

基于 MEMS 工艺的微型制冷器

童欣, 陈晓屏, 李家鹏, 夏明, 槐阳, 陈俊元
(昆明物理研究所, 云南 昆明 650223)

摘要: 微机电系统 MEMS (micro-electro-mechanical system) 是一种集合了微电子与机械工程技术的新型高科技装置, 其制造工艺可以进行最小至纳米尺度的加工以及高度集成化的微型制造。其产品微小体积、高度集成化以及高性能高产热的特性也决定了其需要匹配相应的制冷解决方案, 本文重点阐述了基于 MEMS 制造工艺并同时应用于 MEMS 产品的微型制冷器的工作原理、性能及发展趋势。分别分析了微型半导体制冷器以及微型节流制冷器各自的优势和不足, 对微型制冷器的未来发展提出了建议。

关键词: 微机电系统; 微加工; 微型制冷器

中图分类号: TP39 文献标识码: A 文章编号: 1001-8891(2021)02-0104-06

Micro-coolers Based on MEMS Technology

TONG Xin, CHEN Xiaoping, LI Jiapeng, XIA Ming, HUAI Yang, CHEN Junyuan
(Kunming Institute of Physics, Kunming 650223, China)

Abstract: Micro-electro-mechanical systems (MEMS) are a new type of high-tech devices that combine microelectronics and mechanical engineering technology. Their manufacturing process can be highly integrated and conducted at the minimum nanometer scale. MEMS products also require corresponding refrigeration solutions because of their small volume, high integration, high performance, and high heat production. This study focuses on micro-semiconductors and Joule-Thomson (JT) coolers fabricated via MEMS technology that can also be applied to MEMS products. The working principles, performance, and development trends of the micro-coolers are discussed, and the advantages and disadvantages of micro-semiconductors and JT coolers are analyzed, respectively. Additionally, certain suggestions regarding the future development of micro-coolers are provided

Key words: MEMS, micro manufacturing, micro coolers

0 引言

微机电系统 (micro-electro-mechanical system, MEMS) 以其微小的体积, 高度集成化的特性近年来在航空航天、生物医学、精密计算机等领域有着广泛的应用^[1-2]。而随着 MEMS 集成化程度的增加和性能的提升, 其单位空间内的能量密度也显著增加, 因此如何有效地在微小空间尺度内实现制冷成为了限制 MEMS 进一步发展的主要问题之一。而基于 MEMS 工艺的微型制冷器以其微小的体积, 可靠的制冷性能成为了一种有效的解决方案。目前基于 MEMS 的微型制冷器主要有微型半导体制冷器和微型节流制冷

器, 其制造加工工艺主要涉及机电加工工艺、表面加工工艺、材料生长工艺、薄膜工艺、刻蚀工艺、密封工艺等^[3]。本文重点阐述了以上两种微型制冷器的原理、制造加工工艺以及性能和应用场合, 并对基于 MEMS 工艺的微型制冷器的未来发展提出了一些建议。

1 基于 MEMS 工艺的微型半导体制冷器

半导体制冷器的原理是利用帕尔贴效应, 直接将电能转化为温度梯度从而实现制冷, 具有结构简单、可靠性高、反应迅速等优点^[4]。与常规半导体制冷器不同, 基于 MEMS 工艺的半导体制冷器采用微加工

收稿日期: 2020-02-25; 修订日期: 2021-01-08.

作者简介: 童欣 (1992-), 男, 博士研究生, 主要从事微型节流制冷器的研究。E-mail: 291740057@qq.com.

工艺使得制冷器尺寸大大下降从而显著减少了制冷器的导热热阻。进一步地,陈云飞^[5]研究了尺寸效应达到纳米级时半导体结构的导热系数进一步降低的机理,并且在 1.2 μm 厚的超晶格薄膜上加工出了 50 $\mu\text{m} \times 50 \mu\text{m}$ 的单级半导体制冷器如图 1 所示。该制冷器通过 MEMS 工艺在若干层材料上进行刻蚀和薄膜生长、减薄等工艺制成,实现了制冷器的微型化和平面化,并且能够在 303 K 的环境温度下提供 2 K 的温差。

