

文章编号:0253-4339(XXXX)XX-0001-08

doi: 10.12465/issn.0253-4339.20260210001

并行结构光学制冷器的热链接设计

张佳宜^{1,2,3} 邓联忠¹ 杨浩东^{2,3} 钟标^{2,3} 罗二仓^{2,3}

(1 华东师范大学 精密光谱科学与技术高等研究院 上海 200062;

2 中国科学院理化技术研究所 低温科学与技术全国重点实验室 北京 100190; 3 中国科学院大学 北京 100049)

摘要 光学制冷器作为一种全固态、无振动的主动低温制冷技术,在空间探测与量子精密测量等领域具有重要应用前景。并行结构的光学制冷器能进一步提升制冷功率,满足更大热负载的需求,但由此产生的荧光额外热负载管理也成为关键挑战。本文面向并行结构光学制冷器,聚焦于其关键传热部件——热链接设计。在材料选择上,基于导热系数与热膨胀匹配性,确定了 MgF_2 为热链接材料。在结构设计上,旨在通过几何光路调控与表面散射的协同作用来管理荧光,据此提出6种热链接构型。在此基础上,通过光学仿真,以荧光逃逸系数和抵达冷指端的荧光功率为量化指标,系统评估了不同结构与表面状态的影响。结果表明:提高表面粗糙度可普遍增强所有结构的荧光逃逸能力,减少额外热负载;其中,在较高粗糙度下表现最佳的几何构型,其荧光逃逸系数最低可达0.013,印证了几何设计与表面散射策略的协同有效性。本研究为并行结构光学制冷器的热链接设计提供了系统的仿真方法与明确的优化依据,对抑制荧光热负载、提升系统净制冷功率具有重要的理论和工程意义。

关键词 固体材料激光制冷;光学制冷器;热链接;双晶体制冷;光学仿真

中图分类号: O433.2; O436.2; TB651

文献标识码: A

Thermal Link Design for Parallel Optical Cryocoolers

Zhang Jiayi^{1,2,3} Deng Lianzhong¹ Yang Haodong^{2,3} Zhong Biao^{2,3} Luo Ercang^{2,3}

(1. State Key Laboratory of Precision Spectroscopy, East China Normal University, Shanghai 200062, China; 2. State Key Laboratory of Cryogenic Science and Technology, Technical Institute of Physics and Chemistry, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China; 3. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract

Objective Managing the parasitic heat load caused by fluorescence is essential for improving the net cooling power of cryogenic optical refrigerators, particularly in parallel configurations. The thermal links must conduct efficient cooling while blocking the anti-Stokes fluorescence (920–1100 nm) from reaching the cold finger. This study aims to design and numerically evaluate several thermal-link geometries for an optical cryocooler with parallel configuration, focusing on maximizing the fluorescence escape capability and minimizing the parasitic heat load.

Methods Six thermal-link geometries (labeled A–F) were proposed based on two physical strategies, namely optical-path guiding and surface-scattering control. A three-dimensional model was developed using an optical simulation software. The model included a Yb^{3+} :LLF cooling crystal as a uniform isotropic fluorescence source, an MgF_2 thermal link, and an absorbing baffle. The surfaces of the thermal links were assigned varying Lambertian scattering percentages (0–100%) to represent different roughness levels. A photodetector was placed at the cold-finger end to quantify the escaping fluorescence energy. Performance was evaluated using the fluorescence escape coefficient (η_{esc}), defined as the ratio of detected fluorescence power to total emitted power. **Results and Discussion** The simulation results showed that the fluorescence escape coefficient decreased considerably as the surface roughness (Lambertian scattering percentage) increased for all geometries, confirming that the scattered light was more likely to escape laterally. Regardless of surface roughness, the F-type geometry achieved the best performance, particularly under fully Lambertian scattering conditions (100%), and

收稿日期:XXXX-XX-XX;修回日期:XXXX-XX-XX;录用日期:XXXX-XX-XX

责任编辑:邵月月

基金项目:国家自然科学基金(11604100, 62175066, 12474404)资助项目。(The project was supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 11604100, No. 62175066, No. 12474404).)



移动阅读

its η_{esc} value reached 0.013. This finding is attributed to its geometric features and surface scattering, which effectively randomize the fluorescence direction and increase the optical path length, thereby maximizing lateral escape and minimizing axial transmission to the cold finger.

Conclusions This study demonstrates that both geometry and surface roughness are decisive factors in controlling fluorescence propagation in thermal links for parallel optical refrigerators. An F-type geometry with a rough surface exhibited the best performance. These findings provide practical design guidelines for optimizing thermal links in high-power optical cryocoolers, contributing to improved system efficiency and expanded application potential in fields such as space instrumentation and quantum sensing.

