

专题: 超导及其应用

中国超导电子学研究及应用进展*

李春光¹⁾²⁾ 王佳¹⁾²⁾ 吴云¹⁾²⁾ 王旭¹⁾²⁾ 孙亮^{1)2)3)†} 董慧²⁾⁴⁾ 高波²⁾⁴⁾
 李浩²⁾⁴⁾ 尤立星²⁾⁴⁾ 林志荣²⁾⁴⁾ 任洁²⁾⁴⁾ 李婧⁵⁾ 张文⁵⁾ 贺青⁶⁾
 王轶文⁷⁾ 韦联福⁶⁾⁸⁾ 孙汉聪⁹⁾¹⁰⁾ 王华兵⁹⁾¹⁰⁾ 李劲劲¹¹⁾ 屈继峰¹¹⁾

1) (中国科学院物理研究所, 超导国家重点实验室, 北京 100190)

2) (中国科学院超导电子学卓越创新中心, 上海 200050)

3) (松山湖材料实验室, 东莞 523808)

4) (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)

5) (中国科学院紫金山天文台, 南京 210023)

6) (西南交通大学信息科学与技术学院, 信息量子技术实验室, 成都 610031)

7) (西南交通大学物理科学与技术学院, 量子光电实验室, 成都 610031)

8) (东华大学理学院, 光子学实验室, 上海 210031)

9) (南京大学超导电子学研究所, 南京 210093)

10) (紫金山实验室, 南京 211111)

11) (中国计量科学研究院, 北京 100029)

(2020年12月14日收到; 2020年12月23日收到修改稿)

超导体的发现距今已有近110年了, 高温超导体的发现也已经有30多年了. 超导材料的电子学应用在最近一二十年取得了突破性进展. 高温超导微波器件显示了比传统微波器件更优越的性能, 已经在移动通信、雷达和一些特殊通信系统中取得了规模化应用. 超导量子干涉器件以其磁场和电流测量的超高灵敏度, 成为地质勘探、磁共振成像和生物磁成像等领域不可替代的手段. 包括超导隧道结混频器、超导热电子混频器、超导转变沿探测器及超导单光子探测器等在内的超导传感器/探测器可以探测全波段的电磁波及各种宇宙辐射, 具有接近量子极限的超高灵敏度, 在地球物理、天体物理、量子信息技术、材料科学及生物医学等众多前沿领域发挥越来越重要的作用. 超导参量放大器已经成为实现超导量子计算的关键器件. 超导集成电路技术已被列入国际器件与系统技术路线图, 成为后摩尔时代微电子领域的前沿阵地之一. 在计量科学中, 超导约瑟夫森效应及约瑟夫森结阵器件被广泛应用于量子电压基准和国际单位制基本单位的重新定义中. 在当前的量子信息技术热潮中, 超导电子学扮演重要角色, 同时量子热潮也大力推动了超导电子学的发展. 本文主要对近几年我国超导电子学研究和应用的现状与进展进行概括总结.

关键词: 超导电子学, 高温超导微波器件, 超导传感器/探测器, 超导数字电路

PACS: 85.25.-j, 07.57.-c, 84.40.-x

DOI: 10.7498/aps.70.20202121

1 引言

1911年, 荷兰物理学家 Onnes^[1] 在测量金属

汞的剩余电阻率时, 首次发现当温度降低到4.2 K附近时, 汞的电阻有一个突然转变, 降低到接近于零, 他认为汞在4.2 K以下进入了一个新的物态, 并将其命名为超导态. 其后的超导环电

* 国家自然科学基金 (批准号: 51972012, 61971415, 61601456, 61971408, 61671438, 61827823, 11673073, U1831202, 11974290, 61871333, 11653004, 61727805, 11961141002)、国家科技部重点研发计划 (批准号: 2017YFA0304000, 2017YFA0304003)、国家重点基础研究发展计划 (批准号: 2010CB923104)、中国科学院战略性先导科技专项 (A类, 批准号: XDA18000000)和中国科学院青年创新促进会 (批准号: 2017009) 资助的课题.

† 通信作者. E-mail: sunliang@iphy.ac.cn

流衰减实验表明^[2], 超导态金属中的电阻率小于 $10^{-23} \Omega \cdot \text{cm}$. 1933年, 德国物理学家 Meissner 和 Ochsenfeld^[3] 对锡单晶球超导体做磁场分布测量时发现了超导体的另一个基本性质——迈斯纳效应. 1960年, 美裔挪威籍科学家 Giaever 发现了在超导体隧道结中存在单电子隧道效应^[4]. 1962年, 英国的 Josephson^[5] 从理论上预言了超导电子对隧穿的约瑟夫森效应, 并很快被实验所证实. 零电阻、迈斯纳效应、陡峭的绝缘-超导转变、单电子隧道效应和约瑟夫森效应等构成了超导体应用的主要物理基础, 揭示了超导应用的巨大潜力. 超导体的应用可分为三类: 强电应用、弱电应用和抗磁性应用. 强电应用即大电流应用, 包括超导磁体、超导发电、输电和储能; 弱电应用即电子学应用, 包括超导数字电路、超导传感器/探测器、超导微波器件等; 抗磁性应用主要包括磁悬浮列车和热核聚变反应堆等. 然而由于传统的 BCS 超导体超导转变温度处于液氮温区, 昂贵且笨重的制冷设备给超导体的应用带来了诸多限制. 1986年瑞士的 Bednorz 和 Muller^[6] 发现了一种成分为钡、镧、铜、氧的陶瓷性金属氧化物 LaBaCuO_4 , 其临界温度约为 35 K, 拉开了高温超导研究的序幕. 1987年美国休斯顿大学朱经武等^[7] 与中国科学院物理研究所赵忠贤^[8] 等先后宣布制成临界温度约为 90 K 的超导材料钇钡铜氧 ($\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$, YBCO), 其转变温度已经到了液氮温区, 所以这一类超导体被称为高温超导体. 随后又发现了 $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_8$ (BSCCO) 和 $\text{Tl}_2\text{Ba}_2\text{Ca}_1\text{Cu}_n\text{O}_{2n+4}$ 等超导转变温度更高的氧化物超导体. 高温超导体的发现不仅带来了超导机理研究的又一个高潮, 也有力地推动了超导应用研究的蓬勃发展. 在高温超导体发现 30 多年后, 超导技术已经实现了规模化商业应用. 本文对超导弱电领域的研究和应用现状进行总结和回顾, 主要介绍最近几年国内超导电子学应用的最新成果和发展趋势.

2 超导微波器件

超导微波应用是超导体零电阻特性的一种应用. 当通过微波信号时, 超导材料虽然不像在直流电流下那样具有零电阻, 但其微波表面电阻仍然非常小. 如图 1 所示, 在 1 GHz 的频段, YBCO 的微波表面电阻比铜小 3—4 个数量级^[9]. 虽然随着微波信号频率的升高, 二者差距逐渐缩小, 但直到

100 GHz 之下, YBCO 的微波表面电阻仍然比铜小. 所以用超导材料制作的微波谐振器具有非常高的品质因数, 制作的天线、滤波器、谐振腔和移相器等无源微波器件具有非常小的微波损耗. 另外, 利用超导态到正常态转变时巨大的电阻差还可以制作微波接收系统中的限幅器.

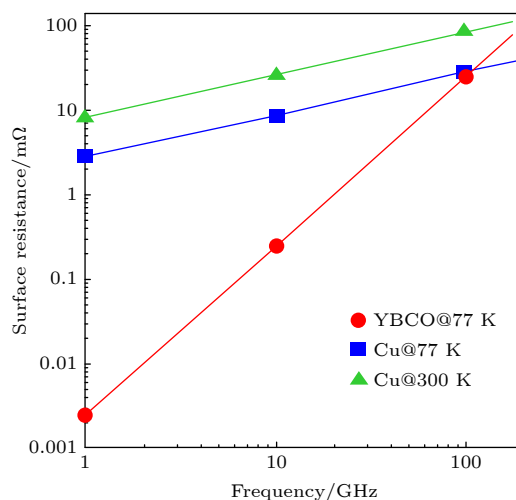


图 1 YBCO 薄膜与铜的微波表面电阻的频率特性^[9]

Fig. 1. Frequency dependence of the microwave surface resistance of YBCO film and copper^[9].

超导滤波器是所有超导微波器件中研究和应用最为深入广泛的一种. 这得益于两方面的原因: 1) 极小的微波表面电阻不仅使超导滤波器具有非常小的插入损耗, 而且使设计制作相对带宽非常小、阶数非常高的滤波器成为可能, 这大大提高了滤波器对微波信号的选择性, 使超导滤波器与常规滤波器相比, 性能提升非常显著; 2) 近些年通信、雷达、卫星等行业的飞速发展, 为超导微波滤波器的应用带来了非常广阔的市场和发展前景. 所以在高温超导材料发现不久, 人们就开始了高温超导滤波器的研制. 平面微带线结构具有体积小、易于集成和加工工艺成熟等优点, 因此随着高质量高温超导薄膜的研制成功, 具有非常优越性能的超导微带滤波器很快被研制出. 美国最早开展了高温超导空间实验计划 (HTSSE)^[10], 并在移动通信领域实现了规模化应用. 据美国超导技术公司 (STI) 宣称, 有超过 10000 个基站使用了他们生产的高温超导微波接收前端^[11]. 随后欧洲、日本等国也都开展了高温超导微波接收前端的应用试验^[12,13].

最近几年, 超导滤波器的研制继续向纵深推进, 努力从设计方法或是物理结构上寻求突破, 力

争实现普通微带超导滤波器难以实现的参数指标和性能,例如:大的相对带宽、高的功率承载能力、小型化,以及实现工作频率的可调化等等.比如日本山梨大学最近几年一直致力于高功率承载能力的超导滤波器研究,他们将两个相同的超导微带线对称叠放在一起,构成类似带状线的结构,称之为“双带结构”^[14].这种双带结构中,上下两条微带线耦合在一起便会有偶模和奇模两种模式.让滤波器工作于偶模模式的时候,两条微带线中电流方向相同,产生的磁场方向相反,相互抵消,减弱了微带线间的磁场,从而降低电流密度.根据2017年^[15]和2019年^[16]他们最新的研究结果,采用这种结构的高温超导滤波器功率承载能力达到46.2 dBm (41.7 W).为进一步提高功率承载能力,他们还研究了高温超导块状谐振器.一般大块的超导块材晶体缺陷较多,微波表面电阻要比外延生长的超导薄膜材料差.用超导块材做谐振器需要寻找微波性能好的材料.实验发现烧结生长的 $\text{GdBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_y$ 具有较小的微波表面电阻^[17],日本山梨大学用它烧结成厚约1 mm的圆片状,用作TM₀₁模式的谐振器,当谐振频率为5 GHz时,超导圆片直径约20 mm,品质因数(Q)约2400左右^[18].用这种谐振器研制的超导滤波器功率承载能力达到100 W以上^[19–22],5阶的滤波器插入损耗小于0.5 dB.可调频率滤波器也是一个重点研究方向.最近日本Sekiya等^[23,24]用介质棒调谐的方法研制了一款4阶可调频率双通带超导滤波器,采用介电常数为39的介质棒进行频率调节,实现的滤波器中心频率调节范围约为4.8%,滤波器插入损耗只增加了0.06 dB,从0.13 dB增大到0.19 dB.2018年加拿大一个研究小组针对美军战术数据链(Link-16)用环形器、超导带通滤波器和MEMS开关研制了一款可调频率带阻滤波器^[25,26],其主要技术路线是用环形器将超导三通道带通滤波器变成带阻滤波器,然后用微机电系统(micro-electro-mechanical system, MEMS)使某通道的滤波器中谐振器失谐,从而达到选择频段的目的.

在整个微波接收前端系统中,除滤波器外还有很多器件是可以利用超导材料实现并带来系统性能提升的.天线是微波接收系统中最前端器件,与传统天线相比,超导天线损耗非常低.但由于超导天线的 Q 值高,也带来了带宽窄的缺点,所以近年超导天线的研究比较少.随着最近几年微波领域滤波

天线的研究热潮,超导滤波天线将弥补带宽窄的缺点,成为一个潜在研究热点方向.限幅器也是大多数微波接收系统必要的元件,用来阻断大功率微波脉冲对后续电子系统的冲击.高温超导材料在正常态电阻接近绝缘体,而在大功率信号下从超导态向正常态转变的响应时间在纳秒以下,所以高温超导材料是研制微波限幅器的理想材料.2017年俄罗斯一个研究组用在 NdGaO_3 衬底上生长的 YBaCuO 薄膜研制出工作于8 GHz的限幅器^[27,28],当输入微波功率为13.5 dBm(22.4 mW)时开始起作用,当输入功率达到46.5 dBm(44.6 W)时泄露功率仅有5.9 mW(7.7 dBm).日本东芝公司近年来一直在研制相控阵雷达超导接收系统.据2018年报道的结果^[29–31],他们研制的16(4×4)单元相控阵超导接收模块工作于9 GHz,内部集成了16路超导移相器、超导T/R开关和超导功分器,包含制冷系统在内体积仅有80 mm \times 80 mm \times 330 mm,其噪声温度为315 K.利用超导谐振器的高 Q 值还可以研制低相噪振荡器.法国Thales公司研制的高温超导谐振器 Q 值将近400000,用该谐振器制成的低相噪振荡器相位噪声约-130 dBc/Hz(频率为1 GHz,偏离1 kHz处)^[32].

国内高温超导微波器件的大规模研究在2000年前后开始,很快研制出性能达到国际先进水平的超导滤波器,比如插入损耗最小仅有0.05 dB^[33,34],相对带宽最小达到0.02%^[35],阶数最高达到24阶^[36],带边陡度高达300 dB/MHz,偏离带边350 kHz处的抑制就达到了90 dB^[37]等.最近几年,高温超导滤波器的研究向超宽带、多通道和可调频率方面拓展,取得了显著成就.

一般将相对带宽大于20%或在传输的任何时刻带宽大于500 MHz的通信系统称为超宽带(ultra wide band, UWB)系统.一方面在民用通信领域,美国联邦通信委员会于2002年批准了UWB技术可用于民用商品.随后,日本于2006年8月开放了UWB频段.另一方面,在天文探测等领域,也是需要进行宽频带信号接收,所以宽带超导滤波器在近些年引起大家关注.主流的超导滤波器一般采用半波长微带线结构,其谐振器耦合强度较弱,难以达到超宽带滤波器设计所需要的耦合强度.采用多模谐振器是设计超宽带滤波器的一个可行途径.具有物理对称结构的谐振器具有奇模和偶模两种谐振模式,通过合理调节奇模和偶模,以及它们

的倍频谐振峰的位置,可以形成较宽的滤波通带. 2017年华东交通大学利用三模谐振器研制了一款应用于射电天文望远镜的超宽带滤波器^[38],该滤波器具有一种奇模谐振模式和两种偶模谐振模式,最终形成相对带宽为66.7%的超宽带滤波器.该滤波器用MgO衬底的YBCO超导双面薄膜实现,中心频率1.5 GHz,封装尺寸为20.8 mm × 16.15 mm.随后清华大学^[39,40]和电子科技大学^[41]也发表了他们用多模谐振器研制的超宽带超导滤波器的研究成果,相对带宽都超过100%,其中电子科技大学利用双环状谐振器的7个谐振峰实现了2.56—11.15 GHz的通带宽度,对应于125.3%的相对带宽.多模谐振器易于实现超宽带,但是很难做到高阶数,所以上述滤波器的带外抑制一般都在20—30 dB左右.2018年中国科学院物理研究所(简称物理所)^[42]用低通滤波器和高通滤波器级联的方法在UHF频段实现了相对带宽为108%的超宽带带通高温超导滤波器系统设计,其起始频率为820 MHz,终止频率为2750 MHz,中心频率为1785 MHz,−40 dB比−3 dB的矩形系数为1.4,优于相同通带下8阶切比雪夫滤波器的矩形系数.但两个滤波器级联导致整体体积比较大.最近物理所研发了新的宽带滤波器设计方法,在低通滤波器电路内部插入高通元件,所有低高通电路元件都采用微带线结构的半集总元件,在一块2英寸(1英寸=25.4 mm)的超导薄膜上实现了通带频率0.8—2.7 GHz,相对带宽大于100%,带外抑制超过70 dB的超宽带滤波器^[43],如图2所示.

超导滤波器在频率选择性和微波损耗等方面展示了其超越传统微波滤波器的优越性能,但其也有根本弱点,那就是需要工作在低温环境(通常由机械制冷机提供),因而体积重量比较庞大.要想减小体积重量,除了制冷机本身的改进外,超导滤波器本身也需要尽量小型化,降低制冷机负载.双工器和多通带滤波器在一块基片上设计实现两个或者多个微波通带,是减小微波接收系统滤波器尺寸的有效办法.设计双工器或是多通带滤波器有多种方法,可以针对每个通带设计单独滤波器,然后将各滤波器用微带分支线连接起来^[44];用一个带通滤波器级联一个或多个带阻滤波器,用带阻将带通的单个通带分割成多个通带^[45];还可以利用频率变换或耦合矩阵优化将传输零点设计在通带内来直接设计多通带滤波器^[46].近年来采用多模谐振

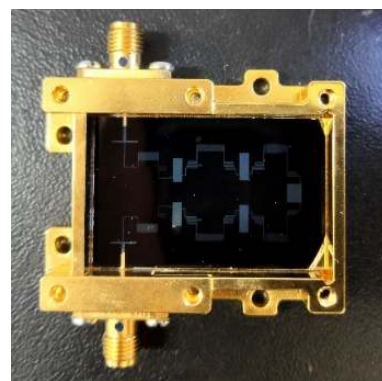
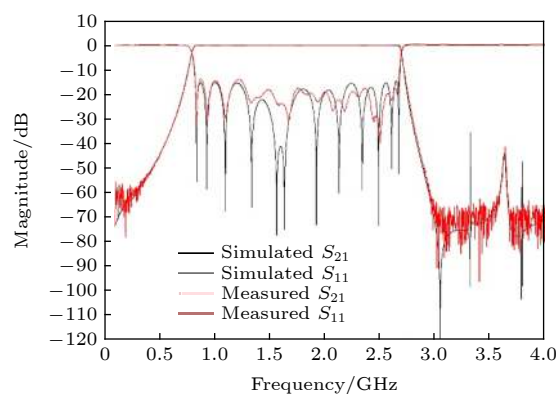


图2 物理所研发的通带频率为0.8—2.7 GHz的超宽带超导滤波器^[43]

Fig. 2. HTS UWB filter with frequency band of 0.8–2.7 GHz developed by Institute of Physics, Chinese Academy of Sciences^[43].