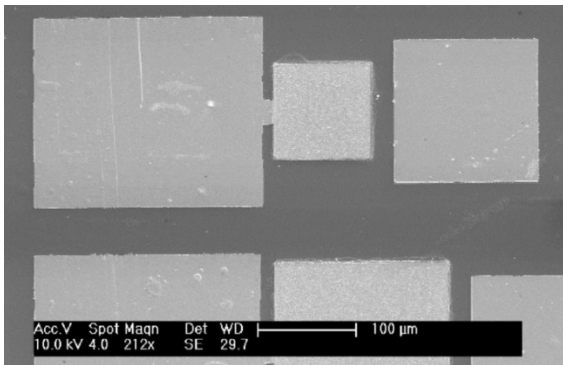


图 1 微型半导体制冷器显微照片

Fig. 1 Micrograph of micro semiconductor cooler

传统的半导体制冷器多采用 Bi-Te 材料,无法适用于 MEMS 工艺并与器件集成,随着近年来与器件工艺更加兼容的 Si/Ge/SiGeC 等超晶格材料蓬勃发展,使得半导体制冷器能够与 MEMS 工艺相结合从而更加微型化和集成化^[6],以及具有更高的热电效率品质无量纲指数 ZT^[7]。J. Christofferson 等人^[8-9]制造出了冷端面积为 50 μm^2 以及 30 μm^2 的微型 Si/Ge 超晶格半导体制冷器,两制冷器分别在 200 $^{\circ}\text{C}$ 以及室温环境下得到了 10.8 K、3.5 K 的温降,并且通过热反射成像技术精确测量得到了该微型半导体制冷器的瞬态性能。类似地,Z. Gehong 等人^[10]也采用了该成像测量技术并且使用了金属薄膜热电阻以及微型热电偶对微型半导体制冷器的制冷温度以及冷量密度进行测量,测量实验结果表明微型半导体制冷器的制冷量和冷量密度与制冷器尺寸有关,测量得到的最大冷量密度为 598 W/cm^2 ,该制冷器尺寸为 40 μm^2 ,在室温环境温度下可提供 4.1 K 的温降。除了半导体材料的 ZT 性能外,接触和导热热阻是影响微型半导体制冷器性能的重要因素,为了尽可能降低接触和导热热阻 D. J. Yao 等人^[11]提出了一种悬空结构的微型半导体制冷器,如图 2 所示,该结构的制冷区域由 P、N 级支撑脚悬空固定,能够显著降低制冷器的接触和导热热阻,然而支撑脚大大增加了制冷器厚度,不便于制冷器与被冷却器件的集成化。

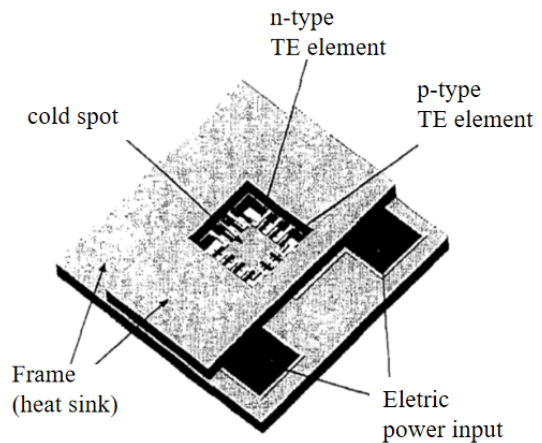


图 2 悬空结构微型半导体制冷器示意图

Fig. 2 Schematic diagram of suspended micro semiconductor cooler

类似地,L. M. Goncalves 等人^[12]在柔性材料基片上通过共蒸发技术分别镀上了一层 Bi_2Te_3 和 Sb_2Te_3 的热电薄膜,并在之上加工出了平面型微型半导体制冷器,如图 3 所示,该制冷器在静止空气中以及真空腔中的冷热端温差可达到 4 K。并且由于制冷器加工于柔性表面,可在更多非平整器件表面应用,实现制冷。