Keywords solid-state laser cooling; optical cryocooler; thermal link; parallel configuration; optical simulation

固体材料激光冷却技术是一种利用反斯托克斯荧光效应来冷却的全固态主动制冷技术,相比传统制冷技术,具有无振动、宽温区(4~300 K)、无电磁干扰等优势^[1-7]。固体材料光学制冷的设想于1929年由P. Pringsheim首次提出^[8],1995年R. I. Epstein率先在实验上实现净制冷^[9]。随着激光技术的进步和材料科学的发展以及诸多研究者的加入,固体材料激光制冷领域取得了快速发展^[10-23]。其中 $\text{Yb}^{3+}:\text{YLiF}_4$ (YLF)和 $\text{Yb}^{3+}:\text{LuLiF}_4$ (LLF)晶体的激光冷却温度已低于123 K^[24-27]。随着关键技术的持续进步,固体材料激光制冷实现的温度极限不断被刷新,该技术已从原理验证阶段,逐步进入面向实际应用的发展阶段^[1,4,28]。基于该技术构建的光学制冷器,其具有全固态、无振动的特性,恰好能够满足空间探测、精密计量等前沿领域对低温环境的关键需求,即极大抑制甚至消除机械振动带来的干扰^[2,29-34]。例如,该技术为空间红外探测器提供了潜在的无振动冷却解决方案^[30];同时,也为实现激光频率长期稳定的超稳单晶硅光学腔,以及面向小型化与可搬运应用的光钟系统,提供了能够满足其无振动的理想低温平台^[35-36]。自M. Sheik-Bahae研究小组于2018年成功研制首台光学制冷器样机,把HgCdTe红外传感器冷却至135 K以来^[4],降低工作温度、提升制冷功率便成为该领域的研究焦点。例如,M. Sheik-Bahae小组通过优化热链接设计,在2022年实现了冷指温度为124.8 K的器件^[37]。然而,单核冷却晶体的制冷功率(通常为百毫瓦级)难以满足诸如大尺寸超稳单晶硅光学腔冷却等应用对数百毫瓦级乃至更高热负载的需求^[4-6,35-37]。为此,旨在实现功率倍增的并行多晶体制冷结构被提出^[6],它直接面向更高制冷功率的应用场景,为系统性能的提升开辟了新路径。

然而,在并行结构的光学制冷器中,系统结构变得更加复杂,从而对冷却晶体产生的反斯托克斯荧光管理以及冷量的传导提出了更高的要求。因此,设计一种既能高效导冷,又能最大限度抑制荧光传输至冷指端的热链接结构,成为提升制冷器性能的

关键^[6,38]。本研究首先通过对光学制冷器热负载的系统分析,明确了荧光在冷指端被吸收所产生的额外热负载是限制系统净制冷性能的关键因素,进而提出了以提升热链接的荧光逃逸能力为核心设计目标。基于几何光路调控与结构优化,本文设计了6种不同几何构型的热链接。通过建立光线追迹仿真模型,以荧光逃逸系数及到达冷指端的荧光功率作为量化评价指标,系统模拟了不同几何结构及表面状态下的荧光逃逸行为。最后,通过综合对比分析,确定了能够实现最强荧光逃逸能力和冷指端荧光最低功率的热链接结构,从而为低额外热负载、高制冷性能的光学制冷器的工程实现提供了重要依据。

1 原理

1.1 反斯托克斯荧光制冷原理

固体材料激光冷却(光学制冷)基于反斯托克斯荧光制冷过程。该过程的原理如图1所示,处于基态顶部的电子吸收能量为 $h\nu$ 的光子跃迁至激发态底部;随后,这些电子吸收声子能量向激发态内更高的能级迁移,实现电子态布居数再平衡过程;接着,这些电子自发辐射出能量为 $h\nu_f$ 的荧光光子($h\nu_f > h\nu$),返回基态底部;基态中的电子吸收声子能量重新再布居。这种循环往复的过程实现了固体的光学制冷。

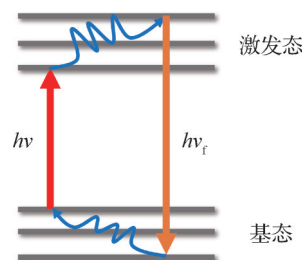


图1 反斯托克斯荧光制冷原理

Fig.1 Principle of anti-Stokes fluorescence cooling

经过上述冷却循环过程,固体材料吸收的光子能量小于辐射的荧光光子能量,其能量差来自基质材料的声子能量。材料的冷却效率通常使用四能级

模型来表征^[2]:

$$\eta_{\text{cool}}(\lambda, T) = \eta_{\text{ext}} \eta_{\text{abs}}(\lambda, T) \frac{\lambda}{\lambda_f(T)} - 1 \quad (1)$$

$$\eta_{\text{abs}} = \alpha_r / (\alpha_r + \alpha_b) \quad (2)$$

式中: λ 为激光泵浦波长,nm; λ_f 为固体材料的平均荧光波长,nm; η_{ext} 为外量子效率; η_{abs} 为吸收效率; α_r 、 α_b 分别为共振吸收系数、背景吸收系数。

在此基础上,材料所能提供的理论制冷功率计算如下:

$$P_{\text{cool}} = \eta_{\text{cool}} P_{\text{abs}} \quad (3)$$

$$P_{\text{abs}} = P_{\text{in}} (1 - e^{-2N\alpha_r l_c}) \quad (4)$$

式中: P_{in} 为泵浦光入射功率,mW; N 为光往返通过材料的次数; α_r 为共振吸收系数; l_c 为材料长度,cm。

尽管材料本身的冷却性能从根本上制约了其最大制冷功率,使得单一晶体在现有材料体系下的制冷能力仍较为有限(通常在百毫瓦量级),但通过系统层面的优化设计可显著提升有效制冷功率。例如,采用非共振腔可大幅增加泵浦光在晶体中的通过次数 N ,从而提升 P_{abs} ;进一步结合并行制冷结构,可通过集成多块冷却晶体实现制冷功率的叠加,为突破单一材料制冷极限、适配大功率应用场景提供了切实可行的技术路径。因此,在材料性能优化的同时,系统结构的创新成为提升光学制冷器制冷能力的关键方向。

