

文章编号: 0258-7025(2009)07-1686-07

高功率固体激光器冷却技术

田长青¹ 徐洪波^{1,2} 曹宏章¹ 司春强^{1,2}

(¹ 中国科学院理化技术研究所, 北京 100190; ² 中国科学院研究生院, 北京 100190)

摘要 大热流密度散热问题已成为发展高功率激光器的关键技术之一。本文结合我们近年来的研究工作, 综述了目前正在应用或正在研究的针对高功率激光器冷却技术的研究现状, 主要包括微通道液体对流换热、固体冷却、喷雾冷却和微热管冷却。然后根据技术发展趋势, 提出了微通道沸腾换热冷却和液氮冷却是两种具有很好应用前景的冷却技术, 并介绍了该两项技术目前基础研究进展情况。

关键词 激光器; 冷却技术; 高功率

中图分类号 TK124 文献标识码 A doi: 10.3788/CJL20093607.1686

Cooling Technology for High-Power Solid-State Laser

Tian Changqing¹ Xu Hongbo^{1,2} Cao Hongzhang¹ Si Chunqiang^{1,2}

(¹ *Technical Institute of Physics and Chemistry, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China*
² *Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China*)

Abstract For the high-power solid-state laser, the cooling technology has become one of the key techniques for its development. This paper reviews the current development of cooling technology dealing with the high-power solid-state laser, both in use and in the experimental stage, which includes the liquid convection heat exchange in microchannel, diamond cooling, spray cooling and micro-heat-pipe cooling. On the basis of our recent research and the summarization of the development, we propose two promising cooling methods, boiling heat exchange in microchannel and liquid nitrogen cooling, and discuss the recent progress of theoretical studies on the two techniques.

Key words lasers; cooling technology; high power

1 引 言

激光二极管抽运固体激光器(DPL)以其高效率、高光束质量、结构紧凑、长寿命等优点引起人们极大兴趣。近年来,随着高功率二极管激光器的相继研制成功,促进了DPL的发展及在军事、工业、医疗、科研等领域的应用。

激光二极管(LD)正常工作时的热耗占总功耗的50%以上,热耗引起激光二极管工作温度的不稳定将使它的输出波长发生变化,进而影响DPL的高效稳定输出。另外,固体激光器激光晶体的光抽运过程中也产生热,同样需要对其进行冷却。随着激光二极管抽运固体激光器功率增大,器件产生的热负荷越来越大,散热密度也越来越高,DPL冷却问题已成为目前DPL研究中的技术难点。

针对高功率DPL散热问题,近年来国内外许多学者进行了大量的研究工作,提出了微通道液体对流换热、固体冷却、喷雾冷却和微热管冷却等多种冷却方式。本文对这些技术的研究现状进行综述分析,并在此基础上提出了微通道沸腾换热冷却和液氮冷却技术。

2 技术原理

高功率固体激光器有诸如固体热容激光器、新型薄片激光器、光纤激光器、端面抽运激光器等不同种类,虽然每种激光器散热器件形状和散热情况不同,但是其主要散热器件均为抽运源和增益介质。抽运源和增益介质的冷却原理可用图1表示。

根据传热理论,激光器冷却可用下式表示:

收稿日期: 2008-10-12; 收到修改稿日期: 2008-11-23

作者简介: 田长青(1965—),男,博士,研究员,主要从事制冷新技术方面的研究。E-mail: chqtian@mail.ipc.ac.cn

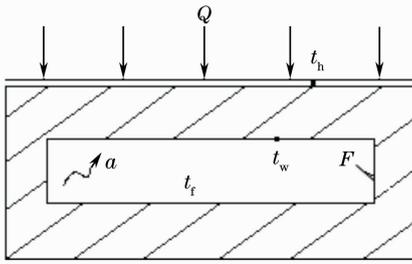


图 1 激光器冷却原理图

Fig. 1 Schematic diagram of laser cooling

$$Q = \alpha F(t_w - t_f), \quad (1)$$

式中 Q 为散热器件的散热量, α 为冷却工质在热沉通道内的对流换热系数, F 为热沉通道换热面积, t_w 为热沉通道内壁温度, t_f 为冷却工质温度。 t_h 为散热器件温度。激光器冷却的目的就是要带走散热器件散热量, 保证散热器件的一定温度。

