

半导体制冷技术原理与应用

李洪斌 杨先

半导体制冷 (Semiconductor refrigeration) 又称电子制冷、温差制冷或者热电制冷,是上世纪 60 年代后迅速发展起来的一项制冷技术。与普通制冷技术不同,半导体制冷不采用压缩机和制冷剂,不依赖制冷剂的相变传递热量,在直流电流通过具有热电转化效应的导体组成的回路时,利用热量转移特性制冷,是一种科技含量高的全新制冷技术。半导体制冷系统无压缩机和制冷工质、结构简单、成本低、寿命长、绿色环保,工作过程无振动、无噪音,也不必担心工质泄露破坏大气层,目前已在低温超导技术、低温生物学、低温外科学,低温电子学,通讯技术,红外技术,激光技术,以及空间技术等领域广泛应用。

一、半导体制冷原理及特点

热电效应是半导体制冷的最基本依据,其中最著名的是塞贝尔效应和珀尔帖效应。1821 年塞贝尔发现在用两种不同导体组成闭合回路中,当两个连接点温度不同时 ($T_1 < T_2$),导体回路就会产生电动势(电流),即塞贝尔效应(图 1)。1834 年,法国科学家珀尔帖在此基础上做了一个相反的实验:用两种不同导体组成闭合回路,并通直流电,连接处出现了一端冷、一端热的现象,即珀尔帖效应。显然其本质就是塞贝尔效应的逆效应(图 2)。



图 1 塞贝尔效应

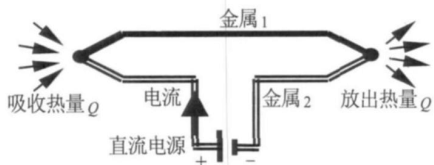


图 2 珀尔帖效应

普通金属导体的珀尔帖效应微弱,制冷效果不佳。例如当时曾用金属材料中导热和导电性能最好的铋-铋 (Sb-Bi) 热电偶做成制冷器,但其制冷效率还不到 1%,根本没有实用价值,因此珀尔帖效应长时间不受重视。但是随着材料科学的进一步发展,人们发现半导体材料的珀尔帖效应远强于普通金属。

由 3 块金属板 (1、2、3) 和一对电偶臂 (由一块 P 型半导体和一块 N 型半导体构成) 组成的热电偶,在通以图 3 所示的电流时,金属板 1 会从周围吸收热量,而金属板 2、3 则释放热量。金属板 1 作为工作端可达到制冷目的,将电源极性反过来(即通以反方向电流),金属板 2、3 吸收热量,金属板 1 释放热量,还把板 1 作为工作端,就是制热器了。实验表明,与普通金属相比,半导体电路的珀尔帖效应明显增强。图 3 中这对电偶制冷量很小,通常只有几百毫瓦到二三瓦之间,一般不能满足制冷需要。为了得到更好的制冷效果,通常串联、并联、混联上述电偶组成制冷电堆,获得数瓦到数千瓦的制冷量。

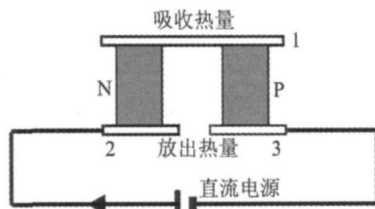


图 3 半导体制冷原理示意图

通常半导体制冷器由许多 N 型和 P 型半导体组成,N、P 结之间以一般导体连接成完整线路,通常采用铝、铜或其他金属导体,最后像夹心饼干一样,外夹两片陶瓷片。陶瓷片必须绝缘,而且导热性能良好(图 4)。

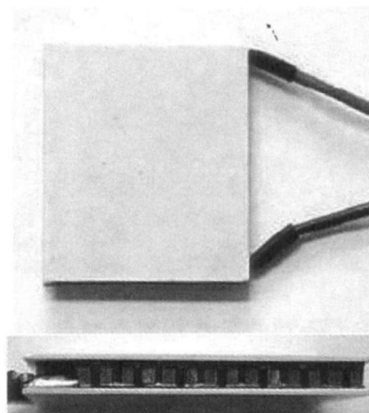


图 4 半导体制冷器实物图

并非所有半导体材料都能制作半导体制冷器,这里所说的半导体材料不是大家熟悉和常见的制造二极管、三极管等电子器件的硅 (Si) 或锗 (Ge),而是相对复杂的化合物半导体,如 P 型的 Bi_2Te_3