1.2 光学制冷器

图2所示为光学制冷器样机的结构,主要包括制冷、测温、非共振增强吸收腔、荧光管理4个部分。制冷部分包括泵浦激光器、冷却晶体、热链接和冷指。激光泵浦冷却样品产生反斯托克斯荧光来实现低温冷却,然后通过热链接将冷量传递给冷指,外部元件则放置在冷指上进行冷却,热链接末端镀高反膜反射荧光。其中,冷却晶体采用目前已制冷至低温学温度的 $\text{Yb}^{3+}:\text{YLF}$ 和 $\text{Yb}^{3+}:\text{LLF}$ 晶体^[24,26]。测温则由光纤、光谱仪和温度传感器完成。光纤和光谱仪收集冷却样品的光谱,通过非接触式测温技术——差分荧光光谱测温技术(differential luminescence thermometry, DLT)来测量冷却晶体的温度^[39],温度传感器则用于测量冷指表面温度。非共振增强吸收腔由2个高反镜组成,可以使得激光多次往返通过冷却晶体,提高晶体的吸收功率,进而提高制冷功率。荧光管理部分由屏蔽腔、低发射率选择性吸收涂层和散热系统组成,用于消除反斯托克斯荧光影响并维持制冷器的环境温度。

在系统层面提升制冷功率的同时,有效管理制

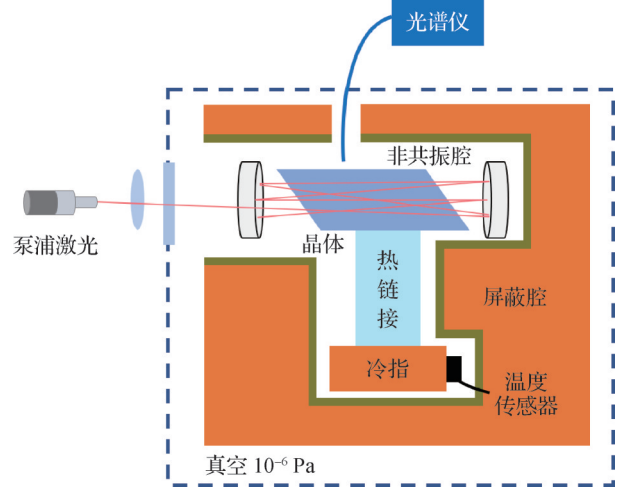


图2 光学制冷器结构

Fig.2 Structure of cryogenic optical cooler

冷器的热负载至关重要。样机运行于高真空环境(压强约为 10^{-6} Pa),空气对流带来的热负载可忽略不计;同时,晶体与热链接间采用低吸收率粘结剂,其对荧光的吸收贡献也控制在极低水平。因此,其总热负载主要由以下几部分构成:

$$P_{\text{total}} = P_{\text{rad}} + P_{\text{cond}} + P_{\text{heat}} \quad (5)$$

式中: P_{rad} 为屏蔽腔与各组件(包括冷却晶体、热链接及冷指)之间的黑体辐射热负载,mW,可通过斯特藩-玻耳兹曼定律逐项计算; P_{cond} 为冷指与屏蔽腔的热传导负载,mW; P_{heat} 为冷却晶体产生的荧光通过热链接到达冷指后,冷指或冷指上的外部元件因吸收荧光而产生的额外热负载,mW,该部分与到达冷指端的荧光功率 P_{esc} 成正比。因此,荧光在热链接中的传输是影响热负载的关键因素, P_{esc} 可表示为:

$$P_{\text{esc}} = (1 - R_m) \eta_{\text{esc}} P_{\text{flu}} \quad (6)$$

$$P_{\text{flu}} = P_{\text{cool}} + P_{\text{abs}} \quad (7)$$

式中: R_m 为热链接末端高反膜的反射率, P_{flu} 为冷却晶体的总荧光功率,mW; η_{esc} 为热链接的荧光逃逸系数,反映荧光从热链接逃逸的能力, η_{esc} 越低,表示热链接的荧光逃逸能力越强,额外热负载 P_{heat} 越小。当泵浦激光在非共振腔内往返100次、入射功率为30 W时,2块 $\text{Yb}^{3+}:\text{LLF}$ 晶体在124 K下可提供的总制冷功率约为452.1 mW。若热链接的荧光逃逸系数 η_{esc} 为0.1,则到达冷指端的荧光功率 P_{esc} 可达181.4 mW。一旦该部分荧光在冷指处被完全吸收,将直接抵消约40.1%的制冷功率,成为不可忽略的额外热负载。显然,降低 η_{esc} ,即提升荧光逃逸能力,是抑制额外热负载、提高系统净制冷性能的重要途径。