从(1)式可以看出, 为了提高散热量, 应尽量提高冷却工质在热沉通道内的对流换热系数, 增加热沉通道换热面积, 降低冷却工质温度。同时, 减小热沉导热热阻, 使得热沉通道内壁温度均匀且尽量接近散热器件温度。

3 研究现状

分别对微通道液体对流换热、固体冷却、喷雾冷却和微热管冷却四种冷却技术的研究现状进行综述分析。

3.1 微通道液体对流换热冷却

依据 Bowers 和 Mudawar 的定义^[1], 水力直径在 0.01~1 mm 之间的通道称为微通道。微通道液体对流换热冷却是液体流经热沉内部微通道, 通过与微通道内壁面对流换热将散热器件热量带走(见图 2)。微通道热沉大大增加了换热面积, 而且微通道内液体对流换热系数也由于微尺度效应远高于常规通道内的对流换热系数。所以冷却原理上讲, 微通道液体对流换热冷却通过增大冷却工质在热沉通道内的对流换热系数和热沉通道换热面积两个方面提高散热冷能力。

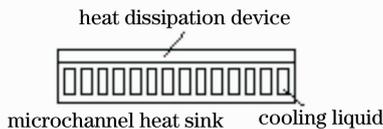


图 2 微通道液体对流换热冷却原理图

Fig. 2 Schematic diagram of microchannel fluid

convection heat exchange

微通道的报导最早见诸于八十年代初美国学者

Tuckerman 和 Pease 的文献^[2]。他们介绍了一种硅基材的水冷肋片式散热器, 该散热器的肋片和通道宽度仅 50 μm , 肋高 300 μm , 热阻仅为 0.09 k/W, 热流密度高达 790 W/ cm^2 。

20 世纪 90 年代以来, 美国的斯坦福大学、加州大学的各分校和马里兰大学等著名大学都分别开展相关课题, 并与 Intel、HP 等公司合作。根据军事技术需要, 美国劳伦斯利弗莫尔国家实验室(LLNL)也较早开始了微通道散热技术的研究。

硅基材料蚀刻成型技术在微通道加工方面具有独特优势, 并且加工出来的微通道尺寸误差小, 因此最初被一些研究者用来冷却高功率激光二极管阵列^[3,4]。他们的研究均表明微通道热沉冷却方式优于传统冷却方式。

Harpole, George M 等^[5]对微通道换热器做了优化。他们建立了一个完整的二维流动/传热微通道换热器模型, 其设计参数为热流密度 1 kW/ cm^2 , 表面最高温度不高于 25 $^{\circ}\text{C}$ 。用纯水作为冷却剂, 或者用 8% 的甲醇水溶液(凝固点为 -5 $^{\circ}\text{C}$)将温度冷却到冰点以下。得出有效传热系数达到 100 W/($\text{cm}^2 \cdot \text{K}$), 并且其总的压力降为 2×10^5 Pa 左右。

黄哲^[6]在 nLight Photonics 公司研制的高可靠性、大功率 808 nm 激光器的研究成果中提到了水冷式铜微通道散热技术。微通道散热器是由放电加工法(EDM)加工的薄铜膜层组成, 然后焊接到一块, 形成微通道阵列。激光条焊接在微通道的边缘, 去离子水在微通道中湍流产生高热传导率, 从而使其具有很低的热阻。

李奇峰等^[7]报道了 V 形槽硅微通道冷却器的结构和主要制作工艺, 研制了冷却器样品, 其冷却能力与数值模拟结果较吻合。

吕文强等^[8]对不同结构的微通道冷却器进行了模拟散热计算。优化了冷却器的结构参数, 研制的模块式微通道冷却器可满足连续 50 W 或脉冲功率 120 W(20% 占空比)的高功率二极管激光器板条的散热需求, 堆叠的二维叠阵 DL 可以很好地用作高平均功率 DPL 的抽运源。

中国科学院长春光学精密机械与物理研究所刘云等^[9,10]制备了整体尺寸为长 15 mm、宽 12 mm、厚 2.2 mm 的无氧铜热沉, 其微道深度为 300 μm , 宽度为 400 μm 。