器来构成多通带滤波器成为一个比较引人关注的方法.多模谐振器通过级联,每一个谐振模式形成一个滤波通带.华东交通大学曾用多模谐振器设计制作了三通带^[47]和四通带^[48]超导滤波器,其中四通带超导滤波器整体电路尺寸仅有11.35 mm × 6.5 mm.当然,上述多通带滤波器具有阶数难以提升,通带矩形度不高的问题.目前双模双通带超导滤波器已经做到了10阶,带外抑制超过90 dB^[49].利用多模谐振器,还便于设计多通道平衡滤波器.去年华东交通大学研制的双通带平衡滤波器^[50],如图3所示,电路尺寸为16.1 mm × 15.9 mm,两个通带插损分别约为0.13 dB和0.16 dB,实现了较好的共模噪声抑制.但总体来看,使用多模谐振器研制多通带滤波器还存在各通带带宽调节范围较小的难点,需要进一步研究.

可调频率超导滤波器也是一个提高超导滤波器适用领域的主要研究方向,对于频率普查和电子对抗等领域具有重要意义,是实现微波通信“自适应滤波”的手段之一.但是从目前研究现状来看,

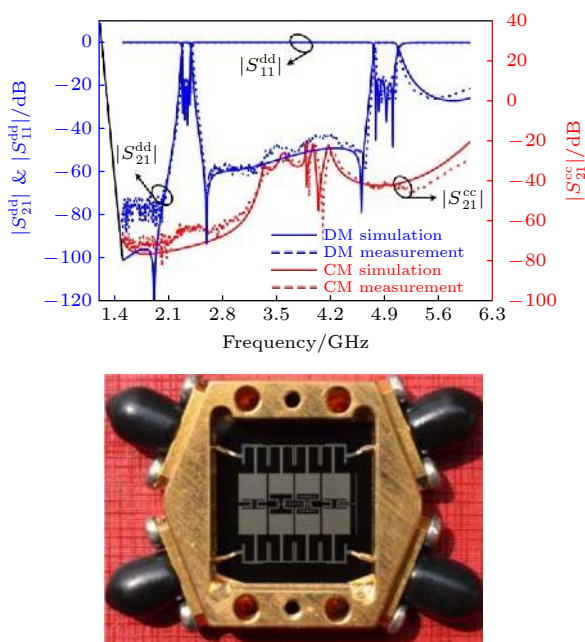


图3 华东交通大学任保平等^[50]研制的双通带平衡滤波器
Fig. 3. HTS differential bandpass filter developed by East China Jiaotong University^[50].

高性能可调频率超导滤波器的实现还是比较困难的,多数可调频率超导滤波器要么频率调节范围不大,要么插入损耗过大,因此需要在材料、设计或是工艺方面的新突破.物理所曾用半导体变容二极管研制一款UHF波段相对带宽约为3%的可调带通超导滤波器^[51],中心频率调节范围为430—720 MHz,对应可调率为50.4%,最大插损3.8 dB.最近物理所研制的中心频率调节范围为72.6—118 MHz^[52],可调率为49%的超导带通滤波器的最大插损降低到2.3 dB.带阻滤波器对谐振器 Q 值要求较低,相对来说半导体变容二极管更适合研制可调带阻超导滤波器.物理所报道的一款可调带阻超导滤波器^[53]中心频率调节范围为286—485 MHz,可调率为51.6%,最高阻带抑制达到70 dB.基于 $\text{Ba}_x\text{Sr}_{1-x}\text{TiO}_3$ 铁电薄膜的可变电容器微波损耗略小于半导体变容二极管,结合超导薄膜能够进一步降低损耗,但制作工艺复杂,成本较高.物理所采用在MgO衬底上先生长 $\text{Ba}_{0.05}\text{Sr}_{0.95}\text{TiO}_3$,再原位覆盖生长YBCO的方法制备铁电/超导多层膜,并制作成可变插指电容.通过调节外加偏压,可变电容器容值可从8 pF调节为2.3 pF,可调率达到了72%^[54].

在国内,高温超导微波器件及子系统的应用研究已大面积开展.在移动通信方面,清华大学、物理所和天津海泰超导技术公司等多家单位开展了

高温超导滤波器子系统的应用研究^[55].清华大学曾和北京联通公司合作,在北京建立了超导通信示范小区.由于应用于移动通信的高温超导前端都需要配备机械制冷机,造成价格、重量、体积和功耗居高不下,大大限制了其商业应用.目前物理所正在努力开发低成本、高性能的小型化高温超导前端,力求早日在移动通信基地站的规模应用上取得突破.在雷达应用方面,物理所在国际上首次将高温超导微波前端引入风廓线雷达中,取得了良好效果^[56].最近几年中国电子科技集团16所在深空探测天文接收机方面的应用也取得了很大进展^[57,58].在空间应用方面,2012年10月,由物理所和航天五一〇所共同研制的超导滤波器验证试验装置随实践九号卫星发射升空,这是世界上继美国HTSSE后第二个成功的超导空间实验,目的是为了验证国产制冷机和超导器件能够在空间环境工作^[59,60].2016年9月,由物理所和中电集团36所研制的作为天宫二号有效载荷的实用高温超导微波接收前端成功发射升空,到2019年7月圆满完成在轨任务,取得了良好的应用效果.这是我国高温超导微波前端的首次空间应用,表明我国超导微波技术的空间应用已跻身国际前列.

3 超导传感器/探测器

超导传感器/探测器是基于超导材料陡峭的超导转变或是超导隧道效应来实现高灵敏探测,可以探测磁场、电磁波及各种宇宙辐射,具有接近量子极限的超高灵敏度,在地球物理、天体物理、量子信息、材料科学、计量科学及生物医学等众多前沿领域发挥越来越重要的作用.

3.1 超导量子干涉器件

超导量子干涉器件(superconducting quantum interference device, SQUID)的工作原理基于两个物理现象:约瑟夫森隧道效应和磁通量子化效应,是迄今为止最灵敏的磁通传感器.SQUID可直接测量磁通及磁场、电流等任何能转换为磁通的物理量,并具有带宽高和在DC~GHz范围内频率响应曲线平坦的优点,因此在地球物理、天文、生物医学等领域发挥着重要作用.

按照SQUID所含的约瑟夫森结(Josephson junction, JJ)的数量来划分,可将SQUID分为包

含 1 个 JJ 的射频 SQUID 和包含 2 个 JJ 的直流 SQUID. 从工作温度来看, SQUID 又可分为工作于液氦温区的低温超导 SQUID 和工作于液氮温区的高温超导 SQUID. 虽然高温超导 SQUID 对工作温度的要求更低, 但低温超导 SQUID (主要是直流 SQUID) 具有更低的本征磁通噪声、更高的可靠性和更成熟的制备工艺, 因此是唯一一种具有成熟商业化产品的 SQUID 类型.

国内 SQUID 器件研究以 Nb 基材料为主, 包括基于 Nb/Al-AIO_x/Nb 和 NbN/AlN/NbN 的超导-绝缘-超导 (superconductor/insulator/superconductor, SIS) 型直流 SQUID^[61,62], 基于 Nb/NbxSi_{1-x}/Nb 的超导-正常金属-超导 (superconductor/normal-metal/superconductor, SNS) 型直流 SQUID^[63] 等. 其中, Nb/Al-AIO_x/Nb 型直流 SQUID 工艺相对稳定可靠, 因此采用此工艺制备的直流 SQUID 磁强计磁场噪声可达 3 fT/Hz^{1/2} 以下^[64]. 因梯度计构型的 SQUID 具有较好的抗共模干扰能力, 中国科学院上海微系统与信息技术研究所 (简称为上海微系统所) 设计并制备了用于无屏蔽复杂电磁环境中高平衡度直流 SQUID 梯度计, 并将其应用在地球物理勘探中^[65]. 在保证一定的工作电流和工艺条件许可的情况下, 为了进一步增加 SQUID 在实际环境中抗强磁场干扰的能力, 约瑟夫森结尺寸应尽量小, 因此上海微系统所开发了基于亚微米约瑟夫森结的直流 SQUID 工艺^[66]. 利用 SQUID 极低噪声的优势, 清华大学、中国科学院高能物理所 (简称为高能所) 和上海微系统所等单位还制作了阵列形式的 SQUID 放大器^[67,68], 可用于超导转变边沿探测器信号的读出. 如果将 SQUID 尺寸做得很小 (如 nano-SQUID), 虽然磁场分辨率会变差, 但空间分辨率将显著增加, 因此可以作为 SQUID 显微镜、磁化率计等^[69]. 以上提到的 SQUID 都是以低温超导材料为主, 近年来国内也有少量高温 SQUID 器件的研究^[70].

直流 SQUID 一般工作于固定电流 (或电压) 偏置下, 此时其输出电压 (或电流) 随外界磁场的变化呈周期性变化, 变化周期为 Φ_0 . 直流 SQUID 器件通常需要配合磁通锁定环 (flux locked loop, FLL) 电路来实现磁通-电压的线性读出. 由于 SQUID 本征磁通噪声转化为电压噪声后远低于现有半导体前置放大器的噪声水平, 因此通常需要借助“磁通调制读出电路+FLL”的构型来实现 SQUID

输出电压的低噪声线性读出. 为了提高读出电路的可靠性、稳定性和实用性, 上海微系统所针对不同应用需求开展了直接读出电路的研究^[71], 包括提出基于电压偏置的 SQUID 自举电路读出方式^[72]、基于自主研发的欠阻尼 SQUID 芯片^[73] 发展单片读出电路构型 (single chip readout electronics, SCRE) 等^[74]. SCRE 是国际上迄今为止最简单的 SQUID 读出电路, 仅需 1 个运算放大器芯片即可实现常规 SQUID 读出电路的所有功能, 同时取消了 FLL 电路中的积分器, 使得系统可靠性显著提升, 可满足诸如地球物理勘探等实用化磁场测量的需求.

虽然我国在 SQUID 应用研究方面起步较晚, 但近年来在地球物理勘探、极低场磁共振、生物磁成像等方面进展迅速.

SQUID 磁强计和梯度计具有超高灵敏度, 因此可以在矿产资源勘查、油气资源调查、地震监测等领域发挥重要作用. 经过多年研发, 上海微系统所已成功研制出基于 SQUID 平面梯度计的实用化航空超导全张量磁梯度测量样机系统, 系统分辨率达 20 pT/m, 并完成多次飞行试验^[75]. 针对深部地球物理勘探的迫切需求, 上海微系统所还开展了基于低温超导 SQUID 的瞬变电磁法 (transient electro magnetic, TEM) 工程样机研发^[76], 噪声水平为 7 fT/Hz^{1/2}, 摆率为 5 mT/s, 系统带宽为 200 kHz. 上海微系统所与吉林大学联合开展的超导 TEM 仪器与传统仪器相比, 低温超导 TEM 在浅层分辨率、探测深度及极化率测量方面均有显著优势^[77,78], 并在全国多地的矿区开展了设备验证与商业化找矿工作, 为当地地质构造研究及矿产勘探提供了重要参考. 吉林大学研制了基于高温超导直流 SQUID 的地面 TEM 系统, 目前噪声水平为 100 fT/Hz^{1/2}@ 10 kHz, 摆率达到 30 mT/s, 带宽为 100 kHz^[79], 并已用磁性源发射完成了数次异常环模拟实验, 用电性源发射在黑龙江大兴安岭地区完成了首次验证性实验. 除了基于 SQUID 的地球磁场和磁梯度探测外, 还可借助 SQUID 构建高分率和高带宽的超导重力仪和超导重力梯度仪以获得地球重力场, 将超导加速度计中由位移引起的磁通变化转换为电压进行读出, 从而用于地球科学研究、资源勘测、重大自然灾害监测与预警等领域. 华中科技大学自 2011 年开始超导重力仪的研制, 梯度仪的共模抑制比提高到了 90 dB, 仪器在实验室的噪声水平达到 2 E/Hz^{1/2}(0.1 Hz), 目前已进入工程样机关

键技术攻关阶段^[80,81].

相较于主磁场 (B_0) 强度在特斯拉量级的传统核磁共振/磁共振成像 (nuclear magnetic resonance/magnetic resonance imaging, NMR/MRI) 技术, 工作场强为百微特 (μT) 量级的极低场 NMR/MRI 技术具有成本低廉、可测“纯”异核自旋-自旋耦合谱、正常组织与病变本征纵向弛豫时间对比度强、无磁化率伪影等优势, 因此成为 SQUID 应用的研究热点之一. 对于极低场 MRI, 传统法拉第线圈的检测灵敏度不能满足信噪比要求, 因此可以采用 SQUID 电流计加超导磁通变换器的构型来作为磁传感器. 上海微系统所自 2007 年开始基于低温超导 SQUID 的极低场磁共振研究, 第二年即在国际上首次在恶劣城市电磁环境中观测到无屏蔽核磁信号^[82]. 上海微系统所针对环境电磁干扰问题研发了一系列噪声抑制和屏蔽技术, 目前信号频段的磁场噪声在 $0.8 \text{ fT}/\text{Hz}^{1/2}$ 左右^[83-86], 并已获得多通道三维 MRI 图像^[87]. 已开展的应用研究包括: 脑组织的反常弛豫现象研究^[88]、用于体外检测的核磁弛豫开关技术研究^[89]、新型极低场磁共振造影剂研究^[90]等. 除了低温超导 SQUID 以外, 物理所和北京大学分别采用高温超导直流 SQUID 和射频 SQUID 开展了弛豫时间相关的研究^[91,92].

生物磁是人体电生理活动过程中产生的微弱磁场, 在人体中分布广泛, 包括心磁、胎儿心磁、脑磁、肺磁、肌磁等. 生物磁成像具有灵敏度高、完全被动、无辐射、非接触等突出优点, 可用于疾病早期诊断、脑功能研究、健康筛查等领域, 是 SQUID 的一个重要应用方向. 上海微系统所先后攻克了核心超导传感器、系统集成等关键技术, 发展了 4 通道、9 通道和 36 通道成人脑磁图仪, 在医院无屏蔽环境下成功实现了高质量成人脑磁的测量^[93]. 通过基于 227 例心肌缺血患者和 347 例健康对照组的临床研究发现, 心磁图的诊断精度高达 94% 以上, 验证了心磁图在心肌缺血方面的诊断潜力^[94]. 2019 年上海微系统所发展的国内首台无屏蔽心磁图仪成功获批二类医疗器械产品注册证, 将来有望在心脏检查领域发挥独特的作用. 此外, 上海微系统所还对胎儿心磁、脑磁、肌磁等多种生物磁测量进行了原理验证.

3.2 超导隧道结混频器

超导隧道结是由两片超导薄膜层和中间仅有几纳米厚的势垒层所构成的 SIS 结构, 它具有能隙

以下极低暗电流和超强非线性伏安特性两大特点. 超导隧道结混频器的功能是将极微弱的被探测信号与频率相近的本振信号进行外差混频, 产生一个低频信号, 再对其进行放大和频谱处理, 其灵敏度能够接近测不准原理所制约的量子噪声极限. 1960 年, Giaever^[4] 的实验发现了超导体中的准粒子隧穿效应, 从此开启了基于隧穿效应的超导混频器研究. 20 世纪 70 年代末, Tucker^[95] 建立了基于光子辅助的准粒子隧穿效应混频理论. 之后随着贝尔实验室发明了基于光刻工艺的铌基超导隧道结制备技术, 使得超导隧道结芯片制备的能力得到显著提升. 由此, 毫米波和亚毫米波段的超导隧道结混频器技术研究与应用进入飞速发展时期, 也因此推动了太赫兹天文学的快速进步, 引领了原行星盘精细结构、宇宙中水的踪迹及黑洞成像等一系列重大天文科学发现. 2019 年 4 月 10 日, 事件视界望远镜 (event horizon telescope, EHT) 发布了人类历史上第一张黑洞照片^[96], 引起巨大轰动. EHT 是整合了分布于地球上不同地点的 8 台望远镜及望远镜阵列, 构成一个概念上口径相当于地球直径大小的望远镜, 以干涉的方式, 对黑洞进行拍摄成像. 需要特别强调的是, 虽然干涉技术实现了超高空间分辨率, 但决定探测灵敏度的主要因素是本文所介绍的超导隧道结混频器技术. 可以说, 没有超导隧道结混频器, 就不可能有 2019 年的人类历史上第一张黑洞照片.

受超导材料的特性限制, 超导隧道结混频器须工作在极低温环境, 通常只有几个开尔文 (绝对零度以上几度). 经典铌 (Nb) 基超导隧道结混频器的工作温度通常在液氮温区 4.2 K. 近年来, 随着在更高频及极端环境 (空间或南极等) 对超导混频器技术的应用需求, 更高能隙超导材料逐渐被应用到超导隧道结混频器研制中, 例如: 铌钛氮 (NbTiN) 和氮化铌 (NbN). 其中, 氮化铌超导隧道结混频器已经可以工作在近 10 K 温区, 并依然保持极高的探测灵敏度^[97].

超导隧道结混频器在我国射电天文望远镜上的应用开始于 20 世纪 90 年代末. 在赵忠贤等老一辈科学家支持下, 中国科学院紫金山天文台为我国青海 13.7 米毫米波望远镜研制了我国首台毫米波段超导 SIS 接收机 (图 4)^[98]. 该超导接收机使 13.7 米毫米波望远镜的灵敏度比之前的半导体接收机提高了一个量级, 也使我国天文观测从此拥有了国际

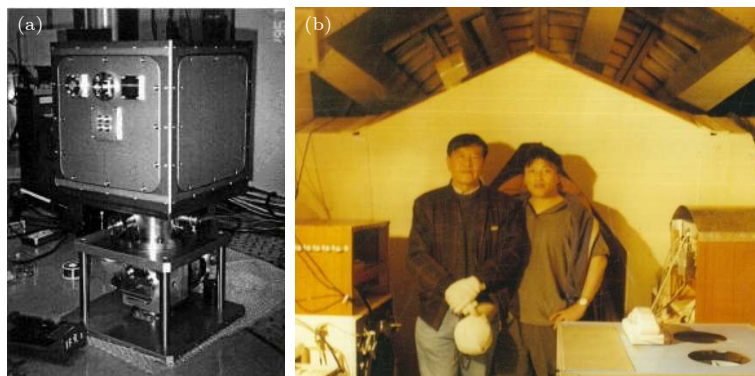


图 4 (a) 100 GHz 频段超导接收机系统; (b) 赵忠贤院士和史生才研究员在已安装我国首台毫米波超导接收机系统的 13.7 米毫米波望远镜前的合影

Fig. 4. (a) The first superconducting SIS receiver in China; (b) photo of professor Zhao Zhongxian and Shi Shengcai standing next to the astronomical telescope with superconducting SIS receiver inside.

