

超导“小时代”之十一 群殴的艺术

罗会仟[†]

(中国科学院物理研究所 罗会仟 100190)

2016-08-11 收到

[†] email: hqluo@iphy.ac.cn

DOI: 10.7693/wl20160908

积羽沉舟，群轻折轴，众口铄金，积毁销骨。

——司马迁《史记·张仪列传》

战争是人类历史上有组织有纪律的群殴，纵观世界历史上大大小小的战争，基本上以少胜多或弱者战胜强者的例子极少，只要有即可列

入史上著名战争之一。换言之，基本上临时拼凑的杂牌军很难在规模宏大的正规军面前取得胜利^[1]。这背后其实蕴含着一个非常简单的物理原理：正规军所处能量状态和无序度要比杂牌军低。阵法分明、训练有素的正规军在战斗中体现的是排列有致、整齐划一，不仅在气势上压倒敌人，在实战中还可以根据形势实施高效有力的打击或防御。相比之下，杂乱无章、不听指挥、效率低下的杂牌军就很可能一触即溃。总之，处于低能有序稳定态的正规军，在大部分情况下完全可以无情地碾压杂牌军，因为相对而言敌人处于高能无序亚稳态，战争消耗必然要大得多。战场前线从正规军冲到杂牌军，就是一个熵增加的过程(图1)。

等等，熵？是个什么玩意儿？

大多数人应该听说过智商和情商，是衡量一个人的智力和情绪重要指数。智商的定义为：智力年龄除以生理年龄然后乘以100，是个商系数值。智商为200分制，低于25属于白痴，高于140属于天才，有兴趣的朋友自行对号入座。物理学上的熵，是热力学中的一个极其重要且基本的概念，甚至比温度等概念更为重要，堪称热力学之魂。熵的概念是由热力学祖师爷之一

——克劳修斯于1854年引入的，意为简单描述热力学第二定律的态函数。该自然基本定律如此描述道：“热量从低温向高温物体传递而不产生任何其他影响是不可能的”^[2]。对可逆热力学过程，可以用流入系统热量与温度之商来定义一个和循环路径无关的态函数，克劳修斯结合德语中的能量(die Energie)和转变(trope)两个词命名这个态函数为Entropy。据说后来中国物理学家胡刚复于1923年仿克劳修斯造新词的style，将其翻译为“熵”，也是取其商的形式定义及热力学属性结合而成。因此，和智商的定义类比，物理学中的熵，可谓是“热商”^[3]。

然而，熵并不仅仅是一个简单热力学商值，这个概念蕴含着极其重要的物理思想。在麦克斯韦、玻尔兹曼、普朗克等著名理论物理学家的步步深入挖掘下，熵的定量表达式最终得以给出。这一系列研究构筑了宏观和微观之间的重要桥梁——统计物理学。麦克斯韦成名于他的电磁学统一理论，即著名的麦克斯韦方程组。1871年，麦克斯韦出任剑桥大学物理学教授，负责筹建卡文迪许实验室，并对更多的物理问题产生了浓厚兴趣。其中一项重要贡献就是他提出的气体分子动力学假说，他认为气体是由一

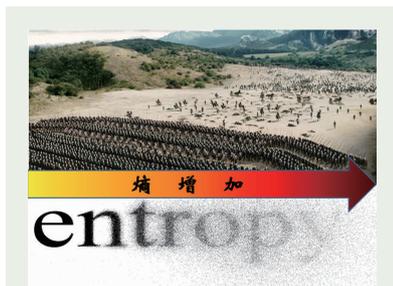


图1 熵增加与无序度(来自cdn1.digitalartsonline.co.uk 及 vignette3.wikia.nocookie.net)

