

半导体制冷研究综述

贾艳婷¹, 徐昌贵², 闫献国¹, 田志峰³

(1. 太原科技大学 机械工程学院, 山西 太原 030024; 2. 北京工商大学 机械工程学院, 北京 010000;
3. 中国电子科技集团第二研究所, 山西 太原 030024)

[摘要] 半导体制冷主要是帕尔帖效应在制冷方面的应用, 半导体制冷的主要优点是: 制冷迅速, 操作简单, 可靠性强, 容易实现高精度的温度控制, 无污染等。尤其适用于制冷量不大, 又要求装置小型化的场合。目前, 广泛应用于国防、科研、工农业、气象、医疗卫生等领域, 实现对仪器仪表、电子元件、药品、疫苗等的冷却、加热和恒温。本文通过半导体制冷与机械制冷比较说明半导体制冷的优点和特点。针对半导体制冷的特点和应用现状, 通过研究国内外的相关文献, 从影响半导体制冷效率的主要方面: 理论、材料、结构方式、传热方式四个方面进行综述, 从中总结了半导体制冷研究的热点和成就, 归纳出当前半导体制冷研究存在的问题, 提出影响半导体制冷的主要因素即: 高优值系数材料, 复杂的多参数工况以及冷热端散热方式与设计。为今后进行深入研究半导体制冷提供了可供借鉴的研究方向和方法。

[关键词] 半导体制冷; 高优值; 散热

[中图分类号]

[文献标识码] A

Semiconductor Refrigeration Review

JIA Yanting¹, XU Changgui², YAN Xianguo¹, TIAN Zhifeng³

(1. Taiyuan University of Science and Technology School of mechanical engineering, Shanxi taiyuan 030024;
2. Beijing Technology and Business University School of mechanical engineering, Beijing 010000;
3. The second Research Institute of China Electronics Technology Group Corporation, Shanxi taiyuan 030024;

Abstract: Semiconductor refrigeration is mainly Peltier effect in the application of the refrigeration. The main advantages of semiconductor refrigeration, refrigeration fast, simple operation, high reliability, easy to implement high-precision temperature control, no pollution especially in the refrigeration quantity of small, and the miniaturization of the device of the occasion. At present, widely used in national defense, scientific research, industry and agriculture, meteorological, medical and health fields mainly for instrumentation, electronic components, drugs, vaccines and other cooling, heating and constant temperature, its scope of application seeped to each industry. In this paper, semiconductor refrigeration and mechanical refrigeration comparison illustrates the advantages and characteristics of semiconductor refrigeration. For the characteristic and application of semiconductor refrigeration, through the study of literature at home and abroad, from the impact of the efficiency of semiconductor refrigeration major aspects: theory, material, structure, mode of heat transfer are reviewed in four areas. From which summarizes the thermoelectric research focus and achievements, summarize the current problems existing in the research of semiconductor refrigeration. Put forward the main factors affecting the semiconductor refrigeration, namely: high merit factor of materials, complex multi-parameter conditions and hot and cold side heat dissipation and design for future in-depth study of semiconductor refrigeration provided for reference the research direction and method.

Keywords: Semiconductor refrigeration; High figure of merit; Heat

1 前言

中国是一个能耗大国, 如何能降低能耗, 实现可持续发展, 研究和开发具有环境友好型的技术就成为一种必须。半导体制冷作为一种新兴发展起来的制冷技术, 是一种具有良好前景的制冷方式。由于半导体制冷具有清洁、无噪音污染和有害物质排放、寿命长、坚固、可靠性高、稳定性好等一系列优点, 符合绿色环保要求, 对国民经济的可持续发展具有重要的战略意义^[1]。

半导体制冷与其他的制冷方式相比有其优点:

(1) 没有机械制冷的运动部件, 从而没有振动和噪声, 也就不担心液击和磨损。所以工作可靠, 维护操作简便。

(2) 不使用制冷剂, 所以不存在配套制冷管路制冷剂泄漏和对环境污染问题。

(3) 冷热转换方便, 只要使电流反向, 制冷工况就变成热泵工况。这种变换效能比任何机械式制冷都要方便和可靠, 而且热泵制热效率比电热器高。

(4) 其制冷器件可以做成各种形状, 以适应不同特殊场合的要求。

(5) 半导体制冷片的单个制冷元件对的功率很小, 但效率不会因为冷量小而降低。通过串、并联的方法将同类型电堆组合成制冷系统的话, 功率就可以做得很大, 因此制冷功率可以做到几毫瓦到上万瓦的范围。