先进的超导探测器. 在此基础上, 紫金山天文台还为该望远镜进一步研制了 3 毫米波段多谱线和多波束超导接收机系统, 使望远镜性能得到显著提升. 目前, 基于 9 波束超导接收机系统, 13.7 米望远镜正在开展银道面分子谱线巡天计划, 即: “银河画卷”计划. 此外, 紫金山天文台研究团队还研制了 500 GHz 频段的高能隙氮化铌超导隧道结混频器, 并实验验证了其在 10 K 温区的高灵敏度特性^[99]. 该超导隧道结混频器应用于我国的 POST 亚毫米波望远镜, 在国际上首次实现 NbN 基超导隧道结的天文观测应用^[100].

3.3 超导热电子混频器

超导热电子 (hot electron bolometer, HEB) 混频器由一层极薄 (通常几纳米厚) 的超导薄膜 (主要是 NbN, NbTiN 等) 组成超导微桥, 其长度和宽度可以调节, 以实现与两端的射频耦合电路之间的阻抗匹配. 超导微桥中的电子吸收太赫兹辐射后电子温度升高, 随后通过电子-声子相互作用将能量传递给声子从而升高声子温度, 最后热量逃逸到衬底中重新恢复平衡态^[101]. 随着对热电子混频机理的理解加深、制备工艺的成熟和测试系统的改进, 超导 HEB 混频器的接收机噪声温度已经接近量子噪声极限, 成为太赫兹高频段灵敏度最高的外差混频器^[102], 并被成功应用到地面望远镜 APEX、机载望远镜 SOFIA、空间卫星 Herschel 等, 取得了包括 HeH⁺ 离子探测在内的丰硕成果^[103].

国内相关研究小组在超导 HEB 混频器工作方面取得了显著进展^[104]. 紫金山天文台开展了长期

研究, 实现了高集成度的超导 HEB 混频器, 成功研制了高达 30 THz 的超导 HEB 混频器, 目前正在研制的大规模探测器阵列, 后续有望应用到中国南极昆仑站天文台及载人航天空间站等平台.

目前为止关于超导 HEB 混频器的特性研究主要集中在液氦温区 (-4.2 K), 但是大气对太赫兹辐射的强吸收使得空间和极端环境 (如南极冰穹 A) 下开展太赫兹天文谱线观测具有重要的科学意义. 在此条件下有限的能源供给限制了探测器可以达到的最低工作温度, 因此研究超导 HEB 混频器在更高温区 (~ 10 K) 的特性具有特殊的意义. 紫金山天文台采用三种不同工艺制备了超导 HEB 混频器, 分别具有从 8.2 K 到 11.3 K 的临界温度 T_C . 通过改变超导 HEB 混频器的环境温度 T_{bath} , 测量了在 0.85 THz 和 1.4 THz 的接收机噪声温度 T_{rec} 和中频噪声带宽. 结果表明, 尽管 3 个器件具有不同的临界温度和不同的微桥长度, 但是其温度相关性完全一致, 在低于 $0.8 T_C$ 的温度区间, 接收机噪声温度基本保持不变, 与基于分布式热点模型仿真的结果吻合^[105]. 超导 HEB 混频器在 4—9 K 的温度范围内实测的中频噪声带宽与环境温度无关, 表明主要是声子制冷起主导作用. 随后研究了超导 HEB 混频器的最优偏置区^[106], 结果表明超导 HEB 混频器具有较大的最优偏置区间, 为采用偏置复用技术研制超导 HEB 混频器阵列接收技术奠定了基础.

高灵敏度外差接收机的两个关键部件——混频器和本振信号源的集成有利于减小体积、降低功耗并提高系统可靠性. 紫金山天文台成功将低功耗 (~ 1.1 W) 量子级联激光器 (quantum cascade

laser, QCL) 和超导 HEB 混频器集成到同一闭环制冷机的 4 K 冷板上, 并通过硅透镜实现波束的高效传输, 在 2.7 THz 实测的接收机噪声温度仅为 1500 K^[107]. 为了进一步提升系统集成度, 又将低功耗 (~0.9 W) QCL 与超导 HEB 混频器集成在同一腔体中^[108]. QCL 在 4.2 K 温度下的输出功率为 0.4 mW, 通过抛物面反射镜汇聚后与 Mylar 分光膜实现与射频信号的耦合, 如图 5 所示. Mylar 分光膜的低温集成在降低热噪声贡献的同时减少空气中震动对系统稳定性的影响. 实测接收机噪声温度约为 800 K, 相当于 7 倍量子噪声极限 ($7h\nu/k$), 为大气和天文领域将来的太赫兹计划提供了高集成度、高灵敏度探测手段.

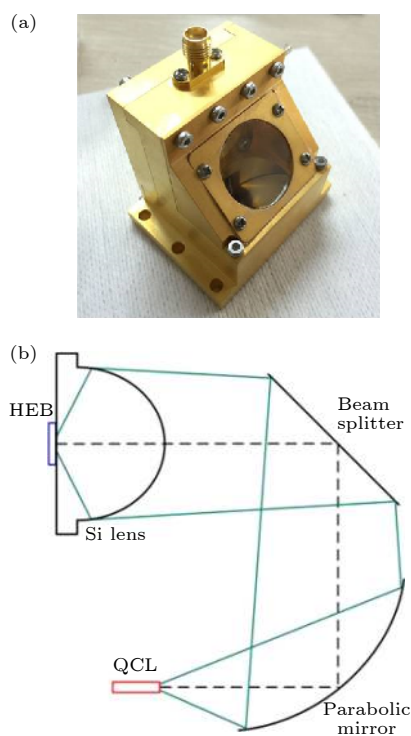


图 5 高集成度外差接收机 (a) 腔体里面集成了超导 HEB 混频器、QCL、抛物镜和 Mylar 分光膜; (b) 集成接收机光路图

Fig. 5. Highly-integrated receiver based on superconducting HEB and QCL: (a) Superconducting HEB mixer, QCL, parabolic mirror and Mylar beamsplitter are integrated in the receiver block; (b) coupling of THz radiation from the QCL to the superconducting HEB.

中红外波段包含大量的原子和分子谱线, 通过对这些谱线的高频率分辨率观测可以研究原行星盘及行星大气等重要科学问题. 紫金山天文台设计了工作在 10 μm 波段的平面螺旋天线, 实现了与超导 HEB 混频器的良好阻抗匹配. 采用砷化

镓材料作为超导热电子混频器的基底, 为 NbN 的生长提供良好的晶格匹配, 同时具有很低的射频传输损耗. QCL 工作在室温, 输出功率约为 40 mW@10.6 μm , 足以抽运超导热电子混频器. 实测的接收机噪声温度约为 5000 K^[109]. 在此基础上, 采用相位光栅将一束本振参考信号分为 4 个波束^[110], 并通过光纤耦合从背面抽运超导 HEB 混频器, 为中红外多波束外差阵列接收机奠定了基础.

3.4 超导转变边沿探测器及其应用

超导转变边沿探测器 (transition edge sensor, TES) 使用极低超导转变温度的薄膜作为探测元件, 利用超导薄膜的电阻在超导转变边沿随温度急剧变化的特性, 通过测量薄膜的温升来获取入射光子/电磁波的能量/功率信息, 是一种极为灵敏的超导光子探测器. 20 世纪 40 年代初, Andrews 等使用电流偏置的铅膜^[111]与钽线^[112]对红外辐射进行了测量, TES 探测器 (功率计) 由此诞生; 1949 年, Andrews 等^[113]又利用氮化铌薄膜制备了 TES 微量能器原型, 实现了对 α 粒子的计数. 为了提高探测器的灵敏度, TES 通常选择超导转变温度在 mK 温区的材料来制备探测器薄膜, 包括 W^[114], Ti^[115] 等单质超导薄膜, 以 Mo/Au^[116], Mo/Cu^[117], Ti/Au^[118] 为代表的超导/金属 (superconducting/normal, S/N) 双层薄膜, 以及以 AlMn^[119] 为代表的磁性掺杂薄膜. 相比于单质材料, S/N 双层薄膜与磁性掺杂薄膜具备超导转变温度可调、薄膜导热性好等优势, 在 TES 探测器的制备中正得到越来越多的应用.

TES 是一种低阻抗器件, 其信号读出需要低阻抗、低噪声的电流放大器, 目前学界多使用 SQUID 对 TES 进行信号读出. 由于单一 SQUID 的输出电压仅为数十微伏, 实际应用中多使用单级 SQUID 串联阵列或者两级 SQUID 放大电路对 TES 探测器的信号进行读出. SQUID 串联阵列的输出信号幅度在毫伏量级, 容易与室温端的放大电路进行匹配. 许多 TES 的应用场景都要求大光敏面与高计数率. 为了满足这些应用需求, 近年来 TES 探测器阵列制备技术与 SQUID 复用读出技术发展迅速. 得益于大面积高均匀性超导薄膜制备技术的发展, 国际上数千乃至上万像素 TES 探测器阵列的制备已经没有明显的技术瓶颈. 在复用读出技术方面, 目前最成熟的是时分复用 (time division multiplexing, TDM)^[120,121]与频分复用 (frequency division

multiplexing, FDM)^[122,123] 技术, 每个读出通道约可支持数十个 TES 像素的信号读出, 能够满足百像素到千像素规模的 TES 探测器阵列的读出需求. 由于 TDM 与 FDM 技术的一些固有缺陷, 例如: TDM 的读出噪声随着复用比的平方根上升, 而 FDM 的功耗高, 读出电子学复杂, 这两种读出技术都难以支持更高的复用比. 为了满足未来更大规模的 TES 探测器阵列的读出需求, 近年来国际上微波复用^[124,125] 读出技术得到快速发展, 目前已经实现利用一对同轴线对数百个 TES 探测器像素进行读出, 并已在微波波段与 γ 射线波段的 TES 探测器阵列读出中得到应用. 进一步的技术优化有望将微波复用读出技术的复用比提高到千像素水平. 通过充分挖掘微波复用读出技术的带宽资源, 并与 TDM/FDM 等技术联合使用, 理论上还可以进一步提高读出复用比^[126], 实现十万像素以上规模的 TES 探测器阵列信号读出.

在应用需求的牵引下, 国内多家单位近年来致力于 TES 探测器与相关技术的研究, 涉及的 TES 探测器应用波段从毫米波一直延伸到 γ 射线波段, 研究内容覆盖超导薄膜生长、探测器器件设计与加工工艺、SQUID 读出芯片与电路、探测器系统集成、制冷机技术研究等多个方向.

TES 功率计在地基毫米波与太赫兹波段天文观测中有重要应用. 紫金山天文台、高能所与清华大学先后开展了这方面的研究工作. 紫金山天文台的研究人员使用高质量的 Ti 薄膜^[127] 制备了面向太赫兹波段应用的双缝天线耦合的 TES 功率计(阵列)^[128,129], 阵列中 TES 像素数目达到 64 个 (8×8), 噪声等效功率低至 3.8×10^{-17} W/Hz^{1/2}. 清华大学的研究人员则使用 Al-Ti 双层膜^[130-132] 研制了 16 像素 (4×4) 的 TES 功率计, 噪声等效功率约为 5×10^{-17} W/Hz^{1/2}. 在应用方面, 高能所正在联合国内外多个单位, 在西藏阿里 5250 m 的高海拔地区建设原初引力波观测站^[133,134]. 该观测站的核心观测装备是一个拥有约 7000 个 TES 探测器像素, 探测波段为 95 GHz 与 150 GHz 的折射望远镜. 该观测站是北半球唯一的高精度宇宙微波背景辐射 (cosmic microwave background, CMB) 偏振观测站, 建成后可望将原初引力波张标比的观测精度提高一个数量级, 同时填补北天区的观测数据空白. 未来通过对比阿里观测站与智利、南极等南半球观测站的数据, 研究人员可以更好地理解 CMB

偏振图谱的南北天不对称性.

近红外与光频波段的 TES 探测器光子数分辨能力强、暗计数极低, 在量子信息与量子力学基本原理研究中发挥着重要的作用. 清华大学与紫金山天文台的研究人员分别采用 Al/Ti^[135] 与 Ti^[136] 薄膜研制了上述波段的 TES 探测器. 紫金山天文台最近实现了对 1550 nm 波长的光子 40% 的系统探测效率 (见图 6), 理论能量分辨率可达 0.23 eV^[137].

X 射线与 γ 射线波段的 TES 微量能器是 X 射线天文学与材料分析领域的重要研究工具. TES 微量能器的能量分辨能力远高于半导体探测器, 可与光栅/弯晶探测器相比拟. 同时作为一种非色散型探测器, TES 的总和探测效率显著优于光栅与弯晶探测器^[138]. TES 微量能器因而兼具单光子探测能力、高能量分辨率与高探测效率的优势, 是新一代高分辨率 X 射线/ γ 射线能谱仪的理想探测元件. 欧洲航天局计划于 21 世纪 30 年代发射的 Athena-X 射线天文卫星将使用约 3840 像素的 TES 探测器阵列作为核心观测元件^[139], 美、日等国已在多个先进光源与加速器设施中部署了使用 TES 探

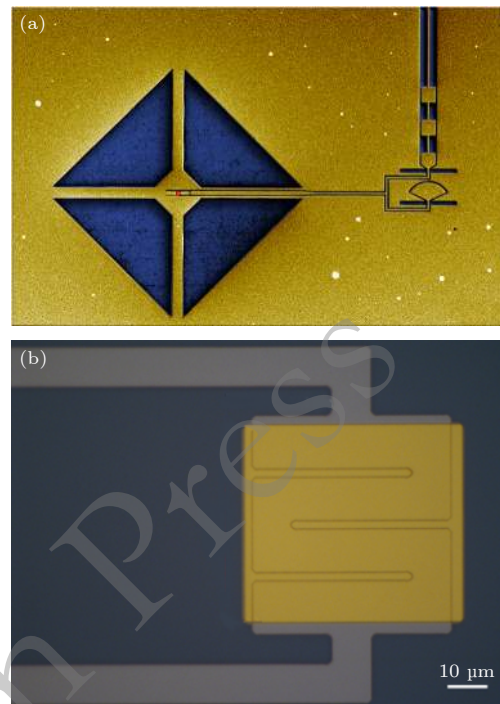


图 6 (a) 紫金山天文台研制的双缝天线耦合的 TES 功率计; (b) 上海微系统所研制的 MoAu-TES 微量能器

Fig. 6. (a) TES with planar twin-slot antenna developed by Purple Mountain Observatory, Chinese Academy of Sciences; (b) MoAu-TES developed by Shanghai Institute of Microsystem and Information Technology, Chinese Academy of Sciences.

测器的能谱仪^[140,141]. 国内在上述方向的应用研究与器件研发也正在蓬勃开展. 清华大学联合国内外多家单位在推动宇宙热重子探索者卫星项目^[142]. 该项目瞄准“失踪重子”问题, 计划使用 3600 像素的 TES 探测器对星际间的温热气体在软 X 射线波段进行观测. 观测结果有望解开“失踪重子”之谜, 并为研究宇宙大尺度结构与星系演化提供可靠的观测数据. 上海微系统所联合上海科技大学的研究人员正在为上海硬 X 射线自由电子激光器研制 TES 能谱仪原理样机. 上海微系统所的研究人员开发了利用离子注入技术制备大面积高质量 AlMn 薄膜的新技术^[143], 并利用 AlMn 与 MoAu 薄膜制备了集成“蘑菇”形纯金吸收体的 TES 探测器. 在 γ 射线波段, 中国工程物理研究院的研究人员使用磁控溅射与分子束外延技术开展了 TES 薄膜的生长研究, 同时在 TES 探测器设计、系统集成与应用方面也进行了大量的探索.

国际计量大会光度和辐射度咨询委员在 2013—2023 战略发展规划中明确提出: 发展光子计量与量子强化测量技术. 其关键技术为基于超导高效探测系统的光子数可分辨探测器. TES 是高效灵敏, 且具有能量分辨率的单光子探测器. 中国计量科学研究院自 2018 年开始光学波段 TES 的研究, 目标是研制 850 nm 和 1550 nm 的具有光子数可分辨和能量分辨率的 TES 探测器. 中国计量科学研究院研究了基于 Ti, Ti/PdAu 和 Ti/Au 三种不同超导薄膜材料的 TES 器件, 目前已成功制备出超导转变温度 T_c 在 70—550 mK 温度范围可调的超导薄膜^[144,145]. T_c 可调器件可以满足不同应用及不同制冷机工作温区的要求, 已研制出 TES 原型器件, 得到基于 SQUID 的读出信号. 中国计量科学研究院同时开展了电感型超导转变边缘单光子探测器的研究工作, 用于探索液氦温区 (4.2 K) TES 探测器.

国内多个研究单位也在 SQUID 放大器、极低温制冷机等 TES 探测器相关技术领域开展了研究工作. 上海微系统所、高能所与清华大学正在开展 TES 探测器 (阵列) 信号读出所需的各类 SQUID 放大器与超导开关研究. 中国科学院理化技术研究所与清华大学开展了面向地面与空间应用的绝热去磁制冷机的研究工作^[146], 理化所的研究人员预期近期在单级制冷条件下可以实现 400 mK 的制冷温度.

3.5 超导纳米线单光子探测器

单光子探测代表了微弱光辐射探测领域的极限水平, 在物理学、天文学、化学、生命科学和医学等领域广泛应用. 基于半导体的单光子探测器 (single photon detector, SPD) 相对成熟, 包括硅雪崩光电二极管、光电倍增管等, 但是多数半导体 SPD 只工作在可见光区域, 其响应光谱由材料的能隙电压所确定. 针对近红外波段应用, 研究人员开发了基于窄禁带半导体材料 InGaAs/InP 的 SPD. 其典型探测效率在 1550 nm 可达到 20%, 但整体性能与可见光波段 SPD 相差甚远^[147].

超导纳米线单光子探测器 (superconducting nanowire single photon detector, SNSPD) 是近几年发展起来的新型单光子探测技术, 其相对于半导体探测器的最大优势就是其超高的探测效率、快速响应速度及几乎可以忽略的暗计数, 且光谱响应范围可覆盖可见光至红外波段.

