文章编号: 1007 - 4252(2022)02 - 0002 - 142 DOI: 10.20027/j.gncq.2022.0012

# 石墨烯表面构筑微通道的传热性能研究

张兴丽[1],王晓杰[1],杨 明[2,*]
(1.东北林业大学 机电工程学院,哈尔滨 150040; 2. 中国科学院工程热物理研究所,北京 100190)

**摘要:** 本文采用化学气相沉积法(CVD 法)在微通道散热器金属基底(铜基)表面上生成石墨烯层,进一步强化微通道整体传热性能。通过实验与模拟仿真相结合的方法,研究了矩形截面铜基底微通道在不同温度以及流体流速条件下,生长石墨烯层对微通道内部的温度分布的影响。研究结果表明: 生长石墨烯薄膜层的微通道内部的最高温度可以降低 7 ℃左右,可将电子器件的散热率提高 8.1%; 布置微肋后的石墨烯层微通道最高温度进一步降低 2 ℃左右,温度分布更加均匀; 将数值模拟计算结果与实验结果进行比较,两者结论一致。

**关键词:** 石墨烯; 微通道; 强化传热; CVD 生长
**中图分类号:** TQ127.1; TK124 **文献标识码:** A

# Study on heat transfer performance of microchannel enhanced by graphene

ZHANG Xing-li[1], WANG Xiao-jie[1], YANG Ming[2,*]
(1. College of Mechanical and Electrical Engineering, Northeast Forestry University, Harbin 150040, China; 2. Institute of Engineering Thermophysics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China.)

**Abstract:** In this paper, graphene layer is formed on the surface of metal substrate (copper substrate) of microchannel radiator by chemical vapor deposition to further enhance the overall heat transfer performance of microchannel. Through the combination of experiment and simulation, the effect of graphene layer on the temperature distribution in the rectangular copper substrate microchannel and the improvement of heat transfer performance by micro ribs under different temperatures and fluid velocity were studied. The results show that the maximum temperature in the microchannel grown with graphene thin layer is reduced by about 7 ℃, and the heat dissipation rate of electronic devices can be increased by 8.1%. The maximum temperature of graphene layer microchannels with micro ribs is reduced by about 2 ℃, and the temperature distribution is more uniform. The numerical simulation results are compared with the experimental results, and the two conclusions are consistent.

**Key words:** Graphene; Microchannel; Heat Transfer enhancement; CVD Grow

**收稿日期:** 2021-11-12; **修订日期:** 2022-02-14
**基金项目:** 国家自然科学基金项目(51706039); 中央高校基本科研业务费专项资金项目(2572020BF01).
**作者简介:** 张兴丽(1981-),女,博士,副教授,主要研究方向为为微尺度传热(E-mail: zhang-xingli@ nefu.edu.cn).

## 0　引言

随着集成电路技术和电子封装技术的迅猛发展，芯片不断朝着高集成度、轻量化和小型化发展。据预测，芯片局部热点热流密度将会超过 1 000 W/cm$^2$[1]，单位面积的热流密度不断增加，设备的散热条件对芯片是否能够高效平稳运行有重要的影响。目前，传统的冷却手段已不能满足未来先进电子元器件（如高功率微波、毫米波器件以及机载、星载电子设备等）的散热要求，解决高热流密度电子元器件在微小区域内的散热问题需要新的突破[2-6]。

在微通道内流体的流动与换热研究方向中，国内外研究人员进行了一系列的研究工作。Dixit 等[7]提出了一种基于硅微/纳米柱的多层水冷散热器设计，硅柱的存在使得散热器基底散热效率提高 16%，显著提升了电子/微机电系统元件的整体热性能；Li 等[8]采用数值模拟的方法分别研究了多孔肋结构对矩形微通道传热和流动特性的影响，利用场协同原理对热性能进行了分析。结果表明多孔肋可以增强速度场和温度梯度场的协同效应，改善传热性能；Rajalingam 等[9]提出微柱结构可以作为增强的表面改善微通道的传热性能，微柱结构的布局对提高微通道的传热性能也有一定的促进作用；国内魏壮壮等[10]在微通道内部添加两个间隔结构，将综合换热系数提升至 67.0 kW/(m$^2$ · K)，明显提高热沉的换热性能。

