2021年10月21日
CN	112561067	A	2021年3月26日	WO	2021190349	A1	2021年9月30日
				US	2022222565	A1	2022年7月14日
				CN	112561067	B	2022年11月15日
CN	113242027	A	2021年8月10日	无			
CN	113394535	A	2021年9月14日	无			
JP	S63290979	A	1988年11月28日	JPH	0785104	B2	1995年9月13日