

## 激光与光电子学进展

## 中红外激光器研究进展

程乃俊<sup>1,2,3,4</sup>, 李惟帆<sup>2,3,4</sup>, 祁峰<sup>1,2,3,4\*</sup><sup>1</sup>沈阳航空航天大学电子信息工程学院, 辽宁 沈阳 110136;<sup>2</sup>中国科学院沈阳自动化研究所光电信息处理重点实验室, 辽宁 沈阳 110169;<sup>3</sup>辽宁省太赫兹成像感知重点实验室, 辽宁 沈阳 110169;<sup>4</sup>中国科学院机器人与智能制造创新研究院, 辽宁 沈阳 110169

**摘要** 中红外波段在基础科学、生物医学、环境监测、军事国防、安检安防、通信娱乐等诸多领域都有极其重要的应用。作为中红外技术的核心组成部分,覆盖宽光谱范围、高能量、高转换效率、小型化、室温运转的高性能中红外相干辐射源始终是科研与应用领域的研究重点与热点。目前中红外激光器种类有很多,根据不同的产生原理,中红外激光器主要分为化学激光器、气体激光器、基于稀土或过渡金属离子掺杂的激光器、量子级联半导体激光器、基于非线性频率变换的激光器。重点综述这几种激光器的特点及发展历程,并对其研究前景进行展望。

**关键词** 中红外激光; 化学激光器; 气体激光器; 稀土或过渡金属掺杂激光器; 量子级联; 非线性频率变换

中图分类号 TN248

文献标志码 A

DOI: 10.3788/L0P220922

## Progress of Mid-Infrared Laser

Cheng Naijun<sup>1,2,3,4</sup>, Li Weifan<sup>2,3,4</sup>, Qi Feng<sup>1,2,3,4\*</sup><sup>1</sup>School of Electronic Information Engineering, Shenyang Aerospace University,  
Shenyang 110136, Liaoning, China;<sup>2</sup>Key Laboratory of Opto-Electronic Information Processing, Shenyang Institute of Automation, Chinese Academy  
of Sciences, Shenyang 110169, Liaoning, China;<sup>3</sup>Key Laboratory of Liaoning Province in Terahertz Imaging and Sensing, Shenyang 110169, Liaoning, China;<sup>4</sup>Institutes for Robotics and Intelligent Manufacturing, Chinese Academy of Sciences,  
Shenyang 110169, Liaoning, China

**Abstract** The mid-infrared band has broad applications, such as fundamental science, biomedicine, environmental testing, national defense, security, communications, and entertainment. As the core component of mid-infrared technology, a high-performance mid-infrared coherent radiation source with a wide spectral range, high energy, high conversion efficiency, miniaturization, and room-temperature operation has been a research focus in scientific research and application. There are many types of mid-infrared lasers. According to different generation principles, mid-infrared lasers are mainly divided into chemical lasers, gas lasers, and lasers based on rare earth or transition metal ion doping, quantum cascade semiconductor lasers, and lasers based on nonlinear frequency conversion. This paper focuses on the characteristics and development of these lasers and discusses their research prospects.

**Key words** mid-infrared laser; chemical laser; gas laser; rare earth or transition metal doped laser; quantum cascade; nonlinear frequency transformation

## 1 引言

自从第一台激光器于 1960 年问世以来,中红外波

段的激光辐射源也在快速发展,随着该波段辐射源的研究不断与其他学科交叉融合发展,其在国防、娱乐、环境监测以及医疗诊断等诸多领域<sup>[1-2]</sup>已有广泛应用,

收稿日期: 2022-02-08; 修回日期: 2022-03-31; 录用日期: 2022-06-13; 网络首发日期: 2022-06-23

基金项目: 中国科学院机器人与智能制造创新研究院自主项目(C2019001)、辽宁省“兴辽英才计划”(XLYC2007074)、沈阳市中青年科技创新人才支持计划(RC200512)

通信作者: \*qifeng@sia.cn

中红外激光器已经成为国内外科学研究的重中之重。

伴随着材料科学和激光技术的飞速进步,中红外波段相干辐射源的性能也逐渐提高,相应的中红外技术也取得了快速发展。根据不同的原理,中红外激光器有不同的种类:利用掺杂离子直接发射的方式能实现高功率、超短脉冲、窄线宽激光输出的激光器<sup>[3]</sup>;以光参量振荡和差频为主的非线性频率变换技术能实现宽调谐、小型化的中红外激光输出的激光器;还有在红外对抗、毒品和爆炸物检测、环境污染监测等方向有广泛的应用前景、且输出波长丰富的量子级联半导体激光器;能实现超大功率输出的化学激光器;结构简单、成本低、操作舒适、工质均匀、光束质量好、能长期运行稳定的气体激光器。每一种激光器的技术方案都有很强的专业性,涉及多个学科,如材料科学、激光工程、半导体物理、非线性光学、光谱学等,根据不同的应用需求以上各类由不同学科构成的中红外激光器都发挥着重要作用。

中红外激光的波长范围在不同领域有不同的划分,例如:在军事领域限定为 $3\sim 10\ \mu\text{m}$ ;在天文领域一般限定为 $5\sim 40\ \mu\text{m}$ ;在激光领域一般限定为 $2\sim 5\ \mu\text{m}$ ;按照整个红外光谱范围一般又将中红外波长限定为 $2.5\sim 25\ \mu\text{m}$ ;本文所综述的研究进展,其波段涵盖了 $1.5\sim 24\ \mu\text{m}$ 。不同激光器的输出波长范围、转换效率及功率各有不同,从不同激光器的原理及特点出发,回顾每种激光器的发展历程,并展望其发展前景。

## 2 中红外化学激光器

中红外化学激光器的优点是具有超高的功率,主要用于军事、光学武器等领域。化学激光器的基本原理是利用化学反应释放的能量,使物质原子产生相应的激发,实现粒子数的反转,最终实现激光输出。目前,常见的化学激光器有氟化氢(HF)、氟化氘(DF)、溴化氢(HBr)、氯化氢(HCl)等,可以实现 $2.7\ \mu\text{m}$ 、 $3.8\ \mu\text{m}$ 和 $4.3\ \mu\text{m}$ 左右的中红外输出<sup>[4-5]</sup>。

HF化学激光器是通过 $\text{D}_2$ 和过量的 $\text{F}_2$ 在燃烧室中反应后,生成的 $\text{F}$ 、 $\text{F}_2$ 、DF和稀释He组成高温混合气体,经喷嘴管进入光腔后,再与He以及 $\text{H}_2$ 混合,整个过程发生泵浦反应、能量转移反应、解离复合反应。1969年,Spencer等将气动技术引入化学激光器,研制了首个连续发射的HF激光器,其采用燃烧驱动和超音速混合技术。燃烧驱动连续波化学激光器的结构如图1所示<sup>[6]</sup>。通过一个超声速混合喷口将投入的氧化剂和燃料混合到光腔中,使反应产物HF处于振动激发态,以此实现受激辐射反转,该激光器能激射出波长范围在 $2.7\sim 3.1\ \mu\text{m}$ 的中红外激光。

电激励连续波HF/DF化学激光器主要由激光器核心组件和辅助系统组成,激光器核心组件包括放电管、主体、光腔、热交换管,辅助系统包括高压直流电源系统、气源及流量控制系统、水冷系统、真空系统,整个

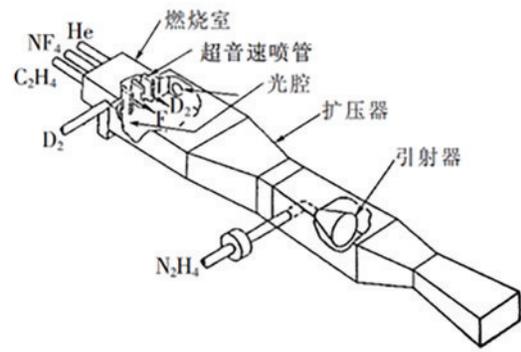


图1 燃烧驱动连续波HF/DF化学激光器的结构图<sup>[6]</sup>

Fig. 1 Structure diagram of combustion-driven continuous wave HF/DF chemical laser<sup>[6]</sup>

系统的结构如图2所示。1975年,Fradin等<sup>[7]</sup>采用电激励技术,利用特定的物质来吸收放电反应生成物,在频率为 $10\ \text{Hz}$ 时,输出DF激光功率为 $0.13\ \text{W}$ ,这是首台封闭可循环的HF/DF化学激光器。2003年,王红岩等<sup>[8]</sup>使用原始的电激励HF/DF激光器结构,并以低廉的 $\text{Cl}_2$ 为燃料,利用 $\text{H}+\text{Cl}_2$ 和 $\text{H}+\text{ClF}$ 的泵浦反应获得功率为 $10\ \text{W}$ 、波长约为 $3.8\ \mu\text{m}$ 的HCl中红外激光,又利用 $\text{F}-\text{ClF}-\text{H}_2$ 泵浦反应获得了功率为 $12\ \text{W}$ 的HF-HCl两波段激光。

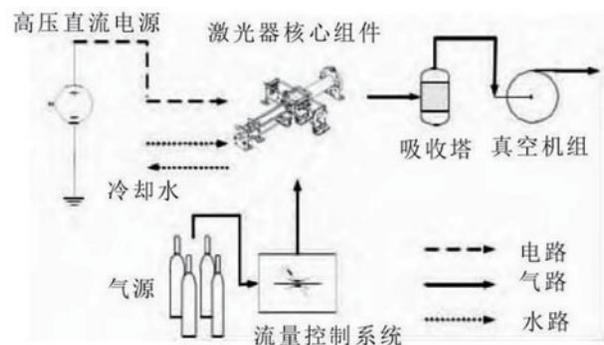
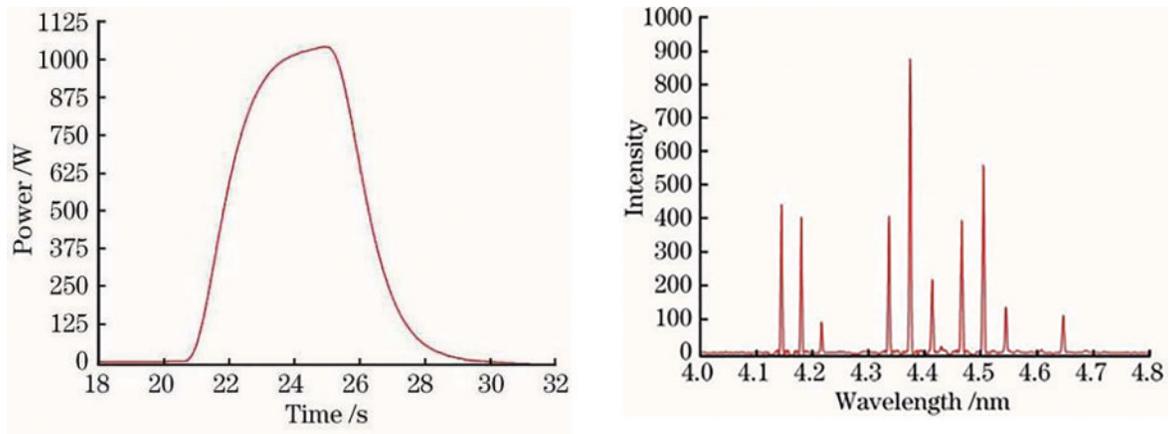


图2 电激励化学激光器的系统组成<sup>[6]</sup>

Fig. 2 System composition of an electrically excited chemical laser<sup>[6]</sup>

2019年,黄超等<sup>[9]</sup>利用自动式紫外预电离和对称Chang氏电极结构,制备了闭环的非链式重复频率HF激光器。该激光器在特定条件下,利用摩尔分数分别为92%的 $\text{SF}_6$ 和8%的 $\text{C}_2\text{H}_6$ 混合气体,使中红外激光输出重复频率为 $150\ \text{Hz}$ 、平均功率为 $200\ \text{W}$ 。

2020年,中国科学院大连化学物理研究所<sup>[10]</sup>研制的燃烧驱动HBr化学激光器第一次实现了 $1000\ \text{W}$ 级别的连续波激光输出,如图3所示。该成果大大高于同波段固态激光器的功率水平,刷新了 $4.0\sim 5.0\ \mu\text{m}$ 波段HBr激光输出功率的国际最好记录,因其具有超高功率,该激光器能作为长波中红外的高能激光光源。其原理是利用 $\text{NF}_3$ 和 $\text{D}_2$ 高温燃烧产生F原子;F原子与 $\text{H}_2$ 发生反应,产生振动激发态的HF和H原子;H原子与 $\text{Br}_2$ 发生反应,产生振动激发态的HBr,HBr受激

图3 HBr激光器的输出波长与功率曲线<sup>[10]</sup>Fig. 3 HBr laser output spectrum and laser output power curve<sup>[10]</sup>

辐射发出 3.8~4.7  $\mu\text{m}$  的中红外激光。

虽然化学激光器具有超高功率的优点,但化学激光器须在极低的腔体压力中工作,目前很难利用现有的科技水平使废物气体的压强在低于一个大气压强下排到空气中。此外,化学激光器的原料为化学物质,制备条件苛刻,且含有剧毒并污染环境,给研究者与应用方造成了很大困难,因此各国研究及应用方都在积极寻找替代光源。虽然,目前化学激光器由于自身劣势有被其他激光系统取代的可能性,但是其在中红外波长 2~5  $\mu\text{m}$  波段范围内极高功率的优势依然明显。

### 3 中红外气体激光器

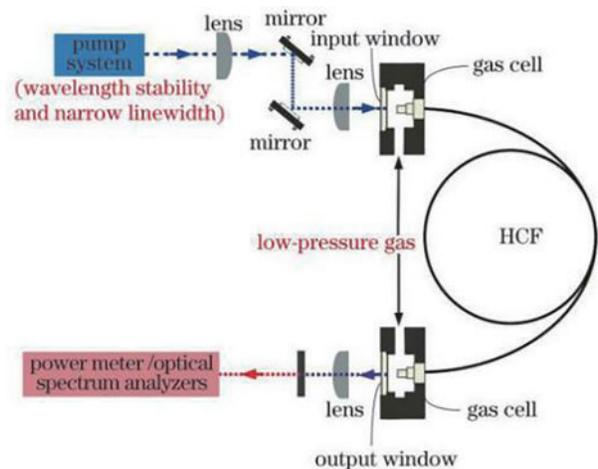
气体激光器主要利用气体或蒸汽作为工作介质来产生激光,该激光器利用特定刺激下电子的碰撞和能量转移,使气体粒子达到高能级,形成粒子数的反转,并产生受激辐射跃迁。气体激光器具有结构简单、成本低、操作舒适、工质均匀、光束质量好、长期运行稳定等优点。根据不同的气体,其能在不同的波长范围内激光出激光。

在 20 世纪 70 年代,中红外气体激光器开始兴起。1972 年,贝尔实验室<sup>[11]</sup>制备了首台中红外气体激光器,利用 HBr 化学激光器作为泵浦源、 $\text{CO}_2$  气体作为介质,实现了最大功率为 80 W、波长为 10.6  $\mu\text{m}$  的中红外激光输出。在 1990 年以后,美国众多研究单位<sup>[12]</sup>报道了大量关于 CO 与 HX 等气体的中红外激光器,包括有 DF、HCL、HF、HBr、CO 等气体激光器,实现了 2~5  $\mu\text{m}$  波段的中红外激光输出。在 2004 年,Kletecka 等<sup>[13]</sup>使用输出波长为 1.34  $\mu\text{m}$  的 Nd:YAG 固体激光器通过级联跃迁的方式泵浦 HBr 气体,实现了 4  $\mu\text{m}$  的中红外激光输出。2014 年,Koen 等<sup>[14]</sup>报道了 Ho 泵浦的 HBr 气体激光器,其利用内腔闪耀光栅输出了波长范围为 3.87~4.45  $\mu\text{m}$  的中红外激光,并在 4.133  $\mu\text{m}$  处获得了 2.4 mJ 的单脉冲能量输出。

