光电器件

DOI：10.16818/j.issn1001－5868.2023010901

金刚石复合热沉面发射激光器面阵热特性研究

宋依依，邹永刚*，石琳琳，田　锟，
赵　瑞，郝永芹，王海珠，范　杰，马晓辉
（长春理工大学 高功率半导体激光国家级重点实验室，长春 130022）

摘　要： 通过设计基于金刚石微槽结构的复合热沉，利用不同材料的热导率差异改变热流传导方向，以优化垂直腔面发射半导体激光器（VCSEL）面阵由于温度分布不均匀导致的中心热量堆积的问题，从而改善激光器面阵整体的输出功率，提高可靠性。基于有限元分析法建立三维热电耦合模型，研究了VCSEL面阵单元排布方式对激光器热串扰效应的影响，同时还研究分析了金刚石复合热沉中微槽形状和位置的变化对半导体激光器内部温度的影响，设计最优结构对激光器的出光性能做进一步优化。采用金刚石复合热沉后的垂直腔面发射激光器面阵，与传统金刚石热沉的封装结构相比，激光器发光单元的温度差值降低了29%，为大面积半导体激光器面阵的输出功率优化提供了新思路。

关键词： 半导体激光器；金刚石复合热沉；微槽结构；有限元分析法；热管理
中图分类号： TN248.4　**文章编号：** 1001－5868(2023)03－0363－08

Thermal Study of Vertical-cavity Surface-emitting Laser Based on Diamond Heat Sink

SONG Yiyi, ZOU Yonggang, SHI Linlin, TIAN Kun, ZHAO Rui,
HAO Yongqin, WANG Haizhu, FAN Jie, MA Xiaohui
(State Key Laboratory of High Power Semiconductor Laser, Changchun University of Science and Technology, Jilin University, Changchun 130022, CHN)

Abstract: By designing a composite heat sink based on diamond micro-groove structure, the utilization of thermal conductivity difference changes the heat flux conduction, to optimize the problem of heat accumulation in the center of the VCSEL surface array due to uneven temperature distribution, thus improve the overall output power and reliability of the laser surface array. Based on the finite element analysis, a three-dimensional thermoelectric coupling model was established to study the effect of vertical-cavity surface-emitting laser surface array unit arrangement on the thermal crosstalk effect of the laser. Moreover, the effect of the change of microgroove shape and position in the diamond composite heat sink on the internal temperature of the semiconductor laser was also studied and analyzed. And the optimal structure was designed for further optimization of the laser output performance. The vertical-cavity surface-emitting laser facet array with diamond composite heat sink reduces the temperature difference of the laser emitting unit by 29% compared with the conventional diamond heat sink package structure. This provides a new idea for output power optimization of large-area semiconductor laser facet arrays.

Key words: semiconductor lasers; diamond composite heat sink; micro groove structure; finite element analysis method; thermal management

收稿日期：2023－01－09.
基金项目：国家自然科学基金青年基金项目(61804013,61804014)；长春理工大学青年基金项目(XQNJJ-2017-2).
* **通信作者：**邹永刚　**E-mail：**zouyg@cust.edu.cn

0 引言

垂直腔面发射半导体激光器(Vertical Cavity Surface Emitting Laser,VCSEL)具有光束对称、低阈值、高速调制、单纵膜、没有光学镜面的灾难性损伤和易于生产密集的二维面阵等优点,被广泛应用于激光抽运、红外激光器光源、光存储、三维传感和光探测等领域[1-5]。目前,将激光器二维集成为VCSEL面阵实现更高的输出功率,成为更广泛应用的一种普遍公认的方法[6],集合VCSEL面阵中所有发光单元的有效输出可实现更高更稳定的输出功率[7-8]。然而,VCSEL面阵由于热量的横向扩展和积累效应产生的热串扰,会使中心部分的发光单元过量热积累且与边缘部分温度不同,进而使激光器因产生热透镜效应和增益压缩效应等热光学效应而导致性能降低[9]。因此,研究VCSEL激光器的散热结构模型对提高激光器性能至关重要。为了减小面阵单元间的热串扰,提高面阵的整体输出功率,许多研究者在VCSEL面阵散热研究上面做了许多工作。Wang等[10]通过改变氧化孔径大小和衬底厚度设计氧化限制型VCSEL面阵的发光单元分布模型;Chuyu等[11]通过增大VCSEL面阵单元间距,减小了面阵中相邻发光单元间的热影响和累积。然而,目前针对提高VCSEL面阵散热效果的研究工作仅是基于对激光器本身的单元间排布设计以及与发光单元大小比例调整等热管理方式。若想进一步提高VCSEL面阵散热效果,以及改善面阵的散热热流渠道,还需要研究更高效更直接的热管理方式,也就是从直接能将热量传导出的散热热沉着手。金刚石在目前研发的高热导率材料中,其硬度、绝缘性和稳定性更适用于高功率器件以及极端复杂环境,它独特的晶格结构和强共价电子键的组合导致了通过声子进行热传导的巨大容量,再加上它的低介电损耗、低摩擦系数、大光谱范围的透明度、高硬度和化学惰性以及热膨胀系数可变,能够很好地消除剪切应力[13],因此金刚石在热管理方面具有非常突出的优势。利用金刚石这一高热导材料作为热沉,能使导热效果比用传统热沉的大功率半导体激光器的效率提高1.5~2.0倍[14],并且采用金刚石作为基于量子点的高效率垂直外腔面发射激光器的热沉,提高了有源区热量的均匀性[15]。因此,金刚石在改善热传导方面具有很大的优势。若将高导热材料金刚石与传统导热材料铜结合制成复合热沉,不仅能提高热导率,还能改变热沉内部热流流向,对降低VCSEL面阵发光单元间的热串扰效应而使激光器的性能实现显著提高具有重要作用。

