

文章编号: 0258-7025(2010)Supplement 1-0029-05

单 bar 条微通道相变热沉开发及性能测试

徐洪波¹ 田长青¹ 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 100049)

摘要 提出了利用水力空化效应抑制微通道流动沸腾不稳定性的方法并进行了实验验证。实验研究结果表明,在微通道入口设置了空化结构后,在加热量较大的变动范围内可以保持稳定的流动沸腾。基于这一研究结果,开发了一种采用水力空化效应的单 bar 条微通道相变热沉,并对单 bar 条微通道相变热沉进行了热工参数、电光参数以及最大散热能力测试。测试结果表明当输出光功率达到 70 W 左右时,光电效率达到最大值,且其最大散热能力超过了 100 W(发热热流密度 870 W/cm²)。

关键词 激光器;微通道;相变热沉;水力空化;稳定性

中图分类号 TK124;TN248.1

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201037s1.0029

Development and Performance Test of Microchannel Phase Change Heat Sink for LD Single Bar

Xu Hongbo¹ Tian Changqing¹ Cao Hongzhang¹ Si Chunqiang^{1,2}

(¹Technical Institute of Physics and Chemistry, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)
(²Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract A method of inhibiting the flow boiling instability in microchannel with the hydrodynamic cavitation effect was promoted and it was proved by experiment as well. According to experimental results, cavitation structure at the entrance of microchannel benefits to the stability of flow boiling with great range of heating input. Based on this result, a microchannel phase change heat sink with single bar by using of the hydrodynamic cavitation effect was developed, and its thermal parameters, electric-optical parameters and maximum heat dissipation potential were also tested. According to the experimental data, when the output power was about 70 W, the photoelectric efficiency achieved the maximum value, and the largest heat dissipation capacity of the heat sink exceeded 100 W whose heat flux density was 870 W/cm².

Key words lasers; microchannel; phase change heat sink; hydrodynamic cavitation; stability

1 引 言

激光二极管(LD)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。DPL被认为是固体激光器技术发展的重要方向,具有重要的用途。

LD正常工作时的热耗占总功耗的50%以上^[1],热耗带来的负面影响相当大,如降低输出功

率、缩短使用寿命等。特别是在DPL中,热耗引起LD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。随着激光二极管抽运固体激光器功率的增大,器件产生的热负荷越来越大,散热热流密度也越来越高,LD冷却问题已成为目前DPL研究中的技术难点。

在现有的LD冷却方式中,微通道液冷热沉在国内外已得到广泛应用。而相对于微通道液体对流换热冷却,微通道沸腾冷却具有更强的冷却能力,在

收稿日期: 2009-12-01; 收到修改稿日期: 2010-04-15

作者简介: 徐洪波(1979—),男,博士,助理研究员,主要从事高热流密度冷却技术、制冷空调新技术方面的研究。

E-mail: hbxu@mail.ipc.ac.cn

开发更高功率的固体激光器方面有着广阔的应用前景^[2]。但由于微通道沸腾换热机理比单相液冷换热机理更为复杂,需要解决热沉通道优化设计、两相流动稳定性等问题,因此目前还未见有微通道相变热沉用于激光器冷却的报道。

2 空化效应

空化是水流或液流在低压处突然发生的空泡(气化或气化空穴)现象。液流流经的局部区域,压强若低于液体温度所对应的饱和蒸气压,液体就会发生空化。在低压区空化的液体挟带着大量的空泡形成两相流,因而破坏了液体宏观上的连续性,液流挟带着的空泡在流经下游压强较高的区域时,空泡将发生湮灭,因此空化现象包括空泡的发生、发育和湮灭,是一个非恒定过程。

关于常规尺度水力空化的研究已经持续了很长时间,主要集中在研究水力空化效应对于流体机械的性能影响、对于固体壁面的破坏作用以及化学强化效应^[3~6]。流体力学研究结果表明,在一定的流动状态下,水力空化必然发生,尤其是高流速以及出现绕流时对于触发空化极为敏感^[7~9],例如文丘里管、后台阶和孔板即为管内典型的空化结构。其中文丘里管喉部由于主流流速增大易于触发空化,而后台阶流动则是由于剪切涡层以及绕流涡的涡中心压力降低易于触发空化,孔板内的流动则综合了上述两种空化触发因素。

