

文章编号:0253-4339(XXXX)XX-0001-15

doi: 10.12465/issn.0253-4339.20260805001

低温光学制冷器的研究进展

杨浩东^{1,2} 祖晨宇^{1,2} 张佳宜^{1,2,3} 何瑞玲^{1,2,4} 钟标^{1,2} 罗二仓^{1,2}

(1 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; 2 中国科学院大学 北京 100049;

3 华东师范大学 精密光谱科学与技术高等研究院 上海 200062; 4 南通大学物理科学与技术学院 南通 226019)

摘要 固体光制冷技术是一种利用反斯托克斯荧光冷却目标载荷的新型制冷技术,具有无振动、无电磁干扰等优势。近年来,随着光制冷材料体系不断拓展,材料性能持续提升以及泵浦吸收增强和光热管理等关键技术的发展,固体光制冷的最低可达温度已从早期的室温附近降至亚 100 K 温区,成功进入低温光学制冷器范畴。本文围绕低温光学制冷器的研究进展,从光制冷物理机制、光制冷材料体系、增强泵浦吸收、光热管理、系统集成等方面进行综述。通过对相关研究进展的归纳可得:低温下泵浦吸收衰减、制冷晶体制冷功率有限以及系统寄生热负载大,是制约进一步降温和载荷端有效制冷功率提升的主要因素。未来需从提高材料制冷性能、强化低温泵浦吸收和优化系统级热管理等方面协同推进,以进一步提升低温光学制冷器的综合性能及应用能力。

关键词 低温光学制冷器;光制冷材料体系;泵浦吸收增强;光热管理;系统集成

中图分类号: TB657;TB61+1;O437.3

文献标识码: A

Research Progress in Optical Cryocoolers

Yang Haodong^{1,2} Zu Chenyu^{1,2} Zhang Jiayi^{1,2,3} He Ruiling^{1,2,4} Zhong Biao^{1,2} Luo Ercang^{1,2}

(1. State Key Laboratory of Cryogenic Science and Technology, Technical Institute of Physics and Chemistry, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 3. State Key Laboratory of Precision Spectroscopy, East China Normal University, Shanghai 200062, China; 4. School of Physical Science and Technology, Nantong University, Nantong 226019, China)

Abstract

Significance Optical cryocoolers are cryogenic refrigeration devices based on anti-Stokes fluorescence. They feature vibration-free operation without moving parts, freedom from electromagnetic interference, and a compact architecture. With the increasing demand for low-vibration and highly reliable cryogenic cooling in space infrared detection, optical clocks, precision time-frequency metrologies, and deep-space science missions, optical cryocoolers show a significant potential for future applications in space payloads, precision measurements, and low-noise detections.

Progress This study reviews the development of optical cryocoolers from the perspectives of basic principles and emerging physical mechanisms of solid-state optical refrigeration, optical refrigeration material systems, pump absorption enhancement, thermal management, and system integration. In terms of materials, the developments of Yb³⁺-doped fluoride glasses and crystals, long-wavelength rare-earth-ion-doped materials based on Er³⁺ and Tm³⁺/Ho³⁺, rare-earth-ion-codoped fluoride crystals and semiconductor materials are summarized. In terms of pump absorption enhancement, the operational characteristics and applicable conditions of non-resonant multipass cavities and resonant cavities are compared. In terms of the thermal management, the effects of thermal-link materials, structural design, and bonding techniques on heat conduction, fluorescence isolation, and cryogenic reliability are analyzed. Regarding system integration, the development from cooling the optical refrigeration material itself to cooling external payload, as well as approaches such as parallel multi-crystal configurations for enhancing the system cooling capacity, are reviewed, and the limitations imposed by the low cooling power of the refrigeration crystal and large system-level parasitic heat loads on the effective cooling power delivered to the payload are summarized.

收稿日期:2026-08-05;修回日期:2026-09-01;录用日期:2026-09-02

责任编辑:田甜



移动阅读

Conclusions The exploration of emerging physical mechanisms provides new pathways for solid-state optical refrigeration. Yb^{3+} -doped fluoride crystals remain the most mature material system for cryogenic optical refrigeration. Non-resonant multipass cavities and resonant cavities can effectively improve pump absorption at cryogenic temperatures, while thermal management strategies provide the key methods of transferring cooling power from the refrigeration crystal to an external payload. Based on this, optical cryocoolers have progressed from cooling the refrigeration material itself to cooling external payload, and proof-of-concept prototypes have been demonstrated. The vibration-free nature of optical refrigeration also offers potential for silicon ultrastable reference cavities in optical-clock systems, solid-state nuclear clocks, infrared detections and imagings, and optically levitated precision measurements. However, owing to the limited cooling power of the refrigeration crystal and parasitic heat loads arising from thermal radiation, support conduction, fluorescence absorption, and interfacial thermal resistance, the effective cooling power delivered to the payload remains low, which is a major limitation for further applications.

Prospects The future development of optical cryocoolers requires coordinated improvements in material performance, pump absorption at cryogenic temperatures, and a system-level thermal management. Increasing the cooling power of the refrigeration crystal, reducing parasitic heat loads, and optimizing thermal management strategies are expected to enhance effective payload cooling and promote engineering applications in infrared detection, optical clocks, and space science missions.

Keywords optical cryocoolers; optical refrigeration material systems; pump absorption enhancement; thermal management; system integration

固体光制冷是一种利用反斯托克斯荧光将热量以光子形式带离固体材料的新型制冷方式。与机械制冷、热电制冷和低温工质制冷相比,其突出特点在于无运动部件、无机械振动、无需低温工质,具有结构紧凑、低噪声、无电磁干扰和工作寿命长等特点。在对振动、噪声、体积和长期稳定性要求较高的低温应用场景中,例如空间红外探测、精密时频计量、单晶硅超稳腔、辐射平衡激光器、引力波探测、芯片冷却、低温电子显微镜、表面增强拉曼光谱冷却等^[1-8],固态光制冷具有传统制冷方式难以替代的独特优势,如图1所示。尤其对于空间任务和精密测量系统,传统机械制冷可能引入振动噪声,低温工质制冷存在泄漏、消耗和长期运行可靠性问题,热电制冷又难以进入深低温区。因此,在要求无振动运行、需要长期自主工作且维护条件受限的应用领域,固体光制冷被认为是一种很有发展潜力的新型低温制冷方案。

反斯托克斯荧光制冷的概念最早由 P. Pringsheim 于 1929 年提出^[9],他指出荧光介质通过反斯托克斯发射实现持续降温在热力学上是允许的。该观点随后受到质疑,学界围绕反斯托克斯荧光过程是否违反热力学第二定律展开了近二十年的激烈争论,最终从理论上确立了光制冷的热力学可行性^[10-15]。直至 1995 年, R. I. Epstein 等^[16]首次在掺 Yb^{3+} 的 ZBLANP 玻璃中观察到宏观净制冷现象,光制冷技术正式登上舞台。

随着后续材料制备和光学结构设计的不断优化,高纯度 Yb^{3+} 掺杂氟化物晶体推动最低制冷温度不断降低,使固体光制冷逐步进入低温学温区,其制冷

能力开始具备冷却外部载荷的潜力^[17-22]。低温光学制冷器并非单一制冷材料,而是由光制冷晶体、泵浦吸收增强腔、热链接、冷指、目标载荷以及热屏蔽结构共同组成的全固态制冷系统,如图2所示。2018 年, M. P. Hehlen 等^[3]首次演示了全固态光学低温制冷器,将 HgCdTe 红外传感器冷却至 135 K。J. L. Kock 等^[23]在此基础上进一步优化光学制冷器结构,将外部载荷冷却至 125 K 以下,推动了低温光学制冷器向更低温度和实际载荷冷却方向发展。

近年来,围绕光制冷材料、泵浦吸收增强及热管理等方向的研究不断推进,固体光制冷已逐步由冷却材料自身向外部载荷冷却和完整制冷器构建发展。在关注光制冷物理机制和材料自身降温性能的基础上,低温光学制冷器还需要进一步考虑制冷功率向外部载荷的有效传递,以及低温泵浦吸收、热链接冷量传递、荧光隔离、寄生热负载和系统集成等问题。因此,本文以低温光学制冷器为综述对象,围绕其从材料冷却向器件级载荷冷却的发展过程,从光制冷材料、低温泵浦吸收增强、光热管理及系统集成等方面总结研究进展,并分析当前制约载荷端有效制冷能力的主要问题。

1 固体光制冷的物理机制

1.1 传统反斯托克斯荧光制冷基本原理

光制冷的基本原理即反斯托克斯荧光制冷:激光泵浦至材料中,材料通过吸收声子能量后发出更高能量的荧光,从而带走热量,实现净制冷。在稀土离子掺杂固体的光学制冷模型中,最为著名的便是 Sheik-Bahae 和 Epstein 提出的四能级速率方程模