本文提出了采用金刚石复合热沉封装结构,研究了VCSEL面阵的热特性。设计金刚石微槽结构与VCSEL面阵间的排布优化方式,减弱VCSEL面阵的发光单元之间的热积累,从而提高激光器的散热效果,优化激光器的出光性能,增强器件的可靠性。首先系统分析了不同单元间距的5×5面阵的热特性,随后根据材料热导率的不同以及VCSEL内部热流密度分布差,设计了一种金刚石微槽结构热沉,基于有限元分析法研究了复合热沉中微槽的形状和位置对面阵单元中热串扰效应的影响。采用金刚石复合热沉后的垂直腔面发射激光器面阵与传统金刚石热沉的封装结构相比发光单元的温度差值明显降低,因而可以使垂直腔面发射激光器面阵输出功率和出光均匀性得到显著提升。

1 基本原理

首先建立传统封装结构的VCSEL面阵结构模型,在模拟计算过程中,对VCSEL器件作如下假设:半导体激光器工作时,激光器产生的热量主要来自于半导体激光器中有源区载流子的非辐射复合、吸收和自发辐射以及P-DBR。为了简化计算,假设激光器热源集中在有源区和P-DBR。由于芯片与外界的接触面积较小,因此忽略了热辐射和空气对流散热的影响。铜的下表面温度设定为25 ℃,铜热沉长度为5 mm,宽度为2 mm,高度为2 mm,其热沉结构如图1所示。在模拟计算中所使用的半导体激光器的光电仿真参数为:在连续输出功率为250 mW的条件下,光电转换效率为34%,激光器发

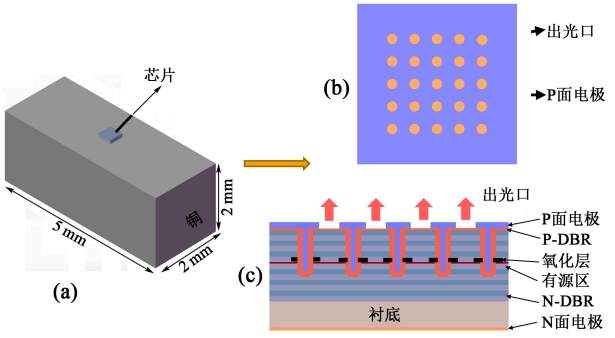


图1 传统VCSEL封装结构示意图。(a) VCSEL面阵热沉结构示意图;(b) VCSEL面阵发光单元分布示意图;(c) VCSEL面阵截面图

光单元的半径为 13 μm，单元间距为 56 μm，厚度为 108 μm。激光器结构材料参数如表 1 所示。

表 1　材料参数

Layers	Materials	K/(W/m℃)	d/μm
N-metal	AuGe/Ni/Au	87	0.6
Substrate	GaAs	55	100
N-DBR	$Al_{0.9}Ga_{0.1}As/Al_{0.2}Ga_{0.8}As$	65	4.9
Active region	$Al_{0.3}Ga_{0.7}As/Al_{0.05}Ga_{0.95}As$	53	0.4
P-DBR	$Al_{0.9}Ga_{0.1}As/Al_{0.2}Ga_{0.8}As$	65	2.9
P-metal	Ti/Pt/Au	48.6	0.7
Heatsink	Cu	398	2 000
Secondary heat sink	Diamond	1 800	1 000

垂直腔面发射激光器的内部产热主要由两部分产生，一是有源区产生的热量，二是由激光器内部体电阻产生的焦耳热。

有源区产生的热量主要是电流注入后，电子与空穴的非辐射复合、自由载流子吸收、其他对光子的散射、衍射等产生的热。量子阱材料构成的有源区产生的热量可以表示为[15]：

$$Q[r]=\frac{V(r)(1-\eta_{sp}f_{sp})}{d}[J_{th}+(J(r)-J_{th})\cdot(1-\eta_i)] \tag{1}$$

式中，d 为有源区的厚度，$V(r)$ 表示 pn 结上的电压，η_{sp} 为自发辐射的内量子效率，η_i 为受激辐射的量子效率，f_{sp} 为自发辐射光子从有源区逃逸的因子，J_{th} 为有源区中心的阈值电流密度。在注入电流密度小于或者等于阈值电流密度的情况下，其热量可以表示为[16]：

$$Q(r)=\frac{V(r)(1-\eta_{sp}f_{sp})}{d}J(r) \tag{2}$$

对于高功率 VCSEL 而言，产生的焦耳热主要是电流注入以后由高功率 VCSEL 体电阻产生，在 P 面出光结构的 VCSEL 中，电流由 P 面电极注入到有源区，由 N 面电极流出，P 面的出光孔出光。则沿着电流的注入方向，VCSEL 的体电阻由 P 面欧姆接触层电阻、N 面欧姆接触层电阻、P-DBR 层电阻、N-DBR 层电阻、衬底层电阻这五部分电阻串联而成，总电阻等于各层电阻之和。设热量在每一层是均匀的，则每一层产生的热量的热流密度为：