(6) 能量调节性能好。调节工作电压或电流就可调节制冷量。能量调节对效率基本没有影响, 而且通过温度检测和控制手段容易做到高精度调节。

(7) 半导体制冷片热惯性非常小, 制冷制热时间很快, 在热端散热良好冷端空载的情况下, 通电不到一分钟, 制冷片就能达到最大温差。

总之, 由于其结构紧凑, 体积小, 可靠性强, 制冷迅速, 操作简单, 容易实现高精度的温度控制, 无环境污染等优点, 半导体制冷的应用范围渗透到各个行业, 尤其在制冷量不大, 又要求装置小型化的场合, 更有其优越性, 甚至在某些方面, 有着压缩式无法替代的能力。在日常生活方面, 应用于空调、冷热两用冰箱、饮水机等, 在实验室装置方面应用于冷阱、冷箱、冷槽、电子低温测试装

置、各种恒温、高低温实验仪片。在医疗方面应用于冷理、冷合、白内障摘除片、血液分析仪等。在军事方面应用于导弹、雷达、潜艇等方面的红外线探测、导航系统。在专用装置方面, 石油产品低温测试仪、生化产品低温测试仪、细菌培养箱、恒温显影槽、电脑等。但由于半导体制冷的效率比较低, 再加上加工制造工艺比较复杂, 在很大程度上限制了半导体制冷的推广和应用^[2-4]。

2 半导体制冷的工作原理

热电制冷是具有热电能量转换特性的材料, 在通过直流电时具有制冷功能。由于半导体材料具有最佳的热电能量转换性能特性, 所以人们把热电制冷称为半导体制冷。半导体制冷是建立于塞贝克效应、珀尔帖效应、汤姆逊效应、焦耳效应、傅立叶效应共五种热电效应基础上的制冷新技术。其中, 塞贝克效应、珀尔帖效应和汤姆逊效应三种效应表明电和热能相互转换是直接可逆的, 另外两种效应是热的不可逆效应。

(1) 塞贝克效应, 1821年, 塞贝克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)。

(2) 珀尔帖效应, 珀尔帖效应是塞贝克效应的逆过程。由两种不同材料构成回路时, 回路的一端吸收热量, 另一端则放出热量。

(3) 汤姆逊效应, 若电流过有温度梯度的导体, 则在导体和周围环境之间将进行能量交换。

(4) 焦耳效应, 单位时间内由稳定电流产生的热量等于导体电阻和电流平方的乘积。

(5) 傅立叶效应, 单位时间内经过均匀介质沿某一方向传导的热量与垂直这个方向的面积和该方向温度梯度的乘积成正比。

半导体制冷原理:

半导体制冷是利用半导体材料组成 P-N 结, 通过两端施加直流电进行制冷, 将电能直接转化为热能的技术。

载流子从一种材料迁移到另一种材料形成电流, 而每种材料载流子的势能不同。因此, 为了满足能量守恒的要求, 载流子通过结点时, 必然与其周围环境进行能量的交换。能级的改变是现象的本

质, 这使构成制冷系统成为可能。

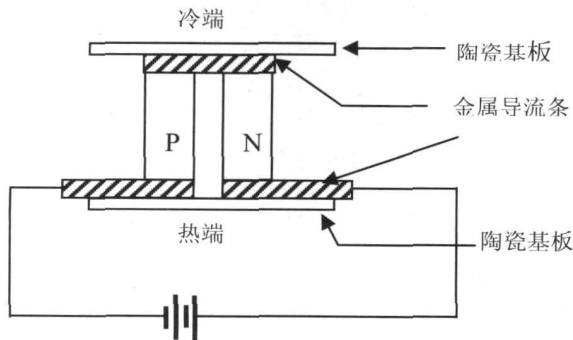


图1 半导体制冷工作原理

如图1把一只P型半导体元件和一只N型半导体元件联结成热电偶, 接上直流电源后, 在接头处就会产生温差和热量转移。在上面的接头处, 电流方向是N→P, 温度下降并吸热, 这就是冷端。而在下面的接头处, 电流方向是P→N, 温度上升并放热, 因此是热端。