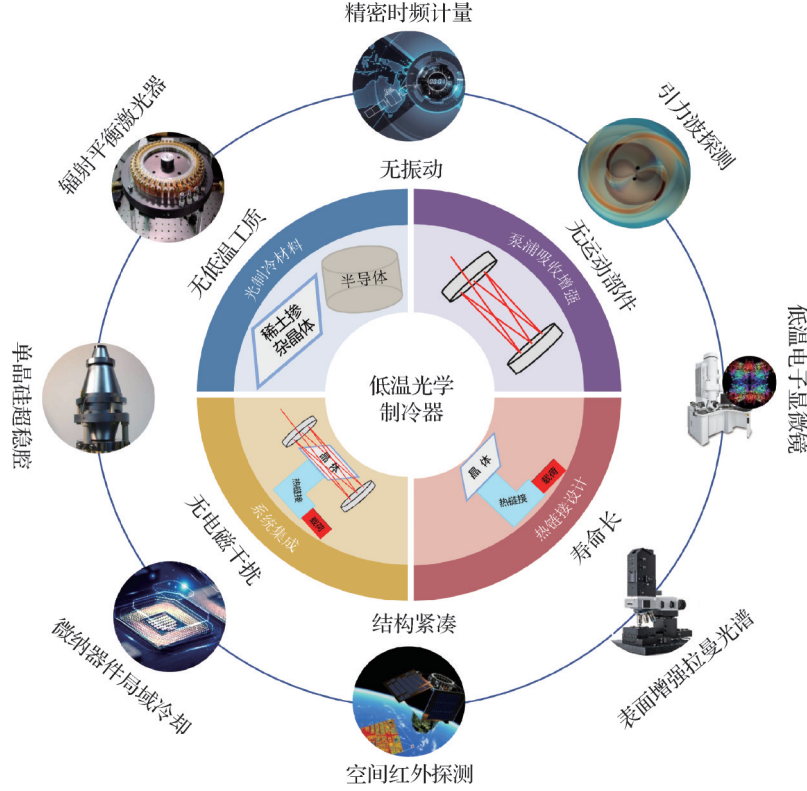


图1 低温光学制冷器的关键技术及应用

Fig.1 Key technologies and applications of optical cryocoolers

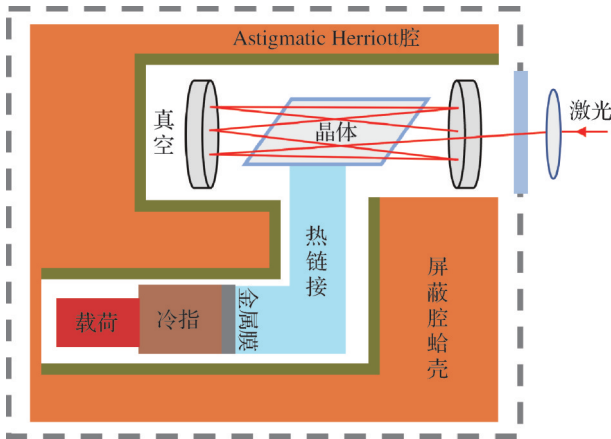


图2 低温光学制冷器结构

Fig.2 Structure of an optical cryocooler

型^[24],其 Stark 能级布居近似服从 Boltzmann 分布,如图3所示。入射激光将处在基态顶部 E_2 的电子抽运至激发态底部 E_3 中。在晶格的振动作用下,受激电子吸收声子的能量并快速完成热弛豫。随后,处在激发态 E_3 、 E_4 的电子自发辐射跃迁至基态 E_1 、 E_2 ,伴随释放出反斯托克斯荧光($\bar{\lambda}_F < \lambda_p$)带走系统中的热量。而处在基态 E_1 的电子同样吸收声子能量与晶格完成热弛豫,形成一个完整的制冷循环。

与稀土离子掺杂材料中的能级跃迁不同,半导体材料光制冷过程可从价带、导带以及载流子—声

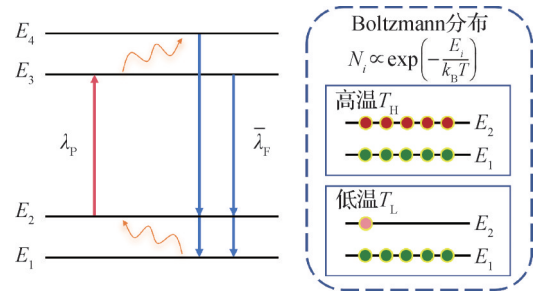


图3 四能级模型及 Boltzmann 分布

Fig.3 Four-levels model and Boltzmann distribution

子相互作用进行描述^[25],其布居由 Fermi-Dirac 统计描述,如图4所示。泵浦光在半导体带边附近被吸收,激发价带电子进入导带并形成电子—空穴对。随后,光生载流子与晶格发生热化并从晶格中获得热能。当电子—空穴发生辐射复合时,发射出平均能量高于泵浦光子的反斯托克斯荧光($\lambda_F < \lambda_p$),从而将晶格热量以光子的形式带出材料。

理想情况下激光制冷的制冷效率 η_c :

$$\eta_c(\lambda_p, T) = \frac{h\nu_F(T) - h\nu_p}{h\nu_p} = \frac{\lambda_p}{\lambda_F(T)} - 1 \quad (1)$$

实际过程需要考虑非辐射损耗和寄生吸收等因素后:

$$\eta_c(\lambda_p, T) = \eta_{\text{ext}} \eta_{\text{abs}}(\lambda_p, T) \frac{\lambda_p}{\lambda_F(T)} - 1 \quad (2)$$

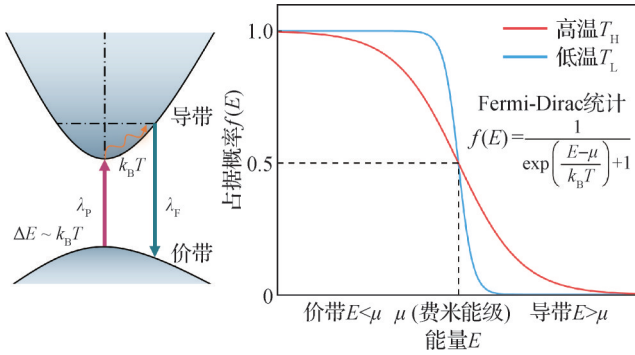


图4 半导体光制冷能带模型及Fermi-Dirac统计示意图

Fig.4 Schematic of the energy-band model and Fermi-Dirac statistics for semiconductor optical refrigeration

从热力学角度来看,泵浦光和荧光可分别以有效辐射温度 T_p 和 T_f 表示。光制冷过程可等效为热机与制冷机串联的热力学过程,其中热机工作在泵浦光有效温度 T_p 与荧光有效温度 T_f 之间,制冷机则工作在样品温度 T 与荧光有效温度 T_f 之间($T_p \gg T_f > T$)。因此,光制冷的理想卡诺制冷系数 κ_c 可表示为:

$$\kappa_c = \frac{T - \Delta T}{T_f - T} \quad (3)$$

$$\Delta T = \frac{T T_f}{T_p} \quad (4)$$

对于理想激光泵浦, $T_p \rightarrow \infty$,则有:

$$\kappa_c = \frac{T}{T_f - T} \quad (5)$$

进一步地,根据热平衡条件下 Boltzmann 分布关系建立荧光有效温度与泵浦光、荧光频率之间的联系后,代入式(3)中即可得到与式(1)相同的理想光制冷效率表达式。

1.2 新型反斯托克斯荧光制冷物理机制

1.2.1 异质结界面电荷转移驱动的光学制冷机制

传统半导体光制冷模型主要依靠反斯托克斯荧光将晶格热量带出材料,对光致发光量子产率、寄生吸收和泵浦波长匹配具有较高要求,限制了其在低发光效率半导体中的实现。针对该问题, Lin Jiamin 等^[26]提出了异质结界面电荷转移驱动的光学制冷机制,通过光生载流子的跨界面输运实现晶格热量的转移。

在具有 II 型能带排列的异质结中,泵浦光被供体层吸收并产生电子-空穴对,光生电子受层间能带偏移驱动向受体层转移。由于该过程受到界面有效能垒和动量失配的限制,电子需要吸收供体层中的晶格声子以完成跨界面转移,从而减少供体层的声子布居并降低其晶格温度。电子进入受体层后,通过非辐射弛豫将所携带的能量释放至受体层,并进一步经衬底传递至外部热沉;异质结界面的热阻

则抑制热量反向传回供体层。随后,载流子经复合返回初始状态,完成“光激发—声子辅助界面电荷转移—受体层放热—载流子复合”的制冷循环。

1.2.2 超辐射相干荧光制冷机制

超辐射相干荧光制冷并未改变传统反斯托克斯光制冷模型中吸收晶格声子并通过辐射带走热量的模式,而是改变了激活离子的辐射方式。传统反斯托克斯荧光由各激活离子彼此独立地自发辐射,其能量释放速度受激发态寿命限制;超辐射则使大量激发离子的跃迁偶极矩通过共同辐射场建立相位关联,并以集体方式发射短时、定向的相干辐射脉冲^[27-29]。这种快速、定向的集体辐射可加快晶格热量输出,并减弱非辐射弛豫和荧光重吸收的影响,从而提高制冷速率,放宽对低声子能量基质的依赖。

在超辐射制冷循环中,特定的连续光或脉冲光首先建立偏离热平衡的激发态布居。当激发离子之间的相干关联在相位弛豫之前形成时,离子以集体方式快速跃迁并发射定向的超辐射脉冲。根据激发方案不同,晶格声子可在红失谐泵浦过程中被吸收,也可在超辐射结束后的能级布居恢复过程中被消耗^[29-30]。通过周期性重复激发、超辐射发射和声子辅助布居恢复,实现连续的降温。

1.2.3 容许跃迁体系中的荧光制冷机制

容许跃迁体系利用满足电偶极选择定则的电子跃迁作为泵浦吸收和荧光发射通道。相比于传统稀土离子 4f-4f 电偶极禁戒跃迁,其跃迁概率和吸收截面更大,可在较短光程内实现更强的泵浦吸收,有利于提高单位体积制冷功率。J. R. Silva 等^[31]在 $\text{Cr}^{3+}:\text{LiSAF}$ 晶体上实现了基于电偶极容许跃迁的激光制冷,该晶体在约 1 μm 泵浦下获得了接近 10% 的制冷效率,表明容许跃迁体系还有望提高固体光制冷效率。

