

特邀综述

跨温区互联技术^{*}

原蒲升^{1,2}, 余慧勤^{1,2}, 汪书娜^{1,2}, 王永良^{1,2}, 李凌云^{1,2}, 尤立星^{1,2†}

1. 中国科学院上海微系统与信息技术研究所, 信息功能材料国家重点实验室, 上海 200050;

2. 中国科学院超导电子学卓越创新中心, 上海 200050

收稿日期: 2020-11-12; 接收日期: 2020-12-04

【摘要】 以半导体材料为基础的微电子技术正面临尺寸极限和功耗的双重挑战与发展瓶颈. 低温电子学作为突破上述瓶颈的新兴应用研究学科之一, 得到科研和产业界越来越多的关注. 2017年起, 低温电子学和量子信息处理被国际器件与系统路线图(IRDS)列为重点关注的十大焦点领域之一. 以低温到室温的微弱、高频电信号传输为核心的跨温区互联技术是低温电子学和量子信息处理必须解决的关键技术之一. 本文对跨温区互联面临的主要问题与挑战、目前的进展和未来展望进行了综述, 为我国开展相关研究工作提供参考.

关键词: 低温电子, 超导电子, 高速互联

PACS: 02.10.Yn, 33.15.Vb, 98.52.Cf, 78.47.dc

DOI: 10.13380/j.ltpl.2020.03.001

Interconnection Technology Across Temperature Zones^{*}

YUAN Pusheng^{1,2}, YU Huiqin^{1,2}, WANG Shuna^{1,2},

WANG Yongliang^{1,2}, LI lingyun^{1,2}, YOU Lixing^{1,2}

1. State Key Laboratory of Functional Materials for Informatics, Shanghai Institute of Microsystem and Information Technology, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200050, China;

2. Shanghai Center for Superconductivity, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200050, China

Received date: 2020-11-12; accepted date: 2020-12-04

【Abstract】 Microelectronic technology based on semiconductor materials is facing the dual challenges and development bottlenecks of size limit and power consumption. As one of the emerging applied research disciplines that breaking through the abovementioned bottleneck, cryogenic electronics has attracted more and more attention from scientific research and industry. Since 2017, cryogenic electronics and quantum information processing have been listed as one of the top ten focus areas on International Roadmap For Devices And Systems (IRDS). The cross-temperature interconnection technology with weak, high-frequency electrical signal transmission from low temperature to room temperature as the core is one of the key technologies that must be solved in cryogenic electronics and quantum information processing. This article summarizes the main problems and challenges faced by the inter-temperature zone interconnection, the current progress and future prospects, and provides references for our country to carry out related research work.

Keywords: Cryogenic electronics, superconductive electronics, high-speed interconnection

^{*} 中国科学院战略性先导科技专项(批准号:XDA18040300)和上海市科委自然科学基金(批准号:19ZR1467400)资助的课题

[†] lxyou@mail.sim.ac.cn

PACS: 02.10.Yn, 33.15.Vb, 98.52.Cf, 78.47.dc

DOI: 10.13380/j.ltpl.2020.03.001

Reference method: YUAN Pusheng, YU Huiqin, WANG Shuna, LI lingyun, YOU Lixing, Low. Temp. Phys. Lett. **41**, 0117 (2020)

1 引言

随着云计算、物联网、人工智能和大型数据中心的发展,特别是情报部门加密、解密工作对更先进计算引擎的需求,人类将致力于发展下一代高性能、低能耗的信息处理系统.当前基于半导体集成电路的信息处理系统已进入 5nm 工艺技术节点,进一步的发展必将面临器件物理特性和微纳加工技术的双重挑战,速度和功耗正在成为难以跨越的技术瓶颈.下一代信息处理系统将达到 10^{18} Floating-Point Operations per Second (EFLOPS) 量级,美国国防高级研究计划局和美国能源局对 EFLOPS 量级计算机的能耗要求 $< 20 \text{ MW}^{[1]}$. 面对如此严格的功耗要求,传统 Complementary Metal-Oxide-Semiconductor (CMOS) 逻辑的信息处理系统,实现一次开关需要消耗 $> 10^{-16} \text{ J}^{[2]}$, 基于 CMOS 技术开发 EFLOPS 量级下一代信息处理系统,功耗将高达 800 MW,这远远超出美国国防高级研究计划局和美国能源局对功耗的限定. 国际 TOP500 组织每半年发布一次全球超级计算机系统的性能排名,日本的 Supercomputer Fugaku 以 0.44201 EFLOPS 的运行成绩暂列 2020 年 11 月份最新发布的 TOP500 榜首,该系统的功耗 29.899 MW. 即使按照这个最新的技术能耗计算,1EFLOPS 超算系统的能耗也将达到 67.6MW^[3]. 因此,除非从本质上提高处理器和内存技术以及整体计算系统的能效,否则满足能效要求的 EFLOPS 量级超算系统将不可行. 作为超越摩尔技术中的代表性技术,超导电子学技术和量子信息技术在下一代信息处理系统中最具有竞争力. 基于低温快速单磁通量子 (Rapid single flux quantum, RSFQ) 的超导逻辑电路实现一次开关消耗的能量 $< 10^{-19} \text{ J}$. D. Scott Holmes 的估算采用超导约瑟夫森效应的超级计算机能耗不到传统 CMOS 技术的超级计算机能耗的 1%^[4], Sergey K. Tolpygo 估算 RSFQ 计算能效是传统 CMOS 技术的计算的 25~250 倍^[4]. 基于 RSFQ 的超导逻辑电路除了较低的能耗外,其工作频率可达到 $\sim 100 \text{ GHz}^{[5]}$, 远远高于当前 CMOS 逻辑电路. 因此,超导逻辑电路将成为下一代信息处理系统中非常有竞争力的一项技术. 另一个超越摩尔技术的量子信息技术,是量子物理与信息技术相互结合的新技术,其中量子信息技术一个关键应用就是量子计算^[6]. 量子的叠加性、非局域性和不可克隆等量子特性使

得量子计算天然地具有并行处理能力,其信息处理能力远远超越当前的基于 CMOS 技术的传统计算机. 2019 年,Google 53 个量子比特的量子计算机以 3 分 20 秒完成了世界第一的超算系统约 1 万年的计算任务^[7]. 2020 年 12 月,中国科技大学构建 76 个光子的光量子计算原型机在求解数学算法高斯玻色取样只需 200 秒,而当前世界最快的超算系统 Fugaku 运行同样的计算则需要 6 亿年^[8]. 因此,量子计算被视为具有颠覆性的一项技术. 在 2017 年国际器件与系统路线图 (International roadmap for devices and systems, 简称 IRDS) 将超导电子学、低温半导体电子学和低温量子计算涉及的低温器件作为新兴应用领域之一^[9].