在微型推进系统、微型能源系统等涉及高流速的微尺度领域,内部流动对于水力空化极为敏感,一定条件下将出现水力空化现象。最早的微尺度下水力空化的直接证据由 Pennathur 等在 2002 年给出^[10],Mishra 和 Peles 等^[11,12]在 2005 年进行了微通道内单相液体流经微孔的实验,观测到了微尺度下的水力空化流动过程,并指出存在极大的尺度效应,当微孔和通道的尺寸变化时存在两种不同的空化流形。其后他们又进行了可视化观测实验^[13]和微通道内单相液体流经微型文丘里管的实验^[14],认为触发空化的原因是由于微孔和微型文丘里管的喉部主流流速增加、静压降低造成的,但是未涉及绕流涡的影响。

微通道相变热沉研制需要解决的关键问题是抑制通道内沸腾过程中的振荡现象,避免沸腾早期出现局部蒸干现象。而抑制沸腾过程中气泡的快速生长是一种有效的方法。常规尺度水力空化的研究表明近壁面处空化泡的湮灭会产生高速微射流,如果

在空化过程中伴随有沸腾过程,那么近壁面处空化泡的湮灭所产生的高速微射流则有可能击碎生长过程中的沸腾泡,从而避免大尺寸气泡的产生。因此,为获得近壁面的空化区,采用截面突扩的微通道形式,希望由截面突扩处的绕流涡触发水力空化,并加工出了变截面微通道实验板,在此基础上进行了实验验证。实验结果表明,在设置了空化结构后,在加热量较大的变动范围内可以保持稳定的沸腾过程,由此可以确定引入水力空化效应后可以有效抑制通道内沸腾过程中的振荡现象。

3 单 bar 条微通道相变热沉结构设计及制作

一般来说,确定通道结构参数和通道间隔是微通道热沉设计的重要内容。在微通道热沉模拟分析中,采用有限差分法进行模拟分析。由于接触热阻与加工工艺关系很大,模拟时不考虑热沉内各部分之间的接触热阻。

图 1 为模拟计算时所采用的几何模型,其中 x 方向沿通道方向且平行于激光晶体板散热板面, y 方向垂直于激光晶体板散热板面, a (板厚度), b (通道宽度与间隔厚度之和)为单元尺寸, c 为通道宽度, d 为通道深度,且 $e = \frac{1}{2}(a-d)$ 。

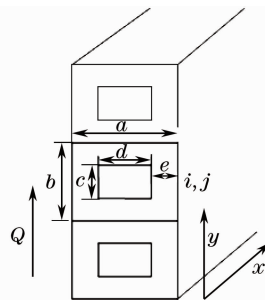


图 1 计算单元

Fig. 1 Calculation unit

选择一个通道作为计算单元。仅考虑通道壁面与流体之间的对流换热,则通道内为一维流动换热情况。对于不可压缩流体在等截面通道里流动,沿流动方向流速相等。若假定通道内壁面温度沿周向无变化,即采用壁面平均温度,且为单元内板的平均温度,则通道内流体沿流动方向的温度分布为

$$\rho_l c_{pl} u \frac{d_h}{4} \frac{dT_1}{dx} = h(T_s - T_1), \quad (1)$$

式中 ρ_l 为液体的密度, c_{pl} 为定压比热容, u 为通道内液体流速, h 为壁面与流体间换热系数, T_s 为单

元内板的平均温度, T_1 为单元所含通道内流体的平均温度, d_h 为水力直径, $d_h = 4A_c/P$, 过流面积 $A_c = c \times d$, 湿周 $P = 2c + 2d$ 。

通道内流动阻力损失为

$$\Delta P = f \frac{L}{d_h} \frac{\rho u_a^2}{2}, \quad (2)$$

式中 L 为通道长度, u_a 为通道内流体的平均速度, f 为阻力系数, 由实验确定。

计算通道外(板内)温度分布时, 因温度沿板的厚度方向无变化, 仅需考虑二维导热问题。在横截面上以一个通道单元作为计算时的最小单元, 即 y 方向单元长度为 b , x 方向单元长度取为 Δx , 取 (i, j) 处单元内板的平均温度为节点温度。由于铜的导热系数远远大于通道内流体的导热系数, 可忽略通道内流体的导热, 则沿 y 方向一个单元的热阻为

$$R_y = \left[\frac{c}{\lambda_s(a-d)} + \frac{(b-c)}{\lambda_s a} \right] \frac{1}{\Delta x}, \quad (3)$$