电偶极容许跃迁体系仍遵循传统反斯托克斯荧光制冷的能量循环,主要区别在于能级结构的描述方式。对于局域发光中心,电子基态和电子激发态各自包含一系列振动能级,二者之间的光学跃迁表现为振动-电子跃迁(振电跃迁)。泵浦波长选择在平均荧光波长的长波一侧,并位于吸收带的长波尾部,使发光中心在声子参与下由电子基态跃迁至电子激发态。随后,激发态和基态内部的振动能级通过声子辅助跃迁重新分配布居,体系最终发出平均能量高于泵浦光子的反斯托克斯荧光。整个循环中的净声子吸收使晶格热量随荧光输出,从而实现制冷^[32]。对于直接带隙半导体,相应过程表现为亚带隙泵浦光在声子辅助下产生电子-空穴对,载流子随后发生辐射复合并发出高于泵浦能量的荧光;只有

当缺陷复合、Auger复合、荧光重吸收和寄生吸收等损耗得到充分抑制时,才能实现净制冷^[32-33]。

2 光制冷材料体系

固体光制冷材料主要包括稀土离子掺杂固体和半导体2类。在稀土离子掺杂固体材料中,激活离子的选择是决定制冷性能的核心因素。稀土离子的4f电子受外层轨道屏蔽,电子—声子耦合较弱,辐射量子效率高,因而适合作为光制冷激活离子;其基质材料则需具备低声子能量和高纯度,以抑制多声子非辐射弛豫和寄生背景吸收。相比之下,半导体光制冷依赖带边载流子或激子的辐射复合,材料选择更关注带隙与泵浦波长的匹配、外量子效率、缺陷与界面复合以及带隙以下背景吸收。

稀土离子掺杂固体材料和半导体材料在低温下的粒子布局数有着明显差异。稀土离子的电子态具有局域性,其 Stark 能级布居近似服从 Boltzmann 分布。随着温度降低,参与冷却跃迁的基态高 Stark 能级热布居数(如图2中的 E_2)减小,使共振吸收和制冷功率下降,现有稀土离子掺杂晶体光制冷实验的最低温度已达到 87 K,接近液氮温区^[20]。相比之下,半导体价带在低温下仍保持大量被占据的初始电子

态,其布居由 Fermi-Dirac 统计描述,不会出现与稀土离子高 Stark 能级相同的热退布居现象(如图3),理论上温度可达到 10 K 甚至更低^[25]。需要指出的是,较低的理论温度下限并不意味着半导体材料目前已经实现了比稀土离子材料更低的实验制冷温度。半导体中复杂的非辐射复合、缺陷与表面复合、Auger 复合以及带隙以下寄生吸收等过程,仍是其实现深低温光制冷的主要障碍。

2.1 稀土离子掺杂固体材料

稀土离子掺杂光制冷材料的性能取决于激活离子能级结构、基质声子特性及材料纯度之间匹配关系。如图5(a)所示,根据多声子弛豫的能隙定律,可得到材料筛选判据 $\hbar\omega_{\max} < E_p/8$ 。该判据对应多声子非辐射弛豫通常需要约8个或更多声子参与,此时非辐射弛豫速率显著降低,因此分界线下方的激活离子-基质材料组合更有利于维持较高的量子效率并实现光制冷。图5(b)表明,较窄的基态 Stark 劈裂可减缓低温下高能子能级布居及共振吸收的衰减,从而有助于降低最低可达温度。总体而言,较大的能级间隔、较低的声子能量、较窄的基态 Stark 劈裂及较低的背景吸收,是实现高效低温光制冷的重要条件。

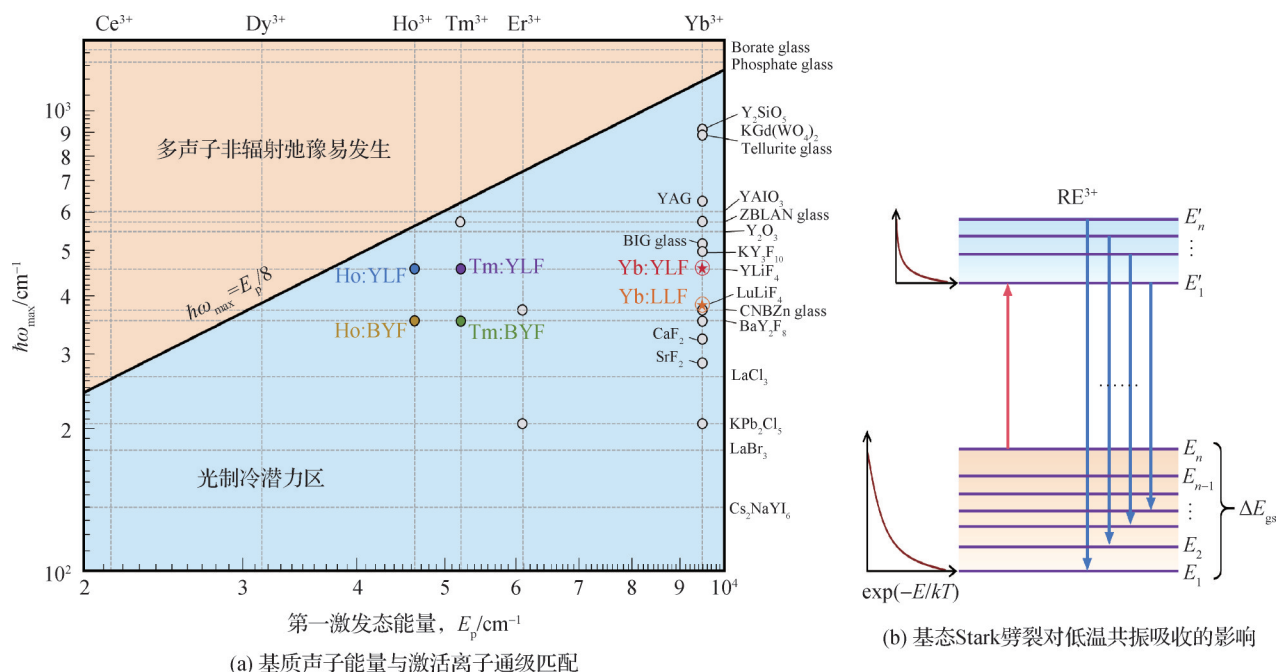


图5 稀土掺杂光制冷材料的基质与激活离子选择准则

Fig.5 Host and activator-ion selection criteria for rare-earth-doped optical refrigeration materials

根据激活离子及其工作波段,现有稀土光制冷材料可分为 Yb^{3+} 掺杂体系和其他稀土离子掺杂体系。前者经过长期发展,已成为低温光学制冷器中成熟的材料基础;后者则主要用于将光制冷波段由 $1\ \mu\text{m}$

附近拓展至 $1.5\ \mu\text{m}$ 、 $2\ \mu\text{m}$ 及更长波段。

2.1.1 Yb^{3+} 掺杂材料体系

Yb^{3+} 仅有一个激发态 $^2\text{F}_{5/2}$ (距基态 $^2\text{F}_{7/2}$ 约 1.2 eV),跃迁波长约为 $1\ \mu\text{m}$,可与高功率、高可靠的固体激光

器匹配,在所有稀土离子中最接近理想二能级系统,是目前研究最充分的激活离子。

Yb^{3+} 掺杂氟化物玻璃是固体光制冷的实验起点。1995年, R. I. Epstein等^[16]在掺 Yb^{3+} :ZBALNP玻璃中观察到净光制冷现象,验证了反斯托克斯荧光制冷在固体材料中的可行性。然而,玻璃的非晶结构会引起较强的非均匀展宽,降低冷却波长附近的峰值吸收能力,使其低温性能受到一定限制。

相比之下, Yb^{3+} 掺杂氟化物晶体具有有序晶格、较窄谱线和低背景吸收等优势,推动固体光制冷进入低温学温区^[34],如图6所示。

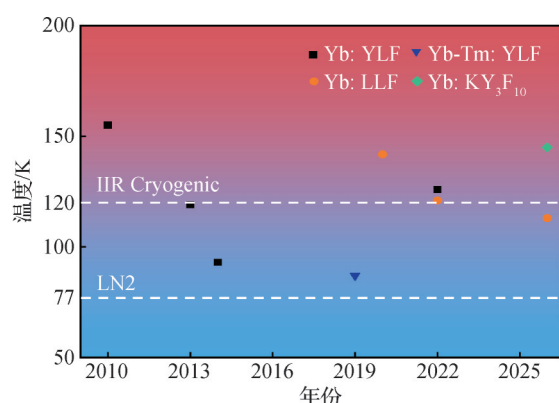


图6 Yb^{3+} 掺杂不同氟化物晶体制冷的最低实验温度进展
Fig.6 Progress in the minimum experimentally achieved temperatures for optical refrigeration of different Yb^{3+} -doped fluoride crystals

Yb^{3+} : YLiF_4 是目前最具代表性的材料,通过提高晶体纯度、优化掺杂浓度和泵浦条件,已实现亚100 K冷却^[17-19,35],并被用于低温光学制冷器及外部载荷冷却演示^[3]。 Yb^{3+} : LuLiF_4 与 YLiF_4 具有相近的晶体结构和光谱特性,也是近年来受到关注的重要候选材料^[21,36-37]; Yb^{3+} : KY_3F_{10} 、 Yb^{3+} : KYF_4 、 Yb^{3+} : KLuF_4 、 Yb^{3+} : CaF_2 及 Yb^{3+} : SrF_2 等其他氟化物晶体则进一步拓展了材料选择范围^[22,38-43]。