3 半导体制冷技术研究现状

半导体制冷一直是半导体工业和材料工业领域的主要研究对象, 由于其材料、工艺和其他条件的限制, 致使半导体制冷技术的整体设备技术性能还不能与机械式制冷相抗衡。研究者们已经做了许多的工作, 并且取得了很大的成果。

经过对参考文献的分析和总结, 影响半导体制冷的主要因素包括: 半导体制冷理论、半导体材料、结构设计和传热方式四方面的内容。

3.1 半导体制冷理论

G. Min 和 D. M. Rowe 将金属半导体界面视为简单的费米气体、固体界面, 从机理上探讨了帕尔贴效应和塞贝克效应的微观本质^[5] 性能组合优化设计。吴兆琳等^[6] 经实测给出了半导体制冷的最佳化设计。杨玉顺等^[7] 分析了热电循环中获得最大制冷量、最大制冷温差和最大制冷系数的条件, 并给出了两种不同设计方法的最佳特性参数选择的原则。陈振林和孙中全按照最大工作效率对半导体多级制冷的基本公式进行了理论推导^[8], 陈振林等^[9] 对多级制冷器的相关公式进行了推导, 并提出了关于多级半导体制冷器的一些重要结论。Kenichi 等^[10] 提

出了修正的 Ioffe 理论, 并对稳态的数值模拟方法作了阐述。J. G. Stockholm 等^[11] 通过建立数学模型, 从热力学和传热学角度对半导体制冷过程作了深入的理论讨论, 并研究了电流、空气流量、热电材料厚度及特性对制冷性能的影响。在实验和实际中, 总结出散热量等于其制冷量与输入功率之和, 散热问题对制冷效率的提高起到至关重要的作用。热端温度越高, 冷热端温差越大, 其制冷量越小, 效率越低的特点。从文献研究来看, 半导体制冷技术的理论研究基本成熟。

3.2 半导体材料

随着半导体物理学的发展, 前苏联科学院半导体研究所约飞院士发现掺杂的半导体材料^[12], 有良好的发电和制冷性能。这一发现引起学者们对热电现象的重视, 开启了半导体材料的新篇章, 各国的研究学者均致力于寻找新的半导体材料。近年来, 为了在现有材料的条件下不断提高半导体制冷材料的优值系数就成为了主攻的方向^[13-27]。2001年, Venkatasubramanian 等人制成了目前世界最高水平的半导体材料系数 2.4^[28]。但这种材料价格过于昂贵, 目前还在研究阶段, 还没有进入家电领域, 但其理论和技术为研究新的高优值半导体指明了新方向, 在不久将来可能会取得重大进展^[29]。目前世界上大多数的半导体材料的无量纲值在 1 左右, 还远小于由固体理论模型和较为实际的数据计算所得的上限 4, 故对材料领域的研究仍有很长的路要走, 这是半导体制冷技术能否取得突破的关键所在^[30]。而 Boff 等提出, 半导体制冷系数提高到 2.0 以上, 则其优值系数需提高到 $13 \times 10^{-3} K^{-1}$ 的水平。但是, 至今世界主要国家研究的半导体制冷元件的优值系数仍不理想, 如: 美国 RCA 实验室 Jiml^[31] 研究结果为 $Z_p \approx 3.4 \times 10^{-3} K^{-1}$; $Z \approx 3.2 \times 10^{-3} K_n^{-1}$ 。英国通用电气公司 GoldClford^[32] 研究的 $Z_p \approx 3.3 \times 10^{-3} K^{-1}$; $Z \approx 3.0 \times 10^{-3} K_n^{-1}$ 。BaMin, G, D M Rowe 和 Kontostavakis K 等还探讨了在大温差下材料优值系数的变化问题^[33]。

宜向春、蔡德坡和吴雄等在考察半导体制冷材料发展的基础上, 详细分析了影响半导体材料优值系数的几个因素, 并对几种半导体材料的性质作了详细说明, 对未来半导体材料的发展作了有益的探索^[34-41]。优值系数的研究有, Mole^[31] 等认为, 减

