



(12)发明专利申请

(10)申请公布号 CN 110494998 A

(43)申请公布日 2019.11.22

(21)申请号 201880024286.3

(74)专利代理机构 北京市金杜律师事务所  
11256

(22)申请日 2018.04.02

代理人 赵林琳

(30)优先权数据

62/484,326 2017.04.11 US

15/836,667 2017.12.08 US

(51)Int.Cl.

H01L 39/14(2006.01)

H01L 39/22(2006.01)

H01L 39/24(2006.01)

(85)PCT国际申请进入国家阶段日  
2019.10.10

(86)PCT国际申请的申请数据  
PCT/US2018/025617 2018.04.02

(87)PCT国际申请的公布数据  
W02018/191041 EN 2018.10.18

(71)申请人 微软技术许可有限责任公司  
地址 美国华盛顿州

(72)发明人 D·B·塔克曼

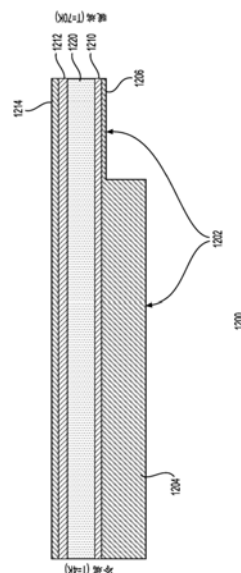
权利要求书2页 说明书14页 附图17页

(54)发明名称

用于超导互连件的热管理

(57)摘要

描述了用于超导互连件的热管理。互连件可以具有耦合至超导系统的第一端和耦合至非超导系统的第二端。互连件可以包括具有临界温度的超导元件。在超导系统和非超导系统的操作期间,第一端附近的互连件的第一部分可以具有等于或低于超导元件的临界温度的第一温度,第二端附近的互连件的第二部分可以具有高于超导元件的临界温度的第二温度,并且其中,互连件还可以被配置为减小第二部分长度,使得互连件的整个长度上的大致温度被维持在等于或低于超导元件的临界温度的温度。



1. 一种用于耦合超导系统和非超导系统的互连件,所述互连件包括:

第一端,所述第一端被配置用于耦合至所述超导系统,其中所述互连件包括具有临界温度的超导元件;以及

第二端,所述第二端被配置用于耦合至所述非超导系统,使得在所述超导系统和所述非超导系统的操作期间,所述第一端附近的所述互连件的第一部分具有等于或低于所述超导元件的所述临界温度的第一温度,所述第二端附近的所述互连件的第二部分具有高于所述超导元件的所述临界温度的第二温度,并且其中所述互连件还被配置为减小所述第二部分的长度,使得所述互连件的整个长度上的大致温度被维持在等于或低于所述超导元件的所述临界温度的温度。

2. 根据权利要求1所述的互连件,其中所述互连件包括:第一层,所述第一层至少包括所述超导元件;第二层,所述第二层至少包括所述超导元件;以及第三层,所述第三层包括形成在所述第一层与所述第二层之间的介电材料。

3. 根据权利要求2所述的互连件,其中所述互连件包括第四层和第五层,所述第四层包括邻近于所述第一层形成的非超导金属元件,所述第五层包括邻近于所述第二层形成的非超导金属元件。

4. 根据权利要求3所述的互连件,其中所述第五层的厚度沿着所述互连件的长度方向变化,以减小所述第二部分的所述长度,使得所述互连件的几乎所述整个长度被维持在等于或低于所述超导元件的所述临界温度的所述温度。

5. 根据权利要求3所述的互连件,其中所述第五层的厚度沿着所述互连件的长度方向变化,使得所述互连件的所述第一部分中的所述第五层的第一厚度与所述互连件的所述第二部分中的所述第五层的第二厚度的比率至少为五。

6. 根据权利要求2所述的互连件,其中热系杆的第一端被连接至所述互连件,并且所述热系杆的第二端被连接至冷却板。

7. 根据权利要求1所述的互连件,其中所述超导元件包括铌。

8. 根据权利要求1所述的互连件,其中所述临界温度与范围介于4开尔文至77开尔文内的温度相对应。

9. 根据权利要求3所述的互连件,其中所述非超导金属元件包括铜、银、金或钛。

10. 一种用于耦合超导系统和非超导系统的互连件,所述互连件包括:

第一端,所述第一端被配置用于耦合至所述超导系统,其中所述互连件包括具有临界温度的超导元件;以及

第二端,所述第二端被配置用于耦合至所述非超导系统,其中所述互连件还包括:

第一层,所述第一层至少包括所述超导元件,

第二层,所述第二层包括非超导金属元件,其中所述第二层的厚度沿着所述互连件的长度方向变化,使得在所述超导系统和所述非超导系统的操作期间,所述互连件的整个长度上的大致温度被维持在等于或低于所述超导元件的所述临界温度的温度。

11. 根据权利要求10所述的互连系统,其中所述第一端附近的所述互连件的第一部分具有等于或低于所述超导元件的所述临界温度的第一温度,所述第二端附近的所述互连件的第二部分具有高于所述超导元件的所述临界温度的第二温度,并且其中所述第二层的厚度沿着所述互连件的长度方向变化,使得所述互连件的第一部分中的所述第二层的第一厚

度与所述互连件的所述第二部分中的所述第二层的第二厚度的比率至少为五。

12. 根据权利要求10所述的互连件,还包括第三层,所述第三层包括介电质。

13. 根据权利要求10所述的互连件,其中所述临界温度与范围介于4开尔文至77开尔文内的温度相对应。

14. 根据权利要求10所述的互连件,其中所述超导元件包括铌。

15. 根据权利要求10所述的互连件,其中所述非超导金属元件包括铜、银、金或钛。

## 用于超导互连件的热管理

### 背景技术

[0001] 在诸如数字处理器的电子设备中使用的基于半导体的集成电路包括基于互补金属氧化物半导体 (CMOS) 技术的数字电路。然而, CMOS技术在设备大小方面达到其极限。另外, 基于CMOS技术的数字电路在高时钟速度下的功率消耗日益成为高性能数字电路和系统的限制因素。

[0002] 作为示例, 数据中心中的服务器越来越多地消耗大量功率。即使在CMOS电路不活动时, 功率消耗也部分地作为因能量耗散而导致的功率损耗的结果。这是因为即使在这些电路不活动并且不消耗任何动态功率时, 这些电路由于需要维持CMOS晶体管的状态仍然消耗功率。另外, 因为使用DC电压为CMOS电路供电, 所以即使在CMOS电路不活动时也存在一定量的电流泄漏。因此, 即使在这些电路当前未处理信息时, 一定量的功率也不仅会由于需要维持CMOS晶体管的状态而且还会由于电流泄漏而被浪费。

[0003] 使用基于CMOS技术的处理器和相关组件的附加方法是使用基于超导逻辑的设备。还可以使用基于超导逻辑的设备来处理量子信息, 诸如量子比特。与可以在室温操作的CMOS设备不同, 基于超导逻辑的设备需要较低温度才能正常运作。在许多应用中, 基于超导逻辑的设备和CMOS设备可能需要彼此互连。类似地, 基于超导逻辑的模块可能需要彼此互连或者与可以在其他较低温度操作的其他模块互连。

### 发明内容

[0004] 在一个示例中, 本公开涉及一种用于耦合超导系统和非超导系统的互连件。该互连件可以包括: 第一端, 该第一端被配置用于耦合至超导系统, 其中该互连件包括具有临界温度的超导元件。该互连件还可以包括: 第二端, 该第二端被配置用于耦合至非超导系统, 使得在超导系统和非超导系统的操作期间, 第一端附近的互连件的第一部分具有等于或低于超导元件的临界温度的第一温度, 第二端附近的互连件的第二部分具有高于超导元件的临界温度的第二温度, 并且其中该互连件还被配置为减小第二部分长度, 使得互连件的整个长度上的大致温度被维持在等于或低于超导元件的临界温度的温度。

[0005] 在另一示例中, 本公开涉及一种用于耦合超导系统和非超导系统的互连件。该互连件可以包括: 第一端, 该第一端被配置用于耦合至超导系统, 其中该互连件包括具有临界温度的超导元件。该互连件还可以包括: 第二端, 该第二端被配置用于耦合至非超导系统。该互连件还可以包括: 第一层, 该第一层至少包括超导元件; 和第二层, 该第二层至少包括非超导金属元件, 其中第二层的厚度沿着互连件的长度方向变化, 使得在超导系统和非超导系统的操作期间, 互连件的整个长度上的大致温度被维持在等于或低于超导元件的临界温度的温度。

[0006] 在另一示例中, 本公开涉及一种用于耦合超导系统和非超导系统的互连件。该互连件可以包括: 第一端, 该第一端被配置用于耦合至超导系统, 其中该互连件包括具有临界温度的超导元件。该互连件还可以包括: 第二端, 该第二端被配置用于耦合至非超导系统。该互连件还可以包括第一层, 该第一层包括介电质, 第一层具有沿着互连件的长度方向的

第一边缘和沿着互连件的长度方向与第一边缘相对的第二边缘。该互连件还可以包括：至少包括超导元件的超导体的第一差分对，该第一差分对沿着互连件的长度方向而被形成，并且该第一差分对被形成为与第二边缘相比更接近第一边缘。该互连件还可以包括：至少包括超导元件的超导体的第二差分对，该第二差分对沿着互连件的长度方向而被形成，并且该第二差分对被形成为与第一边缘相比更接近第二边缘。该互连件还可以包括非超导体金属，该非超导体金属沿着互连件的长度方向在第一差分对与第二差分对之间被形成，其中非超导体金属的厚度被选择，使得在超导系统和非超导系统的操作期间，互连件的整个长度上的大致温度被维持在等于或低于超导元件的临界温度的温度。

### 附图说明

[0007] 通过示例说明了本公开，并且本公开不限于附图，在附图中，相同附图标记指示类似元件。示意图中的元件是出于简单和清楚起见而被图示的，并且不一定需要按比例绘制。

[0008] 图1示出了根据一个示例的互连件的近似温度分布曲线；

[0009] 图2示出了根据一个示例的针对复合普通/超导薄膜导体的热夹持 (clamping) 的示意图；

[0010] 图3示出了根据一个示例的互连件的俯视图；

[0011] 图4示出了根据一个示例的另一互连件的俯视图；

[0012] 图5示出了根据一个示例的互连件的横截面视图；

[0013] 图6示出了根据一个示例的另一互连件的横截面视图；

[0014] 图7示出了根据一个示例的另一互连件的俯视图；

[0015] 图8和图9示出了根据一个示例的另一互连件的俯视图和仰视图；

[0016] 图10示出了根据一个示例的另一互连件的横截面视图；

[0017] 图11示出了根据一个示例的另一互连件的横截面视图；

[0018] 图12示出了根据一个示例的互连件的侧视图；

[0019] 图13示出了根据一个示例的另一互连件的侧视图；

[0020] 图14示出了根据一个示例的另一互连件的侧视图；

[0021] 图15示出了根据一个示例的具有互连件的系统的示意图；

[0022] 图16示出了根据一个示例的具有互连件的系统的示意图；以及

[0023] 图17示出了根据一个示例的系统的示意图。

### 具体实施方式

[0024] 本公开中所描述的示例涉及超导互连件，其包括基于柔性基板的超导互连件。可以使用这些互连件来耦合基于超导逻辑的模块。作为示例，这些互连件可以在基于超导逻辑的系统内的模块中间提供电连接，该基于超导逻辑的系统可以在大约4开尔文(约4K)的热环境下操作。还可以使用这些互连件来将基于超导逻辑的设备与基于CMOS的设备或其他类型的设备耦合，该基于CMOS的设备或其他类型的设备可以在大约70开尔文(约70K)的热环境下操作。另外，还可以使用这些互连件来将基于超导逻辑的设备(在大约4开尔文(约4K)温度热环境下操作)与量子计算设备耦合，该量子计算设备可以在低得多的温度(例如大约20毫开尔文(约20mK))下操作。量子计算设备可以处理量子信息，例如量子比特。超导

逻辑设备可以包括低功率超导体逻辑电路。与CMOS晶体管不同,超导体逻辑电路可以使用基于约瑟夫森结的设备。示例性约瑟夫森结可以包括经由阻碍电流的区域耦合的两个超导体。阻碍电流的区域可以是超导体本身的物理窄化、金属区域或薄绝缘势垒。作为示例,可以将超导体-绝缘体-超导体(SIS)类型的约瑟夫森结实现为超导电路的部分。作为示例,超导体是在不存在电场的情况下可以承载直流电(DC)的材料。这些材料在高速经典和量子计算电路操作的频率(数量级为10GHz)下具有零DC电阻和非常低的电阻。作为示例性超导体,铌(Nb)具有大约9.2开尔文的临界温度( $T_c$ )。在低于 $T_c$ 的温度,铌是超导的;然而,在高于 $T_c$ 的温度,其表现为具有电阻的普通金属。因此,在SIS类型的约瑟夫森结中,超导体可以是铌超导体,且绝缘体可以是氧化铝势垒。在SIS类型的结中,当波函数隧穿穿过势垒时,两个超导体中的时间的变化的相位差在两个超导体之间产生电势差。在一个示例中,SIS类型的结可以是超导回路的部分。在某些示例中,可以使用微波信号来控制基于超导逻辑的设备,包括例如超导量子比特(qubit)的状态。超导量子比特(qubit)的栅极的许多实现需要高频微波信号。

[0025] 当这些基于超导逻辑的系统被连接至其他类型的基于逻辑的系统(诸如基于CMOS设备的系统)时,这些系统需要经由高速通信链路互连。在一个示例中,这些通信链路可以是光纤、铜或另一类型的通信链路。在一个示例中,这些通信链路可能需要以每秒10至100千兆比特(Gbits/s)的速度操作。在一个示例中,在低温环境下操作的系统可能需要真空才能正常操作。在一个示例中,真空可以涉及范围介于 $10^{-3}$ 托至 $10^{-10}$ 托内的压力。

[0026] 本公开中所描述的示例还涉及用以在处于两种不同温度(例如称为“冷”和“暖”)下的电路装置之间连接的超导柔性互连件,这些温度分别低于和高于电缆中的导体(例如Nb)的超导转变温度 $T_c$ 。针对给定的DC电阻,热泄漏主要由维德曼-弗兰兹(Wiedemann-Franz)定律设定,其建立导电率与导热率之间的比例。然而,高频RF信号的信号衰减由高频电阻确定,高频电阻通常比常规电缆中的DC电阻大得多。为了实现最佳可能热泄漏,仅受维德曼-弗兰兹定律的限制,可能需要DC电阻与RF电阻相当的电缆。只有在电缆中的导体相对于感兴趣的频率下的趋肤深度(通常为GHz频率下的亚微米尺寸)较薄时才会出现这种情况。但是这又意味着电缆需要变得极短以便具有可接受的低电阻。