SNSPD 的核心是超薄超导材料制备的纳米线, 其探测基本原理是超导纳米线吸收光子后会出现局域非平衡热点“hot-spot”^[148]. 在此作用下, 纳米线两端会产生电压脉冲信号, 利用这种光电转换实现单光子探测. 2001 年, 莫斯科师范大学利用 5 nm 厚的 NbN 超薄薄膜制备了一条 200 nm 宽的超导纳米线, 成功实现了可见光到近红外波段的单光子探测, 开启了超导纳米线单光子探测器的先河. 目前超导单光子器件性能已经远超常规半导体探测器, 超过 10 个国家, 近 30 家研究机构开展相关研究工作. 国际上著名的研究团队包括美国的 NIST、MIT 和 JPL 等, 欧洲的 TU Delft 和 Glasgow, 日本的 NICT, 俄罗斯的 MSPU 等. 国内开展相关研究的机构包括上海微系统所、南京大学、清华大学、天津大学、物理所等. 随着量子信息产业化的飞速发展, SNSPD 也存在巨大商业应用的潜在市场. 国际上也因此出现了多个以 SNSPD 为核心产品的小型商业化公司, 包括俄罗斯的 Scontel、荷兰 Single Quantum、美国的 Quantum Opus 和 Photon Spot、瑞士的 ID Quantique 及上海赋同科技有限公司. SNSPD 已成为当前最重要的单光子探测技术之一, 其整体性能在近红外波段与半导体探测器相比具有明显优势, 在量子信息技术等前沿领域具有不可替代的作用.

SNSPD 器件主要包括以下性能参数: 1) 器件效率, 主要指的是系统的探测效率, 在量子密钥分

发、集成光量子技术、量子力学实验等领域要求器件的极限效率; 2) 时间抖动, 指的是信号到达时间与理想到达时间的偏差, 包含器件的本征抖动和同步信号的抖动等多方面因素, 一定程度上反映了器件响应的精度; 3) 暗计数, 指没有光入射的情况下自发产生的和光子响应完全无法区分的计数; 4) 计数率, 指探测器每秒计数的次数, 反映了器件探测速率.

得益于量子信息技术的火热, 我国近年来在 SNSPD 技术及应用也得到了迅猛发展. 在 SNSPD 器件方面, 上海微系统所单光子团队基于 NbN 材料研制的器件实现了 98% 的系统探测效率, 达到了世界最优水平, 该器件利用低温片上滤波技术, 实现极低暗计数 SNSPD^[149]. 南京大学团队创新性地应用了超导纳米线低温电子开关, 设计了具有超低功耗和超紧凑尺寸的超导二进制编码器, 为未来的片上集成提供了参考. 利用四阵列器件的高灵敏度和速度使用贝叶斯估计算法, 分析不同发光强度下信息获取的计数方法选择, 获得了较低的误码率^[150]. 天津大学独创了弯曲纳米线型 SNSPD, 实现了偏振无关 SNSPD^[151].

在 SNSPD 应用方面, 我国亦取得了显著的成果, 诸如卫星激光测距、量子密钥分发和光量子计算等. 在量子通信方面, SNSPD 具有高效、低暗计数特点, 很好地解决了长距离量子通信对低暗计数的需求. 2011 年起, 上海微系统所研究团队多次将 SNSPD 技术成功应用于量子通信实验 (和中科大合作). 2012 年利用 SNSPD 系统实现了合肥-六安-舒城近 170 km 的城际量子通信网络. 2013 年成功利用自主研发 SNSPD 在国际上首次实现了 200 km 实验室光纤和 30 km 现场光纤测量器件无关的量子密钥分发 (measurement-device-independent quantum key distribution, MDI-QKD), 并将成码率提高了 3 个数量级. 央视朝闻天下栏目对该成果进行了专题报道, 研究成果入选“两院院士评选 2014 年中国十大科技进展”. 2015 年, 在国际上首次实现了星型拓扑结构的 MDI-QKD 网络 (覆盖合肥城区 200 km²). 2016 年, 利用 SNSPD 成功实现了 404 km MDI-QKD 实验. 2020 年, 利用 SNSPD 成功实现了 509 km 双场 QKD 实验, 创造了新的光纤量子密钥分发纪录^[152]. 在激光雷达应用中, SNSPD 具有低时间抖动等特性, 为高精度激光雷达的测距及成像等应用提供了技术保

障. 上海微系统所和南京大学研制的 SNSPD 都在卫星激光测距中发挥了重要的作用. 上海微系统所与上海天文台合作, 在国际上首次开展 532 nm 波长的卫星激光测距, 完成了对距离台站 3000 km 国际联测激光相对论卫星 LARES 的测距, 精度达 8 mm. 相关结果发表于 *Optics Express*, 入选美国光学学会焦点关注文章 *Spotlight on Optics*^[153]. 2016 年初, 经过进一步系统优化, 已成功观测到近 2 万公里的俄罗斯 Glonass 卫星及同步轨道卫星. 2017 年, 南京大学等基于超导探测器在复杂海面环境下实现了 70 公里海雾探测^[154]. 南京大学研制 SNSPD 解决了 1064nm 波段卫星激光测距系统的探测器瓶颈, 与应用单位合作实现了 3.6 万公里卫星激光测距和 40 万公里月地激光测距等, 以及小空间碎片高精度探测和空间碎片自转周期探测等^[155,156]. 2020 年, 南京大学等利用最新研制的高性能超导阵列单光子探测器, 大幅度提高激光雷达系统的灵敏度和抗环境杂散光能力, 实现了百公里级低空软目标的全天时探测^[157]. 另外, 利用研制 SNSPD 的高灵敏度和高时间分辨特点, 南京大学与深圳先进技术研究院合作成功研制出红外二区荧光寿命成像系统, 实现了活体三维荧光寿命成像, 空间分辨率可以区分生物组织的亚细胞结构^[158]. 在光量子计算方面, 最为瞩目的成果当属 2020 年中科大实现的“九章”量子计算机原型机, 实现了 76 个光量子比特, 其性能达到了量子优越性的又一个里程碑. 该计算机原型机中使用了 100 通道的高性能 SNSPD 器件^[159].

3.6 微波动态电感超导单光子探测器

前述 SNSPD、TES 和超导 SIS 等光子探测器在 X 射线、紫外光及红外太赫兹等波段的弱光探测方面有优异的性能, 因而在天文探测、量子通信和量子计算等相关领域有重要的应用前景. 然而, 这些器件的大阵列集成往往受制于较为复杂的读取电路, 为克服这一困难, 美国 Day 等^[160]于 2003 年首先提出了称为微波动态电感探测 (microwave kinetic inductance detection, MKID) 的新型超导单光子探测器, 其核心是一个四分之一波长超导谐振器. 工作在超导转变温度以下的超导薄膜吸收一个能量为 $h\nu > 2\Delta$ (Δ 是超导体的超导能隙) 的光子之后, 一部分超导库珀对被拆散然后产生了一定数量的准粒子, 准粒子的密度增加使得谐振器动态

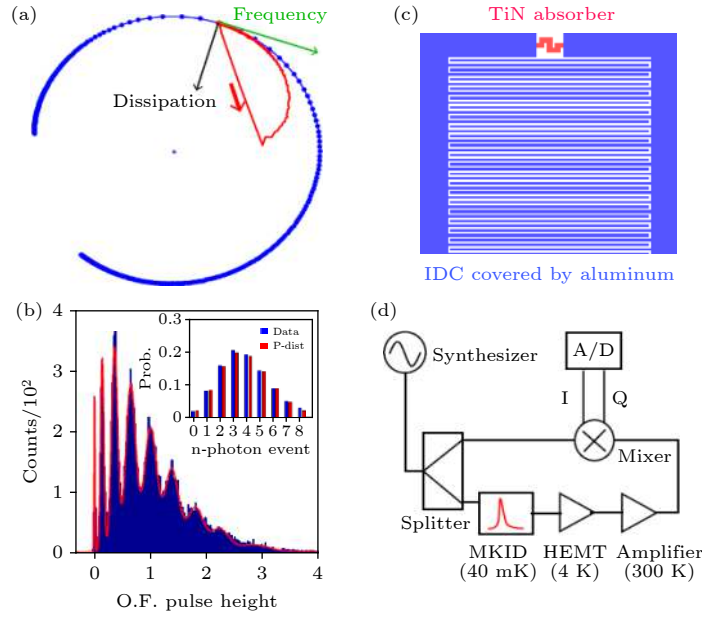


图 7 单元 MKID 实现 1550 nm 波段光子数可分辨的单光子探测^[164] (a) 器件 S21 参数的复面脉冲响应; (b) 可分辨 7 个光子的光子数分辨探测; (c) 集总型 MKID, 红色表示光子吸收部位 (高动态电感区); (d) 用于 MKID 光子计数实验的 IQ-mixer 零拍测量系统

Fig. 7. Photon number resolution detection with one-pixel MKID at 1550 nm^[164]: (a) Pulse response in the complex S21 plane; (b) 7-photon resolution detection, and the averaged frequency and dissipation pulse responses in the time domain; (c) A MKID, the red regime (high kinetic inductance) for photon absorption; (d) IQ-mixer Homodyne detection for photon counting.

电感变化从而改变谐振器的谐振频率, 同时带来部分能量损耗导致品质因数降低. 通过探测馈线中微波信号的相位改变实现单光子探测 (见图 7). 显然, 这种信号读取线路非常适合频域多路复用: 工作于不同频率下的多个谐振器可以耦合到同一条传输馈线实现微波测量. 因此, 这种基于高品质因数四分之一波长共面波导传输线谐振器的 MKID, 可实现多个探测器信号的同时读取, 从而易于实现器件的阵列集成.

性能优良 MKID 的核心器件是高品质因数的四分之一波长超导谐振器. 2013 年, 西南交通大学与南京大学合作首先制备了品质因数超过 10^6 的四分之一波长的钽材料共面波导超导谐振器, 并实现了 6 个谐振器的阵列集成复用测试^[161]. 提高 MKID 光子探测灵敏度的另一个关键问题是寻找具有更高动态电感比 (即动态电感值和磁电感值之比) 的超导薄膜材料. 经过多年的探索, 人们发现 Al, TiN, InO_x 和 NbN 等都是不错的候选者. 2017 年, 南京大学课题组在蓝宝石基底上面用 TiN 材料制作了品质因数在 10^5 量级的共面波导超导谐振器^[162]. 最近, Al_2O_x 也被证实是一种高动态电感的超导薄膜^[163]. 同一年, 基于 IQ-Mixer 测量技术, 西南交通大学课题组和美国 NIST 团队利用 TiN/Ti/TiN

的高动态电感光子响应, 实现了能量分辨率达 0.22 eV、在 1550 nm 波段可分辨 7 个光子的集总型 MKID^[164].

大阵列集成是 MKID 应用于成像探测的关键. 2017 年, 紫金山天文台团队实现了 Si 基 Al 膜 MKID 的 8×8 像元集成^[165], 该探测器的等效噪声功率达到 $10^{-17} \text{ W/Hz}^{1/2}$ 量级. 随着制作工艺的日趋完善和实际运用的需要逐步增多, 该团队与荷兰 Delft 大学及日本理化学研究所合作, 进一步研制了 1024 像元的超导 MKID 阵列探测器芯片. 相对于其他超导光子探测器, MKID 的大阵列集成工艺虽然比较简单: 一般仅需要一次或几次光刻即可完成制作, 但是由一条传输馈线实现不同单元器件的读取可能会遇到某些 MKID 的频率相互重叠碰撞的问题, 导致不能对 MKID 单元器件的精确识别, 从而影响器件的使用率. 2017 年, 西南交通大学课题组和美国 NIST 团队合作实现了单片 99 个 MKID 的阵列集成^[166], 并发展了一种频率微调技术^[167] 克服这一困难. 其要点是, 采用一块点焊有 LED 灯的印刷电路板, 使 LED 灯一一对应阵列中每个 MKID 的物理位置, 依次对每个 MKID 进行标定以测试其频率偏移情况. 对频率重叠的 MKID 进行二次加工微调, 从而显著减少了 MKID 阵列的

频率碰撞现象,极大提升了阵列中 MKID 阵列元件的使用率。

MKID 与 SNSPD, SIS, TES 探测器等都是目前超导单光子探测器领域中的研究热点。其中, MKID 以其易加工、易集成、读取线路简单、可实现光子计数的优势而受到的关注,并有望应用于天文探测、量子信息处理和量子精密测量等各相关领域。不过,相比于 SNSPD,尽管其片上探测的量子效率较高且具有光子数分辨能力,但其响应速度较慢;相比于 TES 探测器,其响应信号的读取电路相对简单、响应速度较快,但量子效率不高;相比于 SIS 探测器,其制备工艺相对简单,但响应速度不高。因此,融合这几种探测器的优缺点,获得综合性能优越的探测器将成为未来超导光子探测器研发的重点。就 MKID 本身而言,揭示其噪声的物理机理,找寻其有效的抑制手段,从而显著提高其探测效率;寻找超导转变温度更高、动态电感比值更大的器件材料;以及器件的大规模阵列集成等都是近期需要关注的研究课题^[168]。

3.7 高温超导太赫兹技术

太赫兹 (Terahertz, THz) 波是指频率范围在 0.1—10 THz 之间的电磁波,其具有宽频带、透射性强、瞬态和“指纹”等特性。太赫兹波的独特电磁特性使其在通讯、生物医学、环境监测和材料科学等领域都有非常可观的应用前景^[169]。由于缺乏有效的信号源和检测手段,太赫兹技术的发展一度发展缓慢。利用超导太赫兹器件可以有效地产生和检测太赫兹波,推动了太赫兹技术的发展。超导在太赫兹领域的应用方向主要有超导太赫兹探测、超导太赫兹源及超导太赫兹调制等。基于低温超导器件的太赫兹探测技术,如前面介绍的超导 SIS 探测器、超导 HEB、超导 TES 和超导 KID 等,已经成为该波段灵敏度最高的探测器。但受限于低温超导材料的工作温度和能隙等限制,如 SIS 探测器,其上限工作频率仅略高于 1 THz,而基于高温超导材料的超导太赫兹器件的探测频率要远高于 1 THz,是未来的发展方向之一。

在超导太赫兹源方面,利用人工制备的低温超导 JJ 阵可以实现并检测到太赫兹辐射^[170],但其辐射功率较小且对制备工艺要求较高。而通过高温超导 BSCCO 本征约瑟夫森结阵制备的太赫兹辐射源具有工作温度高、辐射功率较大和辐射频率连续

可调范围大等优点而受到广泛的关注和研究^[171]。目前 BSCCO 太赫兹辐射源的辐射频率范围可达 0.1—2.5 THz,最大辐射功率接近 1 mW^[172]。

在超导太赫兹调制方面,低损耗、易调控的超导材料与人工电磁超材料的有效结合,可以应用于太赫兹主动功能器件(有源功能材料)的研究。工作于太赫兹频段的超导超材料是一种有效的超导太赫兹调控器件。目前超导超材料的工作温度已经由液氮温区提高到液氦温区^[173],并实现了超过 80% 的调制深度和接近 1 MHz 的调制速度,表现出良好的调制性能^[174,175]。

目前,国内的科研单位和高校开展了广泛而深入的超导太赫兹技术研究,其研究方向覆盖了超导太赫兹探测、超导太赫兹源及超导太赫兹调制等方面。在超导太赫兹探测技术方面,南京大学超导电子学研究所超导 HEB 和高温超导约瑟夫森探测器上开展了器件制备和测试技术等方面的研究,测得的超导 HEB 作为直接检测器时的噪声等效功率为 $1.6 \times 10^{-12} \text{ W/Hz}^{1/2}$ ^[176],另外在高温超导 YBCO 双晶结阵列混频器上实现了高达 154 次的谐波混频^[177]。

在超导太赫兹辐射源方面,南京大学超导电子学研究所创新制备工艺方法及解决导热等问题,实现了 BSCCO 太赫兹辐射源的性能提升^[172],测得的最大辐射功率接近 1 mW,频率可调范围为 0.1—2 THz^[178],并首次实现了液氮温区的太赫兹辐射^[179]。在应用方面,他们利用频率可调的 BSCCO 源测量了氨气和水蒸气的太赫兹吸收光谱,测得的最小吸收线宽可达 5 MHz^[180]。另外,他们也把高温超导 BSCCO 太赫兹源与高温超导 YBCO 双晶结探测器结合,研制了高温超导太赫兹集成接收机^[181],为未来超导集成接收机往高温超导发展提供了思路。

在超导太赫兹调制器方面,南京大学超导电子学研究所利用 NbN 超导薄膜制备太赫兹超材料,实验测得 0.507 THz 处的传输系数高达到 0.98,并实现了 80.6% 的调制深度^[182],显示出优越的低插损和高开关比特性。他们还设计了电控超导超材料太赫兹调制器,在透明窗口处可以实现 45%—79.8% 的调制深度,在外加正弦电压控制信号的作用下,实现了接近 1 MHz 的调制速率^[174]。

4 超导数字电路

超导数字电路采用超导材料和 JJ 作为电路元

件, 具有比半导体电路低 1—2 个数量级的低功耗、小尺寸和极低的信号损耗 (或噪声温度) 等优点, 从最初以超导计算机为应用牵引的研究, 发展出射频信号处理、超导量子计算控制读出电路等更广泛的应用, 成为后摩尔时代微电子领域的前沿阵地之一。

4.1 超导约瑟夫森参量放大器

参量放大, 顾名思义, 抽运信号含时改变系统中某一个参数, 从而驱动系统放大输入的信号. 现代科学中, 参量放大器在各种物理系统中实现, 比如电路系统^[183]、光学系统^[184]、纳米力学系统^[185]、超导约瑟夫森结电路系统^[186,187]等. 20 世纪 80—90 年代, IBM 的科学家 Pedersen 等^[186] 和贝尔实验室的科学家 Yurke 等^[187] 率先开展了超导约瑟夫森参量放大器 (Josephson parametric amplifiers, JPA) 研究, 并利用 JPA 成功演示了真空涨落噪声的压缩^[187]. 1990 年贝尔实验室的 JPA 噪声温度已经接近量子极限.

噪声温度是超导约瑟夫森参量放大器关键指标之一. JPA 可以工作在稀释制冷机的最低温度下, 其噪声主要来自微波真空涨落的量子噪声和测量系统的不完美的噪声屏蔽. 目前最好性能的参量放大器一般都接近量子极限, 当 JPA 工作在简并模式下, 并不引入额外频率的真空涨落, 原则上可以不增加额外噪声.

在一定增益下, 带宽是 JPA 一个重要指标. 在增益达到 20 dB 时, 基于谐振模式的 JPA, 带宽一般在几个 MHz 到几十个 MHz (图 8)^[188–192]. 引入阻抗变换降低 JPA 的等效环境阻抗, 降低等效品质因数^[193], 或者利用阻抗变换器改善增益曲线洛伦兹依赖关系^[194], 可以实现几百 MHz 的参量放大器的带宽. 区别谐振腔模式 JPA, 约瑟夫森行波放大器中, 微波信号随着信号传播而被放大, 其带宽可以超过 3 GHz.