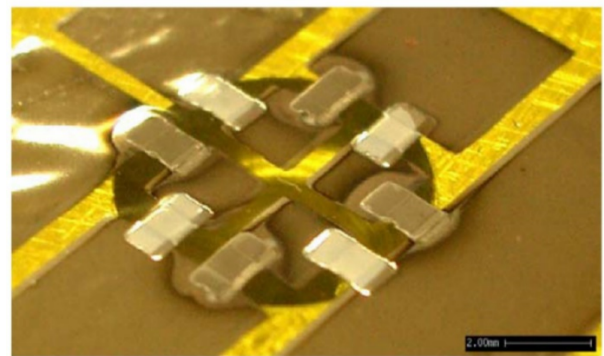


图 3 加工于柔性基片的微型半导体制冷器

Fig. 3 Micro semiconductor cooler on a flexible membrane

微型半导体制冷器的另一个显著优势在于能够十分方便地实现多级制冷,通过 MEMS 工艺可在不显著增加制冷器体积和复杂程度的基础上制造出多级微型半导体制冷器。Y. Ronggui 等人^[13]为一套 10 mW 中红外激光系统设计制造了两级微型半导体制冷器如图 4 所示。激光系统输出 10 mW 功率时将产生 90 mW 的热量,因此该二级微型半导体制冷器应至少具有 90 mW 的制冷量。并且 Y. Ronggui 等人指出低导热、厚度薄的制冷器基片以及相对较厚的热电薄膜有利于改善制冷器性能。

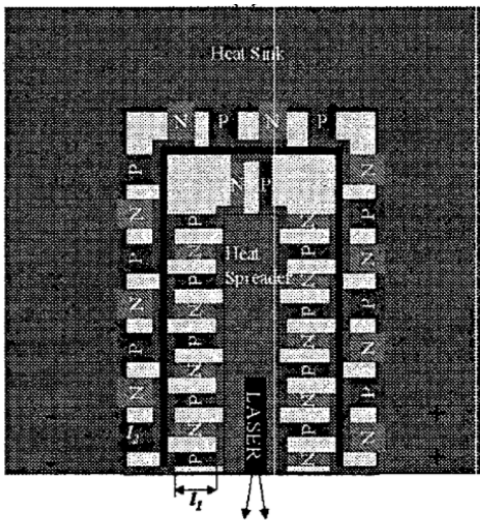


图 4 适配中红外激光系统的二级微型半导体制冷器
Fig. 4 Two stage micro semiconductor cooler for a mid-IR laser system

由此可见,基于 MEMS 工艺的微型半导体制冷器具有尺寸微小可达 $30\mu\text{m}^2$,与器件工艺相互兼容、易集成化,热电效应反应迅速,结构简单、方便多级化制造以及无运动部件无制冷工质等优点,在冷却微型器件方面拥有广泛应用前景。然而微型半导体制冷器也有一定的局限性,其性能受半导体材料性能、制冷器尺寸以及工作温度的影响较大,或导致最佳性能与所需尺寸以及所需工况难以匹配,并且微型半导体制冷器能提供的降温梯度较小,不适用于需要深度降温的微型器件。

2 基于 MEMS 工艺的微型节流制冷器

与常规节流制冷器不同,基于 MEMS 工艺的微型节流制冷器多采用非金属材料,使用微加工工艺在微小体积的材料表面或内部加工出换热和节流部件,并利用制冷工质的节流效应进行制冷,具有制冷量大、制冷温度较低、性能稳定可靠性高且易于批量化生产等优点。其中较为典型的结构为采用光刻刻蚀等微加工工艺在材料表面刻蚀出微米级的槽道,并进行密封形成流体通道构成的微型节流制冷器^[14]。该制冷器设计最早由 W. A. Little 提出^[15],在一块硅基片上刻蚀出高压和低压槽道,再使用另一片光平面硅基片进行密封制成微型节流制冷器,其槽道结构如图 5 所示,然而该结构存在硅基导热系数较高,制冷器轴向漏热严重等问题。