在上述研究中微通道大都以高热导率的单一金属或金属合金作为基底，且通过对微通道的结构设计来增强其传热性能。石墨烯是目前最热门的二维材料之一，具有优异而独特的物理和化学性质，其热导率远远高于以往的铜、铝等金属材料，室温下悬浮状的单层石墨烯的热导率达到 2 700 ~ 5 000 W/(m · K)[11-16]。微通道铜基表面生成石墨烯层可进一步增强热源与流体之间的热量传递。基于此，本文采用化学气相沉积法（CVD 法）[17-22]将碳源在微通道铜基表面上成核，二维重构生成石墨烯层，通过热像仪测量薄膜表面的温度分布，得到沿通道内流体流动方向的温度分布及局部传热特性。同时，采用 CFD 数值模拟方法，对石墨烯强化微通道基底的传热性能进行分析，探讨了表面生成的石墨烯薄膜层对微通道热传输强化的机理。

## 1　实验方法

### 1.1　样品制备

本文选取尺寸为 20 mm×17 mm×2 mm、纯度为 99.99%的铜板作为基底材料，利用 CNC 激光雕刻机制备微通道结构。如图 1 为微通道结构示意图，与流体流入流出方向一致的为横向微通道，长度为 16 mm，宽度、高度与纵向微通道一致为 1 mm。横向微通道之间并联 8 条纵向微通道，纵向微通道长度 $L_z$ = 16 mm、宽度 $L_x$ = 0.5 mm，整体基底厚度 $L_y$ = 2 mm。

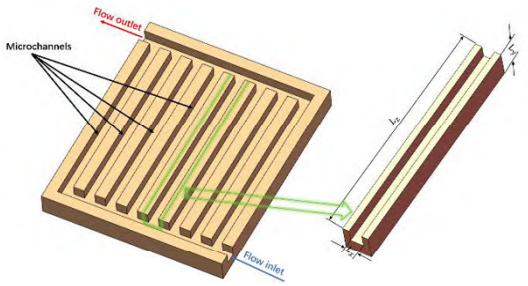


图 1　微通道结构示意图

Fig. 1 Schematic diagram of microchannel structure

将制备完成的铜基微通道依次放入异丙醇、无水乙醇、去离子水中进行清洁，超声处理 600 s。其次进行钝化膏刻蚀、电化学抛光处理（8 V，480 s，7 cm），最大限度消除表面杂质、凹痕等缺陷，得到光滑平整的表面如图 2(a)。采用 CVD 法在预处理的铜基微通道表面生成石墨烯薄膜层。对管式炉进行真空处理后，充入甲烷气体作为碳源，氢气作为还原性气体，氩气作为保护性气体，在 1 035 ℃、400 Pa 的气态环境下借助铜基底的催化作用，实现甲烷的脱氢处理，在铜基底上生成连续的石墨烯薄膜层，如图 2(b) 所示。

### 1.2　样品表征

对在微通道铜基底生成的石墨烯薄膜层进行原子力显微镜（AFM）测试，表征结果如图 3 所示。由 AFM 表征结果可知，生成的石墨烯薄膜层厚度约 5 nm，厚度均匀性< 2 nm。石墨烯表层的大多数区域保持完整，并可观察到石墨烯的莫尔条纹，在每个破损点附近都有一个亮点，这说明生成的石墨烯薄膜层中存在不规则的结构缺陷。

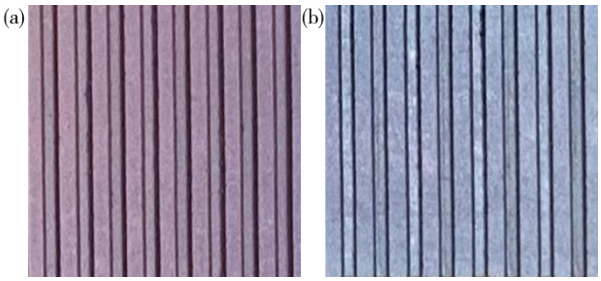


图 2 (a) 原始的微通道基底;(b) 生长石墨烯薄膜层的微通道基底

Fig. 2 (a) Pristine microchannel substrate; (b) Microchannel substrate with graphene thin films