饱和功率是参量放大器另外一个核心指标, 它也决定了 JPA 的动态范围. JPA 的放大主要利用 SQUID 等约瑟夫森电感的非线性项提供不同频率模式的相互作用, 然而非线性项同时引起频率的移动和谐振腔内部的分叉. 对于谐振腔模式的 JPA, 可以通过引入 SQUID 阵列^[192] 或者超导非线性非对称电感元件^[195] 来减少高阶非线性项的比例, 从而提高饱和功率. 行波放大器因为没有光子的存

储, 目前基于约瑟夫森结的行波放大器的饱和功率最高, 达到近 -100 dBm, 没有约瑟夫森结的参量放大器可以实现更高的饱和功率^[196].

由于需求的缺乏, JPA 在 20 世纪 90 年代并没有引起广泛的兴趣. 随着超导量子计算的发展, 自 2007 年起, JPA 再次引起了学术界的极大兴趣. 2007—2010 年科学家开发了多种增益高、噪声低的参量放大器^[188–192]. 这个时期 JPA 多数采用反射谐振腔模式, 并在谐振腔内放入约瑟夫森结等非线性元件. 由于采用了反射谐振腔模式, 这类放大器容易实现较大的增益, 制备也相对较为容易, 但受谐振器线宽的影响, 带宽一般在 10 MHz 以内, 且工作时需要环形器. 工作频率多数可以随着外加磁场的变化而调节, 调节范围往往超过 1 GHz. 利用 JPA 工作于简并模式, 科学家演示了微波频率的真空噪声压缩^[188]. 采用 JPA 作为前级放大器, 科学家实现了实时量子跳跃^[197], 高保真度的单发测量^[198], 量子反馈^[199] 等有趣量子信息实验.

然而谐振腔模式的 JPA 的带宽普遍在几个 MHz, 无法同时测量多个超导量子比特. 为了进一步提高 JPA 的带宽和饱和功率等性能, 各国科学家百花齐放, 采用各类集总电路谐振器和非线性元件, 包括 SQUID, SNAIL, SQUID 结阵列等, 把参量放大器带宽从几个 MHz 提高到几十 MHz. 2015 年, 加州大学圣巴巴拉分校和印度 TIFR 分别开发了各自阻抗变换的参量放大器, 带宽达到近 600 MHz, 饱和功率可以达到 -110 dBm 左右. 采用宽带参量放大器, 国内外知名研究小组同时实现 10 个以上超导量子比特的读出^[200].

为了解决 JPA 带宽和饱和功率的问题, 行波放大器是一个最佳解决方案. 2012 年加州理工大学的研究小组利用超导金属薄膜的动力学电感作为非线性元件, 制备超导传输线结构的行波放大器^[196], 带宽达到 2.5 GHz, 增益 -10 dB, 饱和功率可以达到 -70 dBm, 理论上可以达到 -10 dBm. 该器件在天文观测等领域有很高的潜在应用价值. 2015 年, 加州大学伯克利分校和麻省理工学院联合开发了基于约瑟夫森结的行波参量放大器^[201], 该放大器具有最好的带宽 (>3 GHz) 和饱和功率 (-99 dBm), 噪声温度接近量子极限, 代表了国际上 JPA 的最高性能. 该器件有望成为一个通用器件, 广泛应用于微弱信号极低温微波测量实验中.

由于我国超导量子计算发展晚于美国、欧洲和

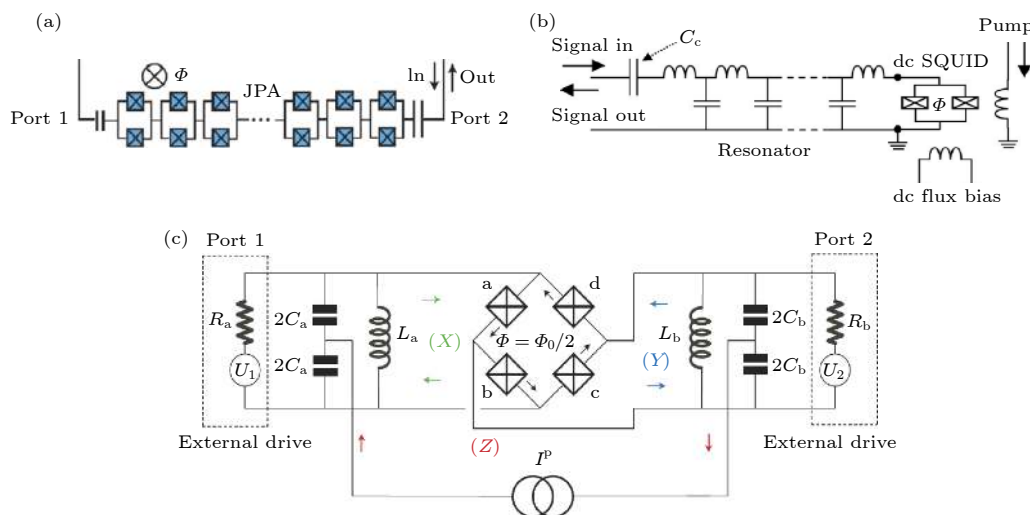


图 8 三种谐振腔模式参量放大器 (a) SQUID 阵列谐振器腔的参量放大器^[188]; (b) 磁通驱动参量放大器^[189]; (c) 约瑟夫森参量转换器^[190]

Fig. 8. Three resonance-type Josephson parametric amplifiers: (a) Josephson parametric amplifier based on a SQUID array resonator^[188]; (b) flux-driven Josephson parametric amplifier^[189]; (c) Josephson parametric converter^[190].

日本, 因此我国的参量放大器的开发也晚于国际顶级的研究小组. 阻抗变换的参量放大器带宽较宽, 工艺相对行波参量放大器简单, 因此被国内研究小组广泛使用. 2017 年中国科技大学-浙江大学-物理所团队利用阻抗匹配参量放大器实现了 10 超导量子比特的测量, 并实现了当时最大的超导量子比特纠缠态^[200]. 2016 年起, 清华大学使用参量放大器实现超导量子比特单发测量, 并应用于各种超导量子信息实验中^[202]. 已报道的文献中, 物理所、中科大、浙江大学联合团队实现了阻抗变化的参量放大器, 放大器带宽约 300—400 MHz^[203,204]. 本源量子公司也提供阻抗变化的参量放大器产品, 带宽约为 400 MHz. 清华大学、南京大学、北京量子院、南方科技大学等多个国内机构都制备了阻抗变化的参量放大器. 目前, 国内开发的参量放大器的非线性元件一般是基于双角度蒸发的 Al 超导约瑟夫森结. 2020 年, 上海微系统所实现基于 Nb 基三层膜的磁通驱动参量放大器. 国内不少单位尝试开发行波参量放大器, 但是行波参量放大器对于平行板电容和约瑟夫森结均匀性要求较高, 目前国际较为成功的行波放大器来自 MIT 林肯实验室, 是基于 Nb 三层膜结构实现的.

4.2 超导集成电路

超导集成电路 (integrated circuit, IC) 是一种基于 JJ 的集成电路, 是对半导体 IC 在器件层面

的颠覆. JJ 可以被看成一种通过调控外加电流等信号, 实现在零电阻态和非零电阻态之间切换的两端子开关器件. 它具备特征开关速度快和功耗低的特性, 且可与超导传输线直接连接, 实现超导芯片上接近光速的高速低损耗信号传输. 因此, 它的发明迅速引发了一系列基于 JJ 的超导 IC 电路的研究. 初期超导 IC 电路研究的主体思路是模仿晶体管 (或真空管) 电压输出的概念, 而这类电路被通称为约瑟夫森锁存逻辑电路. 经过 20 年的研究, 锁存逻辑电路实现了基于全 Nb 制造技术的 4 位超导微处理器和存储器的芯片与封装测试^[205]. 同时, 所积累的 Nb/Al-AIO_x/Nb 约瑟夫森结和全 Nb 超导电路技术奠定了当今超导大规模集成工艺的基础, 也为 SQUID、SIS 混频器等超导传感器、探测器的应用做出了重要贡献.

20 世纪 80 年代中期, 当时在莫斯科国立大学的 Likharev, Semenov 和 Mukhanov 三位科学家发明了一类新型超导数字电路: 快速单磁通量子 (rapid single flux quantum, RSFQ) 电路^[206,207], 由此形成了超导 IC 的第二代逻辑电路: 单磁通量子 (single flux quantum, SFQ) 电路. SFQ 电路虽然依旧利用 JJ 为开关, 但是它不再模仿半导体的电平信号模式, 而是利用超导环路中独特的磁通量子化效应, 根据一个超导环路中是否有磁通量子来定义数字电路的“1”和“0”态. 这一改变使 SFQ 逻辑电路的速度相比锁存逻辑电路而言实现了 100 倍

以上的提升: 最高实测 SFQ 逻辑门时钟频率达 770 GHz^[208].

RSFQ 电路是基于 SFQ 发展的第一种逻辑电路. 目前 SFQ 电路家族已经陆续增加了 ERSFQ, RQL, nSQUID, AQFP 等多种新型电路. 在延续最初锁存技术时期的超导微处理器研究之外, 也逐渐发展出超导高速模数转换器 (analog-to-digital converter, ADC) 及配套数字信号处理器、超导量子计算控制电路、低温超导探测器读出电路、可逆运算等多种新型的应用领域的研究. 在超导计算领域, 2018 年, 美国 Northrop Grummam 公司和 Hypres 公司分别实现了 1.95 GHz 的 16 位 RQL 超导算术逻辑运算器 (arithmetic and logic unit, ALU) 和 2.8 GHz 的 8 位 ERSFQ 超导 ALU. 日本的九州大学和名古屋大学于 2020 年实现了 32 GHz 时钟频率、6.5 mW 功耗、2.5 TOPS/W 的门级流水线 4 位 RSFQ 超导处理器^[209]. 在 ADC 领域, 美国 Hypres 公司自 2005 年起已实现了多代基于 JJ 和 SFQ 的模数转换混合电路为核心芯片的商用化射频接收系统^[210,211]. 在超导量子计算领域, 超导 RSFQ 电路是加拿大 D-Wave 公司自首台售出的超导量子计算机“D-Wave One: Rainier”起的核心控制电路^[212]. 近期利用多种 SFQ 电路对超导量子比特进行控制和读出及对 SNSPD 等低温探测器阵列读出的研究不断涌现^[213–215]. RSFQ 的发明人之一 Semenov 教授于 2003 年发明了 nSQUID 逻辑电路, 随后于 2011 年实现了单个门 $1/3k_B T \ln 2$ 功耗的 nSQUID 电路测试^[216], 验证了利用 nSQUID 实现经典状态可逆计算的可行性. 日本紧随其后于 2011 年开始 AQFP 电路在低功耗及量子控制领域的研究, 并于近期公布了单个门 $70k_B T \ln 2$ 功耗的 AQFP 电路测试结果^[217].

当今 SFQ 技术已经形成了工艺、设计、封装、测试和系统集成等多节点的技术链. 技术链条中各节点及节点连接的综合发展方可推动 SFQ 技术的持续进步, 这也使得 SFQ 研究的技术门槛及成本的日益增高. 正因如此, 很长一段时间国际上只有美国和日本掌握了超导大规模集成电路技术, 而我国在此领域长期处于空白. 近年, 随着我国的综合实力及科技力量的发展提升, 开始在超导集成电路领域进行部署与投入, 正在步入高速发展的阶段.

在超导 IC 工艺方面, 提升超导电路集成度规模的主要有两种手段: 增加金属层数和减小电路中各电子元器件的尺寸. 而提升超导电路速度, 需提高约瑟夫森临界电流密度 J_c . 国际上掌握最高工艺水平 (J_c 为 20 kA/cm², 金属层大于 9 层, 片上结集成度大于 10⁶ JJs/cm²) 的超导 IC 工艺线只有两家单位: 美国 MIT 林肯实验室和日本 AIST. 上海微系统所从 2012 年开始布局超导器件与电路研发平台, 为满足低温超导 SQUID 研制需求, 开发了 J_c 为 100 A/cm², 金属层为 2 层的超导器件工艺. 自 2016 年启动超导 SFQ 电路所需的超导集成工艺研发, 于 2018 年开发了 SIMIT Nb03 超导大规模 IC 标准工艺 (图 9), 其核心技术指标: J_c 为 6 kA/cm², 片上结集成度为 10⁴ JJs/cm², 金属层为 4 层. 该 SIMIT Nb03 工艺及系列相关工作已被 2020 年 IRDS^[218] 收录.

在超导 IC 设计方面, 为了提升电路集成度和性能, 必须建立高可靠性的单元库和超导 IC 专用电子设计辅助 (electronic design automation, EDA) 工具, 并针对 SFQ 电路特性优化大规模超导 IC 的架构. 单元库的可靠性提升需通过提高工艺偏差阈值范围、提升时序精度、降低版图单元尺寸及增加版图种类来实现. 国际上综合性能最优的单元库为

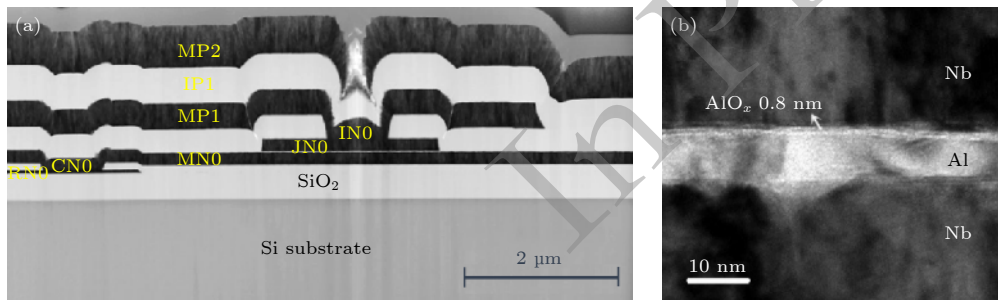


图 9 SIMIT Nb03 工艺下 (a) 电路 TEM 剖面图; (b) Nb/Al-AIO_x/Nb 约瑟夫森结 TEM 剖面图

Fig. 9. In SIMIT Nb03 process: (a) Sectional view of the TEM image of superconducting IC; (b) sectional view of the TEM image of Nb/Al-AIO_x/Nb JJ.

日本 ISTECA/AIST 的 ADP2 工艺单元库 (电路图约 20 种, 版图尺寸单元为 30 μm , 版图数量不公开)^[219]. 上海微系统所已经初步确立了设计-工艺关联的超导 SFQ 工艺过程控制芯片的设计及追踪反馈体系, 以此为基础开发了 SIMIT Nb03 的 PDK 和 RSFQ 单元库. 该单元库由电路图库、时序库、Verilog 模型库、版图库及符号视图组成, 共包含电路图 20 余种, 版图逾 100 种 (版图尺寸单元为 30 μm). 所有单元均设计了低频功能测试电路并通过了实测试验.

有效地调用单元库, 可提高大规模 IC 设计的效率与良率, 因此专用 EDA 工具不可或缺. 而由于近几年来超导 IC 集成度的高速发展, 超导 EDA 也成为国际上该领域的研究热点. 目前上海微系统所基于开源 PSCAN2 软件二次开发了电路图库优化及时序库提取专用软件, 定制开发了布局及时序同步验证的静态时序分析软件及多种设计流程接口自动化软件.

在超导 SFQ 微处理器架构设计优化方面, 中国科学院计算技术研究所 (简称为中科院计算所) 提出了一种全并行的 8 位处理器、一种 4-bit bit-slice 体系结构的 32 位矩阵乘法器和一种专用于 SFQ 处理器的自适应分布式时钟策略, 并为 64 位 CPU 提出了一种 16-bit bit-slice 体系结构的算术逻辑单元和移位运算器, 相关研究内容也已被 2020 年 IRDS 收录.

利用工艺和设计技术的进步不断提升片上电路规模的同时, 从系统层面可通过多芯片封装的方式进一步提高 SFQ 电路的规模与性能. 上海微系统所基于低温、高速、低延迟等设计原则, 正开展基于引线键合和倒装焊两种互连方式的多芯片混合集成研究. 目前基于 PbIn 合金的引线键合技术已可实现芯片间超导无损耗连接; 通过蒸发镀膜、激光熔喷等方法制备倒装焊凸点, 有望实现片间高频 (≥ 100 GHz) 互连.

SIMIT Nb03 的 RSFQ 单元库及超导大规模 IC 开发所需的 EDA 工具均集合至上海微系统所的超导 SFQ 专用设计平台. 基于此设计平台, 上海微系统所、中科院计算所、电子科技大学等多家单位分别开展了超导 SFQ 电路的设计, 并由上海微系统所完成制备、封装及测试验证. 现已建立了设计-制备-测试各环节的正反馈合作研发流程, 实现了包含移位寄存器、全加器、伪随机数发生器等百

结级到 8 位 ALU 等的千结级规模, 实测电路工作频率大于 20 GHz 的 RSFQ 及 ERSFQ 电路的验证.

5 超导电路计量应用技术

计量是关于测量及其应用的科学. 自约瑟夫森效应发现起, 超导电路就和计量科学建立了紧密联系. 在大于临界电流的直流电流偏置下, 约瑟夫森结两端会产生大小为 U 的直流电压, 结内会产生频率 $f = 2eV/h$ 的交变超导电流, 其中, e 和 h 分别为基本电荷和普朗克常数. 如果同时用频率为 f_0 的微波辐射约瑟夫森结, 在其 I - V 曲线上会出现一系列 Shapiro 台阶, 台阶对应的电压值精准正比于台阶数、约瑟夫森常数及辐照的微波频率, 而与约瑟夫森结所在环境的温度、内部结构及材料类型等因素无关.

由于微波频率能以很高准确度测定, 交流约瑟夫森效应被用于建立量子电压基准, 高准确度复现电压量值. 第 77 届国际计量委员会决定, 自 1990 年 1 月 1 日起, 采用基于约瑟夫森结阵器件的量子电压基准取代原来的韦斯顿标准电池电压实物基准, 并统一新基准中所涉及的约瑟夫森常数为 483597.9 GHz/V. 这种基于宏观量子现象和基本物理常数的计量方法具有更高的稳定性, 将电压复现准确度提高了 3 个数量级. 目前, 传统约瑟夫森结阵器件已应用在全球 60 多个国家的直流量子电压基准中.

