光电器件

DOI: 10.16818/j.issn1001－5868.20260828001

面向8通道DFB激光阵列的散热性能研究

刘振华*,迟文潮,李瑞峰,陆永成,胡莹华
(中国电子科技集团公司第二十六研究所,重庆 400060)

摘 要: 针对400 G/800 G高速光模块中8通道分布反馈激光阵列存在的热串扰、波长漂移以及散热器件振动干扰光路等工程问题,文章研制了一种超薄压电微气流泵散热单元,并开展了冲击射流主动散热方案研究。搭建光－热－振多维度实物测试平台,对自然对流、微型旋转风扇、超薄微气流泵三种散热方案开展对比试验。测试结果表明:在15 V直流驱动条件下,该微气流泵输出流量可达0.69 L/min,输出静压为1.41 kPa。相比于微型旋转风扇,阵列基板温降提升6.0℃,通道最大温差降至0.7℃,温度波动降低78.3%,壳体振动幅值在1 μm以内,光路动态插入损耗波动仅为0.08 dB。所提方案可同时实现器件降温与通道均温,并且有效抑制散热装置带来的振动干扰,为紧凑型高速光模块多通道激光阵列的热管理设计提供技术参考。

关键词: 分布反馈激光阵列;主动散热;超薄微气流泵;热串扰;动态插入损耗
中图分类号: TN248.4 **文章编号:** 1001－5868(2026)05－0894－06

Heat-Dissipation Performance of Eight-Channel DFB Laser Array

LIU Zhenhua, CHI Wenchao, LI Ruifeng, LU Yongcheng, HU Yinghua
(**The 26th Institute of China Electronics Technology Group Corporation, Chongqing 400060, CHN**)

Abstract: To address engineering challenges including thermal crosstalk, wavelength drift, and optical-path vibration interference caused by cooling devices for eight-channel Distributed Feedback laser arrays in 400 G/800 G optical modules, an ultrathin piezoelectric micro air-pump cooling unit is developed and an active cooling scheme based on impinging jet is investigated. A multidimensional test platform integrating optical, thermal, and vibration measurements is established, and comparative experiments are conducted using natural convection, a micro-rotary fan, and the proposed micro-air pump. Experimental results show that under 15 V DC excitation, the micro air-pump achieves an output flow of 0.69 L/min and a static pressure of 1.41 kPa. Compared with the micro-rotary fan, the proposed scheme increases the substrate temperature drop by 6.0℃, reduces the maximum channel temperature difference to 0.7℃, and decreases temperature fluctuations by 78.3%. Furthermore, it maintains a housing vibration amplitude below 1 μm and restricts dynamic insertion loss fluctuations to only 0.08 dB. The proposed scheme simultaneously realizes temperature reduction and channel-temperature uniformity while restraining vibration interference introduced by cooling devices. It can serve as a technical reference for the thermal-management design of multichannel laser arrays in compact high-speed optical modules.

Key words: distributed feedback laser array; ultrathin piezoelectric micro-air pump; active heat dissipation; thermal crosstalk; temperature uniformity; vibration suppression; dynamic insertion loss

收稿日期:2026－08－28.
* **通信作者:**刘振华

0　引言

400 G/800 G高速波分复用(Wavelength Division Multiplexing,WDM)光模块作为算力网络与数据中心互联的关键器件,8通道分布反馈(Distributed Feedback,DFB)激光阵列凭借集成度高、成本低等特点,逐步成为该类模块的主流光源方案[1]。阵列内部多路DFB芯片排布紧凑,芯片间距仅数百微米,器件工作过程中热量会在相邻芯片之间传递,由此产生显著的通道热串扰效应[2]。DFB激光器输出波长受结温影响明显,典型温度漂移系数约为0.1 nm/℃,通道间温差会造成各通道输出波长出现偏差,扰乱WDM系统波长配置,增大信道串扰风险,使接收端误码性能劣化[3]。同时该激光阵列采用透镜-光纤耦合光路,对外部振动极为敏感,微小振动扰动即可改变耦合状态,产生动态插入损耗,对光模块长期运行可靠性造成负面影响[4]。