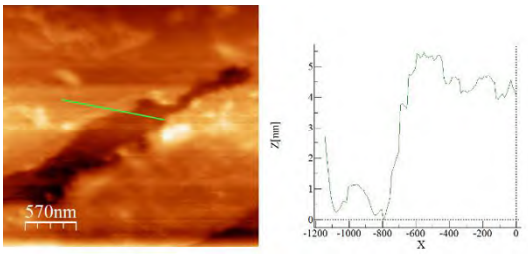


图 3 石墨烯层 AFM 测试结果

Fig. 3 AFM test results of graphene film

### 1.3 实验结果

利用红外热像仪(型号为 Fluke Ti400)测试了微通道散热器内部的温度分布。图 4 是在液体工质流速为 6 mL/min、热源温度为 100 ℃时微通道散热器内部的温度场示意图。可以看出,生成石墨烯薄膜层后的微通道,散热面最高温度极值为 86 ℃,比原始微通道最高温度降低 7 ℃。这归因于在铜基底表面生成石墨烯薄膜层,不但可使基底表面热传导加快,同时也使固体和液体工质之间的换热效率明显提高,因此基底表面出现了较为明显的温度降低。

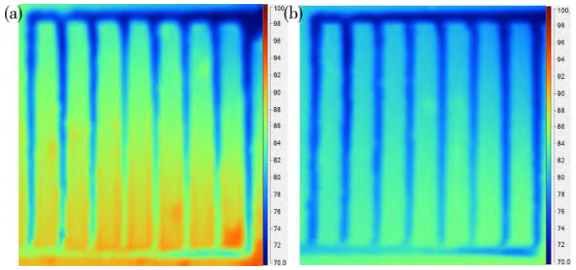


图 4 微通道内部的热成像图(a) 无石墨烯薄膜层基底;(b) 生成石墨烯薄膜层的基底

Fig. 4 Thermal imaging (a) Pristine microchannel substrate; (b) Microchannel substrate with graphene thin films

## 2 数值仿真

### 2.1 模型建立

同时,本文利用仿真软件对生成石墨烯薄膜层的铜基矩形微通道的稳态传热进行了仿真计算,建立如图 5 所示的微通道细化网格模型。为了便于与实验结果进行比对,微通道模型尺寸与实验样品相同。图 5 所示模型网格单元数量为 180 万。

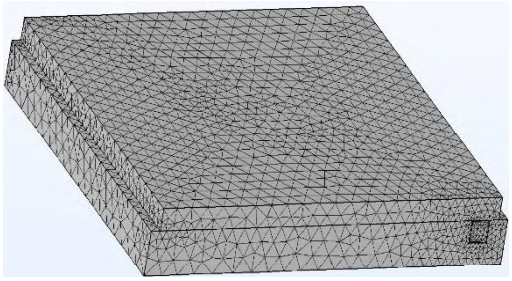

图 5 微通道网格划分模型

Fig. 5 Simulation model of rectangular microchannel

液体工质在低雷诺数下流经微通道依然可设置为层流分布,设置流体流速为 0.5 m/s、出口端压强为 0 Pa。由于本文所建立的微通道模型宽度在 1 μm~1 mm 范围以内,因此连续介质假定、Navier-Stokes 方程和傅里叶导热定律仍然适用于本文模型的仿真计算。

### 2.2 仿真结果与讨论

图 6 为给定相同热源功率、流速等相应参数后,微通道内部的温度分布。无石墨烯薄膜层的微通道最高温度为 99.6 ℃,而生成石墨烯薄膜层的微通道最高温度为 75.6 ℃,最高温度降低了 24.1%,与实验测量结果吻合较好。液体工质在微通道入口端温度较低,沿着流体流动的方向,边界层逐渐建立起来,因此在微通道入口处的边界层最薄,局部表面换热系数在此处达到最大值,随后液体工质的分子热运动剧烈程度不断增加,在微通道的末端其温度达到最大值。这是因为温度较低的液体工质从横向微通道流入纵向微通道内,在流动的过程中逐渐被加热。在热能不断增加的条件下,微通道的换热效率却逐渐降低,致使纵向微通道下游末端有高温热集中点。