超导电子学技术和量子信息技术是后摩尔时代最具有竞争力的关键技术,但它们通常工作在低温环境中. 同时,传感器与探测器等在低温环境下可以显著提升灵敏度、分辨率和能效等指标,使其性能指标远远超过室温下的表现. 虽然低温下量子器件、超导器件或者其它低温器件较室温器件有诸多优势,但是低温环境中器件与室温环境器件之间的数据交互传输存在较大的技术难度. 这个跨温区互联技术的难度主要包括以下两个方面. 第一,低温器件产生的信号幅值以高速、低幅值为主要特征,输出信号频率高达数十 GHz、幅值低于 1mV (超导逻辑电平)^[10, 11], 而室温器件信号幅值通常在伏特量级 (CMOS 逻辑电平), 低温-室温互联需要将数十 GHz 信号在超导逻辑电平与 CMOS 电平之间转换. 这种高速的跨温区数据信号幅值转化相对室温中数据信号传输困难较大. 第二,将高频的超导逻辑电平信号高保真传输至室温,需采用插损小的传输线,插损小的传输线采用电导率小的金属制成,但根据金属材料热导率与电导率之间的关系定律 (Wiedemann-Franz 定律),金属传输线信号传输能力强一般具有较小的热阻,即较大的漏热. 由于制冷机制冷量限制,需要均衡跨温区传输链路的信号传输能力与漏热之间的竞争. 传输链路信号传输能力与传输线漏热之间的竞争关系进一步增加了跨温区互联技术的难度. 以超导计算机为例,整个超导计算机的能耗由逻辑电路、数据存储、接口组件和传输线漏热构成,其中分配给接口组件与传输线构成的系统集成能耗建议不超过整个超导计算机系统的 10%. 因此,高能效的跨温区系统集成技术既是实现超导计算机的关键技术,又是难点技术^[1]. 本文将围

绕构建低温室温跨温区互联集成技术,通过介绍低温室温互联系统的构成,展现低温室温互联中的制冷技术,以及低温室温跨温区互联中的相关无源、有源器件,给出不同传输速率的跨温区互联方案和成功的低温室温互联系统,最后讨论该领域目前存在的一些问题以及未来发展趋势。

2 制冷技术

基于超导材料的大规模超导集成电路技术与量子信息技术工作在超导临界转变温度以下,通常应用的制冷技术可大致分为湿式制冷和干式制冷两类.其中湿式制冷技术常采用液态制冷剂(液氦、液氢和液氮等)直接冷却测试样品,使得测试方便快捷.对于超导集成电路常用液氮杜瓦系统制冷测试,这种制冷方式特别适合超导集成电路研发初始阶段的样品筛选.但液氮作为一种战略资源价格昂贵,造成长期使用成本过高.另外由于容纳液氮的杜瓦容积有限,液氮使用挥发后需要重新灌装,使得超导集成电路难以长时间持续运行和测试.此外,液氮使用需要专门的人员和设备才能安全使用,不接触低温的工程人员对液氮存在心理障碍.可靠的干式制冷技术的出现,不但缓解了低温工程外研究人员对低温的恐惧,而且能够提供一个长期可靠的低温运行环境.对于不同的超导温区,已经有不同的商用制冷机解决方案,包括干式稀释制冷机、吸附制冷机、绝

热去磁制冷机、G-M 制冷机和脉管制冷机等.对于大规模超导电路通常选择表 1 中的 Nb、NbN 或 NbTiN 等材料制备,工作在液氮温区(~ 4.2 K)的超导集成电路可以采用两级 G-M 制冷机或脉管制冷机制冷.而对于工作温度 $T < 1$ K 的量子计算等应用需求通常采用稀释制冷机、吸附式制冷机或绝热去磁制冷机.制冷机的制冷比功率是制冷机的重要指标,也是制约低温系统能耗的关键.卡诺循环理论能效公式: $T / (300 - T)$ 决定了制冷机的最理想比功(300K 为室温).可以看到,在 4.2K 获得 1W 的冷量,理论上要在 300K 室温消耗 70.4W 的功率,也就是 300K 和 4.2K 的比功为 70.4,但这仅仅是理论上的数值,而实际应用的制冷机的比功远远大于这个理论值.一般大型制冷机在 4.2K 产生 1W 的冷量需要消耗 300K 室温 500W 的功率,而小型制冷机则需要消耗 300K 室温大约 10KW 的功耗.由此可见,低温端消耗的冷量转换到室温功耗则被放大 10000 倍.因此,只有尽可能降低低温下的冷量消耗才能有效的降低室温下的功耗.表 2 列出当前商用制冷机不同温度下的比功,制冷机的设计最低温越低,其比功越大.当前制冷机的性能已经能为超导电子学、低温半导体电子学和低温量子计算等提供可靠稳定的低温环境.但对于最低温 ≤ 4.2 K 的制冷机,比功还需进一步的降低以提高系统能效,从而提升低温应用的竞争力。

表 1 超导电子学中常用超导材料的超导特性^[12]

材料	块材 T_c (K)	薄膜 T_c (K)@厚度	带隙 $2\Delta_0$ (meV)	相干长度 (nm)	穿透深度 (nm)	J_c (GA/m ²)
Al	1.18	/	0.34	1600	16	/
In	3.41	/	1.0	/	/	/
MgB ₂	39	~ 39	1.8 \sim 7.5	3.7 \sim 12ab 1.6 \sim 3.6c	80 \sim 180	/
MoGe	7.4	4.4(7.5nm)	2.2	/	/	12(250mK)
MoN	12	/	/	/	/	/
Mo _{0.6} Ge _{0.4}	15	12(20nm)	/	/	/	/
MoSi	7.5	4.2(4nm)	/	/	/	11 \sim 25(1.7K)
Nb	9.2	/	3.0	30 \sim 38	90	/
NbN	16	8.6(3nm)	4.9	5	270	20 \sim 40(4.2K)
NbTiN	12 \sim 16	/	/	/	/	/
NbSi	3.1	2(10nm)	0.94	/	/	0.14(300mK)
Nb ₃ Sn	18.3	/	7	4	30	/
NbTi	9.0	/	3	5	150	/
Pb	7.2	/	/	/	/	/
TiN	5.5	/	/	/	/	/
WSi	5	3.7(4.5)	1.52	/	/	8(250mK)
YBa ₂ Cu ₃ O ₇	92	/	50 \sim 60	1.5ab0.3c	140 \perp 700//	/