现阶段针对8通道DFB激光阵列的各类散热手段均存在一定短板。例如,被动鳍片自然对流方案结构简单、易于实现,但换热能力有限,难以有效抑制芯片之间的热耦合,高功耗工况下通道间温差问题较为突出[5]。半导体制冷器(Thermo-Electric Cooler,TEC)能够实现较高控温精度,但该器件厚度偏大,工作时会产生额外功耗,与光模块小型化、低功耗的发展趋势相冲突[6]。微型旋转风扇是风冷散热的常用方案之一,然而电机转动会产生微米级机械振动,经由结构传递至激光阵列光路,与此同时输出气流存在周期性脉动,诱发温度波动,进一步加剧激光器波长抖动。在光模块密闭狭小空间内,还存在低温卡死、服役寿命有限等可靠性隐患[7]。

为兼顾8通道DFB激光阵列的散热降温、通道均温以及抗振动的综合热管理需求,本文设计一款超薄压电式微气流泵作为风冷执行单元,开展了适配该激光阵列的主动散热技术研究。现有关于压电散热器件的文献大多聚焦泵体自身结构优化与流体性能测试[8],而面向8通道DFB激光阵列,同时将通道温差、光路动态插入损耗作为核心评价指标的实物对比测试较少,缺少热-振-光多维度实测数据支撑,难以直接指导光模块整机热管理设计。本文以8通道DFB激光阵列热管理实际需求为目标,完成散热方案匹配设计并开展流体输出特性标定。通过搭建光-热-振一体化实物测试平台,设置自然对流、微型旋转风扇、超薄微气流泵三组对照试验,从基板温降水平、通道均温性能、温度脉动、振动量级、光学耦合稳定性多个角度综合评估散热方案的性能,为紧凑型400 G/800 G光模块中8通道DFB激光阵列热管理设计提供参考。

1　适配激光阵列的超薄微气流泵散热单元设计与仿真

1.1　激光阵列传热特性及散热约束

8通道DFB激光阵列采用板上芯片封装(Chip-on-Board,COB)共基板封装形式,八路激光芯片紧密集成在同一块基板之上。在器件工作过程中,大部分输入电能转化为热能,各芯片独立产热。一部分热量沿着基板向下传导,最终扩散至模块壳体完成耗散;另一部分热量借助芯片间的半导体介质发生横向传递,进而形成通道间热串扰现象[9]。DFB激光器激射波长与芯片结温密切相关,当结温发生变化时,器件输出中心波长随之产生偏移[10]。

在多通道同时工作条件下,若各芯片散热条件不一致,结温将出现分化,易造成8路激光器输出波长离散度增大,光学通道一致性下降;局部热量堆积还会引起输出功率起伏,加速器件老化失效[11]。传统的被动传导散热方法仅能够降低器件整体温度,无法削弱芯片横向传热带来的通道温差,难以满足多通道器件均温要求[12]。因此,该类器件的热管理需要同时实现整体降温与多通道均衡控温两项目标。

光模块内部可利用空间十分有限,传统微型旋转风扇虽散热能力较强,但工作产生的机械振动容易传递至精密光路,引发动态插入损耗波动,直接降低光传输链路的稳定性[13]。结合8通道DFB激光阵列的产热传热特征以及整机应用约束,本文研制了一种超薄微气流泵散热单元,以此实现狭小空间条件下低振动强制对流散热。

1.2　超薄微气流泵散热单元结构设计

超薄微气流泵作为面向8通道DFB激光阵列主动散热系统的气源单元,采用方形平板一体化结构,主要由压电陶瓷振子、泵腔、喷嘴、电极及壳体组成,如图1所示。工作时交流激励驱动压电陶瓷振子产生高频往复形变,泵腔容积周期性变化实现

气体抽吸与喷射，高速气流经喷嘴喷出形成冲击射流，作用于8通道DFB激光阵列配套微型金属热沉，实现强制对流散热。该散热单元整机厚度仅为2 mm，质量为2 g，能够满足光模块狭小内部空间的装配约束。该结构的关键参数如表1所示。