国内外学者对微通道液体冷却的实验研究较多, 并且微通道液冷热沉在国内外已得到广泛应用, 但是对于流型转变、摩擦阻力系数影响因素、传热系

数影响因素等,至今尚未形成一致的结论,像常规通道中那样具有普适性规律的换热关联式和流动方程仍未建立。对于微通道液体对流换热技术应用于高功率固体激光器冷却,需要解决系统优化、减小通道流动阻力、提高系统稳定性、减少通道腐蚀和堵塞等诸多问题。

3.2 固体冷却

主要采用导热系数极高的金刚石等作为固体冷却材料。一侧抽运面粘贴金刚石薄片,薄片外及非抽运面采用直接水冷。激光晶体工作时所产生的热量迅速传递到金刚石表面,再通过向周围空间的对流散热或与其他冷却设备(如液冷微通道)将热量带走。这样,既保证了热量的迅速散出,又使激光晶体表面温度分布均匀,有效改善激光晶体的热透镜效应。所以冷却原理上讲,固体冷却是采用减小导热热阻的方法进行提高散热能力。

以色列学者 Yitshak Tzuk 等^[11]通过实验验证了采用金刚石箔片冷却大功率固体激光器的可行性。实验采用 $2.3\text{ mm} \times 4\text{ mm} \times 24\text{ mm}$ 的 Nd:YVO₄ 板片状激光晶体,夹在厚 0.3 mm 的光学金刚石箔片与液体铜热沉之间。在输出光波长为 808 nm 的条件下,当抽运能量为 600 W 时得到的输出功率为 200 W。据该文献报道使用传统冷却方法最大输出功率仅为 100 W 左右。美国加利福尼亚 Textron System 公司的 H. P. Chou 等^[12]也报道了基于金刚石冷却技术的紧凑型二极管抽运固体激光器性能研究,并且基于他们的实验数据,对 100 kW 级的激光器进行了概念设计。

国内未见激光器采用固体冷却的报道。

3.3 喷雾冷却

喷雾冷却是将冷却液在外加能量的作用下通过雾化装置(主要装置是喷嘴)雾化后喷射到换热表面,通过雾化液滴的相变换热带走热量达到冷却目的(见图 3)。国外有报告^[13]指出,以水作为冷却液,喷雾强化换热的热流密度可以高达 1000 W/cm^2 ;以氟里昂为冷却液,热流密度也超过了 100 W/cm^2 。所以从冷却原理上讲,喷雾冷却通过增大冷却工质在换热面的对流换热系数来提高散热冷能力。

喷雾强化换热是一个复杂的流动换热过程,受到液滴颗粒尺寸分布、液滴速度、喷射角度、物性、换热面粗糙度、热流等诸多因素的控制,很多学者提出了不同的换热机理^[14]。在低过热度条件下,单相对流换热起主要作用,雾滴的冲击会增加对液膜的扰动,进而强化换热;在高过热度条件下,相变换热占

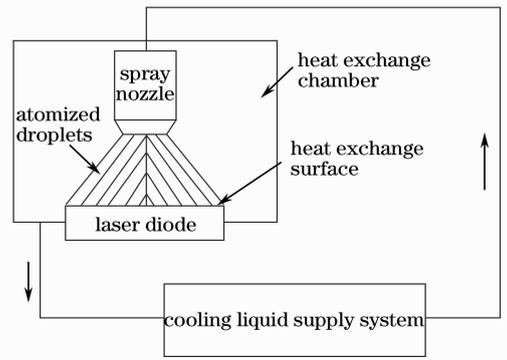


图 3 喷雾冷却原理图

Fig. 3 Schematic diagram of spray cooling

据了强化换热的主导地位。目前被广泛认可的换热理论有两种,一是薄液膜蒸发理论^[15],认为雾滴在换热表面形成薄液膜,通过液膜导热进行换热;液膜顶层的温度是饱和的,由于通过液膜薄层的温度梯度的增加实现薄液膜的高效换热;另一个是二次成核理论^{[13]~[16]},认为雾滴中携带气泡冲击到液膜层上,造成成核条件,在液膜上引发剧烈的沸腾,藉此来强化换热。

