

中国科学院学部 科学与技术前沿论坛简报 第 65 次

学部工作局学术与文化处 编报
《中国科学》杂志社

2018 年 3 月 15 日

“超导电子学”科学与技术前沿论坛综述

一、国内外研究现状

超导电子学的主要内容是研究超导体内有关物理过程的基本规律，据以发展新型的电子器件，并在实际中推广应用。超导器件都要工作在极低的温度，而超导器件的性能则比类似的常温器件或其他非超导器件优越得多，很多情况下更是绝无仅有的。因此，“采取极端的手段达到极端的目标”是超导电子学的实质所在。

随着量子通信以及其他前沿科学领域的发展，对于高性能单光子探测器件（SPD: Single Photon Detector）有着迫切需求，SPD 是量子通信的核心器件，它直接决定着量子密钥分发的距离和速率。超导单光子探测器（SSPD: Superconducting Single Photon Detector）与其他 SPD 相比，在探测效率、暗计数、抖动等方面具有明显优势。

SSPD 研究也在面向应用需求，进一步提升探测效率、速度等性能指标，实现阵列器件、拓展应用波长、实现小型化、实用化系统是未来 SSPD 领域的发展趋势。

SSPD 是超导传感器和探测器领域的热点研究方向，国际上有很多研究组和一些小型化商业公司已经开展了 SSPD (SNSPD-超导纳米线单光子探测器和 TES-超导转变边缘探测器) 方面的研究工作。在 SNSPD 领域，国际上著名的研究团队包括美国的 NIST、MIT、Yale，欧洲的 TU Delft、Univ of Glasgow，日本的 NICT，俄罗斯的 MSPU 等，小型商业化公司包括俄罗斯的 Scontel，欧洲的 ID Quantique、Single Quantum，美国的 Quantum Opus 以及 Photon Spot，主要开展 SNSPD 的应用推广和商业化运作。在 TES 领域国际上著名的研究团队包括美国的 NIST、JPL，欧洲的 SRON，日本的 AIST，全面开展 TES 的研发以及前沿探索。

我国在该领域的主要研究机构包括南京大学、中国科学院上海微系统与信息技术研究所和紫金山天文台。过去几年进展迅速，在探测效率、暗计数、时间抖动等性能研究方面已经达到国际先进水平，并且成功开展了量子通信空间碎片探测等实验研究。

超导量子比特以其低损耗、易调控和规模化并与现代成熟的半导体微加工技术相容等特点，成为最有希望用于实现实用化量子信息处理的物理载体之一。近年来，超导量子比特构建量子计算机的研究取得了诸多新进展。首先是超导量子比特的品质，例如退相干时间得到了显著提升。最早实验测得超导量子比特的退相干时间是只有几个 ns，而到现在超导量子比特的退相干时间已经超过了 100 微秒，已经能够满足简单量子算法实验演示的需要。超导量子比特状态的高保真度读取已经基本解决。最早超导量子比特单量子态的读取保真度不到 60%。目前，单比特读出保真度已高于 99%，已经接近于可容错计算的下限。超导量子比特的耦合，从最早不可控的电容电感耦合已经发展出几种可调控的耦合。从最原始两个比特（2008 年）、三个比特（2010 年）的耦合到最近 Xmon 结构中的 10 个量子比特的近邻耦合。这些为构建超导量子计算网络提供了原理和技术上的保障。

除了用于实现量子计算，超导量子比特在量子通信方面研究和宏观尺度下量子精密测量技术的发展方面也有着重要意义。鉴于超导量子信息处理在国防、金融、科技等领域的巨大潜在应用价值，诸多发达国家的政府、企业纷纷出台了相应的专项资助计划，支持超导量子计算机及相关技术的研发。例如美国国防部和加拿大 D-Wave 公司合作，试用该公司的类超导量子计算机产品；Google 专门研究超导量子计算机的应用；IBM 最近推出了“量子云”计算。

在国内虽然在该领域起步较晚，目前主要有中国科学技术大学、浙江大学、南京大学、中国科学院物理研究所等研究团队，和国外先进水平相比还有一定的差距，但是这个差距正在逐渐减小。

为了进一步推动我国量子通信和量子计算领域的发展，有必要尽早组织国内在超导量子器件，例如超导量子比特、SSPD，从材料器件到系统集成及相关配套技术方面的顶尖研究力量通力合作、协同创新，开展高性能量子通信、量子计算领域核心器件攻关，突破量子信息产业化的核心技术，形成具有自主知识产权的关键器件，从根本上提升量子信息系统的性能与应用范围，使其在深空通信、量子雷达、天文观测等领域扮演不可或缺的角色，并推动相关科技领域的技术革命。