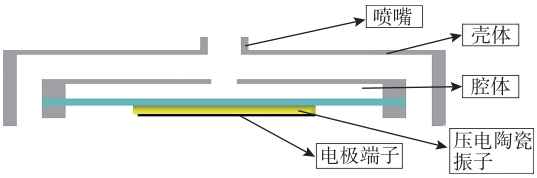


图1 超薄微气流泵散热单元结构示意图

表1 超薄微气流泵散热单元关键参数

参数	规格值	备注
外形尺寸/mm	20±0.20	不含喷嘴尺寸
厚度/mm	2±0.20	适配光模块内部超薄空间
喷嘴高度/mm	2±0.15	盖板顶面至喷嘴顶端
重量/g	2±0.20	适配微型封装
谐振频率/kHz	26±1.00	超声工作频段

1.3 超薄微气流泵散热单元仿真分析

建立包含压电陶瓷、不锈钢基片、内腔薄片、出气孔三维仿真模型，采用结构化六面体网格，流体域近壁边界层加密，首层网格厚度为0.01 mm，总网格量为126万，如图2所示。

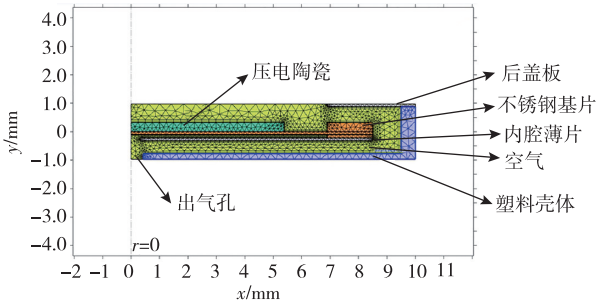


图2 散热单元网格划分模型

模态分析得到泵体固有频率为26.6 kHz，振膜中心Z向最大位移1.75×10^{-3} mm。21.4 kHz和29.2 kHz谐波响应微弱，振动能量集中在振膜中心，向外壳体传递振动水平低，降低对8通道DFB阵列光学耦合的扰动风险，不同谐响应辐射面Z分量位移曲线如图3所示。

瞬态多物理场仿真完整复现泵气-吸气周期流场演化，如图4所示。泵气阶段腔内瞬时峰值压力为13.3 Pa，吸气阶段最大负压为4.7 Pa，喷嘴喷出高速射流可以直接作用于DFB阵列热沉表面实现强制对流。

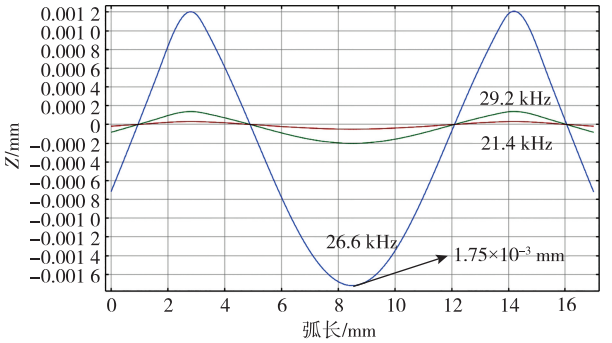


图3 不同谐响应辐射面Z分量位移曲线

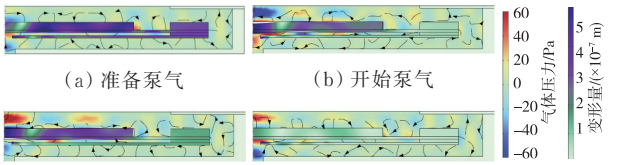


图4 压电微气流泵流场分析示意图

1.4 微气流泵驱动电路匹配设计

针对光模块整机11～20 V直流供电工况，基于LM7 321运算放大器为微气流泵设计自振荡驱动电路，无需外部信号源即可输出交变激励波形。运放带宽20 MHz，搭配NPN/PNP互补功率管成功率放大，匹配压电陶瓷容性负载特性，驱动电路可集成于光模块电源板卡，无需额外信号接口，满足散热系统集成化使用需求。电路拓扑图如图5所示。