表 2 制冷机比功^[12]

T(低温)	制冷量	比功(W at 300 K)/(W at T 低温)			
		平均	低	中	高
80K	1.4W~190kW	5.19E+01	7.18E+00	3.67E+01	1.50E+02
40K	1.1W~52.7 kW	1.85E+02	2.17E+01	8.63E+01	7.50E+02
20K	2W~100W	4.85E+02	1.17E+02	4.23E+02	1.30E+03
4.5K	(≥10W)130W~1000W	4.03 E+02	3.15 E+02	3.91 E+02	5.77 E+02
4.2K	(<10W)0.08W~2W	1.07E+04	4.00E+03	8.30E+03	3.75E+04
100mK	0.1mW ~1mW	3.72E+07	1.27E+07	2.95E+07	1.07E+08
20mK	6μW~ 30μW	1.13E+09	4.56E+08	9.75E+08	2.08E+09

3 跨温区互联技术

跨温区互联技术是实现低温应用系统中制冷机提供的低温环境部分与室温环境部分连接的关键技术. 对于不同数据传输率的低温室温互联链路, 可以采用不同的技术方案. 图 1 为美国 HYPERS 公司给出 10~30 Gbps 不同数据传输率的低温室温互联

链路解决方案^[13]. 在 10 Gbps 较低的数据传输率下, 低温柔性微带线或者带状线即可满足低温室温互联需求. 20Gbps 的数据传输率下, 需要 40K 加入放大器对信号在低温下进行一级放大后输出. 对于 30Gbps 的数据传输链路, 需要采用同轴传输线, 并且需要在低温下进行多级放大后输出. 本节将对构成传输链路的有源、无源器件做详细介绍.

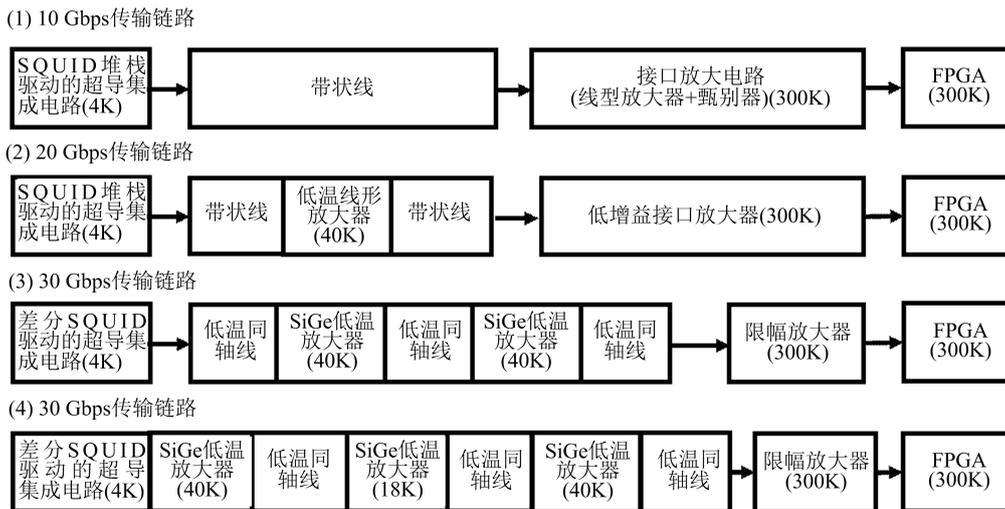


图 1 Hypres 不同数据传输率跨温区互联解决方案^[13]

首先介绍无源器件传输线. 根据传输线在低温与室温连接中的功能不同, 可将传输线分为两类, 一类提供直流偏置, 一类提供射频信号输入/输出 (Input/Output, I/O) 传输. 不同的功能, 对传输线的要求不同. 下面按照功能需求分开讨论.

(1) 直流传输线

用于室温与低温互联的直流传输线对系统低温端的热负载包括焦耳热和传导热两部分. 在电流一定的条件, 传输线的电阻越小, 焦耳热越小. 根据威

德曼-弗朗兹定律 (Wiedemann-Franz Law), 传输线的热阻率与电阻率成正比, 更小的电阻率对应着更小的热阻率, 这将导致更多的热量由室温传导至低温. 也就是说, 对应同一规格的金属传输线, 其焦耳热越小, 传导热越大. Alan M. Kadin 通过理论计算, 可以均衡直流传输线的焦耳热与传导热, 从而使二者之和最小以减小直流引线对系统低温端的热负载^[14]. 为了均衡焦耳热与传导热, 常常会采用磷铜、铍铜、锰铜或镍铬合金等制成直流引线. 可以在

Lake Shore 和 KEYCOM 提供低温设备的厂商购买到这类直流引线,其载流范围在 $1\ \mu\text{A} \sim 1\ \text{mA}$.

超导材料在超导态下的无电阻特性,使其在电流输运过程中的几乎不产生焦耳热,从而采用超导材料制备 50K~4K 温区的传输线能够有效的降低 4K 温区的热负载. 2009 年,Robert J. Webber 采用粒子束刻蚀的方法,将 2 代 YBCO 带材加工处理成窄条的直流传输线,同样的载流能力下,采用 YBCO 带材加工的直流引线在 4K 的热负载是经过热负载优化金属直流引线的 $1/10^{[15]}$. 2012 年,Michael Merker 通过切割、电蚀的方法将哈氏合金基底的 YBCO 带材加工成 15 通道的直流传输线,50K 到 4K 的漏热为 $163\ \mu\text{W}$,而同样的载流能力经过热负载优化的金属直流传输线漏热 $11.6\ \text{mW}^{[16]}$. 图 2 为粒子束刻蚀和电蚀法制备的 YBCO 直流引线. 随后 Robert J. Webber 采用粒子束刻蚀将 12mm 宽的 YBCO 带材制备成宽 $300\ \mu\text{m}$ 间隔 $625\ \mu\text{m}$ 的 15 通道直流传输线,每通道载流 32mA 其 50K 到 4K 的漏热是金属直流引线的 $1/6$,经过 6 个月的低温测试,由 YBCO 带材制备的直流引线载流能力和漏热特性没有退化^[17]. 除了用于 50K 到 4K 温区的 YBCO 超导直流传输线外,在 4K 到 mK 温区的常常采用 MgB_2 、Nb 和 NbTi 等低温超导体制备的直流引线^[18-20]. 随着集成度的增加,超导直流引线将成为 50 到 4.2K 和 4.2K 到 mK 温区中的首选. 美国国家宇航局高分辨率机载宽带摄像机的 4K 到 mK 级连接采用 NbTi 双绞线连接,在 4K~1K 温区采用 38 AWG 规格 NbTi 双绞线(图 3(a)中白色的带状),1K~170mK 采用 40AWG 规格 NbTi 双绞线^[21](图 3(b)中白色的带状),确保摄像机在 170mK 的低温端正常工作.