沿 x 方向一个单元的热阻为

$$R_x = \frac{\Delta x}{\lambda_s(ab-cd)}, \quad (4)$$

式中 λ_s 为热沉板的导热系数。

利用上述关系式, 通过建立稳态时的差分方程, 对采用图 2 所示空化结构的相变热沉, 进行了不同通道长度、不同蒸发温度及不同 bar 条腔长的数值模拟, 最后确定了相变热沉的结构, 并制作出实验样件。

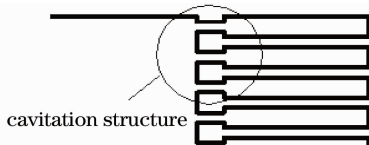


图 2 空化结构

Fig. 2 Schematic diagram of cavitation structure

4 单 bar 条微通道相变热沉性能测试实验

4.1 实验装置及实验方法

图 3 为实验装置示意图。液态制冷剂由供液装置提供, 进入相变热沉实验段, 在热沉中制冷剂吸热部分气化, 变为气液混合物, 再回到供液装置, 由其所带的冷却装置冷却为液态制冷剂, 完成一个循环。

LD 供电直流电源可以调节激光 bar 条的输入电流、电压, 制冷剂流量则通过调节变频器改变供液装置中的齿轮泵转速来改变。实验参数测量主要为 bar 条输入电压、输入电流、输出光功率、输出光波

长、制冷剂流量和热沉进出口压力。

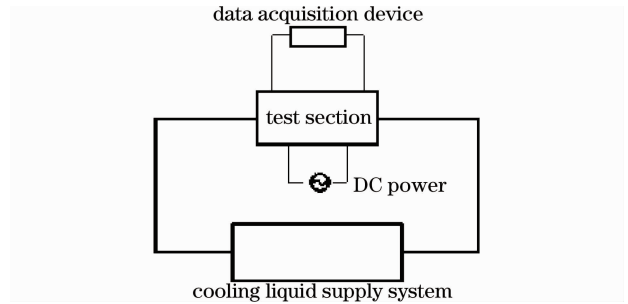


图 3 实验装置示意图

Fig. 3 Schematic diagram of test bench

4.2 实验数据及分析

4.2.1 热功参数测量实验

将齿轮泵转速固定为 40 Hz, 测量 LD 输入电流、输出光功率以及制冷剂质量流量。图 4 显示了 LD 输出光功率与输入电流的关系。可以看出, 发光电流阈值约为 15 A, 当输入电流大于发光阈值电流之后, 输出光功率随着输入电流呈线性变化。

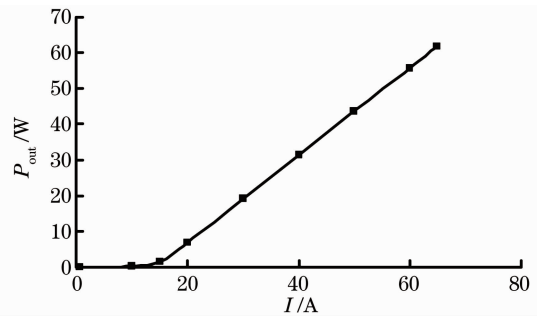


图 4 LD 输出光功率随输入电流的变化关系

Fig. 4 LD output power versus input current

图 5 为热沉进出口压力差随输出光功率的变化关系。可以看出, 随着输出光功率的增加, LD 发热功率也相应增加, 导致热沉内制冷剂气化量增加, 流阻增大, 因此进出口压降随输出光功率增加而增大。