虽然传统气体激光器在结构和稳定运行等方面有优势,但其系统笨重且庞大,激光转换效率受气穴作用

距离的限制,纯粹的气体激光器已不再是当前激光器领域研究的热点。近年来,空芯光纤(Hollow-core fiber, HCF)的出现为光与气体相互作用创造了理想条件,促进了气体激光器的发展,为传统光纤激光器在提高性能和扩展波长范围等方面的技术瓶颈提供了一个非常有希望的解决方案<sup>[15-16]</sup>。气体激光器的原理主要是粒子数反转和受激拉曼散射,基于粒子数反转的光纤气体激光器通过气体分子振动能量的内部吸收变化来实现激光输出,由于大多数气体分子的振动能级所对应的激光跃迁光谱位于中红外波段,因此该激光器的波长范围大部分在中红外波段。

目前,基于粒子数反转的光纤气体激光器实验系统基本上采用单向结构,如图 4 所示。泵浦光通过常规光学元件与封装在气穴中的 HCF 耦合。HCF 通过空气室吸入,以补充输送介质所需的空气压力。

图4 基于粒子数反转的光纤气体激光器示意图<sup>[16]</sup>Fig. 4 Diagram of fiber gas laser based on population inversion<sup>[16]</sup>

基于粒子数反转的光纤气体激光器自发布以来吸引了大量的关注<sup>[17]</sup>。近年来,因其在实现中红外波段激光输出方面拥有潜在的巨大优势,且随着中红外波

段低输送耗损的抗共振空芯光纤迅速发展,相关的研究报道也逐渐增多,目前基于 HCF 的常见气体激光研

究结果,如表 1 所示。

表 1 常见气体的 HCF 激光源研究进展<sup>[16]</sup>

Table 1 Research progress of HCF based on population inversion<sup>[16]</sup>

Pump source	Pump wavelength /nm	Gas gain medium	Laser wavelength / $\mu\text{m}$	Maximum laser energy or power	Efficiency /%
OPO	1521	$\text{C}_2\text{H}_2$	3.12, 3.16	6 nJ	1
OPO	1521	$\text{C}_2\text{H}_2$	3.12, 3.16	600 nJ	27
OPA	1532.8	$\text{C}_2\text{H}_2$	3.11, 3.17	550 nJ	20
OPA	1530	$\text{C}_2\text{H}_2$	3.11, 3.17	1.41 $\mu\text{J}$	20
Diode laser	1530	$\text{C}_2\text{H}_2$	3.12, 3.16	0.8 nJ	30
Diode laser	1530	$\text{C}_2\text{H}_2$	3.08–3.18	2.5 mW	6.7
Diode laser	1530	$\text{C}_2\text{H}_2$	3.12, 3.16	1.12 W	33.2
Diode laser	1530–1535	$\text{C}_2\text{H}_2$	3.09–3.21	0.6 $\mu\text{J}$ 0.77 W(CW)	16 13
OPO	2002.5	$\text{CO}_2$	4.30, 4.37	100 $\mu\text{J}$	20
TDFA	2000.6	$\text{CO}_2$	4.30, 4.39	80 mW	19.3
OPA	1541.3	HCN	3.09, 3.15	56 nJ	0.02
Nd:Vanadate	532	$\text{I}_2$	1.31, 1.33	8 mW	4
OPO	1517	$\text{N}_2\text{O}$	4.59, 4.66	150 nJ	9
Electrodes		He:Xe(5:1)	3.11, 3.37, 3.51		

作为代表性进展,在 2011 年, Jones 等<sup>[18]</sup>第一次利用一个脉宽为 5 ns、中心波长为 1.52  $\mu\text{m}$  的光学参量振荡器作为脉冲泵浦源,泵浦一段充有低气压  $\text{C}_2\text{H}_2$  气体的空芯橡胶光纤,放射出波长为 3.12  $\mu\text{m}$  和 3.16  $\mu\text{m}$  的中红外激光。2016 年,在 Jones 工作的基础上, Hassan 等<sup>[19]</sup>利用 HCF 截面形成反馈结构,第一次实现

了环形腔光纤  $\text{C}_2\text{H}_2$  气体激光器波长为 3  $\mu\text{m}$  的中红外输出。2017 年, Xu 等<sup>[20]</sup>基于 10 W 掺  $\text{Er}^{3+}$  光纤放大器的 1.5  $\mu\text{m}$  半导体激光器首次利用单程光纤  $\text{C}_2\text{H}_2$  气体激光器实现了瓦级别的 3.12  $\mu\text{m}$  和 3.16  $\mu\text{m}$  的连续输出,实验系统和结果如图 5 所示。

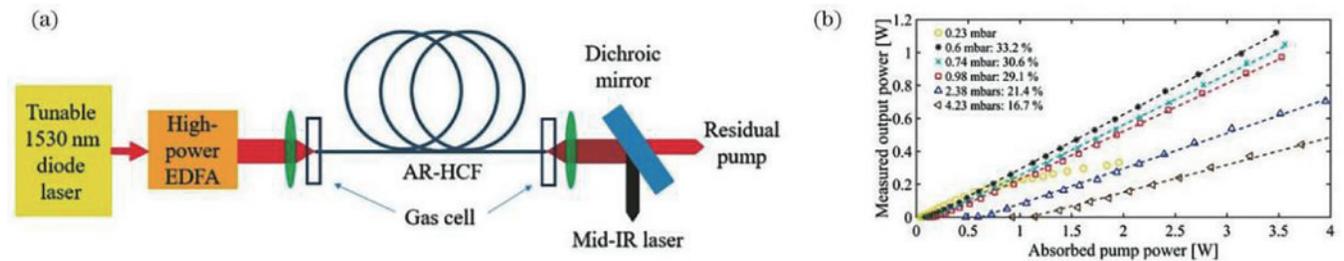


图 5 单程光纤  $\text{C}_2\text{H}_2$  气体连续激光输出实验<sup>[20]</sup>。(a) 实验装置图;(b) 不同气压下输出激光功率随吸收的泵浦功率的变化

Fig. 5 Single-pass configuration experiment of fiber acetylene gas CW laser output<sup>[20]</sup>. (a) Diagram of experimental setup; (b) output laser power as a function of absorbed pump powers at different pressures

2012 年, Nampoothiri 等<sup>[21]</sup>利用脉宽为 5 ns、最大输出能量为 1 mJ、波长为 2002.5 nm 的光参量振荡器(OPO)泵浦源,成功实现了基于镀银毛细玻璃管且转换效率达 20% 的 4.3  $\mu\text{m}$  和 4.37  $\mu\text{m}$   $\text{CO}_2$  中红外激光输出,实验系统及输出光谱如图 6 所示。2019 年,崔宇龙研究小组又报道了一种基于 HCF 的  $\text{CO}_2$  气体激光器,使用自行研制的掺  $\text{Tm}^{3+}$  光纤放大的可调谐窄线宽 2  $\mu\text{m}$  激光二极管为泵浦源,第一次实现了最大输出功率约为 80 mW,激光斜率效率约为 9.3% 的 4  $\mu\text{m}$  以上连续的中红外激光输出。

2020 年国防科技大学王泽锋课题组<sup>[23]</sup>将 HBr 充

入 HCF 中,以 2  $\mu\text{m}$  掺  $\text{Tm}^{3+}$  光纤激光器泵浦 HCF 中低压的 HBr,实现了中心波长为 4  $\mu\text{m}$  的激光输出,其最大输出功率为 125 mW,转换效率达 10%。为了提高气体光纤激光器的输出功率,2022 年,国防科技大学黄威等<sup>[24]</sup>报道了在突破高功率泵浦激光高效稳定耦合关键技术的基础上,使用一段长约为 8 m、充有 300 Pa  $\text{C}_2\text{H}_2$  的 HCF,实现了 4.5 W 的 3.1  $\mu\text{m}$  波段中红外激光输出,这是目前国内外报道的此类激光器的最高输出功率,总光光转换效率约为 14%,如图 7 所示。该实验表明光纤气体激光器具备实现高功率中红外光纤激光输出的潜力。除了上述气体外,还有基于 HCN<sup>[25]</sup>、

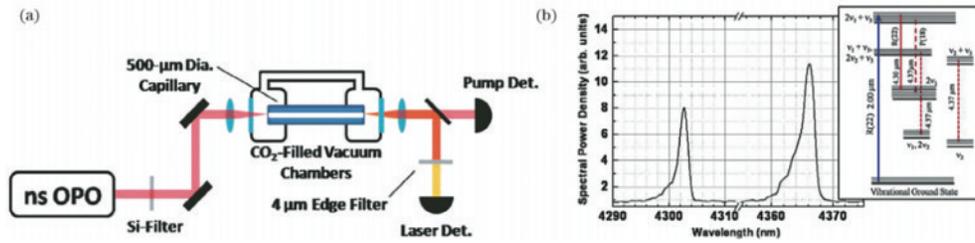


图 6 OPO 泵浦充 CO<sub>2</sub> 镀银毛细管实验<sup>[21]</sup>。(a) 实验装置 (b) 输出光谱及能级跃迁原理

Fig. 6 Experiment of OPO pumping CO<sub>2</sub>-filled silver plating capillary<sup>[21]</sup>. (a) Diagram of experimental setup; (b) output spectrum and energy level transition principle

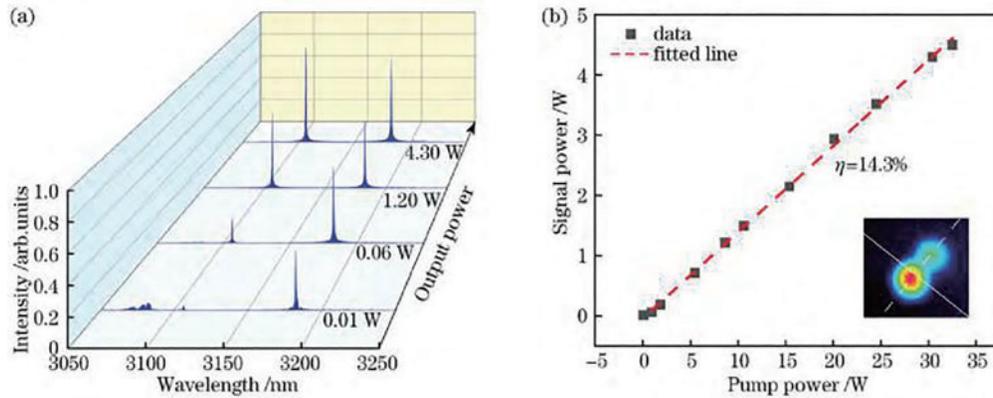


图 7 光纤 C<sub>2</sub>H<sub>2</sub> 气体激光器的输出特性<sup>[24]</sup>。(a) 300 Pa 气压时不同信号功率下激光器输出光谱; (b) 300 Pa 气压下信号功率随泵浦功率的变化曲线, 插图为输出光场

Fig. 7 Output characteristics of fiber acetylene gas laser<sup>[24]</sup>. (a) Laser output spectra under different signal powers at 300 Pa pressure; (b) signal power versus pump power at 300 Pa pressure with output light field shown in inset

N<sub>2</sub>O<sup>[26]</sup> 等中红外光纤气体激光器和基于碘蒸气<sup>[27]</sup> 以及基于稀有气体<sup>[28]</sup> 的近红外光纤气体激光器的报道。

虽然中红外 HCF 气体激光器结合了气体与光纤激光器的优点, 能在中红外波段实现高性能激光输出, 但作为一种新兴的气体激光器, 其正处于一个非常初级的发展阶段, 许多关键技术和基础物理问题还需进一步研究和解决。未来光纤气体激光器将是实现高功率中红外激光输出的有效手段, 可以解决传统中红外光纤激光器在功率提升和波长拓展方面遇到的技术瓶颈。

#### 4 基于稀土离子或其他金属离子掺杂的激光器

该类激光器的核心思想是通过在激光晶体中掺杂

其他杂质, 使激光晶体的能级结构发生改变, 杂质作为增益介质的一部分实现中红外输出, 与其他类型激光器相比, 该类激光器具有很高的转换效率。目前主要的掺杂杂质为稀土离子 (Tm<sup>3+</sup>, Ho<sup>3+</sup>, Er<sup>3+</sup>) 及过渡金属 (Cr<sup>2+</sup>, Fe<sup>2+</sup>)。

目前掺杂稀土离子所产生的中红外波长分别集中在 1.5、2、2.8 μm 左右, 所掺杂的主要稀土离子也集中为 Tm<sup>3+</sup>、Ho<sup>3+</sup>、Er<sup>3+</sup>, 这 3 种稀土离子的能级跃迁示意图<sup>[29]</sup> 如图 8 所示。

##### 4.1 掺 Tm<sup>3+</sup> 激光器

Tm<sup>3+</sup> 在 2 μm 附近有 200 nm 的发射谱宽度, 非常有利于实现激光波长的连续调谐和超短脉冲输出。高功率掺 Tm<sup>3+</sup> 固体激光器增益介质材料有石榴石系列

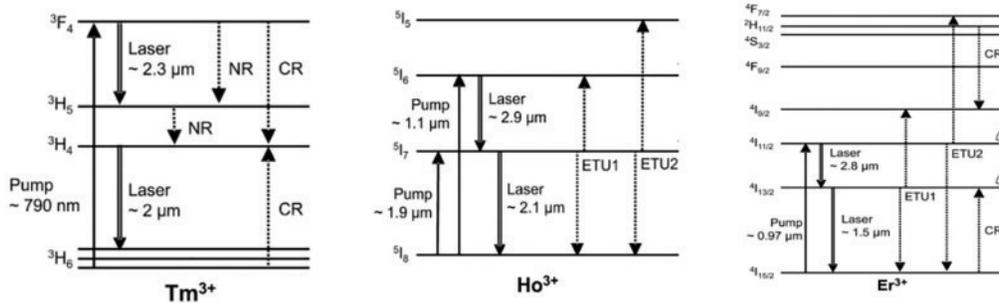


图 8 Tm<sup>3+</sup>、Ho<sup>3+</sup>、Er<sup>3+</sup> 能级跃迁示意图 (从左到右)<sup>[29]</sup>

Fig. 8 Schematic diagrams of energy level transitions of Tm<sup>3+</sup>, Ho<sup>3+</sup> and Er<sup>3+</sup> (from left to right)<sup>[29]</sup>

(YAG、YLE、YAP)以及倍半氧化物陶瓷等。除了固体材料外,光纤材料也是掺 Tm<sup>3+</sup>激光器的增益介质,与体块材料相比光纤具有更大的表面积与体积比,能有效散热,不会出现热透镜效应。

Tm<sup>3+</sup>在多种基质材料中有良好的固溶性,有利于针对不同的应用选择合适的激光基质与掺杂浓度,不同材料掺杂的调谐范围与宽度如表 2 所示。

表 2 不同基质掺 Tm<sup>3+</sup>激光器的调谐范围与宽度<sup>[30]</sup>

Table 2 Tuning range and width of Tm<sup>3+</sup> doped laser with different substrates<sup>[30]</sup>