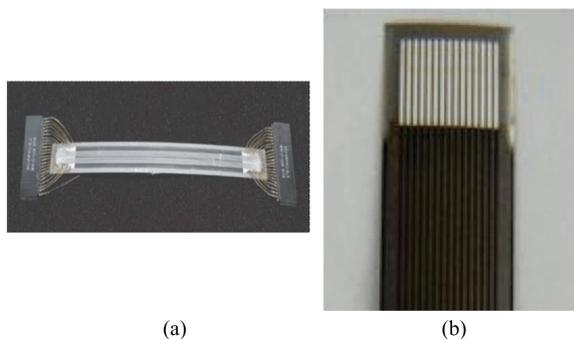


图 2 (a)粒子束刻蚀的 YBCO 直流引线^[15];
(b)电蚀方法 YBCO 直流引线^[16]



图 3 (a)4K 到 1K 温区 38 AWG 规格 NbTi 双绞线^[21];
(b)1K 到 170mK 温区 40 AWG 规格 NbTi 双绞线^[21]

(2)RF 射频信号传输线

跨温区互联的应用系统需要多路低温与室温之间的射频信号和高速(GHz)、低幅值($\sim\text{mV}$)的数字信号传输. 对于这些信号特征,必须选用合适的传输线以降低信号的衰减、色散和串扰. 通常采用微带线、带状线或同轴电缆作为这种信号传输载体. 与直流传输线相比较,射频信号传输线的电气约束主要来自 $4.2 \sim 300\text{K}$ 整个传输链路的衰减而不是电流的承载能力. 衰减对小信号的传输带来非常严重的后果,将影响整个传输链路的信噪比和误码率. 传输载体的选择与链路传输速率和漏热要求密切相关,正如图 1 中的互联方案,美国 HYPERS 公司按照数据传输率的大小不同,采用不同类型的传输线作为低温室温互联的数据传输载体. 通常传输速率 $< 20\ \text{Gbps}$ 的系统集成中采用多通道柔性微带线或者带状线,而在传输速率 $> 20\ \text{Gbps}$ 的数据传输链路中采用同轴线^[13]. 传输线的 3 dB 带宽决定了传输线的数据传输率,3 dB 带宽越宽,数据传输率越高,但其漏热也越大. 例如,HYPERS 公司开发的 10 通道柔性带状线 3dB 带宽由 $1.5\ \text{GHz}$ 增加到 $7\ \text{GHz}$ 时,4 K 的漏热则由 $440\ \mu\text{W}$ 增加到 $1118\ \mu\text{W}$ (由于无法购买到 HYPERS 传输线,所以具体数据无法测试). 荷兰 Delft-circuits 公司近期推出的 Cri/oFlex 系列柔性带状线(图 4(a)),30cm 长 3dB 带宽为 4

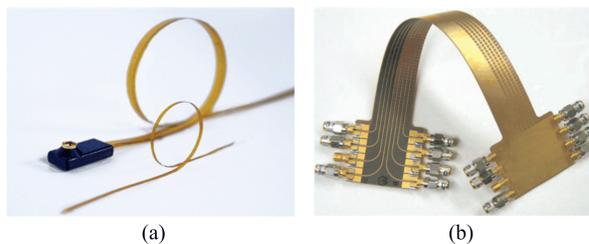


图 4 (a)Delft-circuits 公司 Cri/oFlex 柔性带状线;
(b)多通道 RF 传输线^[22]

GHz(4K 温度), 40K 至 4K 的漏热 $125\mu\text{W}$. 除了单通道的 RF 传输线, 适用于提高系统装配集成度的多通道 RF 传输线也被开发出来(图 4(b))^[22]. 在国内, 中国科学院上海微系统与信息技术研究与赋同科技共同研发出了适用于超导纳米线单光子探测系统的低温柔性微带传输线, 并已经应用于 16 通道的单光子探测系统中. 虽然柔性带状线的漏热较小, 但对于数据传输 $>20\text{Gbps}$ 的需求, 需要插损更小、屏蔽效果更好的同轴传输线. 用于低温室温互联互通通常

采用不锈钢、磷铜或镀铜热传导率低材质的同轴线, 对插损要求高的应用环境会采用中心导体镀银的方式降低插损. 使用同轴线, 可将低温室温互联传输链路 3dB 带宽提升到 $>20\text{GHz}$ ^[10, 13, 23, 24]. 虽然同轴线支持更高的传输带宽, 但从表 3 可以看到, 同轴线的漏热较带状线高出 2~10 倍. 因此, 在搭建低温室温互联链路时, 需要充分考虑传输链路的数据传输率与传输链路漏热之间的均衡, 以达到最优的数据传输能耗.

表 3 射频传输线特性

传输线类型	金属材料		介质材料	插损@10GHz (dB/m)	30cm 长 40~4K 漏热(μW)	厂商
	内	外				
同轴线	SBC	BC	PTFE*	2.45 @4K	1303	KEYCOM
同轴线	BC	BC	PTFE	4.45 @4K	730	KEYCOM
带状线	Ag	Ag	Polyimide	9.5 @4K	125	Delft-circuits
带状线	Cu	BC	/	/	112(单通道)	HYPRES

* SBC: Silver Plated Beryllium Copper; * BC: Beryllium copper; * PTFE: Poly tetra fluoroethylene.