二、论坛概况

本次论坛于 2017 年 5 月 22~23 日在南京大学国际会议中心举办。论坛执行主席为吴培亨院士。论坛由中国科学院学部主办，中国科学院信息技术科学部、中国科学院学部学术与出版工作委员会承办，南京大学、中国电子学会超导电子学分会、江苏省电子学会、《中国科学》杂志社共同协办。来自中国科学技术大学、中国科学院上海微系统与信息技术研究所、清华大学、南京大学等 26 所高校及科研院所的 130 余位专家学者参加论坛，涵盖了国内开展超导电子学研究的主要单位。

三、论坛的目的、意义和重点关注的问题

物理学（特别是量子理论）、数学等基础学科和信息科学技术的交叉融合催生了量子通信、量子计算、量子精密测量等新的领域，单光子的量子态正被用来存储和传送信息、进行计算。这些既是国际科技的热点，也是我国急需解决的重大应用问题。在这些新的领域和新的应用中，超导电子器件几乎无处不在，起着举足轻重的关键作用。可以毫不夸张地说，科学技术对于超导电子器件的需求，从来没有像今天这样迫切，超导电子学的发展迎来了又一个春天。

在这样的大背景下，本次论坛的主题为“量子信息时代的超导电子学：机会和挑战”。论坛采取分成若干专场的方式进行，每场都邀请了主题发言，佐以自由发言和充分的讨论。讨论了我国有关的实际需要，理清国内外本学科发展的总脉络，以期寻找我国独立自主创新的可能途径，并就相关科学技术的发展提出目标与战略方向。

论坛重点关注了**超导单光子探测器、超导量子计算、超导电子器件的高频应用、与超导电子学有关的高新技术**四方面的议题。

四、报告内容及讨论情况

议题一：超导单光子探测器

（一）中国科学院上海微系统与信息技术研究所尤立星研究员：
超导纳米线单光子探测技术及量子信息应用

高性能单光子探测器是光量子信息发展的核心技术，超导纳米线单光子探测（SNSPD: Superconducting Nanowire Single Photon Detection/Detector）是基于超导纳米线在吸收光子后局域有阻区的产生和消失的过程来实现单光子探测的。研究结果显示其探测效率、暗计数、时间抖动、速度等性能指标都明显优于传统的半导体器件。

中国科学院上海微系统与信息技术研究所自 2007 年开始启动 SNSPD 相关技术研究，目前已掌握 SNSPD 材料、器件和系统集成全部核心关键技术。通过优化薄膜厚度、线宽、间距光学结构等，提高器件的耦合效率、吸收效率和响应效率。通过片上集成滤波器和光

纤端面滤波降低了器件暗计数。通过改进核心器件、优化探测系统和测量方法将、时间抖动大幅降低。在这些指标方面都获得了国际领先的结果。通过和中国科学技术大学等单位合作，成功地将 SNSPD 应用到量子通信、量子模拟、量子隐形传态、量子指纹、卫星激光测距等领域。创造 400 公里光纤量子密钥分发等多项世界纪录，其中在 2014 年 200 公里量子密钥分发的合作研究成果被评为当年度两院院士评选的“十大科技进展”之一。

针对以上报告内容，会议开展了讨论，认为超导电子学赶上了量子信息发展好时代，需要继续提高器件性能，发挥各种超导单光子探测器优势，扩大量子信息和极限探测上的应用并进行产业化推广。

（二）南京大学康琳教授：超导纳米线单光子探测器在弱光检测中的应用

目前空间碎片的数量也日益增多，激光测距技术可以提供被测空间目标的方位、高度、距离等信息，定轨精度高。对空间碎片监测、预警等研究具有重大意义。激光测距和激光雷达系统的主要工作波段在 1064 nm，在此波段半导体单光子探测器效率较低，小于 20%。SNSPD 工作波段可以覆盖从可见光到红外光波段，检测效率高、速度快、噪声低等，在激光测距和激光雷达系统中具有独到的应用优势。