Sb_2Te_3 、 $AgTiTe$ 、 $AgCuTiTe$ 及 N 型的 $Bi-Sb$ 合金等。衡量半导体材料热电性能的系数用 Z 表示,称为优值系数。它是一个与材料的温差电动势率、电导率、电阻率、热导率(包括晶格热导率、电子热导率)相关的综合参数,其量纲为 K^{-1} 。上述几种材料的 Z 值在 $3 \times 10^{-3} K^{-1}$ 左右。该值越大,说明材料的热电性能越好,制作的制冷器在相同条件下的制冷效率就越高。同种半导体材料的 Z 值还与温度有关,温度不同 Z 值就不同,也就是说同种半导体材料在常温下可做制冷材料,而在低温下因为 Z 值改变就不行了。

和传统的蒸气压缩式、蒸气喷射式和吸收式制冷等技术相比,半导体制冷具有以下特点:不使用制冷剂、不污染环境,绿色环保;体积小、重量轻、结构简单、容易操作;可只冷却某一专门元件或指定空间;可在失重或超重等极端环境下运行;制冷系统无机械转动,所以无噪音、无磨损、运行可靠、维护方便;便于通过改变电流方向达到冷却和加热的不同目的;具有发电能力,在制冷组件两面建立温差可产生直流电;冷却速度不仅快,而且便于通过工作电流大小实现可控调节。

二、半导体制冷技术的应用

半导体制冷的特点,使其在常规制冷无法满足需要的很多场合应用广泛。

半导体冰箱 上世纪 50 年代,前苏联就开始研制容量约 10L 左右的小型半导体冰箱。与通常冰箱相比,其最大优势在于体积小、易携带、无管道回路系统、能承受较大颠簸等。目前已大量用于车载型冷暖箱、宾馆客房及办公室等的小冰柜,如日本松下公司开发的“珀尔帖半导体制冷式酒柜”,可容纳 36 瓶红酒,能满足一般人对红酒收藏的要求。我国河北节能公司推出的“新生活”系列半导体制冷设备更是从一开始就考虑了不同消费群体的需要,相继推出床头柜型、茶几型、车用型、旅行型等不同用途的半导体冰箱。随着技术的进一步完善,日本雅马哈公司开发出比同类产品性能提高 30%、耗电量降低 20% 的新产品。以前一度认为不可能应用这一技术的 100L 以上的大冰箱也推出了商业化产品。

半导体空调 现有研究表明,半导体空调系统在成本价格和运行费用两方面都还不能与压缩机空调相比,因此家用型半导体空调尚未问世。但其制冷方式在许多特殊场合,如潜水艇、飞机机舱、高速

列车车厢、军用通讯车辆、地下工程等(这些场合首先要求制冷系统运行有效稳定,其次才是运行成本)已有成功应用。环保电动汽车将是未来汽车市场的主流产品,而汽车中的制冷空调负载很大,珀尔帖半导体制冷元件和电池活性剂可使电池至少可连续工作 8 小时以上,满足了行车时的制冷需要。目前,日本、美国的一些大公司正在加紧这方面的研发工作。

电子器件冷却(散热)方面 电子器件的可靠性与温度紧密相关。通常温度每升高 $1^\circ C$,电子设备的失效率就要上升 2%~3%。美国军方研究表明,航空、航天电子设备中有 20% 左右的现场失效是因温度过高所致。因而提高电子产品的可靠性就要采取必要的散热措施,在小面积、小体积和小功率环境下采用半导体制冷最为有效。目前计算机奔腾系列 CPU 芯片的散热就是采用半导体制冷手段。这类散热系统通常包括半导体制冷器组件、散热器和风扇,可把 CPU 的温度维持在 $30^\circ C$ 左右,大大提高了芯片工作的可靠性。

生物、医学方面 在生物学中,观察、研究切片时,一般要求观察对象的温度要保持不变,多数时候还需要低温,采用常规手段对整个实验室降温或供热是非常浪费的。但是采用半导体制冷技术便可制作温度可控的显微镜物台,在 $-25 \sim 125^\circ C$ 均可调节,精度为 $\pm 0.1^\circ C$,能够很好地满足苛刻的温度要求。半导体制冷在医学上应用更为广泛。如在外科小手术中用半导体制冷器代替常用麻醉剂对一些小脓肿施行冷冻麻醉,可以简单、安全地切开排脓。又如冷冻止血、冷冻切除白内障、医疗中的冷冻切片、体外循环热交换器,以及一些特殊药物或是血清、疫苗和血浆的低温存储,高烧病人用冷帽、炎夏用的冷枕等也都已运用这一技术。

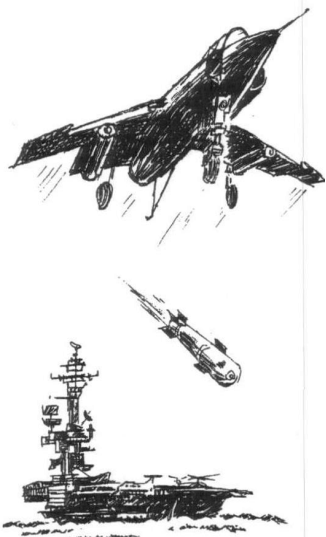
此外,该技术还可用于高真空技术、工业气体含水量测定、温度测定、红外技术、激光技术、高精密科学仪器以及空间技术等领域。