[0027] 为了提供可接受的低电损耗(即,低电阻),可以设计电缆的温度,使得几乎整条电缆长度被维持在低于 $T_c$ 的温度,仅允许暖端附近的相对较短的部分升温到高于 $T_c$ 。这可以通过以下方式中的任一者来实现:通过将外部机械夹具应用于暖端附近的被维持在低于 $T_c$ 的温度的电缆,或通过电缆本身内包含高导热路径(例如铜平面),该高导热路径从电缆的冷端开始并且大部分朝向暖端延伸,使得只有在暖端附近的相对较短的长度的电缆具有高于 $T_c$ 的温度。因此,作为示例,热夹具通过有效地产生两个串联电缆来解决由高RF电阻产生的问题:一条电缆是较长且超导的,而另一条电缆是较短且由普通金属制成的。总之,在一个方面中,本公开涉及修改电缆中的热传导路径,以使其在大部分长度上人为地维持在低温下,使得热转变区域在暖端附近的长度相对较短。如果电缆的低温部分包含超导体,那么我们在针对几乎整条电缆长度的超导传输线上获得几乎无损耗的信号传播的优点,只有相对较短的串联电阻出现在暖端处。这些解决方案可以有利地允许超导计算机与在较温暖的温度操作的电子组件(例如基于CMOS的电子器件)之间的高速通信。

[0028] 与常规的铜同轴电缆相比,超导柔性阻抗受控电缆(诸如微带、带状线或共面波

导) 允许以最低损耗在长距离内传输高速电信号。另外,其物理横截面可以非常小,使得可以在单个紧凑型带状电缆中传输大量信号。然而,如果电缆温度超过 $T_c$ ,那么性能优点可能会丧失,诸如在从低温环境连接至更高温度的电子器件时发生。一旦电缆温度超过 $T_c$ ,小导体横截面就可以在每单位长度上产生非常高的电阻。然而,如果沿着大部分电缆长度的温度可以被维持在低于 $T_c$ 的温度,那么这种普通段的长度可以短到足以使其电阻是可接受的(例如小于50欧姆的串联电阻)。在一个示例中,用指形冷却器或冷却板将电缆物理地夹持在暖端附近可以实现这种效果。备选地,通过在电缆中包含高导热路径(例如具有高残余电阻比(RRR)的厚铜平面),可以在没有外部机械夹具的情况下实现相同效果,该高导热路径从电缆的冷端开始且延伸了大部分电缆的长度。在一些情况下,超导体的高温正常状态电阻可能如此高以至于需要使得热夹具与暖端极为接近(几毫米或更小)以实现可接受的低串联电阻,这可能会带来实际困难。在这种情况下,可以转而改变将高于 $T_c$ 的区域中的铜导电路径,这允许较长转变区域(几厘米),实现此转变区域更为实际。

[0029] 构建密集集成的低温电子系统的限制中的一种是电互连技术。可能需要具有较小横截面的密集超导电缆。薄膜铌(Nb)的超导特征使其成为用于实现超导电缆的可行材料。与刚性基板上的互连件相比,柔性超导电缆可以具有更实际的用途和更广泛的应用前景。一个问题是Nb薄膜容易从底层基板开裂和分层,特别是当如柔性电缆的情况下经受弯曲时。可以将钛用作针对随后沉积的金属层的粘附和转变层。可以将铜(作为具有优异延展性的优良电导体和热导体)沉积在Nb薄膜的顶部以防止其开裂,可能修补开裂损坏并且提供增强热化以在超导温度以及在室温实现更好的电缆性能。

[0030] 本公开中的某些示例涉及在柔性基板上制造的超导互连件的热管理,包括例如铌(Nb, $T_c$ 约为9.2K)或相关合金,诸如氮化铌(NbN)或铌钛氮化物(NbTiN)。某些示例涉及复合超导体/普通导体(例如Nb/Ti/Cu)薄膜柔性电缆。在这些示例中,导电层可以是超导体(例如铌或氮化铌)和高导电可延展普通金属(例如铜(厚度的范围可以根据应用而介于10纳米至更高厚度内))的层压板。覆盖(或例如包覆)有铜的这些电缆可以有利地具有更高的制造产量。某些示例可以涉及可用于低频DC信号(例如偏置电流)或高频射频信号(例如10GHz信号)应用中的任一者的高度并联互连件。本公开还讨论了通过引入附加的普通金属层(诸如钛(Ti)和铜(Cu))来修改电缆的机械特性和电特性。在某些示例中,超导材料可以直接沉积在自立式聚酰亚胺膜(诸如Kapton膜)上,或超导材料可以沉积在刚性基板晶片顶上的薄膜聚酰亚胺介电质上;在后一种情况下,电缆随后从基板晶片释放。作为示例,使用多层薄膜处理,可以形成传输线(包括微带、带状线和共面传输线)。

[0031] 在一个示例中,可以使用玻璃基板来制造柔性超导电缆。可以将初始聚酰亚胺膜(例如Pyralin PI-2611)旋转涂布在玻璃基板上。使用等离子体工艺,随后进行物理气相沉积(PVD)工艺,可以将薄Ti膜涂覆于固化的聚酰亚胺膜上。接着,可以沉积超导金属层,例如铌层。接着,Ti/Nb堆叠可以覆盖有铜层(也可以使用其他普通导体,诸如金或银)。最后,可以使用光刻和薄膜处理技术来使导体的轨迹图案化。然后可以在导体的顶部涂覆聚酰亚胺层并且使其固化。可以重复这些工艺以形成具有多个导体层的结构。

[0032] 可以使用超导“矩形同轴”带状电缆来连接在约20mK的热环境下操作的模块和在约4K的热环境下操作的模块。如果在终端附近使用热夹具以使非超导部分极短(几毫米),那么甚至可以在包含光电收发器的室温电路板处终止。带的两个面可以包覆有平面超导屏

蔽,除了用于钉住(由低温恒温器中的残余磁场引起的)所捕获的通量的临时孔之外。可以使用反应性离子蚀刻或其他薄膜处理技术来形成孔。可以将超导屏蔽(壁)定位于相邻的超导信号布线之间,从而确保零可测量的串扰。导体可以仅为几微米宽且约 $1\mu\text{m}$ 厚,其将在处于超导状态时有利地产生非常高的互连密度(在 $1\text{cm}$ 的宽度内约500或1000个信号)、优良的机械柔性和非常低的轴向热泄漏。在该示例中,铌( $\text{Nb}$ ;  $T_c=9.2\text{K}$ )是优选超导体。可以使用常规的单端对或差分对中的任一者。终端可以使用超导焊料(例如 $\text{Pb}$ 或 $\text{In}$ )通过以下方式中的任一者接合至芯片:以用于在芯片的边缘附近接触的紧密间隔的线性阵列,或以将与芯片的面配合的不太密集间隔的2维阵列(在电缆的端部处具有分离芯片可以较方便,电缆的唯一功能是提供从紧密间隔的线性布线到不具有侵略性间隔的2维区域阵列的‘空间转换’)。此处所描绘的示例的阻抗大约为 $50\Omega$ ;然而,例如,如果设计完全旨在用于量子比特、超导电路和电/光收发器之间的内部连接,那么可能不需要此阻抗。在量子计算应用中,可以布置终止方案,使得所有终端电阻器位于 $4\text{K}$ 端上,以使 $20\text{mK}$ 下的热电子生成最小化。这种布置将导致针对进入量子比特的信号的‘串联终端’,并且导致针对来自量子比特的信号的‘并联终端’。

[0033] 如先前所提到的,虽然铌( $\text{Nb}$ )是针对许多应用的最简单且最适合的超导体,但也可以使用其他材料,包括合金。作为示例,也可以使用 $\text{NbN}$ 或 $\text{NbTiN}$ ,条件是其高得多的动态电感与预期用途相兼容。也可以使用高温超导体(HTSC)材料(诸如 $\text{YBCO}$ 或 $\text{BSCCO}$ )来提供从低温到约 $70\text{K}$ 的超导互连件。

[0034] 这些柔性多导体带状电缆可以在低温计算中具有若干用途:(1)作为约 $4\text{K}$ 热环境内的电连接(例如约瑟夫森结计算机内的互连模块);(2)作为约 $4\text{K}$ 环境与较高温度之间的连接(例如用于将约瑟夫森电路装置接口连接到在约 $70\text{K}$ 或更高的温度操作的经典 $\text{CMOS}$ 电路);以及(3)作为约 $4\text{K}$ 环境与低得多的温度之间的连接(例如用于控制在约 $20\text{mK}$ 下操作的量子计算机中的量子比特)。

[0035] 作为示例,图1示出了互连件104(例如超导带状电缆)沿着其长度的近似温度分布曲线。在该示例中,超导带状电缆经示出为在沿着其长度的若干中间位置处具有4个普通金属(例如铜、银或金)包层区段(例如110、112、114和116)。左侧示出了稀释制冷机102的示意图,以示出电缆的每个包层区段将被热连接的实际热阶段的潜在物理位置(例如铜线、箔或编织物的一端焊接或夹持到包层,而另一端焊接或夹持到热阶段),如同每个包层区段向上穿过系统。这些阶段之间的非线性温度分布曲线可能是由于电缆的高度非线性导热率,其随着温度降低而迅速减小。使用热系杆(例如120、122、124和126)的这种层级顺序可以有利地使稀释制冷机的总负担最小化,并且还可以有利地允许超导体中的热电子(例如‘准粒子’)的最大机会,以在电缆在 $20$ 至 $30\text{mK}$ 量子比特样品终止之前冷却。针对电缆的暖端需要继续高于 $4\text{K}$ 以在室温终止的特殊情况(例如针对经典计算机的光电数据链路),‘热夹持’至 $4\text{K}$ (例如经由液氮热管)可以被放置在非常接近电缆终端的位置,使得超导体仅在长度为 $1$ 或 $2$ 毫米时是‘正常的’(例如电阻的)。如果超导体包覆有铜或如下文所讨论的其他高导电金属,那么热夹具与高温终端之间的距离可以延长到几厘米,这是由于相较于诸如铌的超导体的正常状态电阻,铜的电阻更低。尽管图1示出了以特定方式布置的一定数目的组件,但可以存在以不同方式布置的更多或更少数目的组件。

[0036] 在一些示例中,上述互连件可以被表征为复合超导体/普通薄膜柔性电缆,其中,



导电层是超导体 (诸如铌或氮化铌) 和高导电可延展普通金属 (诸如铜) 的层压板 (厚度的范围根据应用而介于10nm至任意厚度)。这些电缆具有有趣且有用的特性。例如,覆盖 (包覆) 有Cu的Nb电缆可以具有显著更高的制造产量 (例如其对柔性基板上的凹坑、粒子和粗糙度更具容忍性)、大致更高的临界电流,并且相较于在相同的聚酰亚胺介电层上制造的未经包覆的Nb电缆,可以承受更多的弯曲周期 (例如数百个)。

[0037] 薄膜铜包层还可以促进电缆的更好热化 (将其维持在均匀且明确限定的温度),这可能与在传热不佳的真空低温恒温器中使用超导电缆有关。当一者正连接在空间上分离的两个4K电路板之间时,可能会出现对热化的这种需求的示例,其中可能会担心由于来自系统的较高温区域辐射而导致的电缆的可能升温。

[0038] 当使用包含具有转变温度 $T_c$ 的超导体的覆铜电缆连接在低温 ( $T_{low} \ll T_c$ ) 模块与高温 ( $T_{high} \gg T_c$ ) 模块之间时,自然会存在沿着电缆的某个位置的转变区域 (其中 $T$ 约为 $T_c$ ),其中,电流从超导体平滑地移动到普通金属。在一个示例中,通过沿着电缆的长度在某个中间点将该电缆热夹持到 $T_{low}$  (或大致低于 $T_c$ 的任何其他温度),可以延长超导区域的长度,并且可以减小正常导电区域的长度。图2示出了根据一个示例的针对复合普通/超导薄膜导体200的热夹持的示例。在该示例中,使用厚 (因此高导热) 铜膜来沿着导体200的实质长度实现低温的维持,但不需要沿着电缆的中间点处的物理热夹具。导体200还可以包括聚酰亚胺膜 (例如Pyralin PI-2611) 202。在一个示例中,可以将聚酰亚胺膜202旋转涂布在玻璃基板 (未示出) 上。导体200还可以包括铌层 (例如薄NbN层) 204。可以在铌层204上形成铜膜。铜膜可以包括夹持在导体200的冷端处的厚铜部分208和朝向导体200的暖端定位的薄铜部分206。图2的示意图220示出了即使在温度上升到高于冷端温度 (例如4K) 时的信号的几乎无损耗传播。

[0039] 有利地,热夹持可以减小线的总串联电阻,这又可以允许使用较小的导体横截面,从而使得能够实现比其他可能的互连密度更高的互连密度。可以通过在沿着线的中间位置 (优选地接近线的较暖端) 处应用热管、铜带或其他技术来实现热夹持。如图2所示,还可能通过使用从线的冷 (4K) 端到沿着线的中间位置的非常厚 (因此高导热) 的铜包层将热夹具集成到传输线中。这可以将厚包层区段维持在低于 $T_c$ 。在该中间点之外,包层可以转变为薄得多的层 (恰好足以在没有太多衰减,但具有低得多的导热性的情况下传导信号);该薄区域是线段,在该线段中,温度从低于 $T_c$ 转变为高达“热”端处的70K。

[0040] 根据图2中所示的示例,厚的高残余电阻比 (RRR) 的铜具有非常好的导热率,因此其将温度维持在4K附近。从电缆的一端 (在4K的温度) 到点 $x_0$ 的细微线性斜坡 (显示温度升高) 表明即使高RRR铜具有非常好的导热率,但并不是无限的。斜坡大致为线性的,这是因为热流沿着线的长度是恒定的 (忽略辐射损耗),并且厚Cu的导热率大致恒定,这是由于温度变化不大。一旦电缆转变为薄金属,导热率就低得多,因此温度因流过电缆的相同量的电流而迅速升高。这是因为根据维德曼-弗兰兹定律,金属的导热率大致与绝对温度和电阻的乘积成比例。如果电阻在感兴趣的温度范围内是恒定的,那么导热率大致与温度变化成比例地增大。这样,薄金属的暖端处的温度梯度小于冷端附近 (在点 $x_0$ 到点 $x$ 之间) 的温度梯度。尽管图2示出了在冷端与暖端之间具有温度的金属的导热率的特定变化,但这仅仅是示例,并且变化分布曲线可能是不同的。