图 7 为沿流体流动方向(X 方向)纵向微通道内部各点处的温度值。由图可知,生长石墨烯薄膜

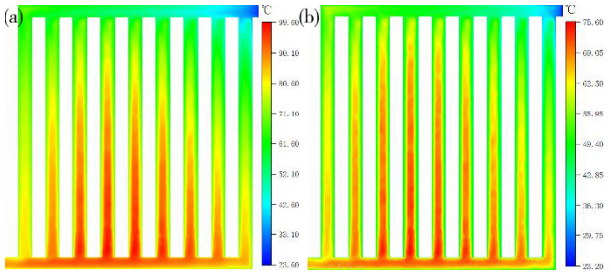


**图 6　微通道内部温度分布的仿真结果( a) 无石墨烯薄膜层基底; ( b) 生成石墨烯薄膜层的基底**

Fig. 6 Temperature distribution inside microchannel ( a) without graphene thin films; ( b) with graphene thin films

层的微通道在各点处的温度值都明显低于未生长石墨烯薄膜层的微通道，这说明石墨烯薄膜层可明显增强微通道的热传导性能。与实验结果进行比较可知，仿真结果比实验结果得到的温度值略低，这可能是因为在实验过程中石墨烯薄膜层中产生的结构缺陷对微通道导热性能的增强作用会产生一定的负面影响。同时，在实验研究中存在一定量的微通道辐射散热影响，而在仿真模拟中并未考虑该影响。

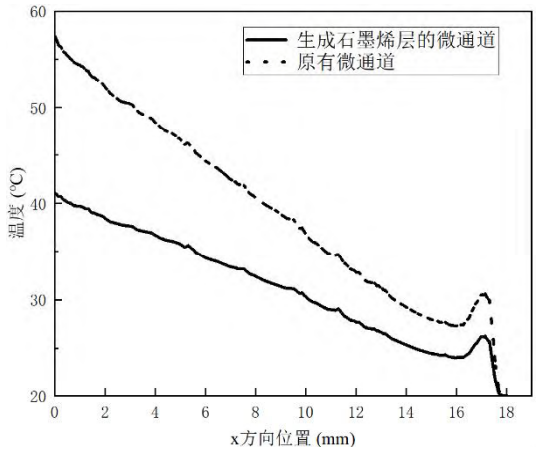


**图 7　沿流体流动方向微通道内部的温度值**

Fig. 7 The temperature of microchannel along the direction of fluid flow

本文通过在微通道衬底生成石墨烯薄膜层强化传热基础上，在微通道中引入微肋结构进一步强化微通道的换热性能。通过对微肋结构位置进行合理布局，可增强纵向微通道流体的扰动，使微通道内对流换热系数随流速的增加而增加，在相同的冷却性能下更为有效的降低参考面最高温度，使散热面具有更好的温度均匀性。如图 8 所示，本文在微通道内部建立了五种相同尺寸不同位置的微肋结构，横截面均为正方形，对角线长度为 0.5 mm，微肋与微通道同等深。