Gain material	Tuning range / $\mu\text{m}$	Tuning width /nm
Tm <sup>3+</sup> :YAG	1.87–2.16	290
Tm <sup>3+</sup> :YSGG	1.84–2.14	300
Tm <sup>3+</sup> :YALO <sub>3</sub>	1.93–2.00	70
Tm <sup>3+</sup> :Y <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1.93–2.09	160
Tm <sup>3+</sup> :Sc <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1.93–2.16	230
Tm <sup>3+</sup> :Silica fiber	1.86–2.09	230
Tm <sup>3+</sup> :YLE	1.91–2.07	160
Tm <sup>3+</sup> :GdVO <sub>4</sub>	1.86–1.99	130
Tm <sup>3+</sup> :Silica fiber	1.72–1.97	250
Tm <sup>3+</sup> :BaY <sub>2</sub> F <sub>8</sub>	1.78–2.03	245

在 1997 年,Honea 等利用侧面泵浦掺杂 Tm<sup>3+</sup>的 YAG 激光系统实现了波长为 2.01  $\mu\text{m}$ 、功率为 115 W 的中红外激光输出,该实验利用水与乙醇融合作为冷却液。在 2015 年,深圳大学的任席奎等<sup>[31]</sup>在室温下利

用波长为 793 nm 的半导体二极管激光器对 Tm<sup>3+</sup>:YAP 晶体进行双端泵浦,获得功率为 42 W、中心波长为 1.988  $\mu\text{m}$  的连续中红外激光,实现了连续运转、结构紧凑、效率高、功率高的 L 型折叠腔型掺 Tm<sup>3+</sup>固体激光器。相关的掺杂 Tm<sup>3+</sup>固体激光器的研究情况如表 3 所示。

表 3 掺 Tm<sup>3+</sup>固体激光器近年来的研究进展

Table 3 Research progress of Tm<sup>3+</sup> solid-state laser

Material	Wavelength / $\mu\text{m}$	Output power	Year	Reference
Tm <sup>3+</sup> :YAP	1.988	344 mW	2010	[32]
Tm <sup>3+</sup> :YAG	2.01	38 mW	2012	[33]
Tm <sup>3+</sup> :LSO	2.054	0.65 W	2013	[34]
Tm <sup>3+</sup> :YAG	2.07	267 W	2014	[35]

2022 年,江苏师范大学王飞等<sup>[36]</sup>报道了基态吸收(GSA, <sup>3</sup>H<sub>6</sub>→<sup>3</sup>H<sub>4</sub>)和激发态吸收(ESA, <sup>3</sup>F<sub>4</sub>→<sup>3</sup>H<sub>4</sub>)双波长泵浦 2.3  $\mu\text{m}$ 波段的 Tm<sup>3+</sup>:YAP 激光器。其实验系统如图 9 所示,2274 nm 和 2383 nm 双波长泵浦的最大输出功率达 2.28 W,相比于单波长 785 nm 的泵浦,激光输出功率提高了 65.2%。波长为 2383 nm 激光的最大输出功率为 942 mW,较单波长泵浦方案提高了 84.3%。2446 nm 激光的最大输出功率达 1.62 W,较单波长方案提高了 48.6%。实验结果表明,GSA 和 ESA 双波长泵浦方案为实现 2.3  $\mu\text{m}$ 掺 Tm<sup>3+</sup>固体激光器获得更高的输出功率提供了一种有效技术手段。

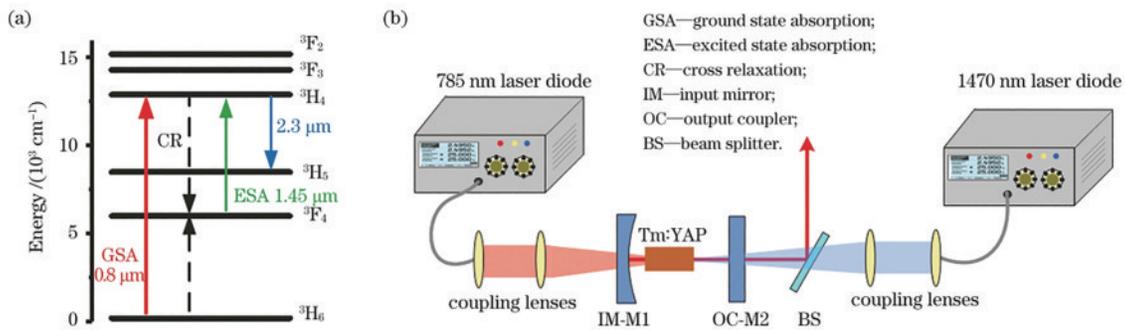


图 9 总体实验方案<sup>[36]</sup>。(a)GSA 和 ESA 双波长泵浦能级方案示意图;(b)GSA 和 ESA 双波长泵浦 Tm<sup>3+</sup>:AP 激光器实验装置  
Fig. 9 Overall experimental scheme<sup>[36]</sup>. (a) Energy level diagram of GSA and ESA dual-wavelength pumped scheme; (b) experimental arrangement for GSA and ESA dual-wavelength pumped Tm<sup>3+</sup>:YAP laser

相比于固体块状激光器,掺 Tm<sup>3+</sup>光纤激光器的效率更高,且可实现的功率更大,目前在光子通信、医疗、光谱学、传感器等领域有极好的应用。793 nm、1.6  $\mu\text{m}$  和 1.9  $\mu\text{m}$  是掺 Tm<sup>3+</sup>光纤激光器的 3 个主要泵浦带,其发射谱覆盖 1.7~2.1  $\mu\text{m}$ 。自 20 世纪 90 年代开始,国外就对 2  $\mu\text{m}$  掺 Tm<sup>3+</sup>光纤激光器展开研究。在 1990 年,南安普敦大学的 Hanna 等<sup>[37]</sup>就报道了一种连续光单横模的最大输出功率为 1.35 W 的 2  $\mu\text{m}$  掺 Tm<sup>3+</sup>光纤激光器。随着激光技术的进步和掺杂光纤、器件工艺的不不断提升,掺 Tm<sup>3+</sup>光纤激光器的斜率效率、输出功率都

在不断进步。在 2010 年,Ehrenreich 等<sup>[38]</sup>利用 12 台功率为 150 W、波长为 793 nm 的商用半导体激光器(LD)在全光纤主振荡功率放大器(MOPA)结构下,将 50 W 的 2045 nm 种子激光通过两级放大得到了斜率效率约为 53.2%、功率>1 kW 的中红外激光。2021 年,美国空军实验室的 Anderson 等<sup>[39]</sup>同样利用多台 793 nm 的 LD 作为泵浦源,采用全光纤 MOPA 结构,通过多级放大设计出了一台输出功率达 1.1 kW、斜率效率约为 50.7%、输出波长为 1.95  $\mu\text{m}$  的中红外掺 Tm<sup>3+</sup>光纤激光器,这也是目前掺 Tm<sup>3+</sup>光纤放大器的

最高输出功率记录。

掺  $\text{Tm}^{3+}$  光纤激光器虽然能获得千瓦级的激光输出,但由于其较低的光光转换效率,光纤会产生大量的热量,为了使激光器正常工作,整个发光过程需对光纤进行不断降温。同带泵浦是一种能提高光光转换效率、降低废热的泵浦方式,2014年,BAE公司 Creeden 等<sup>[40-42]</sup>利用 1908 nm 掺  $\text{Tm}^{3+}$  光纤激光器作为泵浦源对掺  $\text{Tm}^{3+}$  光纤进行同带泵浦,获得了最高输出功率为 123 W,斜率效率超过 90% 的 2  $\mu\text{m}$  激光。该同带泵浦方案量子效率高、废热少,为掺  $\text{Tm}^{3+}$  光纤激光系统的功率提升提供了一个重要的技术途径<sup>[43]</sup>。

#### 4.2 掺 $\text{Ho}^{3+}$ 激光器

掺杂  $\text{Ho}^{3+}$  所产生的红外光波长主要约为 2.1  $\mu\text{m}$ ,可以实现极高的光光转换效率,在早期的闪光灯泵浦的激光系统中, $\text{Er}^{3+}$ 、 $\text{Cr}^{2+}$ 、 $\text{Tm}^{3+}$  离子等被单独或混合作为  $\text{Ho}^{3+}$  的敏化剂,利用这些离子实现对  $\text{Ho}^{3+}$  的激发。利用其他离子作为敏化剂的掺  $\text{Ho}^{3+}$  激光器因为其常温下较强的上转换效应限制了能量转换效率,且共掺杂时的强温度敏感性,使其不能在常温下获得高功率、高效率、高质量的激光输出。与此相比,共振泵浦技术逐渐成为掺  $\text{Ho}^{3+}$  激光系统的高能短脉冲输出的理性途径。

掺杂  $\text{Ho}^{3+}$  的激光器主要分为固体和光纤激光器,掺  $\text{Ho}^{3+}$  固体激光器的基质主要分为以石榴石晶体(YAG)和铝酸盐晶体(YAP)为代表的氧化物晶体,以及以氟化钇锂(YLF)、氟化钙( $\text{CaF}_2$ )和氟化锂镨(LLF)等晶体为主的氟化物晶体。掺  $\text{Ho}^{3+}$  YAG 固体激光器能实现高功率、高质量的 2  $\mu\text{m}$  激光输出,2012年,哈尔滨工业大学 Shen 等<sup>[44]</sup>利用 1.91  $\mu\text{m}$  的  $\text{Tm}^{3+}$ :YLF 固体激光器作为泵浦源,利用共振泵浦实现了输出功率最大为 103 W、波长为 2.097  $\mu\text{m}$  和 2.122  $\mu\text{m}$ 、斜率效率为 67.8% 的激光输出,首次实现了  $\text{Ho}^{3+}$ :YAG 激光器的百瓦级输出。2018年,哈尔滨工业大学 Duan 等<sup>[45]</sup>成功实现了输出激光最大功率为

146.4 W、斜率效率为 66.0%、光光转换效率为 61.2% 的  $\text{Ho}^{3+}$ :YAG 激光器,进一步加大了  $\text{Ho}^{3+}$ :YAG 激光器的输出功率。基质为 YAP 的掺  $\text{Ho}^{3+}$  激光器也能达到百瓦级输出,江苏师范大学 Tang 等<sup>[46]</sup>在 2020 年实现了输出功率为 107.3 W、斜率效率为 50.6%、输出波长为 2.117  $\mu\text{m}$  的  $\text{Ho}^{3+}$ :YAP 固体激光器。与氧化物相比氟化物晶体的上能级寿命更长、发射截面更大,在实现高功率和大能量方面更具有优势,燕山大学 Wang 等<sup>[47]</sup>于 2021 年实现了一种紧凑、高效且输出功率为 125 W、波长为 2.064  $\mu\text{m}$  的  $\text{Ho}^{3+}$ :YLF 中红外激光器。

此外, $\text{Ho}^{3+}$  光纤激光器近年来也取得较好的发展。掺  $\text{Ho}^{3+}$  的氟化物光纤(ZBLAN)能实现 3  $\mu\text{m}$  波段的中外输出,早期的掺  $\text{Ho}^{3+}$  光纤激光器以 1100 nm 波段掺镱光纤激光为泵浦源,转换效率较低,近年来报道的掺  $\text{Ho}^{3+}$  光纤主要以 1150 nm 的 LD 为泵浦源,伴随光纤激光技术的快速发展,人们已经能利用级联拉曼效应实现高功率的掺  $\text{Ho}^{3+}$  光纤激光输出。但利用级联拉曼效应的结构较为复杂,且效率较低,除了此方法外,也能直接通过激光振荡实现 1150 nm 泵浦掺  $\text{Ho}^{3+}$  光纤中红外激光的输出,2017年,西北核技术研究所 谌鸿伟等<sup>[48]</sup>利用 1150 nm 光纤激光器为泵浦源,泵浦双包层的铈镨共掺氟化物光纤,实现了功率为 115 mW、光光转换效率为 8.0%、中心波长为 2.8684  $\mu\text{m}$  的中红外激光输出。

为了实现 2.1  $\mu\text{m}$  波段光纤激光器输出多波长激光,在 2019年,长春理工大学于秀明等<sup>[49]</sup>设计了一种基于光纤 Sagnac 干涉仪的多波长可调谐掺  $\text{Ho}^{3+}$  光纤激光器,实验装置如图 10 所示。该激光器得到了 2.1  $\mu\text{m}$  波段多波长激光输出,其输出功率在 1~15 mW 可调谐,且最多可观测到 6 个波长的激光输出。掺  $\text{Ho}^{3+}$  光纤在适当的波长激光泵浦下如果采用级联振荡的方式,可以由一个振荡器同时输出波长分别在 2  $\mu\text{m}$  和 3  $\mu\text{m}$  的中红外激光,还能提高激光的输出功率和光光转换效率。

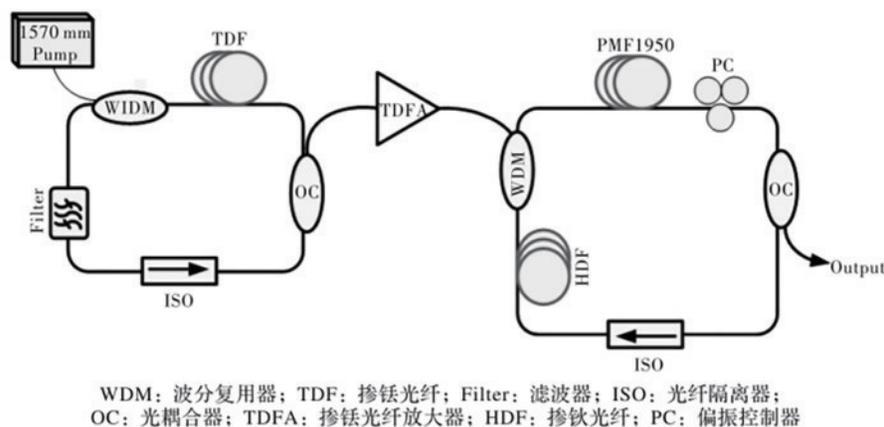


图 10 多波长可调谐掺  $\text{Ho}^{3+}$  光纤激光器<sup>[49]</sup>

Fig. 10 Configuration of tunable multi-wavelength  $\text{Ho}^{3+}$  doped fiber laser<sup>[49]</sup>

### 4.3 掺 Er<sup>3+</sup> 激光器

稀土 Er<sup>3+</sup> 能级结构丰富、能产生多种辐射波长,因此其研究十分广泛。目前实现激光运转的掺铒激光器有三大类:1) 有敏化剂的 Er<sup>3+</sup> 激光器;2) 非敏化的 Er<sup>3+</sup> 激光器;3) 谐振泵浦激光器。

在掺杂 Er<sup>3+</sup> 的同时如果掺杂适量的镱离子 (Yb<sup>3+</sup>), 可以增大对泵浦光的吸收, 提高泵浦效率, 获得更高的激光输出。Yb<sup>3+</sup> 分裂简单, 可以掺杂较高浓度, 在共掺杂系统中起敏化作用。2005 年英国南安普敦大学<sup>[50]</sup> 报道了一种高效率铒镱共掺光纤激光器, 获得了功率为 188 W 的连续激光输出。2014 年, 加拿大科研人员 Jebali 等<sup>[51]</sup> 利用铒镱共掺光纤激光器, 获得了最大功率为 264 W、斜率效率为 74%、波长为 1585 nm 的连续激光输出。这是目前 1.5 μm 波段掺 Er<sup>3+</sup> 光纤激光器运用的共振泵浦技术获得的最高功率。