少声子传导率,即可大大提高半导体制冷堆的优值系数。半导体材料的优值系数除与电极材料有关,也与电极的截面和长度有关,不同电阻率和导热率的电极应有不同的几何尺寸,只有符合最优尺寸才能获得最大优值系数的半导体制冷器^[13,42-46]。

3.3 结构设计

包括改进半导体制冷器的制造工艺过程、设计外部换热方式、优化内部热电偶结构以及整体热电器件结构这几个方面。可以通过优化设计半导体制冷模块,减小半导体制冷模块的理想性能系数和实际性能系数间的差值,提高半导体制冷器的实际制冷性能^[47]。M. Yamanashi 提出了半导体制冷系统优化设计的新方法^[48], Taylor^[49]建立了半导体制冷设备非稳态温度场的简单模型。Xuan^[50]对多级半导体制冷器作了阐述,认为分离的电流不仅能提供大的制冷能力,而且有更高的制冷系数。王宏杰和陈金灿对耦合半导体制冷系统性能特性进行了优化分析,导出了多级制冷最大制冷系数和制冷率的公式,最大工作电流的范围和两级半导体元件的最佳比的取值范围。文献 [51] 提出加工工艺对半导体制冷的影响因素有:附加传热温差、焊缝电阻、散热交换和原件性能。

3.4 传热方式

由于半导体制冷的散热量等于其制冷量和输入功率之和,因此半导体制冷热端散热效果是影响半导体制冷性能的重要因素^[52-60]。国内外学者在文献 [59] ~ [63] 中提出,采用各类强化散热方式可以提高制冷效率,有空气自然对流散热、强迫对流散热、水冷散热、相变沸腾换热等方式,均可以收到良好的效果。由于散热方式的选择在半导体制冷的设计中很重要,所以选择何种方式应综合考虑半导体制冷器的用途及散热效率。李茂德^[54]讨论了散热强度对制冷器的影响分析;任欣^[64]给出了半导体制冷器在有限的热端散热强度下不同制冷工况的试验研究,并推导出最佳工况下半导体制冷器的工作电流和制冷量的近似公式;殷亮^[65]对半导体制冷器进行了瞬态的数值计算以及冷端温度的分析;李茂德^[66]用有限差分建立的半导体制冷系统非稳态温度场的传热模型及王华军对低温半导体热电堆内部温度分布进行了动态特性分析。有学者^[51-52,67-70]对半导体制冷过程中散热强度对制冷性能的影响作

了比较详细的分析研究,并认为适当提高散热强度可以改善半导体制冷的制冷性能,但是不能无限制地通过提高散热强度来提高其制冷性能。

通过研究半导体制冷的影响因素,在研究过程中,总结出的研究方法有:理论研究,计算分析,实验,对比分析。通过对半导体以及半导体制冷的原理研究,可以提供理论基础,从中得到的计算公式可以得出理论最优值,为以后的工作奠定了基础 and 方向。然后对具体的工况进行实验,可以找到其中的内在联系和相互影响,并且修正之前的理论。最终进行系统的综合分析和研究,得到相应的结论,指导生产实际和研究。

4 半导体制冷的热点、难点及存在的主要问题

4.1 半导体制冷的热点

通过上面的分析可以看出,近年来有关半导体制冷的研究得到了国内外学者的广泛关注。其关注的研究对象包罗万象,几乎涉及到所有领域,如军事、科学、航空航天、工业、农业、医疗卫生、生化和日常生活用品等。目前的研究水平还局限于半导体制冷的材料,最大制冷量和最大制冷效率,距离实现半导体制冷的广泛应用还有较大差距。半导体制冷的材料和热端散热效果一直是半导体制冷的热点和难点。目前,国内外学者对半导体制冷的研究主要集中在半导体材料研究开发、模块设计制造和系统优化设计等方面,这需从原理上对半导体制冷进行分析。与此同时,半导体制冷的性能特性优化和系统的散热条件也是半导体制冷研究的热点,通过研究半导体制冷优值系数 Z 、半导体制冷器的制造工艺过程、设计外部换热方式、优化内部热电偶结构以及整体半导体制冷器件结构,为半导体制冷成熟理论的提出和推广应用提供一定的理论基础。目前半导体制冷新理论和半导体制冷新技术也是各国关注的热点研究课题,不断开发研究新型半导体材料以及努力提高现有半导体材料的性能是目前和今后半导体材料研究的主要目标。