三、半导体制冷技术研究热点及前景展望

目前半导体制冷技术的研究工作主要集中在以下两个方面。研究表明,半导体制冷效果的好坏主要取决于珀尔帖效应的强弱,因此这方面的一个研究重点就是寻求更好的材料。目前已取得一定进展,近年来新开发的热电材料性能提高了 20%。此外,将半导体制冷技术与太阳光伏发电技术相结合,利用太阳能电池提供制冷所需电能,即所谓的太阳

光纤陀螺及其军事应用

段改丽



光纤技术作为一项新兴技术,性能优异、应用潜力巨大,而光纤陀螺是其中研究最为活跃的一种传感器。美国的瓦利(V. Vali)和肖迪尔(R. W. Shortill)于1976年提出的光纤陀螺引起广

泛关注。光纤陀螺因其体积小、抗电磁辐射和冲击能力强、寿命长、易于集成、成本低等优点而飞速发展,广泛用于兵工、航海、航空、航天等军事领域。

一、光纤陀螺的原理

光纤陀螺以光的 Sagnac 效应为理论基础。Sagnac 效应是在相对于惯性空间旋转的闭合环中传播的光普遍存在的一种相关性。当光束在一个环形通道中前进时,如果环形通道本身具有转动速度,那么光线沿通道转动的方向前进所需时间要比沿这个通道以相反方向转动前进所需时间多。即光学环路转动时,在不同前进方向上的光学环路光程相对于环路在静止时的光程都会产生变化,这种光程变化就引起相位和谐振频率的变化。通过测量相位和谐振频率的变化量可测定环路旋转的速度。

二、光纤陀螺仪的分类

干涉型陀螺仪(I-FOG) 干涉型光纤陀螺仪是第一代光纤陀螺仪,它起步较早、发展也比较完善,是现在常用的一种光纤陀螺仪。它的特点是运用 Sagnac 效应产生的光程变化,利用干涉测量技术把相位调制光转变为振幅调制光,把光相位的直接

测量转化成光强度测量,从而比较简单地测出 Sagnac 相位变化。干涉型光纤陀螺又分为开环和闭环两种。开环光纤陀螺结构简单、价格便宜,但是线性度差、动态范围小。闭环型是一种较为精密、复杂的光纤陀螺,主要用于中等精度的惯导系统。现在干涉型光纤陀螺仪的光纤元器件一般都用保偏光纤制作,由于保偏光纤对线偏振光具有较强的偏振保持能力,并且与普通单模光纤有良好的相容性,从而大大提高了光纤陀螺的性能。但若要增加它的灵敏度就必须增加光纤长度,一般为数百米到数千米,所以干涉型光纤陀螺的体积相应较大,实用性受到一定影响。

谐振型光纤陀螺(R-FOG) 谐振型光纤陀螺是第二代光纤陀螺仪,它利用 Sagnac 效应产生的光程变化、通过调整光纤环路的光的谐振频率进而测量环路的转动速度。从理论上讲谐振型光纤陀螺采用环形谐振腔增强 Sagnac 效应,利用循环提高精度,克服了干涉型光纤陀螺的光纤长,体积大的缺点,它要比干涉型的光纤陀螺仪有更好的灵敏度,有更大的发展空间,但实际中,谐振式的陀螺仪在实现干涉时,它的光程差较大,所以要求的光源必须有很好的单色性,而一般光源由于其单色性不是很高,所以在产生干涉时,会有其他杂散光的干涉,影响测量的精度。如何消除杂散光产生的干涉是目前面临的最大难题。而且由于对谐振型光纤陀螺研究起步较晚,所以在技术上还不太成熟,目前正处于由实验室向实用过渡阶段。

布里渊型光纤陀螺(B-FOG) 布里渊型光纤陀螺是第三代光纤陀螺仪,它基于光学非线性效应

能半导体制冷技术,也是近年来的研究新方向。目前研究的最大制冷量已达 31kW,制造成本虽高于普通压缩式制冷机,但却能以零费用运行。

和常规制冷相比,半导体制冷还存在制冷系数低(半导体制冷器最初的制冷系数只有 0.9 左右,目前实验室产品已达 2.0,而常规压缩式空调的制冷系数为 2.5~3.0)、制冷温差小等不足,这在很大程度上影响了其商业化推广。但由于其本身优势(特

别是环保、无污染、免费利用太阳能的潜力及在一些特殊场合的无法替代的地位),相信随着该技术的进一步发展和完善,半导体制冷技术必将在未来制冷领域中占据重要地位。

(李洪斌,广东省武警广州指挥学院训练部数理教研室 510440;杨先,云南省大理州下关第三中学 671000)