尽管铒镱共掺光纤激光器有着不错的表现, 然而

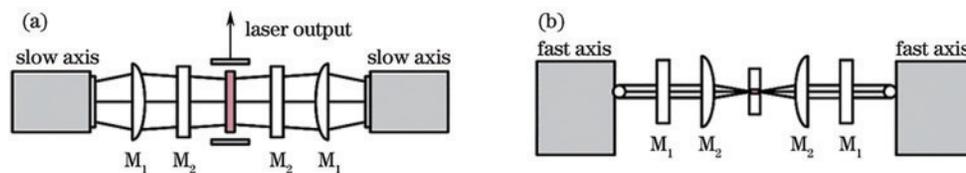


图 11 侧面抽运 Er<sup>3+</sup>:YSGG 平板激光器示意图;(a) 俯视图;(b) 侧视图<sup>[52]</sup>

Fig. 11 Diagrams of side-pumped Er<sup>3+</sup>:YSGG slab laser; (a) Top view; (b) side view<sup>[52]</sup>

YSGG 晶体的缺点在于具有严重的热效应, 很难实现大功率激光输出, 故其应用受到很大限制。其次是 YAG 晶体, 其具有掺杂难度小、热导率较高等优点, 目前主要有灯泵浦、LD 侧面泵浦、LD 端面泵浦 3 种方式。2017 年, Xu 等<sup>[53]</sup> 利用 LD 侧面泵浦 Er<sup>3+</sup>:YAG 晶体, 实现了平均输出功率为 10 W、中心波长为 2.94 μm 的中红外激光输出。2016 年, Sanamyan<sup>[54]</sup> 在 77 K 低温环境下, 通过 960 nm 二极管激光端面泵浦掺杂粒子数分数为 0.5% 的 Er<sup>3+</sup>:YAG, 得到连续输出的波长为 2.73 μm、功率为 10 W、斜率效率为 15% 的激光输出, 可见低温环境下利用 Er<sup>3+</sup>:YAG 得到的输出激光波长明显小于室温下 2.94 μm。2016 年, Messner 等<sup>[55]</sup> 在 18~25 °C 的较大冷却水温环境下, 利用单片大功率二极管 975 nm 激光泵浦 Er<sup>3+</sup>:YAG, 实现了平均输出功率高达 50 W, 脉冲峰值功率高达 972 W 的 2.94 μm 激光, 这表明 Er<sup>3+</sup>:YAG 具有实现高功率输出的潜力。其他掺杂 Er<sup>3+</sup> 的固体激光器, 比如 Er<sup>3+</sup>:YLF、Er<sup>3+</sup>:Lu<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 等都能实现 2.8 μm 附近的中红外激光输出<sup>[56]</sup>。

除掺 Er<sup>3+</sup> 固体激光器外, 基于掺铒氟化物双包层 (Er<sup>3+</sup>:ZBLAN) 光纤激光器也是实现 3 μm 附近输出的重要途径。2009 年, Tokita 等<sup>[57]</sup> 利用 975 nm LD 泵浦 Er<sup>3+</sup>:ZBLAN 光纤, 在液冷条件下获得 24 W 光光转换效率为 14.5% 的 3 μm 激光输出。2015 年, 沈炎龙等<sup>[58]</sup> 利用 975 nm LD 泵浦 Er<sup>3+</sup>:ZBLAN, 在室温条件下, 得到了波长为 2.8 μm、斜率效率为 24.8%、平均功

率超过 9 W 的中红外光纤激光连续输出。同年, Fortin 等<sup>[59]</sup> 报道了连续输出超过 30 W、整体效率约为 16% 的 2.938 μm 掺 Er<sup>3+</sup> 全光纤激光器。

2020 年, Gu 等<sup>[60]</sup> 报道了基于非线性偏振旋转技术的 2.8 μm 的飞秒锁模 Er<sup>3+</sup>:ZBLAN 光纤激光器, 该激光器产生的平均输出功率为 317 mW, 重复频率为 107 MHz, 脉冲持续时间短至 131 fs。2021 年, Shen 等<sup>[61]</sup> 报道了一台主动调 Q、输出波长为 2.7 μm 的 Er<sup>3+</sup>:ZBLAN 光纤激光器, 其脉冲能量达 205.7 μJ, 脉宽为 13.1 ns, 峰值功率为 15.7 kW, 重复频率为 100 Hz, 脉冲宽度和峰值功率分别是目前 3 μm 波段光纤激光器中最短和最高的。

### 4.4 掺杂过渡金属离子激光器

近年来掺杂过渡金属离子也逐渐成为一个研究热点, 掺杂过渡金属离子 Cr<sup>2+</sup> 或 Fe<sup>2+</sup> 的 ZnS 或 ZnSe (TM<sup>2+</sup>: II-VI) 由于其独特的光谱特性成为最具前途的中红外激光放大材料<sup>[62]</sup>, 掺杂过渡金属实现中红外输出波长集中在 2~6 μm。

掺杂过渡金属离子 Cr<sup>2+</sup> 的 ZnSe 可实现 2.5 μm 激光的输出。2008 年, Moskalev 等<sup>[63]</sup> 利用 Cr<sup>2+</sup>:ZnSe 实现了输出功率为 12.5 W、出光效率为 43.5% 的连续激光输出。2016 年, 长春光机所王云鹏等<sup>[64]</sup> 利用其自行研制的 Cr<sup>2+</sup>:ZnSe 单晶体, 搭建了全固态中红外激光器, 实现了光光转换效率为 17.2%、斜率效率为 20%、最大输出能量为 3 W 的 2.5 μm 激光输出。

掺杂  $\text{Cr}^{2+}$  的 ZnS 晶体能实现波长约  $2.3 \mu\text{m}$  的激光输出, 2001 年 Mirov 等<sup>[65]</sup> 第一次报道了连续输出的  $\text{Cr}^{2+}:\text{ZnS}$  激光器, 其在室温下运行, 实现了功率为  $63 \text{ mW}$ 、斜率效率为  $53\%$  的  $2.32 \mu\text{m}$  激光输出。Sorokin 等<sup>[66]</sup> 在 2009 年报道了  $10 \text{ W}$  级的连续输出  $\text{Cr}^{2+}:\text{ZnS}$  激光器, 该激光器能实现  $1.940\sim 2.780 \mu\text{m}$  的调谐, 且在  $2.380 \mu\text{m}$  的斜率效率为  $43\%$ 。2016 年, Moskalev 等<sup>[67]</sup> 报告了基于  $\text{Cr}^{2+}:\text{ZnS}$  和  $\text{Cr}^{2+}:\text{ZnSe}$  高功率连续激光系统的重大突破, 其实现了输出功率为  $140 \text{ W}$ 、光光转换效率为  $62\%$  的  $2.5 \mu\text{m}$  激光输出, 及输出功率为  $32 \text{ W}$ 、光光转换效率为  $29\%$  的  $2.94 \mu\text{m}$  激光输出, 使用的方法是基于  $\text{Cr}^{2+}:\text{ZnS}/\text{Se}$  增益元件上快速同时扫描共线激光模式和泵浦光束, 消除热透镜效应并获得前所未有的输出功率水平和非常高的光光转换效率, 其实验系统如图 12 所示。

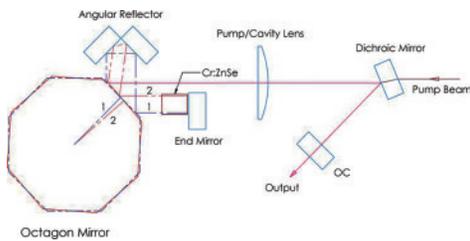


图 12  $140 \text{ W}$   $\text{Cr}^{2+}:\text{ZnSe}$  激光系统示意图<sup>[67]</sup>

Fig. 12 Schematic diagram of  $140 \text{ W}$   $\text{Cr}^{2+}:\text{ZnSe}$  laser system<sup>[67]</sup>

$\text{Fe}^{2+}:\text{ZnSe}$  比  $\text{Cr}^{2+}$  掺杂的材料有着更大的吸收与发射截面,  $\text{Fe}^{2+}:\text{ZnSe}$  是目前通过掺杂过渡金属离子实现中红外最受关注的对象。1999 年, Adams 等<sup>[68]</sup> 首次实现了基于  $\text{Fe}^{2+}:\text{ZnSe}$  的固体激光器, 利用  $\text{Er}^{3+}:\text{YAG}$  ( $2.698 \mu\text{m}$ ) 激光作为泵浦源, 在超低温情况下, 实现了波长  $3.98\sim 4.54 \mu\text{m}$  的中红外激光输出。2013 年, 俄罗斯科学院 Frolov 等<sup>[69]</sup> 使用泵浦源为自由运转的  $\text{Er}^{3+}:\text{YAG}$  激光器 ( $2.94 \mu\text{m}$ ) 在超低温条件下泵浦  $\text{Fe}^{2+}:\text{ZnSe}$ , 实现了单脉冲能量超过  $2 \text{ J}$ 、波长为  $4.1 \mu\text{m}$  的中红外激光输出, 实验装置如图 13 所示, 该实验在同样的泵浦条件下, 常温时仅输出  $42 \text{ mJ}$  的激光。

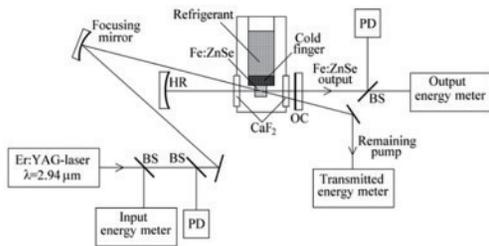


图 13 基于  $\text{Er}^{3+}:\text{YAG}$  泵浦焦耳级  $\text{Fe}^{2+}:\text{ZnSe}$  中红外激光器示意图<sup>[69]</sup>

Fig. 13 Joule level  $\text{Fe}^{2+}:\text{ZnSe}$  mid-IR laser pumped by  $\text{Er}^{3+}:\text{YAG}$  lasers<sup>[69]</sup>

2014 年和 2017 年, Velikanov 等<sup>[70-71]</sup> 首次在室温环境下采用 HF 激光泵浦的  $\text{Fe}^{2+}:\text{ZnSe}$  高能中红外激光

器, 分别获得了光光转换效率为  $23\%$ 、能量为  $30.6 \text{ mJ}$  的  $2.6\sim 3.1 \mu\text{m}$  的中红外激光输出和光光转换效率为  $27\%$ 、平均功率为  $20 \text{ W}$  的  $4\sim 5 \mu\text{m}$  中红外激光输出, 如图 14 所示。

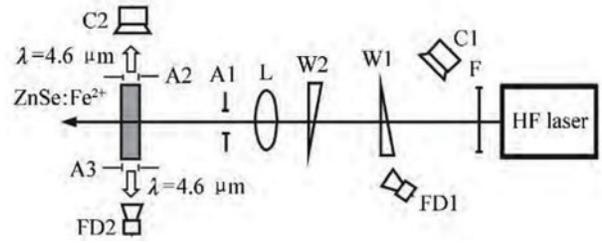


图 14 室温下  $30.6 \text{ mJ}$  HF 激光泵浦的  $\text{Fe}^{2+}:\text{ZnSe}$  中红外激光器<sup>[70]</sup>

Fig. 14  $30.6 \text{ mJ}$ ,  $\text{Fe}^{2+}:\text{ZnSe}$  mid-IR laser pumped by HF laser operating at room temperature<sup>[70]</sup>

2016 年, Frolov 等<sup>[72]</sup> 报道了一台大能量  $\text{Fe}^{2+}:\text{ZnSe}$  激光器, 利用最大能量为  $28 \text{ J}$ 、波长为  $2.94 \mu\text{m}$  的  $\text{Er}^{3+}:\text{YAG}$  激光器作为泵浦源, 在  $85 \text{ K}$  的环境中, 实现了脉冲能量为  $10.6 \text{ J}$ 、光光转换效率为  $37\%$  的  $4.1 \mu\text{m}$  激光输出。2017 年, Martyskhin 等<sup>[73]</sup> 报道了输出功率为  $9.2 \text{ W}$  的连续输出  $4.15 \mu\text{m}$  激光器, 该激光器以  $2.94 \mu\text{m}$  的激光为泵浦源, 在  $77 \text{ K}$  的低温条件下, 实现了较高能量的连续模式  $\text{Fe}^{2+}:\text{ZnSe}$  激光输出。

2020 年, Uehara 等<sup>[74]</sup> 以输出波长为  $2.8 \mu\text{m}$  的  $\text{Er}^{3+}:\text{ZBLAN}$  光纤激光器为泵浦源, 在工作温度  $70 \text{ K}$  的环境下, 泵浦  $\text{Fe}^{2+}:\text{ZnSe}$  激射出波长为  $4.05 \mu\text{m}$ 、峰值功率为  $1.1 \text{ kW}$ 、脉宽为  $20 \text{ ns}$  的中红外激光。

相比于其他类型的激光器, 基于稀土掺杂或过渡金属掺杂的中红外激光器都具有结构紧凑、转换效率较高等优点, 但由于其本身的热导率低、掺杂浓度低等特点, 限制了其输出功率和光束质量, 且基于过渡金属掺杂的  $\text{Fe}^{2+}:\text{ZnS}/\text{ZnSe}$  激光器输出的激光性能在低温和室温下差距甚大, 其调谐特性受晶体能级结构限制, 调谐范围较窄。

## 5 量子级联半导体激光器

量子级联半导体激光器 (QCL) 利用半导体导带、子带之间的电子跃迁和声子共振支持隧穿来产生光放大, 该类激光器的输出波长由导带、子带之间的能量差选择, 与半导体材料的禁带宽窄大小无关。因此, 可以通过改变量子阱层的厚度及数量来控制波长。与传统的半导体激光器的受激辐射机制不同, 量子级联半导体激光器的受激辐射只有电子介入, 激射波长的大小可经过有源区的势垒和势阱的能带剪辑来控制。

相比于其他激光器, 量子级联激光器的优势是级联过程, 通过结合量子化和量子隧道机理将多个量子阱结构串联, 电子从高能级跃迁到低能级过程中没有损耗, 还能加入到下一个进程中再次发光。这种级联

过程能使这些电子反复循环,因而造就了一种让人惊奇的激光器。量子级联激光器的能带结构如图 15 所示。

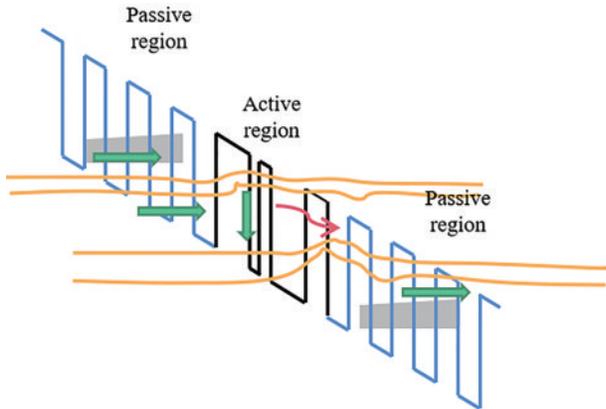


图 15 量子级联激光器的能带结构示意图

Fig. 15 Schematic diagram of band structure of quantum cascade laser

1971年,苏联科学家Kazarinov等<sup>[75]</sup>提出了利用强电场下量子阱子带间的电子跃迁代替窄带隙半导体的带间光学跃迁的方法,实现了量子级联激光器的理论基础。1994年贝尔实验室的Faist等<sup>[76]</sup>使用分子束外延技术制造出来第一台QCL,在10 K的温度下激射出波长为4.2  $\mu\text{m}$ 、输出功率为8 mW的中红外激光。1996年<sup>[77]</sup>第一个具有25个级联结构且在室温脉冲工作的QCL在贝尔实验室又被制备出来,其输出中心波长为5.2  $\mu\text{m}$ 。在2000年,第一个远红外QCL被报道出来<sup>[78]</sup>,实现了中心波长为24  $\mu\text{m}$ 和21.5  $\mu\text{m}$ 激光输出。2002年,Faist小组<sup>[79]</sup>第一个在室温条件下实现了连续工作的中红外QCL。从1994年第一台量子级联激光器的诞生到2002年第一个室温量子级联半导体激光器的诞生期间,是QCL理论研究蓬勃发展的时期,尤其是以Faist小组和阿尔卡特朗讯贝尔实验室为主的科学家们经过对量子级联激光器基础物理流程的认识,逐渐改进有源区结构,产生了一套完备的量子级联激光器基础理论。