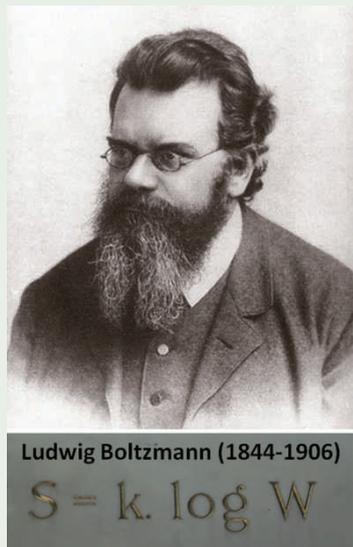


图2 玻尔兹曼和刻在他墓碑上的熵公式(来自英文维基百科)

个个独立的微小分子组成，它们的集体运动规律决定了气体的宏观性质。1872—1875年间，来自奥地利的天才物理学家路德维希·玻尔兹曼进一步发展了麦克斯韦分子运动论，他用概率统计的方法，引入能量均分理论，用于描述大量气体分子的运动状态。玻尔兹曼给出一个极其重要的结论：一切自发过程，总是从概率小的有序态向概率大的无序态变化。而我们熟知的热力学中的熵，其实是刻画系统无序度的物理量。1900年，普朗克将玻尔兹曼的研究写成一个极其简洁的表达式： $S=k \log W$ 。其中 W 就是系统的宏观状态数或称宏观态出现概率， S 即系统的熵， k 是物理学常数，后命名为玻尔兹曼常数。可以说，玻尔兹曼的熵公式，其优美程度和麦克斯韦方程组不相上下，甚至比其更加深刻地揭示了微观物理世界的基本规律，影响整个物理学至今(例如著名的薛定谔方程就可能是借鉴该公式而来)^[3]。不幸的是，天才往往超越他所处的时代，玻尔兹曼做出这些研究的时候，量子论尚未建立，关于原子的概念是否存在仍然有极大的争议。玻尔兹曼与奥斯特瓦尔德之间发生了激烈的“原子论”和“唯能论”之争，后者背后是理论物理“教父”级人物——恩斯特·马赫。尽管当时资历尚浅的普朗克(时为玻尔兹曼助手)站在了玻尔兹曼的一边，但于事无补，面对大牛群体的激烈质疑，玻尔兹曼对当时物理界充满了厌恶和愤懑。1906年，痛苦压抑绝望之极的玻尔兹曼，选择了饮弹自杀，一代物理天才陨落在了无谓的人身攻击和纷争之中。如果玻尔兹曼能在黑暗年代坚持下去的话，或许他将见证甚至亲自推动物理学史上前所未有的新

革命。1900年，普朗克在黑体辐射研究中首次提出量子论；1905年，爱因斯坦借鉴量子论提出了光量子假说；随后十几年间，量子力学在玻尔、海森伯、德布罗意、薛定谔、玻恩等人的努力下迅速建立；数十年后，人们已经可以从实验上直接观察甚至操纵单个原子。原子的客观存在不容置疑，玻尔兹曼理论也得到了迟来的肯定，奈何天意弄人，空留慨叹。玻尔兹曼被葬在了维也纳中央公墓，墓碑上刻有他的名字、生卒年月，和著名的玻尔兹曼熵表达式(图2)^[4]。

根据热力学，对于一个孤立系统，体系的熵是恒增加的，也就是说系统的状态数总是在增加，趋于无序状态。要注意的是，严格意义上来说，这里的状态数是在相空间，表征的是系统个体步调一致程度，和我们实空间直观上的无序度有一定区别。玻尔兹曼的熵公式明确告诉我们，系统的宏观状态数和微观运动存在必然联系，因此，理论上，研究一个系统熵的变化，就可以从热力学上给出它的微观集体行为。只是，实验上并非如此轻而易举，因为直接测量熵本身存在许多困难。在实验研究物体热力学性质时，人们通常采用的是测量系统的比热、热导等比较直接的方法，通过对比热和温度之商的积分，可以得到系统熵的相对变化，进一步推断系统是否发生了热力学意义上的宏观行为。就像一群人吃芝士火锅一样，完整的热力学实验包括热源(炉子)、量