[0041] 当铜被配置为在低于 $T_c$ 的温度操作的受控阻抗传输线 (即,微带、带状线或共面)

时,铜(或其他普通导体)包层可以在传输线内实现低通滤波器,其中拐角频率约等于 $R/(2\pi L_K)$ ,其中 $R$ 是普通导体的串联电阻,并且 $L_K$ 是超导体的串联动态电感。在足够低的频率下,线可以充当近乎完美的超导体,因此可以用于在没有任何损耗的情况下承载DC偏置电流,就如同铜不存在一般。然而,在足够高的频率下,与超导体相关联的额外电抗 $j\omega L_K$ 的大小使得射频电流更有利地流过普通导体;此线现在充当普通导体,就如同超导层实质上不存在一般。这种滤波特征对使电磁噪声衰减(例如从较高温度移除热噪声)有用,从而避免了对在传输线中包括离散衰减器的需要。由于有用的量子计算机经预期为具有极其大量的量子比特控制线,因此消除大量的离散衰减器可能是非常有益的。当然,可能通过制造集成式薄膜电阻器将局部薄膜衰减器集成到超导弯曲电缆的设计中,或者可能将离散的电阻器芯片阵列以倒装芯片方式附接到电缆上,但是相较于那些备选方案,包层方法可以将制造工艺简化。

[0042] 在一个示例中,低拐角频率( $\ll 1\text{GHz}$ )可能是优选的,并且在该示例中,优选地可以使用高动态电感超导体,诸如氮化铌和中等厚度(例如250nm)的铜包层。根据另一示例,如果需要高拐角频率(诸如用于微波信号传播),那么将选择低动态电感超导体(通常是纯Nb)和更薄的铜包层。可以通过选择性地使铜(或其他普通导体)包层图案化使得其具有与超导体不同的宽度(而非相同的宽度),来向传输线设计者提供附加的自由度。特别地,使铜包层宽度略微比底层Nb线宽度更窄可以有利地增加与流过铜的电流相关联的磁性电感。这不只是可以抵消超导体的动态电感,使得射频电流能够继续主要地经过无损耗超导体。以这种方式,可能能够获得由铜包层产生的热化和增强的可靠性益处,但不会过度地牺牲高频性能。

[0043] 在一个示例中,在需要在4K与低得多的温度(例如20mK)之间的连接的量子计算机应用中,可能期望保持这种低通滤波特性,同时使电缆的轴向导热性最小化,这是因为铜会存在明显的热泄漏。这可以通过在一个或多个位置处中断铜包层,使得其沿着电缆长度不呈现连续的热传导路径来实现。可以设想铜包层和/或底层超导体的更复杂的光刻图案,其将产生专门的滤波和透射特性,例如布拉格反射器或超材料结构。

[0044] 在某些示例中,使超导弯曲电缆中的射频损耗尽可能物理地较小可以是优选的。作为示例,大型约瑟夫森计算机可能需要相对较长(多米)的电缆,其承载频率含量高于30GHz的数字信号。备选地,量子计算机可以用单独的微波信号(在约10GHz的范围内)驱动大量的量子比特,并且由于导体中的微波损耗(例如由于热激励的准粒子)或介电质(例如由于介电损耗角正切)而导致的电缆的任何升温可以增加20mK稀释制冷机上的热负荷。针对这些应用,任何普通金属(包层或粘附层)的存在可能是有害的。然而,10nm的Ti粘附层可以薄到足以不会对射频性能造成明显损害。另外,在聚酰亚胺上的Nb超导体的情况下,温度可能需要降低到3K或更低,以便在高达20GHz下具有可忽略的超导损耗。此外,典型的薄膜聚酰亚胺介电质(即,PI-2611或HD4100)的损耗角正切可能远低于室温值(例如在4K的温度 $\tan\delta\approx 0.0002$ 与在室温为0.01进行对比),并且当温度进一步降低到1K时,损耗角正切可能继续下降到 $<0.0001$ 。因此,即使具有主要在约4K温度操作的约瑟夫森计算机,将较长柔性电缆维持在比计算机的其余部分稍低的温度也是有益的。例如,长距离电缆可以在低温管道中布线,使用超流氦、氦蒸汽或传导冷却技术将这些低温管道维持在1或2开尔文下。

[0045] 图3示出了具有垂直差分对的示例互连件300的俯视图。互连件300可以形成于柔

性或刚性介电质302(例如聚酰亚胺)上。如图3所示,四条铌线304、306、308和310可以形成用于传输信号的四个垂直差分对的上半部分。铌(Nb)线可以任选地包覆有薄铜层。如图3所示,示例互连件的一端可以处于冷端(例如大约4K),而另一端可以处于暖端(例如大约70K)。另外,如图3所示,厚的高RRR铜膜320、322和324可以在承载信号的Nb线之间交错。在该示例中,Nb信号线本身未包覆薄铜层,这是因为形成这些线的聚酰亚胺或一些其他介电质可能能够横向地将热传导到交错的铜,使得Nb信号线保持在足够冷的温度。尽管图3示出了导体和介电质的特定布置,但也可以使用其他布置。

[0046] 图4示出了具有垂直差分对的另一示例互连件400的俯视图。互连件400可以形成于柔性或刚性介电质402(例如聚酰亚胺)上。如图4所示,四条铌线404、406、408和410可以形成用于传输信号的四个垂直差分对的上半部分。在该示例中,铌(Nb)线可以用薄铜层包覆其长度的一部分(例如部分412、414、416和418)。在包覆Nb线的整个长度可能会导致过多的RF损耗时,可以选择这种配置。如图4所示,示例互连件的一端可以处于冷端(例如大约4K),而另一端可以处于暖端(例如大约70K)。在该示例中,厚的高RRR铜膜420、422和424可以在承载信号的Nb线之间交错。尽管图4示出了层的特定布置,但是互连件400可以包括以不同方式布置的附加的层或更少的层。

[0047] 图5示出了图4中所示的示例互连件的横截面视图500(沿着电缆的长度看)。横截面视图500示出了介电层502、504和506。在该示例中,介电层502和504中的每一个可以为大约10微米厚。介电层506可以为20微米厚。另外,横截面视图500示出了由包覆有薄铜层(例如512、522、516和526)的铌层(例如510、520、514和524)形成的差分对的横截面。铌层和铜层中的每一个可以为大约0.25微米厚和大约18微米宽。横截面视图500还示出了厚的高RRR铜膜530。在该示例中,厚的高RRR铜膜可以为大约25微米厚。相对于图5描述的各种尺寸和温度仅仅是示例。

[0048] 图6示出了图3或图4中所示的示例互连件的横截面视图600(沿着电缆的长度看),其已经根据图5修改为在互连件的两侧包括热夹具。因此,在互连件的顶侧和底侧上都设置了高RRR铜夹具。横截面视图600示出了介电层602、604和606。在该示例中,介电层602和604中的每一个可以为大约10微米厚。介电层606可以为20微米厚。另外,横截面视图600示出了由包覆有薄铜层(例如610、620、614和624)的铌层(例如612、622、616和626)形成的差分对的横截面。铌层和铜层中的每一个可以为大约0.25微米厚和大约18微米宽。横截面视图500还示出了在互连件的相对侧上形成的厚的高RRR铜膜630和另一厚的高RRR铜膜640。在该示例中,厚的高RRR铜膜可以为大约25微米厚。相对于图6描述的各种尺寸和温度仅仅是示例。

[0049] 图7示出了具有共面差分对的示例互连件700的俯视图。互连件700可以形成于柔性或刚性介电质702(例如聚酰亚胺)上。图7中所示的六条铌线(例如704、706、708、710、712和714)可以形成用于传输信号的三个共面差分对(第一对包括铌线704和706,第二对包括铌线708和710,且第三对包括铌线712和714)。铌(Nb)线任选地包覆有薄铜层。如图7所示,示例互连件的一端可以处于冷端(例如大约4K),而另一端可以处于暖端(例如大约70K)。在该示例中,厚的高RRR铜膜720和722可以在承载信号的铌线之间交错。根据需要,外部热夹具的一端可以被应用在互连件的暖端附近(图7中的热夹具的可能位置被示出为虚线矩形730),而另一端可以被连接到在4K下的冷却板。尽管图7示出了层的特定布置,但互连件700可以包括以不同方式布置的附加的层或更少的层。

[0050] 图8和图9分别示出了另一示例互连件的俯视图800和底视图900。俯视图800示出了并联延伸的多条铌线(804、806、808、810、812、814和816),其可以任选地包覆有薄铜层。铌线可以形成于柔性或刚性介电质802(例如聚酰亚胺)上。图9中的底视图900示出了较薄的Nb接地平面904上的厚的高RRR铜平面902,其从冷端朝向暖端延伸并且在薄接地平面904(由铜、铌或铜和铌的组合组成)继续且在暖端处结束的位置处终止。另外,图9示出在铜平面的另一侧的是铌线(912、914、916、918、920、922和924)。尽管图8和图9示出了层的特定布置,但是互连件可以包括以不同方式布置的附加的层或更少的层。

[0051] 图10示出了图8和图9中所示的示例互连件的横截面视图1000(沿着包括热夹持区域的电缆的长度看)。因此,在互连件的底侧上设置了高RRR铜夹具1010。在该示例中,铜夹具1010可以为20微米厚。横截面视图1000还示出了在铜夹具1010上方形成的铌层1020。在该示例中,铌层1020可以是0.25微米厚。在铌层1020上方示出了介电层1030。在该示例中,介电层1030可以为20微米厚。另外,横截面视图1000示出了包覆有薄铜层(例如1034、1038和1042)的铌层(例如1032、1036和1040)的横截面。铌层和铜层中的每一个可以为大约25微米厚和大约18微米宽。相对于图10描述的各种尺寸和温度仅仅是示例。

[0052] 图11示出了图8和图9中所示的示例互连件的横截面视图1100(沿着包括非热夹持区域的电缆的长度看)。在该示例中,铜夹具1110可以仅为0.25微米厚。因此,在非热夹持区域中,热夹具的厚度可以基本上比热夹持区域的厚度小得多。横截面视图1100还示出了在铜夹具1110上方形成的铌层1120。在该示例中,铌层1120可以是0.25微米厚。在铌层1120上方示出了介电层1130。在该示例中,介电层1130可以为20微米厚。另外,横截面视图1100示出了包覆有薄铜层(例如1134、1138和1142)的铌层(例如1132、1136和1140)的横截面。铌层和铜层中的每一个可以为大约25微米厚和大约18微米宽。相对于图11描述的各种尺寸和温度仅仅是示例。

[0053] 图12示出了另一示例互连件的侧视图1200。该示例涉及沿着互连件的整个长度包覆铜(如附图标记1202所指示)的互连件(例如微带)。沿着互连件的一个表面改变铜包层的厚度,使得在热夹持区域中的互连件的底侧上设置高RRR(例如大约250)铜夹具1204。在一个示例中,高RRR铜夹具1204可以在热夹持区域中具有大约20微米的厚度。非热夹持区域中的低RRR(例如大约4)的厚度可以为大约0.25微米。互连件还可以包括铌层1210和1212。在该示例中,铌层中的每一个可以具有大约0.25微米的厚度。可以将介电层1220包括在铌层之间。在该示例中,介电层1220可以是聚酰亚胺层,并且可以具有大约20微米的厚度。信号层1214可以形成在铌层1212上方。信号层1214可以使用铜形成,并且可以具有大约0.25微米的厚度。底部铜包层1202还可以充当接地层。相对于图12描述的各种尺寸和温度仅仅是示例。

[0054] 图13示出了示例互连件(例如微带)的侧视图,其示出了非热夹持区域中的信号线和接地平面的铜包层。该示例示出了信号层的部分铜包层。可以使用铜包层来解决超导信号线的射频特性的劣化。在该示例中,Nb接地平面可以通过介电质(例如聚酰亚胺)与厚的高RRR铜平面隔开。然而,因为聚酰亚胺具有足够的导热率,所以即使Nb接地平面不与厚的高RRR铜平面直接接触,也可以是足够冷的。在该示例中,高RRR铜夹具1310可以在热夹持区域中具有大约20微米的厚度。互连件还可以包括铌层1332和1334。在该示例中,铌层中的每一个可以具有大约0.25微米的厚度。如图13所示,可以包括介电层1320。在铌层1332与1334

之间可以包括另一介电层1336。在该示例中,介电层1320和1336中的每一个可以是聚酰亚胺层。介电层1320可以具有大约20微米的厚度。铌层1334可以充当信号层。在该示例中,铌层1334可以部分地包覆有铜层1342,并且铌层1332可以部分地包覆有铜层1340。铜层1340和1342中的每一个可以具有大约0.25微米的厚度。相对于图13讨论的各种尺寸和温度仅仅是示例。

[0055] 图14示出了在非热夹持区域中没有铜包层的示例互连件(例如微带)的侧视图1400。这种互连件可以用于非常短的转变长度。沿着互连件的一个表面改变铜包层的提供,使得在热夹持区域中的互连件的底侧上设置高RRR(例如大约250)铜夹具1410。在一个示例中,高RRR铜夹具1410可以在热夹持区域中具有大约20微米的厚度。在非热夹持区域中未提供铜包层。互连件还可以包括铌层1432和1434。在该示例中,铌层中的每一个可以具有大约0.25微米的厚度。可以将介电层1420包括在铌层之间。在该示例中,介电层1420可以是聚酰亚胺层,并且可以具有大约20微米的厚度。铌层1434可以充当信号层。底部铜包层1410还可以充当接地层。相对于图14讨论的各种尺寸和温度仅仅是示例。