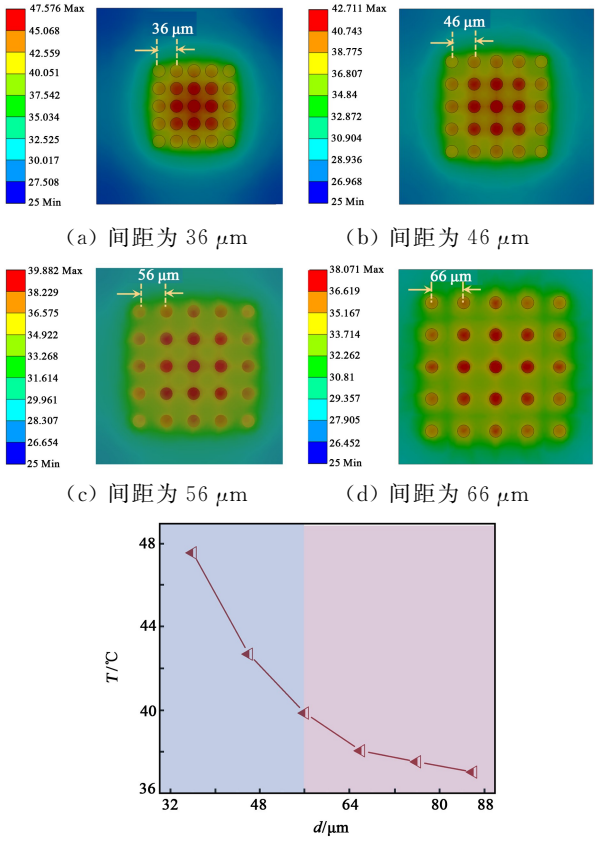
$$Q_i(r)=J^2(r)\rho_i \tag{3}$$

式中，ρ_i 为每一层的电阻。高功率 VCSEL 器件内部总的焦耳热等于五层体电阻产生的焦耳热之和。在 VCSEL 结构中，DBR 层尤其 P-DBR 层的体电阻远大于其他层的体电阻，产生的焦耳热要远高于其他层。因此，在模拟过程中，采用热源近似即热源主要在有源区和 P-DBR 层产生并且是均匀的。

2　分析与讨论

2.1　面阵单元间距对激光器温度的影响

在二维 VCSEL 面阵中，单元间距大小的设计对面阵单元分布至关重要。合适的激光器发光单元排布可以使热量不会过渡积累，并且较大的面阵密度会使激光器输出效率更高。若单元间距较小，会使单元间的热耦合严重，从而更加剧了器件的热串扰效应[17]。利用有限元分析法模拟研究了不同单元间距的 VCSEL 面阵温度分布，如图 2 所示。VCSEL 面阵单元间距分别取 36、46、56 和 66 μm，模拟分析激光器整体的温度分布。



(a) 间距为 36 μm　(b) 间距为 46 μm

(c) 间距为 56 μm　(d) 间距为 66 μm

(e) 不同单元间距的 VCSEL 面阵温度分布曲线图

图 2　不同发光单元间距下 VCSEL 面阵热分布云图

从图 2(a)～(d)中可以看出，当单元间距从 36 μm 增加到 66 μm 时，激光器面阵的中心最高温度从 47.576 ℃显著降低到 38.071 ℃。因此，增大发光单元间距对降低中心温度有明显改善。为了更深入地了解下降趋势，我们逐点分析了单元间距从 36 μm 增加到 86 μm 时面阵的最高温度变化情况，如图 2(e)所示。当单元间距从 36 μm 增加到 56 μm 时，激光器中心最高温度显著下降，而继续增加单元

间距，激光器温度降低的趋势有所减缓。这是由于，发光单元间距的增加，虽然可以使单元间的热耦合减小，但是单元间距过大会降低输出光的相干性和输出功率密度[18]，所以在设计 VCSEL 结构时，选择适合的单元间距需要通过散热和功率模拟进行综合分析考量。

2.2 金刚石复合热沉结构的 VCSEL 面阵热模拟

2.2.1 金刚石过渡热沉

利用高导热金刚石优化激光器面阵的封装结构，在过渡热沉结构中引入金刚石热沉来提高散热效果，其结构示意图如图 3 所示，所采用的金刚石的长度为 1.2 mm，宽度为 1.2 mm，厚度为 1 mm。

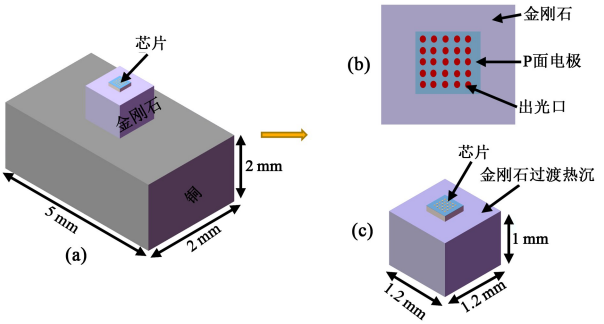
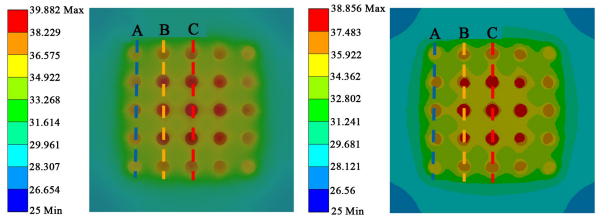
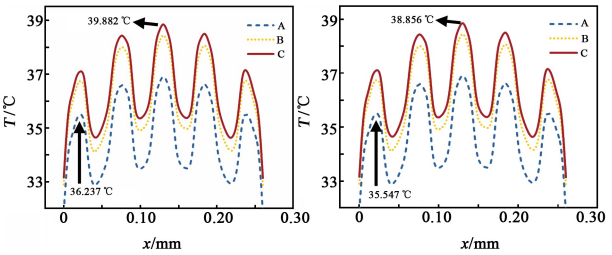