热器(锅)、样品(芝士)、温度计(餐具)、观测者(人)等重要因素，才可以给出热力学参量的演化信息(图3)。

当一个系统的热力学参量发生突变的时候，物理上往往就称其发生了热力学“相变”，系统从一个状态相转化成了另一个状态相，水变冰就是一种典型的物理相变^[5](注：关于热力学相变的具体分类和理论描述，将在下一篇详述)。类似地，超导现象发生前后，材料的电阻突降为零，体内磁感应强度也变为零，这是否意味着，超导会是一种热力学相变呢？

答案是肯定的！

实验测量超导材料的比热就会发现，超导现象的出现，伴随着比热的跃变发生——超导态的比热会突然增加。详细的研究表明，这个比热跃变来源于材料内部的电子体系，即电子的比热发生了跃变，而材料的晶体结构和晶格比热并未发生突变。因此，超导现象的发生实际上是材料内部电子体系的一种相变过程，对应着电、磁、热等多种“异常”物理现象。零电阻、完全抗磁性、比热跃变是完整描述一个超导相变的三个典型特征，其中零电阻和完全抗磁性各自独立，而比热



图3 热力学的实验研究方法(来自 dpmc.unige.ch)

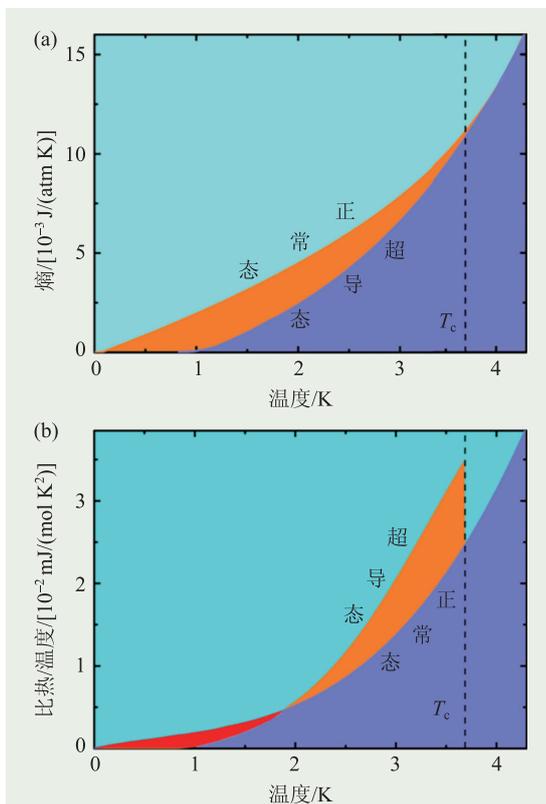


图4 超导相变过程比热和熵的变化

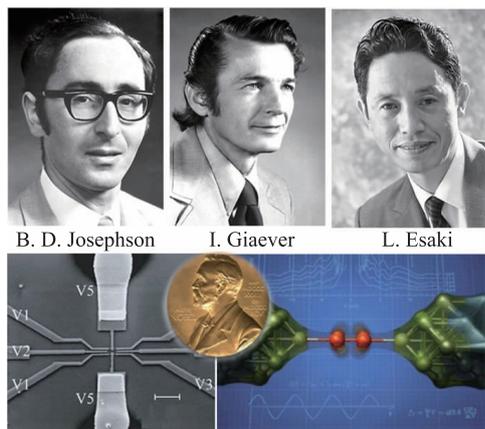


图5 1973年诺贝尔物理学奖获得者：约瑟夫森、贾埃沃、江崎玲于奈(来自英文维基百科)

跃变则揭示了超导作为热力学相变的重要属性^[6](图4(b))。

在一般金属材料中，其比热系数主要来源于和温度成正比的电子运动比热，以及和温度呈三次方关系的晶格振动比热。倘若不存在超导相变，比热/温度比值将和温度本

身成二次方关系，我们可以定义其为“正常态比热”。发生超导相变后，电子体系的比热将发生跃变，而晶格比热规律不变，我们称之为“超导态比热”。将正常态和超导态下的比热/温度值对温度进行积分，就可以得到系统熵对温度的依赖关系。一个非常明显的事实是，超导态的熵要低于正常态，且越到低温差距越大(图4(a))。这说明，超导相变是电子体系熵减小的过程，电子系统从相对无序态进入到了有序态。进一步把熵对温度进行积分，就可以得到材料体系的自由能。因为超导态的熵要低，对应系统的自由能也就减少了。这意味着，超导态是材料中电子体系的一种低能凝聚现象，其减少的自由能又被称为“超导凝聚能”。由于固体材料中电子体系相变根源于微观量子相互作用，超导可以划分为电子体系有序化的一种“宏观量子凝聚态”，这是超导热力学给我们的重要启示!^[7]