[0056] 图15示出了具有互连件的系统1500的示例,互连件具有不同热夹具或其他热管理结构。图15中所示的各个阶段可以涉及冷却系统,诸如稀释制冷机。作为示例,图15示出了从大约70K的最暖阶段开始到大约30mK的最冷阶段的五个不同的温度阶段。70K阶段可以包括电子器件1504,诸如基于CMOS的设备。30mK阶段可以包括超导设备,诸如图15中所示的量子比特样品1502。可以使用柔性互连件1520来将70K电子器件1504与量子比特样本1502连接。如先前相对于图1所描述的,由于电缆的高度非线性导热率,这些阶段之间的温度分布曲线可能是非线性的,其随着温度降低而迅速减小。可以通过使用高导热路径1530显著地减小70K电子器件与4K阶段之间的热转变区域,该高导热路径可以具有经由热夹具连接到柔性互连件1520的一端(如图15所示),而另一端可以被连接至4K阶段1514(例如被维持在大约4K下的冷却板)。可以在热夹持之后使用另一热系杆1526将柔性互连件1520与4K阶段1514热连接。可以使用又一热系杆1524将柔性互连件1520与700mK阶段1512连接。最后,可以使用另一热系杆1522将柔性互连件1520与100mK阶段1510连接。使用热系杆的层级顺序可以有利地使稀释制冷机的总负担最小化,并且还可以有利地允许超导体中的热电子(例如‘准粒子’)的最大机会,以在电缆在30mK量子比特样品终止之前冷却。针对电缆的暖端需要继续高于4K以在70K或室温终止的情况(例如针对经典计算机的光电数据链路),‘热夹持’至4K(例如经由液氮热管)可以放置在非常接近电缆终端的位置,使得超导体仅在长度为1或2毫米时是‘正常的’(例如电阻的)。如果超导体包覆有铜或另一高导电金属,那么热夹具与高温终端之间的距离可以延长到几厘米,这是由于相较于诸如铌的超导体的正常状态电阻,铜的电阻更低。可以将相对于图3至图14描述的任何互连件用作图15中所示系统的部分。尽管图15示出了以特定方式布置的一定数目的组件,但可以存在不同地布置的更多或更少数目的组件。作为示例,尽管图15示出了物理热夹具,但是可以备选地使用如图13(例如)所示的厚铜平面;在这种情况下,铜平面将需要从较低的4K夹持点延伸到较高的4K夹持点。只要铜的导热率足够好,该备选布置就可以起作用。如果导热率不够好,那么可能需要物理热夹具。如果使用物理热夹具,那么可能还需要跨越两个4K夹持点之间的距离的一些铜,但其可能薄得多,这是因为其不是热的主要载体,而仅用于处理因吸收来自70K阶段的热辐射而泄漏到电缆中的热。

[0057] 图16示出了在平坦柔性带状电缆1640上包括物理热夹具1642的系统1600的示例。电缆1640的一端可以经由焊接或用于接合电缆的其他技术(诸如倒装芯片接合技术)连接到冷端(例如大约4K)。在该示例中,示出了用于将电缆1640连接到冷却电子器件1610的焊接接头1644。电缆1640的另一端可以经由焊接或用于接合电缆的其他技术(诸如倒装芯片接合技术)连接到暖端(例如大约在70K)。在该示例中,示出了用于将电缆1640连接到暖端电子器件1620的焊接接头1646。如图16所示,物理热夹具1642可以经由“波比别针”或夹具在更接近暖端的点处被连接。热夹具的另一端可以被连接到冷却板或制冷阶段1630,其可以被维持在大约4K的温度。将热夹具部位和冷却板互连的物理连接器1650可以被实现为铜线、编织物或箔,或实现为液氮热管。在该示例中,假设冷端与连接热夹具的点之间的距离为 $x$ ,并且假设暖端与连接热夹具的点之间的距离为 $y$ ,那么 $x$ 与 $y$ 的比率的范围可以介于1与100之间。平坦柔性带状电缆也可以包括集成式热夹具或内部热夹具,诸如图3至图14中所示的热夹具。作为示例,如果存在从低温恒温器的较高温度部分到电缆1640的辐射热传递的风险,那么可以包括集成式热夹具作为平坦柔性带状电缆的部分。这是因为在这种情况下,仅使用物理夹具可能不足以使电缆1640的中间保持冷却;具有提供附加热传导的内部热夹具将允许热传导到冷点(传导到电缆1640的4K端或传导到4K物理夹具中任一者)。在那种情况下,可能不需要使用几乎与可能另外所需的同样厚度的铜,这是因为传导的热量可以少得多(仅来自热辐射的散失热量)。尽管图16示出了以特定方式布置的一定数目的组件,但可以存在不同地布置的更多或更少数目的组件。

[0058] 图17示出了包括经典计算机系统(例如经典计算机1710)和超导系统1730(例如包括超导MCM 1732、安装到该超导MCM的芯片、量子比特晶片和安装到该量子比特晶片的芯片)二者的系统1700以及使用热夹具的一个示例,该系统在低温环境下操作。经典计算机1710可以在空气或室温操作,并且可以经由高速短距离光缆(例如电缆1712和1714)耦合到VCSEL阵列1776,并且经由梯度索引透镜阵列窗口(例如窗口1716和1718)耦合到光电检测器阵列1782。可以使用低温恒温器壁1720将低温环境与室温环境隔离。可以使用DC电源电缆1774向超导系统1730的组件提供DC功率,并且可以使用微波电源电缆1772向超导系统1730的组件提供微波功率。

[0059] 仍然参照图17,在该示例中,量子比特被布置为硅或蓝宝石的单个单片晶片(例如量子比特晶片1770)的顶面上(或附近)的2-D阵列(间距 $<200$ 微米以维持晶片对角线 $<约300$ mm)。将20mK冷却板1790热捆绑到稀释制冷机的混合腔室(例如气密氦(He)传热槽1780)。某种基本接口电路装置可以驻留在量子比特晶片本身上;更复杂的接口电路装置(若可能,具有一些错误校正和多路复用功能性)可以驻留在约瑟夫森电路芯片(例如芯片1750、1752、1754、1756、1758和1760)上,这些电路芯片以倒装芯片方式附接(电路面朝下)在紧密平铺的阵列中(例如 $20 \times 20 = 400$ 个芯片)。在该示例中,芯片具有朝向其背侧的穿孔,其中附接有柔性超导带状电缆(例如先前所描述的任何互连件),每条电缆可以是约1000个信号宽。这些电缆可以布线穿过辐射屏蔽到达在约4.2K下操作的高性能约瑟夫森计算机(许多芯片(例如1734、1736、1738、1740、1742和1744),这些芯片倒装安装在超导多芯片模块1732上);这执行进一步的处理,并具有MUX/DEMUX电路装置,使得相对‘较慢’的量子比特(切换时间为几ns)可以接口连接到10GHz、20GHz或甚至40GHz的数字数据速率。

[0060] 继续参照图17,该高速数据流经由另一组超导带状电缆(根据数据速率的选择,分

别为200条、100条或50条电缆)耦合至光学收发器模块(例如VCSEL阵列1776和光电检测器阵列1782);每条电缆可以是约1000单向信号宽的,对于总双向数据速率为约1Pbit/s。光学收发器模块在室温操作,因此可能需要在每个电缆终端附近进行特殊热夹持以使非超导长度最小化并且管理残余热泄漏。作为示例,图17示出了两个热夹具1792,这两个热夹具将光学收发器模块(位于冷水冷却板1728上,其为暖端)连接到超导多芯片模块(MCM)1732,其位于冷端(大约在4.2K的温度)上。可以将先前所描述的任何热夹具布置包含进来作为该系统的部分。另外,根据需要,连接量子比特接口电路和约瑟夫森逻辑的电缆(例如电缆1724)可以是先前描述的具有集成式热夹具或热板的任何互连件。进入透镜阵列的自由空间光学链路将通过低温恒温器的壁的光耦合至连接到经典计算机的光纤束。尽管图17示出了以特定方式布置的一定数目的组件,但可以存在不同地布置的更多或更少数目的组件。

[0061] 在某些示例中,本公开中所提到的系统可以互连以提供计算环境(诸如数据中心中的计算环境),该数据中心除了其他服务之外,还用于提供基于云的服务,诸如软件即服务或平台即服务。

[0062] 总之,本公开涉及用于耦合超导系统和非超导系统的互连件。该互连件可以包括:第一端,该第一端被配置为耦合至超导系统,其中,该互连件包括具有临界温度的超导元件。该互连件还可以包括:第二端,该第二端被配置为耦合至非超导系统,使得在超导系统和非超导系统的操作期间,第一端附近的互连件的第一部分具有等于或低于超导元件的临界温度的第一温度,第二端附近的互连件的第二部分具有高于超导元件的临界温度的第二温度,并且其中,该互连件还被配置为减小第二部分长度,使得互连件的整个长度上的大致温度被维持在等于或低于超导元件的临界温度的温度。

[0063] 该互连件可以包括:第一层,该第一层至少包括超导元件;第二层,该第二层至少包括超导元件;以及第三层,该第三层包括形成在第一层与第二层之间的介电材料。该互连件还可以包括第四层和第五层,该第四层包括邻近于第一层形成的非超导金属元件,该第五层包括邻近于第二层形成的非超导金属元件。第五层的厚度可以沿着互连件的长度方向变化,以减小第二部分长度,使得互连件的几乎整个长度被维持在等于或低于超导元件的临界温度的温度。在一个示例中,厚度的变化可以是如先前所描述的阶梯式变化。第五层的厚度可以沿着互连件的长度方向变化,使得互连件的第一部分中的第五层的第一厚度与互连件的第二部分中的第五层的第二厚度的比率至少为五。

[0064] 热系杆的第一端可以被连接到互连件,并且热系杆的第二端可以被连接到冷却板。超导元件可以是铌,并且非超导元件可以是铜、银、金或钛。临界温度的范围可以介于4开尔文到77开尔文内。

[0065] 在另一示例中,本公开涉及用于耦合超导系统和非超导系统的互连件。该互连件可以包括:第一端,该第一端被配置用于耦合至超导系统,其中,该互连件包括具有临界温度的超导元件。该互连件还可以包括:第二端,该第二端被配置用于耦合至非超导系统。该互连件还可以包括:第一层,该第一层至少包括超导元件;和第二层,该第二层包括非超导金属元件,其中,第二层的厚度沿着互连件的长度方向变化,使得在超导系统和非超导系统的操作期间,互连件的整个长度上的大致温度被维持在等于或低于超导元件的临界温度的温度。

[0066] 第一端附近的互连件的第一部分可以具有等于或低于超导元件的临界温度的第



一温度,第二端附近的互连件的第二部分可以具有高于超导元件的临界温度的第二温度,并且第二层的厚度可以沿着互连件的长度方向变化,使得互连件的第一部分中的第二层的第一厚度与互连件的第二部分中的第二层的第二厚度的比率可以至少为五。

[0067] 该互连件还可以包括第三层,该第三层包括介电质。超导元件可以是铌,并且非超导元件可以是铜、银、金或钛。临界温度的范围可以介于4开尔文到77开尔文内。

[0068] 在另一示例中,本公开涉及用于耦合超导系统和非超导系统的互连件。该互连件可以包括:第一端,该第一端被配置用于耦合至超导系统,其中,该互连件包括具有临界温度的超导元件。该互连件还可以包括:第二端,该第二端被配置用于耦合至非超导系统。该互连件还可以包括第一层,该第一层包括介电质,第一层具有沿着互连件的长度方向的第一边缘和沿着互连件的长度方向与第一边缘相对的第二边缘。该互连件还可以包括:至少包括超导元件的超导体的第一差分对,该第一差分对沿着互连件的长度方向形成,并且该第一差分对形成为与第二边缘相比更接近第一边缘。该互连件还可以包括:至少包括超导元件的超导体的第二差分对,该第二差分对沿着互连件的长度方向形成,并且该第二差分对形成为与第一边缘相比更接近第二边缘。该互连件还可以包括非超导体金属,该非超导体金属沿着互连件的长度方向在第一差分对与第二差分对之间形成,其中,选择非超导体金属的厚度,使得在超导系统和非超导系统的操作期间,互连件的整个长度上的大致温度被维持在等于或低于超导元件的临界温度的温度。

[0069] 介电质可以包括聚酰亚胺。超导元件可以是铌,并且非超导元件可以是铜、银、金或钛。临界温度的范围可以介于4开尔文到77开尔文内。

[0070] 应理解,本文中所描绘的方法、模块和组件仅仅是示例性的。备选地或另外,本文中功能性地描述的内容可以至少部分地由一个或多个硬件逻辑组件来执行。例如但不限于,可以使用的说明性类型的硬件逻辑组件包括现场可编程门阵列(FPGA)、专用集成电路(ASIC)、专用标准产品(ASSP)、片上系统(SOC)、复杂可编程逻辑器件(CPLD)等。在抽象但仍明确的意义上来讲,实现相同功能性的任何组件布置有效地“相关联”,使得能够实现期望的功能性。因此,本文中组合以实现特定功能性的任何两个组件可以被视为彼此“相关联”,使得能够实现期望的功能性,而不考虑架构或中间组件。同样地,如此关联的任何两个组件也可以被视为彼此“可操作地连接”或“耦合”以实现期望的功能性。

[0071] 与本公开中所描述的一些示例相关联的功能性还可以包括存储在非瞬态介质中的指令。本文中所使用的术语“非瞬态介质”是指存储使机器以特定方式操作的数据和/或指令的任何介质。示例性非瞬态介质包括非易失性介质和/或易失性介质。非易失性介质包括例如硬盘、固态驱动器、磁盘或磁带、光盘或磁带、闪速存储器、EPROM、NVRAM、PRAM或其他此类介质或此类介质的网络版本。易失性介质包括例如动态存储器,诸如DRAM、SRAM、高速缓存或其他此类介质。非瞬态介质不同于传输介质,但可以与传输介质结合使用。传输介质用于向或从机器传输数据和/或指令。示例性传输介质包括同轴电缆、光纤电缆、铜线和无线介质,诸如无线电波。