南京大学针对 1064 nm 频段，开发研制了单像元和 2×2 像元的 SNSPD 探测系统，系统检测效率大于 60%。通过光压缩系统的设计，将器件的等效光敏面积提高了 3 倍，大大改进了望远镜的接收系统与 SNSPD 的光子耦合效率。通过准门控工作模式设计，解决了测距中背散射致盲的工程难题。在空间测距实验中，目前已测量了 170 多个空间碎片，探测效率超过 95%，最小测试记录为 774 km 高度轨道上，雷达散射截面为 0.56m²，编号 33773 的铍 33 碎片（半径 25cm 球）。随着 SNSPD 阵列的发展，实现对入射的光子数、光子入射的时间和空间位置的分辨检测，在进一步的实验中，获取到空间目标的三维信

息。

除了在空间测距应用之外，还在青海湖和青岛灵山岛开展了地面和海面测距实验，均取得了良好的效果。今后 SNSPD 发展会朝着提高器件性能，扩大阵列规模和光子数分辨等功能扩展方面，并基于这些发展进行应用研究。

会议讨论认为，SNSPD 由于其高灵敏性在激光测距等弱光探测方面具有应用优势，其阵列化和光子数分辨功能的拓展除了器件本身优化外还和相对应的读出电路发展密不可分，故也应在低温电路和 SFQ 电路等方面投入。

（三）中国科学院紫金山天文台史生才研究员：超导转变边缘单光子探测器及其应用

超导转变边缘探测器（TES）具有极高的灵敏度及能谱分辨率，在太赫兹与 X 射线波段宇宙学及天体物理观测研究中正发挥越来越重要的作用。得益于平面制备工艺及低噪声复用读出电路技术的发展，超导转变边缘探测器（TES）与传统的半导体 Bolometer 相比，容易实现大规模阵列。在量子信息等领域，超导 TES 探测器的高效率及光子数分辨本领则有独特优势。报告首先介绍了超导 TES 探测器及读出电路的发展现状，然后重点介绍了中国科学院紫金山天文台为南极 5 米太赫兹望远镜研制的超导 TES 探测器阵列最新结果，最后针对单光子探测讨论超导 TES 探测器的应用前景。

会议讨论认为，发展性能更为优良的红外波段单光子检测器非常重要，在天文、激光测距、遥感、通信、生物成像等方面均有应用。

（四）中国科学院上海微系统与信息技术研究所/中国科学院超导电子学卓越创新中心王镇研究员：超导大规模数字集成电路技术及其应用

报告简单介绍了超导 SFQ 电路的发展历史、国际研究趋势、国内研究现状和上海微系统所的研究进展以及超导数字集成电路技术的应

用前景。

超导数字电路技术也叫超导单磁通量子 (SFQ) 电路。到 2020 年, 预计美国和日本的超导 SFQ 大规模集成电路的集成度将达到 106 JJs/cm^2 。届时, 64 位超导 SFQ 微处理器的实现将成为可能。

由于超导数字电路研究需要相应的工业基础和特殊的工艺、设计仿真技术积累, 我国的超导 SFQ 大规模集成电路技术长期处于空白。2012 年, 中国科学院上海微系统与信息技术研究所启动部署了超导 SFQ 电路相关研究工作, 在中国科学院的支持下完成了具有国际先进水平的 4~6 英寸超导器件与电路研发工艺平台一期建设。在此基础上, 开发并初步掌握了三层 2 微米 Nb/AlO_x/Nb 集成工艺技术, 1 万个 JJ 结阵的临界电流不均匀度小于 5%, 可以满足小规模 SFQ 电路的设计和制备要求。目前, 超导中心正在进行工艺平台二期建设和设计、仿真及测试平台建设, 目标到 2025 年掌握九层 0.5 微米 Nb/AlO_x/Nb 工艺技术, 实现 106 JJs/cm^2 大规模集成度, 达到 64 位超导 SFQ 微处理器的工艺条件。

会议讨论了是否应该联合相关单位, 建设超导器件流水线等问题。

议题二：超导量子计算

(一) 中国科学技术大学潘建伟院士：量子信息技术前沿进展

量子信息技术分为 3 类：量子通信（无条件安全的通信手段）；量子计算与模拟（超快计算能力，有效揭示复杂物理系统规律）；量子精密测量（测量精度超越经典极限）。在量子通信方面，量子密钥分发主要有两种方案：（1）单粒子方案 Bennett & Brassard (1984), BB84 协议；（2）纠缠态方案：Ekert, *PRL* 67, 661 (1991)。在量子计算方面，量子计算的基本单位是量子比特，利用了量子并行性，可以同时处理 2^N 个数进行数学运算，相当于经典计算机重复实施 2^N 次操作比经典算法有极大的速度提升。经典计算机无法对量子体系行为进行模拟，而量子计算机则有可能实现普适的量子模拟器，从而具有揭示新能源，