2003年,哈佛大学等<sup>[80]</sup>成功研发出面发射光子晶体QCL,该激光器激射波长约为8  $\mu\text{m}$ 。2006年,Faist小组<sup>[81]</sup>第一次研制出基于外腔调谐的QCL,可调谐波长范围为8.2~10.4  $\mu\text{m}$ 。

在2010年,Colombelli<sup>[82]</sup>实验组对光子晶体QCL的研究取得了一些突破性进展,制备出单模面发射光子晶体QCL。在2013年,Blanchard小组<sup>[83]</sup>制造出对改善QCL的激光质量起到优异作用的锥形状量子级联激光器。由于量子级联激光器输出激光的能量较小,因此在识别精密物质光谱方面具有极其重要的应用,频率稳定发挥是其在精密分子光谱学发挥重要作用的重要指标。2021年,Zhao等<sup>[84]</sup>实现了量子级联激光器对高模匹配双镜腔谐振漏场的光学自锁,该结果是一种从大

功率中红外激光器中获得稳定频率的简单方法。

我国的中红外量子级联激光器发展也十分迅速,自从2000年,我国科学家李爱珍课题组在亚洲首先研制出波长在5~8  $\mu\text{m}$ 范围内的半导体量子级联激光器,使我国成为了掌握该类激光器研究制造技术的国家。2000年,中国科学院半导体研究所利用应变补偿结构的QCL实现了中心波长在3.5  $\mu\text{m}$ 中红外激光的激射,自2004年起,接连成功实现了5.5、7.8、9.75、10、11.2  $\mu\text{m}$ 的法布里-珀罗QCL,还制备出了分布式反馈量子级联激光器,实现波长为5.5、7.8  $\mu\text{m}$ 的中红外激光激射。中国科学院上海微系统与信息技术研究所于1998年<sup>[85]</sup>制备出了国内首个量子级联激光器,又在2004年报道了我国首个中红外分布式反馈QCL,随后又成功制造出了在室温下的低阈值电流密度脉冲分布式反馈QCL。由于量子级联激光器的输出能量较小,限制了其应用范围。2021年,天津光电信息控制和安全技术重点实验室王珂等<sup>[86]</sup>使用线栅偏振片和中波半波片组成偏振合束装置,如图12所示,对两路波长为4.05  $\mu\text{m}$ 、最大功率为0.241 W的量子级联激光器进行偏振合束,当透射光束和反射光束与偏振片夹角为30°时,二者合束之后其光束合束效率约为86%,这为提高量子级联激光器的能量提供了一种可行的思路。

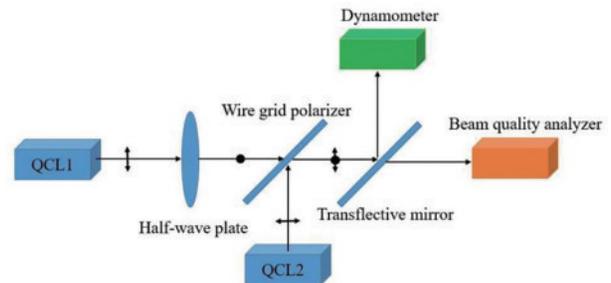


图 16 量子级联激光器偏振合束实验装置示意图<sup>[86]</sup>

Fig. 16 Schematic diagram of experimental apparatus for polarization beam combination<sup>[86]</sup>

量子级联半导体激光器能够实现很大范围的中红外波段激光输出,且集成的量子级联半导体激光器质量轻、体积小、易于携带、应用广泛。其不足之处为输出功率较低、室温下最高输出功率为瓦级,罕见的复杂结构和生长层次是对分子束外延生长技术极限的挑战,半导体有源层制备技术较为复杂。

## 6 基于非线性光学频率变换技术的中红外激光器

非线性光学频率变换是利用非线性效应的频率变换,将近红外波段的激光转换为中红外激光输出的一种方法,不再依赖增益介质中掺杂的离子能级特性,而是依赖于光在介质中与物质的相互作用,有和频(SFG)、光学参量(OPG)、光学参量振荡(OPO)、倍频

(SHG)、差频(DFG)和光学参量放大(OPA)等几种方式,这些方法的基本原理示意图<sup>[87]</sup>如图 17 所示。

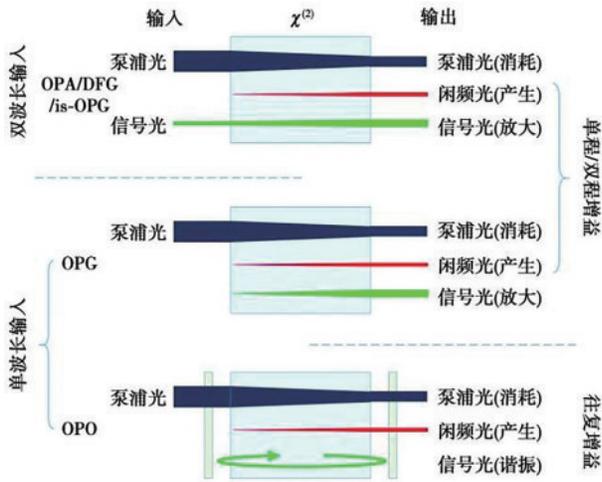


图 17 几种非线性频率下转换过程示意图<sup>[87]</sup>

Fig. 17 Schematic diagram of conversion process under several nonlinear frequencies<sup>[87]</sup>

基于非线性光学频率变换技术的中红外激光器的核心器件为光学晶体,目前利用各类光学晶体产生中红外激光的最常用的方式为差频和光学参量振荡两种。

### 6.1 中红外差频产生

当两束光功率足够高且具有一定频率差的激光入射到非线性晶体时,可以产生一束新的激光,其频率为两束入射激光的频率差,这就是差频产生的原理。利用差频产生的中红外激光广泛应用于光谱学领域,该方法方案灵活、可调谐范围宽、能实现脉冲或连续波输出。

1974 年, Pine 等<sup>[88]</sup>在 LN 晶体中通过差频实现了连续运转的 2.2~4.2  $\mu\text{m}$  可调谐中红外激光输出,这是世界上第一个利用差频方法产生的激光器。1998 年,美国阿拉巴马大学研究小组<sup>[89]</sup>采用波长范围为 0.73~0.75  $\mu\text{m}$  的脉冲紫翠玉激光器及波长范围为 0.8~1.2  $\mu\text{m}$  的可调谐 LiF:F<sup>2+</sup> 色心激光器,一同泵浦 GaSe 和 AgGaS<sub>2</sub> 晶体差频,分别实现波长 3.5~7  $\mu\text{m}$  和 6.5~8.5  $\mu\text{m}$  的调谐输出,系统如图 18 所示。在 2004 年,日本的东北大学课题研究小组<sup>[90]</sup>采用脉冲式 Nd:YAG 激光泵浦 KTP-OPO 晶体输出的 1.76~2.36  $\mu\text{m}$  信号光和 2.61~1.91  $\mu\text{m}$  闲频光在 ZnGeP<sub>2</sub> 晶体中差频产生 5~12  $\mu\text{m}$  调谐的中红外辐射。同年,德国明斯特大学课题组<sup>[91]</sup>分别利用 Nd:YLF 激光器泵浦 PPLN-OPO 产生波长范围为 1.56~2.02  $\mu\text{m}$  的信号光和 Nd:YLF 激光泵浦双 KTP 参量晶体产生的波长范围为 3.24~2.20  $\mu\text{m}$  的闲频光,共同泵浦 CdSe 和 GaSe 晶体,从而差频产生波长范围为 3~24  $\mu\text{m}$  的超宽中红外激光。

国内方面,在 2011 年,中国科学院安徽光学精密

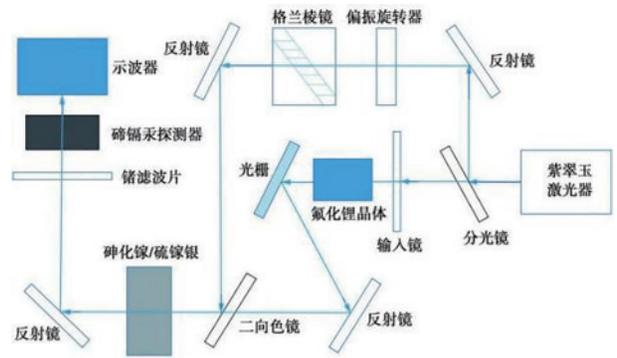


图 18 紫翠玉激光差频泵浦 AgGaS<sub>2</sub>、GaSe 晶体系统示意图<sup>[89]</sup>  
Fig. 18 Schematic diagram of violet jade laser pumped AgGaS<sub>2</sub> and GaSe MIR-DFG<sup>[89]</sup>

机械研究所研究小组<sup>[92]</sup>采用波长范围为 0.76~0.79  $\mu\text{m}$  的连续半导体激光器和输出波长范围为 0.79~0.91  $\mu\text{m}$  Ti 宝石激光器差频泵浦碲镉银晶体,成功实现了窄线宽连续且波长覆盖 5~12.5  $\mu\text{m}$  中红外光输出。在 2013 和 2015 年,中国科学院理化技术研究所利用皮秒(ps)脉冲 Nd:YAG 激光器输出的基频光和由激光器泵浦的倍频光共同泵浦碲镉银(BaGa<sub>4</sub>Se<sub>7</sub>)晶体分别实现了 3~5  $\mu\text{m}$  和 6.4~11  $\mu\text{m}$  中红外光波差频输出<sup>[93-94]</sup>,其系统结构如图 19 所示。

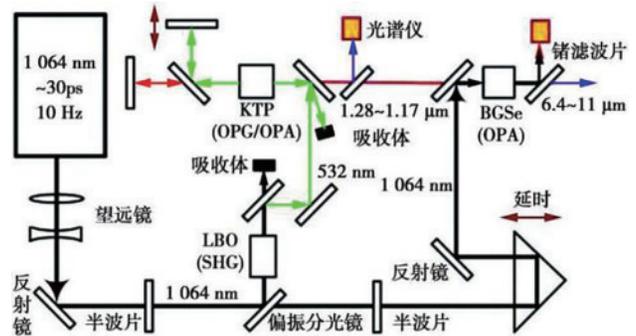


图 19 ps 激光泵浦 BaGa<sub>4</sub>Se<sub>7</sub> 晶体中红外光源系统示意图<sup>[94]</sup>  
Fig. 19 Schematic diagram of MIR source based on ps-laser pumped BaGa<sub>4</sub>Se<sub>7</sub> crystal<sup>[94]</sup>

2019 年,天津大学激光与光电子研究所课题组<sup>[95]</sup>采用脉冲 Nd:YAG 激光器基频光与倍频光泵浦 BaGa<sub>4</sub>Se<sub>7</sub> 晶体差频产生了波长为 3.36~4.27  $\mu\text{m}$  的中红外光,其能量转换率达 9.8%。同年,中国科学院安徽光学精密机械研究所课题组<sup>[96]</sup>采用波长范围为 0.74~0.97  $\mu\text{m}$  钛宝石激光器和波长为 1.06  $\mu\text{m}$  的 Nd:YAG 激光器作为泵浦源,获得 3.15~7.92  $\mu\text{m}$  的中红外激光,第一次实现了基于 BaGa<sub>4</sub>Se<sub>7</sub> 晶体连续波中红外差频输出,其实验装置如图 20 所示。

### 6.2 中红外光参量振荡产生

光参量振荡是利用非线性光学晶体的混频特性来实现频率变换的一种方式,具有调谐范围宽、不受抽运光波长限制、精度高、调谐方式多样等优势。利用腔镜表面的镀膜使一定频率的光在腔内来回振荡,使其不

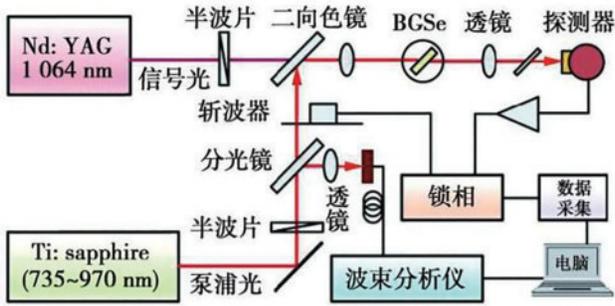


图 20 基于 BaGa<sub>4</sub>Se<sub>7</sub> 晶体差频的连续中红外光源系统示意图<sup>[96]</sup>  
Fig. 20 Schematic diagram of CW MIR source based on BaGa<sub>4</sub>Se<sub>7</sub>-DFG<sup>[96]</sup>

断地通过晶体,在泵浦光的影响下,产生的低频光能量不断增加。光参量振荡器的优势在于其结构简单、体积较小、输出稳定、室温运行、可调谐范围较宽。光参量振荡是发展迅速、潜力巨大的产生中红外激光的一种方式。

非线性晶体是中红外参量振荡器的关键,非线性晶体的特性对输出指标有很大影响。目前常用的晶体有磷酸钛氧钾(KTP)以及砷酸钛氧钾(KTA)晶体、铌酸锂(PPLN)晶体、硫镓银(AgGaS<sub>2</sub>)、硒镓银(AgGaSe<sub>2</sub>)和磷锆锌(ZnGeP<sub>2</sub>)、LiInS<sub>2</sub>晶体以及近年来新型 BaGa<sub>4</sub>Se<sub>7</sub>晶体。几种常见光学晶体的物理性质<sup>[87]</sup>如表 4 所示。

表 4 常见中红外非线性光学晶体的物理性质<sup>[87]</sup>  
Table 4 Optical properties of some infrared nonlinear crystals<sup>[87]</sup>

Crystal	Transmittance rang / $\mu\text{m}$	Energy gap /eV	Nonlinear coefficient /( $\text{pm}\cdot\text{V}^{-1}$ )	Damage threshold /( $\text{MW}\cdot\text{cm}^{-2}$ )
AgGaS <sub>2</sub>	0.47-13	2.76	$d_{36}=12.6@10.6$	34(1.06 $\mu\text{m}$ , 15 ns)
ZnGeP <sub>2</sub>	0.74-12	2.00	$d_{36}=75@10.6$	100(2.1 $\mu\text{m}$ , 10 ns)
GaSe	0.62-20	1.72	$d_{22}=54.4@10.6$	30(1.06 $\mu\text{m}$ , 10 ns)
CdSe	0.75-25	2.20	$d_{31}=18@10.6$	50(2.36 $\mu\text{m}$ , 35 ns)
BaGa <sub>4</sub> S <sub>7</sub>	0.35-13.7	3.54	$d_{31}=5.1@2.26$	264(1.06 $\mu\text{m}$ , 14 ns)
BaGa <sub>4</sub> Se <sub>7</sub>	0.47-18	2.64	$d_{23}=14.2@1.06$	100(1.06 $\mu\text{m}$ , 14 ns)
QPM-GaAs	0.85-18.5	1.42	$d_{14}=86@10.6$	200(1.06 $\mu\text{m}$ , 5 ns)