为了实现输出电压可调, 美国国家标准与技术研究院 (National Institute of Standards and Technology, NIST) 最早提出可编程约瑟夫森电压标准 (programmable Josephson voltage standard, PJVS) 的概念. 其工作原理与数模转换器类似, 采用一组二进制排列的约瑟夫森结子阵列构成串联的约瑟夫森结阵, 每个子阵列有独立的偏置电路, 通过开关选择驱动的约瑟夫森结数目. 为了保证每个子阵列能够被准确的偏置在选定的 Shapiro 台阶上, NIST 使用 Nb/Nb_xSi_{1-x}/Nb 材料制备了集成度达到 33 万个结的过阻尼约瑟夫森结阵器件, 率先实现 -10 V 至 +10 V 范围的可编程电压输出. 目前, 美国 NIST 和德国联邦物理技术研究院均开发了商用化的 PJVS 系统. 其中, 美国 NIST 已将 PJVS 系统推广至包括美国海军实验室、NASA 在内的多个研究机构, 在高分辨率电压表的线性度校准、正

弦信号的差分采样校准、量子功率等领域发挥了重要作用。

美国 NIST 的 Hamilton 等还提出了一种脉冲驱动的交流约瑟夫森电压标准 (AC Josephson voltage standard, ACJVS). 与可编程量子电压标准不同, ACJVS 采用调制的高速电流脉冲序列来驱动约瑟夫森结阵. 当电流脉冲幅度在 Shapiro 台阶范围内时, 不论电流脉冲的幅度如何变化, 均会驱动约瑟夫森结输出时间积分面积恒等于 $h/2e$ 的电压脉冲. ACJVS 合成电压波形的过程分为 3 个步骤: 首先利用 Δ - Σ 调制, 将期望合成的波形调制成一串数字代码, 接着将数字代码存储到脉冲序列发生器并转换成相应的高速脉冲序列, 最后利用高速脉冲驱动约瑟夫森结阵输出包含待合成波形信息的量子电压脉冲序列. 这些量子电压脉冲是 Δ - Σ 调制数字码型的完美复现, 经超导滤波器低通滤波, 即可得到所需合成的电压波形. 近年来, 交流量子电压标准被用于测定玻尔兹曼常数 k , 在 2019 年国际单位制基本单位重新定义中扮演了非常重要的角色.

中国计量科学研究院近几年一直在致力于研制交直流电压基准用基于 Nb/NbSi/Nb 材料的大规模集成约瑟夫森结阵列器件^[220,221]. 经过多年努力, 已攻克量子电压器件所需超导约瑟夫森结大规模集成关键技术, 将约瑟夫森结物理集成度提升至 40 万量级; 攻克基于超导材料的芯片上微波电路关键技术, 实现了数万结微波功率一致^[222,223]. 核心技术的突破使我国成为继美、日、德后第 4 个实现量子电压器件的国家. 具体进展包括: 成功研制出 2 V 可编程量子电压器件包含 7 万多个约瑟夫森结, 在 19 GHz 微波输入下, 可实现约 2.2 V 高精度交直流量子电压输出; 成功研制双通道小电压结阵器件^[224], 该器件可工作在双微波频率下, 通过差分法可输出最小 1 μ V 的量子电压, 不确定度达到了 10^{-9} V. 研制成功量子电压噪声源器件^[225], 该器件可以合成量子噪声信号用于约瑟夫森噪声温度计系统. 正在研制脉冲驱动约瑟夫森结阵器件, 用于交流量子电压系统.

中国计量科学研究院于 1993 年和 1999 年建成 1 V 和 10 V 直流量子电压基准装置, 并分别于 1995 年和 2013 年参加了国际计量局组织的现场关键国际比对 (依据国际关键比对协议 BIPM-K10.a 和 BIPM-K10.b). 1 V 和 10 V 的比对结果

的一致性和不确定度均为国际领先, 与国际计量局等效一致性优于 2×10^{-10} . 中国计量科学研究院于 2010 年和 2015 年先后建立了 1 V 和 10 V 量级 PJVS. 在脉冲驱动的 ACJVS 方面, 研制出一套包含 12800 个约瑟夫森结的 ACJVS 装置用于合成毫伏量级的交流电压, 并且提出了一种新型的波形合成方法, 使感应电压下降了近 3 个数量级^[226]. 2020 年, 首次在国内实现了 1 V 交流量子电压信号的合成^[227].

在玻尔兹曼常数测量方面, 中国计量科学研究院于 2012 年研制出一套包含 20 个约瑟夫森结, 可合成微伏量级量子电压的量子电压噪声源装置用于玻尔兹曼常数的测量^[228]. 到 2018 年, 实现玻尔兹曼常数的精确测定, 相对合成标准不确定度达到 2.7×10^{-6} , 为全球最佳测量结果^[229].

6 结 论

超导弱电应用在近二三十年取得了突破性进展. 高温超导微波器件及子系统已经在移动通信、雷达和一些特殊通信系统中取得了规模化应用. 包括 SQUID、超导 TES、超导 SIS 混频器、超导 HEB 混频器、超导 SNSPD 和超导 MKID 等在内的超导传感器/探测器实现了接近量子极限的灵敏度, 成为天文观测、地球物理、量子信息技术和生物医学等领域的前沿推动技术. 超导 JPA 已经成为超导量子信息重要器件, 是实现超导量子比特的单发非破坏性测量的关键器件. 超导 SFQ 集成电路技术可用于雷达、通信系统、超导计算机、可为后 E 级超级计算提供技术方案, 为规模化超导量子计算提供核心技术. 在计量科学中, 交流约瑟夫森效应被广泛用于建立量子电压基准. 近年来, 受益于国内基础科研条件的进步, 以及众多大科学项目的带动, 我国超导弱电应用技术研究取得了明显进步和杰出成绩, 在大多数领域走到了世界前列. 当前, 量子信息技术在全世界已经掀起巨大的热潮, 已成为世界各国战略竞争的焦点之一, 在未来国家科技发展、新兴产业培育、国防和经济建设等领域, 有望产生基础共性乃至颠覆性重大影响. 而无论是在量子计算、量子通信还是量子精密测量方面, 超导电子学都扮演重要角色, 同时量子热潮也会大力推动超导电子学的发展. 我们期待国内超导电子学技术的研究在未来能取得更多出色成果, 成为世界相关研究领域的引领者.

参考文献

- [1] Onnes H K 1911 *Phys. Lab. Univ. Leiden* **120b** 122
- [2] Quinn D J, Ittner W B 1962 *J. Appl. Phys.* **33** 748
- [3] Meissner W, Ochsenfeld R 1933 *Naturwiss* **21** 787
- [4] Giaever I 1974 *Rev. Mod. Phys.* **46** 245
- [5] Josephson B D 1962 *Phys. Lett.* **1** 251
- [6] Bednorz J G, Muller K A Z 1986 *Physik B* **64** 189
- [7] Wu M K, Ashburn J R, Torng C J, Hor P H, Meng R L, Gao L, Huang Z J, Wang Y Q, Chu C W 1987 *Phys. Rev. Lett.* **58** 908
- [8] Zhao Z X, Chen L Q, Yang Q S, Huang Y Z, Chen G H, Tang R M, Liu G R, Cui C G, Chen L, Wang L Z, Guo S Q, Li S L, Bi J Q 1987 *Science Bulletin* **32** 412 (in Chinese) [赵忠贤, 陈立泉, 杨乾声, 黄玉珍, 陈赓华, 唐汝明, 刘贵荣, 崔长庚, 陈烈, 王连忠, 郭树权, 李山林, 毕建清 1987 *科学通报* **32** 412]
- [9] Inam A, Wu X D, Nazar L, Hegde M S, Rogers C T, Venkatesan T, Simon R W, Daly K, Kirchgessner J, Moffat D, Rubin D, Shu Q S, Kalokitis D, Fathy A, Pendrick V, Brown R, Brycki B, Belohoubek E, Drabeck L, Gruner G, Hammond R, Gamble F, Lairson B M, Bravman J C 1990 *Appl. Phys. Lett.* **56** 1178
- [10] Nisenoff M, Meyers W J 2001 *IEEE Trans. Appl. Supercond.* **11** 799
- [11] Willemssen B A 2009 *IEEE MTT-S International Microwave Symposium Digest Boston, USA, June 7–12, 2009* p1457
- [12] Anders S, Blamire M G, Buchholz F Im, Crété D G, Cristiano R, Febvre P, Fritzsche L, Herr A, Il'ichev E, Kohlmann J, Kunert J, Meyer H G, Niemeyer J, Ortlev T, Rogalla H, Schurig T, Siegel M, Stolz R, Tarte E, Brake H J M, Toepfer H, Villegier J C, Zagoskin A M, Zorin A B 2010 *Physica C* **479** 2079
- [13] Kawaguchi T, Ikeuchi H, Kayano H, Sawahara Y, Shiokawa N 2017 *Proceedings of the 14th European Radar Conference Nuremberg, Germany, October 11–13, 2017* p449
- [14] Sekiya N, Matsuura H, Akiya M, Tanaka Y, Ohshima S 2013 *IEEE Trans. Appl. Supercond.* **23** 1500904
- [15] Sekiya N 2017 *IEEE Trans. Appl. Supercond.* **27** 1501804
- [16] Sekiya N, Kobayashi S 2019 *IEEE Trans. Appl. Supercond.* **29** 1500804
- [17] Saito A, Sekiya N, Teshima H, Obara H, Noguchi Y, Hirano H, Hirano S, Ohshima S 2006 *Physica C* **300** 445-448
- [18] Saito A, Teshima H, Obara H, Ono S, Kimura M, Sekiya N, Hirano H, Hirano S, Ohshima S 2007 *IEEE Trans. Appl. Supercond.* **17** 886
- [19] Saito A, Tsurui R, Kato T, Nakajima K, Teshima H, Ohshima S 2015 *Applied Physics Express* **8** 043101
- [20] Tsurui R, Saito T, Kato T, Teshima H, Ohshima S, Saito A 2016 *IEEE Trans. Appl. Supercond.* **26** 1501004
- [21] Saito A, Saito T, Saito T, Kodama S, Nakajima K, Ohshima S 2018 *IEEE Trans. Appl. Supercond.* **28** 1500205
- [22] Saito T, Kodama S, Saito T, Ohshima S, Saito A 2018 *IEEE Trans. Appl. Supercond.* **28** 1500704
- [23] Sekiya N, Unno K 2018 *IEEE Trans. Appl. Supercond.* **28** 1500105
- [24] Sekiya N, Tsuruoka T 2019 *IEEE Trans. Appl. Supercond.* **29** 1501004
- [25] Laforge P 2018 *18th International Symposium on Antenna Technology and Applied Electromagnetics (ANTEM) Waterloo, Canada, August 19–22, 2018*
- [26] Laforge P, Mansour R R, Yu M 2018 *IEEE Trans. Appl. Supercond.* **28** 1501208
- [27] Belyaev B A, Govorun I V, Leksikov A A, Serzhantov A M, Leksikov A A 2016 *IEEE Trans. Appl. Supercond.* **26** 1500506
- [28] Govorun I V, Leksikov A A 2017 *18th International Conference of Young Specialists on Micro/Nanotechnologies and Electron Devices (EDM) Erlagol, Russia, June 29–July 3 2017* p80
- [29] Ikeuchi H, Kawaguchi T, Shiokawa N, Sawahara Y, Kayano H 2018 *13th European Microwave Integrated Circuits Conference (EuMIC) Madrid, Spain, September 23–25, 2018*
- [30] Iijima K, Okada Y, Kumamoto T, Kawaguchi T, Ikeuchi H, Sawahara Y, Shiokawa N, Shinonaga M 2018 *IEEE Radar Conference (RadarConf18) Oklahoma City, April 4–23 2018* p0077
- [31] Ikeuchi H, Kawaguchi T, Shiokawa N, Sawahara Y, Kayano H 2018 *Asia-Pacific Microwave Conference (APMC) Kyoto, Japan, November 6–9, 2018* p797
- [32] Chaudy D, Llopis O, Marcelliac B, Lemaitre Y, Kelly O D, Hode J M 2018 *IEEE International Frequency Control Symposium (IFCS) California, USA, May 21–24 2018* p50
- [33] Wei B, Guo X B, Piao Y L, Jin S C, Zhang X P, Gao L M, Peng H L, Yin Z S, Cao B S 2009 *Chin. Sci. Bull.* **54** 612
- [34] Yu T, Li C G, Li F, Zhang Q, Sun L, Gao L, Wang Y H, Zhang X Q, Li H, Jin C J, Li J B, Liu H F, Gao C Z, Meng J B, He Y S 2009 *IEEE Trans. Microw. Theory Techn.* **57** 1783
- [35] Li C G, Yu T, Bian Y B, Wu Y, Wang J, Zhang X Q, Sun L, Li H, He Y S 2016 *IEEE Trans. Appl. Supercond.* **26** 1502104
- [36] Zhang X Q, Meng Q D, Li F, Li C G, Li S Z, He A S, Li H, He Y S 2006 *Supercond. Sci. Technol.* **19** 394
- [37] Tsuzuki S M I, Shen Y, Berkowitz S 2002 *IEEE Trans. Microw. Theory Techn.* **50** 2924
- [38] Liu H W, Rao L X, Xu Y C, Wen P, Ren B P, Guan X H, He Y S, Sun L, Ma J 2017 *IEEE Trans. Appl. Supercond.* **27** 1501704
- [39] Shang S, Wei B, Guo X B, Cao B S, Wang X, Jiang L N, Lu X X 2018 *IEEE Microw. Wirel. Compon. Lett.* **28** 588
- [40] Lu X L, Ma P Y, Wei B, Zhao L, Xu A G, Cao B S, Wang X, Song X K 2019 *IEEE Trans. Appl. Supercond.* **29** 1500308
- [41] Long Z H, Tian M G, Zhang T L, Qiao M, Wu T H, Lan Y 2020 *IEEE Trans. Appl. Supercond.* **30** 1500204
- [42] Huang H B, Wu Y, Wang J, Bian Y B, Wang X, Li G Q, Zhang X Q, Li C G, Sun L, He Y S 2018 *Physica C* **550** 78
- [43] Dai J H, Wu Y, Yuan Y F, Wang X, Wang J, Li G Q, Li C G, Sun L, He Y S 2020 *IEEE Microw. Wirel. Compon. Lett.* To be published
- [44] Zhang Q, Bian Y B, Guo J, Cui B, Wang J, Yu T, Gao L, Wang Y H, Li C G, Zhang X Q, Li H, Gao C Z, He Y S 2010 *IEEE Trans. Appl. Supercond.* **20** 2
- [45] Heng Y, Guo X, Cao B, Wei B 2013 *Electron. Lett.* **49** 1230
- [46] Ji L Y, Ma J, Sun J, Wang L, Li Y Q, Liu B 2012 *Sci. China Inf. Sci.* **55** 956
- [47] Liu H W, Lei J H, Guan X H, Zhao Y L, Sun L, He Y S 2014 *IEEE Trans. Appl. Supercond.* **24** 8
- [48] Liu H W, Ren B P, Guan X H, Wen P, Wang Y 2014 *IEEE Trans. Microw. Theory Techn.* **62** 2931
- [49] Sekiya N, Kitada N, Kishida K, Tsuruoka T 2020 *Supercond. Sci. Technol.* **33** 095002
- [50] Ren B P, Ma Z W, Liu H W, Guan X H, Wang X L, Wen P, Ohira M 2019 *IEEE Trans. Microw. Theory Techn.* **67** 726