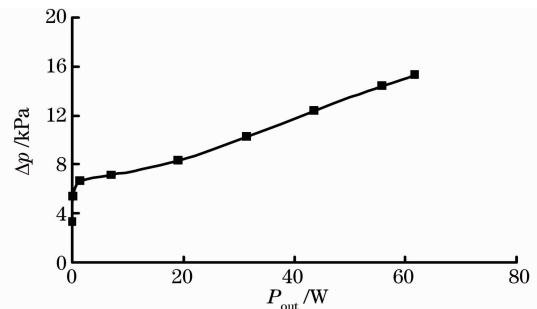


图 5 高转速时热沉进出口压降随输出光功率的变化关系

Fig. 5 Pressure drops in the heat sink at high rotating speed versus output power

从图中还可以看出,进出口压降最大为 15 kPa 左右,这远低于液冷热沉的进出口压差,可见采用空化结构的热沉在沸腾换热时具有很小的阻力。图 6 为各输出光功率稳定时的进出口压力曲线。从图中可以看出,各种工况时的压力比较稳定,其波动幅度不到 1×10^4 Pa,说明采用此结构的热沉在工质沸腾时稳定性较好。

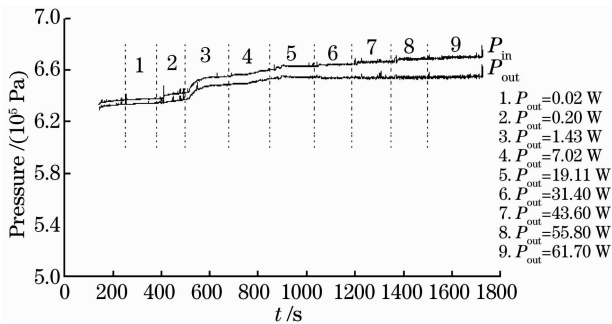


图 6 高转速时各输出光功率稳定时的进出口压力曲线
Fig. 6 Inlet and outlet pressure curve at various stable output power at high rotating speed

通过以上实验可以看出在 40 Hz 的转速下,热沉性能较稳定,满足 bar 条额定功率下的散热要求。为了得到热沉在较低流量下的性能表现,将齿轮泵的转速调低到 35 Hz,测量此时的 LD 输入电流、输出光功率以及制冷剂质量流量。

图 7 为热沉进出口压力差随输出光功率的变化关系。可以看出,当齿轮泵转速减小时,随着输出光功率的增加,进出口压降随输出光功率增加而增大。从图中还可以看出,进出口压降最大为 12 kPa 左右,这相对于转速高时略有减小。图 8 为各输出光功率稳定时的进出口压力波动曲线。从图中可以看出,各种工况时的压力比较稳定。

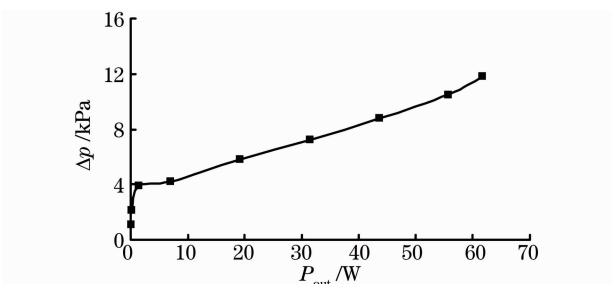


图 7 低转速时热沉进出口压降随输出光功率的变化关系
Fig. 7 Pressure drops in the heat sink at low rotating speed versus output power

由上述实验结果可以看到,加热初期热沉内工质由于具有一定过冷度,均经历液相升温直至稳定相变

过程。泵转速 40 Hz, bar 条输出功率 19.11 W 时,热沉出口压力和温度趋于稳定,如图 7 所示;而在泵转速 35 Hz 时,热沉出口压力和温度趋于稳定所对应的 bar 条输出功率则为 6.24 W,如图 8 所示。

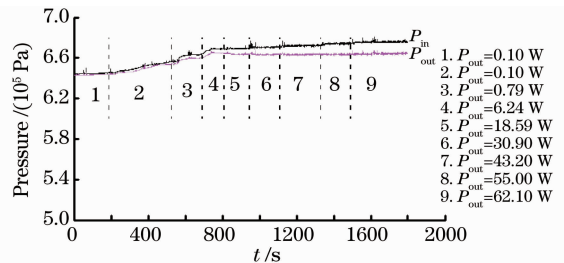


图 8 低转速时各输出光功率稳定时的进出口压力曲线
Fig. 8 Inlet and outlet pressure curve at various stable output power at low rotating speed