与普通金属微带线、带状线或同轴电缆相比, 低损耗和低色散超导电缆无需低温放大即可实现微弱、高带宽数据信号的传输. 超导体的 RF 表面电阻虽不为零, 但在 GHz 的高频信号下, 比普通金属的表面电阻小几个数量级, 这使得超导材料制备的 RF 传输线在高频、小信号传输中具有显著优势. 日本 KEYCOM 公司以 NbTi 为导体, 以 PTFE 为介质制成超导同轴传输线. 10cm 长 NbTi 超导同轴传输线数据传输率 $>40\text{Gbps}$. 该 NbTi 超导同轴传输线导热系数是同规格 Cu 同轴传输线的 1/3000, 是同规格 Nb 同轴传输线的 1/300. NbTi 超导同轴线已经用在一些实验测试中^[25]. 高温超导体 Yttrium Barium Copper Oxide (YBCO) 临界转变温度 $>90\text{K}$, 适合用于 4-70K 高速 RF 信号传输线的开发. 77 K 液氮温度下, 线宽 $100\mu\text{m}$ 的 YBCO 线条在 25 GHz 下表面电阻 $2\text{m}\Omega$ ^[26], 体现出其在高频 RF 传输中的优势. 采用 YBCO 构成双层结构是开发带状线的关键, 采用胶合方式可以获得超导性能均匀的双层结构, 为进一步研发超导带状线奠定了基础^[27]. 日本名古屋大学 FUJIMAKI 研究组, 为了降低漏热, 在 4-60K 温区采用 YSZ 基底的高温超导体 YBCO 薄膜制备的高频平面波导实现 GHz 的数据传输, 与常规传输线相比漏热减少 10mW 以上^[28].

虽然高温超导体 RF 信号传输上具有显著优势, 但在加工制备传输线中加工难度较大. 因此, 目前除了高频平面波导外, 还没有微带结构的超导 RF 传输线的报道. 2020 年 IRDS 中的低温电子与量子信息处理部分 (Cryogenicelectronicsandquantum information processing, 简称 CEQIP) 对未来 10 年射频传输线做了规划(表 4)^[29], 可以看出, 超导传输线是一个重要的研究方向, 也是未来射频传输线的研究方向.

(3) 低温放大器

无源传输线对传输信号的衰减影响了传输链路的数据传输率, 若能够将传输的信号在低温下预放大, 将有效的提升传输链路的数据传输率. 因此, 低温放大器也是低温室温跨温区传输链路中的重要器件. 由于趋肤效应的存在, 频率越高的信号, 经过传输线时的衰减越大. 因此, 对于低温下超导集成电路产生的微伏、数十 GHz 电信号不经放大处理直接由低温输出至室温是非常困难的. 将这个幅值小、频率高的信号在低温放大后输出是一个可行方案. 但当前的低噪声小信号、高带宽的放大器主要还是应用在室温环境中. Si 材料 CMOS 的常温放大器在低于 30K 低温下冻析效应显著影响器件正常工作性能^[30], 虽然通过建立低温下的仿真模型能够提高

CMOS 器件的工作性能^[31], 但 Si 材料 CMOS 器件的功耗显著增大, 将增加低温系统的热负载. 在传统

的硅双极晶体管中引入 SiGe 材料制成的异质结双极性晶体管可实现重掺杂, 从而避免低温下载流子

表 4 低温互联传输线路线^[29]

年份	2019	2020	2022	2024	2026	2028	2030
<5K 传输线							
线型	同轴	同轴	柔性电缆 微带线	柔性电缆 微带线	柔性电缆 带状线	柔性电缆 带状线	柔性电缆 带状线
超导材料 T _c (K)	NbTi9	NbTi9	NbTi9	NbTi9	NbTi9	NbTi9	NbTi9
单通道输率(Gbps)	25	25	15	15	30	30	50
通道数	1	1	10	10	20	20	40
边缘数据速率(Gb/s-mm)	25	25	100	100	400	400	1000
阻抗(Ω)	5~50	5~50	5~50	5~50	5~50	5~50	5~50
插损(dB/m)	<2	<2	<2	<2	<2	<2	<2
串扰(dB)	<-40	<-40	<-40	<-40	<-40	<-40	<-40
4~60K 传输线							
线型	同轴	同轴	柔性电缆 微带线	柔性电缆 微带线	柔性电缆 带状线	柔性电缆 带状线	柔性电缆 带状线
超导材料	No	No	部分 ReBCO	部分 ReBCO	ReBCO	ReBCO	ReBCO
单通道输率(Gbps)	50	50	15	15	30	30	50
边缘数据速率 (Gb/s-mm)	40	40	100	100	400	400	1000
阻抗(Ω)	50	50	50	50	50	50	50
插损(dB/m)	<2	<2	<2	<2	<2	<2	<2
串扰(dB)	<-40	<-40	<-40	<-40	<-40	<-40	<-40

的冻析效应, 表明 SiGe 器件适用于低温环境中^[32]. 加州理工大学 Bardin 博士对市场不同公司的 SiGe 异质结双极性晶体管做了低温测试并提取低温下的小信号模型, 进而设计适合低温应用的放大器^[33]. 当前低温放大器市场主要以国外公司为主, 其中美国加州理工大学和瑞典低噪工厂的低温放大器(图 5)占市场份额较大, 单个放大器价格在数万元, 不但价格昂贵, 而且带宽较宽的放大器还因禁运难以购买. HYPERS 公司针对超导集成电路研制了专用的低温放大器, 11GHz 的增益 21dB, 18K 低温下功耗约为 2.7mW^[34]. 国内也逐渐开展了低温低频段的放大器研究, 4.2K 下增益达到 23dB, 3dB 带宽超过 3.4GHz, 功耗 4mW^[35]. 当前国内涉及的低温放大器主要局限在 10 GHz 以下的频率范围^[36], 虽然已

经对低温放大器研究有一些进展, 但仍然有许多工作需要进一步开展.

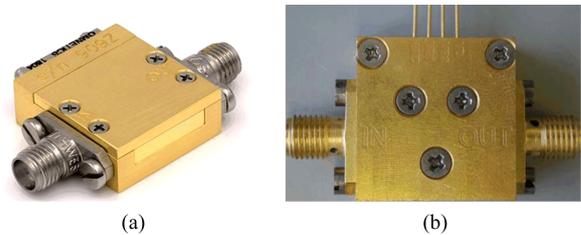


图 5 (a)瑞典低噪工厂 LNF-LNC0.3-14A 低温放大器; (b)加州理工大学 CITCYO1-12A 低温放大器

(4)光互联传输

根据 2017 年的 IRDS 的计划, 未来的 SFQ 超导逻辑电路时钟频率将超过 100 GHz^[9]. SFQ 超导逻辑电路的时钟频率在超过 30GHz 后, 传统的金属