基于上述分析,优化热链接的荧光逃逸能力成为系统设计中的关键环节。本文后续将针对并行结

构,系统设计并研究不同几何构型与表面状态的热链接对荧光逃逸行为的影响,旨在实现额外热负载的最小化,从而提升制冷器的整体性能。

2 并行结构热链接设计

在光学制冷器中,热链接作为连接冷却晶体与冷指的核心传热部件,承担着双重重任:一方面需具备优异的导热性能,确保冷量高效传递至冷指端的负载;另一方面须尽可能阻隔由冷却晶体产生的反斯托克斯荧光(920~1 100 nm)到达冷指,以避免其对外部元件造成额外加热。尤其在并行双晶体制冷结构中,荧光产额相应增加,热链接的荧光管理能力更加关键,其制冷系统结构如图3所示,由2个冷却晶体、晶体间挡板、热链接和冷指组成。泵浦激光分为2路分别泵浦冷却晶体,晶体间的挡板用于吸收晶体产生的荧光,其表面也会覆盖一层低发射率选择性吸收涂层。热链接将冷却晶体产生的冷量传递至冷指,冷指末端则用于放置并冷却外部元件。

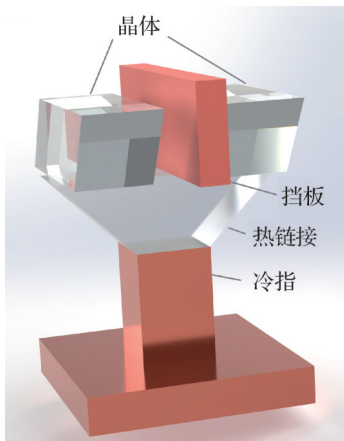


图3 双晶体制冷结构

Fig.3 Schematic of the dual-crystal refrigeration in parallel configuration

因此,热链接的设计需同时追求高导热性能与高荧光逃逸能力:导热性能依赖于材料本身,而荧光逃逸能力则与材料的光学特性、几何构型及表面状态等密切相关。为实现该目标,下文将明确热链接材料,进而通过几何构型设计与光学仿真,系统研究不同结构和表面对荧光逃逸行为的影响,以筛选出荧光逃逸能力最强的热链接。

2.1 材料选择

制冷器的热链接材料需同时满足3个关键条件:

- 1)对冷却晶体产生的反斯托克斯荧光波段透明;
- 2)具有较高的导热系数;3)与冷却晶体(Yb^{3+} :YLF或 Yb^{3+} :LLF)间良好的热膨胀匹配。表1所示为4种在

荧光波段具有高透明性的热链接候选材料的折射率(n)、导热系数和热膨胀系数^[37,40]。由表1可知,蓝宝石导热性能突出,但其与冷却晶体的热膨胀系数差异较大。长期热循环作用下,界面产生的应力易造成晶体开裂。使用YLF/LLF基质材料虽能避免热应力问题,但其导热系数不足,不利于冷量的高效传导。综合对比发现, MgF_2 展现出更优的综合性能,其导热系数远高于YLF/LLF,同时热膨胀系数与冷却晶体良好匹配,能够在确保机械连接可靠性的基础上实现高效导冷。因此,在后续模拟中选用 MgF_2 作为热链接材料。

表1 不同热链接材料的折射率、导热系数和热膨胀系数
Tab.1 Refractive index, thermal conductivity and coefficient of thermal expansion of different thermal link materials

材料	折射率	导热系数/[W/(m·K)]	热膨胀系数/(10^{-6} K $^{-1}$)
蓝宝石	~1.75	~40	6.95 (//a), 5.9 (//c)
YLF	~1.47	~6.5	13 (//a), 8 (//c)
LLF	~1.48	~6.3	14.6 (//a), 10.8 (//c)
MgF_2	~1.38	~30	8.9 (//a), 13.7 (//c)

注://a代表平行于晶体的a轴方向, //c代表平行于晶体的c轴方向

2.2 几何结构与荧光仿真

在选定 MgF_2 作为热链接材料的基础上,为实现其高导热与强荧光抑制的核心功能,本研究从几何光路调控的物理机制出发,提出了3种几何设计策略,并据此衍生出6种具体构型(A~F型),系统探索几何结构对荧光逃逸行为的调控规律。

2.2.1 基于光路调控的几何构型设计

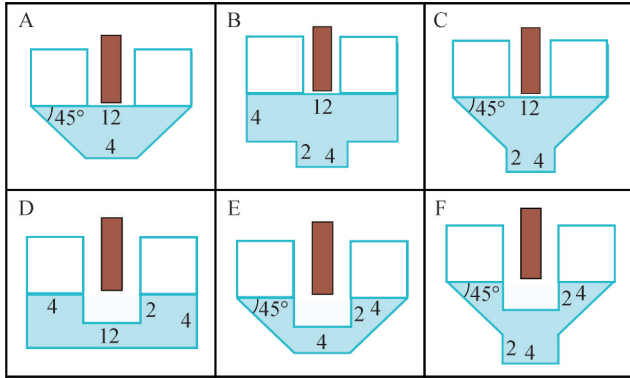
图4所示为6种热链接构型的横截面,其设计遵循以下策略:

1)倾角引导策略。以A型(梯形截面)为代表,通过侧壁倾角改变荧光的传播方向,使其更易与侧壁作用时发生大角度反射,偏离轴向传输路径。研究中初步选择45°倾角,该角度在光学设计中常用于实现高效侧向反射,同时兼顾加工可行性;为验证角度选择的合理性,对A型结构在40°、45°和50°倾角下的荧光逃逸系数 η_{esc} 进行了仿真对比。结果表明,40°和50°倾角的 η_{esc} 与45°倾角的 η_{esc} 相差不足0.05%。由于40°~50°倾角范围内荧光逃逸系数变化较小,说明荧光逃逸能力对倾角变化不敏感,此处选择45°开展仿真研究。

2)路径延长与再分布策略。该策略旨在增加荧光在热链接内的光程,提升其逃逸的机会。B型(末端方形)通过末端延伸段延长轴向路径;C型(梯形+

末端方形)则融合了A型的倾角引导与B型的路径延长,形成协同增强。

(3)凹槽反射策略:该策略引入内部凹槽,促使荧光发生多次反射,从而有效分散其传播方向并抑制轴向传输。D型(凹形)采用矩形凹槽反射并分散荧光;E型(梯形截面+凹形)结合倾角与矩形凹槽;F型(梯形截面+凹形+末端方形)则通过倾角引导、凹槽反射与路径延长的三重协同,进一步提高其荧光逃逸能力。



白色为冷却晶体;棕色为晶体间挡板;蓝色为热链接。

单位:mm

图4 6种热链接结构(A~F型)截面示意图

Fig.4 Cross-sectional views of the six proposed thermal link structures (Type A-F)

所有设计均保持与晶体及冷指接触的截面积一致,以确保基础导热性能的可比性。上述构型从单一策略(A、B、D型)向复合策略(C、E、F型)演进,为系统评估几何因素对荧光逃逸能力的影响提供了清晰的研究序列。此外,还通过调控表面朗伯散射百分比来模拟不同粗糙度,研究几何结构与表面散射的协同作用。

2.2.2 仿真模型与性能评估方法

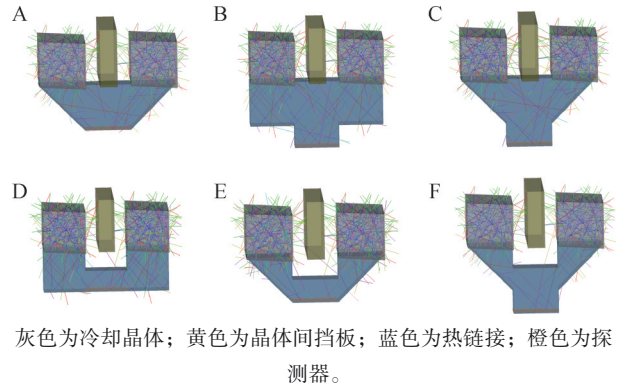
为量化评估上述不同几何策略下热链接的荧光逃逸能力及冷指端荧光吸收的影响,本文建立了光线追迹仿真模型用于模拟冷却晶体发射的荧光进入热链接后的逃逸过程。首先,依据图4所示设计,以1:1比例构建包含冷却晶体、热链接及吸收挡板的三维模型。其中,冷却晶体($\text{Yb}^{3+}:\text{LLF}$, $n \approx 1.48$)尺寸设定为4 mm×4 mm×10 mm,通光面为布儒斯特角切割以优化泵浦吸收,该尺寸和构型已在前期实验中被验证可实现激光冷却^[12,26];吸收挡板(1.5 mm×5 mm×14 mm)用于隔离双晶体间的荧光。热链接材料为 MgF_2 ($n \approx 1.38$),厚度统一为4 mm。模型进行了合理简化:1)晶体内部的荧光设为均匀、各向同性的体光源;2)热链接与晶体、挡板等之间的界面光学接触设

为理想状态;3)表面散射由朗伯散射百分比(Lambertian scattering percentage)参数化描述(0%为镜面,100%为完全漫反射)。

模拟中在热链接末端(冷指连接面)设置了理想光功率探测器,用于接收透射至此的荧光能量。为充分采样并确保统计可靠性,每个结构均追迹 10^5 条光线。本文预先进行了光线数量收敛性测试:当追迹光线从 10^4 条增加至 10^5 条时,荧光逃逸系数(η_{esc})的统计波动小于6%;继续增加至 10^6 时, η_{esc} 的变化小于1%。因此,采用 10^5 条光线可在计算效率与结果精度间取得最佳平衡。此外,所有模拟均通过了能量守恒验证,即被探测器接收、被挡板吸收以及从系统边界逃逸的总能量,与荧光光源发出的总能量之差小于2%,确保了计算模型的可靠性。图5所示为热链接的模拟示意图,荧光逃逸系数作为量化其荧光逃逸能力的核心指标,可表示为:

$$\eta_{\text{esc}} = \frac{P_d}{P_{\text{flu}}} \quad (4)$$

式中: P_d 为末端探测器接收到的荧光功率,mW; P_{flu} 为冷却晶体产生的总荧光功率,mW。 η_{esc} 值越小,表明热链接阻止荧光到达冷指端的能力越强,其荧光逃逸能力越强。



灰色为冷却晶体;黄色为晶体间挡板;蓝色为热链接;橙色为探测器。

图5 6种热链接结构(A~F型)模拟示意图

Fig.5 Simulation diagram of the thermal link (Type A-F)