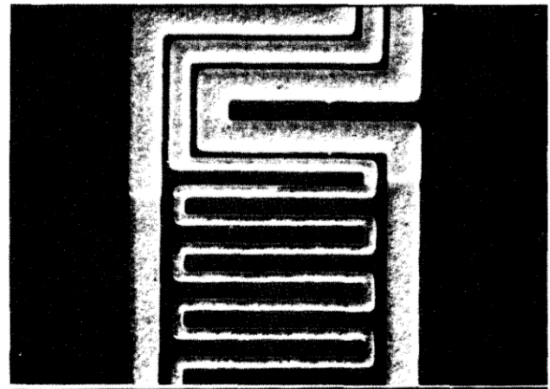


图 5 微型节流制冷器槽道示意图
Fig. 5 Channels of micro JT cooler

随着近年来刻蚀工艺不断发展,目前大多数微型节流制冷器的材料已经由易硅基更换为石英玻璃,因为石英玻璃具有较低的导热系数,能够有效改善轴向漏热对制冷器性能的影响,并且石英强度更高,能适用于更高的工作压力以提供更大的制冷量。目前微型节流制冷器的刻蚀方法主要以湿法刻蚀为主,能够在石英材料表面刻蚀出深度较浅光滑度较高的槽道^[16]从而降低槽道内气体压力损失,提升制冷器性能。微型节流制冷器的结构形式灵活,能够根据工况、空间需求以及制冷量以及制冷温度需要匹配相适应的制冷器。微型节流制冷器除了传统的槽道形式换热器外 P. P. M. Lerou 等人^[17]提出了点阵结构的换热器如图 6 所示,同时对一款 $30\text{mm}\times 2.2\text{mm}\times 0.5\text{mm}$ 的微型节流制冷器进行了测试,该制冷器从室温降温至 100K 约需 1000s ,该温度下制冷量为 20mW 。该制冷器结构能够起到加强制冷器密封强度的作用,并且能够通过调整换热器面积大小以及节流部分的长度来改变制冷器的流量、工作温度以及制冷量。

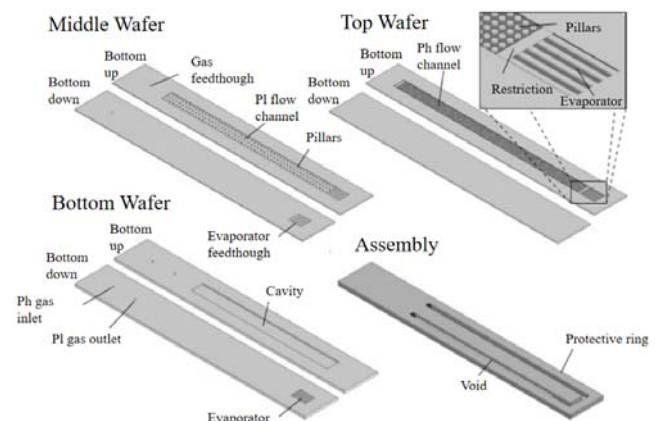
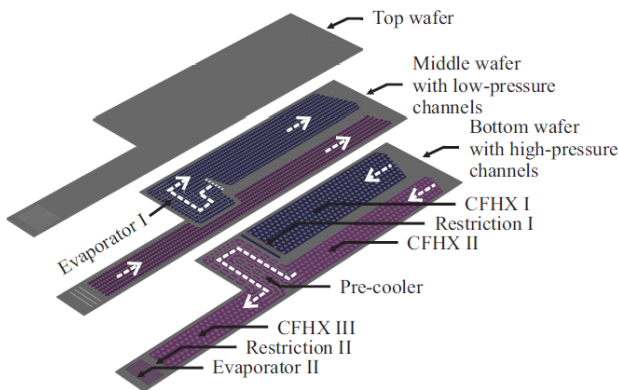
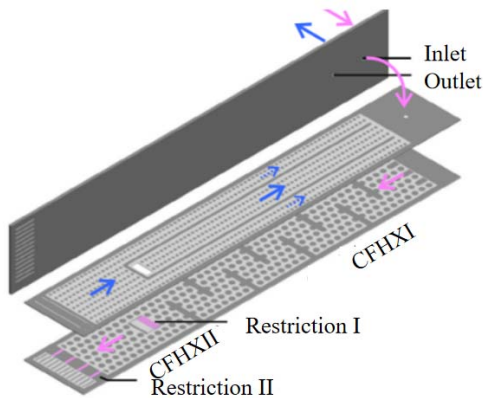