新材料的特性或机制。在量子精密测量方面，量子精密测量可大幅度提升导航、激光制导、水下定位、医学检测和引力波探测等的准确性和精度。

量子通信是无条件安全的通信手段，保证量子通信安全性的重点就在于量子密钥分发。现实条件下量子密钥安全性主要受到两个问题的制约：一是光源不完美，2010年时光纤诱骗态量子密钥分发已达200公里；二是探测器不完美，黑客可通过强光致盲攻击掌握密钥，而测量器件无关的量子密钥分发的提出解决了这一问题，它可以免疫任何针对探测器的攻击。解决以上问题后，就实现了实用化的城域量子通信网络，基于量子通信的高安全通信保障系统已在北京投入运行。短距离的量子通信已经比较成熟，而远距离量子通信仍面临挑战，远距离光纤损耗过大、与环境的耦合会使纠缠品质下降，另外单光子和纠缠光子对的产生是概率性的，这就导致效率受限，难以扩展。而要想完美地实现远距离量子通信，最终解决方案还是量子中继。近些年，潘建伟院士研究小组已经在量子中继的相关研究中取得诸多进展。

报告中还介绍了光量子计算方面取得了丰富的成果，量子点单光子源的研究，实现了20~30个光子的相干操纵，用于玻色取样（#P-Complete问题）的多光子可编程量子计算原型机，首次演示了超越早期经典计算机（ENIAC、TRADIC）的量子计算能力。同时还介绍了10个超导量子比特的纠缠成果、超冷原子量子调控以及超冷物理化学方面的进展与成果，并对量子通信、量子计算和模拟、量子精密测量的未来进行了展望。

（二）中国科学技术大学朱晓波教授：纵场控制的量子开关和多比特量子芯片上的线性方程量子求解算法演示

针对超导量子系统对动态的耦合和退耦合，展示了一种高效的新型量子开关。朱晓波及其合作者实验演示了如何利用外加的纵向控制场连续地调整一个超导量子比特与一个超导量子谐振子的耦合大小。

在特定幅度和频率的纵向控制场的作用下，量子比特和量子谐振子之间的真空拉比震荡完全停止，显示两个量子元件已经解耦合。课题组还演示了如何利用脉冲的控制场动态地关断或打开量子比特与量子谐振子之间的耦合。

设计制备并测试了集成了 6 个量子比特的超导量子芯片，芯片上的超导比特的弛豫时间稳定的超过 10 微秒，最长达到 20 微秒以上。课题组利用自行设计制备的 300MHz 带宽的量子极限约瑟夫森放大器，实现了对超导量子比特的多通道、单发高效率读取。利用芯片上的 4 个量子比特演示了如何采用 Aram Harrow、 Avinatan Hassidim 和 Seth Lloyd 所提出的算法（HHL 算法）来求解一个 2×2 的线性方程，保真度超过 80%。HHL 量子算法在求解某些 N 维线性方程组的时候可以在 $O(\log N)$ 的时间内完成，相较于目前已知的最优经典解法所需的 $O(N)$ 的时间有着指数级的量子加速效应。这项工作显示了采用超导量子芯片获得量子加速效应的潜力。

（三）浙江大学王浩华教授：基于超导量子电路的 10 比特量子纠缠

多比特量子纠缠是实现量子计算、量子通讯以及量子模拟的关键技术。多粒子量子体系的最大纠缠态，Greenberger-Horne-Zeilinger 态（GHZ 态）在量子纠错和量子加密等方面中有重要作用。目前，国际上最多比特数的 GHZ 态是 2011 年在离子阱系统中实现的，比特数达到 14。目前超导系统的最多比特数 GHZ 态是 2014 年美国加州大学圣塔芭芭拉分校的科学家利用一片五比特超导量子芯片完成的。

王浩华教授课题组与中国科学技术大学潘建伟、朱晓波、陆朝阳课题组，福州大学郑仕标课题组以及中国科学院物理研究所郑东宁课题组等合作，通过高精度脉冲控制和全局纠缠方案，成功实现了 10 个超导量子比特的纠缠，并完整地刻画了 10 比特量子态。课题组使用了一片联合研发的 10 比特超导量子芯片，其中单个比特的能量弛豫时