图6所示为6种结构在不同朗伯散射表面百分比下的荧光逃逸系数 η_{esc} 和124 K时到达冷指端(热链接末端)的荧光功率 P_{esc} 。对于所有结构,随着表面粗糙度(朗伯散射百分比)的增加,荧光逃逸系数显著下降。当朗伯散射百分比达到100%时,所有结构的 η_{esc} 均低于0.04, P_{esc} 可减少至72.5 mW以下,这是因为粗糙表面将荧光散射向各个方向,显著提升了其从热链接中侧向逃逸的概率。在不同表面粗糙度下,E型结构凭借其倾角、凹槽与路径延长设计,实现了最低的荧光逃逸系数($\eta_{\text{esc}} < 0.04$);尤其当表面为完

全朗伯散射时, η_{esc} 降至 0.013, 此时 P_{esc} 也降低至 23.1 mW (124 K)。这意味着 F 型结构在几何结构与表面散射作用的共同优化下, 不仅显著增加了荧光的光程, 也使得多次反射后的荧光方向随机化, 从而极大提升了其从侧壁热链接逃逸的概率。 η_{esc} 的降低直接导致抵达热链接末端的荧光功率减少, 这将有效抑制由此产生的额外热负载 P_{heat} , 对于提升光学制冷系统的净制冷性能具有重要实际意义。

需要指出的是, 不同热链接结构的几何差异不仅影响其荧光逃逸能力, 还会改变其黑体辐射热负载的大小。这一热负载将直接作用于热链接本身, 并最终影响冷指端的温度。因此, 在优化荧光逃逸能力的同时, 需综合考虑几何构型对黑体辐射热负载的影响, 并从系统层面对制冷器进行热平衡分析。通过建立系统热平衡模型, 可量化评估各项热负载: 包括冷却晶体的制冷功率、各组件与屏蔽腔之间的黑体辐射热负载、各组件间的导热以及冷指或冷指上的外部元件因吸收荧光而产生的额外热负载, 进而确定在无外部热负载条件下冷指端所能达到的最低温度, 为热链接的几何优化提供更全面的热性能评估依据。

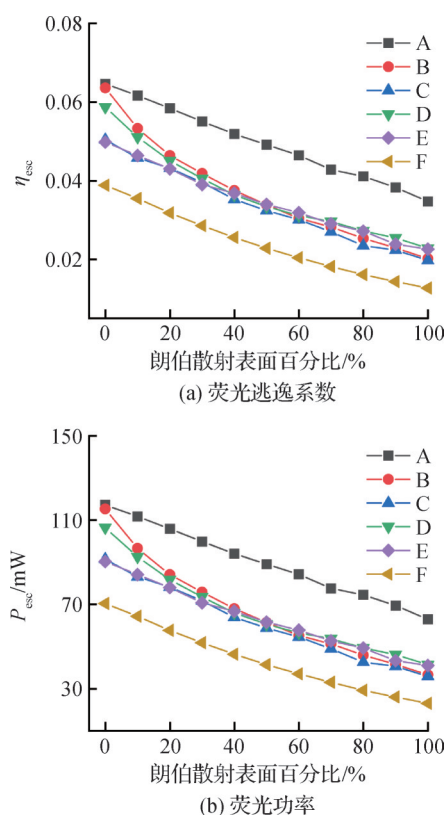


图6 荧光逃逸系数和到达冷指端的荧光功率随朗伯散射表面百分比的变化

Fig.6 Fluorescence escape coefficient and fluorescence power reaching the cold finger end versus Lambertian scattering percentage

3 结论

针对并行结构光学制冷器对高效热传导与低荧光额外热负载的双重要求, 本文聚焦于关键传热部件热链接, 开展了高导热与高荧光逃逸能力的协同设计与仿真研究。通过解析系统热负载, 明确了增强荧光在热链接处的侧向逃逸、降低逃逸荧光功率对提升系统净制冷性能具有决定性作用。基于几何光路调控原理, 提出了以倾角引导、路径延长与凹槽反射为核心策略的 6 种热链接构型 (A~F 型), 旨在通过几何结构主动引导荧光向侧方逃逸。构建光线追迹模型, 以 η_{esc} 和 P_{esc} 为量化指标, 系统评估了几何构型与表面粗糙度的协同影响。仿真结果表明: 表面粗糙度增加能显著增强荧光散射, 从而提升所有结构的荧光侧向逃逸能力; F 型结构凭借其倾角、凹槽与路径延长的复合设计, 与表面散射实现了最佳协同, 表现出最优的荧光逃逸能力 (η_{esc} 约为 0.013), 此时 P_{esc} 约为 23.1 mW (124 K), 仅占制冷功率的 5.1%, 有效抑制了额外热负载。

M. Sheik-Bahae 小组在其首次实现的光学制冷器样机中, 采用单次弯折 YLF 晶体结构完成热链接设计。通过系统扫描弯折角度 ($0^\circ \sim 35^\circ$) 确定了 15° 的最优设计, 使 η_{esc} 降至约 0.02。该样机在泵浦功率为 47 W、工作温度为 135 K 时的总制冷功率约为 470 mW, 成功实现了对 HgCdTe 红外传感器的冷却 (热负载约为 8 mW)^[4]。本工作则采用并行双晶体结构, 系统引入了多种几何光路调控 (倾角引导、路径延长、凹槽反射) 与表面散射协同设计的理念, 通过荧光逃逸系数 η_{esc} 实现了不同设计方案间的量化比较。研究表明, 当表面为完全朗伯散射时, F 型结构的 η_{esc} 可低至 0.013, 其荧光逃逸能力比 M. Sheik-Bahae 小组更强。更重要的是, 并行结构在相同条件下可提供约 765.6 mW 的总制冷功率 (135 K), 较单晶体结构提升约 63%, 充分体现了并行结构在提升制冷能力方面的显著优势。