Yb^{3+} 掺杂氟化物材料是当前低温光学制冷器的主要材料。其中, Yb^{3+} : YLiF_4 的低温性能和器件化成熟度最高, Yb^{3+} : LuLiF_4 及其他晶体则更多体现为候选材料拓展和性能优化方向。

2.1.2 其他稀土离子掺杂材料体系

除 Yb^{3+} 外, Er^{3+} 、 Tm^{3+} 和 Ho^{3+} 等稀土离子也被用于拓展固体光制冷的工作波段。 Er^{3+} 具有多条可用于光制冷的激发通道,J. Fernandez等^[44]首先在 Er^{3+} : KPb_2Cl_5 晶体和 Er^{3+} :CNBZn玻璃中分别利用870 nm和860 nm泵浦实现了反斯托克斯激光冷却。N. J. Condon等^[45]在 Er^{3+} : KPb_2Cl_5 晶体中通过 $^4\text{I}_{13/2} \rightarrow ^4\text{I}_{15/2}$ 跃

迁观察到了1.5 μm 波段光学制冷,该波段与光通信波段相对应。但 Er^{3+} 能级结构较为复杂,上转换、激发态吸收和多通道弛豫等过程可能增加寄生损耗,因此其净制冷性能和材料成熟度仍低于 Yb^{3+} 体系。

Tm^{3+} 和 Ho^{3+} 的冷却跃迁位于2 μm 附近,是当前长波段光制冷研究的重要方向。较低的跃迁能量在理论上有利于提高单位吸收功率对应的制冷效率,同时可与2 μm 激光源和中红外应用相匹配。此外,对于单晶硅超稳腔等对2 μm 荧光透明的载荷,它对该波段的荧光无明显吸收,因此有望省去专门用于荧光隔离的热链接,简化冷端结构,但该优势仅适用于相应波段透明的载荷^[46]。目前, Tm^{3+} 光制冷已在氟化物玻璃以及 YLiF_4 、 BaY_2F_8 等低声子能晶体中得到验证^[47-50], Ho^{3+} : YLiF_4 也展现出较好的长波段冷却潜力^[46]。但这类材料目前仍受到材料纯度、背景吸收、复杂能级过程以及2 μm 泵浦光源成熟度的限制。

Dy^{3+} 、 Pr^{3+} 、 Nd^{3+} 等具有更低第一激发态能量的稀土离子可进一步将光制冷拓展3 μm 及更长波段,但较小的能级间隔会使得多声子非辐射弛豫更易发生,这就对基质材料的声子能量和纯度有了更高要求。目前,这类稀土离子体系主要处于理论分析和材料筛选阶段。

整体来看, Yb^{3+} 体系已经由材料自身冷却发展至低温光学制冷器演示, Er^{3+} 体系在0.8 μm 和1.5 μm 波段附近实现了光制冷, Tm^{3+} / Ho^{3+} 体系是当前长波段光制冷的重要候选,而更长波段稀土离子体系仍以基础探索为主。

2.1.3 双掺氟化物晶体材料体系

除单一稀土离子掺杂体系外,在同一基质中引入能级结构相匹配的第二种稀土离子,利用离子间能量传递构建附加的声子吸收通道。Dong Guangzong等^[51]从理论上分析 Ho^{3+} / Tm^{3+} 共掺 YLiF_4 中 Ho^{3+} 向 Tm^{3+} 的能量传递可提高制冷效率和制冷功率密度。在 Yb^{3+} / Tm^{3+} 共掺 YLiF_4 中,微量 Tm^{3+} 同样表现出明显的制冷增强作用,该体系曾实现87 K的低温纪录^[20,52]。G. Cittadino等^[53]进一步将10% Yb^{3+} -0.004 0% Tm^{3+} 共掺 YLiF_4 晶体的室温制冷效率提高至4.2%,高于10% Yb^{3+} : YLiF_4 晶体的3.2%。

然而,共掺杂并不一定能够改善制冷性能,其效果取决于离子能级匹配、能量传递方向和相对掺杂浓度。过高的掺杂浓度可能引起上转换、交叉弛豫和浓度淬灭,不合适的杂质离子也会通过非辐射能量传递产生附加热负载;同时,新增荧光波段的重吸收也可能削弱制冷效果^[54]。因此,共掺体系的关键在于选择能够形成声子湮灭过程的离子组合,并优

化掺杂比例,在增强有利能量传递的同时抑制非辐射损耗。

2.2 半导体材料体系

半导体是固体光制冷的另一类重要材料体系。与稀土离子掺杂材料相比,许多直接带隙半导体具有较强的带边吸收,其带隙、载流子态和光学性质还可通过组分调控、异质结构及纳米结构设计进行调节。同时,半导体材料易与电子和光子器件集成,因此在更低温度光制冷、更高制冷功率密度以及微纳器件局域热管理等方面具有潜在优势^[55]。更值得关注的是,半导体材料在低温下不存在稀土离子高 Stark 能级明显热退布居的问题,理论最低可达温度可至 10 K 甚至更低,但该优势目前主要体现为理论潜力,尚未在实验中实现。

半导体光制冷研究主要经历了从传统 III-V 族异质结构、II-VI 族纳米结构到卤化物钙钛矿材料的拓展。早期 GaAs/GaInP 双异质结构曾被认为是重要候选体系,虽然其外量子效率已接近实现光制冷所需水平,但残余带隙以下背景吸收限制了净冷却的实现^[56]。随后,Zhang Jun 等^[57]报道了 CdS 纳米带中的半导体激光冷却,在室温附近实现约 40 K 的净冷却,被认为是半导体光制冷的重要进展。近年来,卤化物钙钛矿由于具有较高光致发光量子效率、较强

激子-声子耦合以及低成本制备优势,也被引入半导体光制冷研究,为新型半导体制冷材料提供了新的选择^[58]。

半导体材料虽在低温潜力、功率密度和器件集成等方面具有独特优势,但其光制冷实现难度明显高于稀土掺杂低声子能晶体,原因在于半导体中存在着更加复杂的载流子复合和寄生吸收过程。非辐射复合以及缺陷、表面和界面复合会降低外量子效率,使吸收的泵浦能量转化为晶格热;Auger 复合则会进一步增加高载流子浓度条件下的非辐射损耗。此外,缺陷态吸收、带隙以下背景吸收和基底吸收均会直接引入寄生热负载,削弱甚至抵消反斯托克斯冷却效应,而实验测温、基底热传导以及局域加热等因素也需要在实验设计上加以考虑^[55,59-60]。因此,未来半导体光制冷的发展需要在现有低维微纳结构基础上进一步增大样品体积,提高制冷功率,同时需解决材料尺寸增加后寄生损耗更加显著的问题,从而推动其向集成化器件应用发展。

综合来看,不同光制冷材料体系在工作波段、最低实验温度、制冷效率及发展成熟度等方面存在明显差异。为进一步对比不同光制冷材料体系的性能,其主要参数及特点总结于表 1。

表 1 不同光制冷材料体系的性能及特点对比

Tab.1 Comparison of the performance and key characteristics of different optical refrigeration material systems

材料体系	代表性材料	工作波长	最低实验温度	代表性制冷效率	主要优势	主要限制
Yb ³⁺ 掺杂 氟化物	Yb:YLiF ₄ 、Yb:LuLiF ₄ 等	约 1 μm	91 K ^[19]	3.2% ^[53] (Yb:YLF)	外量子效率高,材料体系和制备工艺成熟,已实现亚 100 K 冷却及外部载荷制冷	低温下共振吸收弱;对材料纯度和背景吸收要求高
Er ³⁺ 体系	Er:KPh ₂ Cl ₃ 等	约 0.8 μm、1.5 μm	室温附近已实现净冷却 ^[45]	0.38% ^[45]	可将光制冷拓展至 1.5 μm 通信波段	能级结构复杂,上转换、激发态吸收及多通道弛豫易引入寄生损耗
Ho ³⁺ /Tm ³⁺ 体系	Ho:YLiF ₄ 、Tm:YLiF ₄ 、Tm:BaY ₂ F ₈ 等	约 2 μm	室温下已实现净冷却 ^[46,49-50]	5% ^[50] (Tm:BYF)	有利于提高反斯托克斯制冷效率,2 μm 波段过渡金属杂质的吸收弱	2 μm 波段易受水汽及 OH 杂质吸收影响,还受到材料纯度、背景吸收等因素的限制
其他长波稀土离子体系	Dy ³⁺ 、Pr ³⁺ 、Nd ³⁺ 等	约 3 μm 及更长波段	—	—	可将光制冷拓展至 3 μm 及更长波段	能级间隔小,多声子非辐射弛豫更易发生,对基质材料要求更高
稀土离子共掺体系	Yb ³⁺ /Tm ³⁺ :YLiF ₄	约 1 μm	87 K ^[20]	4.2% ^[53]	可通过离子间能量传递增加声子吸收通道,提高制冷性能	对离子组合及掺杂比例敏感,参数不当制冷性能可能低于单掺杂体系
半导体体系	GaAs/GaInP、CdS、卤化物钙钛矿等	可见光—近红外 (取决于半导体带隙)	CdS 纳米带从室温附近实现约 40 K 温降 ^[57]	—	带边吸收强,理论最低可达温度可达到 10 K 甚至更低	非辐射复合、Auger 复合、缺陷态吸收、背景吸收及基底热传导等易产生寄生热负载