正是因为认识到超导属于电子体系的宏观量子态，物理学家才得以从微观上揭示超导的物理本质——材料中近自由运动的电子两两配对并集体凝聚到低能组态(详见本系列后续篇)。物理上描述微观粒子集体行为有一个非常简单的量——

位相，相当于每个粒子运动的“步调”。由于超导电子是集体凝聚行为，同一个超导体内电子将步调一致，即共享一个位相。也就是说，所有的超导电子可以看做一个和谐的整体，它们按照共同的旋律来运动^[8]。

一个有趣的问题随之产生：如果让两个不同超导体中的电子相遇，会发生什么事情？显然，超导体A中的电子有A型位相，超导体B中的电子有B型位相，相遇后谁跟着谁的步调呢？就像两支训练有素的正规军相遇，一言不合，群殴大战就爆发。何解？

1962年，剑桥大学一名22岁的二年级研究生仔细思考了这个问题，并从理论上给出了自己的答案。两个中间隔着薄薄一层绝缘体的超导体，在不加外界电压情况下，就会因为相位差异而形成“超导隧道电流”，超导电子可以量子隧穿到另一个超导体中；在加上外界电压之后，则会形成高频交流电流，其频率是量子化的。这种奇异的量子效应称之为“超导隧道效应”，后以发现人名字命名为“约瑟夫森效应”^[9]。据说，当年刚刚跨入研究门槛的布莱恩·约瑟夫森苦于寻找研究课题，偶然机会拜访凝聚态物理大牛菲利普·安德森后，向其请教可能的课题，安德森便建议理论研究超导隧道效应。约瑟夫森用简单的数学方法很快就得到了上述结果，但预言的现象实在太奇特，即使论文发表后他自己都还忐忑不安。幸运的是，实验技术走在了理论前面，1958年，江崎玲于奈实现了半导体材料的隧道二极管，1960年贾埃沃就已在铝/氧化铝/铅复合薄膜中观测到了超导隧道电流^[10]。约瑟夫森理论出来三个月

后，安德森的研究组就成功在锡/氧化锡/锡薄膜中全面验证了他的理论^[11]。因为半导体和超导体中量子隧道效应的成功实验和理论，江崎玲于奈、贾埃沃、约瑟夫森分享了1973年的诺贝尔物理学奖，其中约瑟夫森时年33岁(图5)。遗憾的是，直到如今，约瑟夫森的下半生精力都贡献给了包括特异功能在内的超自然力研究，逐渐走向边缘化了。

约瑟夫森效应的发现，开启了超导应用的新天地——超导电子学，其基本单元就是超导体/绝缘体/超导体构成的约瑟夫森结。超导应用不再局限于输电、强磁场、磁悬浮等强电领域，利用超导隧道效应或超导材料本身制作的电子学器件，是超导弱电应用的重要代表，具有非常广泛的用途。如果您已认识到超导是一种宏观量子凝聚态，那么理解超导隧道效应其实也非常简单。量子力学告诉我们，微观粒子具有不费吹灰之力的“穿墙术”——通过量子隧穿效应越过壁垒到另一侧，超导体中的电子也不例外。由于超导态下电阻为零，即使零电压也可以维持超导隧穿电流的存在。当超导体A中的一群电子量子隧穿到超导体B中遇到另一群电子时，他们将因为相位的不同而“群殴”。只要稍微改变两个超导体的相位差(如施加外磁场)，就可以实现不同的“群殴模式”——超导隧道电流会出现强度调制。这就像光学中的夫琅禾费衍射一样，平行光通过小孔会在远处屏上出现明暗相间的条纹，这恰恰说明了光的波动性和量子本质，也告诉我们超导隧道效应必然是一种量子力学现象(图6)^[12]。