图 3 加入过渡热沉的 VCSEL 封装结构示意图。(a) 整体结构；(b) 过渡热沉结构的上表面；(c) 过渡热沉和芯片结构尺寸

采用金刚石过渡热沉的优势是能将芯片产生的热量快速传导到铜热沉，并与铜热沉绝缘以便设计大面积封装结构。为了研究金刚石过渡热沉对 VCSEL 面阵温度的影响，利用有限元分析法模拟研究了加入过渡热沉后 VCSEL 面阵的散热效果，通过考量激光器面阵中最高温与最低温的温度差值来衡量面阵单元间温度的均匀性。分别提取了 A，B，C 三条路径上面阵单元的温度分布，如图 4 所示。从图 4 中可以看出，传统封装结构的 VCSEL 面阵最高温度为 39.882 ℃，最低温度为 36.237 ℃，其发光单元的温度差值为 3.645 ℃，最高温度在发光单元的中心位置处，而最低温度位于边缘位置处，发光单元产生的热量在最中心部分积累，中心位置温度最高。加入金刚石过渡热沉后，面阵的最高温度降低到 38.856 ℃，最低温度降低到 35.547 ℃，发光单元的温度差值缩小为 3.309 ℃。因此，金刚石过渡热沉相比传统封装结构能使 VCSEL 面阵的温度降低的同时使得发光单元的最高温度和最低温度差值减小。这是由于，面阵内部产生的热量主要是通过热传导的方式从芯片传导到热沉中，采用金刚石做过渡热沉使得芯片产生的热量快速传导出去，额外增加了封装结构的散热途径，使得相邻发光单元间的热影响减弱。然而，单纯采用整片金刚石做过渡热沉仅能提高热量的传导率，如果想要优化发光均匀性还需要进一步设计过渡热沉的热流传导方式。



(a) 传统封装结构的 VCSEL 面阵热分布云图　(b) 加入金刚石过渡热沉的 VCSEL 面阵热分布云图

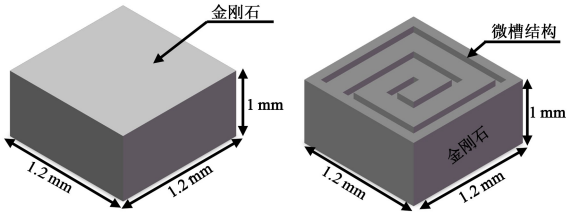


(c) 传统封装结构的 VCSEL 面阵 A，B，C 三条路径上的温度分布图　(d) 加入金刚石过渡热沉的 VCSEL 面阵 A，B，C 三条路径上的温度分布图

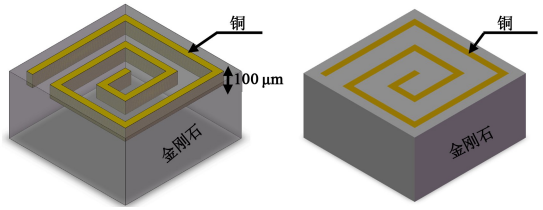
图 4 两种结构的 VCSEL 面阵热分布云图和 A，B，C 三条路径上的温度分布图

2.2.2 具有微槽结构的金刚石复合热沉

改善过渡热沉内部热流传导方向是最直接影响热传导效率的方式，热流倾向于向热导率更大的方向流动[15]，在半导体激光器面阵过渡热沉内部设计特殊热传导通道，如图 5 所示，利用金刚石和铜的热导率差异，改变了热流在热沉中的传导路径，热流在金刚石和铜的交集面处改变了流动方向，更倾向于向下方热传导，从而可以改变热流向相邻发光单元之间的流动更优先向下传递。其中，复合过渡热沉结构如图 5(d)所示，可以通过感应耦合等离子体刻蚀法和湿法镀铜填充工艺来实现[19-20]。