注:表 1 中最低实验温度与制冷效率来源于不同样品及实验条件,二者不存在对应关系。不同文献中制冷效率的测试温度、泵浦波长及实验条件存在差异,相关数据主要用于反映各材料体系的代表性实验水平。“—”表示目前缺乏可直接比较的实验数据。

3 增强泵浦吸收

稀土离子基态顶能级对应的共振吸收随晶格温度降低而快速衰减。这意味着随着晶体温度的下降,晶体的吸收功率会大幅度下降,从而影响制冷功率与制冷效率。为补偿低温下的吸收衰减,通常采用多通泵浦或腔增强结构,延长泵浦光在制冷晶体中的有效传播路径,使其多次通过晶体,从而提高泵浦光利用率和有效吸收。

3.1 非谐振腔

非谐振结构通过几何反射使泵浦光多次穿过制冷材料,从而在不依赖相位共振的条件下增加有效光程。在忽略反射损耗及其他附加光学损耗,并认为各次通过晶体时共振吸收系数保持不变的情况下,晶体的吸收功率 P_{abs} 与泵浦功率 P_{in} 之间的关系可近似表示为:

$$P_{\text{abs}} = P_{\text{in}}[1 - \exp(-2N\alpha_r L)] \quad (6)$$

早期研究主要采用端面反射型结构,将泵浦光限制在制冷元件两端的高反射镜之间反复传播,验证了多通吸收在弱吸收光制冷材料中的可行性。此后发展出的Herriott腔利用两片反射镜形成空间分离的多通光路,能够在避免光斑高度重合的同时提高通光次数。其中,像散Herriott腔通过球面镜和柱面镜产生非对称光斑轨迹,可减少泵浦光从输入孔提前泄漏,因而被应用于 $\text{Yb}^{3+}:\text{YLiF}_4$ 低温光学制冷器^[61]。全内反射结构则直接利用泵浦光在晶体内部的多次全反射延长传播路径,不需要外部多通反射腔,但对晶体形状、入射面和入射角的设计要求较高^[62]。

非谐振多通结构不要求严格的腔长和相位匹配,对泵浦波长及系统扰动的适应性强,因而更适合低温光学制冷器的系统集成。其中,像散Herriott腔兼顾了通光次数、泵浦耦合和结构可调性,是目前低温光学制冷样机中典型的泵浦吸收增强方式。

3.2 谐振腔

谐振腔增强吸收方案利用法布里-珀罗(F-P)腔的干涉效应实现吸收增强。当泵浦光满足腔内共振条件时,光场在腔内多次相干叠加,从而显著提高样品对泵浦光的吸收。其核心在于输入耦合镜反射率需要与腔内吸收损耗相匹配,即满足光学阻抗匹配条件。在后镜反射率近似为1时,该条件可表示为^[63] $R_{\text{ic}} = e^{-2\alpha L}$,其中 α 为吸收系数, L 为样品长度;在理想情况下,入射泵浦光可被腔内吸收介质接近完全吸收^[64]。

与依靠几何多通增加有效光程的非谐振腔相比,谐振腔可在满足共振条件和阻抗匹配条件时显著增强腔内光场,从而提高弱吸收材料的泵浦利用率,但其吸收增强效果对腔体参数和材料吸收特性极为敏感。降温过程中,晶体吸收系数 α 随温度降低而减小,使最佳阻抗匹配所要求的输入镜耦合率 R_{ic} 发生变化,并逐渐偏离最佳阻抗匹配条件,需要持续调节激光频率或腔长以维持共振。因此,2类腔体在吸收能力与工程适用性等方面各有特点,二者的主要性能差异如表2所示。

表2 非谐振腔与谐振腔的工程特性对比

Tab.2 Comparison of engineering characteristics between non-resonant cavities and resonant cavities

工程特性	非谐振腔	谐振腔
吸收增强能力	依靠增加通光次数,吸收较强	满足共振和阻抗匹配时可接近完全吸收
结构复杂度	无须严格控制腔长和相位,结构相对简单	需要模式匹配及精确调腔,调节要求较高
低温稳定性	对腔长和泵浦波长变化容忍度较高,易维持稳定	对腔长和共振条件敏感,稳定运行难度较高
系统集成难度	较低,便于与冷端结构集成	较高,需要持续共振调节
工程适用性	工程化低温光学制冷器	弱吸收材料、高增强需求

综合而言,谐振腔适合弱吸收样品或对吸收增强倍数要求较高的实验研究,而非谐振腔在低温稳定性和系统集成方面更具优势,适合低温光学制冷器的系统构建。

4 光热管理

对于低温光学制冷器,光制冷晶体产生的制冷功率并不能全部传递至外部载荷。例如,M. P. Hehlen等^[3]在135 K时估算晶体名义制冷功率约为470 mW,而实际载荷段有效制冷功率仅为8.8 mW,说明载荷端有效制冷能力不仅取决于晶体产生的制冷功率,还受到系统寄生热负载和冷量传递损失的共同影响。在稳态条件下,可将载荷端有效制冷功率 P_{load} 概括表示为:

$$P_{\text{load}} = P_{\text{cool}} - P_{\text{rad}} - P_{\text{cond}} - P_{\text{fl}} \quad (7)$$

4.1 蛤壳腔

随着光制冷向更低温度推进,晶体与室温环境之间的辐射热负载成为制约其进一步降温的重要因素。为减小该寄生热负载,低温光制冷实验会在冷却晶体外围设置紧凑的蛤壳腔,并在高真空条件下进行,使晶体能够达到更低的实验温度^[65]。

此外,蛤壳腔同时承担有对晶体所发射出荧光的吸收作用。其内表面通常要求在荧光波段具有高吸收率,以吸收从晶体逸出的反斯托克斯荧光;同时在热辐射波段保持低发射率,以减小蛤壳自身向冷端产生的辐射热负载。为及时导出吸收的荧光能量,蛤壳主体通常采用铜等高热导材料,并与外部热沉保持良好热连接;在几何上则尽可能紧凑地包围冷端,同时避免与冷却部件直接接触。在低温光学制冷器中,该结构除了包围晶体外,还需进一步覆盖热链接、冷指等冷端组件,在降低外部辐射热负载的同时,减少荧光对冷端组件的照射和吸收^[3,23]。

因此,蛤壳腔并非单纯的机械外壳,而是低温光学制冷器中兼顾荧光吸收与辐射热负载控制的重要热管理部件。

4.2 热链接

热链接是实现晶体自身降温迈向外部载荷冷却的关键部件,它承担着双重功能:一方面,高效传导热量;另一方面,必须有效阻断荧光向载荷端的传输,避免被载荷吸收而产生额外热负载。理想热链接需要在高热导率、低光吸收、低荧光透过率、低界面热阻和低温机械可靠性之间协同设计。

4.2.1 热链接材料

热链接材料的选择需要满足高热导率和低光学吸收。早期研究中采用丙烯酸树脂等材料制作热链接原型,用于验证几何光隔离结构的可行性^[66]。该类材料易加工、便于光学测试,但热导率较低,难以满足实际低温光学制冷器对高效导热的要求,因此更多属于原理验证材料。

蓝宝石因具有高热导率和低光吸收的特点,被认为是热链接的重要材料之一。然而,蓝宝石折射率较高,会改变荧光在热链接中的传播和逸出条件,对光隔离结构设计提出更高要求;同时,蓝宝石与 Yb^{3+} 掺杂氟化物晶体之间存在热膨胀失配,直接键合时容易在低温循环过程中产生界面应力甚至导致连接失效^[3]。因此,蓝宝石虽然导热性能优良,但其应用必须与结构设计和连接方式协同优化。

同质或近同质材料则提供了另一种设计思路。M. P. Hehlen 等^[3]采用未掺杂 YLiF_4 作为热链接材料,主要是考虑到其与 Yb^{3+} 掺杂氟化物晶体具有更好的热膨胀匹配,但 YLiF_4 的热导率较低,使晶体与冷指之间存在超过 6 K 的温差。 MgF_2 在保持与 YLiF_4 较好热膨胀匹配的同时,热导率约为 YLiF_4 的 5 倍。J. L. Kock 等^[23]在此基础上,采用纹理化 MgF_2 热链接替代 YLiF_4 热链接,将晶体与冷指之间的温差降至约 1 K。

4.2.2 热链接结构设计

热链接结构设计的核心是协调热传导与荧光隔离。增大热链接横截面积并缩短传热路径,有利于降低其导热热阻,但会增强荧光向载荷端的直接传输;增加弯折、锥度或曲面结构能够改变荧光传播方向,却增大了传热距离和表面辐射热负载。

现有热链接主要采用半球、弯折波导和锥形波导等结构,通过改变光线入射角或阻断直通光路,使荧光从侧壁逸出。J. Parker 等^[66]的模拟结果表明,当荧光透过率降低至一定程度后,继续增强光学隔离带来的收益有限,环境热辐射和支撑传导将逐渐成为主要热负载。因此,结构优化不能只追求最低荧光透过率,还应控制热链接长度、横截面积和外表面积。

在实际低温光学制冷器中,弯折波导结构能够阻断制冷晶体与载荷之间的直接光路,因而成为较常用的结构形式^[67-68]。此外,在载荷端设置金属反射层,能够进一步阻止残余荧光进入冷指。