Choi 和 Yao^[17]通过试验研究了液滴向换热面的撞击角度对换热效率的影响。研究发现,对于垂直喷射,在核态沸腾段换热效率较高;对于水平喷射,在过渡沸腾段换热效率较高。Sodtke 和 Stephan^[18]对不同表面粗糙度进行了实验,实验发现有微小粗糙度的表面的换热效果比平滑表面明显要高很多,另外由于微小的粗糙度导致了三相接触线长度的增加,也进一步导致薄液膜的快速蒸发。Silk^[19]研究了平直翅片、锥状翅等对换热性能的影响,和平滑换热表面相比,平直翅片的临界热流密度(CHF)可以高出 50%。高珊、曲伟^[20]等人利用 Volume-of-fluid(VOF)方法,针对单个水滴冲击恒温平板建立物理和数学模型,然后进行数值模拟并分析结果,研究其动力学和传热特性。

陈伟等^[21]在实验中将封闭微喷射流冷却系统应用于发光二极管(LED)散热,结果表明在环境温度为 $25.6\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时,LED 芯片组输入电功率为 2.45 W 时,相比不采取散热措施 1 min 后其温度上升到 $72\text{ }^{\circ}\text{C}$,采用该系统开始工作后,其温度迅速下降到 $34.81\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。当 LED 芯片输入电功率为 9.3 W 时,其热流密度为 14.53 W/cm^2 ,该冷却系统依然能迅速把 LED 芯片温度降到 $54.34\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。英国 Raytheon 研究的高效率二极管抽运源技术就是利用喷雾冷却提高换热系数,实验测得的热流密度大于 500 W/cm^2 。美国 Rinitechnologies 公司的 Rini 博

士对未来有望使用的高功率(100~300 kW)激光系统的高功率的二极管阵列进行散热模拟。对比微通道散热,采用氨为冷却液的喷雾冷却散热系统,需要的冷却液流量比前者的 1/12 还少,系统的体积、重量都有大幅度的降低。因此,喷雾冷却极有可能成为冷却大功率激光器的一种重要方式。

尽管喷雾冷却具有换热系数大、临界热流密度高和冷却液流量低等优点,但是由于影响换热的众多参数(喷射角度、喷射速度、液滴尺寸、换热表面、重力因素等)不是相互独立的,很难通过试验做到分析单个参数对换热的影响。换热本身包含气液相互作用、液滴的冲击、相变等复杂过程,目前只能做一些有限的相关试验如气泡液滴的动力特性,池沸腾,液滴撞击,平滑换热面和一些简单的喷雾冷却模拟,还没有形成系统完整的理论。在高功率固体激光器冷却装置中,一般是在有限的空间内换热,有的甚至需要在封闭空间内换热,在这些条件下的换热机理和换热规律有待进一步研究。

3.4 微热管冷却

微热管这一概念是于 1984 年由 T. P. Cotter 在日本举行的第五届国际热管会议上提出^[22]。

微热管由密闭容器、毛细结构与工作流体构成。工作流体在容器内维持饱和状态,一旦容器的一端受热,工作流体吸热气化,所产生的蒸气流向容器另一端放热凝结,而凝结液将在毛细作用力或重力作用下回流至原加热位置。由于热管内的工作流体通过相变传输热量,因而可得到极高的传导系数,达到均恒温度的效果。Petros, Mulugetat 等^[23]设计了一通过热管导热的激光器,通过三根热管可以从二极管和激光棒中传导 150 W 的热量。Xie Boping 等^[24]也对热管散热技术做了一些研究,并对如何和什么时候利用热管解决热管理问题给出了大致的指导方针。