本研究从“功能需求-构型创新-仿真验证”层面, 形成了一套面向光学制冷器热链接的系统设计方法。结果表明, 通过几何光学设计与表面散射特性的协同优化, 可在确保高效轴向导冷的同时, 显著促进荧光侧向逃逸、减少其轴向传输至冷指端的比例。这不仅为发展高功率、低热负载的并行结构光学制冷器提供了兼具高导热与高荧光逃逸能力的热链接设计方案, 也为解决类似固态制冷系统中的额外光热管理问题提供了新思路。

本文受中国科学院稳定支持基础研究领域青年团队计划(YSBR-120);中国科学院理化技术研究所所长基金(E2A9R40101);低温科学与技术全国重点实验室重点自主课题项目(E4ASW10601,E5ASD10201)资助。(The project was supported by the Young Scientists in Basic Research under grant (No. YSBR-120); Director's Fund of the Technical Institute of Physics and Chemistry, CAS (No. E2A9R40101); Key Research Program of the State Key Laboratory of Cryogenic Science and Technology, CAS (E4ASW10601, E5ASD10201).)

参考文献

- [1] Seletskiy D V, Epstein R, Sheik-Bahae M. Laser cooling in solids: advances and prospects[J]. Reports on Progress in Physics, 2016, 79(9): 096401.
- [2] Sheik-Bahae M, Epstein R I. Optical refrigeration [J]. Nature Photonics, 2007, 1(12): 693-699.
- [3] 中国制冷学会. 2022—2023 制冷及低温工程学科发展报告[M]. 北京: 中国科学技术出版社, 2024. (Chinese Association of Refrigeration. 2022—2023 report on advances in refrigeration and cryogenic engineering [M]. Beijing: China Science and Technology Press, 2024.)
- [4] Hehlen M P, Meng Junwei, Albrecht A R, et al. First demonstration of an all-solid-state optical cryocooler [J]. Light: Science & Applications, 2018, 7: 15.
- [5] Vicente R, Cittadino G, Di Lieto A, et al. Operation of a fiber-coupled laser-cooler down to cryogenic temperatures [J]. Optics Express, 2022, 30(8): 12929.
- [6] Caminati F, Cittadino G, Damiano E, et al. A design for optical refrigeration: the parallel configuration [J]. Applied Physics Letters, 2023, 122(2): 021102.
- [7] Zhang Zhuoming, Ding Yang, Pauzauskie P J, et al. Principles for demonstrating condensed phase optical refrigeration [J]. Nature Reviews Physics, 2025, 7(3): 149-153.
- [8] Pringsheim P. Zwei bemerkungen über den unterschied von lumineszenz- und temperaturstrahlung [J]. Zeitschrift für Physik, 1929, 57(11): 739-746.
- [9] Epstein R I, Buchwald M I, Edwards B C, et al. Observation of laser-induced fluorescent cooling of a solid [J]. Nature, 1995, 377(6549): 500-503.
- [10] Melgaard S D, Seletskiy D V, Di Lieto A, et al. Optical refrigeration to 119 K, below National Institute of Standards and Technology cryogenic temperature [J]. Optics Letters, 2013, 38(9): 1588.
- [11] Zhong B, Yin J, Jia Y, et al. Laser Cooling of Yb³⁺-Doped LuLiF₄ Crystal [J]. Optics Letters, 2014, 39(9): 2747-2750.
- [12] Zhong Biao, Lei Yongqing, Luo Hao, et al. Laser cooling of the Yb³⁺-doped LuLiF₄ single crystal for optical refrigeration [J]. Journal of Luminescence, 2020, 226: 117472.
- [13] Topper B, Neumann A, Albrecht A R, et al. Potential of ytterbium doped silica glass for solid-state optical refrigeration to below 200 K [J]. Optics Express, 2023, 31(2): 3122-3133.
- [14] Chen Chunwei, Balliu E, Meehan B, et al. Observation of anti-Stokes-fluorescence cooling in commercial Yb-doped silica fibers [J]. Applied Physics Letters, 2025, 127(14): 142203.
- [15] Zhong Biao, Lei Yongqing, Duan Xuelu, et al. Optical refrigeration of the Yb³⁺-doped YAG crystal close to the thermoelectric cooling limit [J]. Applied Physics Letters, 2021, 118(13): 131104.
- [16] Zhang Jun, Li Dehui, Chen Renjie, et al. Laser cooling of a semiconductor by 40 kelvin [J]. Nature, 2013, 493(7433): 504-508.
- [17] Pant A, Xia Xiaojing, Davis E J, et al. Solid-state laser refrigeration of a composite semiconductor Yb: YLiF₄ optomechanical resonator [J]. Nature Communications, 2020, 11: 3235.
- [18] Dalla Valle P, Bescond M, Michelini F, et al. Laser cooling in semiconductor heterojunctions by extraction of photogenerated carriers [J]. Physical Review Applied, 2023, 20: 014066.
- [19] Luntz-Martin D R, Felsted R G, Dadras S, et al. Laser refrigeration of optically levitated sodium yttrium fluoride nanocrystals [J]. Optics Letters, 2021, 46(15): 3797-3800.
- [20] Silva J R, da Cunha Andrade L H, Lima S M, et al. Observation of laser cooling on an electric-dipole-allowed transition in Cr³⁺: LiSAF crystal [J]. Advanced Optical Materials, 2025, 13(16): 2403222.
- [21] Nobel S, Zhu X, Wu J, et al. Optical refrigeration of Tm³⁺ doped indium fluoride glass from room temperature [J]. Applied Physics Letters, 2025, 127: 011104.
- [22] Rostami S, Albrecht A R, Volpi A, et al. Observation of optical refrigeration in a holmium-doped crystal [J]. Photonics Research, 2019, 7(4): 445.
- [23] Fernandez J, Garcia-Adeva A J, Balda R. Anti-stokes laser cooling in bulk erbium-doped materials [J]. Physical Review Letters, 2006, 97(3): 033001.
- [24] Melgaard S D, Albrecht A R, Hehlen M P, et al. Solid-state optical refrigeration to sub-100 Kelvin regime [J]. Scientific Reports, 2016, 6: 20380.
- [25] Volpi A, Meng Junwei, Gragossian A, et al. Optical refrigeration: the role of parasitic absorption at cryogenic temperatures [J]. Optics Express, 2019, 27(21): 29710-29718.