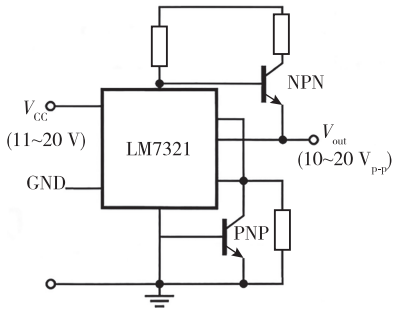


图5 驱动电路拓扑图

2 微气流泵散热单元流体输出特性与测试分析

2.1 流体输出理论模型

流体输出静压与流量呈负相关线性关系，在同一驱动电压下，随着系统背压升高，泵的实际输出流量逐步衰减，流量-静压数学模型为：

$$Q=Q_0-kP_s \tag{1}$$

式中，Q 为实时输出流量（L/min），Q_0 为零背压条件下空载流量，P_s 为输出静压（kPa），k 为流量衰减系数。当输出流量 Q 降至 0 时，泵达到极限输出静压 P_{max}，由式（1）可得到流量衰减系数 $k=Q_0/P_{max}$。该系数用于表征气流输出受背压的抑制程度，k 数值越大，背压升高带来的流量衰减效应越明显。

2.2　流体特性测试

测试设备包含高精度气体流量计、数字压力传感器、可编程直流供电电源、可调气流截止阀等。通过施加几组固定的电压值，同时让微气流泵工作在谐振状态下，通过调节截止阀的大小，测得几组静压值和流量值。零背压空载流量 Q_0 为微气流泵截止阀全开（$P_s=0$）时测得，极限最大静压值 P_{max} 为截止阀全关状态下测试值。根据微气流泵特性，选取直流电压分别为 11.5 V，16.5 V 和 21 V 三组驱动电压下测试静压和输出流量，数据如表 2 所示，压力 - 流量特性曲线如图 6 所示，其中离散点为多次测量取平均后的实验数据，实线为最小二乘线性拟合结果。

表 2　不同驱动电压下静压和流体输出测试值

驱动电压为 11.5 V		驱动电压为 16.5 V		驱动电压为 21 V	
静压/kPa	流量/（L/min）	静压/kPa	流量/（L/min）	静压/kPa	流量/（L/min）
0.00	0.42	0.00	0.81	0.00	1.24
0.21	0.33	0.43	0.63	0.51	0.98
0.40	0.23	0.81	0.42	1.02	0.67
0.62	0.14	1.20	0.24	1.50	0.43
0.80	0.04	1.41	0.12	2.02	0.13
0.91	0.00	1.63	0.00	2.28	0.00

注：表中静压、流量为同一工况 3 次重复测试取算术平均值，抑制随机测量噪声。

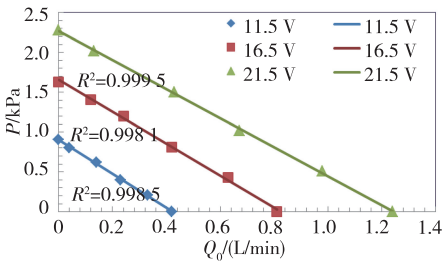


图 6　压力 - 流量特性曲线

在三组驱动电压下，最大空载流量 Q_0 分别为 0.42 L/min，0.81 L/min，1.24 L/min，最大静压值 P_{max} 分别为 0.91 kPa，1.63 kPa，2.28 kPa，由此推导出流量衰减系数 k 分别为 0.461 L·min^{-1}·kPa^{-1}，0.497 L·min^{-1}·kPa^{-1}，0.544 L·min^{-1}·kPa^{-1}，关键参数如表 3 所示。

表 3　不同驱动电压下流体关键参数表

V_{DC}/V	V_{PP}/V	Q_0/（L/min）	P_{max}/kPa	k/（L·min^{-1}·kPa^{-1}）
11.5	11.5	0.42	0.91	0.461
16.5	16.5	0.81	1.63	0.497
21.0	20.0	1.24	2.28	0.544

基于式（1）模型，采用最小二乘法对各组电压下的实测点进行线性回归拟合，得到不同驱动电压对应的拟合方程、模型参数 Q_0 和 k，各组驱动电压对应的拟合表达式如式（2）～（4），为基于式（1）线性模型得到的近似拟合结果：