图 6 点阵结构微型节流制冷器
Fig. 6 Micro JT cooler with pillar-structure

微型节流制冷器也能够在不显著增加体积的情况下实现二级节流制冷, 从而达到更低的制冷温度。H. S. Cao 等人^[18]提出了一种第一级采用氮气第二级采用氢气的两级微型节流制冷器如图 7(a)所示, 该制冷器体积为 $85.8\text{ mm} \times 20.4\text{ mm} \times 0.72\text{ mm}$, 第一级制冷量为 $50\text{ mW}@97\text{ K}$, 第二级制冷量为 $20\text{ mW}@28\text{ K}$, 从室温降温至 28 K 需要约 1.7 h 。除了使用两种不同工质进行二级节流来达到更低的制冷温度外, 对同一种工质进行二级节流也可以起到在一定程度上降低制冷温度, 提升制冷器性能的作用。H. S. Cao 等人^[19]在两级微型节流制冷器的基础上提出了平行两级微型节流制冷器, 结构如图 7(b)所示。该制冷器使用氮气作为工质, 对其进行了两级节流, 该制冷器的体积为 $60\text{ mm} \times 9.5\text{ mm} \times 0.72\text{ mm}$, 从室温降温至 83 K 需要约 9 min , 并在 85 K 制冷温度下拥有 98 mW 的制冷量。由此可见, 单级和多级制冷器整体结构基本一致, 只有在槽道加工时采用的掩模不同, 其他加工和密封工艺均相同, 因此微型节流制冷器能够十分方便地实现多级制冷。



(a) 两级微型节流制冷器
(a) Two-stage micro JT cooler



(b) 平行两级微型节流制冷器
(b) Parallel two-stage micro JT cooler

图 7 多级微型节流制冷器

Fig. 7 Multi-stage micro JT cooler

与多级节流的原理类似, H. S. Cao 等人^[20]进一步提出了采用半导体制冷器来进行预冷的微型节流/半导体混合制冷器的设计, 其示意图如图 8 所示。该设计通过半导体制冷器对高压侧流体进行预冷, 进一步降低工质节流前的温度, 以此来提高制冷器的制冷量。研究表明增加半导体制冷器后该微型节流制冷器在 8.8 MPa 的运行压力下, 达到 101 K 时的制冷量从 21 mW 增加到了 60 mW 。并且通过半导体制冷器将高压侧气体从 295 K 预冷至 250 K , 在相同制冷温度 101 K 以及相同制冷量 20 mW 工况下, 工作压力可从 8.8 MPa 下降至 5.5 MPa 。该设计可有效降低制冷器工作压力, 提升制冷器安全性和可靠性并且能显著提升制冷器性能。然而半导体制冷器需要适配一套电路系统才能工作, 而半导体制冷器的位置在高压侧进气区域附近距离冷端较远, 无法跟冷端被冷元件进行耦合, 因此这种节流/半导体混合制冷器设计会在较大程度上增加制冷系统的复杂性。

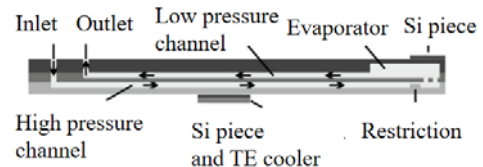


图 8 微型节流/半导体混合制冷器示意图

Fig.8 Schematic of JT/semiconductor hybrid micro cooler

微型节流制冷器的制冷量通常在毫瓦级别, 因此制冷器的热负载和漏热、导热损失将对制冷器性能造成较大影响。W. A. Little^[21]提出了一种加大换热器部分, 减小冷端部分的圆形快速制冷微型节流制冷器设计, 如图 9 所示, 该设计直径 18 mm , 厚度为 0.5 mm , 采用 24 MPa 的氩气为工质, 可在 2 s 内从室温冷却至 90 K 。该制冷器设计能做到快速冷却, 其冷端面积较小适合冷却体积较小的元件, 然而该设计主要通过减小冷端热负载来加快冷却速率, 其制冷量应小于相同运行工况下的其他微型节流制冷器。