目前国内对微热管应用于激光冷却的研究开展得很少,需要加强这方面的研究工作。

4 未来发展

根据激光器冷却原理和冷却公式,提出了用于高功率固体激光器可实现更高热流密度冷却的微通道沸腾换热冷却和液氮冷却两种技术。

4.1 微通道沸腾换热冷却

微通道沸腾换热冷却是工质流经热沉内部微通道时蒸发沸腾,通过与微通道内壁面沸腾相变换热将散热器热量带走(见图 4)。从冷却原理上讲,

微通道沸腾换热冷却与微通道液体对流换热冷却相同,也是通过增大工质在热沉通道内的对流换热系数和热沉通道换热面积两个方面提高散热冷能力,但是由于微通道沸腾换热冷却具有微尺度效应和沸腾换热双重作用,对流换热系数比微通道液体对流换热冷却有很大提高,因此其散热能力得到很大提升。

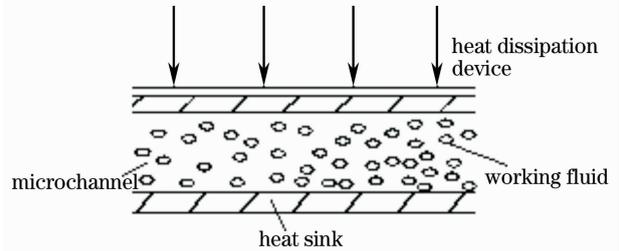


图 4 微通道沸腾换热冷却原理图

Fig. 4 Schematic diagram of microchannel boiling heat exchange cooling

国内外学者已对微通道沸腾换热现象进行了广泛的研究。已有研究表明,微通道内的流动沸腾换热规律已明显不同于常规尺度内的流动沸腾换热规律,适合于大通道的具有普适性规律的换热关联式和流动方程并不适用于微通道。到目前为止,有关微通道制冷蒸发器内两相流动和沸腾换热规律的研究主要有流形研究和换热特性与通道内气泡的核化机理的研究两类在微尺度条件下,由于流道狭窄,流型变化一般较为剧烈,容易引起流阻的变化、流动的稳定性变化以及传热恶化^[25~32],因此流型的研究极为重要。换热特性与微通道内气泡的核化机理的研究中微通道内的流动沸腾换热有核态沸腾和对流沸腾两种形式。核态沸腾换热系数与热流密度、流体特性、流体压力和通道尺寸等参数有关,而对流沸腾换热系数则由质量流速、质量含气率、流体特性、通道结构及尺寸等决定。汽化核心的形成与局部壁面过热度 and 流体过冷度有关^[33],而通道尺寸对于核化温度有所影响^[34,35]。

对于采用微通道蒸发器的微型制冷系统,蒸发器内沸腾换热不稳定两相流会引起气泡周期性充满微通道,造成通道气堵,从而引起壁面温度急剧升高^[36],造成散热器不能得到有效冷却甚至被烧毁。因此,微通道蒸发器内制冷剂不稳定两相流动规律是保证微制冷系统正常工作的前提,也是广泛应用微通道蒸发器和微制冷系统无法逾越的理论基础。