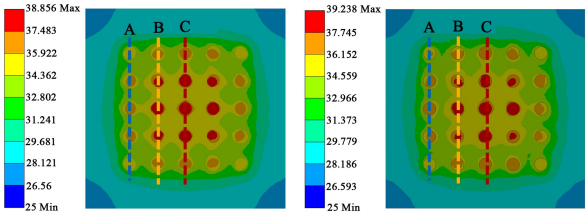
(a) 传统金刚石过渡热沉　(b) 引入微槽结构的金刚石过渡热沉



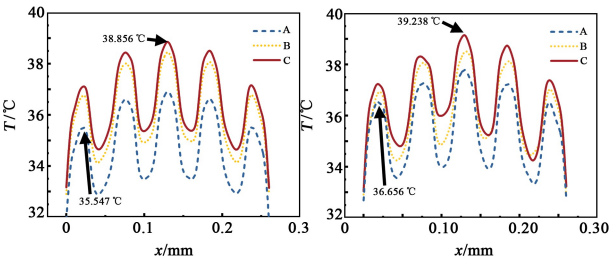
(c) 微槽结构填充铜的复合热沉　(d) 金刚石复合热沉整体结构示意图

图 5　复合热沉结构

利用金刚石和铜的材料热导率差异设计复合结构过渡热沉，建立过渡热沉封装结构的 VCSEL 面阵光电模型，利用 ANSYS 仿真软件模拟其温度分布，如图 6 所示。从图中可以看出，采用金刚石过渡热沉封装结构的 VCSEL 面阵的中心最高温度为 38.856 ℃，边缘最低温度为 35.547 ℃，面阵发光单元间的温度差为 3.309 ℃。而采用金刚石微槽结构的复合过渡热沉封装结构，其面阵发光单元间的温度差值降低到 2.582 ℃，使得面阵发光单元间的温度差值显著降低，是因为微槽结构改变了热沉的纵向热导率，从而使 VCSEL 面阵发光单元间的温度分布均匀。从中心最高温度可以看出，采用了微槽结构的过渡热沉，其中心最高温度相比未刻蚀微槽的金刚石过渡热沉封装结构有一定程度提升，如图 6(a)、(b)所示。可能是由于复合结构的整体热导率因热流的改变受到了影响，但是从温度差值的改变



(a) 金刚石过渡热沉的 VCSEL 面阵热温度分布云图　(b) 加入金刚石复合热沉的 VCSEL 面阵热温度分布云图



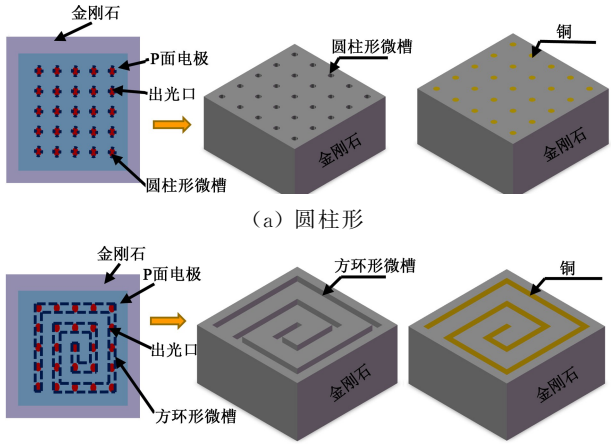
(c) 金刚石过渡热沉的 VCSEL 面阵 A,B,C 三条路径上的温度分布图　(d) 加入金刚石复合热沉的 VCSEL 面阵 A,B,C 三条路径上的温度分布图

图 6　两种热沉的 VCSEL 面阵温度分布云图及 A,B,C 三条路径上的温度分布图

量来说，升高的中心温度影响不大，降低温度差值对激光器性能的提升更为重要。

2.2.3　微槽形状对 VCSEL 面阵温度的影响

为了进一步缩减激光器发光单元温度差值，研究了微槽结构对 VCSEL 面阵温度的影响，分别将微槽设计为圆柱形和方环形，其目的是进一步优化过渡热沉内部热流流向，如图 7 所示。



(a) 圆柱形

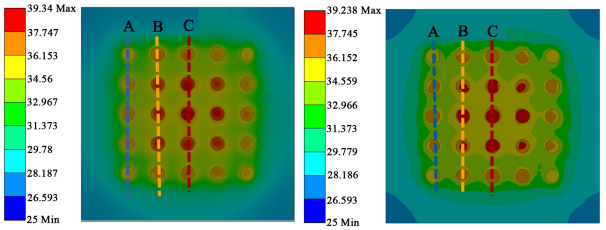
(b) 方环形

图 7　具有圆柱形和方环形微槽结构的金刚石复合热沉结构

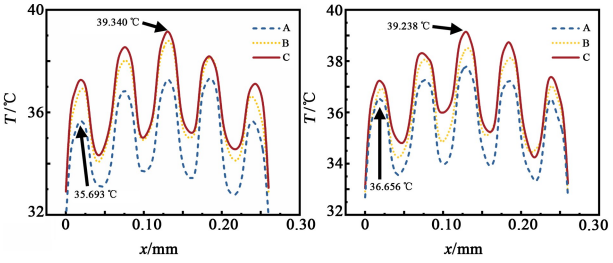
分析微槽结构为圆柱形和方环形两种不同微槽结构的复合热沉封装 VCSEL 面阵温度分布。由于 VCSEL 面阵具有对称性，提取了 A,B,C 三条路径上面阵单元的温度分来研究面阵发光单元间的温度差值，如图 8(c)、(d)所示。微槽结构为圆柱形的金刚石复合热沉封装的 VCSEL 面阵发光单元的温度差值为 3.647 ℃，微槽结构设计为方环形后，VCSEL 面阵发光单元的温度差值为 2.582 ℃，从图 8(a)、(c)和图(b)、(d)中的对比可以看出，采用方环形微槽结构的复合热沉比圆柱形微槽结构的热沉散热效果更好，其高低温度差值分别为 3.647 和 2.582 ℃。由此可知，具有方环形微槽结构的复合热沉相比圆柱形的微槽结构的复合热沉更利于提高 VCSEL 面阵发光单元温度的均匀性。因此，采用四周封闭热流只向下热传导(圆柱形微槽)的这一结构，并不能更大程度上的缩小发光单元的温度差，横向和纵向均匀分布的热流传导结构(方环形微槽)对缩小发光中心和边缘的温度分布差更有效果。