超导隧道电流对外磁场极其敏

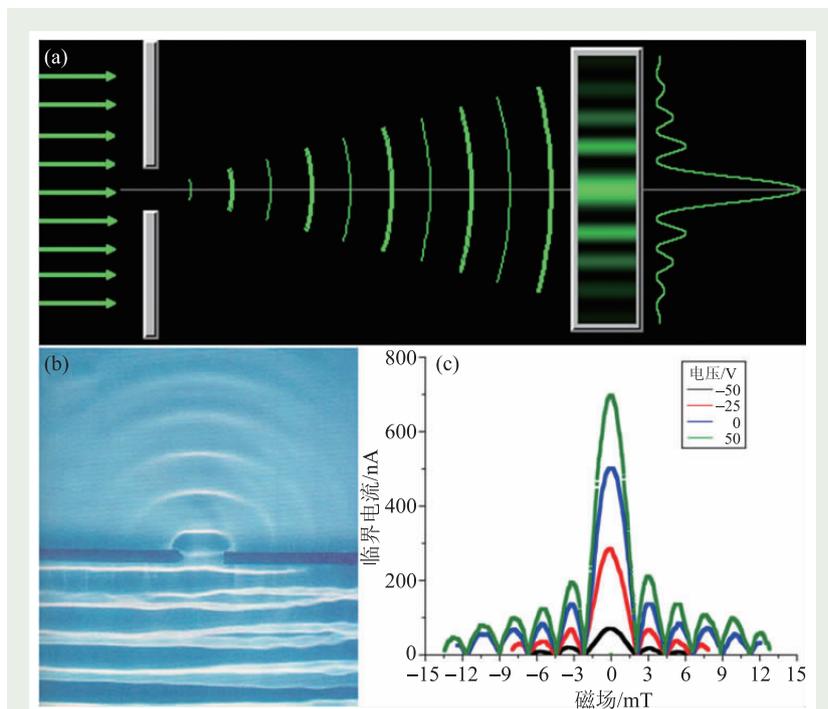


图6 (a)光的衍射；(b)水波衍射；(c)约瑟夫森结电流(来自 labman.phys.utk.edu 及 Nature.com)

感，因为即使发生最小的磁通量变化——单位磁通量子($\Phi_0 = h/2e \approx 2 \times 10^{-15} \text{ Wb}$)，也会引起超导体相位差的变化，从而形成对超导隧道电流的调制。正是由于超导材料的神奇量子特性，利用约瑟夫森效应，可以做极其精密的超导量子干涉仪(Superconducting Quantum Interference Device, 缩写为SQUID)^[13]。具有并联双约瑟夫森结的直流SQUID，可以探测 10^{-13} T 的微弱磁场，相当于地

磁场($5 \times 10^{-5} \text{ T}$)的几亿分之一(图7(a))。在交流条件下工作的单结射频SQUID，甚至可以探测 10^{-15} T 的微弱磁场。可以说，SQUID是目前世界上最精密的磁测量器件，仅受

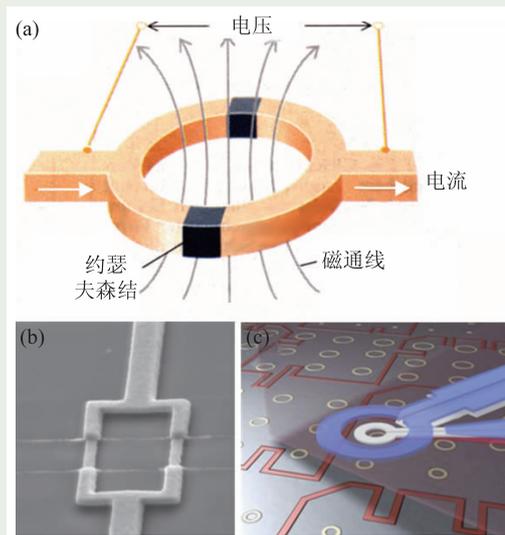


图7 超导量子干涉仪 (a)原理示意图；(b)实物；(c)扫描功能器件(来自 www.engr.sjsu.edu, www.supraconductivite.fr 及 www.quantuminfo.physik.rwth-aachen.de)