微通道沸腾换热应用于高功率固体激光器冷却,需要进行一系列的研究工作,包括对通道优化设计,保证蒸发器内沸腾换热的稳定性;对制冷系统进

- interface technology for VLSI packaging[J]. *Digest of Technical Papers-Symposium on VLSI Technology*, 1983, p60~61
- 3 William J. Benett, Barry L. Freitas, *et al.*. Microchannel heatsinks for high average power laser diode arrays [C]. *Proc. SPIE*, 1992, **1634**(453): 453~465
 - 4 R. Beach. Modular microchannel cooled heatsinks for high average power laser diode arrays[J]. *IEEE J. Quant. Electr.*, 1992, **28**(4): 966~976
 - 5 Harpole, George M., *et al.* Micro-channel heat exchanger optimization [C]. *IEEE Semiconductor Thermal and Temperature Measurement Symposium*, Feb, 1991, p59~63
 - 6 Huang Zhe. High efficiency, high power 808nm laser array and stacked arrays optimized for elevated temperature operation[J]. *OME Information*, 2004(11)
 - 黄哲. 高效率、大功率 808 nm 激光器阵列和为高温运转优化的叠层阵列[J]. *光机电信息*, 2004, **11**: 1~9
 - 7 Li Qifeng, Lü Wenqiang, Wu Deyong, *et al.*. Fabrication of V-shaped silicon microchannel cooler[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2005, **17** (SO): 114~116
 - 李奇峰, 吕文强, 武德勇等. V 形槽硅微通道冷却器研制[J]. *强激光与粒子束*, 2005, **17**(SO): 114~116
 - 8 Lü Wenqiang, Tu Bo, Wei Bin, *et al.*. Micro-channel heatsink module for high power diode laser[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2005, **17**(SO): 83~86
 - 吕文强, 涂波, 魏彬等. 高功率二极管激光器模块式微通道冷却器研制[J]. *强激光与粒子束*, 2005, **17**(SO): 83~86
 - 9 Liu Yun, Liao Xinheng, Qin Li, *et al.*. Oxygen-free copper microchannel heat sink of high power semiconductor laser[J]. *Chinese J. Luminescence*, 2005, **26**(1): 109~114
 - 刘云, 廖新胜, 秦丽等. 大功率半导体激光器叠层无氧铜微通道热沉[J]. *发光学报*, 2005, **26**(1): 109~114
 - 10 YunLiu, Xinheng Liao, *et al.*. Novel efficient compact package of high-power laser diode arrays with single piece oxygen-free copper microchannel heat sink cooling[J]. *Proceedings of the SPIE-The International Society for Optical Engineering*, 2004, **5280**(1): 429~433
 - 11 Yitshak Tzuk, Alon Tal, Sharon Goldring, *et al.*. Diamond cooling of high-power diode-pumped solid-state lasers[J]. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 2004, **40**(3): 262~269
 - 12 Hsian P. Chou, Yu-Lin Wang, Victor H. Hasson. Compact and efficient DPSS. laser using diamond-cooled technology [C]. *Proceedings of SPIE*, 2004, **5448**: 550~560
 - 13 J. Yang, L. Chow, M. Pais. Nucleate boiling heat transfer in spray cooling[J]. *ASME J. Heat Transfer*, 1996, **118**: 668~671
 - 14 Bohumil Horacek, Kenneth T. Kiger, Jungho Kim. Single nozzle spray cooling heat transfer mechanisms[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2005, **48**: 1425~1438
 - 15 M. R. Pais, L. C. Chow, E. T. Mahefkey. Surface roughness and its effects on the heat transfer mechanism in spray cooling [J]. *Heat Transfer*, 1992, **114**: 211~219
 - 16 D. P. Rini, R. H. Chen, L. C. Chow. Bubble behavior and nucleate boiling heat transfer in saturated FC-72 spray cooling [J]. *Heat Transfer*, 2002, **124**: 63~72
 - 17 K. J. Choi, S. C. Yao. Mechanism of film boiling heat transfer of normally impacting spray[J]. *Int. J. Heat Transfer*, 1987, **30**: 311~318
 - 18 C. Sodtke, P. Stephan. Spray cooling on micro structured surfaces[J]. *Heat and Mass Transfer*, 2007, **50**: 4089~4097
 - 19 E. Silk, J. Kim, K. Kiger. Investigation of enhanced surface spray cooling[C]. *Proc. of IMECE*, 2004, Anaheim (USA), 2004.
 - 20 Gao Shan, Qu Wei, Yao Wei. Flow and heat transfer of droplet impinging on hot flat surface during spray cooling[J]. *Journal of Engineering Thermophysics*, 2007, **28**: 221~224
 - 高珊, 曲伟, 姚伟. 喷雾冷却中液滴冲击壁面的流动和换热. *工程热物理论*, 2007, **28**: 221~224
 - 21 Chen Wei, Luo Xiaobing, Cheng Ting, *et al.*. Experimental investigation on micro jet cooling system for high power LED[J]. *Semiconductor Optoelectronics*, 2007, **28**(4): 478~482