为了验证微槽结构内部热流流向，探究不同微槽结构对 VCSEL 面阵散热的影响，建立了热流分析模型，两种不同微槽结构复合热沉封装 VCSEL 面阵的热流分布如图 9 所示。从图中可以看出 VCSEL 面阵内部产生的热量主要通过热沉扩散出

去，当热量通过衬底传导到具有圆柱形微槽结构复合热沉中时，在微槽结构出现了热量堆积现象，而方环形的微槽结构更利于热量的散发和传导。这是由于圆柱形微槽结构只改变了热沉的纵向热导率，热量不能有效地散出，从而不能有效地改善 VCSEL 面阵发光单元的温度差。通过热流流向分析，进一步解释了方环形微槽结构对缩小高低温度差值具有更大的降低效果，使得 VCSEL 面阵的发光单元热串扰影响较小，提高了激光器的可靠性。

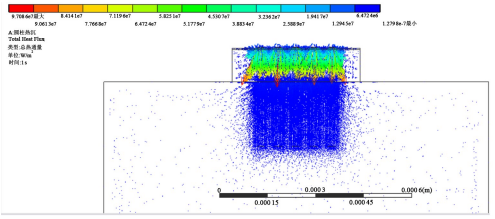


（a）具有圆柱形的 VCSEL 阵列热分布图　（b）具有方环形的 VCSEL 阵列热分布图

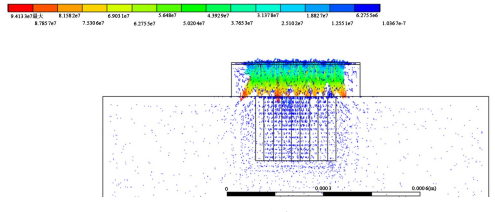


（c）具有圆柱微槽结构的 VCSEL 阵列 A，B，C 三条路径上的发光单元温度分布曲线图　（d）具有方环形微槽结构的 VCSEL 阵列 A，B，C 三条路径上的发光单元温度分布曲线图

图 8　具有圆柱形和方环形微槽结构的金刚石复合热沉封装的 VCSEL 阵列热分布图和 A，B，C 三条路径上的发光单元温度分布曲线图



（a）圆柱形微槽结构的热流图

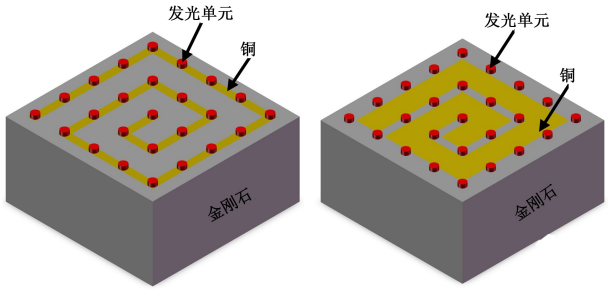


（b）方环形微槽结构的热流图

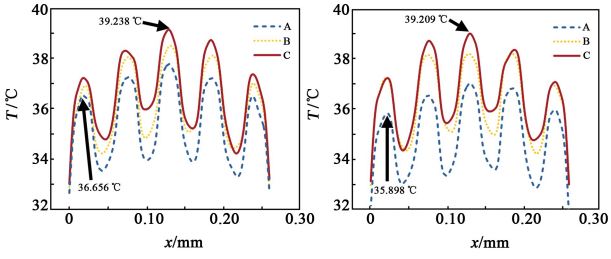
图 9　热流矢量图

2.2.4　微槽位置对 VCSEL 面阵温度的影响

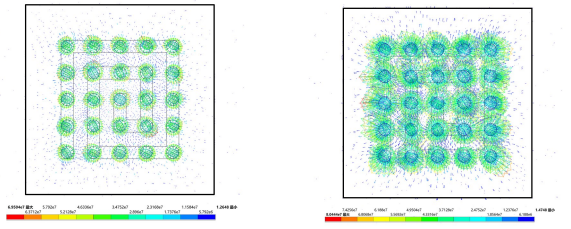
根据热流流向的模拟分析可知，方环形微槽结构的复合热沉使 VCSEL 面阵发光单元的温度分布更均匀，为了进一步分析发光单元的热流，在方环形微槽结构基础上研究不同微槽位置对 VCSEL 面阵温度分布的影响，分别设计了微槽结构位于发光单元正下方和发光单元之间两种复合热沉，如图 10(a)、(b)所示。图 10(c)、(d)为采用两种复合热沉封装的 VCSEL 面阵从外侧到内侧不同位置路径上温度分布曲线图，图(e)、(f)为两种复合热沉封装的 VCSEL 面阵热流分布。所设计的结构，当微槽部分位于正下方时，热流倾向于向下传导，对相邻发光单元影响较小。



（a）微槽在发光单元正下方　（b）微槽与发光单元错开



（c）微槽在发光单元正下方　（d）微槽与发光单元错开



（e）微槽在发光单元正下方　（f）微槽与发光单元错开

图 10　采用两种复合热沉封装的 VCSEL 面阵 A，B，C 三条路径上的发光单元温度分布曲线图和面阵热流图

从图 10 中可知，当复合热沉中微槽结构位于发光单元正下方时，VCSEL 面阵发光单元的温度差值为 2.582 ℃，而微槽结构位于发光单元之间时，VCSEL 面阵发光单元的温度差值为 3.311 ℃。此时，微槽结构位于发光单元的正下方，面阵发光单元间的温度差最小，更有利于发光单元间温度的扩散。