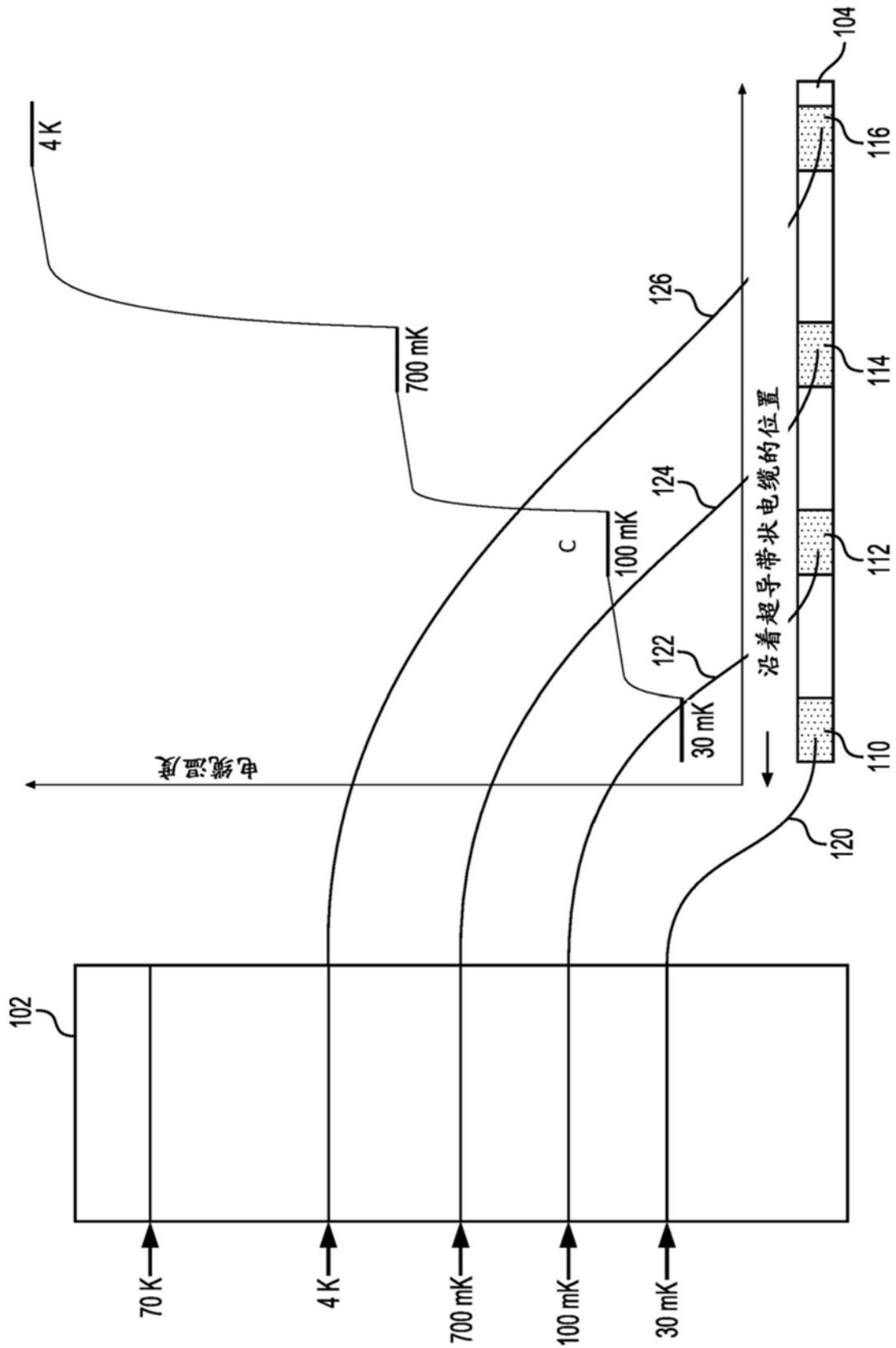
[0072] 此外,本领域的技术人员将认识到,上述操作的功能性之间的界限仅仅是说明性的。可以将多个操作的功能性组合成单个操作,和/或可以将单个操作的功能性分布在附加操作中。此外,备选实施例可以包括特定操作的多个实例,并且可以在各种其他实施例中更改这些操作的顺序。



[0073] 尽管本公开提供了具体示例,但是可以在不脱离如以下权利要求书中阐述的本公开的范围的情况下做出各种修改和改变。因此,本说明书和附图都应该被理解为是说明性的,而不是限制性的,并且所有这种修改都旨在被包括在本公开的范围之内。本文中关于具体示例描述的任何益处、优点或问题的解决方案不旨在被解释为任何或所有权利要求项的关键、必需或必要的特征或要素。

[0074] 此外,如本文中所使用的术语“一”或“一个”被定义为一个或一个以上。而且,即使同一权利要求包括引导性短语“一个或多个”或“至少一个”和诸如“一”或“一个”的不定冠词,在权利要求书中使用诸如“至少一个”和“一个或多个”的引导性短语也不应被解释为暗示由不定冠词“一”或“一个”引入另一权利要求要素将包含这种引入的权利要求要素的任何特定权利要求限制于仅包含一个这种要素的发明。使用定冠词的情况也是如此。