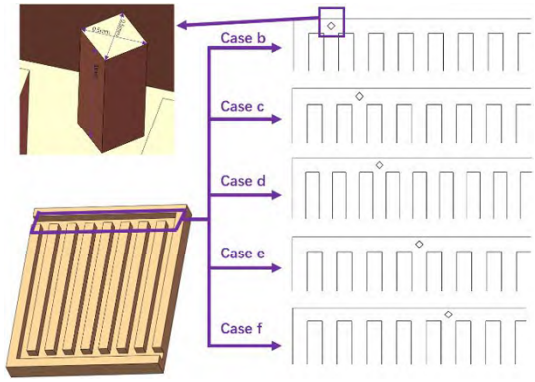


**图 8　五种微肋布局及尺寸示意图**

Fig. 8 Layout and size diagram of five micro ribs

微肋不同位置时石墨烯强化微通道的流速如图 9 所示。图 9( a) 是不含有微肋结构的微通道流速分布。液体工质在微通道中心处速度最大，并联排布的各纵向微通道之间流体流量相差较大。液体工质依次流入八条纵向微通道过程中，最靠近入口端及最远离入口端的两条微通道获得最高流量，中间纵向微通道流体流速仅为 0.2 ~ 0.3 m/s。图 9( b) -9( f) 是微肋不同位置时微通道内流体流速图。引入微肋结构后液体横向流动受到阻挡，迫使横向干流流入微肋前方的纵向微通道，纵向微通道流速急剧增大，有效的改善了局部对流换热。与此同时，微肋后壁面会出现流体“附着”现象，局部流速极低，这是由于流体在经过微肋时，流域面积变小与变大的同时，流体流速也会相应变大与变小。图 9( d) 、9( e) 、9( f) 中微肋后方的纵向微通道受影响较大，微肋的加入使后方的纵向微通道中流速差异增大。相比之下图 9( b) 、9( c) 中微肋下游流道的流速较为均匀。

图 10 是微肋不同位置时石墨烯强化微通道的温度分布。不含有微肋结构的石墨烯强化微通道的最高温度为 75.6 ℃，而含有五种不同位置的微肋结构微通道的最高温度分别为 73.6 ℃、74.6 ℃、75.4 ℃、74.6 ℃、74.2 ℃，这表明在生成石墨烯薄膜层微通道中增加微肋结构，可使微通道的换热性能明显提升，最高可使微通道的局部温度降低 2 ℃。

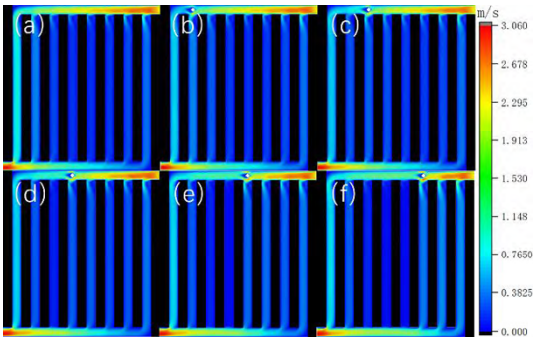


**图 9 微肋不同位置时石墨烯强化微通道的流速图**

Fig. 9 Flow velocity diagram of graphene microchannel at different micro-rib positions

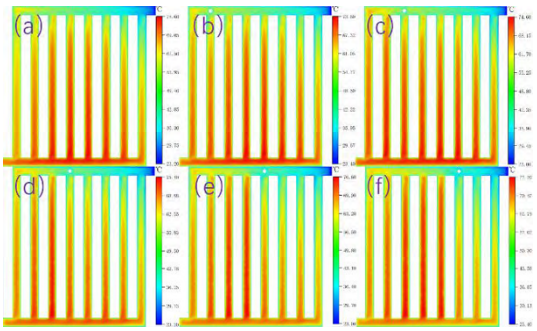


**图 10 微肋不同位置时石墨烯强化微通道的温度分布图**

Fig. 10 The temperature distribution of graphene microchannel at different micro-rib positions

## 3 结论

**本文利用实验方法在微通道散热器金属基底(铜基)表面上生成石墨烯薄膜层,使微通道基底的传热性能得到明显强化,生成石墨烯薄膜层的微通道比无石墨烯薄膜层的微通道最高温度降低约8.1%。同时,为验证实验的可靠性,本文对相同结构形式的微通道进行了仿真模拟研究,仿真结果与实验结论吻合较好。同时,为了解决纵向微通道流量不均的问题,在石墨烯强化微通道基础上引入具有散热加强单元的微肋结构,结果表明此举可进一步增强微通道的温度均匀性,同时使微通道最高温度明显降低。本文的研究结果对微纳电子器件的散热设计和优化具有一定的指导意义。**

**参考文献:**

[1] Hao X H, Peng B, Xie G N, et al. Efficient on-chip hotspot removal combined solution of thermoelectric cooler and mini-channel heat sink [J]. Applied thermal engineering, 2016, 100: 170-178.