RF 传输线衰减显著而不能满足低温室温的跨温区互联. 而光纤构成的光链路不但损耗小、不受串扰和电磁干扰的影响, 而且其漏热较金属传输线小 2 个量级, 在未来更高的时钟频率下, 只有光纤链路才能确保 $>100\text{Gbps}$ 传输速率的低温室温互联. 光链路的关键在于开发出低功耗适用于超导逻辑电路的光电转换器 (optical-to-electrical transducers OET) 和电光转换 (electrical-to-optical transducers EOT). 对于 OET, 实验已经证明非晶 GaAs 光电开关^[37] 和 YBCO 热电子光电探测器^[38] 均能够实现 $>100\text{Gbps}$ 的光电转化. 在 1994 年, 已经实现了室温-低温-室温光学链路传输, 室温-低温光信号输入到 6GHz 的模拟超导电路, 在 4.2K 实现 500MHz 的激光直调输出^[39]. 2009 年, 光输入到 SFQ 超导电路的传输率达到 40Gbps^[40]. 相对 OET 而言, 应用于 SFQ 超导逻辑电路的 ETO 器件难度较大. 因为 SFQ 超导逻辑电路直接输出的脉冲信号携带的能量小, 还没有直接将 100Gbps 的 SFQ 脉冲信号直接转换成光信号的 ETO 验证方案. 将 SFQ 超导逻辑电路直接输出的电信号转换为光信号输出到室温的方式有两类, 一类是将 SFQ 超导逻辑电路的输出电信号通过电光晶体或者马赫-曾德调制器对输入光进行调制输出到室温, 被称为外调制方式, 另一类是 SFQ 超导逻辑电路的输出电信号作为激光器的驱动信号加载在激光器上, 对激光器进行调制, 被称为直调方式. 由于 SFQ 的输出脉冲信号携带能量较小, 从而使得无论哪种调制方式 ETO 的实现都比 OET 困难. 但适用于 SFQ 超导逻辑电路的 ETO 是发挥超导逻辑电路优势的关键环节, 因此美国陆军研究实验室 (ARL) 与情报高级研究计划署 (IARPA) 在 2018 年推出 SuperCables 的研究资助项目, 支持适用于低温下 ETO 的开发和低温-室温互联光链路的技术方案开发, 用于解决数据传输能耗 $<32.5\text{ pJ/bit}$ 的项目需求^[41]. 室温电路到低温 SFQ 超导逻辑电路的输入光链路方案成熟, 但由于 SFQ 超导逻辑电路的输出信号的较小, 增加了低温 SFQ 超导逻辑电路到室温输出光链路方案的技术难度. 虽然室温-低温光互联传输技术得到了一定的发展, 但还存在功耗较大、封装困难等亟需解决的问题^[42].

在本节中, 分析了建立跨温区互联中涉及的传输线和放大器, 同时也分析了未来跨温区光互

联传输链路的技术难点和器件需求. 下面通过两个跨温区互联系统介绍跨温区互联传输链路的解决方案.

4 低温室温跨温区互联传输链路方案

在超导集成电路的低温室温互联系统集成研究中, 美国 Hypres 公司和日本 International superconductivity technology center (ISTEC) 具有成功开发低温室温互联系统的经验. 在 2007 年, ISTEC 利用二级 GM 制冷机系统, 采用不同材质、不同线径的同轴电缆实现 32 路 3dB 带宽 23GHz 的高速低温室温互联系统^[10], 随后优化传输链路的长度, 将链路 3dB 带宽提升至 25GHz^[23]. 图 6 为 ISTEC 低温室温互联系统实物图与示意图. 为了均衡系统室温到 4K 的漏热与整个链路的插损, 该系统在不同温区区间采用不同的同轴传输线. 室温 300K 到制冷机 1 级冷台 50K 采用直径 $\varphi 2.2\text{mm}$ 、长度 160mm 的铜 (Cu) 同轴传输线. 虽然 $\varphi 2.2\text{mm}$ 的 Cu 同轴线漏热大, 但 1 级冷台的制冷量足够应对来自同轴线的漏热. 2 级冷台 4K 的制冷量仅为 1W, 因此在 1 级冷台 50K 与 2 级冷台 4K 温区采用 $\varphi 1.19\text{mm}$ 、长度 250mm 磷青铜 (PB) 降低 50K 到 4K 的漏热, 此段传输链路牺牲部分插损均衡漏热. 在二级冷台内的连接属于同温度的连接, 因此再次采用插损小的直径 $\varphi 2.2\text{mm}$ Cu 同轴线与超导逻辑电路连接. 整个低温室温传输链路的室温接口到低温超导集成电路接口长度为 720mm (优化版缩短到 570mm), 整个传输链路以及超导集成电路在 2 级冷台的热负载约为 1.01W. 在最终的测试中, 实现了 $10^{23}-1$ 伪随机序列在 10Gbps 的数据传输率下误码率小于 10^{-12} ^[10].