[0075] 除非另有说明,否则诸如“第一”和“第二”的术语用于任意地将这些术语描述的要素区分开。因此,这些术语不一定旨在指示这些要素的时间或其他优先次序。



100

图1

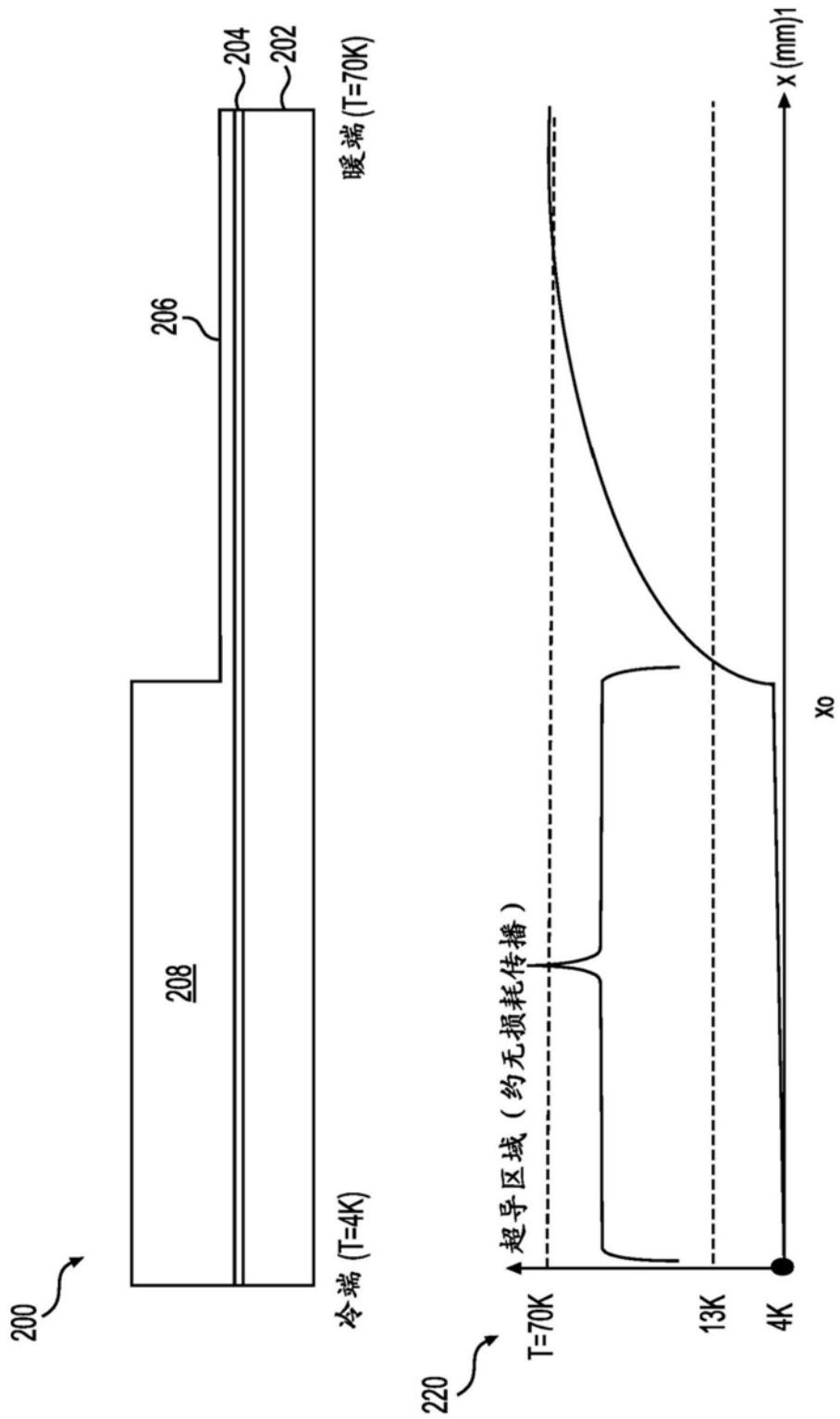


图2

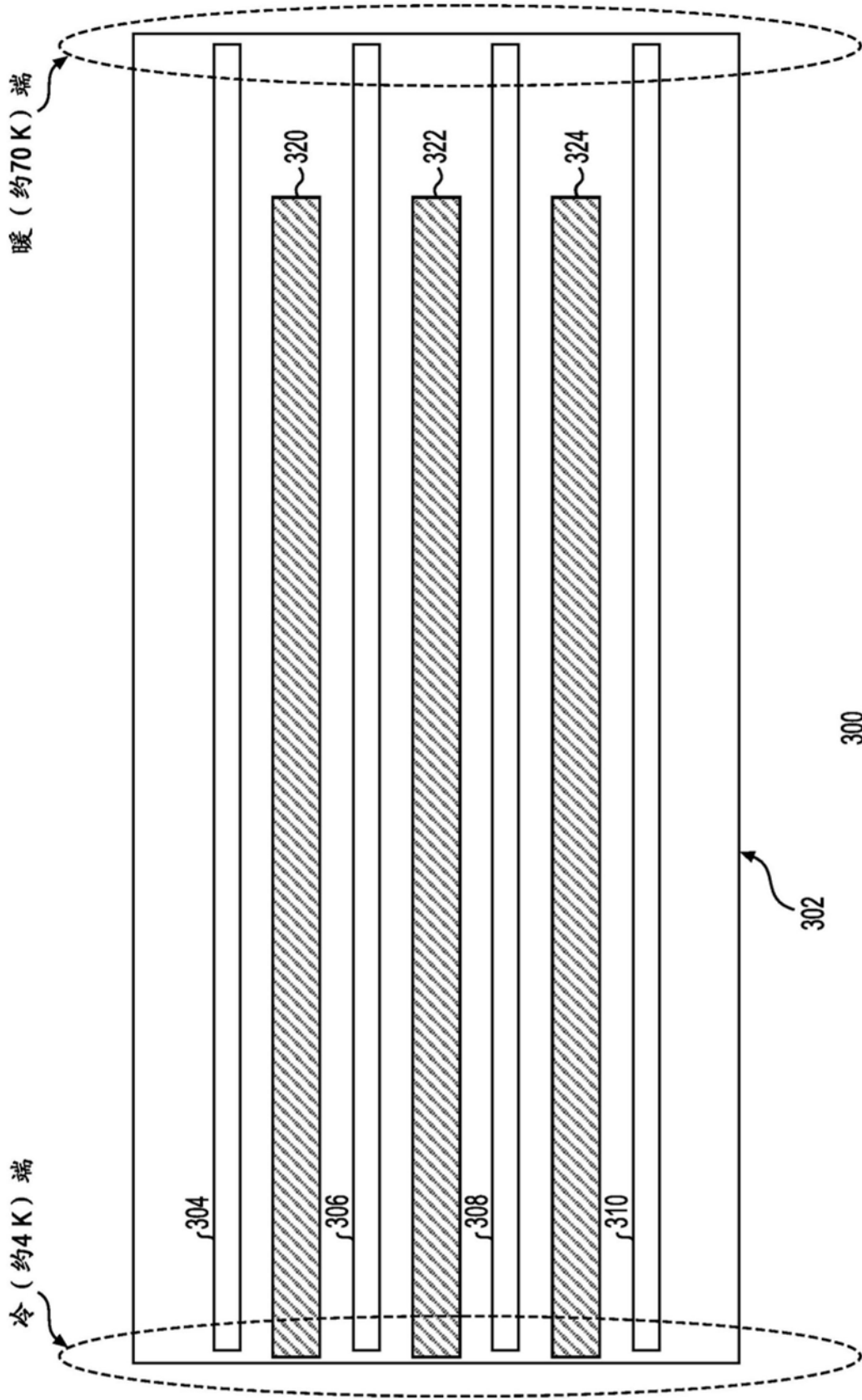


图3

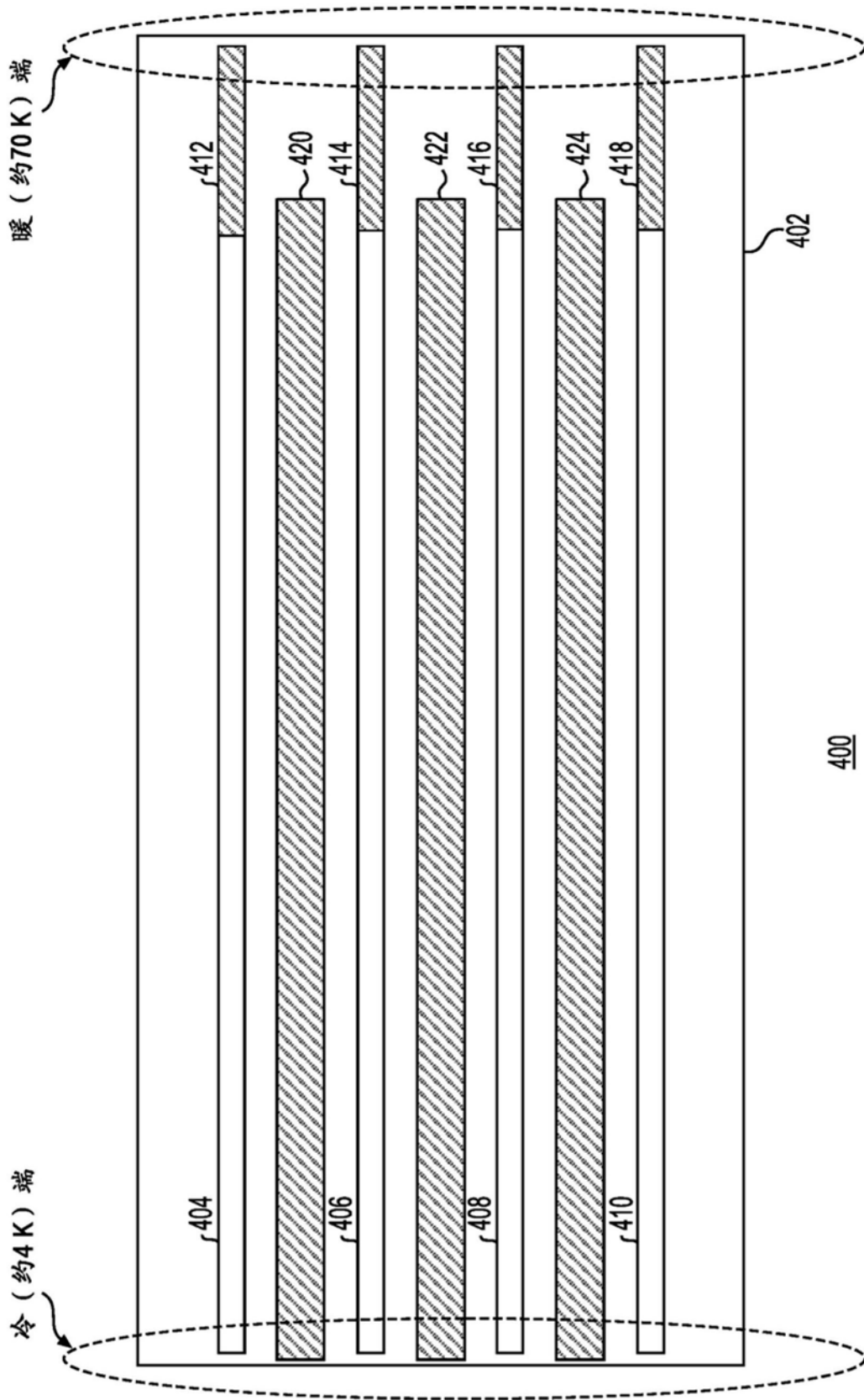


图4

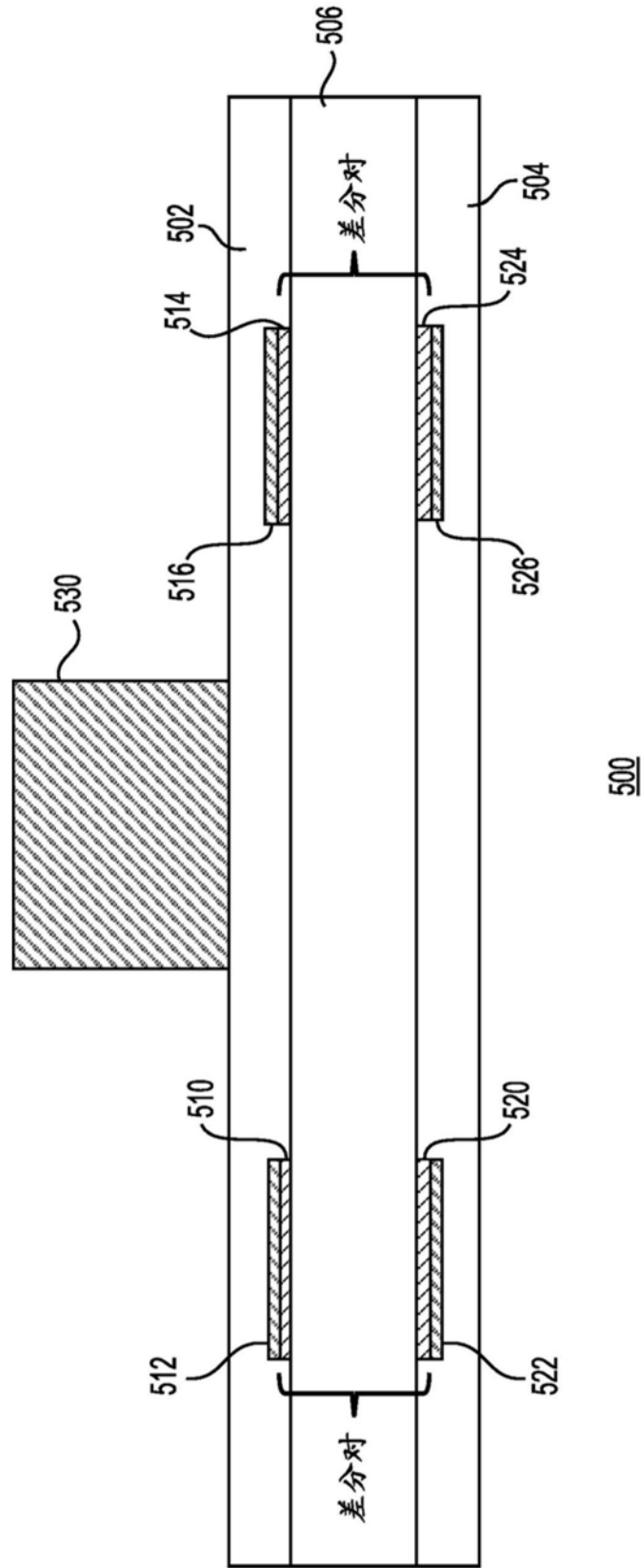


图5