间均超过 10 微秒，单比特门操控精度都在 0.99 以上。在芯片上，10 个量子比特通过一个中心谐振腔连接，比特对腔的耦合强度大约为 20MHz。而量子比特间的直接相互耦合可以通过基于中心谐振腔的超交换相互作用实现，可灵活调制。通过频分复用技术，可以进一步将不同的比特对调制到不同的超交换相互作用频率，从而实现并行的两比特门操作。

报告展示了一种高效的多比特 GHZ 纠缠态生成方案。依次制备了从 3 比特到 10 比特的 GHZ 态，并利用量子态层析技术完整地刻画了这些 GHZ 态。10 比特 GHZ 态的保真度达到了 0.66，远高于 0.5 的纠缠阈值。相比于次序式的 GHZ 态生成方案，这种一步生成 GHZ 态的方案具有更高的可扩展性，而实验所展示的并行的两比特门操作方案也有可能在未来小规模量子计算芯片上得到应用。

（四）清华大学孙麓岩教授：基于三维微波光场的量子信息处理

实现一个有量子纠错保护的量子存储是目前整个量子计算领域急需解决的关键问题之一。相比于传统的量子纠错方案，利用光场来进行量子信息的存储与纠错可能是一种更节省资源和更有效的方案。利用 3D 微波光场进行量子信息的处理有以下几个优点：（1）其本身具有无限维 Hilbert 空间，可以满足对量子信息冗余化存储的要求；（2）微波谐振腔中微波光子的相干时间本身可以非常长，单独一个微波谐振腔的相干时间可达几百微秒甚至更高，非常适合进行量子信息处理；（3）谐振腔中微波光子的主要退相干通道只有一个，即光子的泄漏，因此只有一个错误症状，即光场的奇偶性（宇称），需要被连续跟踪，这样可以大大简化对硬件的要求。

目前基于光场，第一个有正增益的量子存储已经实现了，其相干时间比该系统中相干时间最好的单光子长了 10%。另外，两个远程超导比特的 Bell 纠缠态以及两个逻辑比特之间的逻辑操作也都已经实现了。因此基于三维光场和超导比特耦合的系统是一个进行量子信息处

理的非常好的物理系统。

在这个系统中也演示了几项工作。在一个实验中第一次同时展示了两点：（1）普通的量子延迟选择实验，被测系统的性质依赖于观测装置的设置；（2）延迟选择的量子擦除实验。在这个基础上把二者结合起来，实现了第一个双重量子延迟选择实验，进一步阐述了波粒互补性原理。另一项工作是演示了一个新方法制备光场中任意 Fock state 的叠加态。它在研究量子行走、环境导致的量子退相干、高精度测量等方面都有非常重要的应用。

研究小组希望在这个系统中实现一个由量子纠错保护的逻辑比特，并且在此基础上进一步实现两个逻辑比特之间的逻辑操作，为以后利用光场进行大规模的量子信息处理打下坚实基础。

（五）南京大学于扬教授：利用超导量子比特模拟拓扑能带

量子计算机可以解决经典计算机无法解决的问题，是重要的未来信息技术。近年来，超导量子比特取得了很大进展，退相干时间达到 100 微秒，逻辑操控保真度超过 99%，已经达到容错量子计算的下限，许多国际上的大公司纷纷投入超导量子计算领域研发，争取占领新一代信息技术的制高点。

课题组在超导量子比特的制备加工和测量方面都取得了巨大的进步，已经建立了完善的样品加工流水线和多套样品测量系统。目前主要研究分两个方面。（1）在通用量子计算机方面，设计加工了 13 个量子比特的平面二维表面码（surface code）量子芯片。开发了基于 PCB 板的三维立体封装技术，可以方便地操控和测量每一个量子比特。系统的 Q 值达到平面封装效果，有较长的量子比特退相干时间。控制线之间的串扰低于 -50dB，可以进行容错量子计算。检测到 Rabi 振荡，实现了两比特 CNOT 操作。说明该三维立体封装技术是一个可行的方案，具有设计加工简单、成本低等优势。（2）在专用量子计算机研究方面，设计了平面的 8 个量子比特芯片和 21 个量子比特芯片，检测了

这些量子芯片上的大部分量子比特，发现退相干时间最高可达到 33 微秒，接近国际同类设计最好水平 50 微秒。

利用已有的量子比特开展了量子模拟的研究。模拟了空间、时间联合对称性保护的拓扑半金属能带。直接测量到时空对称性保护的狄拉克点，验证了它们的稳定性。发现单独破坏时间或空间对称性但保持时空联合对称性的情况下，狄拉克点任然存在。另外还实验验证了改变参数可以使拓扑半金属变到拓扑绝缘体。该研究在超导量子比特中实现了自旋-动量（轨道）耦合的哈密顿量，为今后利用超导量子比特模拟凝聚态复杂系统提供了新方案。