4.2.3 键合与连接技术

热链接的材料和结构设计最终需要通过可靠的界面连接实现。低温光学制冷器中存在制冷晶体—热链接、热链接—载荷等多个接触界面,界面热阻会直接影响冷量传递效率。同时,连接层还可能吸收荧光或散射泵浦光,并转化为寄生热负载。因此,连接技术不仅要降低接触热阻,还要兼顾低光吸收和低温机械可靠性。

无胶键合是一种较理想的连接方式。该方法避免了胶层带来的附加热阻和光吸收,适用于同质或热膨胀匹配较好的材料,但对表面平整度和加工质量要求较高,材料失配时易在低温循环中产生界面应力^[3]。低吸收光学环氧树脂则可利用其弹性缓冲异质材料间的热膨胀失配,提高不同材料之间的连接适应性^[69]。但胶层本身会引入附加热阻和潜在光吸收,因此其厚度、吸收系数和低温稳定性需要严格控制。

5 光子态密度优化

光制冷材料即使具有很高的外量子效率,其实际性能仍受到发射光谱分布、荧光提取效率和泵浦吸收不足等因素的限制。通过改变发光中心周围的局域光子态密度,可以改变不同光学过程发生的概率,使有利于光制冷的辐射与吸收过程得到增强。光子态密度优化可增强有利于制冷的辐射发射,提高荧光提取效率,并改善泵浦光吸收,从而提升光制冷性能。

在发射端,光子态密度优化的核心作用是将发射概率更多地分配到有利于制冷的高能辐射模式,该作用方式在半导体材料和稀土掺杂材料中有所差异。对于半导体材料,光子晶体形成的光子带隙可抑制接近带隙能量的低能发射,并提高高能反斯托克斯光子的相对发射比例,从而增加逸出光子的平均能量^[70];同时,通过调节斯托克斯与反斯托克斯拉曼散射对应的光学模式,还可选择性增强反斯托克斯拉曼散射,为直接带隙和间接带隙半导体提供另一种潜在的光制冷途径^[71]。对于稀土掺杂材料,光子态密度优化则主要用于调控发光离子的自发辐射过程,微腔、介质界面和波导结构可通过Purcell效应改变目标荧光波段附近的局域光学模式,提高反斯托克斯跃迁的自发辐射速率。Ju Peng等^[72]研究表明,当Purcell因子达到180时, $\text{Yb}^{3+}:\text{YLiF}_4$ 纳米晶的理论最低可达温度可降至约38 K,表明该方法具有进一步降低稀土掺杂材料最低可达温度的潜力。

在光子传播和逃逸环节,结构优化能够减少荧光在材料内部的俘获与重吸收。高折射率材料中产生的荧光容易受到全内反射限制,在材料内部经历较长传播路径后,可能被发光中心、杂质或其他部件重新吸收,从而削弱制冷能力。减反射膜、表面纹理和刻蚀结构可降低界面反射并扩大光子的逸出通道,提高荧光提取效率^[73]。对于稀土掺杂晶体,样品的尺寸与宏观形貌同样会改变荧光在内部的传播路径和逃逸概率,Zhong Biao等^[74]在 $\text{Yb}^{3+}:\text{LuLiF}_4$ 晶体降温实验中验证了降低几何对称性对改善荧光逃逸的作用,并通过光线追迹模拟表明,该结构有助于荧光的逃逸并降低理论最低可达温度。

在泵浦端,局域共振结构还可用于补偿稀土离子 $4f-4f$ 跃迁吸收截面较低的问题。对于宏观稀土掺杂晶体,合理设计光学腔结构,使泵浦光多次穿过晶体,能够增加有效光程提高泵浦吸收。对于微纳尺度的稀土掺杂结构,则可利用Mie共振在颗粒内部形成局域共振场,使泵浦光在微腔中循环并增强其与发光离子的相互作用^[75]。

总体而言,光子态密度优化有望进一步降低光制冷材料的理论最低可达温度,同时提高泵浦吸收和荧光提取效率,使现有材料获得更好的制冷性能,并为半导体及微纳尺度材料的光制冷提供新的实现途径。现阶段,相关的研究目前仍以理论计算和微纳结构验证为主,实际降温效果缺乏充分的实验支撑。

6 系统集成

低温光学制冷器的系统集成决定了制冷功率向

外部载荷的有效传递及最终制冷性能,该过程需要各功能部件协同工作。泵浦激光经聚焦后进入泵浦吸收增强腔(像散Herriott腔),并多次通过晶体以提高泵浦吸收;晶体产生的冷量通过热链接和冷指传递至目标载荷,金属膜用于反射残余荧光,屏蔽蛤壳、低热导(气凝胶)支撑和真空环境则用于抑制辐射、传导和气体换热等寄生热负载。

M. P. Hehlen等^[3]采用“10% $\text{Yb}^{3+}:\text{YLiF}_4$ 晶体+像散Herriott多通腔+弯折型未掺杂 YLiF_4 热链接+铜冷指”的冷端结构,并结合 SiO_2 气凝胶支撑、低发射率屏蔽蛤壳和真空环境,将 HgCdTe 红外传感器冷却至135 K,但晶体与冷指之间存在超过6 K的温差。J. L. Kock等^[23]在此基础上,将原有未掺杂 YLiF_4 热链接替换为纹理化 MgF_2 热链接,并采用光谱选择性高反射腔镜抑制放大自发辐射和寄生激光,在入射泵浦功率为50 W下将冷指温度进一步降至124.7 K,晶体与冷指之间的温差缩小至1 K,由于无外部载荷,此时晶体的制冷功率用于平衡环境辐射等寄生热负载。虽然上述工作验证了低温光学制冷器冷却外部载荷的可行性,但其有效制冷功率却很低。M. P. Hehlen等^[3]在47 W泵浦功率下,估算了晶体的名义制冷功率约为470 mW@135 K,其中大部分用于抵消环境辐射等寄生热负载,真正用于冷却红外传感器的有效载荷仅为8.8 mW。

针对单块制冷晶体制冷功率有限的问题,可采用并行多晶体结构提高光学制冷器的总制冷功率。该结构将多块冷却晶体连接至同一热链接或冷指,并分别进行泵浦,使各晶体均工作在吸收饱和和寄生激光阈值以下,同时通过多路制冷功率的叠加提高系统总制冷能力。F. Caminati等^[76]构建了由2块 $\text{Yb}^{3+}:\text{YLiF}_4$ 晶体和1块未掺杂 YLiF_4 热链接组成的并行结构,实验获得的温降较单晶体连接负载的结构提高约40%,验证了并行结构提高制冷能力的可行性。需要指出的是,并行结构中晶体数量的增加也会提高反斯托克斯荧光功率,因此需要同步优化晶体间光学隔离和热链接结构,避免新增荧光热负载抵消制冷功率的提升^[77]。

从系统能量利用角度看,反斯托克斯荧光不仅能够将热量从晶体中带出,同时也是一种可回收利用的高品质光能。M. Sheik-Bahae^[78]提出在热端布置与荧光波段匹配的光伏器件,将荧光重新转换为电能并反馈至泵浦激光器,如图7所示。

低温光学制冷器系统的电效率 η_E 可表示为:

$$\eta_E = \eta_{\text{laser}} \eta_{\text{pump}} \eta_c \quad (8)$$

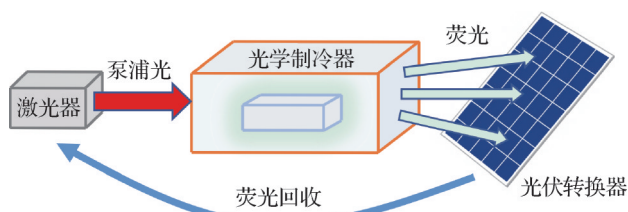


图7 光伏回收荧光系统

Fig.7 Photovoltaic fluorescence-recycling system

假设光伏器件对荧光的捕获与转换效率为 η_{pv} , 则该回收方案可提升系统电效率至:

$$\eta_{E, pv} = \frac{\eta_E}{1 - \eta_{pv}} \quad (9)$$

当 η_{pv} 达到80%时,系统的电效率相比之前可提升至原来的5倍。虽然该理论增益十分可观,但该荧光回收方案目前处于概念设计阶段,尚未有实际的方案。

因此,低温光学制冷器的发展面临着2个关键问题:1)光制冷晶体产生的制冷功率较低;2)辐射、支撑传导、界面热阻及荧光吸收等寄生热负载消耗了大量制冷功率,使得最终传递至外部载荷的有效制冷功率大幅降低。未来需提高晶体的制冷能力,并通过优化热链接与系统热管理,提升载荷端的有效制冷功率。

7 结论

低温光学制冷器是一种基于反斯托克斯荧光效应的全固态制冷技术,其性能受到光制冷材料、泵浦吸收增强结构、热链接设计及系统热管理等因素的共同影响。随着高纯度稀土掺杂晶体制备、非谐振腔和谐振腔增强吸收技术以及热链接结构设计的发展,固体光制冷已从早期材料自身降温逐步发展到外部载荷冷却阶段,并在单晶硅超稳腔等对低温和无振动环境要求较高的外部载荷中展现出重要应用潜力。虽然低温光学制冷器具有无振动、无电磁干扰、结构紧凑和可靠性高等优势,但载荷端有效制冷功率仍然较低,后续研究可从以下几个方面进一步开展:

1)在物理机制方面,除传统稀土离子反斯托克斯荧光制冷外,异质结界面电荷转移、超辐射相干发射及电偶极容许跃迁等新机制进一步拓展了固体光制冷的实现路径。这些新的物理机制为突破传统4f-4f跃迁吸收较弱、制冷功率受限等问题提供了新的研究思路,但其净制冷条件、损耗机制及器件实现仍需进一步研究和验证。