$$11.5\ \text{V}:\ Q=0.42-0.461\,P_s \tag{2}$$

$$16.5\ \text{V}:\ Q=0.81-0.497\,P_s \tag{3}$$

$$21.0\ \text{V}:\ Q=1.24-0.544\,P_s \tag{4}$$

实验中压电微气流泵工作在谐振状态及稳定工作区间内流量 - 静压模型近似满足线性关系，但实测数据仍存在系统误差与随机误差。对三组驱动电压下的测试数据开展线性回归分析，11.5 V，16.5 V，21.0 V 对应的决定系数 R^2 分别为 0.987，0.991，0.989，线性拟合度较高，各实测点相对拟合直线仍存在残差。测试误差主要来源于：（1）可编程电源输出精度，造成谐振频率发生偏移；（2）气体流量计、压力传感器自身测量误差；（3）调节截止阀背压时，背压稳态建立存在延迟，造成读数滞后；（4）环境温度波动引起气体密度变化。实验中各背压工况均重复采集 3 组数据，表 2 数据为多次实验测量的算术平均值，可有效抑制随机误差，部分测点与拟合曲线之间的残差反映了实际测试引入的误差，模型仅适用于泵谐振工作区间的工程估算。

由式（2）～（4）拟合参数可见，随着驱动电压升高，空载流量 Q_0 显著增大，衰减系数 k 小幅上升。根据压力 - 流量拟合方程，结合光电封装散热风道等效背压可定量预测微泵有效输出流量，判断强制对流换热能力。

3　8 通道 DFB 激光阵列实物散热测试与分析

3.1　测试方法

测试对象选用商用 1 310 nm 波段 8 通道 DFB 激光阵列，阵列总功耗设置 1.2 W，该功耗与 400 G 光模块内部 8 通道 DFB 激光阵列实际工作功耗保持一致。阵列装配微型铝制热沉，透镜 - 光纤光路对准，测试环境温度恒定为 25℃。测试仪器包含红

外热成像仪（同步采集8路DFB芯片基板温度，统计通道间最大温差）、高精度振动传感器、1 kHz采样速率光功率计（记录光路动态插入损耗波动）。

采用三组实验对照测试：实验1采用自然对流散热，无任何主动气流装置；实验2采用微型旋转风扇散热；实验3采用超薄微气流泵散热。气流口距离8通道DFB阵列热沉表面10 mm，系统持续运行10 min，待器件温度、光功率、振动信号全部达到稳定状态后，每组工况重复3次平行测试，测试结果取算术平均值。测试采集指标包括：阵列基板稳态温度、相对自然对流温降、系统热阻、阵列8通道之间最大温差、温度波动峰峰值、泵/风扇壳体振动幅值、光路动态插入损耗波动。

3.2 测试结果分析

前述拟合方程插值计算得到15 V直流输入工况下，微气流泵输出流量不低于0.69 L/min，输出静压不低于1.41 kPa。微气流泵在15 V直流驱动下，测量稳态温升、温降幅度、系统热阻、温度波动峰峰值、表面振动位移等指标。三组实验测试结果如表4所示。

表4 8通道DFB激光阵列散热实测结果

散热方案	实验1	实验2	实验3
稳态温度/℃	72.10	45.50	39.50
相对自然对流温降/℃	—	26.60	32.60
系统热阻/(℃·W^{-1})	39.25	17.08	12.08
阵列通道最大温差/℃	4.30	2.10	0.70
温度波动峰值/℃	0.04	0.28	0.06
振动幅值/μm	0.00	6.20～9.50	0.30～0.70
动态插入损耗波动/dB	0.07	0.42	0.08

注：阵列通道最大温差指8路DFB芯片基板实测温度的峰-峰值；动态插入损耗波动为1 kHz光功率采样下光路插入损耗峰-峰值，表征振动引发的光路耦合动态抖动。

结合8通道DFB激光阵列的器件工作特性，从散热能力与热串扰抑制效果、温度脉动对波长的影响、振动对光路耦合的影响等方面对测试结果进行分析。

（1） 散热能力与热串扰抑制效果

采用自然对流散热时，激光阵列基板稳态温度达到72.1℃，8个通道之间最大温差为4.3℃。依据0.1 nm/℃波长漂移系数换算，通道间波长偏差最高可达0.43 nm，已经超出常规WDM光模块波长裕量，难以满足系统工作条件[14]。微型旋转风扇能够实现26.6℃的基板温降，但受限于气流分布，阵列通道最大温差仍为2.1℃，无法有效抑制芯片之间的热耦合效应。采用超薄微气流泵散热方案后，相比微型旋转风扇，基板温降进一步提升6.0℃，系统热阻下降29.3%；阵列通道最大温差降至0.7℃，显著削弱芯片间热串扰，保障8通道DFB激光阵列输出波长一致性。