（六）南京大学孙国柱教授：AT 效应的动态调制

由于超导量子比特可以和微波场实现强耦合，因此可以用超导量子比特与微波的耦合系统来研究原子和光的耦合系统无法实现的一些问题，由此可以开展微波量子光学的相关研究。

课题组利用三维传输子超导量子比特（3D transmon）和微波场，实现了电路量子电动力学系统(Circuit QED)。首先，对 3D transmon 的基本参数做了表征，然后，利用单光子跃迁、双光子跃迁过程作为探测手段，观察到了单个微波耦合场作用下 3D transmon 中的 Autler-Townes 效应(ATE)，即 3D transmon 原先的一根谱线分裂成了两根谱线，这两根谱线的间隔是和施加的微波耦合场的场强成正比，即和该微波耦合场引起的拉比（Rabi）振荡成正比。然后，对微波耦合场加上了随机电报噪声(RTN)，研究了受 RTN 调制的 ATE，发现 RTN 中存在一个阈值。当 RTN 中的跳变率低于这个阈值时，ATE 呈现三条谱线；当 RTN 中的跳变率高于这个阈值，三条谱线汇聚成了两条。阈值的大小和耦合强度及失谐量有关。进一步，课题组对微波耦合场进行了正弦波调制，为了提高调制的灵活性，课题组用两个耦合场来实现等效的调制。当其中一个耦合场和 transmon 中的两个能级谐振，而另一个耦合场有一定失谐时，课题组发现当谐振耦合场强度是该失

谐量的整数倍 (n) 时, 将出现 ($n+1$) 对谱线; 当两个耦合场对称失谐时, 出现了一系列等间隔的谱线, 间隔大小等于失谐量。若确定失谐量, 改变耦合强度, 课题组可以得到动态的发射状谱线。通过双修饰态的图像和理论计算得到了和实验非常一致的模拟结果。这些结果对于研究超导量子系统中的噪声、量子态的灵活控制、微波光子开关和路由等有着重要的意义。

议题三: 超导电子器件的高频应用

(一) 南京大学超导电子学研究所陈健教授: 太赫兹波段超导直接探测器

太赫兹技术的重要应用之一就是高空间分辨率的实时成像探测应用, 而实现这一应用的关键之一是需要大规模阵列探测器。超导氮化铌 (NbN) 热电子测辐射热计 (HEB) 因其优异的混频探测性能在射电天文观测中已经得到了广泛的应用。

目前, 直接探测器的大阵列系统读出电路最有前景的方法是利用微波技术。研究发现, 当微波频率高于 NbN HEB 的中频增益带宽时, IV 曲线会出现电流的不稳定跳变; 当微波频率低于 HEB 的中频增益带宽时, IV 曲线与 HEB 热响应 IV 曲线类似, 有着稳定的偏置区域。据此搭建了一套基于微波反射读出法的超导 HEB 直接探测系统, 所用的超导 HEB 芯片在 4.2 K 和 0.65 THz 频率下混频器的噪声温度为 500 K, 中频增益带宽为 1.85 GHz (响应时间为 86 ps)。将该芯片用于 0.65 THz 直接探测时测得其噪声等效功率 (NEP) 为 $1.6 \text{ pW/Hz}^{1/2}$, 与商用低温 Si Bolometer 的相当, 并有望进一步提升, 而其响应速度要比 Si bolometer 高 6 个量级。结合现有的频分复用读出电路, 基于微波反射读出法的超导 HEB 直接探测器有望构建大阵列太赫兹探测系统用于高分辨的实时太赫兹成像等。

会议讨论认为, 应进一步提升超导直接探测器灵敏度 (NEP), 结构简易化、阵列化等是应用面临的重要问题, 值得深入研究。

（二）清华大学物理系曹必松教授：超导滤波器在通信系统中的应用

滤波器用于选频，是各种无线通信装备接收前端的关键部件。对无线通信装备的灵敏度、抗干扰能力、通信距离等有重要的影响。从100多年前发明无线电以来，人们为了获得理想的滤波性能，发明了各种各样的滤波器，但由于受材料电阻的限制，这些滤波器的性能离理想滤波器相差甚远。