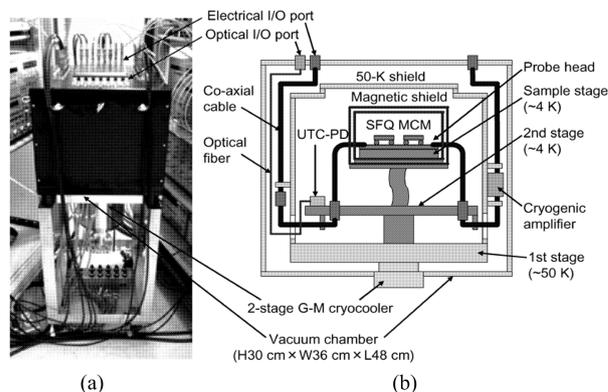


图 6 日本 ISTEC 用于 SFQ 测试的低温室温互联系统实物图与示意图

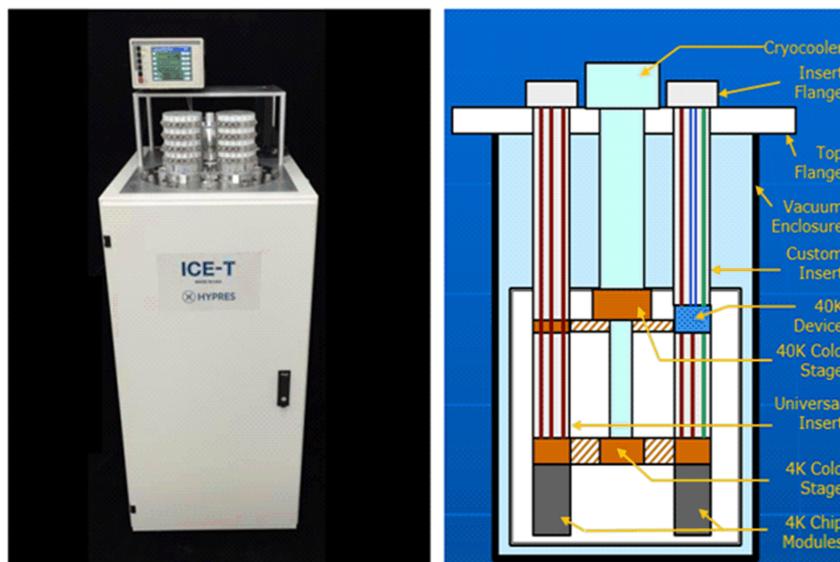


图7 美国 Hypres 研制的 ICE-T 系统实物图和剖面示意图

为了给处于开发迭代阶段的超导集成电路提供方便快捷的测试系统,美国 Hypres 公司经过十多年的研究发展,研制出集成式低温电子测试台 ICE-T(The integrated cryogenic electronics testbed)^[43]. 该测试台采用一台一级冷头 50K 制冷量 45W 和二级冷头的 4.2K 冷量 1.5W 的住友 RDK-415D 制冷机搭建. 与日本 ISTEK 的低温室温互联系统相比, Hypres 采用测试杆的方案使测试超导集成电路样品的更换更为快速、便捷. 图 7 为 ICE-T 系统实物图和剖面示意图. ICE-T 系统可以插入两根测试杆, 根据样品尺寸大小、I/O 数量不同, 分别设计了 40 根、80 根 BeCu 同轴线作为信号低温室温互联介质的测试杆. 该系统由室温降至 4.2K 用时约 4.5 小时, 长度 50cm 的低温室温互联链路对 20GHz 的信号插损为 1dB. 随后在该系统中测试了一块 10mm × 10mm 的超导模数转换 (analog-to-digital converter (ADC)) 芯片, 在设计频率 20.48GHz 下测试结果与直接将 ADC 芯片浸泡在液氮中的结果完全一致, 验证了 ICE-T 系统的测试可靠性^[44]. 美国 IARPA 建议 SuperCables 计划中涉及的高速器件的低温实验在 ICE-T 测试台中完成. Hypres 公司 ICE-T 测试台可为满足高速超导集成电路的快速、

长时测试的需求, 是超导集成电路开发测试阶段的一个有力测试工具. 因技术壁垒原因, 我国必须自行研制类似测试系统支持超导集成电路的开发和研制.

5 总 结

低温电子学和量子信息处理技术作为 IRDS 十大焦点技术之一, 在未来必将受到更多的关注和重点发展. 跨温区互联技术是相关领域一个不可避免的关键技术. 当前国际上已经有研究团队正在加速深入开展跨温区互联技术的研究工作, 部分高科技公司已经研制出快捷的跨温区互联的测试系统, 为低温电子学和量子信息处理技术发展提供了有力的保障. 随着超导计算、量子信息技术的飞速发展, 对跨温区互联技术的需求会越来越迫切并提出更高的要求. 我国在跨温区互联技术方面还处于研发的初始阶段, 作为一个交叉学科研究课题, 还需要得到相关领域的更多的关注和发展. 随着我国跨温区互联技术的发展, 必将为低温电子学和量子信息领域的科技进步提供有力的技术支撑.

参 考 文 献

[1] D. S. Holmes, A. L. Ripple, M. A. Manheimer, IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 23 (2013), 1701610

[2] A. R. Saibal Mukhopadhyay, R. Kaushik, (2006) [Online] <http://nanohub.org/local/ipod/MukhopadhyayNano> 501