- [26] Lei Yongqing, Zhong Biao, Yang Tao, et al. Laser cooling of Yb^{3+} : LuLiF_4 crystal below cryogenic temperature to 121 K[J]. *Applied Physics Letters*, 2022, 120(23): 231101.
- [27] Zhong Biao, Zhang Jiayi, Yang Haodong, et al. Critical limitations in cryogenic laser cooling of solids: symmetry-related fluorescence trapping and condensation-induced parasitic heating[J]. *Advanced Science*, 2026, 13(19): e19452.
- [28] Nemova G. Radiation-balanced lasers: history, status, potential[J]. *Applied Sciences*, 2021, 11(16): 7539.
- [29] Kessler T, Hagemann C, Grebing C, et al. A sub-40-mHz-linewidth laser based on a silicon single-crystal optical cavity [J]. *Nature Photonics*, 2012, 6 (10) : 687–692.
- [30] Vicente R, Nogues G, Niot J M, et al. Impacts of laser cooling for low earth orbit observation satellites: an analysis in terms of size, weight and power [J]. *Cryogenics*, 2020, 105: 103000.
- [31] Schulz S, Drori Y, Wipf C, et al. Optical Refrigeration for an Optomechanical Amplifier [PP/OL]. [引用日期]. https://xueshu.baidu.com/ndscholar/browse/detail?paperid=1v3j0gm0305t04506j210je066381129&site=xueshu_se.
- [32] Chang Haonan, Zhang Jun. Refrigeration technologies of cryogenic chips[J]. *Chip*, 2023, 2(3): 100054.
- [33] Li Jingang, Chen Zhihan, Liu Yaoran, et al. Opto-refrigerative tweezers [J]. *Science Advances*, 2021, 7 (26): eabh1101.
- [34] Aggarwal N, Winstone G P, Teo M, et al. Searching for new physics with a levitated-sensor-based gravitational-wave detector [J]. *Physical Review Letters*, 2022, 128 (11): 111101.
- [35] Kedar D, Ye Jun. Cryogenic silicon cavity for record laser frequency stability [C]//*Photonic Heat Engines: Science and Applications V*, 2023: 5.
- [36] Robinson J M, Oelker E, Milner W R, et al. Crystalline optical cavity at 4 K with thermal-noise-limited instability and ultralow drift[J]. *Optica*, 2019, 6(2): 240.
- [37] Kock J L, Albrecht A R, Epstein R I, et al. Optical refrigeration of payloads to $T < 125$ K[J]. *Optics Letters*, 2022, 47(18): 4720–4723.
- [38] Deshpande S B, Tendolkar M V, Singh V K. Numerical modeling of thermal link for optical cooler [J]. *Heat Transfer Engineering*, 2026, 47(4/5): 367–381.
- [39] Imangholi B, Hasselbeck M P, Bender D A, et al. Differential luminescence thermometry in semiconductor laser cooling[J]. *Physics and Simulation of Optoelectronic Devices XIV*, 2006, 6115: 61151C.
- [40] Volpi A. Cooling Effect on Fluoride Crystals [D]. Pisa: University of Pisa, 2016.

通信作者简介

邓联忠,男,副教授,华东师范大学精密光谱科学与技术高等研究院,E-mail:lzdeng@phy.ecnu.edu.cn。研究方向:超快光场调控下的稀土离子发光特性及其非线性显微成像应用研究,外场操控下的冷原子、分子研究。

About the corresponding author

Deng Lianzhong, male, associate professor, State Key Laboratory of Precision Spectroscopy, East China Normal University, E-mail: lzdeng@phy.ecnu.edu.cn. Research fields: ultrafast optical field control of luminescence properties in rare-earth ions and their applications in nonlinear microscopic imaging, external-field manipulation of cold atoms and molecules.