由于高温超导材料的微波表面电阻接近于零，用高温超导薄膜研制的滤波器具有几乎理想的滤波性能，使得百年来无线电领域使用高性能滤波器的愿望成为现实。高温超导滤波器已经用于我国26个省市，实现了大范围规模实际应用，大幅提高了应用性能，解决了这些装备长期以来无法解决的难题。

报告介绍了超导滤波器的基本原理、应用领域，技术难点、国内外研究现状，超导滤波器在我国军民有关领域的应用情况，超导滤波器未来的发展等。

会议认为，应充分利用超导滤波器低插损、高选择性和强干扰性等特点，在国防和军事领域开展更为积极和广泛的应用。

议题四：与超导电子学有关的高新技术

（一）清华大学微纳电子学系陈炜教授：微纳加工技术和超导电子学

微纳加工技术是超导电子学研究不可或缺的一项技术。目前，我们具备了制备不同超导电子器件的基本的工具手段。首先需要进行掩模图性的制备，使用不同波长电磁辐射，从紫外光到X射线，或者是电子束或离子束对辐射敏感的感光胶进行选择性的曝光，显影后形成所需要的器件结构的掩模图形，在此基础上利用化学或物理方法在平面衬底上淀积所需的材料，化学方法包括化学气相沉积、原子层沉积，物理方法包括热蒸发、电子束蒸发、磁控溅射、分子束外延、离子注

入等。用刻蚀法将没有感光胶覆盖的无用部分的功能材料去掉，最终形成所需要的器件结构。利用微纳加工技术，可以制备最小特征尺寸在 10 纳米的器件，包括超导电子器件，例如超导纳米线单光子探测器的最小线宽可以达到 10 纳米左右。报告还介绍了在超导电子学方面，包括超导单光子探测器、超导量子比特、超导低功耗电子器件等的一些相关工作。

会议讨论了超导电子学器件制备中利用的各种微纳加工技术，与会代表们认为，以几家微纳加工技术较好的单位为平台，开展代加工服务，是解决目前微纳加工技术凌散、低水平的好方法。

（二）中国科学院理化技术研究所王俊杰研究员：应用于超导电子学的低温技术

超导是物质在低温下的一种物理现象，任何超导体的应用都需要低温环境。超导电子器件对制冷条件的要求通常是消耗功率低、制冷效率高、机械振动小、制冷体积小、制冷重量轻、操作维修方便、工作寿命长，其技术的发展对超导电子学起到关键的支撑作用。

对于 GM 或 GM 型脉冲管制冷机虽然是液氮温区唯一商业化的产品，目前可达液氮温度的为多级斯特林型脉冲管制冷机，该温区内这类制冷机的热效率依然较低。VM 或 VM 型脉冲管制冷机是一种热驱动型斯特林制冷机，工作频率较低，满足液氮温区高效运行条件。在前期的工作中，采用该类制冷机成功获取了 3K 以下的极低温度，已初步显示出该类制冷机获取极低制冷温度的优势。另外该类制冷机具有结构紧凑、洁净无油、振动低等优点，结合绝热去磁制冷机，可形成极具优势的空间 mK 级的制冷方案。

会议讨论认为，对于低温技术在超导电子学中的应用，在振动性、磁干扰性、稳定性、高效性等方面对于制冷机的发展提出了要求，所以小型低温制冷机在超导电子学领域主要的发展方向为：（1）新型高效制冷流程的探索，（2）10K 以下新型无磁蓄冷器的研究，（3）长寿

命、低振动驱动源的相关研究,(4)mK 温区极低温制冷机的研究,(5)温控、减震、磁屏蔽等问题的解决方案。

(三) 中船重工鹏力(南京)超低温技术有限公司高金林博士: 低温制冷技术和超导电子学

目前为超导电子器件提供低温环境的低温制冷机主要包括稀释制冷机、G-M 低温制冷机、脉管制冷机、绝热去磁制冷机(ADR)等。这些低温制冷机的制冷温度范围从 10mK~4.2K 不等,制冷量从 10 μ W~1.5W 不等。低温制冷机,尤其是 mK 级别的极低温制冷机的技术难度及加工难度非常之高,国内很多高校或研究所,例如浙江大学、西安交通大学、中国科学院理化技术研究所以及中国科学院物理研究所等单位,都有该类型低温制冷机的相关研究,中船重工鹏力(南京)超低温技术有限公司通过自主研发和技术创新,成为国内实现 4K GM 制冷机量产的公司(最低温度可达 2.1K),并实现了该类型制冷机的全球销售。在国外,G-M 低温制冷机的主要生产厂家是日本住友公司,脉管制冷机的主要生产厂家是美国 Cryomech 公司和日本住友公司,英国、芬兰和美国的三家公司几乎垄断了稀释制冷机在全球的市场。为了发展国内的超导电子学用低温制冷设备,打破国外垄断,开展和即将开展以下主要工作:量子通信、量子成像雷达和激光测距用超导纳米线单光子探测低温恒温器,微型 G-M 制冷机和压缩机的研制,量子计算用稀释制冷机的研制。目前正在与英国的 ICE Oxford 公司联合研制 10mK 级稀释制冷机,通过合作与关键技术引进,逐步实现国产化,解决毫 K 级低温制冷机依赖国外进口的问题。