到了量子力学基本原理的限制(图7(b))^[14]！如今SQUID已广泛应用于商业化仪器，在微弱磁信号测量中大有用武之地。将SQUID安装在微尺度扫描探头上，能够清晰地测量

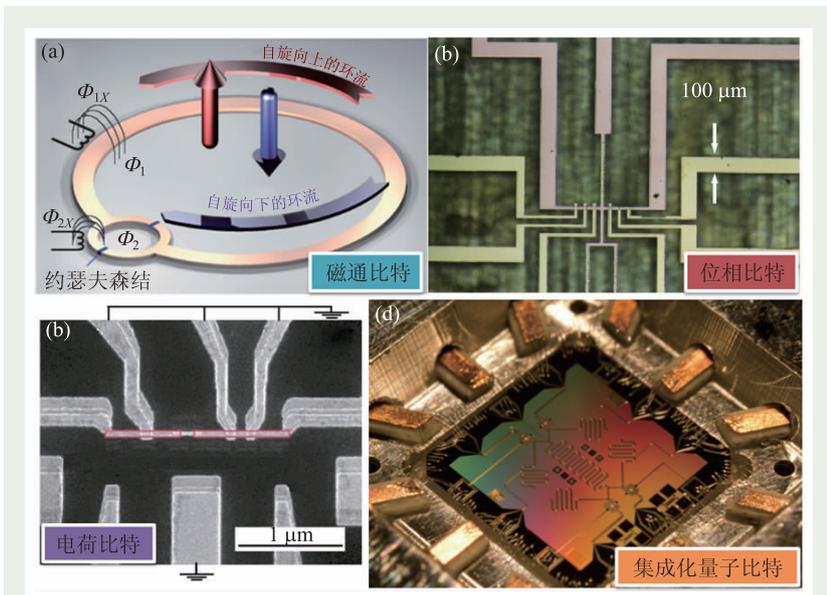


图8 多种超导量子比特(来自 web.physics.ucsb.edu 及 南京大学于扬教授)

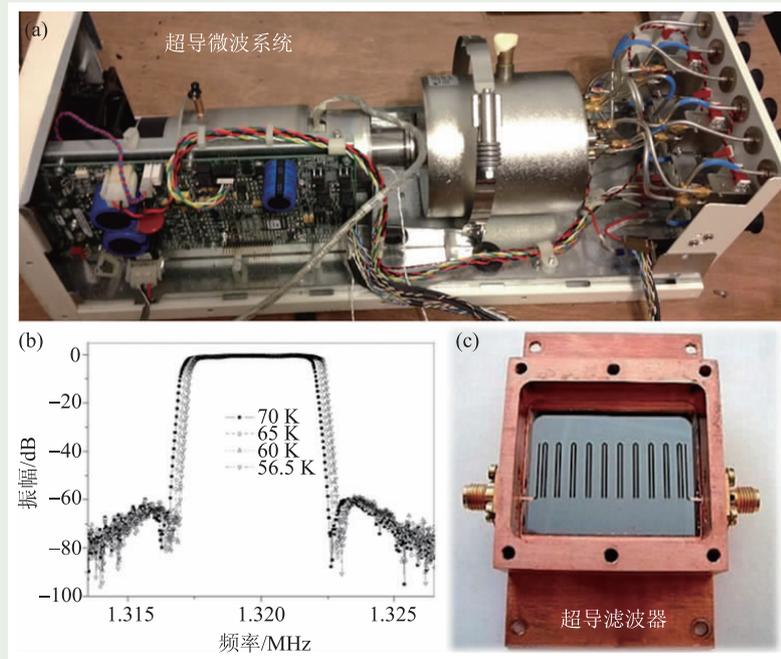


图9 超导微波器件(来自 iopscience.iop.org 及 www.supotech.com)