- [51] Li C G, Bian Y B, Li G Q, Wu Y, Wang J, Wang X, Zhang X Q, Xia F J, Bai D D, Sun L, Li H, He Y S 2014 *IEEE Trans. Appl. Supercond.* **24** 1501205
- [52] Wang X, Wang J, Li C G, Wu Y, Zhang X Q, Li G Q, Dai J H, Yuan Y F, Xu Z, Zhang C, He Y S, Sun L 2020 *IEEE Trans. Appl. Supercond.* To be published
- [53] Wang J, Li C G, Wang X, Li N, Bian Y B, Li G Q, Wu Y, Xia F J, Bai D D, Zhang X Q, Sun L, Li H, He Y S 2014 *IEEE Trans. Appl. Supercond.* **24** 1501104
- [54] Wang X, Xia F J, Li N, Wang J, Li C G, Bai D D, Zhang X Q, Bian Y B, Li G Q, Wu Y, Li H, Sun L, He Y S 2015 *IEEE MTT-S International Microwave Workshop Series on Advanced Materials and Processes for RF and THz Applications (IMWS-AMP)* Suzhou, China, July 1–3, 2015 p1
- [55] Li C G, Wang X, Wang J, Sun L, He Y H 2017 *Supercond. Sci. Technol.* **30** 073001
- [56] Li C G, Zhang Q, Meng Q D, Sun L, Huang J D, Wang Y F, Zhang X Q, He A S, Li H, He Y S, Luo S 2006 *Supercond. Sci. Technol.* **19** 398
- [57] Hu L P, Zhang S G, Zhang M, Ding X J, Wang S W 2020 *Cryo. & Supercond.* **48** 82 (in Chinese) [胡来平, 张士刚, 张梅, 丁晓杰, 王生旺 2020 低温与超导 **48** 82]
- [58] Wang S W, Wang X H, Liu Y, He C, Ding X J 2018 *Low Temperature Physical Letters* **6** 25 (in Chinese) [王生旺, 王贤华, 刘洋, 何川, 丁晓杰 2018 低温物理学报 **6** 25]
- [59] Wu Y, Sun L, Li C G, Zhang X Q, Zhang Q, Wang J, Bian Y B, Yu T, Cui B, Li G Q, Li H, He Y S 2013 *Proceedings of the 2013 International Kharkov Symposium on Physics and Engineering of Microwaves, Millimeter and Submillimeter Waves* Kharkov, Ukraine, June 23–28 2013 p46
- [60] Sun L, He Y S 2014 *IEEE Trans. Appl. Supercond.* **24** 1501308
- [61] Liu Q S, Wang H W, Zhang Q Y, Wang H, Peng W, Wang Z 2017 *Appl. Phys. Lett.* **110** 222604
- [62] Zhang X, Zhang G F, Ying L L, Xiong W, Han H X, Wang Y L, Rong L L, Xie X M, Wang Z 2018 *Physica C* **548** 1
- [63] Cao W H, Chen H, Liang T T, Li J J, Kong X Y, Sun T B, Zhong Q, Wang X S, Wang L R, Zhong Y 2018 *IEEE Trans. Appl. Supercond.* **28** 1602204
- [64] Han H X, Zhang G F, Zhang X, Liang T T, Ying L L, Wang Y L, Peng W, Wang Z 2019 *Acta Phys. Sin.* **68** 138501 (in Chinese) [韩昊轩, 张国峰, 张雪, 梁恬恬, 应利良, 王永良, 彭炜, 王镇 2019 物理学报 **68** 138501]
- [65] Zhang X, Zhang G F, Wang Y L, Rong L L, Zhang S L, Wu J Q, Qiu L Q, Xie X M, Wang Z 2019 *IEEE Trans. Appl. Supercond.* **29** 1600503
- [66] Zhang G F, Zhang X, Wang Y L, Rong L L, Xie X M, Wang Z 2019 *Physica C* **562** 32
- [67] Liu J, Gao H, Li G, Li Z W, Ahmada K, Shan Z Y, Liu J S, Chen W 2017 *Chin. Physics B* **26** 098501
- [68] Zhang Q Y, Wang H W, Tang X, Peng W, Wang Z 2020 *IEEE Trans. Appl. Supercond.* **30** 1600103
- [69] Chen L, Wang H, Liu X Y, Wu L, Wang Z 2016 *Nano Lett.* **16** 7726
- [70] Linghu K H, Guo Z S, Li Y L, Xu T Q, Luo W H, Huang Z G, Jin Y R, Zheng D N, Wang F R, Gan Z Z 2019 *Physica C* **564** 1
- [71] Zhang Y, Dong H, Krause H J, Zhang G F, Xie X M 2020 *SQUID Readout Electronics and Magnetometric Systems for Practical Applications* (Weinheim, Germany: Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA
- [72] Zhang Y, Liu C, Schmelz M, Krause H J, Braginski A I, Stolz R, Xie X M, Meyer H G, Offenhäusser A, Jiang M H 2012 *Supercond. Sci. Technol.* **25** 125007
- [73] Liu C, Zhang Y, Mück M, Zhang S L, Krause H J, Braginski A I, Zhang G F, Wang Y L, Kong X Y, Xie X M, Offenhäusser A, Jiang M H 2013 *Supercond. Sci. Technol.* **26** 065002
- [74] Zhang G F, Zhang Y, Hong T, Wang H, Krause H J, Xie X M 2015 *Physica C* **518** 73
- [75] Song Z W, Dai H B, Rong L L, Dong H, Wu J, Qiu L Q, Zhang G F, Wang Y L, Tao Q, Pei Y F, Zhang S L, Xie X M 2019 *IEEE Trans. Appl. Supercond.* **29** 1600205
- [76] Rong L L, Bao S X, Wu J, Zhang G F, Qiu L Q, Zhang S L, Wang Y L, Dong H, Pei Y F, Xie X M 2019 *IEEE Trans. Appl. Supercond.* **29** 1601704
- [77] Ji Y J, Du S Y, Xie L J, Chang K, Liu Y, Zhang Y, Xie X M, Wang Y, Lin J, Rong L L 2016 *J. Appl. Geophys.* **135** 243
- [78] Du S Y, Zhang Y, Pei Y F, Jiang K, Rong L L, Yin C C, Ji Y J, Xie X M 2018 *Geophys* **83** E111
- [79] Wu Y Q, Ma B Y, Shao J Y, Ji Y J, Teng F 2020 *IEEE Access* **8** 150478
- [80] Liu X D, Liu X K, Ma D, Chen L, Zhang N 2019 *Navigation and Control* **18** 7 (in Chinese) [刘向东, 刘习凯, 马东, 陈亮, 张宁 2019 导航与控制 **18** 7]
- [81] Liu X K, Ma D, Chen L, Liu X D 2018 *Chin. J. Geophys.* **61** 3037 (in Chinese) [刘习凯, 马东, 陈亮, 刘向东 2018 地球物理学报 **61** 3037]
- [82] Dong H, Wang Y L, Zhang S L, Sun Y, Xie X M 2008 *Supercond. Sci. Technol.* **21** 115009
- [83] Huang X L, Dong H, Qiu Y, Li B, Tao Q, Zhang Y, Krause H J, Offenhäusser A, Xie X M 2018 *J. Magn. Reson.* **286** 52
- [84] Liu C, Chang B L, Qiu L Q, Dong H, Qiu Y, Zhang Y, Krause H J, Offenhäusser A, Xie X M 2015 *J. Magn. Reson.* **257** 8
- [85] Dong H, Qiu L Q, Shi W, Chang B L, Qiu Y, Xu L, Liu C, Zhang Y, Krause H J, Offenhäusser A, Xie X M 2013 *Appl. Phys. Lett.* **102** 102602
- [86] Yu M M, Tao Q, Dong H, Huang T, Li Y Q, Xiao Y, Yang S W, Gao B, Ding G Q, Xie X M 2020 *J. Magn. Reson.* **317** 106775
- [87] Liu C, Chang B L, Qiu L Q, Qiu Y, Dong H, Zhang Y, Xie X M 2015 *IEEE Trans. Appl. Supercond.* **25** 1602804
- [88] Dong H, Hwang S M, Wendland M, You L X, Clarke J, Inglis B 2017 *Magn. Reson. Med.* **78** 2342
- [89] Wang W, Ma P, Dong H, Krause H J, Zhang Y, Willbold D, Offenhäusser A, Gu Z 2016 *Biosens. Bioelectron.* **80** 661
- [90] Li Y Q, Dong H, Tao Q, Ye C C, Yu M M, Li J P, Zhou H F, Yang S W, Ding G Q, Xie X M 2020 *Biomaterials* **250** 120056
- [91] Jin Y R, Jia Q J, Deng H, Wang N, Jiang F Y, Tian Y, Gao M Y, Zheng D N 2015 *IEEE Trans. Appl. Supercond.* **25** 1601805
- [92] Linghu K H, Guo Z S, Wu Q H, Luo W H, Nie R J, Jin Y R, Zheng D N, Wang F R, Gan Z Z 2019 *IEEE Trans. Appl. Supercond.* **29** 1600104
- [93] Li H, Zhang S, Zhang C, Xie X 2016 *IEEE Trans. Appl. Supercond.* **26** 1601805
- [94] Tao R, Zhang S, Huang X, Tao M, Ma J, Ma S, Zhang C, Zhang T, Tang F, Lu J, Shen C, Xie X 2019 *IEEE Trans. Biomed. Eng.* **66** 1658
- [95] Tucker J, Feldman M 1985 *Rev. Mod. Phys.* **57** 1055
- [96] The EHT collaboration, 2019 *ApJL* **875** L1-6
- [97] Li J, Takeda M, Wang Z, Shi S C, Yang J 2008 *Appl. Phys.*

- Lett.* **92** 222504
- [98] Shi S C, Noguchi T, Inatani J 1997 *IEEE Trans. Appl. Supercond.* **7** 3850
- [99] Li J, Takeda M, Wang Z, Shi S C 2009 *IEEE Trans. Appl. Supercond.* **19** 417
- [100] Li J 2008 *Ph. D. Dissertation*(Nanjing: Purple Mountain Observatory, Chinese Academy of Sciences) (in Chinese) [李婧 2008 博士学位论文 (南京: 中国科学院紫金山天文台)]
- [101] Shurakov A, Lobanov Y, Goltsman G 2016 *Supercond. Sci. Technol.* **29** 023001
- [102] Klapwijk T M, Semenov A V 2017 *IEEE Trans. THz Sci. Technol.* **7** 627
- [103] Gusten R, Wiesemeyer H, Neufeld D, Menten K M, Graf U U, Jacobs K, Klein B, Ricken O, Risacher C, Stutzki J 2019 *Nature* **568** 357
- [104] Shi S C, Li J, Zhang W, Miao W 2015 *Acta Phys. Sin.* **64** 228501 (in Chinese) [史生才, 李婧, 张文, 缪巍 2015 物理学报 **64** 228501]
- [105] Zhang W, Miao W, Zhong J Q, Shi S C, Hayton D J, Vercruyssen N, Gao J R, Goltsman G N 2014 *Supercond. Sci. Technol.* **27** 085013
- [106] Zhou K M, Miao W, Gen Y, Delorme Y, Zhang W, Ren Y, Zhang K, Shi S C 2020 *Chin. Phys. B* **29** 058505
- [107] Miao W, Lou Z, Xu G Y, Hu J, Li S L, Zhang W, Zhou K M, Yao Q J, Zhang K, Duan W Y, Shi S C, Colombelli R, Beere H E, Ritchie D A 2015 *Optics. Express* **23** 4453
- [108] Miao W, Gao H, Lou Z, Hu J, Zhang W, Ren Y, Zhou K M, Shi S C, Li H, Cao J C, Delorme Y 2018 *IEEE Trans. THz Sci. Technol.* **8** 581
- [109] Ren Y, Zhang D X, Zhou K M, Miao W, Zhang W, Shi S C, Seleznev V, Pentin I, Vakhtomin Y, Smirnov K 2019 *AIP Advances* **9** 075307
- [110] Ren Y, Zhang D X, Wang Z, Zhou K M, Zhong J Q, Liu D, Miao W, Zhang W, Shi S C 2020 *Appl. Phys. Lett.* **116** 131108
- [111] Andrews D H, Brucksch W F, Ziegler W T, Blanchard E R 1941 *Physical Review* **59** 1045
- [112] Andrews D H, Jr. W F B, Ziegler W T, Blanchard E R 1942 *Rev. Sci. Instrum.* **13** 281
- [113] Andrews D H, Fowler R D, Williams M C 1949 *Physical Review* **76** 154
- [114] Lita A E, Rosenberg D, Nam S, Miller A J, Balzar D, Kaatz L M, Schwall R E 2005 *IEEE Trans. Appl. Supercond.* **15** 3528
- [115] Zhang W, Zhong J Q, Miao W, Wang Z, Liu D, Yao Q J, Shi S C, Chen T J, Wang M J 2016 *J. Low Temp. Phys.* **184** 11
- [116] Tralshawala N, Aslam S, Brekosky R P, Chen T C, Figueroa Feliciano E, Finkbeiner F M, Li M J, Mott D B, Stahle C K, Stahle C M 2000 *Nucl. Instrum. Meth. A* **444** 188
- [117] Hilton G C, Martinis J M, Irwin K D, Bergren N F, Wollman D A, Huber M E, Deiker S, Nam S W 2001 *IEEE Trans. Appl. Supercond.* **11** 739
- [118] Muramatsu H, Nagayoshi K, Hayashi T, Sakai K, Yamamoto R, Mitsuda K, Yamasaki N Y, Maehata K, Hara T 2016 *J. Low Temp. Phys.* **184** 91
- [119] Deiker S W, Doriese W, Hilton G C, Irwin K D, Rippard W H, Ullom J N, Vale L R, Ruggiero S T, Williams A, Young B A 2004 *Appl. Phys. Lett.* **85** 2137
- [120] Doriese W B, Morgan K M, Bennett D A, Denison E V, Fitzgerald C P, Fowler J W, Gard J D, Hays-Wehle J P, Hilton G C, Irwin K D, Joe Y I, Mates J A B, O'Neil G C, Reintsema C D, Robbins N O, Schmidt D R, Swetz D S, Tatsuno H, Vale L R, Ullom J N 2016 *J. Low Temp. Phys.* **184** 389
- [121] Korte P A J d, Beyer J, Deiker S, Hilton G C, Irwin K D, MacIntosh M, Nam S W, Reintsema C D, Vale L R, Huber M E 2003 *Rev. Sci. Instrum.* **74** 3807
- [122] Kiviranta M, Seppä H, Kuur J V D, Korte P D 2002 *AIP Conference Proceedings* 605 Washington DC, USA, February 2002 p295
- [123] Akamatsu H, Gottardi L, van der Kuur J, de Vries C, Ravensberg K, Adams J, Bandler S, Bruijn M, Chervenak J, Kilbourne C, Kiviranta M, van der Linden A J, Jackson B, Smith S 2016 *Proc. SPIE 9905, Space Telescopes and Instrumentation 2016: Ultraviolet to Gamma Ray*, Edinburgh, Scotland, UK, July19, 2016 p99055S-1
- [124] Irwin K D, Lehnert K W 2004 *Appl. Phys. Lett.* **85** 2107
- [125] Bennett D A, Mates J A B, Gard J D, Hoover A S, Rabin M W, Reintsema C D, Schmidt D R, Vale L R, Ullom J N 2015 *IEEE Trans. Appl. Supercond.* **25** 2101405
- [126] Irwin K D, Chaudhuri S, Cho H M, Dawson C, Kuenstner S, Li D, Titus C J, Young B A 2018 *J. Low Temp. Phys.* **193** 476
- [127] Wang Z, Zhang W, Miao W, Liu D, Zhong J Q, Shi S C 2018 *IEEE Trans. Appl. Supercond.* **28** 2100204
- [128] Zhang W, Miao W, Wang Z, Liu D, Zhong J Q, Guo X H, Wu F, Yao Q J, Shi S C 2017 *IEEE Trans. Appl. Supercond.* **27** 2100606
- [129] Zhang W, Miao W, Wang Z, Guo X H, Liu D, Zhong J Q, Yao Q J, Shi S C 2018 *J. Low Temp. Phys.* **193** 276
- [130] Ahmad K, Liu J, Li G, Liu J S, Chen W 2019 *J. Electron. Mater.* **48** 799
- [131] Ahmad K, Liu J, Liu Q C, Li G, Liu J S, Chen W 2019 *J. Electron. Mater.* **48** 925
- [132] Zhang Q Y, Liu J S, Dong W H, Wang T S, He G F, Li T F, Zhou X X, Chen W 2014 *Chinese Sci. Bull.* **59** 2292
- [133] Gao H, Liu C Z, Li Z W, Liu Y, Li Y, Li S Y, Li H, Gao G H, Lu F J, Zhang X M 2017 *Radiation Detection Technology and Methods* **1** 12
- [134] Li H, Li S Y, Liu Y, Li Y P, Cai Y, Li M, Zhao G B, Liu C Z, Li Z W, Xu H, Wu D, Zhang Y J, Fan Z H, Yao Y Q, Kuo C L, Lu F J, Zhang X 2019 *Natl. Sci. Rev.* **6** 145
- [135] Zhang Q Y, Wang T S, Liu J S, Dong W H, He G F, Li T F, Zhou X X, Chen W 2014 *Chinese Phys. B* **23** 118502
- [136] Zhang W, Geng Y, Wang Z, Zhong J Q, Li P Z, Miao W, Ren Y, Yao Q J, Wang J F, Shi S C 2019 *IEEE Trans. Appl. Supercond.* **29** 2100505
- [137] Geng Y, Zhang W, Li P Z, Zhong J Q, Wang Z, Miao W, Ren Y, Wang J F, Yao Q J, Shi S C 2020 *J. Low Temp. Phys.* **199** 556
- [138] Uhlig J, Doriese W B, Fowler J W, Swetz D S, Jaye C, Fischer D A, Reintsema C D, Bennett D A, Vale L R, Mandal U, O'Neil G C, Miaja-Avila L, Joe Y I, El Nahhas A, Fullagar W, Gustafsson F P, Sundström V, Kurunthu D, Hilton G C, Schmidt D R, Ullom J N 2015 *J. Synchrotron Radiat.* **22** 766
- [139] Gottardi L, Akamatsu H, Bruijn M P, den Hartog R, den Herder J W, Jackson B, Kiviranta M, van der Kuur J, van Weers H 2016 *Nucl. Instrum. Meth. A* **824** 622
- [140] Lee S J, Titus C J, Mori R A, Baker M L, Bennett D A, Cho H M, Doriese W B, Fowler J W, Gaffney K J, Gallo A, Gard J D, Hilton G C, Jang H, Joe Y I, Kenney C J, Knight J, Kroll T, Lee J S, Li D, Lu D, Marks R, Minitti M P, Morgan K M, Ogasawara H, O'Neil G C, Reintsema C D, Schmidt D R, Sokaras D, Ullom J N, Weng T C, Williams