4.2.2 电光参数测量实验

由热功参数测量实验可以看到,采用变截面结构的平行多通道相变热沉换热性能稳定,在各输出光功率稳定时压力和温度波动均很小,下面的实验将测量不同输出光功率时的输出波长和电光转换效率。

将齿轮泵转速固定为 50 Hz,测量此时的 LD 输入电压、输入电流、输出光功率、输出光波长以及制冷剂质量流量。根据实验数据,计算了各输出光功率的光电效率,如表 1 所示。

表 1 不同输出光功率时的光电效率

Table 1 Photoelectric efficiency at variable output powers

Output power /W	Photoelectric efficiency	Output power /W	Photoelectric efficiency
1.58	0.07	36.9	0.490
7.20	0.22	42.8	0.510
13.17	0.32	48.4	0.520
19.16	0.39	53.9	0.530
25.06	0.43	59.6	0.530
30.90	0.46	64.9	0.536

图 9 为光电效率随输入电流的变化关系。可以

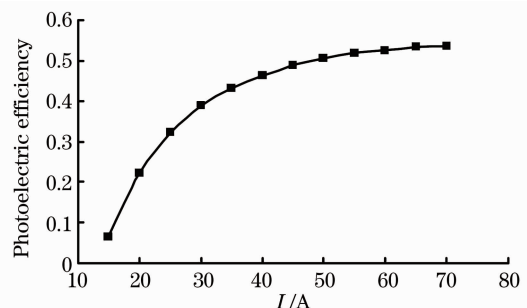


图 9 光电效率随输入电流的变化关系
Fig. 9 Photoelectric efficiency versus input current

看出,随着输入电流即输出光功率的增加,光电效率逐渐增大。当输入电流达到 70 A 时(输出光功率为 64.9 W),此时光电效率达到最大值 0.536。

4.2.3 相变热沉最大散热能力测试

为了测试单 bar 条相变热沉的最大散热能力,将齿轮泵转速设定为 50 Hz,重新进行上述实验。测试过程中 bar 条输出功率随输入电流增加逐渐增大,输入电流在实验过程中持续上调,达到 115 A,输出 101.3 W 时为实验所保持的最后稳定工况,电流继续上调时 bar 条烧毁。对实验结果进行整理,可以得出图 10,11 所示关系。其中图 10 为 LD 输出光功率随输入电流的变化关系,图 11 为光电效率随输出光功率的变化关系。

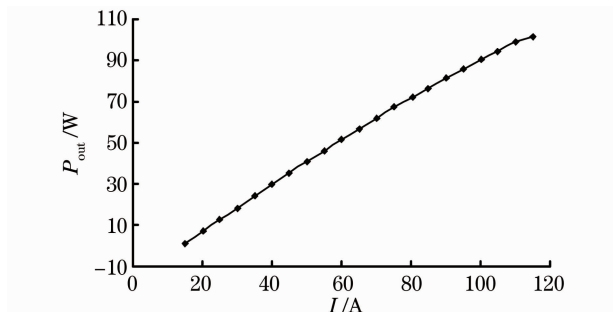


图 10 LD 输出光功率随输入电流的变化关系

Fig. 10 LD output power versus input current

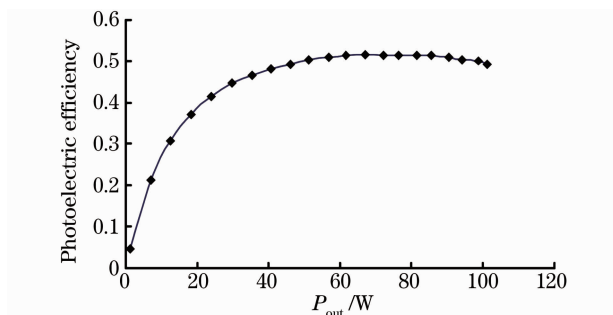


图 11 光电效率随输出光功率的变化关系

Fig. 11 Photoelectric efficiency versus output power

由实验结果可知,在输入电流达到 115 A, bar 条输出光功率 101.3 W 时热沉出口温度恒定,现场观察出口为两相,热沉保持稳定冷却工况,此时 bar 条输入电功率 205.85 W,发热功率 104.53 W(发热热流密度为 870 W/cm²),说明所研制的热沉完全满足 bar 条散热量要求。bar 条烧毁是由于结温升高所致。由图 10 可以看出,当输入电流达到 115 A 时,输出光功率已经开始偏离线性变化,说明此时散热能力开始不足。图 11 显示 bar 条输出光功率在 50~95 W 的输出范围内效率变化不是很大,约