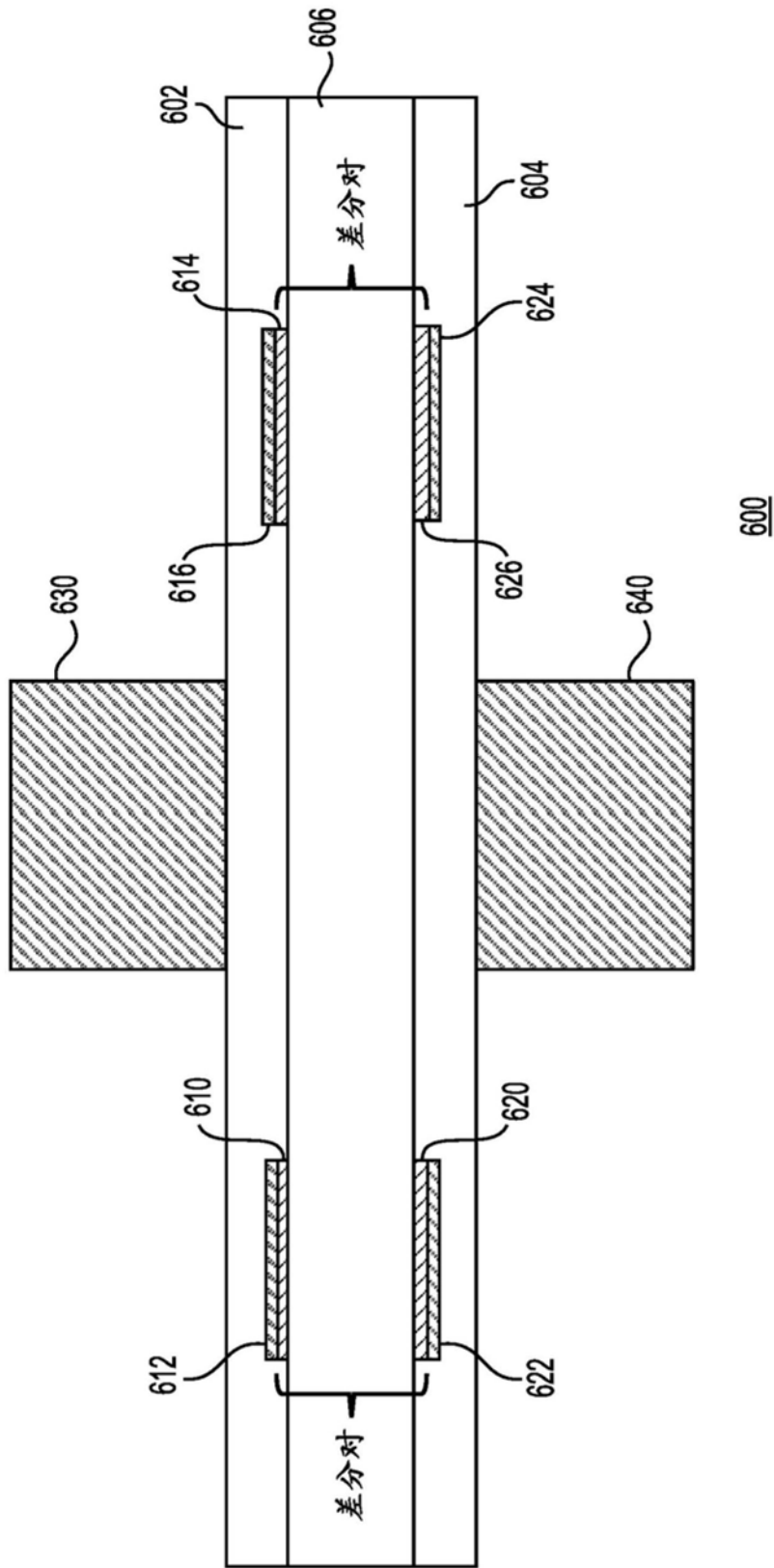


图6

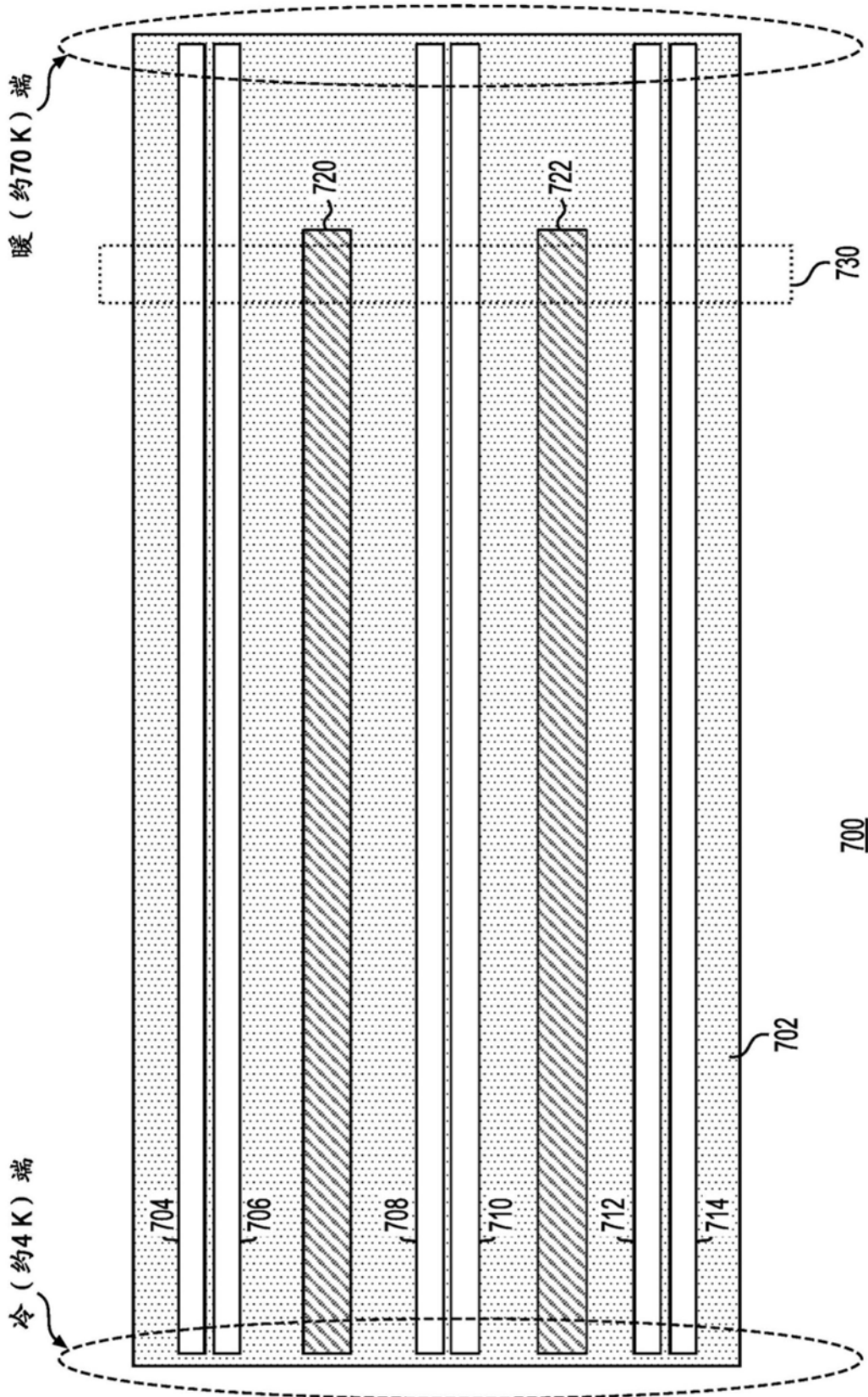


图7



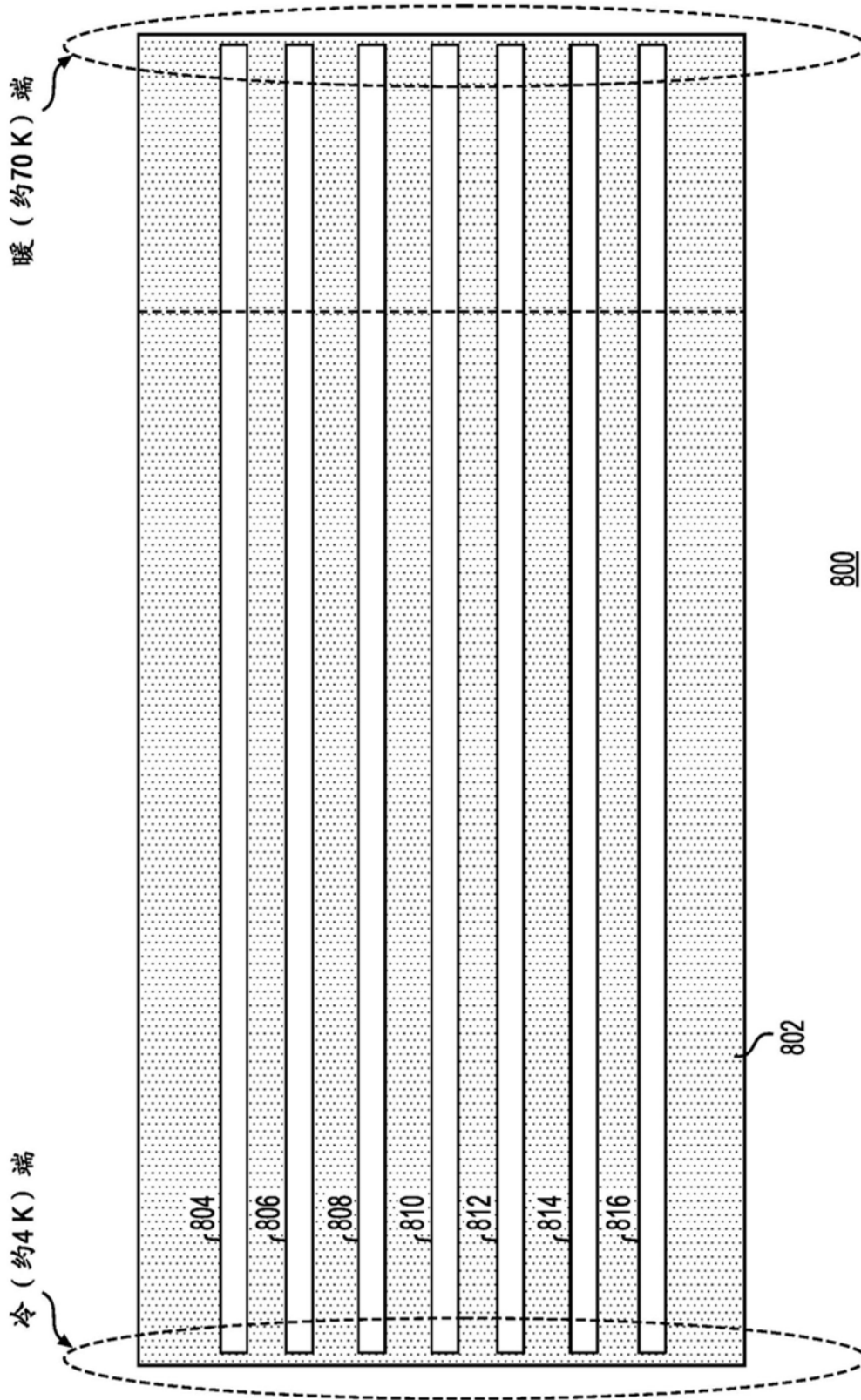


图8

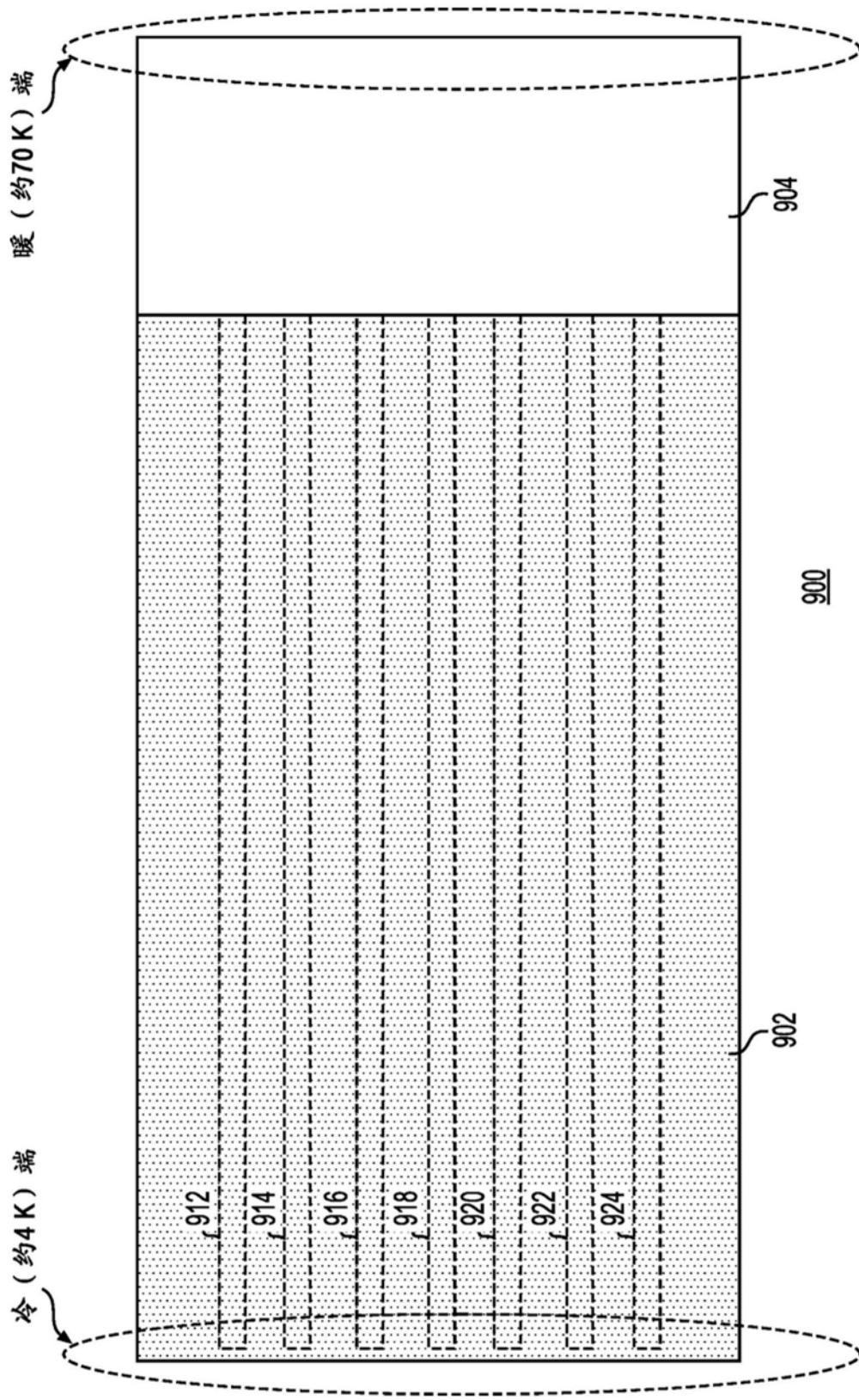


图9

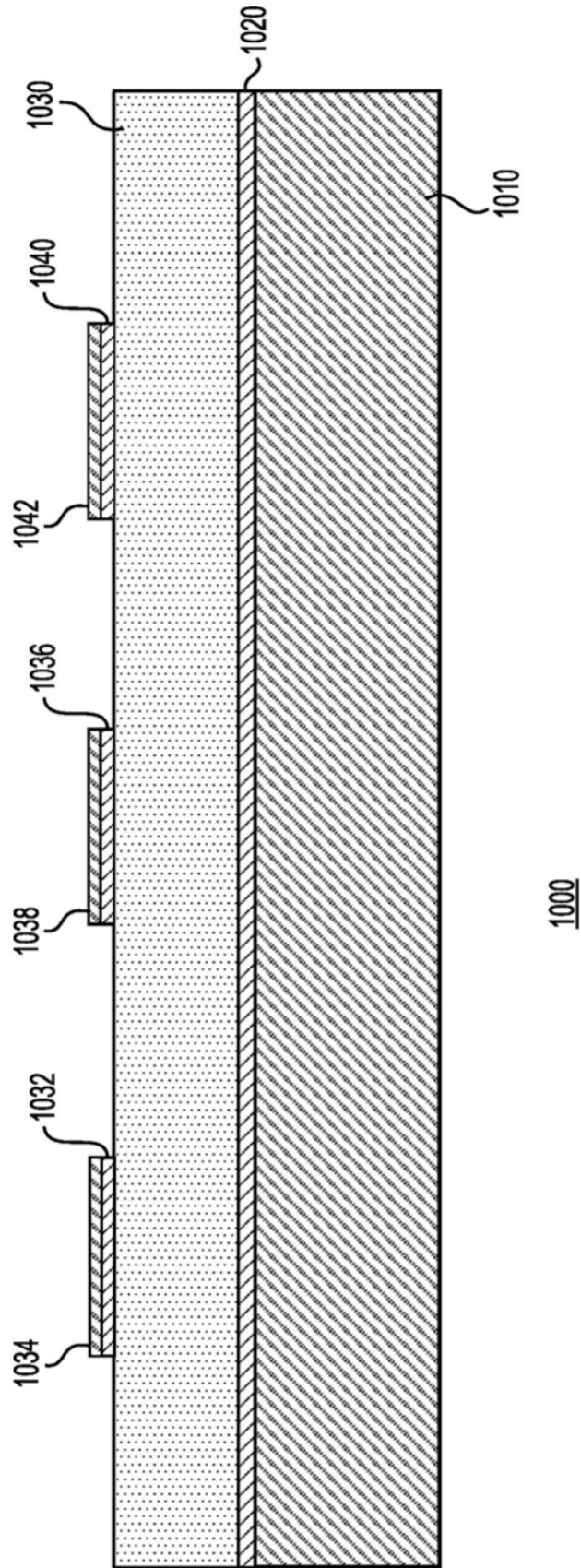


图10

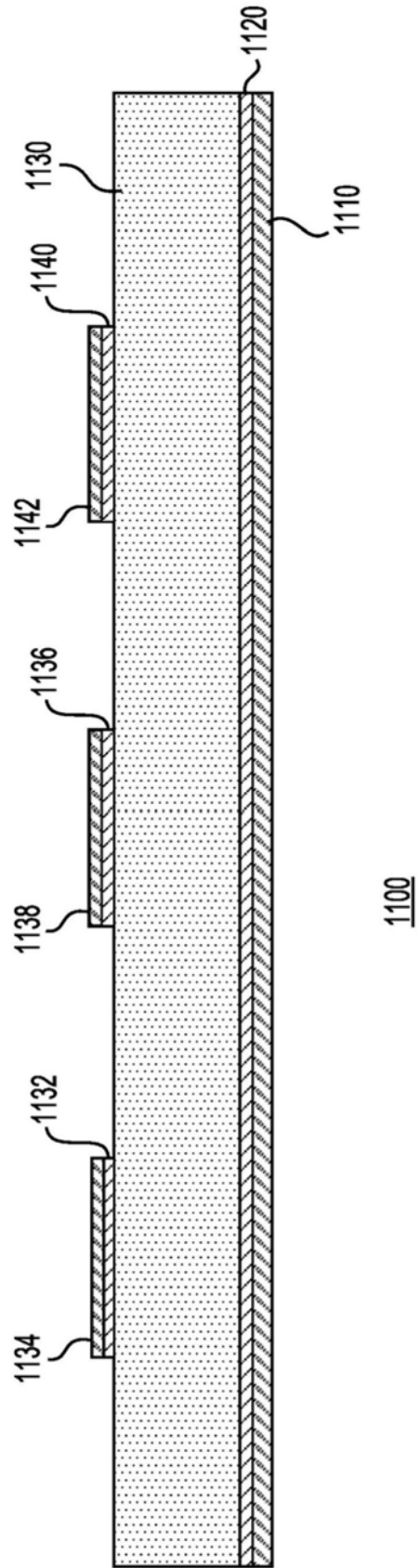


图11