块状晶体 KTP 和 KTA 是用于光参量振荡的一种很好的非线性光学晶体。其转换效率高且具有极高的损伤阈值。1996 年, Rahlff<sup>[97]</sup> 以 Nd:YLF 激光器泵浦 KTA-OPO 实现了 3.44  $\mu\text{m}$  的中红外激光输出。2011 年, 奥地利维也纳科技大学 Baltuška 研究组<sup>[98]</sup> 利用 1064 nm 的 ps 脉冲泵浦两级 KTA 晶体, 在 3.9  $\mu\text{m}$  获得了 8 mJ、83 fs 的脉冲输出。多种类型的约 1  $\mu\text{m}$  基频泵浦源都有被用到基于 KTP 和 KTA 晶体的内腔单谐振中红外激光 OPO 中, 但由于采用了非临界相位匹配条件, 其中红外激光辐射源的调谐特性较差。

基于 PPLN 的光参量振荡出现很早, 该类激光器可调谐且能轻易实现全固化的输出特点, 所以其发展一直深受重视。1996 年, Bosenberg<sup>[99]</sup> 用 Nd:YAG 激光器作为泵浦源, 利用四镜腔 PPLN-OPO, 在 3.25  $\mu\text{m}$  处实现连续中红外激光输出。1997 年, Burr 等<sup>[100]</sup> 首次将 PPLN 用于实现中红外激光飞秒 OPO, 采用中心波长为 790~815 nm 可调的钛宝石激光器作为泵浦源, 获得波长为 1.7~5.4  $\mu\text{m}$  连续可调谐的闲频光输出, 其中 5.4  $\mu\text{m}$  闲频光的平均功率 >20 mW。PPLN-OPO 结构如图 21 所示。2005 年, Chen 等<sup>[101]</sup> 报道了在室温下基于 MgO:PPLN 晶体 OPO 实现了 10 W 的 2.9  $\mu\text{m}$  连续波中红外激光输出, 该实验利用 50 W Yb 光纤激光器作为泵浦源。

2010 年后, 针对高重频 PPLN-OPO, 多种高性能基频泵浦源、腔型设计手段以及 MgO:PPLN 被应用于 PPLN-OPO 系统, 以提高中红外激光输出功率以及

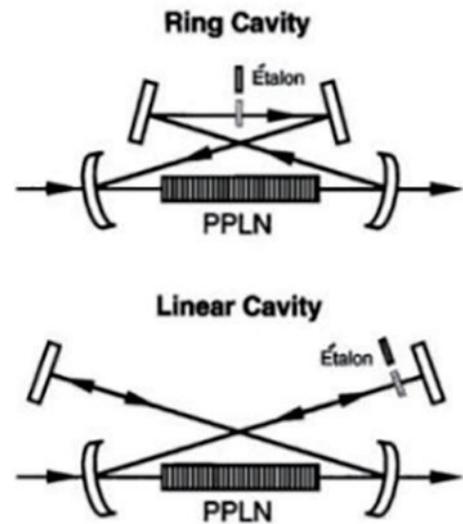


图 21 PPLN-OPO 结构图<sup>[100]</sup>  
Fig. 21 PPLN-OPO structure diagram<sup>[100]</sup>

调谐范围。2013 年, Kemlin 等<sup>[102]</sup> 基于大尺寸 MgO:PPLN 晶体利用泵浦源为 Nd:YAG 激光(1.064  $\mu\text{m}$ ) 实现了输出波长范围为 1.4~4.3  $\mu\text{m}$  连续可调谐的中红外 OPO 激光器。2014 年, 刘善德等<sup>[103]</sup> 报道了利用波长为 1.064  $\mu\text{m}$  的掺镱光纤泵浦的 MgO:PPLN-OPO 中红外激光器, 实现了可调谐的波长范围为 3.0~3.9  $\mu\text{m}$  中红外激光。2017 年, Murray 等<sup>[104]</sup> 基于 MgO:PPLN 晶体采用掺 Er<sup>3+</sup> 和掺 Yb<sup>3+</sup> 光纤激光器作为泵浦源实现了波长调谐范围为 3.31~3.48  $\mu\text{m}$  且功

率 > 6 W 的中红外激光输出,其实验结构如图 22 所示。2022 年,何洋等<sup>[105]</sup>报道了基于 MgO:PPLN 的晶

体 OPO,通过优化输出镜曲率半径和泵浦光束腰直径的条件下实现了 9.15 W 的 3.754 μm 脉冲激光输出。

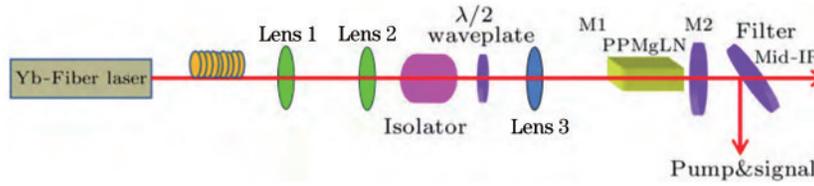


图 22 MgO:PPLN-OPO 实验装置<sup>[104]</sup>

Fig. 22 MgO:PPLN-OPO experimental apparatus<sup>[104]</sup>

AgGaS<sub>2</sub> 与 AgGaSe<sub>2</sub> 晶体透光率范围大,其中 AgGaSe<sub>2</sub> 晶体最高可达 18 μm。早在 1970 年左右这两种晶体就以 OPO 方式被用作产生中红外激光光源。1973 年,英国南安普敦大学课题组<sup>[106]</sup>采用 OPO 方式,利用波长 1.06 μm 的 Nd:CaWO<sub>4</sub> 激光器在 AgGaS<sub>2</sub> 晶体泵浦出波长范围为 1.22~8.5 μm 的可调谐中红外光源。2015 年,Boyko<sup>[107]</sup>报道了基于 AgGaSe<sub>2</sub> 晶体的中红外辐射源,采用内腔 OPO 方法进一步将调谐范围拓展至 18 μm。

LiInS<sub>2</sub> 属于硫化物晶体,2013 年, Tyazhev<sup>[108]</sup> 以 Nd:YAG 激光器泵浦 LiGaS<sub>2</sub>-OPO 实现了高能量中红外激光输出。

磷锆锌(ZnGeP<sub>2</sub>)是目前基于非线性频率变换产生中红外激光波段最为成熟的晶体,具有透光范围宽、不

易损伤、非线性系数大等特点,目前该晶体主要通过 OPO 方式实现中红外激光输出。主要介绍近几年的研究报道,2013 年,Hemming 等<sup>[109]</sup>报道了基于 ZnGeP<sub>2</sub>-OPO 的中红外激光光源,如图 23(a)所示,泵浦源为掺 Tm<sup>3+</sup> 的光纤激光器(2.09 μm)泵浦 Ho<sup>3+</sup>:YAG 放大器,实现了输出 3~5 μm 的中红外激光,其输出功率高达 27 W。2017 年,Wang<sup>[110]</sup>通过采用双通结构有效提高了 ZnGeP<sub>2</sub>-OPO 的转换效率至 75%。2019 年,姚宝权<sup>[111]</sup>课题组以功率为 231 W 的 Ho<sup>3+</sup>:YAP 激光器泵浦 ZnGeP<sub>2</sub>-OPO,最终将 3~5 μm 中红外激光能量提高至 102 W,实验系统如图 23(b)所示。虽然 ZnGeP<sub>2</sub> 晶体具备优秀的物理性能,但其内部存在一定的缺陷,会引起波长较短的近红外激光的吸收,故必须使用波长 > 2 μm 的泵浦源才能避免其对泵浦能量的消耗。

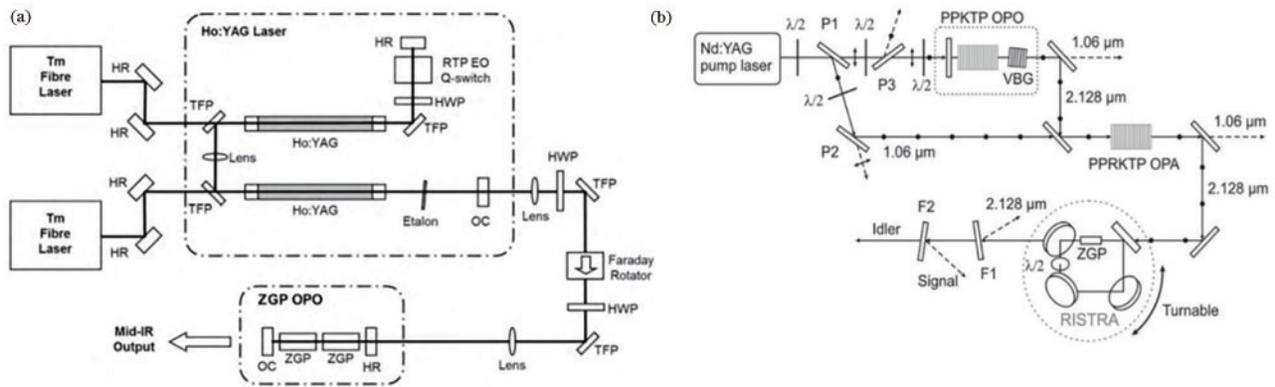


图 23 基于 ZnGeP<sub>2</sub>-OPO 的中红外激光源实验;(a)掺 Tm<sup>3+</sup> 光纤+Ho<sup>3+</sup>:YAG 泵浦 ZGP-OPO 中红外激光装置示意图<sup>[109]</sup>;(b)基于 Rb:PPKTP 泵浦的中红外 ZnGeP<sub>2</sub>-OPO<sup>[111]</sup>

Fig. 23 Experiment of mid-infrared laser source based on ZnGeP<sub>2</sub>-OPO; (a) Tm<sup>3+</sup>-doped fiber+Ho<sup>3+</sup>:YAG rod pumped ZGP-OPO mid-infrared laser<sup>[109]</sup>; (b) based on Rb:PPKTP pumped mid-infrared ZnGeP<sub>2</sub>-OPO<sup>[111]</sup>

BaGa<sub>4</sub>Se<sub>7</sub> 是近年来新兴的晶体,由中国科学院理化技术研究所姚吉勇课题组<sup>[112]</sup>于 2010 年成功制备,该晶体透光波段达到 0.47~14 μm,损伤阈值极高,非线性系数较大,是一种性能十分出色的中红外非线性光学晶体。2016 年,哈工大课题组<sup>[113-114]</sup>基于 BaGa<sub>4</sub>Se<sub>7</sub>-OPO 利用 Ho<sup>3+</sup>:YAG 激光器泵浦,实现了功率为 1.55 W、波长 3~5 μm 以及波长为 8~9 μm 中红外激光输出。同年,德国马克斯-普朗克研究所<sup>[115]</sup>以 OPO 方式利用 Nd:YAG 激光器直接泵浦 BaGa<sub>4</sub>Se<sub>7</sub> 实现可调谐中红外输出。2017 年,Boyko<sup>[116]</sup>以 Rb:PPKTP-

OPO 产生的可调谐双波长内腔泵浦 BaGa<sub>4</sub>Se<sub>7</sub> 晶体实现了 7 μm 附近可调谐中红外输出。在 2017 年,天津大学课题组<sup>[117]</sup>研究报道了用波长为 1.06 μm 的脉冲 Nd:YAG 激光器泵浦 BaGa<sub>4</sub>Se<sub>7</sub> 晶体 OPO,实现了波长范围为 3.12~5.16 μm 的中红外输出。2019 年,该课题组又报道了 BaGa<sub>4</sub>Se<sub>7</sub> 晶体和 KTP 内腔串联 OPO,改变 KTA-OPO 的波长,实现了 BaGa<sub>4</sub>Se<sub>7</sub>-OPO 的泵浦波长调谐<sup>[118]</sup>。2021 年,天津精密仪器于光电子工程学院张永平等<sup>[119]</sup>报道一种以 BaGa<sub>4</sub>Se<sub>7</sub> 晶体为核心,由脉宽为 10 ns、波长为 1.06 μm 的 Nd:YAG 激光器作为

泵浦源,以 OPO 和电控调谐的方式泵浦输出了波长范围为 2.97~6.35  $\mu\text{m}$  的宽范围中红外激光。

上述实现 OPO 的  $\text{AgGaS}_2$ 、 $\text{AgGaSe}_2$ 、 $\text{ZnGeP}_2$  3 种晶体,已经实现商品化,工艺成熟、性能优良。美中不足的是, $\text{AgGaS}_2$  晶体因其较低的损伤阈值,不适合在高功率下运转, $\text{AgGaSe}_2$  和  $\text{ZnGeP}_2$  晶体也因为较小的禁带宽度而不利于在目前最成熟的 1  $\mu\text{m}$  商用激光器下泵浦。与上述 3 种晶体相比, $\text{BaGa}_4\text{Se}_7$  晶体暂无明显缺点,综合性能良好,但作为一种新型非线性晶体,其生长及加工工艺还有很大的改进空间,物理参数也需进一步表征。

基于差频和光参量振荡的非频率变换技术的优点是调谐光谱范围宽、调谐方式简单、系统结构简单、稳定性高、可在室温下工作。但差频和 OPO 产生中红外激光对泵浦光源质量要求严格,需满足相位匹配且转换效率低,所以实验上难以得到高功率的中红外光源。

## 7 总结和展望

上述的各种激光器各有优劣,在不同的领域都有着重要应用。化学激光器具有超高的功率,主要用于军事、光学武器等领域,但是会产生有害物质,且体积大、成本高,在中红外波段范围 2~5  $\mu\text{m}$  的宽广覆盖,但其特有的超大功率与高质量光束令其仍具有不错的发展空间。

气体激光器是一种利用气体作为工作材料来产生激光器的装置。气体激光器具有结构简单、成本低、操作方便、工作方式均匀等优点,是目前品种最多、使用最普遍的激光器。基于气体激光器 HCF 的出现为光与气体的相互作用提供了理想环境,有力地推动了气体激光器的快速发展。同时,其为解决传统光纤激光器在性能提高和波长扩展方面的技术瓶颈提供了一个非常有潜力的解决方案,未来的发展前景十分广阔。

虽然掺杂稀土离子或掺杂过渡金属离子激光器可以产生中红外激光,但由于其低导热系数和低掺杂浓度,其输出和辐射质量受到限制。无论掺杂稀土或瞬态其他金属,这种激光器结构紧凑,但激光功率(特别是  $\text{Fe}^{2+}:\text{ZnS}/\text{ZnSe}$ )在低温和室温下有很大不同,其调谐特性受晶体能级结构的限制,调谐范围较窄。此类激光器在掺杂晶体的制备、激光泵浦源、谐振腔、热处理技术以及掺杂工艺等方面仍有不错的发展前景,这都为性能的提升提供了广阔空间。

虽然中红外波段的量子级联激光器具有很宽的调谐范围和广泛的应用,但其罕见的复杂结构和众多的生长层提高了分子束外延生长技术的局限性,其高阈值电流密度也影响了实际工艺,致命弱点为热输出差、输出能量低。量子级联激光器因其具有良好的小型化特性,故在应用便利性上有很大优势,在精密体检领域中的应用十分广泛。

基于非线性光学变频技术的中红外激光器主要优

点为调谐光谱范围宽、调谐方式简单、系统结构简单、稳定性高、可在室温下工作等,其缺点为难以实现大功率激光输出。通过优化设计、泵浦模式以及研制出参数优异的晶体,不断提高中红外激光器的光束质量。