（2） 温度脉动对输出波长的影响

微型旋转风扇依靠转子旋转产生气流，输出气流存在周期性脉动，造成0.28℃的温度波动。该温度波动会转化为激光器输出波长抖动，计算可得波长动态波动约为0.028 nm，会对密集波分复用系统信道稳定性带来不利影响[15]。超薄微气流泵无旋转部件，输出气流连续平稳，温度波动仅0.06℃，相较于旋转风扇降低78.3%，能够明显抑制阵列的动态波长抖动。

（3） 机械振动对光路耦合性能的影响

微型旋转风扇工作时，壳体振动幅值处于6.2～9.5 μm区间，振动通过热沉传递至透镜-光纤耦合组件，引起光路耦合状态不断变化，动态插入损耗波动高达0.42 dB，严重劣化光模块传输性能。超薄微气流泵不存在旋转结构，壳体振动幅值控制在1 μm以内，光路动态插入损耗波动仅0.08 dB，与自然对流工况的振动水平基本相当，不会破坏激光阵列精密光学耦合状态。

3.3 散热方案工程适用边界

从400 G/800 G光模块整机实际应用条件出发，超薄压电微气流泵用于8通道DFB激光阵列散热时，其散热性能受驱动电压、环境温度以及粉尘杂质等多重条件制约，存在明确工程适用边界。驱动电压直接决定泵体气流输出能力：当工作电压低于11 V时，微气流泵输出流量不足0.5 L/min，阵列通道温差增大至2.6℃以上，无法满足多通道激光阵列均温散热指标；若驱动电压超过21 V，则接近压电陶瓷耐压上限，长期连续工作会加剧振子疲劳开裂风险。综合散热效果与器件可靠性，光模块整机应用中推荐驱动电压区间为11.5～16.5 V。

环境壳温同样会影响散热单元工作状态。当模块内腔环境温度高于70℃时，压电陶瓷机电耦合性能衰减，泵体输出流量出现明显下降，直接造成激光阵列通道温差恶化。因此，整机布局设计应将超薄微气流泵布置于激光阵列热沉侧方，远离模块内部大功率芯片形成的局部高温区，降低高温环境对泵体性能的负面影响。

此外，粉尘环境也会对长期工作的可靠性带来挑战。光模块腔体内部必须增设防尘隔离结构；若

空气中亚微米级粉尘持续附着于喷嘴与压电振子表面，将逐步堵塞内部通道，造成输出流量持续衰减，最终劣化阵列通道均温效果。实际工程应用中，需要结合模块密封等级，评估粉尘积累对散热系统寿命的影响。

4　结论

本文针对400 G/800 G紧凑型高速光模块内8通道DFB激光阵列面临的热串扰、波长偏移以及传统风冷器件振动干扰光路的工程难题，提出一种基于超薄压电微气流泵的冲击射流主动散热方案，完成散热单元设计、流体特性标定以及光－热－振多维度对比实验研究。实验结果表明，在15 V直流驱动下，该微气流泵可输出0.69 L/min流量、1.41 kPa静压；对比微型旋转风扇散热方案，激光阵列基板温降提高6.0℃，通道最大温差下降至0.7℃，温度波动幅度降低78.3%，泵体壳体振动幅值控制在1 μm以内，光路动态插入损耗波动仅0.08 dB。该散热方案兼顾降温能力与多通道均温效果，并规避旋转类散热器件带来的机械振动对耦合光路的不良影响。相比于半导体制冷器，超薄压电微气流泵整体结构更轻薄，附加功耗更低；对比自然对流，换热能力得到显著提升，适合光模块狭小腔体内部使用。该研究结果可为高速光模块多通道激光阵列的热－振协同热管理设计提供实验依据与技术参考。

参考文献：

[1] 王珍珍，王桂奇，陈国良，等. 玻璃基共封装光学前沿技术及应用[J]. 光学学报，2026，46(7)：182-206.
Wang Zhenzhen，Wang Guiqi，Chen Guoliang，et al. Glass-based co-packaged optical frontier technologies and applications[J]. Acta Optica Sinica，2026，46(7)：182-206.