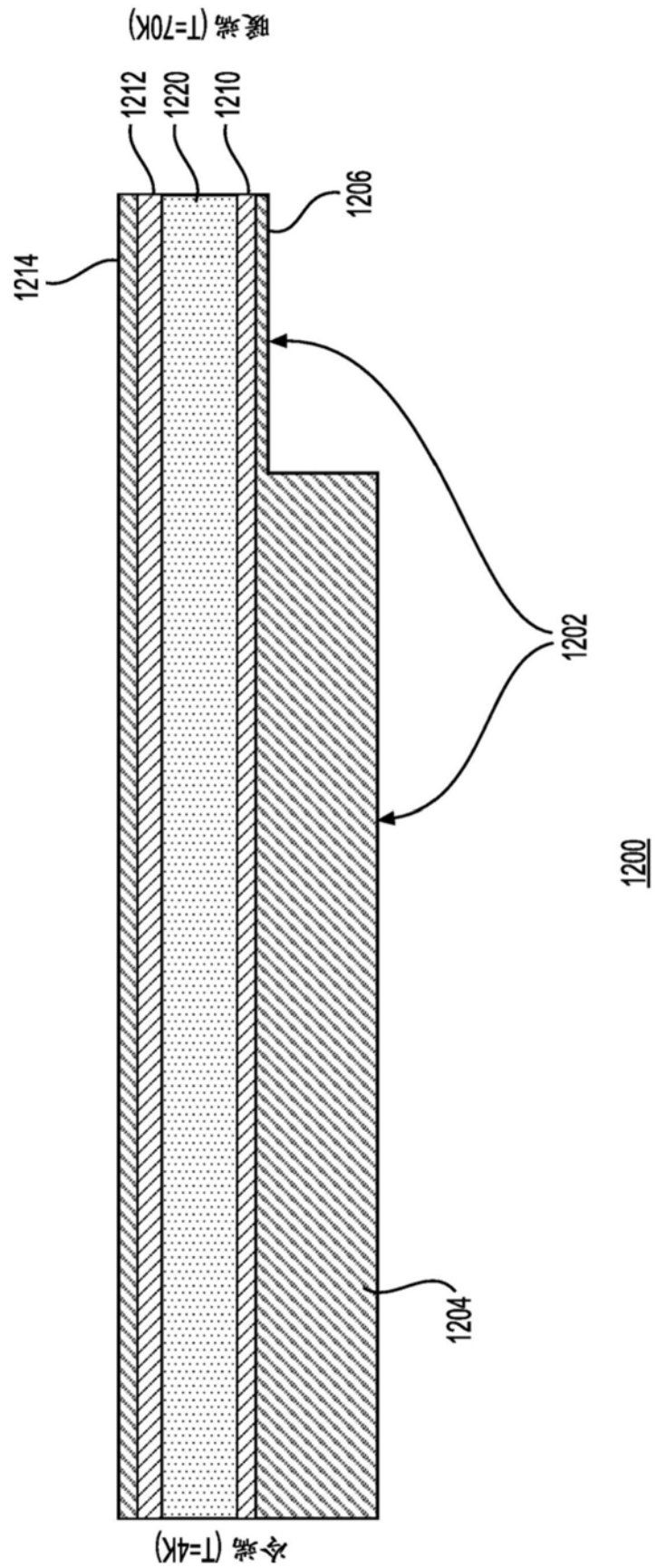


图12

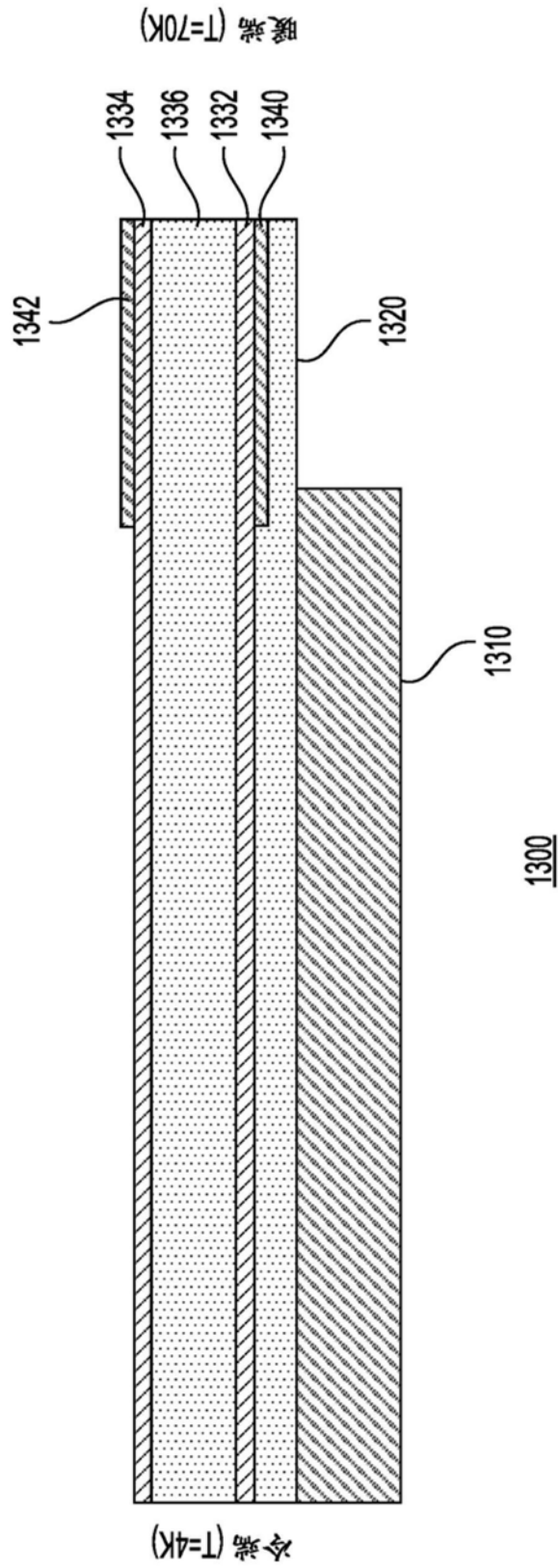


图13

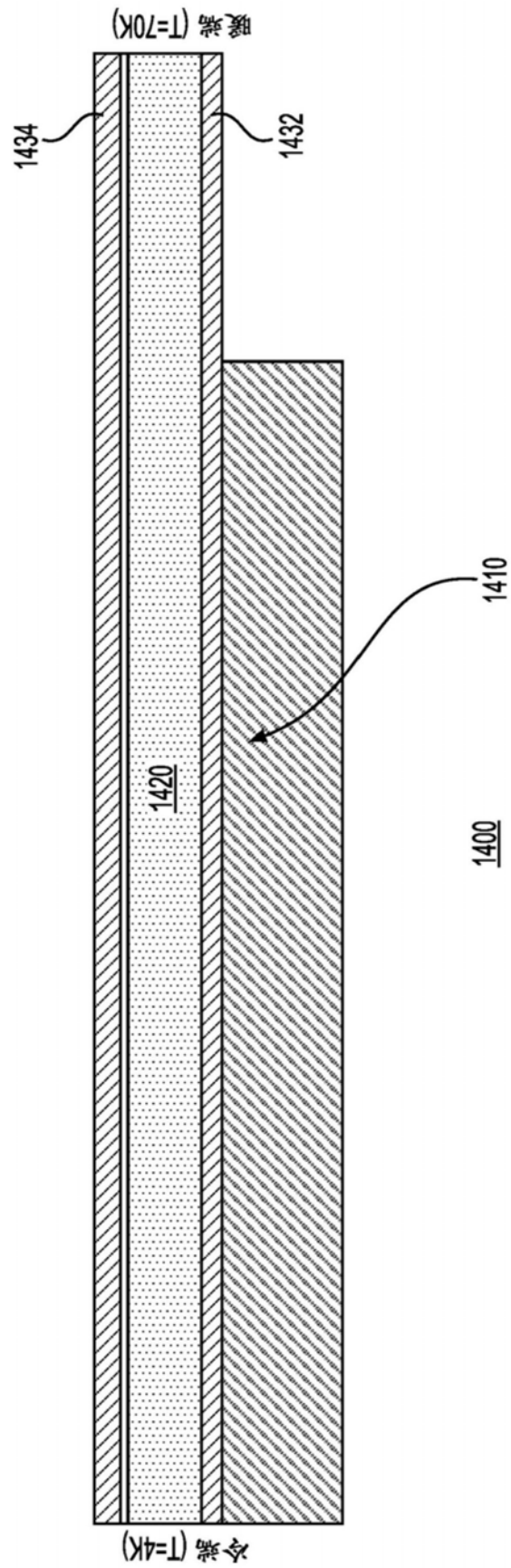


图14

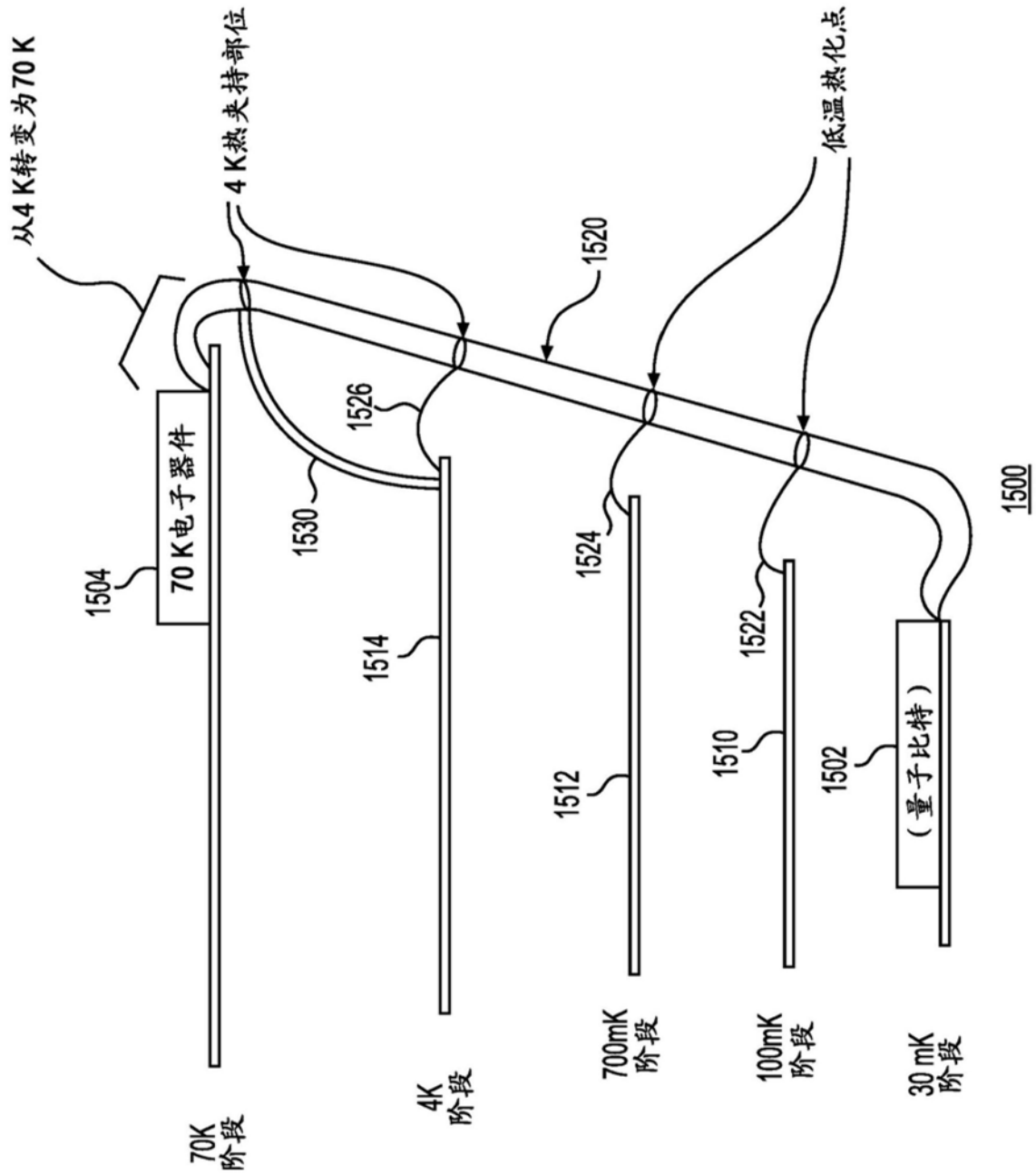


图15



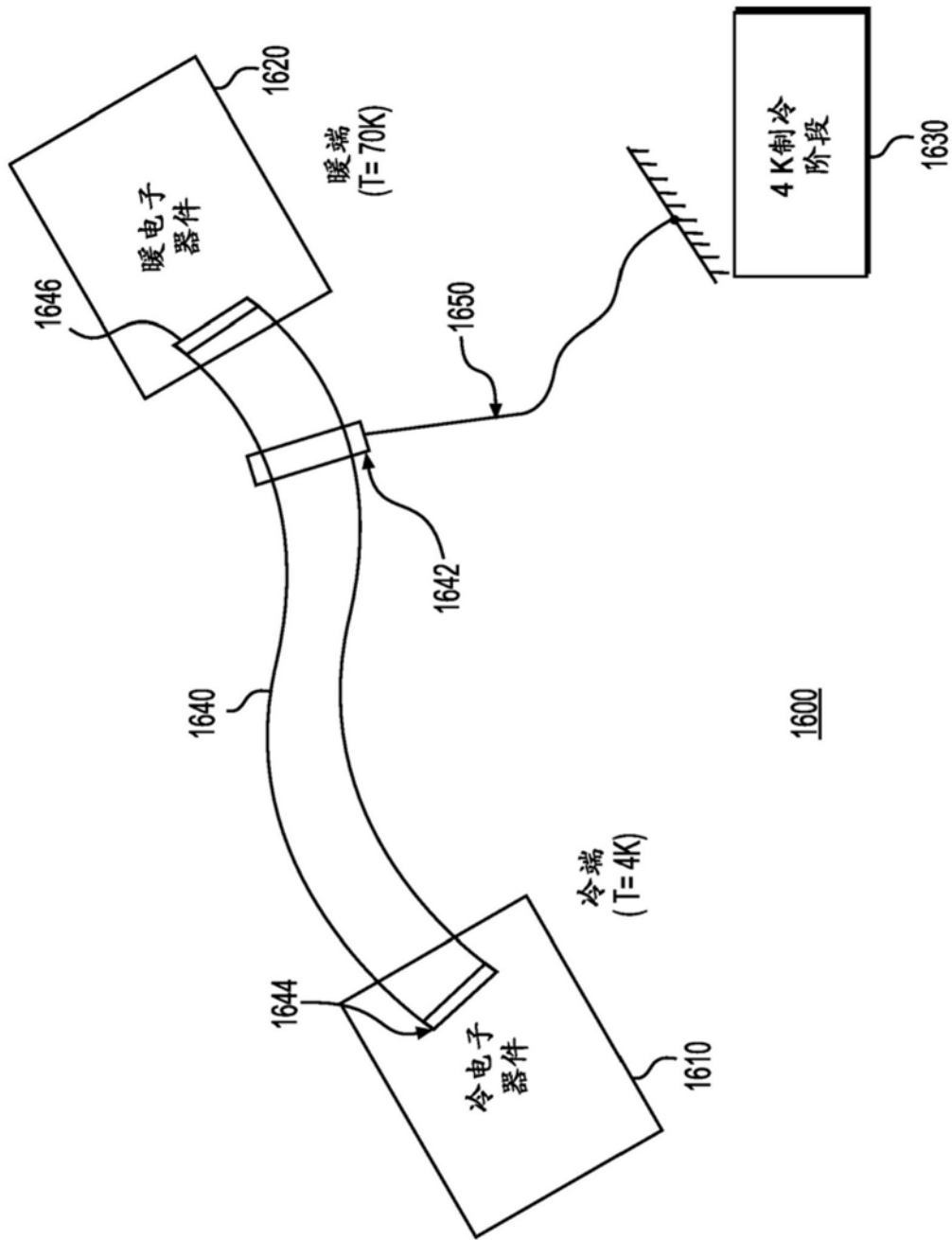


图16

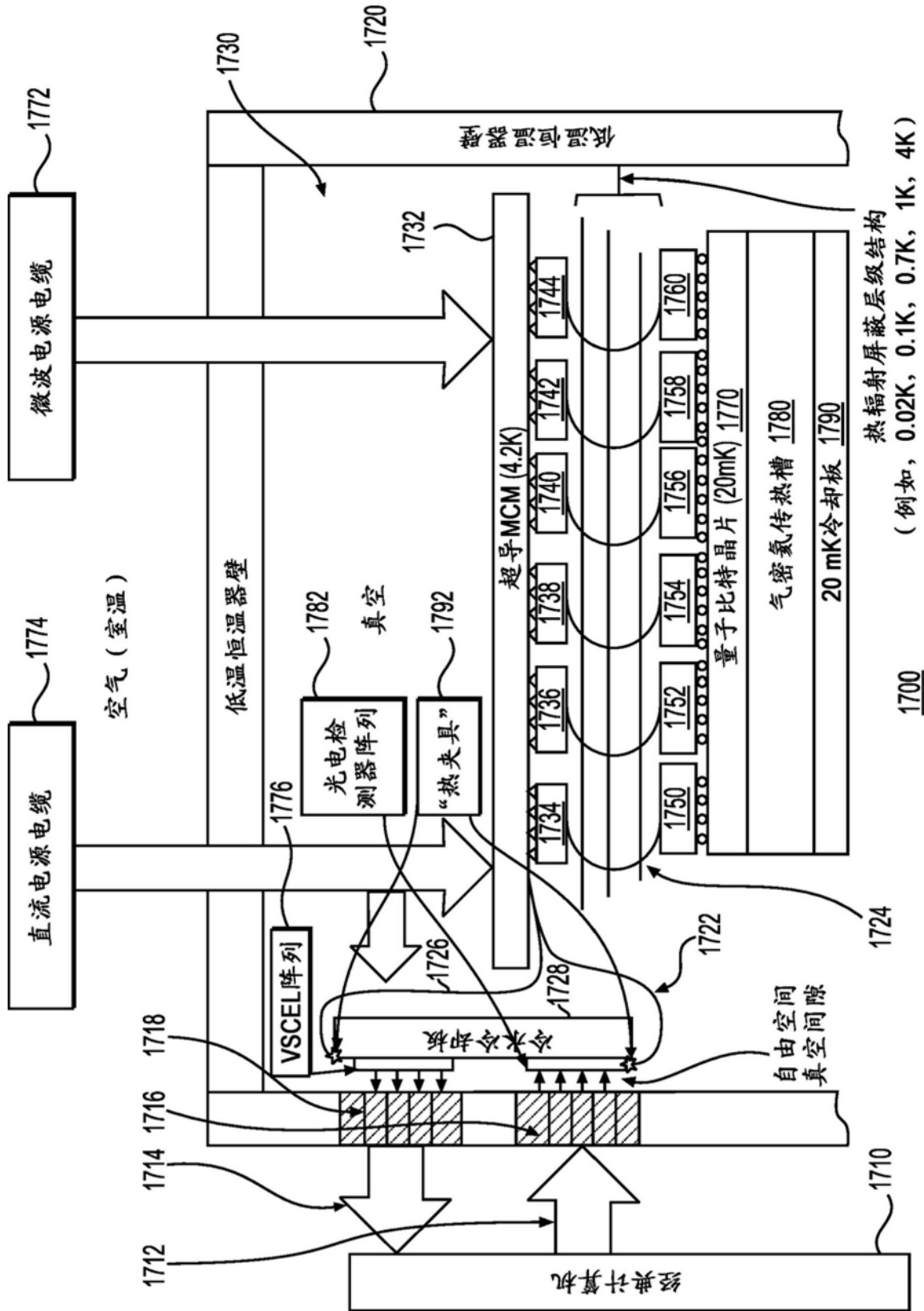


图17