材料中的磁场分布,可轻松用于检测诸如CPU之类大规模集成电路中的缺陷(图7(c))。基于SQUID技术,还能够探测 10^{-9} T到 10^{-6} T之间的生物磁场,将有可能在未来实现脑磁图和心磁图的扫描,或给生物医学带来新的技术手段,揭开候鸟和海洋生物远距离迁徙的秘密。

超导电子学另一个极其重要的应用就是基于超导约瑟夫森结的超导量子比特,根据其利用超导电子的不同性质(自旋、电荷、位相),又分为超导磁通比特、电荷比特、位相比特等三类(图8)^[15, 16]。打开你的电脑机箱,在主板核心位置就会发现计算机的CPU,它是电脑的

“神经中枢”,其中大量的“神经元”就是由半导体电子学器件——经典比特构成。摩尔定律告诉我们,计算机每秒的运行次数随着年代在持续增长,但是总有一天会遇到尽头——因为经典比特的电路宽度不能无限小,终将触碰到量子极限。当集成电路单元越来越小的时候,量子效应的凸显会让所有经典的电路失效,最后电脑里只能用越来越多个核来克服无法集成更多电路的困境,即便如此,该困境预计会在未来十年内走到绝境。看来逃避量子效应并不是一个好办法!既然躲不起,那不如惹得起!主动利用起量子效应,把半导体电子学器件“进化”为超导电子学器件,大胆用起超导量子比特,把现在的经典计算机量子化,实现高速并行的量子计算^[17]。当然,实现量子计算机有很多途径,未必要采用超导材料。但固态化、集成方便、易于工业化生产等是超导量子比特的得天独厚优势,特别是其加工方法和半导体工艺相近,是最有可能实现从经典计算机过渡到量子计算机的途径。不过由于超导的零电阻效应,超导电子学器件运行能耗几乎为零,再也不用发愁CPU温度过高的问题了。量子计算的效率有多高?由于量子叠加效应,仅仅需要32个量子比特就能存储4 GB的信息量!现如今用大型服务器制作IMAX高清动画可能需要数年时间,但换到量子计算机上也许就分分钟搞定。未来的美好简直不敢想象!

除了利用超导材料中的奇异量子效应之外,单纯利用超导的零电阻优势制作微波器件也是超导弱电应用的重要领域。普通金属材料存在电阻,因此作为微波器件必然存在损耗,无法达到理想的电子学性

能。如今社会离不开通讯和数据传输,保证通讯质量和效率的办法就是尽可能提高信号识别度和降低器件的损耗率,超导材料做成的微波系统是唯一有效的方案(图9(a))。超导滤波器具有极小的插入损耗、极高的带边陡度和极深的带外抑制等多重优势,在移动通讯、国防军事、航空航天等多个方面已有重要应用(图9(b))^[18]。早在2004年,中国联通的CDMA移动通讯基站就试用了超导滤波器。而在3G/4G基站中,高性能超导滤波器也是让手机不串号不混流量的重要法宝(图9(c))。2008年汶川大地震,科技人员制造的超导滤波器及时送出了清晰的遥感地图,为救灾抢险指明了路径。2012年,我国首颗民用新技术试验卫星——实践九号A星搭载超导滤波器上天试验,首次完成了超导器件的空间实验。2016年,超导滤波系统将成为天宫二号的重要仪器,再次上天。如今,超导滤波器已经走向了产业化道路,未来正是蓬勃发展的黄金期。