4.2 半导体制冷的难点

半导体制冷的研究涉及传热学原理、热力学定律以及帕尔贴效应,还要考虑多种因素如材料的优值系数、半导体多级制冷、冷热端散热系统的优化

设计等,同时影响半导体制冷的各种因素都是相辅相成的,不是独立的。所以半导体制冷的研究一直是国内外学者关注的热点,但也面临诸多难点。

首先,半导体制冷材料性能的优劣取决于其半导体制冷优值系数 Z 。构成半导体制冷材料优值系数的三个参数塞贝克系数(α)、电导率(σ)和热导率(K)都是温度的函数。与此同时,优值系数又敏感地依赖于材料种类、组分、掺杂水平和结构。能适合半导体制冷的半导体材料不仅要混合地加入少量杂质改变它的温差电动势率、导热率和导电率,而且还应该具有半导体本身特性,做到既要保持原来半导体的传统半导体特性又要使它具有好的温差电动势率、导热率和导电率存在较大的困难,所以,高优值系数的研究一直是半导体制冷研究的难点问题。

其次,半导体制冷是一个参数多、工况变化复杂的过程,几何结构参数、散热传热等对其影响都很大,采用常规的针对性实验方法难以满足多种需要,并且在进行优化设计的参数选择时需要实验对比不同工况从而选择最优方案。所以如何选择和设计研究过程和方案就显得重要,而整体分析又把问题变得复杂起来。

再次,根据传热学原理、热力学定律以及帕尔贴效应可知,半导体制冷过程中冷、热端的温差对半导体制冷的热量和冷量的传递有极大的影响,两端换热性能差,就会大幅度地减小同等功率下的制冷能力,若热端散热效果差,往往达不到设计要求。因而冷、热端散热也是半导体制冷的又一个困难:即如何强化冷、热端散热以及对制冷电堆冷、热端散热进行优化设计和改进。

总而言之,半导体制冷的难点在于:高优值系数的材料、复杂的多参数以及冷热端散热的设计。

4.3 半导体制冷当前存在的主要问题

虽然半导体制冷的研究面临诸多困难,但是可以欣喜地看到当前研究仍然呈现出欣欣向荣的景象。到目前为止,国内外的学者从不同角度去提高半导体的制冷效率,展现出各自的优势和实用性。但是半导体制冷的研究当前还存在以下问题。

(1)半导体制冷要想达到机械压缩制冷相当的制冷效率,材料的优值系数就必须提高。然而,直到现在,科学家对半导体制冷材料的研究并未有很

大突破。半导体制冷温差较小和制冷系数不高是半导体制冷的最大缺点,而材料的优值系数不高导致这些缺点从而是阻碍半导体制冷发展的最主要因素,因此半导体材料的性能即优值系数 Z 还有待于进一步的提高。

(2)有关冷、热端散热系统的优化设计的研究较少。这使得半导体制冷的设计多半处于理论计算阶段,半导体制冷的实际运行效果不能得到很好的保证。所以要不断深入进行半导体制冷器模块设计和系统性能优化的研究。

(3)相关领域的技术与手段的引用较少,材料的优值系数的停滞影响了整个半导体制冷行业的发展,所以运用包括新理论和新技术来研究和完善就变得非常重要。半导体制冷也是一个交叉学科,需要不同方面的知识相互配合,共同进步。

(4)随着科学技术的飞速发展,产品器件的尺寸有的越来越大,有的越来越小,有的状况越来越复杂,需要考虑多种因素。这样如何解决大功率半导体多级制冷的优化问题、小尺寸器件的局部散热问题和多因素的半导体热电能量转换问题就成为今后不断努力研究的内容。

5 结束语

随着科技的发展,半导体制冷技术已经在诸多领域得到应用,半导体制冷技术为我国经济建设的快速发展和环境保护做出了巨大贡献。在这浩瀚的研究成果中,着重通过对半导体制冷材料优值系数的提高和半导体制冷器结构的优化两方面综述国内外相关文献所取得的成就。得出的结论:

(1)半导体制冷技术的理论研究基本成熟,但优值系数 Z 低,在理论上有很大的发展空间,进一步研究和开发新材料,不断提高其优值系数将有广阔的前景。

(2)在生产技术和工艺方面要多做实验,有机地结合计算机辅助设计,对降低实验成本、加速理论的完善和提高半导体的性能有很大的帮助。

(3)有关部门应集中力量联合攻克重点难题,开展基础实验研究,防止盲目地进行重复性工作。

(4)在应用方面应熟悉各种使用状况,在不同的领域,采用不同的研究方法,因为半导体制冷的

运作过程受多因素的影响, 最好采用系统分析和综合分析的方法, 尤其是对半导体制冷配套系统的研究也很重要, 所以没有最好, 只有适用, 在适用性下进行应用性研究, 让技术成为生产力。

只有半导体制冷材料的发展才能使得其理论得到应用, 半导体与现代制造技术的结合, 其应用范围也会越来越广。半导体制冷研究的热点、难点以及存在的问题, 为今后半导体制冷研究提供了可以借鉴的研究方向。

半导体制冷在世界日益发展的高科技领域中越来越显示出它的重要地位, 主要是因为其制冷技术的特殊优越性和不可替代性, 但是其效率低一直是其软肋, 如果能有新材料的诞生将使一切美景成为现实。制冷器的发展趋势是大功率和微型, 以及精确控制。我们应该结合实验和产品, 结合不同的使用环境, 利用实验和其他工具对半导体制冷原理及器件的工作过程有个直观清晰的认识, 了解其周围的温度场变化, 这样对于改进半导体及其布置都有帮助。同时, 在实验中总结规律, 如热端散热的研究对半导体制冷的重要性。在研究中要综合考虑, 因为各种因素都是相辅相成的, 不是独立的。

在半导体制冷的应用中, 由于使用范围的不同, 对其最佳性能有不同的要求, 因而必须采用不同的设计方法, 随着使用要求的变化, 也要进行相应的研究。不断拓展半导体制冷的应用领域是加速发展的牵引力。可以深信, 半导体制冷在未来将得到更广泛的应用和很好的发展。

6 参考文献

- [1] 张宏祥. 半导体冷热风机的数值模拟研究 [D]. 南京: 东南大学, 2008
- [2] 朱倩, 刘玉超, 张强, 蔡存金. 半导体制冷技术及其应用 [J]. 学园, 2011 (2): 21-22
- [3] 李冰. 半导体制冷技术及其发展 [J]. 山西科技, 2009 (4): 33-35
- [4] 谢玲, 汤广发. 半导体制冷技术的发展与应用 [J]. 洁净与空调技术, 2008 (1): 68-71
- [5] G. Min, D. M. Rowe. The use of Femi-gas/liquid interfaces to improve the thermoelectric efficiency. *J. Appl Phys* 1999, 85(32): 1-3
- [6] 吴兆琳. 热电式制冷器的最佳设计 [J]. 上海机械学院学报, 1992, 14 (2): 13-16
- [7] 杨玉顺, 王国庆. 热电制冷循环最佳特性分析 [J]. 哈尔滨工业大学学报, 1990, 8 (1): 10-14
- [8] 陈振林, 孙中泉. 多级半导体制冷器设计. 仪表技术与传感器, 2000, 11: 20-21
- [9] 陈振林, 孙中泉. 半导体制冷器原理与应用 [J]. 微电子技术, 1999, 27 (5): 18-20
- [10] Kenichi Ueda, Yoshihiko Ogawa, Proposition of Modified Ioffe Theory on Peltier Cooling [J]. *Electronics and Communications in Japan, Part 2* 1997, 80(2): 16-22
- [11] J. G. Stockholm, J. G. Buffet. Large Gas to Gas Thermoelectric Heat Pumps [J]. *Proceedings of the 3rd International Conference on Thermoelectric Energy Conversion*, 1980, 8
- [12] 张文杰. 热电器件的热弹性应力分析及外加电、磁场环境下的性能测试 [D]. 甘肃: 兰州大学, 2010
- [13] G. J. Snyder, T. S. Ursell. Thermoelectric efficiency and compatibility [J]. *Phys Rev Lett*, 2003, 91
- [14] R. Venkata E. subramanian, Siivola, T. Colpitts. Thin-film thermoelectric devices with high room-temperature figures of merit [J]. *Nature*, 2001, 4(13): 597-602
- [15] W. Sun, P. Hu, Z. Chen, L. Jia. Performance of cryogenic thermoelectric generators in LNG cold energy utilization [J]. *Energy Convers* 2005, 46: 789-796
- [16] Y. Bi, L. Chen, C. Wu, S. Wang. Effect of heat transfer on the performance of thermoelectric heat pump [J]. *J Non-Equilibrium Thermodynamica*, 2001, 26: 41-51
- [17] 倪华良. Bi₂Te₃ 基纳米复合热电材料的合成与性能 [D]. 浙江: 浙江大学, 2007
- [18] 刘辉. 半导体多级制冷器的设计与性能优化 [D]. 上海: 同济大学, 2008
- [19] 蔡德坡. 半导体制冷热端的分析与实验研究 [D]. 江西: 南昌大学, 2010
- [20] D. C. Agrawal, V. J. Menon. The thermoelectric generator as an endoreversible Carnot engine [J]. *J. Phys D: Appl Phys* 1997, 30: 357-359
- [21] J. Chen, Z. Yan, L. Wu. The influence of Thomson effect on the maximum power output and maximum efficiency of a thermoelectric generator [J]. *J. Appl Phys*, 1996, 79: 8823-8828
- [22] M. Gao, D. M. Rowe, Kontostavlakis K. Thermoelectric figure-of-merit under larger temperature differences [J]. *J. Phys D: Appl Phys* 2004, 37: 1301-1304
- [23] X. C. Xuan, D. Li. Optimization of a combined thermionic-thermoelectric generator [J]. *J. Power Sources* 2003, 115: 167-170
- [24] J. Chen, B. Lin, H. Wang, G. Lin. Optimal design of a multi-couple thermoelectric generator [J]. *Semicond Sci Technol*, 2000, 15: 184-188
- [25] X. C. Xuan. Optimum design of a thermoelectric device [J]. *Semicond Sci Technol*, 2002, 17: 114-119
- [26] F. J. Weinberg, D. M. Rowe, M. Gao. Novel high performance small-scale thermoelectric power generation employing regenerative combustion systems [J]. *J. Phys D: Appl Phys*