## 参 考 文 献

- [1] Ebrahim-Zadeh M, Sorokina I T. Mid-infrared coherent sources and applications[M]. Dordrecht: Springer Netherlands, 2008.
- [2] Zandonella C. Terahertz imaging: T-ray specs[J]. Nature, 2003, 424(6950): 721-722.
- [3] 沈德元, 范滇元. 中红外激光器[M]. 北京: 国防工业出版社, 2015.  
Shen D Y, Fan D Y. Mid-infrared lasers[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2015.
- [4] Bashkin A S, Gurov L V, Katorgin B I, et al. On the possibility of simultaneous emission of an autonomous cw HF-DF chemical laser in two spectral ranges[J]. Quantum Electronics, 2008, 38(5): 429-435.
- [5] Lowenthal D D, Hamilton C E, Tidwell S C, et al. 20-watt output power Tm: YAG laser driver for HBr mid-IR laser[J]. Proceedings of SPIE, 1995, 2502: 483-489.
- [6] 郭汝海, 施龙, 王思雯, 等. HF/DF 化学激光器的研究进展[J]. 光机电信息, 2010, 27(3): 30-35.  
Guo R H, Shi L, Wang S W, et al. Development review of HF/DF chemical lasers[J]. OME Information, 2010, 27(3): 30-35.
- [7] Fradin D W, Chenausky P P, Freiberg R J. A recirculating, self-contained DF/HF pulsed laser[J]. IEEE Journal of Quantum Electronics, 1975, 11(8): 631-633.
- [8] 王红岩. 电激励连续波红外多波段化学激光器的研究[D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2006.  
Wang H Y. Study of discharge driven continuous wave infrared multi-band chemical laser[D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2006.
- [9] 黄超, 黄珂, 易爱平, 等. 200 W 重复频率中红外氟化氢化学激光器[J]. 中国激光, 2019, 46(8): 0801005.  
Huang C, Huang K, Yi A P, et al. 200 W mid-infrared HF chemical laser with repetition rate[J]. Chinese Journal of Lasers, 2019, 46(8): 0801005.
- [10] 王增强, 多丽萍, 周冬建, 等. 连续波千瓦级燃烧驱动 HBr 化学激光器[J]. 中国激光, 2020, 47(12): 1216004.  
Wang Z Q, Duo L P, Zhou D J, et al. Continuous wave kilowatt combustion driven HBr chemical laser[J]. Chinese Journal of Lasers, 2020, 47(12): 1216004.
- [11] Chang T Y, Wood O R. Optically pumped atmospheric-pressure  $\text{CO}_2$  laser[J]. Applied Physics Letters, 1972, 21(1): 19-21.
- [12] 陈育斌, 王红岩, 陆启生, 等. 光抽运中红外气体激光器[J]. 激光与光电子学进展, 2015, 52(1): 010005.  
Chen Y B, Wang H Y, Lu Q S, et al. Optically pumped mid-infrared gas lasers[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2015, 52(1): 010005.
- [13] Kletecka C S, Campbell N, Jones C R, et al. Cascade lasing of molecular HBr in the four micron region pumped

- by a Nd: YAG laser[J]. IEEE Journal of Quantum Electronics, 2004, 40, (10): 1471-1477.
- [14] Koen W, Jacobs C, Bollig C, et al. Optically pumped tunable HBr laser in the mid-infrared region[J]. Optics Letters, 2014, 39(12): 3563-3566.
- [15] 王泽锋, 黄威, 李智贤, 等. 光纤气体激光光源研究进展及展望(I): 基于受激拉曼散射[J]. 中国激光, 2021, 48(4): 0401008.  
Wang Z F, Huang W, Li Z X, et al. Progress and prospects of fiber gas laser sources (I): based on stimulated Raman scattering[J]. Chinese Journal of Lasers, 2021, 48(4): 0401008.
- [16] 王泽锋, 周智越, 崔宇龙, 等. 光纤气体激光光源研究进展及展望(II): 基于粒子数反转[J]. 中国激光, 2021, 48(4): 0401009.  
Wang Z F, Zhou Z Y, Cui Y L, et al. Research progress and prospect of fiber gas laser sources (II): based on population inversion[J]. Chinese Journal of Lasers, 2021, 48(4): 0401009.
- [17] 崔宇龙, 周智越, 黄威, 等. 基于反共振空芯光纤的 4.3  $\mu\text{m}$  二氧化碳激光器[J]. 光学学报, 2019, 39(12): 1214002.  
Cui Y L, Zhou Z Y, Huang W, et al. Anti-resonant hollow-core fibers based 4.3- $\mu\text{m}$  carbon dioxide lasers[J]. Acta Optica Sinica, 2019, 39(12): 1214002.
- [18] Jones A M, Nampoothiri A V V, Ratanavis A, et al. Mid-infrared gas filled photonic crystal fiber laser based on population inversion[J]. Optics Express, 2011, 19(3): 2309-2316.
- [19] Hassan M R A, Yu F, Wadsworth W J, et al. Cavity-based mid-IR fiber gas laser pumped by a diode laser[J]. Optica, 2016, 3(3): 218-221.
- [20] Xu M R, Yu F, Knight J. Mid-infrared 1 W hollow-core fiber gas laser source[J]. Optics Letters, 2017, 42(20): 4055-4058.
- [21] Nampoothiri A V V, Jones A M, Fourcade-Dutin C, et al. Hollow-core optical fiber gas lasers (HOFGLAS): a review[J]. Optical Materials Express, 2012, 2(7): 948-961.
- [22] Cui Y L, Huang W, Wang Z F, et al. 4.3  $\mu\text{m}$  fiber laser in CO<sub>2</sub>-filled hollow-core silica fibers[J]. Optica, 2019, 6(8): 951-954.
- [23] 周智越, 李昊, 崔宇龙, 等. 基于空芯光纤的光泵浦 4  $\mu\text{m}$  连续波 HBr 气体激光器[J]. 光学学报, 2020, 40(16): 1614001.  
Zhou Z Y, Li H, Cui Y L, et al. Optically pumped 4  $\mu\text{m}$  CW HBr gas laser based on hollow-core fiber[J]. Acta Optica Sinica, 2020, 40(16): 1614001.
- [24] 黄威, 周智越, 崔宇龙, 等. 4.5 W 中红外 3.1  $\mu\text{m}$  光纤气体激光器[J]. 中国激光, 2022, 49(1): 0101024.  
Huang W, Zhou Z Y, Cui Y L, et al. 4.5 W 3.1  $\mu\text{m}$  mid-infrared fiber gas laser[J]. Chinese Journal of Lasers, 2022, 49(1): 0101024.
- [25] Jones A M, Fourcade-Dutin C, Mao C, et al. Characterization of mid-infrared emissions from C<sub>2</sub>H<sub>2</sub>, CO, CO<sub>2</sub>, and HCN filled hollow fiber lasers[J]. 2012, 8237: 82373Y.
- [26] Aghbolagh F B A, Nampoothiri V, Debord B, et al. Mid IR hollow core fiber gas laser emitting at 4.6  $\mu\text{m}$ [J]. Optics Letters, 2019, 44(2): 383-386.
- [27] Nampoothiri A V V, Debord B, Alharbi M, et al. CW hollow-core optically pumped I<sub>2</sub> fiber gas laser[J]. Optics Letters, 2015, 40(4): 605-608.
- [28] Koen W, Jacobs C, Bollig C, et al. Optically pumped tunable HBr laser in the mid-infrared region[J]. Optics Letters, 2014, 39(12): 3563-3566.
- [29] 陈长水, 赵向阳, 徐磊, 等. 中红外光源研究进展[J]. 红外技术, 2015, 37(8): 625-634.  
Chen C S, Zhao X Y, Xu L, et al. Evolution of mid-infrared optical source[J]. Infrared Technology, 2015, 37(8): 625-634.
- [30] Godard A. Infrared (2-12  $\mu\text{m}$ ) solid-state laser sources: a review[J]. Comptes Rendus Physique, 2007, 8(10): 1100-1128.
- [31] 任席奎, 李春波, 王冬冬, 等. 高功率掺铥固体激光器的研究[J]. 深圳大学学报(理工版), 2015, 32(4): 411-416.  
Ren X K, Li C B, Wang D D, et al. High power Tm-doped solid laser[J]. Journal of Shenzhen University Science and Engineering, 2015, 32(4): 411-416.
- [32] Li J, Yang S H, Zhang H Y, et al. Diode-pumped room temperature single frequency Tm:YAP laser[J]. Laser Physics Letters, 2010, 7(3): 203-205.
- [33] Wang Q, Teng H, Zou Y W, et al. Graphene on SiC as a Q-switcher for a 2  $\mu\text{m}$  laser[J]. Optics Letters, 2012, 37(3): 395-397.
- [34] Feng T L, Zhao S Z, Yang K J, et al. Diode-pumped continuous wave tunable and graphene Q-switched Tm:LSO lasers[J]. Optics Express, 2013, 21(21): 24665-24673.
- [35] Niu Y X, Wang C L, Liu W W, et al. Theoretical model predictions and experimental results for a wavelength switchable Tm:YAG laser[J]. Applied Optics, 2014, 53(19): 4359-4362.
- [36] 王飞, 黄海涛, 鲍玉朔, 等. GSA 和 ESA 双波长泵浦 2.3  $\mu\text{m}$  波段 Tm: YAP 激光器[J]. 中国激光, 2022, 49(1): 0101022.  
Wang F, Huang H T, Bao Y S, et al. GSA and ESA dual-wavelength pumped 2.3  $\mu\text{m}$  Tm: YAP lasers[J]. Chinese Journal of Lasers, 2022, 49(1): 0101022.
- [37] Hanna D C, Perry I R, Lincoln J R, et al. A 1-Watt thulium-doped cw fibre laser operating at 2  $\mu\text{m}$ [J]. Optics Communications, 1990, 80(1): 52-56.
- [38] Ehrenreich T, Leveille R, Majid I, et al. 1-kW, all glass Tm: fiber laser[J]. Proceedings of SPIE, 2010, 7580: 758016.
- [39] Anderson B M, Solomon J, Flores A. 1.1 kW, beam-combinable thulium doped all-fiber amplifier[J]. Proceedings of SPIE, 2021, 11665: 116650B.
- [40] Creeden D, Johnson B R, Setzler S D, et al. Resonantly pumped Tm-doped fiber laser with >90% slope efficiency[J]. Optics Letters, 2014, 39(3): 470-473.
- [41] Creeden D, Johnson B R, Rines G A, et al. High power resonant pumping of Tm-doped fiber amplifiers in core-and cladding-pumped configurations[J]. Optics Express,

- 2014, 22(23): 29067-29080.
- [42] Wang Y, Yang J L, Huang C Y, et al. High power tandem-pumped thulium-doped fiber laser[J]. Optics Express, 2015, 23(3): 2991-2998.
- [43] 陶蒙蒙, 叶锡生, 叶景峰, 等. 同带泵浦千瓦级掺铥光纤激光器输出特性理论模拟[J]. 中国激光, 2022, 49(1): 0101019.
- Tao M M, Ye X S, Ye J F, et al. Modeling In-band pumped kW level high-power Tm-doped fiber lasers via simulations[J]. Chinese Journal of Lasers, 2022, 49(1): 0101019.
- [44] Shen Y J, Yao B Q, Duan X M, et al. 103 W in-band dual-end-pumped Ho: YAG laser[J]. Optics Letters, 2012, 37(17): 3558-3560.
- [45] Duan X M, Yao B, Wang Y. 146.4-W end-pumped slab Ho:YAG laser with two crystals[J]. Quantum Electronics, 2018, 48(8): 691-694.
- [46] Tang J W, Li E H, Wang F, et al. High power Ho: YAP laser with 107 W of output power at 2117 nm[J]. IEEE Photonics Journal, 2020, 12(2): 1501107.
- [47] Wang Q C, Long Q L, Gao Y, et al. High-efficiency Ho:YLF slab laser with 125 W continuous-wave output power[J]. Applied Optics, 2021, 60(26): 8046-8049.
- [48] 湛鸿伟, 沈炎龙, 陶蒙蒙, 等. 基于 1150 nm 光纤激光抽运的中红外掺钬光纤激光器[J]. 中国激光, 2017, 44(8): 0801009.
- Chen H W, Shen Y L, Tao M M, et al. Mid-infrared Ho-doped fiber laser pumped by 1150 nm fiber laser[J]. Chinese Journal of Lasers, 2017, 44(8): 0801009.
- [49] 于秀明, 丁云飞, 马万卓, 等. 2.1  $\mu\text{m}$  可调谐多波长掺钬光纤激光器[J]. 应用光学, 2019, 40(3): 500-504.
- Yu X M, Ding Y F, Ma W Z, et al. Tunable multi-wavelength holmium-doped fiber laser operating at 2.1  $\mu\text{m}$  [J]. Journal of Applied Optics, 2019, 40(3): 500-504.
- [50] Shen D Y, Sahu J K, Clarkson W A. Highly efficient Er, Yb-doped fiber laser with 188 W free-running and  $>100$  W tunable output power[J]. Optics Express, 2005, 13(13): 4916-4921.
- [51] Jebali M A, Maran J N, LaRochelle S. 264 W output power at 1585 nm in Er-Yb codoped fiber laser using in-band pumping[J]. Optics Letters, 2014, 39(13): 3974-3977.
- [52] Shen B J, Kang H X, Chen P, et al. Performance of continuous-wave laser-diode side-pumped Er:YSGG slab lasers at 2.79  $\mu\text{m}$ [J]. Applied Physics B, 2015, 121(4): 511-515.
- [53] Xu Z, Wang P Y, Liu W F, et al. 2.94  $\mu\text{m}$  diode side pumped Er:YAG laser[J]. Proceedings of SPIE, 2017, 10254: 102540F.
- [54] Sanamyan T. Efficient cryogenic mid-IR and eye-safe Er:YAG laser[J]. Journal of the Optical Society of America B, 2016, 33(11): D1-D6.
- [55] Messner M, Heinrich A, Hagen C, et al. High brightness diode pumped Er:YAG laser system at 2.94  $\mu\text{m}$  with nearly 1 kW peak power[J]. Proceedings of SPIE, 2016, 9726: 972602.
- [56] 方聪, 王思博, 惠勇凌, 等. 掺钬中红外激光器的进展[J]. 激光与光电子学进展, 2019, 56(18): 180002.
- Fang C, Wang S B, Hui Y L, et al. Progression erbium-doped mid-infrared laser[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2019, 56(18): 180002.
- [57] Tokita S, Murakami M, Shimizu S, et al. Liquid-cooled 24 W mid-infrared Er:ZBLAN fiber laser[J]. Optics Letters, 2009, 34(20): 3062-3064.
- [58] 沈炎龙, 黄珂, 周松青, 等. 10 W 级高效率单模中红外 2.8  $\mu\text{m}$  光纤激光器[J]. 中国激光, 2015, 42(5): 0502008.
- Shen Y L, Huang K, Zhou S Q, et al. 10 W-level high efficiency single-mode mid-infrared 2.8  $\mu\text{m}$  fiber laser[J]. Chinese Journal of Lasers, 2015, 42(5): 0502008.
- [59] Fortin V, Bernier M, Bah S T, et al. 30 W fluoride glass all-fiber laser at 2.94  $\mu\text{m}$ [J]. Optics Letters, 2015, 40(12): 2882-2885.
- [60] Gu H A, Qin Z P, Xie G Q, et al. Generation of 131 fs mode-locked pulses from 2.8  $\mu\text{m}$  Er:ZBLAN fiber laser [J]. Chinese Optics Letters, 2020, 18(3): 031402.
- [61] Shen Y L, Wang Y S, Zhu F, et al. 200  $\mu\text{J}$ , 13 ns Er:ZBLAN mid-infrared fiber laser actively Q-switched by an electro-optic modulator[J]. Optics Letters, 2021, 46(5): 1141-1144.
- [62] 罗永治, 余盛全, 阴明, 等. 过渡金属离子掺杂 II-VI 族中红外激光陶瓷研究进展[J]. 人工晶体学报, 2021, 50(5): 947-958.
- Luo Y Z, Yu S Q, Yin M, et al. Research progress on transition metal ions doped II-VI group mid-infrared laser ceramics[J]. Journal of Synthetic Crystals, 2021, 50(5): 947-958.
- [63] Moskalev I S, Fedorov V V, Mirov S B. Tunable, single-frequency, and multi-watt continuous-wave  $\text{Cr}^{2+}$ : ZnSe lasers[J]. Optics Express, 2008, 16(6): 4145-4153.
- [64] 王云鹏, 王飞, 赵东旭.  $\text{Cr}^{2+}$ : ZnSe 全固态中红外激光器[J]. 中国光学, 2016, 9(5): 563-568.
- Wang Y P, Wang F, Zhao D X. All solid state Mid-IR laser of  $\text{Cr}^{2+}$ : ZnSe[J]. Chinese Optics, 2016, 9(5): 563-568.
- [65] Mirov S B, Fedorov V V, Graham K, et al. Erbium fiber laser-pumped continuous-wave microchip  $\text{Cr}^{2+}$ : ZnS and  $\text{Cr}^{2+}$ : ZnSe lasers[J]. Optics Letters, 2002, 27(11): 909-911.
- [66] Sorokin E, Sorokina I T, Mirov M S, et al. Ultrabroad continuous-wave tuning of ceramic Cr:ZnSe and Cr:ZnS lasers[C]//Advanced Solid-State Photonics 2010, January 31-February 3, 2010, San Diego, California, USA. Washington, D. C.: Optica Publishing Group, 2010: AMC2.
- [67] Moskalev I S, Mirov S, Mirov M, et al. 140 W Cr: ZnSe laser system[J]. Optics Express, 2016, 24(18): 21090-21104.
- [68] Adams J J, Bibeau C, Page R H, et al. 4.0-4.5-  $\mu\text{m}$  lasing of Fe:ZnSe below 180 K, a new mid-infrared laser material[J]. Optics Letters, 1999, 24(23): 1720-1722.
- [69] Frolov M P, Korostelin Y V, Kozlovsky V I, et al. Study of a 2-J pulsed Fe:ZnSe 4-  $\mu\text{m}$  laser[J]. Laser Physics Letters, 2013, 10(12): 125001.
- [70] Velikanov S D, Danilov V P, Zakharov N G, et al.  $\text{Fe}^{2+}$ : ZnSe laser pumped by a nonchain electric-discharge