 - 陈伟, 罗小兵, 程婷等. 大功率 LED 用微喷射流冷却系统的实验研究[J]. *半导体光电*, 2007, **28**(4): 478~482
 - 22 COTTERT P. Principles and prospects for micro heat pipe[C]. *Proceedings 5th International Heat Pipe Conference*, 1984: 328~335
 - 23 Petros, Mulugeta *et al.*. Totally conductive cooled, diode pumped, 2 μ m laser transmitter[J]. *The International Society for Optical Engineering*, v 5653, *Lidar Remote Sensing for Industry and Environmental Monitoring V*, 2005: 158~166
 - 24 Xie Boping, Yu, Z. Zack. Natural convection cooling for pump lasers in telecommunication applications[J]. *American Society of Mechanical Engineers, EEP*, 1999, **26-2**: 1943~1949
 - 25 P. C. Lee, F. G. Tseng, C. Pan. Bubble dynamics in microchannels (I) single microchannel[J]. *Int. J. Heat Mass Transfer*, 2004, **47**: 5575~5589
 - 26 H. Y. Li, F. G. Tseng, C. Pan. Bubble dynamics in microchannels (II) two parallel microchannels[J]. *Int. J. Heat Mass Transfer*, 2004, **47**: 5591~5601
 - 27 G. Hetsroni, A. Mosyak, Z. Segal, G. Ziskind. Two-phase flow patterns in parallel microchannels[J]. *International Journal of Multiphase Flow*, 2003, **29**: 341~360
 - 28 L. Zhang, J. Koo, L. Jiang, *et al.*. Measurements and modeling of two-phase flow in microchannels with nearly constant heat flux boundary conditions [J]. *Journal of microelectromechanical systems*, 2002, **11**(1): 12~19
 - 29 H. Y. Wu, P. Cheng. Liquid/Two-phase/Vapor alternating flow during boiling in microchannels at high heat flux[J]. *Int. Comm. Heat Mass Transfer*, 2003, **30**: 295~302
 - 30 A. Serizawa, Z. Feng, Z. Kawara. Two-phase flow in microchannels[J]. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 2002, **26**: 703~714
 - 31 M. Yu, T. Lin, C. Tseng. Heat transfer and flow pattern during two-phase flow boiling of R-134a in horizontal smooth and microfin tubes [J]. *International Journal of Refrigeration*, 2002, **25**: 789~798
 - 32 Xu J L, Zhang W, Wang Q W, *et al.*. Flow instability and transient flow patterns inside intercrossed silicon microchannel array in a micro-timescale [J]. *International Journal of Multiphase Flow*, 2006, **32**: 568~592
 - 33 S. G. Kandlikar. Nucleation characteristics and stability considerations during flow boiling in microchannels [J]. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 2006, **30**: 441~447
 - 34 Peng X F, Hu H Y, Wang B X. Boiling nucleation during liquid flow in microchannels[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 1998, **41**: 101~106
 - 35 Peng X F, Tien Y, Lee D J. Bubble nucleation in microchannels: statistical mechanics approach[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2001, **44**: 2957~2964
 - 36 R. Mertz, A. Wein and M. Groll. Experimental investigation of flow boiling heat transfer in narrow channels[C]. In: *Second European Thermal Sciences and 14th UIT National Heat Transfer Conference*, Rome, May, 26~31
 - 37 Steiner D, Schlunder E U. Heat transfer and pressure drop for boiling nitrogen flowing in a horizontal tube 1. saturated flow boiling[J]. *Cryogenics*, 1976, **16** (3): 387~399
 - 38 Steiner D, Schlunder E U. Heat transfer and pressure drop for boiling nitrogen flowing in a horizontal tube 2. Pressure drop[J]. *Cryogenics*, 1976, **16** (3): 457~764
 - 39 Klimenko V V, Sudarchikov A M. Investigation of forced flow boiling of nitrogen in a long vertical tube[J]. *Cryogenics*, 1983,

- 23** (3) : 379~385
- 40 RenXin, Zhang Peng, Wang Ruzhu. Experimental research on pool boiling heat transfer of liquid nitrogen in open space and capillary tubes [J]. *Cryogenics and Superconductivity*, 2005, **33**(3): 21~24
任 欣,张 鹏,王如竹. 大空间和毛细管内液氮池沸腾传热的实验研究[J]. *低温与超导*, 2005, **33** (3): 21~24
- 41 Qi Shouliang. Flow and Heat Transfer of Liquid Nitrogen in Micro-Tubes [D]. Shanghai: Shanghai Jiao tong University, 2007
齐守良. 微通道中液氮流动和换热特性研究[D]. 上海:上海交通大学, 2007