- 2002, 35; 61-63
- [27] J. Chen Thermodynamic analysis of a solar-driven thermoelectric generator [J]. J. Appl. Phys. 1996, 79; 2717-2721
- [28] Venkatasubramanian R, et al [J]. Nature. 2001, 413-597
- [29] Gang Chen, Bao Yang, Wei Li Liu, etc Nanoscale Heat Transfer for energy Conversion applications [C], Int. Conf. On Energy Conversion and Applications Wuhan, China, 2001, 287-296
- [30] Di Salvo, F. J. Thermoelectric cooling and power generation. Science, 1999, 285(5428); 703-706
- [31] Mole C. J. Porcupple J. C. Recent development on direct transfer thermoelectric for shipboard use [J]. Transaction of ASHRAE 1988(11); 58-61
- [32] Blaff F. J. Schroeder P. A Thermoelectric Power of Metals [M]. Washington; Plenum press 1986
- [33] Min G, DM Rowe & Kontostavlakis K Thermoelectric figure-of-merit under large temperature differences [J]. Phys. D: Appl. Phys. 2004, 37(8); 1301-1304
- [34] 宣向春, 王维扬. 半导体制冷材料的发展. 制冷技术, 2001 (2); 37-41
- [35] 蔡德坡, 陈杨华. 半导体制冷材料及工况优化分析. 能源研究与管理, 2010 (1); 25-31
- [36] 吴雄. 半导体制冷材料及应用现状 [J]. 电子材料, 1994, 1; 44-47
- [37] 石尧文, 乔冠军, 金志浩. 热电材料研究进展 [J]. 稀有金属材料与工程, 2005 (1); 12-15
- [38] 刘华军, 李来风. 半导体热电制冷材料的研究进展 [J]. 低温工程, 2004 (1); 32-38
- [39] 郑文礼, 李志文, 刘炳灿等. 热电材料研究进展 [J]. 大学物理, 2004, 23 (11); 55-57
- [40] 高远, 李杏英, 蒋玉思等. 半导体制冷材料的发展 [J]. 广东有色金属学报, 2003, 13 (1); 34-36
- [41] 倪华良. Bi₂Te₃ 基纳米复合热电材料的合成和性能 [D]. 浙江: 浙江大学, 2007
- [42] E Macia Compatibility factor of segmented thermoelectric generators based on quasicrystalline alloys [J]. Phys. Rev. B. 2004, 70
- [43] 肖波. 基于热电制冷的电子降温系统的研究与设计 [D]. 上海: 上海交通大学, 2007
- [44] 张睿. 光集成芯片控温系统有限元分析及半导体控温技术研究 [D]. 武汉: 华中师范大学, 2006
- [45] 顾雪婷. 半导体制冷器优化设计的计算机仿真模拟分析 [D]. 上海: 同济大学, 2008
- [46] 潘玉灼. 不可逆半导体制冷器和温差发电器性能特性的优化分析 [D]. 福建: 厦门大学, 2007
- [47] 杨建敏. 风冷散热半导体制冷系统性能分析及实验研究 [D]. 江西: 南昌大学, 2009