[2] Wang J, Yu K, Ye M Z, et al. Effects of pin fins and vortex generators on thermal performance in a microchannel with $Al_2O_3$ nanofluids [J]. Energy, 2022, 239(E): 122606.

[3] 裘腾威, 刘 敏, 刘 源, 等. 新型多孔铜微通道热沉散热性能实验研究 [J]. 热科学与技术, 2020, 19(04): 339-346.

[4] Lin X H, Mo S P, Mo B Z, et al. Thermal management of high - power LED based on thermoelectric cooler and nanofluid - cooled microchannel heat sink [J]. Applied Thermal Engineering, 2020, 172: 115165.

[5] Sen S, Darici S. Transient conjugate heat transfer in a circular microchannel involving rarefaction, viscous dissipation and axial conduction effects [J]. Applied Thermal Engineering, 2017, 111: 855-862.

[6] Oni M O, Jha B K. Joule heating and viscous dissipation effect on electroosmotic mixed convection flow in a vertical microchannel subjected to asymmetric heat fluxes [J]. Propulsion and Power Research, 2021, 10(1): 83-94.

[7] Dixit P, Chen X, Miao J M, et al. Study of surface treatment processes for improvement in the wettability of silicon-based materials used in high aspect ratio through-via copper electroplating [J]. Applied Surface Science, 2007, 253(21): 8637-8646.

[8] Li F, Ma Q M, Xin G M, et al. Heat transfer and flow characteristics of microchannels with solid and porous ribs [J]. Applied thermal engineering, 2020, 178: 115639.

[9] Rajalingam A, Chakraborty S. Effect of micro-structures in a microchannel heat sink-A comprehensive study [J]. International journal of heat and mass transfer, 2020, 154: 119617.

[10] 魏壮壮, 高林松, 王仁彻, 等. 金属微通道热沉换热特性仿真与实验研究 [J]. 真空与低温, 2020, 26(02): 131-138.

[11] 宋厚甫, 康飞宇. 石墨烯导热研究进展 [J]. 物理化学学报, 2022, 38(01): 87-102.

[12] Yang X M, Meng F X, Zhang X Y, et al. Mesoscopic simulation of thermal conductivities of 3D carbon nanotubes, graphene and their epoxy resin based composites [J]. International Journal of Thermal Sciences, 2022, 172: 107273.

[13] Ye J, Jeong J. Effects of structural characteristics of Cu grain boundaries on graphene growth [J]. Carbon, 2021, 176: 262-270.

[14] Wang J B, Ren Z, Hou Y, et al. A review of graphene synthesisatlow temperatures by CVD methods [J]. New

Carbon Materials，2020，35( 3) : 193-208.

[15] 刘　明，徐伟华，许　康，等. 石墨烯薄膜与半导体界面热输运规律 [J]. 中国石油大学学报( 自然科学版) ，2020，44( 06) : 103-108.

[16] 于利媛，杨　丹，韦群桂，等. 填充型高分子导热复合材料的研究进展 [J]. 橡胶工业，2020，67( 11) : 873-879.

[17] Huet B，Raskin J P，Snyder D W，et al. Fundamental limitations in transferred CVD graphene caused by Cu catalyst surface morphology [J]. Carbon，2020，163: 95-104.

[18] Qi P W，Huang Y N，Yao Y Z，et al. Wax-assisted crack-free transfer of monolayer CVD graphene: Extending from standalone to supported copper substrates [J]. Applied surface science，2019，493: 81-86.

[19] 程　婷，孙禄钊，刘志荣，等. 金属衬底在石墨烯化学气相沉积生长中的作用 [J]. 物理化学学报，2022，38( 01) : 26-41.

[20] 张德洲，徐　晨，汪　虹，等. 石墨烯/聚氨酯纳米复合材料研究进展 [J]. 功能材料与器件学报，2021，27( 03) : 174-180.

[21] 李　伟，刘林涛，李争显，等. CVD 在介电材料表面直接制备石墨烯进展 [J]. 稀有金属材料与工程，2020，49( 11) : 3987-3997.

[22] 姚文乾，孙健哲，陈建毅，等. 石墨烯的化学气相沉积可控制备 [J]. 科学通报，2020，65( Z2) : 3134-3149.