[2] 夏宇祺，慕京飞，周寅利，等. 大功率垂直腔面发射激光器阵列的热优化[J]. 发光学报，2024，45(6)：970-977.
Xia Yuqi，Mu Jingfei，Zhou Yinli，et al. Thermal optimization of high-power vertical cavity surface emitting laser arrays[J]. Chinese Journal of Luminescence，2024，45(6)：970-977.

[3] Yang Z，He G，Li Y，et al. Thermal management in copackaged optics：from device assembly to system operation[J]. Advanced Photonics Nexus，2026，5(3)：1-23.

[4] Liu B，Guan S，Wang F，et al. Research on the effect of vibrational micro-displacement of an astronomical camera on detector imaging[J]. Sensors，2024，24(3)：1025.

[5] 蔡益勋，杨光照，钟　鑫，等. 面向激光芯片的铬锆铜微流道热沉SLM制造与散热性能研究[J]. 半导体光电，2025，46(4)：630-637.
Cai Yixun，Yang Guangzhao，Zhong Xin，et al. Study on the fabrication and heat sink performance of Cu-Cr-Zr micro-channel heat sinking SLM for laser chips[J]. Semiconductor Optoelectronics，2025，46(4)：630-637.

[6] 林青华，张东亮，王　锐，等. 量子级联激光器热仿真与分析[J]. 半导体光电，2024，45(1)：84-89.
Lin Qinghua，Zhang Dongliang，Wang Rui，et al. Thermal simulation and analysis of quantum cascade laser [J]. Semiconductor Optoelectronics，2024，45(1)：84-89.

[7] 朱　笑，许峥嵘，李锦棒，等. 谐振型大流量阀式压电气泵的设计与实验[J]. 压电与声光，2025，47(2)：333-342.
Zhu Xiao，Xu Zhengrong，Li Jinbang，et al. Design and experiment of a resonant large-flow valve-type piezoelectric air pump [J]. Piezoelectrics & Acoustooptics，2025，47(2)：333-342.

[8] Peng B，Yi Z，Fan Y，et al. Piezoelectric active air-cooling devices[J]. Chip，2026，5(1)：100163.

[9] 吴文东，张文斌，陈永华，等. 柔性鸭嘴阀压电泵的设计与试验[J]. 压电与声光，2024，46(1)：124-127，135.
Wu Wendong，Zhang Wenbin，Chen Yonghua，et al. Design and test of piezoelectric pump with flexible duckbill valve[J]. Piezoelectrics & Acoustooptics，2024，46(1)：124-127，135.

[10] 严天祥，蓝慕淳，陈辉庆，等. 圆环阀压电泵的设计与试验[J]. 压电与声光，2026，48(2)：255-261.
Yan Tianxiang，Lan Muchun，Chen Huiqing，et al. Design and testing of a circular valve piezoelectric pump [J]. Piezoelectrics & Acoustooptics，2026，48(2)：255-261.

[11] Mehrez Z，Elfalleh W. Thermal management in electronic systems using the inverse piezoelectric effect：a comprehensive review [J]. International Journal of Refrigeration，2025，179：321-341.

[12] Kim E P，Yoon J I. Heat transfer enhancement of a piezoelectric fan for cooling of electronic devices[J]. Journal of the Korea Society for Power System Engineering，2014，18(1)：14-21.

[13] 笪余生，唐彬洽，张童童，等. 一种降低直调电/光转换组件功耗的封装方法[J]. 光通信技术，2023，47(5)：63-66.
Da Yusheng，Tang Binhan，Zhang Tongtong，et al. Packaging method for reducing power consumption of directly modulated electrical/optical conversion module [J]. Optical Communication Technology，2023，47(5)：63-66.

[14] Li X，Liu X，Dong L，et al. A high-performance synthetic jet piezoelectric air pump with petal-shaped channel[J]. Sensors，2022，22(9)：3227.

[15] Wang C P. Thermal management for portable electronics using a piezoelectric micro-blower[J]. IEEE Transactions on Device and Materials Reliability，2019，19(3)：563-567.

作者简介：

刘振华(1981—)，男，重庆市人，高级工程师，主要从事电子陶瓷材料及器件研究。