- Switching Energy in CMOS Logic (PDF).pdf
- [3] <https://www.top500.org/lists/top500/list/2020/11/>
- [4] S. K. Tolpygo, *Low Temperature Physics* 42 (2016), 361
- [5] W. Chen, A. V. Rylyakov, P. Vijay, J. E. Lukens and K. K. Likharev, *IEEE Transactions on Applied Superconductivity* , 73 (1999), 19
- [6] G. C. Guo, *Sci Sin Inform*, 50(2020) ,1395
- [7] F. Arute, K. Arya, R. Babbush, D. Bacon, J. C. Bardin, R. Barends, R. Biswas, S. Boixo, F. Brandao, D. A. Buell, B. Burkett, Y. Chen, Z. Chen, B. Chiaro, R. Collins, W. Courtney, A. Dunsworth, E. Farhi, B. Foxen, A. Fowler, C. Gidney, M. Giustina, R. Graff, K. Guerin, S. Habegger, M. P. Harrigan, M. J. Hartmann, H. Alan, M. Hoffmann, T. Huang, T. S. Humble, S. V. Isakov, E. Jeffrey, Z. Jiang, D. Kafri, K. Kechedzhi, J. Kelly, P. V. Klimov, S. Knysh, A. Korotkov, F. Kostritsa, D. Landhuis, M. Lindmark, E. Lucero, D. Lyakh, S. Mandra, J. R. McClean, M. McEwen, A. Megrant, X. Mi, K. Michielsen, M. Mohseni, J. Mutus, O. Naaman, M. Neeley, C. Neill, M. Y. Niu, E. Ostby, A. Petukhov, J. C. Platt, C. Quintana, E. G. Rieffel, P. Roushan, N. C. Rubin, D. Sank, K. J. Satzinger, V. Smelyanskiy, K. J. Sung, M. D. Trevithick, A. Vainsencher, B. Villalonga, T. White, Z. J. Yao, P. Yeh, A. Zalcman, H. Neven, J. M. Martinis, *Nature* , 574(2019) , 505
- [8] H. S. Zhong, H. Wang, Y. H. Deng, M. C. Chen, L. C. Peng, Y. H. Luo, J. Qin, D. Wu, X. Ding, Y. Hu, P. Hu, X. Y. Yang, W. J. Zhang, H. Li, Y. X. Li, X. Jiang, L. Gan, G. W. Yang, L. x. You, Z. Wang, L. Li, N. L. Liu, C. Y. Lu, J. W. Pan, *Science* ,(2020)
- [9] IEEE 2017 *The international roadmap for devices and systems*
- [10] Y. Hashimoto, S. Yorozu, T. Miyazaki, Y. Kameda, H. Suzuki, N. Yoshikawa, *IEEE Transactions on Applied Superconductivity* , 17(2007), 546
- [11] O. A. Mukhanov, D. Kirichenko, I. V. Vernik, T. V. Filippov, A. Kirichenko, R. Webber, V. Dotsenko, A. Talalaevskii, J. C. Tang, A. Sahu, P. Shevchenko, R. Miller, S. B. Kaplan, S. Sarwana, D. Gupta, *IEICE Transactions on Electronics* , E91–C (2008) , 306
- [12] IEEE 2020 *The international roadmap for devices and systems*
- [13] D. Gupta, S. Sarwana, D. Kirichenko, V. Dotsenko, A. E. Lehmann, T. V. Filippov, W. T. Wong, S. W. Chang, P. Ravindran, J. Bardin, *IEEE Transactions on Applied Superconductivity* , 29(2019) , 1
- [14] A. M. Kadin, R. J. Webber, D. Gupta, *IEEE Transactions on Applied Superconductivity* , 17(2007) , 975
- [15] R. J. Webber, J. Delmas, B. H. Moeckly, *IEEE Transactions on Applied Superconductivity* , 19(2009) 999
- [16] M. Merker, J. Delmas, R. Webber, *AIP Conf. Proc.* , 1434 (2012), 573
- [17] R. J. Webber, J. Delmas, *Physics Procedia* , 36(2012), 256
- [18] C. S. Yung, B. H. Moeckly, *IEEE Transactions on Applied Superconductivity* , 21 (2011) , 107
- [19] A. L. Woodcraft, G. Ventura, V. Martelli, W. S. Holland, *Cryogenics* , 50(2010) , 465
- [20] H. J. Van Weers, G. Kunkel, M. A. Lindeman, M. Leeman, *Cryogenics* 55–56(2013) , 1
- [21] D. A. Harper, M. C. Runyan, C. D. Dowell, C. J. Wirth, M. Amato, T. Ames, M. Amiri, S. Banks, A. Bartels, D. J. Benford, M. Berthoud, E. Buchanan, S. Casey, N. L. Chapman, D. T. Chuss, B. Cook, R. Derro, J. L. Dotson, R. Evans, D. Fixsen, I. Gatley, J. A. Guerra, M. Halpern, R. T. Hamilton, L. A. Hamlin, C. J. Hansen, S. Heimsath, A. Hermida, G. C. Hilton, R. Hirsch, M. I. Hollister, C. F. Hostetter, K. Irwin, C. A. Jhabvala, M. Jhabvala, J. Kastner, A. Kovács, S. Lin, R. F. Loewenstein, L. W. Looney, R. E. Lopez, S. F. Maher, J. M. Michail, T. M. Miller, S. H. Moseley, G. Novak, R. J. Pernic, T. Rennick, H. Rhody, E. Sandberg, D. Sandford, F. P. Santos, R. Shafer, E. H. Sharp, P. Shirron, J. Siah, R. Silverberg, L. M. Sparr, R. Spotz, J. G. Staguhn, A. S. Toorian, S. Towey, J. Tuttle, J. Vaillancourt, G. Voellmer, C. G. Volpert, S. I. Wang and E. J. Wollack, *Journal of Astronomical Instrumentation* , 7(2018) , 4
- [22] A. I. Harris, M. Sieth, J. M. Lau, S. E. Church, L. A. Samoska, K. Cleary, *Rev Sci Instrum* , 83(2012) , 086105
- [23] Y. Hashimoto, S. Yorozu and Y. Kameda, *Ieice Trans. Electron* , E91(2008) , 3
- [24] D. Gupta, J. C. Bardin, A. Inamdar, A. Dayalu, S. Sarwana, P. Ravindran, S. W. Chang, A. H. Coskun and G. M. Sadrabadi, *IEEE Transactions on Applied Superconductivity* , 23(2013) , 1701806
- [25] P. Kurpiers, T. Walter, P. Magnard, Y. Salathe and A. Wallraff, *EPJ Quantum Technol* , 4(2017) , 8
- [26] A. V. Pan, S. A. Fedoseev, O. V. Shcherbakova, I. A. Golovchanskiy, S. Zhou, S. X. Dou, R. J. Webber, O. A. Mukhanov, T. Yamashita and R. Taylor, *Physics Procedia* , 36 (2012) , 365
- [27] A. H. Yonamine, D. I. Santos , A. V. Pan, S. A. Fedoseev, D. Oakden, B. Parsons, O. V. Shcherbakova, I. A. Golovchanskiy and N. Masilamani, *IEEE 14th International Superconductive Electronics Conference (ISEC)* 2013
- [28] ATIP Report: Superconducting Computing in Japan 2015
- [29] Cryogenic electronics and quantum information processing 2020
- [30] 吴金, 魏同立, 郑荏, 肖志雄, 固体电子学研究进展, 14 (1994), 3
- [31] 周鹏, 冯一军, 低温物理学报, 27(2005), 4
- [32] 黄云波, 李博, 杨玲, 韩郑生, 罗家俊, 微电子学, 47(2017), 5
- [33] J. C. Bardin *California Institute of Technology PhD thesis* 2009
- [34] P. Ravindran, S. W. Chang, D. Gupta, A. Inamdar, V. Dotsenko, S. M. Sarwana and J. C. Bardin, *IEEE Transactions on*

- Applied Superconductivity*, 25(2015), 1
- [35] L. He, L. Li, X. Niu, H. Xia, M. Xie, X. Wu, L. Zhang, L. Kang, and Z. Wang, *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, 29(2019), 1
- [36] 刘军, 周明珠, 李志芸, 微电子学, 48(2018), 5
- [37] J. Nees, S. Williamson and G. Mourou, *Applied Physics Letters*, 54(1989), 1962
- [38] R. Adam and R. Sobolewski, *Superconducting and Related Oxides: Physics and Nanoengineering, Proceedings of SPIE*, 4058(2000), 230
- [39] L. A. Bunz E. K. Track, S. V. Rylov, F. Y. Perng *SPIE*, 2160(1994), 229
- [40] Y. Hashimoto, H. Suzuki, M. Maruyama, K. Fujiwara, M. Hidaka, *Electronics Letters*, 45(2009), 1
- [41] U. S. Army Research Office Broad Agency Announcement For SuperCables 2018
- [42] E. Bardalen, M. N. Akram, H. Malmbeek and P. Ohlckers, *Journal of Microelectronics and Electronic Packaging*, 12(2015), 189
- [43] V. V. Dotsenko, A. Sahu, B. Chonigman, J. Tang, A. E. Lehmann, V. Gupta, A. Talalevskii, S. Ruotolo, S. Sarwana, R. J. Webber and D. Gupta, *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*, 171(2017), 012145
- [44] V. V. Dotsenko, B. Chonigman, A. Sahu, J. Tang, A. E. Lehmann, S. Sarwana and D. Gupta, *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, 27(2017), 1