由此可知，面阵中中心发光单元的温度的热耦合明显高于边缘发光单元，金刚石中微槽结构的作用是改变热流在热沉中的流向，合理利用金刚石的热导率特性，提高热沉中的热传导效率，从而使中心单元产生的热量更好地向边缘扩散，达到降低发光单元间温度差的效果，进而提高输出功率，增强器件的可靠性。

2.3　VCSEL 面阵的 *P-I* 特性分析

半导体激光器内部产生的热量是影响其输出功率的重要因素。通过对封装结构中接近失效时的发光单元的最大输出功率进行研究，可以分析出激光器的可靠性。对于垂直腔面发射半导体激光器热阻的表达式为：

$$R_{\mathrm{th}}=\frac{T_1-T_0}{P_{\mathrm{tem}}} \tag{3}$$

式中，T_1 为激光器内部的温度，T_0 为热沉温度，P_{tem} 为热功率。

其 VCSEL 面阵的输出功率与热阻的关系可以由下式表示：

$$P=\eta_{\mathrm{exp}}\left[-\frac{R_{\mathrm{th}}(IV-P)}{T_1}\right]\cdot\left\{I-I_{\mathrm{Ret}}\cdot \exp\left[\frac{R_{\mathrm{th}}(IV-P)}{T_0}\right]\right\} \tag{4}$$

式中，T_1 为激光器特征温度，T_0 为热沉温度，P 为激光器的输出功率，R_{th} 为热阻，V 为激光器偏置电压，I 为工作电流，η 为激光器的斜率效率，I_{Ret} 为阈值电流。

不同热沉结构封装的激光器面阵输出功率随电流变化的模拟结果曲线如图 11 所示，当用铜热沉封装激光器时，半导体激光器的最大输出功率为 30.86 mW，当采用金刚石复合热沉封装激光器时，具有圆柱形微槽结构复合热沉封装的半导体激光器最大输出功率为 33.97 mW，方环形微槽结构复合热沉封装的半导体激光器最大输出功率升高到 35.98 mW。这是由于方环形微槽结构减少了发光单元间的热串扰，使得输出功率升高。因此，在面阵单元间距相同时，复合热沉的散热更好，激光器的输出功率更高。

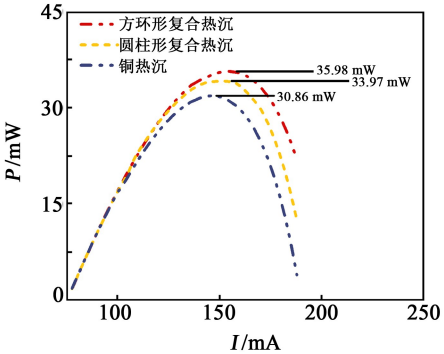


图 11　不同热沉封装的 VCSEL 面阵的 *P-I* 曲线

3　实验

根据模拟仿真结果，在外延片上通过干法刻蚀、湿法氧化、金属电极等工艺，制作了发光单元间距为 56 μm 的 5×5VCSEL 阵列器件，此外利用 ICP 刻蚀和湿法镀铜填孔技术制备出具有圆柱形微槽结构和方环形微槽结构的金刚石复合热沉。分别用铜热沉、具有圆柱形微槽结构的金刚石复合热沉和具有方环形微槽结构的金刚石复合热沉对 VCSEL 面阵进行封装测试。

在室温（RT）连续波（CW）的条件分别测量了其光电特性，如图 12 所示。采用铜热沉封装的 VCSEL 面阵输出功率为 28.13 mW；采用具有圆柱形微槽结构的金刚石复合热沉封装的 VCSEL 面阵输出功率为 31.25 mW；采用方环形微槽结构的金刚石复合热沉封装的 VCSEL 面阵输出功率为 32.98 mW。在实验过程中会存在一些因素，比如焊料层中的空洞，使得实际热阻值增大，导致 VCSEL 面阵实验测得的输出高功率总体偏低，但是与传统的铜热沉相比，复合热沉封装的 VCSEL 面阵输出功率增大，实验结果与模拟结果一致。实验证实了所设计的方环形微槽结构复合热沉，对垂直腔面发射激光器面阵的性能得到了显著提升，降低了单个发光单元的出光功率差，使面阵整体发光更均匀，减小了中心部分热量累计，产热更均匀，提高了最终器件的可靠性。

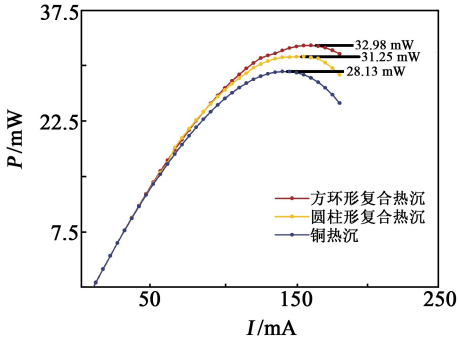


图 12　连续波条件下的 VCSEL 面阵的 *P-I* 曲线

4　结论

为了提高垂直腔面发射半导体激光器的出光性

能，优化面阵发光单元温度的均匀性进而提升激光器可靠性，设计了具有微槽结构的金刚石复合热沉封装的 VCSEL 面阵。通过设计优化面阵单元分布间距，使面阵整体温度降低的同时提升输出功率。设计了不同微槽结构金刚石复合热沉，对降低 VCSEL 面阵整体散热温度方面得到改善的同时，缩小了发光单元的温度差值，因而提升了发光均匀性。所设计的具有方环形微槽结构的金刚石复合热沉具有最好的散热效果，通过对内部传导热流的优化设计，可以使激光器面阵的发光单元温度差值缩小为 2.582 ℃，使得发光中心温度降低，发光均匀性得到显著改善，进而增强了器件的可靠性。基于该复合结构散热热沉的设计为今后提升高功率半导体激光器的面阵整体性能和面阵散热的发展提供了帮助。