2)光制冷材料方面, Yb^{3+} 掺杂氟化物晶体是当前

低温光学制冷器中最成熟的材料体系,其中 $\text{Yb}^{3+}:\text{YLiF}_4$ 已实现亚100 K冷却并完成器件演示, $\text{Yb}^{3+}:\text{LuLiF}_4$ 、 $\text{Yb}^{3+}:\text{KY}_3\text{F}_{10}$ 等材料则进一步拓展了候选晶体范围。 Er^{3+} 、 Tm^{3+} 、 Ho^{3+} 等长波段稀土体系以及半导体材料体系拓宽了光制冷材料研究方向,但整体处于探索和验证阶段。未来需要进一步提高材料纯度和外量子效率,降低背景吸收及非辐射损耗,从而提高晶体的制冷效率和制冷功率。

3)泵浦吸收增强方面,低温下稀土离子冷却跃迁的共振吸收会随热布居数降低而逐渐减弱,多通泵浦和腔增强结构是提高泵浦吸收功率的重要手段。非谐振多通腔不依赖严格的相位匹配,具有较好的系统集成适用性;谐振腔则具有更强的吸收增强能力,但对腔长、模式匹配和系统稳定性要求较高。未来需根据材料的低温吸收特性优化腔体结构,同时抑制泵浦泄漏、放大自发辐射和寄生激光等非期望光学过程。

4)光热管理方面,蛤壳腔是低温光学制冷器中重要的光热管理部件,热链接则是实现冷却晶体走向冷却载荷的关键部件。热链接材料的热导率、热膨胀匹配、几何结构和表面状态均会影响晶体与载荷之间的温差;界面热阻、连接层光吸收及低温应力则直接影响冷量传递效率和长期可靠性。未来应进一步发展高导热、低吸收且热膨胀匹配良好的热链接材料,并优化无胶键合和异质材料连接工艺。

5)系统集成方面,低温光学制冷器已完成原理样机验证,但受晶体制冷功率和系统寄生热负载限制,载荷端的有效制冷功率仍处于较低水平。未来需要加强制冷晶体、泵浦腔、热链接、冷指、支撑结构和辐射屏蔽之间的协同设计,在提高晶体制冷功率的同时降低系统寄生热负载,从而提升载荷端的有效制冷能力。

6)应用场景方面,低温光学制冷器可为光钟系统的单晶硅超稳腔提供无振动低温环境。单晶硅超稳腔通常工作在约124 K的零热膨胀系数温区,其稳态冷量需求较低,但对机械振动和长期温度稳定性极为敏感,例如对 $\text{Th}:\text{CaF}_2$ 核光钟, 10^{-18} 量级精度要求约5 μK 的温度稳定性,这一严苛的温控需求有望通过无振动制冷的低温光学制冷器实现。空间红外探测方面,低温光学制冷器更适用于热负载较小且对振动、长期可靠性和维护条件要求较高的载荷,未来需要在保持无振动优势的同时进一步提高有效制冷功率,并降低系统体积和功耗,提高长期运行可靠性。此外,固体光制冷还可拓展至辐射平衡激光器、光学悬浮精密测量及引力波探测等应用。

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 (No. E4ASW10601 & No. E5ASD10201).)

符号说明

- N_i ——第 i 个 Stark 子能级上的粒子布局数
 E_i ——第 i 个 Stark 子能级的能量, J
 k_B ——玻尔兹曼常数, J/K
 T ——材料的绝对温度, K
 $f(E)$ ——能量为 E 的电子态被电子占据的概率
 μ ——半导体电子体系的化学势, eV
 η_{ext} ——外量子效率
 η_{abs} ——吸收效率
 λ_p ——泵浦光波长, nm
 λ_F ——荧光波长, nm
 $\bar{\lambda}_F$ ——平均荧光波长, nm
 ν_p ——泵浦光频率, Hz
 ν_F ——荧光频率, Hz
 h ——普朗克常数, J·s
 $\hbar$ ——约化普朗克常数, $\hbar = \frac{h}{2\pi}$, J·s
 ω_{max} ——基质材料的最大声子角频率, rad/s
 E_p ——激活离子第一激发态与基态之间的能量间隔, cm^{-1}
 ΔE_{gs} ——激活离子基态 Stark 子能级的总能量劈裂, cm^{-1}
 N ——激光通过晶体的往返次数
 α_r ——晶体的共振吸收系数, cm^{-1}
 L ——晶体沿光路方向的长度, cm
 P_{cool} ——制冷晶体产生的制冷功率, W
 P_{rad} ——环境辐射产生的寄生热负载, W
 P_{cond} ——支撑传导产生的寄生热负载, W
 P_{fl} ——荧光吸收产生的寄生热负载, W
 η_{laser} ——激光器电光转换效率
 η_{pump} ——泵浦耦合效率

参考文献

- [1] Sheik-Bahae M, Epstein R I. Optical refrigeration [J]. Nature Photonics, 2007, 1(12): 693-699.
- [2] Epstein R I, Sheik-Bahae M. Optical refrigeration: science and applications of laser cooling of solids [M]. Weinheim, Germany: John Wiley & Sons, 2010.
- [3] 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.
- [4] 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.
- [5] Knall J, Engholm M, Boilard T, et al. Radiation-balanced silica fiber laser [J]. Optica, 2021, 8(6): 830.
- [6] Nemova G. Radiation-balanced lasers: history, status, potential [J]. Applied Sciences, 2021, 11(16): 7539.
- [7] 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.
- [8] Chang Haonan, Zhang Jun. Refrigeration technologies of cryogenic chips [J]. Chip, 2023, 2(3): 100054.
- [9] Pringsheim P. Zwei bemerkungen über den unterschied von lumineszenz-und temperaturstrahlung [J]. Zeitschrift für Physik, 1929, 57(11): 739-746.
- [10] Vavilov S. Some remarks on the Stokes law [J]. Journal of Physics(USSR), 1945, 9:68-73.
- [11] Landau L. On the thermodynamics of photoluminescence [J]. Journal of Physics(USSR), 1946, 10:503-506.
- [12] Pringsheim P. Some remarks concerning the difference between luminescence and temperature radiation: anti-Stokes fluorescence [J]. Journal of Physics(USSR), 1946, 10:495-498.
- [13] Vavilov S. Photoluminescence and thermodynamics [J]. Journal of Physics (USSR), 1946, 10:499-501.
- [14] Weinstein M A. Thermodynamic limitation on the conversion of heat into light [J]. Journal of the Optical Society of America, 1960, 50(6): 597.
- [15] Geusic J E, Schulz-DuBios E O, Scovil H E D. Quantum equivalent of the Carnot cycle [J]. Physical Review, 1967, 156(2): 343-351.
- [16] 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.
- [17] Melgaard S D, Seletskiy D V, Di Lieto A, et al. Optical refrigeration progress: cooling below NIST cryogenic temperature of 123K [J]. Laser Refrigeration of Solids VI, 2013, 8638: 863804.
- [18] Melgaard S D, Albrecht A, Hehlen M, et al. Optical refrigeration cools below 100K [C]//CLEO: QELS_Fundamental Science 2014, San Jose, California United States. OSA, 2014: FTh4D.4.
- [19] 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.
- [20] 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.
- [21] Lei Yongqing, Zhong Biao, Yang Tao, et al. Laser cooling of Yb³⁺: LuLiF₄ crystal below cryogenic temperature to 121 K[J]. Applied Physics Letters, 2022, 120(23): 231101.
- [22] Koldeweyh L, Püschel S, Liestmann Z, et al. Solid-state laser cooling of Yb³⁺-doped KY₃F₁₀ to 145 K[J]. Journal of the Optical Society of America B, 2026, 43(8): 1719.
- [23] 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.
- [24] 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.
- [25] Sheik-Bahae M, Epstein R I. Can laser light cool semiconductors? [J]. Physical Review Letters, 2004, 92(24): 247403.
- [26] Lin Jiamin, Xiang Baixu, Liu Renguang, et al. Optical cooling by interfacial charge transfer in 2D heterostructures [J]. Nature, 2026, 655(8122): 342–349.
- [27] Andrianov S, Samartsev V. Optical superradiation and laser cooling[J]. Laser Physics, 1997, 7(2): 314–317.
- [28] Bashkirov E K. Dynamics of phonon mode in superradiance regime of laser cooling of crystals [J]. Physics Letters A, 2005, 341(1–4): 345–351.
- [29] Nemova G, Kashyap R. Alternative technique for laser cooling with superradiance[J]. Physical Review A, 2011, 83: 013404.
- [30] Dong Guangzong, Zhang Xinlu, Cui Jinhui. Double-pulse excitation scheme for laser cooling of solids in the superradiance regime[J]. Journal of the Optical Society of America B, 2015, 32(2): 324.
- [31] 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.
- [32] Hehlen M P. Review of condensed matter laser cooling using electric-dipole-allowed transitions [J]. Journal of Luminescence, 2022, 252: 119270.
- [33] Morozov Y V, Zhang Shubin, Janko B, et al. Charge and thermal modeling of a semiconductor-based optical refrigerator [J]. Applied Physics Letters, 2018, 113(18): 181105.
- [34] Melgaard S, Seletskiy D, Sheik-Bahae M, et al. Spectroscopy of Yb-doped YLF crystals for laser cooling [J]. Laser Refrigeration of Solids III, 2010, 7614: 761407.
- [35] Seletskiy D V, Melgaard S D, Sheik-Bahae M, et al. Optical refrigeration breaks the Peltier barrier: cooling Yb: YLF to 155K [C]// Proc. SPIE 7614, Laser Refrigeration of Solids III, 2010: 761403.
- [36] Zhong Biao, Luo Hao, Lei Yongqing, et al. Forward to cryogenic temperature: laser cooling of Yb: LuLiF crystal [J]. Tri-Technology Device Refrigeration (TTDR) II, 2017, 10180: 101800C.
- [37] 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.
- [38] Bowman S R, Mungan C E. New materials for optical cooling[J]. Applied Physics B, 2000, 71(6): 807–811.
- [39] Volpi A, Cittadino G, Di Lieto A, et al. Anti-Stokes cooling of Yb-doped KYF₄ single crystals [J]. Journal of Luminescence, 2018, 203: 670–675.
- [40] Nakayama Y, Harada Y, Kita T. An energy transfer accompanied by phonon absorption in ytterbium-doped yttrium aluminum perovskite for optical refrigeration [J]. Applied Physics Letters, 2020, 117(4): 041104.
- [41] Xia X, Pant A, Zhou X, et al. Hydrothermal synthesis and solid-state laser refrigeration of ytterbium-doped potassium-lutetium-fluoride (KLF) microcrystals [J]. Chemistry of Materials, 2021, 33(12): 4417–24.
- [42] Püschel S, Mauerhoff F, Kränkel C, et al. Laser cooling in Yb: KY₃F₁₀: a comparison with Yb: YLF [J]. Optics Express, 2022, 30(26): 47235.
- [43] Püschel S, Mauerhoff F, Kränkel C, et al. Solid-state laser cooling in Yb: CaF₂ and Yb: SrF₂ by anti-Stokes fluorescence[J]. Optics Letters, 2022, 47(2): 333–336.
- [44] 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.
- [45] Condon N J, Bowman S R, O'Connor S P, et al. Optical cooling in Er³⁺: KPb₂Cl₅ [J]. Optics Express, 2009, 17(7): 5466.
- [46] 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.
- [47] Hoyt C W, Sheik-Bahae M, Epstein R I, et al. Observation of anti-stokes fluorescence cooling in thulium-doped glass[J]. Physical Review Letters, 2000, 85(17): 3600–3603.
- [48] Hoyt C W, Hasselbeck M P, Sheik-Bahae M, et al. Advances in laser cooling of thulium-doped glass [J]. Journal of the Optical Society of America B, 2003, 20(5): 1066.
- [49] Patterson W, Bigotta S, Sheik-Bahae M, et al. Anti-Stokes luminescence cooling of Tm³⁺ doped BaY₂F₈ [J]. Optics Express, 2008, 16(3): 1704–1710.
- [50] Rostami S, Albrecht A R, Volpi A, et al. Tm-doped