- C, Young B A, Swetz D S, Irwin K D, Nordlund D 2019 *Rev. Sci. Instrum.* **90** 113101
- [141] Hashimoto T, Bennett D A, Doriese W B, Durkin M S, Fowler J W, Gard J D, Hayakawa R, Hayashi T, Hilton G C, Ichinohe Y, Ishimoto S, Morgan K M, Noda H, O'Neil G C, Okada S, Reintsema C D, Schmidt D R, Suzuki S, Swetz D S, Tatsuno H, Ullom J N, Yamada S, collaboration J P E 2020 *J. Low Temp. Phys.* **199** 1018
- [142] Cui W, Chen L B, Gao B, Guo F L, Jin H, Wang G L, Wang L, Wang J J, Wang W, Wang Z S, Wang Z, Yuan F, Zhang W 2020 *J. Low Temp. Phys.* **199** 502
- [143] Lv Y, Huang H, You T, Ren F, Ou X, Gao B, Wang Z 2020 *J. Low Temp. Phys.* in press
- [144] Xu X L, Li J J, Wang X S, Zhong Q, Zhong Y, Cao W H, Li W, Chen J, Zhao Z W, Gao Y, Liu Z, He Q 2020 *Conf. Precis. Electromagn. Meas. IEEE, Denver, USA, August 24–28 2020* p1
- [145] Zhong Q, Liu W P, Zhong Y, Wu H P, Li J J, Wang X S 2019 *OSA Contin.* **2** 2227
- [146] Chen L B, Jin H, Wang J, Pan C Z, Wu X L, Cui W, Zhou Y, Wang J J 2019 *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* **502** 012063
- [147] You L X 2020 *Nanophotonics* **9** 2673
- [148] Natarajan C M, Tanner M G, Hadfield R H 2012 *Supercond. Sci. Technol.* **25** 063001
- [149] Yang X Y, Li H, Zhang W J, You L X, Zhang L, Liu X Y, Wang Z, Peng W, Xie X M, Jiang M H 2014 *Opt. Express* **22** 16267
- [150] Li X, Tan J R, Zheng K M, Zhang L B, Zhang J L, He W J, Huang P W, Li H C, Zhang B, Chen Q, Ge R, Guo S Y, Huang T, Jia X Q, Zhao Q Y, Tu X C, Kang L, Chen J, Wu P H 2020 *Photonics Research* **8** 637
- [151] Chi X M, Zou K, Gu C, Zichi J, Cheng Y H, Hu N, Lan X J, Chen S F, Lin Z Z, Zwiller V, Hu X L 2018 *Opt. Lett.* **43** 5017
- [152] Chen J P, Zhang C, Liu Y, Jiang C, Zhang W, Hu X L, Guan J Y, Yu Z W, Xu H, Lin J, Li M J, Chen H, Li H, You L X, Wang Z, Wang X B, Zhang Q, Pan J W 2020 *Phys. Rev. Lett.* **124** 070501
- [153] Li H, Chen S J, You L X, Meng W D, Wu Z B, Zhang Z P, Tang K, Zhang L, Zhang W J, Yang X Y, Liu X Y, Wang Z, Xie X M 2016 *Opt. Express* **24** 3535
- [154] Zhu J, Chen Y J, Zhang L B, Jia X Q, Feng Z J, Wu G H, Yan X C, Zhai J Q, Wu Y, Chen Q, Zhou X Y, Wang Z Z, Zhang C, Kang L, Chen J, Wu P H 2017 *Scientific Reports* **7** 15113
- [155] Xue L, Li Z L, Zhang L B, Zhai D S, Li Y Q, Zhang S, Li M, Kang L, Chen J, Wu P H, Xiong Y H 2016 *Opt. Lett.* **41** 3848
- [156] Tang R F, Li Z L, Li Y Q, Pi X Y, Su X L, Li R W, Zhang H T, Zhai D S, Fu H L 2018 *Opt. Lett.* **43** 5488
- [157] Zhang B, Guan Y Q, Xia L H, Dong D X, Chen Q, Xu C, Wu C, Huang H X, Zhang L B 2020 *Supercond. Sci. Technol.* to be published
- [158] Yu J, Zhang R L, Gao Y F, Sheng Z H, Gu M, Sun Q C, Liao J L, Wu T, Lin Z Y, Wu P H, Kang L, Li H, Zhang L B, Zheng W 2020 *Opt. Lett.* **45** 3305
- [159] Zhong H S, Wang H, Deng Y H, Chen M C, Peng L C, Luo Y H, Qin J, Wu D, Ding X, Hu Y, Hu P, Yang X Y, Zhang W J, Li H, Li Y X, Jiang X, Gan L, Yang G W, You L X, Wang Z, Li L, Liu N L, Lu C Y, Pan J W 2020 *Science* **370** 1460
- [160] Day P K, LeDuc H G, Mazin B A, Vayonakis A, Zmuidzinas J 2003 *Nature* **425** 817
- [161] Li H J, Wang Y W, Wei L F, Zhou P J, Wei Q, Cao C H, Fang Y R, Yu Y, Wu P H 2013 *Chinese Sci. Bull.* **58** 2413
- [162] Liu Q, Xue G M, Tan X S, Yu H F, Yu Y 2017 *Chinese Phys. B* **26** 058402
- [163] He Q, Wang Y W, Wei L F To be published
- [164] Guo W, Liu X, Wang Y, Wei Q, Wei L F, Hubmayr J, Fowler J, Ullom J, Vale L, Vissers M R, Gao J 2017 *Appl. Phys. Lett.* **110** 212601
- [165] Shi Q, Lin Z H, Yang J P, Li J, Shi S C 2017 *J. Microwaves* **S1** 266 (in Chinese) [石晴, 林镇辉, 杨瑾屏, 李婧, 史生才 2017 微波学报 **S1** 266]
- [166] Liu X, Guo W, Wang Y, Dai M, Wei L F, Dober B, McKenney C M, Hilton G C, Hubmayr J, Austermann J E, Ullom J N, Gao J, Ullom J N 2017 *Appl. Phys. Lett.* **111** 252601
- [167] Liu X, Guo W, Wang Y, Wei L F, McKenney C M, Dober B, Billings T, Hubmayr J, Ferreira L S, Vissers M R, Gao J 2017 *J. Appl. Phys.* **122** 034502
- [168] Zmuidzinas J 2012 *Annual Review of Condensed Matter Physics* **3** 169
- [169] Tonouchi M 2007 *Nature Photonics* **1** 97
- [170] Barbara P, Cawthorne A B, Shitov S V, Lobb C J 1999 *Phys. Rev. Lett.* **82** 1963
- [171] Ozyuzer L, Koshelev A E, Kurter C, Gopalsami N, Li Q, Tachiki M, Kadowaki K, Yamamoto T, Minami H, Yamaguchi H, Tachiki T, Gray K E, Kwok W K, Welp U 2007 *Science* **318** 1291
- [172] Kleiner R, Wang H B 2019 *J. Appl. Phys.* **126** 171101
- [173] Gu J Q, Singh R, Han J G, Cao W, Zhang W L, Xing Q R, Tian Z 2010 *Appl. Phys. Lett.* **97** 071102
- [174] Li C, Wu J B, Jian S L, Su R F, Zhang C H, Jiang C T, Zhou G C, Jin B B, Kang L, Xu W W, Chen J, Wu P H 2017 *Appl. Phys. Lett.* **111** 092601
- [175] Zhang C H, Wu J B, Jin B B 2019 *Chin. J. Las.* **46** 42 (in Chinese) [张彩虹, 吴敬波, 金彪兵 2019 中国激光 **46** 42]
- [176] Jiang S L, Li F, Jia X Q, Kang L, Wu P H 2017 *Supercond. Sci. Technol.* **30** 044004
- [177] Yu M, Geng H F, Hua T, An D Y 2020 *Supercond. Sci. Technol.* **33** 025001
- [178] Sun H C, Wieland R, Xu Z Y, Qi Z D, Lv Y Y, Huang Y, Zhang H L, Zhou X J, Li J, Wang Y L, Rudau F, Hampp J S, Koelle D, Ishida S, Eisaki H, Yoshida Y, Jin B B, Koshelets V P, Kleiner R, Wang H B, Wu P H 2018 *Phys. Rev. Applied* **10** 024041
- [179] Hao L Y, Ji M, Yuan J, An D Y, Li M Y, Zhou X J, Huang Y, Sun H C, Zhu Q, Rudau F, Wieland R, Kinev N, Li J, Xu W W, Jin B B, Chen J, Hatano T, Koshelets V P, Koelle D, Kleiner R, Wang H B, Wu P H 2015 *Phys. Rev. Applied* **3** 024006
- [180] Sun H C, Yang Z B, Kinev N V, Kiselev O S, Lv Y Y, Huang Y, Hao L Y, Zhou X J, Ji M, Tu X C, Zhang C H, Li J, Rudau F, Wieland R, Hampp J S, Kizilaslan O, Koelle D, Jin B B, Chen J, Kang L, Xu W W, Kleiner R, Koshelets V P, Wang H B, Wu P H 2017 *Phys. Rev. Applied* **8** 054005
- [181] An D Y, Yuan J, Kinev N, Li M Y, Huang Y, Ji M, Zhang H, Sun Z L, Kang L, Jin B B, Chen J, Li J, Gross B, Ishii A, Hirata K, Hatano T, Koshelets V P, Koelle D, Kleiner R, Wang H B, Xu W W, Wu P H 2013 *Appl. Phys. Lett.* **102** 092601
- [182] Li C, Zhang C H, Hu G L, Zhou G C, Jiang S L, Jiang C T, Zhu G H, Jin B B, Kang L, Xu W W, Chen J, Wu P H 2016 *Appl. Phys. Lett.* **109** 022601

- [183] Goto E 1959 *Proc. Inst. Radio Engrs.* **47** 1304
- [184] Giordmaine J A and Miller R C 1965 *Phys. Rev. Lett.* **14** 973
- [185] Turner K L, Miller S A, Hartwell P G, MacDonald N C, Strogatz S H, and Adams S G 1998 *Nature* **396** 149
- [186] Pedersen N F, Davidson A 1981 *Appl. Phys. Lett.* **39** 830
- [187] Bryant P H, Movshovich R, Yurke B 1991 *Phys. Rev. Lett.* **66** 2641
- [188] Castellanos-Beltran M A, Irwin K D, Hilton G C, Vale L R, Lehnert K W 2008 *Nature Phys.* **4** 929
- [189] Yamamoto T, Inomata K, Watanabe M, Matsuba K, Miyazaki T, Oliver W D, Nakamura Y, Tsai J S 2008 *Appl. Phys. Lett.* **93** 042510
- [190] Bergeal N, Schackert F, Metcalfe M, Vijay R, Manucharyan V E, Frunzio L, Prober D E, Schoelkopf R J, Girvin S M, Devoret M H 2010 *Nature* **465** 64
- [191] Hatridge M., Vijay R., Slichter D. H., Clarke J, Siddiqi I 2011 *Phys. Rev. B* **83** 134501
- [192] Zhou X, Schmitt V, Bertet P, Vion D, Wustmann W, Shumeiko V, Esteve D 2014 *Phys. Rev. B* **89** 214517
- [193] Mutus J Y, White T C, Barends R, Chen Y, Chen Z, Chiaro B, Dunsworth A, Jeffrey E, Kelly J, Megrant A, Neill C, O'Malley P J J, Roushan P, Sank D, Vainsencher A, Wenner J, Sundqvist K M, Cleland A N, Martinis J M 2014 *Appl. Phys. Lett.* **104** 263513
- [194] Roy T, Kundu S, Chand M, Vadiraj A M, Ranadive A, Nehra N, Patankar M P, Aumentado J, Clerk A A, Vijay R 2015 *Appl. Phys. Lett.* **107** 262601
- [195] Frattini N E, Sivak V V, Lingenfelter A, Shankar S, Devoret M H 2018 *Phys. Rev. Applied* **10** 054020
- [196] Eom B, Day P K, LeDuc H, Zmuidzinas J 2012 *Nature Physics* **8** 623
- [197] Vijay R, Slichter D H, Siddiqi I 2011 *Phys. Rev. Lett.* **106** 110502
- [198] Lin Z R, Inomata K, Oliver W D, Koshino K, Nakamura Y, Tsai J S, Yamamoto T 2013 *Appl. Phys. Lett.* **103** 132602
- [199] Vijay R, Macklin C, Slichter D H, Weber S J, Murch K W, Naik R, Korotkov A N, Siddiqi I 2012 *Nature* **490** 77
- [200] Song C, Xu K, Liu W X, Yang C P, Zheng S B, Deng H, Xie Q W, Huang K Q, Guo Q J, Zhang L B, Zhang P F, Xu D, Zheng D N, Zhu X B, Wang H, Chen Y A, Lu C Y, Han S Y, Pan J W 2017 *Phys. Rev. Lett.* **119** 180511
- [201] Macklin C, O'Brien K, Hover D, Schwartz M E, Bolkhovskiy V, Zhang X, Oliver W D, Siddiqi I 2015 *Science* **350** 307
- [202] Yuan X 2016 *Phys. Rev. Lett.* **117** 010502
- [203] Yang R, Deng H 2020 *IEEE Trans. Appl. Supercond.* **30** 1100306
- [204] Huang K Q, Guo Q J, Song C, Zheng Y, Deng H, Wu Y, Jin Y, Zhu X B, Zheng D N 2017 *Chin. Phys. B* **26** 094203
- [205] Nakagawa H, Kurosawa I, Aoyagi M, Kosaka S, Hamazaki Y, Okada Y, Takada S 1991 *IEEE Trans. Appl. Supercond.* **1** 37
- [206] Likharev K K, Mukhanov O A, Semenov V K 1985 *SQUID85 -Superconducting Quantum Interference Devices and their Applications* Berlin, Germany, June 25–28, 1985 p1103
- [207] Likharev K K, Semenov V K 1991 *IEEE Trans. Appl. Supercond.* **1** 3
- [208] Chen W, Rylyakov A V, Patel V, Lukens J E, Likharev K K 1999 *IEEE Trans. Appl. Supercond.* **9** 3212
- [209] Ishida K, Tanaka M, Nagaoka I, Ono T, Kawakami S, Tanimoto T, Fujimaki A, Inoue K 2020 *IEEE Symposium on VLSI Circuits Honolulu HI, USA, June 16–19, 2020* p1
- [210] Horst Rogalla, Peter H Kes 2012 *100 Years of Superconductivity* (London: Taylor & Francis) pp440–458
- [211] [<http://www.hypres.com>[2020-10-1]]
- [212] Bunyk P I, Hoskinson E M, Johnson M W, Tolkacheva E, Altomare F, Berkley A J, Harris R, Hilton J P, Lanting T, Przybysz A J, Whittaker J 2014 *IEEE Trans. Appl. Supercond.* **24** 1700110
- [213] McDermott R, Vavilov M G, Plourde B L T, Wilhelm F K, Liebermann P J, Mukhanov O A, Ohki T A 2018 *Quantum Sci. and Technol.* **3** 024004
- [214] Yoshikawa N 2019 *IEICE Trans. Electron* **E102-C** 217
- [215] Terai H, Miki S, Yamashita T, Makise K, Wang Z 2010 *Appl. Phys. Lett.* **97** 112510
- [216] Ren J, Semenov V K 2011 *IEEE Trans. Appl. Supercond.* **21** 780
- [217] Takeuchi N, Yamae T, Ayala C L, Suzuki H, Yoshikawa N 2019 *Appl. Phys. Lett.* **114** 042602
- [218] [<https://irds.ieee.org> [2020-10-1]]
- [219] Akaike H, Tanaka M, Takagi K, Kataeva I, Kasagi R, Fujimaki A, Takagi K, Igarashi M, Park H, Yamanashi Y, Yoshikawa N, Fujiwara K, Nagasawa S, Hidaka M, Takagi N 2009 *Physica C* **469** 1670
- [220] Cao W H, Li J J, Zhong Q, Guo X W, He Q, Chi Z T 2012 *Acta Phys. Sin.* **61** 170304 (in Chinese) [曹文会, 李劲劲, 钟青, 郭小玮, 贺青, 迟宗涛 2012 物理学报 **61** 170304]
- [221] Cao W H, Li J J, Zhong Y, He Q 2015 *Chinese Phys. B* **24** 127402
- [222] Cao W H, Li J J, Wang L R, Zhong Y, Zhong Q 2020 *Chinese Phys. B* **29** 067404
- [223] Wang L R, Li J J, Wang X S, Zhong Y, Tong J, Cao W H, Zhong Q 2021 *IEEE Trans. Appl. Supercond.* **31** 1500104
- [224] Cao W H, Li J J, Zhong Y, Gao Y, Li H H, Wang Z Y, He Q 2016 *Chinese Phys. B* **25** 057401
- [225] Wang L R, Zhong Y, Li J J, Qu J F, Zhong Q, Cao W H, Wang X S, Zhou Z Q, Fu K, Shi Y 2018 *Acta Phys. Sin.* **67** 108501 (in Chinese) [王兰若, 钟源, 李劲劲, 屈继峰, 钟青, 曹文会, 王雪深, 周志强, 付凯, 石勇 2018 物理学报 **67** 108501]
- [226] Zhou K L, Qu J F, Benz S P 2015 *IEEE Trans. Appl. Supercond.* **25** 1400806
- [227] Zhou K L, Han Q N, Zhao J T, Lu Y F, Shi Y, Yang Y, Qu J F 2020 *Acta. Metrol. Sin.* **41** 1 (in Chinese) [周琨荔, 韩琪娜, 赵建亭, 鲁云峰, 施杨, 杨雁, 屈继峰 2020 计量学报 **41** 1]
- [228] Qu J F, Benz S P, Pollarolo A, Rogalla H, Tew W L, White D R, Zhou K L 2015 *Metrologia* **52** S242
- [229] Qu J F, Benz S P, Coakley K, Rogalla H, Tew W L, White D R, Zhou K L, Zhou Z Y, 2017 *Metrologia* **54** 549

SPECIAL TOPIC—Superconductivity and its applications

Recent progress of superconducting electronics in China *

Li Chun-Guang¹⁾²⁾ Wang Jia¹⁾²⁾ Wu Yun¹⁾²⁾ Wang Xu¹⁾²⁾ Sun Liang^{1)2)3)†}
 Dong Hui²⁾⁴⁾ Gao Bo²⁾⁴⁾ Li Hao²⁾⁴⁾ You Li-Xing²⁾⁴⁾ Lin Zhi-Rong²⁾⁴⁾
 Ren Jie²⁾⁴⁾ Li Jing⁵⁾ Zhang Wen⁵⁾ He Qing⁶⁾ Wang Yi-Wen⁷⁾
 Wei Lian-Fu⁶⁾⁸⁾ Sun Han-Cong⁹⁾¹⁰⁾ Wang Hua-Bing⁹⁾¹⁰⁾
 Li Jin-Jin¹¹⁾ Qu Ji-Feng¹¹⁾

1) (*State Key Laboratory of Superconductivity, Institute of Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China*)

2) (*CAS Center for Excellence in Superconducting Electronics, Shanghai 200050, China*)

3) (*Songshan Lake Materials Laboratory, Dongguan 523808, China*)

4) (*State Key Laboratory of Functional Materials for Informatics, Shanghai Institute of Microsystem and Information Technology, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200050, China*)

5) (*Purple Mountain Observatory, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210023, China*)

6) (*School of Information Science and Technology, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China*)

7) (*School of Physical Science and Technology, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China*)

8) (*College of Science, Donghua University, Shanghai 210031, China*)

9) (*Research Institute of Superconductor Electronics, Nanjing University, Nanjing 210046, China*)

10) (*Purple Mountain Laboratories, Nanjing 211111, China*)

11) (*National Institute of Metrology, Beijing 100029, China*)

(Received 14 December 2020; revised manuscript received 23 December 2020)

Abstract

It has been nearly 110 years since the discovery of superconductors, and more than 30 years since the discovery of high temperature superconductors (HTS). Great progress has been made in the application of superconducting electronics in the last two decades. HTS microwave devices have shown much higher performance than the traditional ones and have found their ways to the industry applications in mobile communication, radar, and special communication applications. Owing to the ultrahigh sensitivity to magnetic fields and currents, superconducting quantum interference devices (SQUIDs) have been used as the irreplaceable sensors in geological surveying, magnetic resonance imaging, biomagnetic imaging, and other areas. The sensitivity of superconducting radiation detectors such as superconducting SIS mixer, superconducting hot electron bolometer, superconducting transition edge sensor, superconducting nanowire single photon detector, and superconducting microwave kinetic inductance detector are near the quantum limitation. They are now key

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 51972012, 61971415, 61601456, 61971408, 61671438, 61827823, 11673073, U1831202, 11974290, 61871333, 11653004, 61727805, 11961141002), Key Research and Development plan of the Ministry of Science and Technology, China (Grant Nos. 2017YFA0304000, 2017YFA0304003), the National Basic Research Program of China (Grant No. 2010CB923104), the Strategic Priority Research Program of Chinese Academy of Sciences (Grant No. XDA18000000) and the Youth Innovation Promotion Association, Chinese Academy of Sciences (Grant No. 2017009) .

† Corresponding author. E-mail: sunliang@iphy.ac.cn

technology in geophysics, astrophysics, quantum information science, biomedicine, and so on. Superconducting Josephson parametric amplifier has become a key element for superconducting quantum computing. Superconducting integrated circuit has been included in the international roadmap for devices and systems, and shows that having the potential to become one of the mainstreams for post-Moore information processing technology. In metrology, superconducting Josephson effect and Josephson junction array devices have been widely used in the redefinition of quantum voltage reference and basic units of the International system of Units. Superconducting electronics plays an important role in the current quantum information technology boom, which in turn promotes the development of superconducting electronics. This review will brief introduce the research and application of superconducting electronics in China in recent years.

Keywords: superconducting electronics, HTS microwave device, superconducting sensor/detector, superconducting digital circuits

PACS: 85.25.-j, 07.57.-c, 84.40.-x

DOI: [10.7498/aps.70.20202121](https://doi.org/10.7498/aps.70.20202121)

In Press