参考文献：

[1] Li X P, Yang J, Zhang M S, et al. A 658-W VCSEL-pumped rod laser module with 52.6% optical efficiency[J]. Chinese Physics B, 2022, 8: 149-153.

[2] Matthew S, Ann E. Confocal retinal imaging using a digital light projector with a near infrared VCSEL source[J]. Proc. SPIE, 2018, 10546: 105460G.

[3] Sakaguchi J, Katayama T, Kawaguchi H, et al. High switching-speed operation of optical memory based on polarization bistable vertical-cavity surface-emitting laser[J]. IEEE J. of Quantum Electron., 2010, 46(11): 1526-1534.

[4] Khan Z, Shih J C, Chao R L, et al. High-brightness and high-speed vertical cavity surface-emitting laser arrays[J]. Optica, 2020, 7(4): 267-275.

[5] Zhang J W, Ning Y Q, Zhang X, et al. 910 nm vertical-cavity surface-emitting laser arrays with 100 W output power level and low driving current[J]. Jap. J. of Appl. Phys., 2018, 57(10): 100302.

[6] Di P C, Li X P, Yang J, et al. High-power VCSEL-pumped slab laser with temperature fluctuation adaptability[J]. IEEE Photon. Technol. Lett., 2021, 33(8): 395-398.

[7] Wu G M, Kung F C, Lee C Y. Study of fabrication and characterization of high power 850 nm vertical-cavity surface-emitting laser arrays[J]. Surface and Coatings Technol., 2020, 387: 125489.

[8] Heuser L, Pflvger M, Fischer I, et al. Developing a photonic hardware platform for braininspired computing based on 5×5 VCSEL arrays[J]. J. Phys. Photon., 2020, 2(4): 044002.

[9] Farzaneh M, Amatya R, Luerben D, et al. Temperature profiling of VCSELs by thermoreflectance microscopy[J]. IEEE Photon. Technol. Lett., 2007, 19(8): 601-603.

[10] Wang J H, Savidis I, Friedman E G. Thermal analysis of oxide-confined VCSEL arrays[J]. Microelectronics J., 2011, 42(5): 820-825.

[11] Zhong C Y, Zhang X, Liu D, et al. Enhanced thermal stability of VCSEL array by thermoelectric analysis-based optimizationof mesas distribution[J]. Chinese Physics B, 2017, 26(6): 064204.

[12] Guo Z J, Zhu X M, Wang K Y, et al. Influence of near threshold energy irradiation on the thermal conductivity of LLA diamond[J]. Appl. Phys. Lett., 2021, 119(18): 182205.

[13] Parashchuk V, Ryabtsrv I, Belyaeva A, et al. Improving the efficiency of high-power diode lasers using diamond heat sink[J]. Quantum Electron., 2010, 40(4): 301-304.

[14] Finke T, Sichkovskyi V, Reithmaier J. Quantum-dot based vertical external-cavity surface-emitting laser with high efficiency[J]. IEEE Photon. Technol. Lett., 2021, 33(14): 719-722.

[15] 房俊宇，石琳琳，张 贺，等. 石墨片作辅助热沉的高功率半导体激光器热传导特性[J]. 发光学报，2019，40(7)：907-914.
Fang Junyu, Shi Linlin, Zhang He, et al, Heat transfer characteristics of high-power semiconductor lasers with graphite sheets as auxiliary heat sink[J]. J. of Photoluminescence, 2019, 40(7): 907-914.

[16] 张秋波. 808 nmVCSEL 阵列的热特性研究[D]. 长春：长春理工大学，2020.
Zhang Qiubo. Thermal characterization of 808 nm VCSEL arrays[D]. Changchun: Changchun University of Science and Technol., 2020.

[17] Liu Y Y, Huang Y W, Zhong C Y, et al. VCSEL array thermal-distribution optimized by mesas rearrangement[J]. Optik, 2019, 186: 443-448.

[18] Zhong C Y, Zhang X, Hofmann W, et al. Low thermal crosstalk 808-nm VCSEL arrays with nonlinear mesa configuration[J]. IEEE Photon. J., 2018, 10(6): 1-8.

[19] Ahzad K, Matthew M, Aaron C H. High-Q/V monolithic diamond microdisks fabricated with quasiisotropic etching[J]. Nano Lett., 2015, 15(8): 5131-5136.

[20] 卢 跃. 铜互连镀铜添加剂的电化学机理研究[D]. 上海：上海交通大学，2013.
Lu Yue. Study on electrochemical mechanism of copper interconnect plating additive[D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2013.

作者简介：

宋依依(1996—)，女，河北省衡水市人，硕士研究生，主要从事半导体激光器方面的研究；

邹永刚(1982—)，男，吉林省长春市人，博士，副教授，博士生导师，主要从事光电子技术与应用、光电子器件等方面的研究。