- [48] M. Yamashita A new approach to optimum design in thermoelectric cooling system appl. Phys. 80(9); 5494-5502
- [49] Taylor. A model for the non-steady-state temperature behaviour of thermoelectric cooling semiconductor device. Semicond. Sci. Technol. 1997(12); 443-447
- [50] X C Xuan, on the optimal design of multstage thermoelectric coolers [J]. Semicond. Sci. Technol. 2002(12); 625-629
- [51] 王宏杰, 陈金灿. 耦合半导体制冷系统性能特性的优化分析. 半导体学报, 2001, 22 (7); 938-943
- [52] 徐德胜. 半导体制冷与应用技术 [M]. 上海: 上海交通大学出版社, 1992
- [53] 谢玲, 汤广发. 半导体制冷技术的发展与应用 [J]. 洁净与空调技 CC&AC, 2008 (1); 68-71
- [54] 李茂德, 卢希红. 热电制冷过程中散热强度对制冷参数的影响分析 [J]. 同济大学学报, 2002, 30 (7); 811-813
- [55] F. J. Weinberg, D. M. Rowe, M. Gao. Novel high performance small-scale thermoelectric power generation employing regenerative combustion systems [J]. J. Phys. D: Appl. Phys. 2002, 35; 61-63
- [56] 徐胜. 新型低温冷风发生装置的研制及应用 [D]. 南京: 南京航空航天大学, 2006
- [57] 张芸芸. 小功率半导体制冷空调系统优化设计 [D]. 上海: 同济大学, 2008
- [58] 曹志高. 热管散热型半导体冷箱的理论分析及实验研究 [D]. 江西: 南昌大学, 2010
- [59] 温文龙. 密封仪器仪表的散热研究及温控系统设计 [D]. 西安: 西北大学, 2005
- [60] J. Chen Thermodynamic analysis of a solar-driven thermoelectric generator [J]. J. Appl. Phys. 1996, 79; 2717-2721
- [61] L. Chen, F. Sun, C. Wu. Thermoelectric-generator with linear phenomenological heat-transfer law [J]. Appl. Energy, 2005, 81; 358-364
- [62] 华舟萍. 太阳能半导体制冷器在卡车驾驶室内的应用研究 [D]. 西安: 长安大学, 2010
- [63] 李玉东. 半导体多级制冷性能组合优化设计 [D]. 上海: 同济大学, 2007
- [64] 任欣, 张鹏. 有限散热强度下半导体制冷器性能的实验研究 [J]. 低温工程, 2003, (4); 14-18
- [65] 殷亮, 李茂德. 热电制冷系统的非稳态温度场数值模拟及其冷端温度的分析 [J]. 低温工程, 2003, (6); 32-36
- [66] 殷亮, 李茂德, 何文莉. 半导体制冷系统非稳态温度工况的模型及实验分析 [J]. 能源技术, 2004, 25 (1); 87-93
- [67] 卢希红. 散热强度对半导体制冷性能影响的分析研究 [D]. 上海: 同济大学, 1999
- [68] 代彦军, 戴维涵, 王如竹. 半导体冰箱冷端散热条件的实验研究 [J]. 工程物理学报, 2005 (26); 221-224
- [69] 许志浩, 陈桔. 半导体制冷在空调中应用的研究 [J]. 四川制冷, 1996 (3); 25-27
- [70] 金刚善, 李彦, 刁永发. 小空间半导体制冷的实验研究 [J]. 兰州理工大学学报, 2004, 30 (3); 51-55