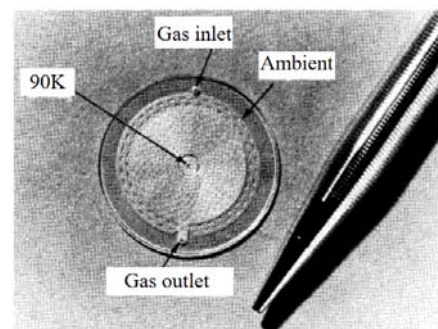


图 9 快速启动微型节流制冷器

Fig.9 Fast cooldown micro JT cooler

除了整体制冷器的加工制造外, MEMS 的微加工工艺也可以实现微通道换热器的加工, 微米级的微通道可以极大地强化流体换热提高换热器效率。ZHU Weibin 等人^[22-25]将高效微通道换热器与节流制冷原理相结合, 设计出了一种大制冷量微型节流制冷器。该制冷器主要由微通道换热器搭配节流元件和压缩机等部件组成。该换热器通过刻蚀工艺分别将硅基和石英玻璃刻蚀出换热通道, 并层层堆叠, 利用硅基的高导热性进行高低温流体间的换热并利用石英玻璃的低导热性来减少轴向漏热, 其结构如图 10 所示。该制冷器的换热器主体部分体积为 $35\text{ mm} \times 10\text{ mm} \times 10\text{ mm}$, 在使用乙烷作为工质时, 在 0.84 MPa 工作压力下能够得到 218.7 K 的制冷温度, 在有外部热负载时可在 239 K 温度下提供 1 W 的制冷量。该制冷器相对于其他微型节流制冷器而言, 体积较大并且其制冷量也更大。由于适配了压缩机该制冷器, 可根据需求选用不同工质和不同工作压力, 制冷量可以在 $100\text{ mW} \sim 1\text{ W}$ 范围内自由调节。然而该制冷器部件较多, 整套系统较为庞大, 不利于小型化和集成化, 或许在未来的研究中将节流部件整合进换热器内部能够使整套系统更为紧凑, 进一步提升其适用性。

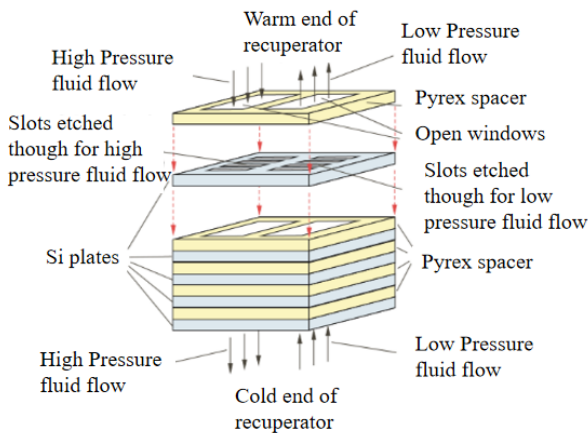


图 10 基于 MEMS 工艺的低温换热器

Fig.10 Cryogenic heat exchanger based on MEMS technology

综上所述, 基于 MEMS 的微型节流制冷器具有制冷温度低 (单级制冷温度可达到 90 K , 两级制冷温度可达到 28 K)、制冷量相对较高 (最高可到 1 W)、采用光刻刻蚀工艺加工易实现批量化生产、制冷器结构灵活、能使用不同工质来满足制冷温度和制冷量的需求等优点。微型节流制冷器已经在半导体性能测试、CCD 阵列冷却、激光二极管冷却等方面得到了广泛的应用^[21]。然而由于节流制冷需不断消耗高压工质, 因此微型节流制冷器通常为开放式系统, 并且为其匹配压缩机的难度相对较高。另外微型节流制冷器的节流区域堵塞问题也是制约其进一步发展的一个

主要问题^[26]。

3 小结

本文主要总结了基于 MEMS 工艺的微型半导体制冷器以及微型节流制冷器的工作原理、结构、性能以及主要应用场合。分析了两种微型制冷器的优点及缺点, 并针对其特点提出了一些可能提升制冷器性能以及拓展制冷器应用的建议, 具体如下:

1) 通过强化热端导热提升微型半导体制冷器性能

微型半导体制冷器在微型化后可显著降低导热损失从而提高制冷器冷量密度, 在制冷器冷端面积为 $40\text{ }\mu\text{m}^2$ 时其冷量密度可达到 598 W/cm^2 , 而在制冷器热端若热量不及时导出, 则会使制冷温差迅速升高从而使得制冷器工作效率降低。在传统半导体制冷器中常使用翅片、循环流体、相变材料等方式对制冷器热端进行散热^[27-29], 然而针对尺寸为微米级的微型半导体制冷器上述方法应用空间有限。在微小空间内或可采用石墨烯来强化热端导热, 石墨烯的导热系数为 $5300\text{ W/m}\cdot\text{K}$, 高于碳纳米管和金刚石, 将石墨烯与微型半导体制冷器的热端耦合能够有效导出热量, 或者可进一步与其他主动制冷方式连接来提升微型半导体制冷器性能。

2) 通过半导体-节流制冷器耦合以及闭循环方式改善微型节流制冷器堵塞

由于微型节流制冷器多数为开放式工作, 气体工质源源不断进入制冷器, 其中的水分容易在节流区域处堆积凝结造成堵塞, 因此若使用对工质充分脱水的闭循环则能有效改善水分堆积堵塞的问题。文献[20]提出了将半导体制冷器与微型节流制冷器结合的方法, 能够在达到相同制冷量时将工质进气压力由 8.8 MPa 降低至 5.5 MPa , 这是一种降低压缩机压比的有效方式。或许在一些制冷温度不需要太低的场合使用半导体-节流制冷器耦合的方法能够将压缩机压比控制在压缩机能达到的范围, 从而实现在闭循环工作, 解决微型节流制冷器的堵塞问题。

3) 微型节流制冷器在红外器件冷却领域的应用

目前的微型节流制冷器主要将被冷却元件贴合在制冷器冷端, 元件的电信号由导线或电路板连接, 并且整套制冷器需要放置在真空杜瓦中才能保证稳定工作^[30]。然而该设计无法有效应用于红外器件冷却领域, 因为红外器件需要有光学接口并且器件的电信号通路较多, 常规的真空杜瓦和导线、电路板均无法满足此要求。基于 MEMS 工艺的微型节流制冷器比常规节流制冷器的体积更小, 能够满足更加微小器件

的制冷需求。因此通过改进微型节流制冷器以及适配杜瓦的方式或许能够提高其在红外器件冷却领域的适用性,具体为:将红外器件和部分读出电路与微型节流制冷器进行耦合一并放入杜瓦中;将杜瓦与光学部件整合并在杜瓦内部设计电路接口来实现光电信号的转换,以此来实现基于MEMS工艺的微型节流制冷器在红外器件冷却领域的应用。

参考文献:

- [1] 薛淞元. 微机电系统科学与技术发展趋势[J]. 数字技术与应用, 2018, 36(11): 212-213.
- [2] Esashi M, Ono T. Micro-nano electromechanical system by bulk silicon micromachining[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2002, 10(6): 608-613.
- [3] 刘少波. 新型 MEMS 致冷器研究[J]. 电子工业专用设备, 2004, 108: 21-25.
- [4] 吴雷, 高明, 张涛, 等. 热电制冷的应用与优化综述[J]. 制冷学报, 2018, 11(8): 1-16.
- [5] 陈云飞. 基于微纳结构的制冷器[J]. 东南大学学报, 2006, 36(3): 356-360.
- [6] 阮雷, 吴云峰, 陈镇龙, 等. 半导体超晶格微制冷器的研究进展[J]. 红外, 2007, 28(10): 1-5.
- [7] 宫昌萌. 基于超晶格的微型热电制冷器[D]. 南京: 东南大学, 2006.
- [8] Christofferson J, Vashae D, Shakouri A. Thermal characterization of thin film superlattice micro refrigerators[C]//*IEEE SEMI-THERM Symposium*, 2000: 49-54.
- [9] Christofferson J, Ezzahri Y, Shakouri A. Transient thermal imaging of pulsed- operation superlattice micro-refrigerators[C]// *IEEE SEMI-THERM Symposium*, 2009: 45-49.
- [10] ZENG Gehong, FAN Xiaofeng, LaBounty C, et al. Cooling power density of SiGe/Si superlattice micro refrigerators[J]. *Materials Research Society*, 2004, 793: 221-227.
- [11] YAO D J, KIM C J, CHEN G. MEMS thermoelectric micro-cooler[C]//*International Conference on Thermoelectric*, 2001: 401-404.
- [12] Goncalves L M, Couto C, Correia J H. Flexible thin-film planar peltier microcooler[C]//*International Conference on Thermoelectrics*, 2006: 327-331.
- [13] Ronggui Y, GANG C, Snyder G J, et al. Multistage thermoelectric micro coolers[C]//*Inter Society Conference on Thermal Phenomena*, 2002: 323-329.
- [14] 刘东立, 曹海山, 刘霄, 等. 微型 JT 制冷机实验研究进展[C]//*低温工程大会*, 2019: 199-204.
LIU Dongli, CAO Haishan, LIU Xiao, et al. Experimental development of microminiature JT refrigerators[C]//*Cryogenic Engineering Conference*, 2019: 199-204.
- [15] Little W A. Design considerations for microminiature refrigerators using laminar flow heat exchangers[J]. *NSB Speial Publication*, 1981, 607: 154-161.
- [16] FAN Zhonghui, D Harrison. Micromachining of capillary electrophoresis injectors and separators on glass chips and evaluation of flow at capillary intersections[J]. *Analytical Chemistry*, 1994, 66: 177-184.
- [17] P P P M Lerou, G C F Venhorst, C F Berends, et al. Fabrication of a micro cryogenic cold stage using MEMS-technology[J]. *Journal of Micromechanics and Microengineering*, 2006, 16: 1919-1925.
- [18] CAO H S, Mudaliar A V, Derking J H, et al. Design and optimization of a two-stage 28 K Joule-Thomson microcooler[J]. *Cryogenics*, 2012, 52: 51-57.
- [19] CAO H S, Vanapalli S, Holland H J, et al. A micromachined Joule-Thomson cryogenic cooler with parallel two-stage expansion[J]. *International Journal of Refrigeration*, 2016, 69: 223-231.
- [20] CAO H S, Vanapalli S, Holland H J, et al. Characterization of a thermoelectric Joule-Thomson hybrid microcooler[J]. *Cryogenics*, 2016, 77: 36-42.
- [21] Little W A. Microminiature refrigeration[J]. *American Institute of Physics*, 1984: 661-680.
- [22] ZHU Weibin, J W Michael, F N Gregory, et al. A Si/Glass bulk -micromachined cryogenic heat exchanger for high heat loads: fabrication, test, and application results[J]. *Journal of Microelectromechanical System*, 2010, 19(1): 38-47.
- [23] ZHU Weibin, Michael J W, Gregory F N, et al. A Joule-Thomson cooling system with a Si/Glass heat exchanger for 0.1-1 W heat loads[C]//*Transducers*, 2009: 2417-2420.
- [24] ZHU Weibin, Michael J W, Daniel W H, et al. Two approaches to micromachining Si heat exchanger for Joule-Thomson cryosurgical probes[C]//*MEMS*, 2007: 317-320.
- [25] ZHU Weibin, Michael J W, Gregory F N, et al. A perforated plate stacked Si/Glass heat exchanger with In-SITU temperature for Joule-Thomson coolers[C] //*MEMS*, 2008: 844-847.
- [26] Lerou P P P M, Brake H J M, Holland H J, et al. Insight into clogging of micromachined cryogenic coolers[J]. *Applied Physics Letters*, 2007, 90: 102-104.
- [27] Tsai H L, Le P T. Self-sufficient energy recycling of light emitter diode/thermoelectric generator module for its active-cooling application[J]. *Energy Conversion and Management*, 2016, 118: 170-178.
- [28] LIN Shumin, MA Ming, WANG Jun, et al. Experiment investigation of a two-stage thermoelectric cooler under current pulse operation[J]. *Applied Energy*, 2016, 180: 628-636.
- [29] ZHAO Dongliang, TAN Gang. Experimental evaluation of a prototype thermoelectric system integrated with PCM (Phase Change Material) for space cooling[J]. *Energy*, 2014, 68(4): 658-666.
- [30] Derking J, Holland H, Lerou P, et al. Micromachined Joule-Thomson cold stages operating in the temperature range 80-250 K[J]. *International Journal of Refrigeration*, 2012, 35: 1200-1207.