- HF laser at room temperature[J]. *Quantum Electronics*, 2014, 44(2): 141-144.
- [71] Velikanov S D, Gavrishchuk E M, Zaretsky N A, et al. Repetitively pulsed Fe:ZnSe laser with an average output power of 20 W at room temperature of the polycrystalline active element[J]. *Quantum Electronics*, 2017, 47(4): 303-307.
- [72] Frolov M P, Korostelin Y V, Kozlovsky V I, et al. Efficient 10-J pulsed Fe:ZnSe laser at 4100 nm[C]//2016 International Conference Laser Optics (LO), June 27-July 1, 2016, St. Petersburg, Russia. New York: IEEE Press, 2016: R1-10.
- [73] Martyshekin D V, Fedorov V V, Mirov M, et al. High power (9.2 W) CW 4.15  $\mu\text{m}$  Fe:ZnSe laser[C]//Conference on Lasers and Electro-Optics, May 14-19, 2017, San Jose, California. Washington, D.C.: Optica Publishing Group, 2017: STh1L.6.
- [74] Uehara H, Tsunai T, Han B Y, et al. 40 kHz, 20 ns acousto-optically Q-switched 4  $\mu\text{m}$  Fe:ZnSe laser pumped by a fluoride fiber laser[J]. *Optics Letters*, 2020, 45(10): 2788-2791.
- [75] Kazarinov R F, Suris R A. Possibility of the amplification of electromagnetic waves in a semiconductor with a superlattice[J]. *Soviet Physics Semiconductors*, 1971, 5(4): 707-709.
- [76] Faist J, Capasso F, Sivco D L, et al. Quantum cascade laser[J]. *Science*, 1994, 264(5158): 553-556.
- [77] Faist J, Capasso F, Sirtori C, et al. High power mid-infrared ( $\lambda \sim 5 \mu\text{m}$ ) quantum cascade lasers operating above room temperature[J]. *Applied Physics Letters*, 1996, 68(26): 3680-3682.
- [78] Colombelli R, Capasso F, Gmachl C, et al. Far-infrared surface-plasmon quantum-cascade lasers at 21.5  $\mu\text{m}$  and 24  $\mu\text{m}$  wavelengths[J]. *Applied Physics Letters*, 2001, 78(18): 2620-2622.
- [79] Beck M, Hofstetter D, Aellen T, et al. Continuous wave operation of a mid-infrared semiconductor laser at room temperature[J]. *Science*, 2002, 295(5553): 301-305.
- [80] Colombelli R, Srinivasan K, Troccoli M, et al. Quantum cascade surface-emitting photonic crystal laser[J]. *Science*, 2003, 302(5649): 1374-1377.
- [81] Maulini R, Mohan A R, Giovannini M, et al. External cavity quantum-cascade laser tunable from 8.2 to 10.4  $\mu\text{m}$  using a gain element with a heterogeneous cascade[J]. *Applied Physics Letters*, 2006, 88(20): 201113.
- [82] Xu G Y, Colombelli R, Braive R, et al. Surface-emitting mid-infrared quantum cascade lasers with high-contrast photonic crystal resonators[J]. *Optics Express*, 2010, 18(11): 11979-11989.
- [83] Blanchard R, Mansuripur T S, Gökden B, et al. High-power low-divergence tapered quantum cascade lasers with plasmonic collimators[J]. *Applied Physics Letters*, 2013, 102(19): 191114.
- [84] Zhao G. Frequency stabilization of a quantum cascade laser by weak resonant feedback from a Fabry-Perot cavity[J]. *Optics Letters*, 2021, 46(13): 3057-3060.
- [85] 宋淑芳, 邢伟荣, 刘铭. 量子级联激光器的原理及研究进展[J]. *激光与红外*, 2013, 43(9): 972-976.
- Song S F, Xing W R, Liu M. Theory and research advancement of quantum cascade lasers[J]. *Laser & Infrared*, 2013, 43(9): 972-976.
- [86] 王珂, 蔡军, 丁宇, 等. 中红外量子级联激光器偏振合束实验研究[J]. *红外与激光工程*, 2022, 51(8): 20210679.
- Wang K, Cai J, Ding Y, et al. Experimental study on polarization beam combining of mid-infrared quantum cascade laser[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2022, 51(8): 20210679.
- [87] 郭丽媛, 马勇, 祁峰, 等. 非氧化物晶体应用于长波红外光源的研究进展[J]. *重庆邮电大学学报(自然科学版)*, 2021, 33(2): 230-241.
- Guo L Y, Ma Y, Qi F, et al. Research progress of non-oxide crystals applied in long-wave infrared sources[J]. *Journal of Chongqing University of Posts and Telecommunications (Natural Science Edition)*, 2021, 33(2): 230-241.
- [88] Pine A S. Doppler-limited molecular spectroscopy by difference-frequency mixing[J]. *Journal of the Optical Society of America*, 1974, 64(12): 1683-1690.
- [89] Okorogu A O, Mirov S B, Lee W, et al. Tunable middle infrared downconversion in GaSe and AgGaS<sub>2</sub>[J]. *Optics Communications*, 1998, 155(4/5/6): 307-312.
- [90] Haidar S, Miyamoto K, Ito H. Generation of continuously tunable, 5-12  $\mu\text{m}$  radiation by difference frequency mixing of output waves of a KTP optical parametric oscillator in a ZnGeP<sub>2</sub> crystal[J]. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 2004, 37(23): 3347-3349.
- [91] Finsterbusch K, Bayer A, Tunable Zacharias H., narrow-band picosecond radiation in the mid-infrared by difference frequency mixing in GaSe and CdSe[J]. *Applied Physics B*, 2004, 79(4): 457-462.
- [92] Wang L S, Cao Z S, Wang H, et al. A widely tunable (5-12.5  $\mu\text{m}$ ) continuous-wave mid-infrared laser spectrometer based on difference frequency generation in AgGaS<sub>2</sub>[J]. *Optics Communications*, 2011, 284(1): 358-362.
- [93] Yang F, Yao J Y, Xu H Y, et al. High efficiency and high peak power picosecond mid-infrared optical parametric amplifier based on BaGa<sub>4</sub>Se<sub>7</sub> crystal[J]. *Optics Letters*, 2013, 38(19): 3903-3905.
- [94] Yang F, Yao J Y, Xu H Y, et al. Midinfrared optical parametric amplifier with 6.4-11  $\mu\text{m}$  range based on BaGa<sub>4</sub>Se<sub>7</sub>[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2015, 27(10): 1100-1103.
- [95] Sun M G, Cao Z S, Yao J Y, et al. Continuous-wave difference-frequency generation based on BaGa<sub>4</sub>Se<sub>7</sub> crystal[J]. *Optics Express*, 2019, 27(4): 4014-4023.
- [96] Hu S W, Wang L, Guo Y W, et al. High-conversion-efficiency tunable mid-infrared BaGa<sub>4</sub>Se<sub>7</sub> optical parametric oscillator pumped by a 279- $\mu\text{m}$  laser[J]. *Optics Letters*, 2019, 44(9): 2201-2203.
- [97] Rahlff C, Tang Y, Sibbett W, et al. High-repetition-rate, mid-infrared KTA-OPO at 3.44  $\mu\text{m}$ [C]//Conference on Lasers and Electro-Optics 1996, June 2-7, 1996, Anaheim, California, United States. Washington, D.C.: Optica Publishing Group, 1996: CWF16.

- [98] Andriukaitis G, Balčiūnas T, Ališauskas S, et al. 90 GW peak power few-cycle mid-infrared pulses from an optical parametric amplifier[J]. *Optics Letters*, 2011, 36(15): 2755-2757.
- [99] Bosenberg W R, Drobshoff A, Alexander J I, et al. 93% pump depletion, 3.5-W continuous-wave, singly resonant optical parametric oscillator[J]. *Optics Letters*, 1996, 21(17): 1336-1338.
- [100] Burr K C, Tang C L, Arbore M A, et al. Broadly tunable mid-infrared femtosecond optical parametric oscillator using all-solid-state-pumped periodically poled lithium niobate[J]. *Optics Letters*, 1997, 22(19): 1458-1460.
- [101] Chen D W, Rose T S. Low noise 10 W cw OPO generation near 3  $\mu\text{m}$  with MgO doped PPLN[C]// *Conference on Lasers and Electro-Optics*, May 22-27, 2005, Baltimore, Maryland, United States. Washington, D.C.: Optica Publishing Group, 2005: CThQ2.
- [102] Kemlin V, Jegouso D, Debray J, et al. Widely tunable optical parametric oscillator in a 5 mm thick 5% MgO: PPLN partial cylinder[J]. *Optics Letters*, 2013, 38(6): 860-862.
- [103] Liu S D, Wang Z W, Zhang B T, et al. Wildly tunable, high-efficiency MgO:PPLN mid-IR optical parametric oscillator pumped by a Yb-fiber laser[J]. *Chinese Physics Letters*, 2014, 31(2): 024204.
- [104] Murray R T, Runcorn T H, Guha S, et al. High average power parametric wavelength conversion at 3.31-3.48  $\mu\text{m}$  in MgO:PPLN[J]. *Optics Express*, 2017, 25(6): 6421-6430.
- [105] 何洋, 陈飞, 万浩华, 等. 光纤激光泵浦 MgO:PPLN 高功率中波红外光参量振荡器[J]. *强激光与粒子束*, 2022, 34(3): 031003.  
He Y, Chen F, Wan H H, et al. Fiber-laser-pumped high-power mid-infrared optical parametric oscillator based on MgO:PPLN crystal[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2022, 34(3): 031003.
- [106] Hanna D C, Luther-Davies B, Smith R C. Singly resonant proustite parametric oscillator tuned from 1.22 to 8.5  $\mu\text{m}$  [J]. *Applied Physics Letters*, 1973, 22(9): 440-442.
- [107] Boyko A A, Marchev G M, Petrov V, et al. Intracavity-pumped, cascaded AgGaSe<sub>2</sub> optical parametric oscillator tunable from 5.8 to 18  $\mu\text{m}$ [J]. *Optics Express*, 2015, 23(26): 33460-33465.
- [108] Tyazhev A, Vedenyapin V, Marchev G, et al. Singly-resonant optical parametric oscillation based on the wide band-gap mid-IR nonlinear optical crystal LiGaS<sub>2</sub>[J]. *Optical Materials*, 2013, 35(8): 1612-1615.
- [109] Hemming A, Richards J, Davidson A, et al. 99 W mid-IR operation of a ZGP OPO at 25% duty cycle[J]. *Optics Express*, 2013, 21(8): 10062-10069.
- [110] Wang L, Xing T L, Hu S W, et al. Mid-infrared ZGP-OPO with a high optical-to-optical conversion efficiency of 75.7%[J]. *Optics Express*, 2017, 25(4): 3373-3380.
- [111] Qian C P, Yao B Q, Zhao B R, et al. High repetition rate 102 W middle infrared ZnGeP<sub>2</sub> master oscillator power amplifier system with thermal lens compensation [J]. *Optics Letters*, 2019, 44(3): 715-718.
- [112] Yao J Y, Mei D J, Bai L, et al. BaGa<sub>4</sub>Se<sub>7</sub>: a new congruent-melting IR nonlinear optical material[J]. *Inorganic Chemistry*, 2010, 49(20): 9212-9216.
- [113] Yuan J H, Li C, Yao B Q, et al. High power, tunable mid-infrared BaGa<sub>4</sub>Se<sub>7</sub> optical parametric oscillator pumped by a 2.1  $\mu\text{m}$  Ho: YAG laser[J]. *Optics Express*, 2016, 24(6): 6083-6087.
- [114] Zhao B R, Chen Y, Yao B Q, et al. High-efficiency, tunable 8-9  $\mu\text{m}$  BaGa<sub>4</sub>Se<sub>7</sub> optical parametric oscillator pumped at 2.1  $\mu\text{m}$ [J]. *Optical Materials Express*, 2018, 8(11): 3332-3337.
- [115] Kostyukova N Y, Boyko A A, Badikov V, et al. Widely tunable in the mid-IR BaGa<sub>4</sub>Se<sub>7</sub> optical parametric oscillator pumped at 1064 nm[J]. *Optics Letters*, 2016, 41(15): 3667-3670.
- [116] Boyko A A, Kostyukova N Y, Badikov V, et al. Intracavity difference-frequency mixing of optical parametric oscillator signal and idler pulses in BaGa<sub>4</sub>Se<sub>7</sub>[J]. *Applied Optics*, 2017, 56(10): 2783-2786.
- [117] Xu W T, Wang Y Y, Xu D G, et al. High-pulse-energy mid-infrared optical parametric oscillator based on BaGa<sub>4</sub>Se<sub>7</sub> crystal pumped at 1.064  $\mu\text{m}$ [J]. *Applied Physics B*, 2017, 123(3): 80.
- [118] He Y X, Xu D G, Yao J Y, et al. Intracavity-pumped, mid-infrared tandem optical parametric oscillator based on BaGa<sub>4</sub>Se<sub>7</sub> crystal[J]. *IEEE Photonics Journal*, 2019, 11(6): 1300109.
- [119] 张永平, 刘永方, 贾大功. 基于 BGSe 晶体的电控可调谐中红外激光器设计[J]. *应用激光*, 2021, 41(4): 839-842.  
Zhang Y P, Liu Y F, Jia D G. Design of electrically controlled tunable mid infrared laser based on BGSe crystal[J]. *Applied Laser*, 2021, 41(4): 839-842.