不仅是微波,对介于无线电波

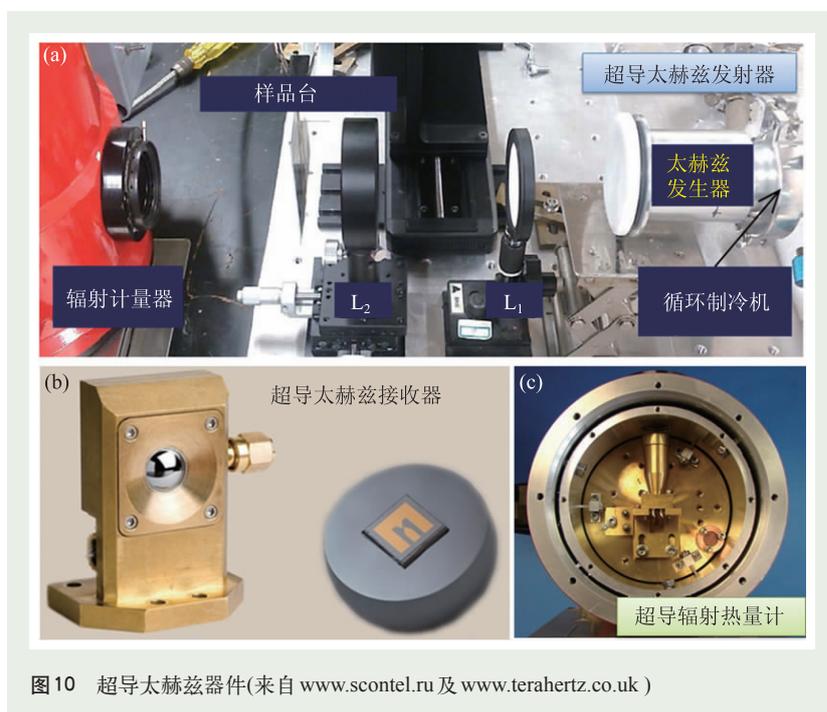


图10 超导太赫兹器件(来自 www.scontel.ru 及 www.terahertz.co.uk)

和光波频段之间的太赫兹波段,超导材料器件也大有可为。由于太赫兹在非金属断层探测成像、基因和细胞水平成像、化学和生物检查、宽带通信和微波定向等多个方面具有难以替代的优势,其技术发展有着巨大的应用价值^[19]。目前,研发太赫兹发射器、接收器、雷达、成像仪和通讯系统均处于起步阶段,

部分器件也利用了超导材料的优异性能(图10)^[20]。

无论是简单利用超导材料的零电阻和抗磁性优势,还是较为复杂地利用其宏观量子特性,超导材料的弱电应用都已经悄然改变了我们的生活。在值得期待的未来,超导的各种应用将会带来更多的惊喜!

参考文献

- [1] 黄于. 世界是部战争史. 浙江:浙江人民出版社,2011
- [2] 冯端,冯少彤. 嫡的世界. 北京:科学出版社,2005
- [3] 曹则贤. 物理,2009,38(9):675
- [4] Jaynes E T. American Journal of Physics, 1965, 33:391
- [5] 于渌,郝柏林. 相变和临界现象. 北京:科学出版社,1980
- [6] 刘兵,章立源. 超导物理学发展简史. 陕西:陕西科学技术出版社,1988
- [7] 张裕恒. 超导物理. 合肥:中国科学技术大学出版社,1997
- [8] 陈式刚等. 高温超导研究. 四川教育出版社,1991
- [9] Josephson B D. Phys. Lett., 1962, 1:251
- [10] Giaever I. Phys. Rev. Lett., 1960, 5:464
- [11] Anderson P W, Rowell J M. Phys. Rev. Lett., 1963, 10:230
- [12] Cho S. Nature Commun., 2013, 4:1689
- [13] Jaklevic R C, Lambe J, Silver A H *et al.* Phys. Rev. Lett., 1964, 12:159
- [14] Clarke J. Phil. Mag., 1966, 13:115
- [15] Yu Y *et al.* Science, 2002, 296:889
- [16] Yamamoto T *et al.* Nature, 2003, 425:941
- [17] Johnson M W *et al.* Nature, 2011, 473:194
- [18] Li C G *et al.* Supercond. Sci. Technol., 2006, 19:S398
- [19] Nakade K *et al.* Scientific Reports, 2016, 6:23178
- [20] Welp U *et al.* Nature Photonics, 2013, 7:702