- crystals for mid-IR optical cryocoolers and radiation balanced lasers[J]. *Optics Letters*, 2019, 44(6): 1419.
- [51] Dong Guangzong, Zhang Xinlu, Li Li. Energy transfer enhanced laser cooling in Ho^{3+} and Tm^{3+} -codoped lithium yttrium fluoride [J]. *Journal of the Optical Society of America B*, 2013, 30(4): 939.
- [52] Volpi A, Di Lieto A, Tonelli M. Novel approach for solid state cryocoolers[J]. *Optics Express*, 2015, 23(7): 8216.
- [53] Cittadino G, Damiano E, Di Lieto A, et al. First demonstration of optical refrigeration efficiency greater than 4% at room temperature[J]. *Optics Express*, 2020, 28(10): 14476.
- [54] Caminati F, Cittadino G, Damiano E, et al. Loss processes on crystal cooling efficiency[J]. *Optics Express*, 2021, 29(25): 41313.
- [55] Zhang Shubin, Zhukovskiy M, Jankó B, et al. Progress in laser cooling semiconductor nanocrystals and nanostructures [J]. *NPG Asia Materials*, 2019, 11: 54.
- [56] Bender D A, Cederberg J G, Wang Chengao, et al. Development of high quantum efficiency GaAs/GaInP double heterostructures for laser cooling [J]. *Applied Physics Letters*, 2013, 102(25): 252102.
- [57] Zhang Jun, Li Dehui, Chen Renjie, et al. Laser cooling of a semiconductor by 40 kelvin [J]. *Nature*, 2013, 493(7433): 504–508.
- [58] Pokryshkin N S, Mantsevich V N, Timoshenko V Y. Anti-stokes photoluminescence in halide perovskite nanocrystals: from understanding the mechanism towards application in fully solid-state optical cooling[J]. *Nanomaterials*, 2023, 13(12): 1833.
- [59] Ha S T, Shen Chao, Zhang Jun, et al. Laser cooling of organic-inorganic lead halide perovskites [J]. *Nature Photonics*, 2016, 10(2): 115–121.
- [60] 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.
- [61] Gragossian A, Meng Junwei, Ghasemkhani M, et al. Astigmatic Herriott cell for optical refrigeration [J]. *Optical Engineering*, 2017, 56(1): 011110.
- [62] Farfan B G, Gragossian A, Symonds G, et al. Cooling enhancement in optical refrigeration by non-resonant optical cavities [J]. *Tri-Technology Device Refrigeration (TTDR)*, 2016, 9821: 982104.
- [63] Seletskiy D, Hasselbeck M P, Sheik-Bahae M, et al. Cooling of Yb: YLF using cavity enhanced resonant absorption[J]. *Laser Refrigeration of Solids*, 2008, 6907: 69070B.
- [64] Seletskiy D V, Hasselbeck M P, Sheik-Bahae M. Resonant cavity-enhanced absorption for optical refrigeration [J]. *Applied Physics Letters*, 2010, 96(18): 181106.
- [65] 罗昊, 钟标, 雷永清, 等. $\text{Yb}^{3+}:\text{LuLiF}_4$ 晶体激光制冷的热负载管理[J]. *红外与激光工程*, 2018, 47(12): 33–37. (Luo Hao, Zhong Biao, Lei Yongqing, et al. Thermal load management of laser cooling of $\text{Yb}^{3+}:\text{LuLiF}_4$ crystal [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2018, 47(12): 33–37.)
- [66] Parker J, Mar D, Von der Porten S, et al. Thermal links for the implementation of an optical refrigerator [J]. *Journal of Applied Physics*, 2009, 105: 013116.
- [67] Melgaard S D, Trevino J, Seletskiy D V, et al. Novel photon blockade schemes for thermal link applications[J]. *Laser Refrigeration of Solids V*, 2012, 8275: 82750I.
- [68] Melgaard S D, Seletskiy D V, Epstein R I, et al. Device applications of cryogenic optical refrigeration [C]// *Proc. SPIE 9000, Laser Refrigeration of Solids VII*, 2014: 900002.
- [69] Epstein R I, Seletskiy D V, Sheik-Bahae M, et al. Thermal management and design for optical refrigeration [C]// *Optical and Electronic Cooling of Solids*, 2016.
- [70] Khurgin J B. Band gap engineering for laser cooling of semiconductors[J]. *Journal of Applied Physics*, 2006, 100(11): 113116.
- [71] Chen Y C, Bahl G. Raman cooling of solids through photonic density of states engineering[J]. *Optica*, 2015, 2(10): 893.
- [72] Ju Peng, Shen Kunhong, Püschel S, et al. Purcell-enhanced optical refrigeration [J]. *Physical Review Research*, 2026, 8(2): 023149.
- [73] Hassani Nia I, Rezaei M, Brown R, et al. Efficient luminescence extraction strategies and anti-reflective coatings to enhance optical refrigeration of semiconductors [J]. *Journal of Luminescence*, 2016, 170: 841–854.
- [74] 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.
- [75] Nemova G, Caloz C. Mie resonance enhancement of laser cooling of rare- earth doped nanospheres [C]// *OSA Advanced Photonics Congress 2021*. Washington, DC United States. Optica Publishing Group, 2021: IW4A.3.
- [76] Caminati F, Cittadino G, Damiano E, et al. A design for optical refrigeration: the parallel configuration [J]. *Applied Physics Letters*, 2023, 122(2): 021102.
- [77] 张佳宜, 邓联忠, 杨浩东, 等. 并行结构光学制冷器的热链接设计[J/OL]. *制冷学报*, 2026–07–07. <http://www.zhilengxuebao.com/thesisDetails#10.12465/issn.0253-4339>.

20260210001&lang=zh. (Zhang Jiayi, Deng Lianzhong, Yang Haodong, et al. Design of thermal link for parallel-structure optical refrigerators [J/OL]. Journal of Refrigeration, 2026-07-07. <http://www.zhilengxuebao.com/thesisDetails#10.12465/issn.0253-4339.20260210001&lang=zh>.)

- [78] Sheik-Bahae M. GaAs-based cryocoolers for space-borne optical clocks [C]//Photonic Heat Engines: Science and Applications IV. San Francisco, USA. SPIE, 2022: 7.

通信作者简介

钟标,男,研究员,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,010-82543733, E-mail: bzhong@mail.ipc.ac.cn。研究方向:固体材料激光制冷,无振动光制冷技术,低温光学制冷器研究。

About the corresponding author

Zhong Biao, male, research professor, State Key Laboratory of Cryogenic Science and Technology, Technical Institute of Physics and Chemistry, Chinese Academy of Sciences, 86-10-82543733, E-mail: bzhong@mail.ipc.ac.cn. Research fields: solid-state laser cooling, vibration-free optical refrigeration technology and optical cryocoolers.