70 W 时 LD 电光转换效率最大,输出功率继续上升时电光转换效率开始下降。

5 结 论

根据空化效应可以有效抑制微通道内沸腾过程中的振荡现象,设计制作出单 bar 条微通道相变热沉,通过对相变热沉的一系列实验,得出以下结论:

1) 引入水力空化效应可以有效抑制微通道内沸腾过程中的振荡现象。

2) 对封装单 bar 条后的微通道相变热沉的冷却性能进行了测试。热功参数测量实验表明,相变热沉阻力远低于液冷热沉的阻力,在各不同输出光功率稳定时压力和温度波动小,稳定性较好。

3) 对封装单 bar 条后的微通道相变热沉电光参数测量实验表明,当输出光功率达到 70 W 左右时,光电效率达到最大值。

4) 相变热沉最大散热能力测试表明其最大散热能力超过了 100 W(发热热流密度 870 W/cm²)。

参 考 文 献

- Zhou Shouhuan, Zhao Hong, Tang Xiaojun. High average power laser diode pumped solid-state laser[J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(7): 1605~1618
- 周寿桓, 赵 鸿, 唐小军. 高平均功率全固态激光器[J]. *中国激光*, 2009, **36**(7): 1605~1618
- Tian Changqing, Xu Hongbo, Cao Hongzhang et al.. Cooling technology for high-power solid-state laser [J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(7): 1686~1692
- 田长青, 徐洪波, 曹宏章等. 高功率固体激光器冷却技术[J]. *中国激光*, 2009, **36**(7): 1686~1692
- R. E. A. Arndt. Cavitation in fluid machinery and hydraulic structures[J]. *Ann. Rev. Fluid Mech.*, 1981, **13**: 273~328
- D. D. Joseph, A. Prosperetti. Cavitation and the state of stress in a flowing liquid[J]. *J. Fluid Mech.*, 1998, **366**: 367~378
- B. Ran, J. Katz. The response of microscopic bubbles to sudden changes in the ambient pressure[J]. *J. Fluid Mech.*, 1991, **224**: 91~115
- Y. Tomita, A. Shima. Mechanisms of impulsive pressure generation and damage pit formation by bubble collapse[J]. *J. Fluid Mech.*, 1986, **169**: 535~564
- R. T. Knapp, J. W. Daily, F. G. Hammit. Cavitation[M]. New York: McGraw-Hill, 1970
- M. S. Plesset. The dynamics of cavitation bubbles[J]. *J. Appl. Mech.*, 1949, **16**: 277~282
- J. W. Holl. Nuclei and cavitation[J]. *J. Basic Eng.*, 1970, **92**: 681~688
- S. Pennathur, Y. Peles, A. H. Epstein. Cavitation at micro-scale in MEMS fluid machinery[C]. In Proceedings of ASME International Mech. Engg. Congress and Exposition, 2002, 87~94
- C. Mishra, Y. Peles. Cavitation in flow through a micro-orifice

-
- inside a silicon micro-channel[J]. *Phys. Fluids*, 2005, **17**(1): 013601
- 12 C. Mishra, Y. Peles. Size scale effects on cavitating flows through micro-orifices entrenched in rectangular microchannels [J]. *J. Microelectronic Syst.*, 2005, **14**(5): 987~999
- 13 C. Mishra, Y. Peles. Flow visualization of cavitating flows through a rectangular slot micro-orifice ingrained in a microchannel[J]. *Phys. Fluids*, 2005, **17**(11): 113602~113616
- 14 C. Mishra, Yoav Peles. An experimental investigation of hydrodynamic cavitation in micro-venturis [J]. *Phys. Fluids*, 2006, **18**(10): 103603