会议讨论了自主研制制冷机的重要性,提出了在国内科研需要制冷机,但市场规模又有限的情况下,是否需要相关部门给予支持以及如何发展等问题。

五、共识和建议

针对国际整体研究形势,结合国内研究现状和进展,大家认为各

单位既要发挥各自研究的特长，继续深入开展针对性的研究，同时也应该相互合作、互通有无、相互支持，避免不必要的资源重复投入。

关于超导量子比特相关的报告，引起了参会人员的极大兴趣。大家对其中的样品制备、测量表征、具体能解决的问题等方面开展了热烈的讨论和充分的交流。对于到底是哪种形式的超导量子比特最后能胜任量子计算和量子模拟，大家各抒己见，求同存异。

关于超导量子比特的研究吸引了各领域的关注，包括相关的微加工、制冷技术等。同时，由于感受到来自国际同领域快速发展的压力，相关研究人员一致认为，国家应该持续的对该领域投出更多的支持。

超导检测器具有极高的灵敏度及能谱分辨率，在多波段、多领域发挥越来越重要的作用，应研发各种超导电子器件，利用超导器件独特的材料和器件性能，在微波、太赫兹、红外到可见光各个波段实现单光子检测，在上述频率较低的波段，对单光子的产生及调控也应开展积极的原创性的研究。

针对超导数字和模拟器件的制备问题，会议认为必须赶超西方国家的相关技术，探讨了集中资源、建设超导器件制备流水线的可能性。

关于超导器件和电路的制冷问题，论坛有两个报告报道了各种制冷技术，以及研制和将要研制的各类制冷机。超导器件需要的制冷机，特别是稀释制冷机或其他有特殊功能要求的制冷机一般价格都很昂贵，但市场规模又不如其他科学仪器。在这样的条件下，如何发展高性能的制冷技术，应引起相关部门的重视，给予一定的支持。

六、与国外研究相比的优势和差距

超导量子比特的研究在国际上已经形成了白热化趋势，许多的商业公司已经介入其中，包括 IBM、Google、Microsoft 等，其取得的进展是相当迅速的，包括 IBM 发布的“量子云”、Google 提出的实现“量子霸权”的近期目标。相对于国外而言，目前国内的发展相对滞后，包括量子相干时间较短、耦合的量子比特位数较少，同时，国内尚无

商业公司参与到相关的研究中。但经过最近一段时间的努力，国内各个研究小组也都在上述两方面取得了不少进展，同时，在量子比特样品制备上，都建立了相对稳定的工艺流程。

超导太赫兹检测器等方面的研究，如在射电天文方面，由于国内近几年的大力投入，并通过国际合作，得到了很好的发展，也有很好的实际应用。但就整体水平而言，仍有一定的差距，原创性器件的研制不多，在器件的设计和制备、大规模阵列器件的应用、读出电路的研制、制冷技术等方面还需要形成研究规模。希望有关方面加大支持力度，通过竞争与合作，进一步发展超导电子学。

七、特色和创新

超导电子器件有许多其他器件如半导体无法取代的特点，如灵敏度高、噪声低、高度非线性等；而光学特别是腔量子光学等在量子信息等方面已有很好的研究和应用。“他山之石，可以攻玉”，如何利用超导器件的特点，在不同工作频率，进行原创性的相关研究，是此次会议的一个共识。

南京大学超导电子学研究所微波量子光学等方面，取得一些初步的结果，对于拓展超导量子比特在量子信息研究领域的应用，例如实现微波单光子探测、在微波量子通讯（如量子雷达）等有着重要意义，这一领域国际上也处于刚刚起步的阶段。

（作者：吴培亨，中国科学院院士，南京大学电子科学与工程学院教授；许伟伟，南京大学电子科学与工程学院教授）