

光抽运中红外气体激光器

陈育斌 王红岩 陆启生 司磊

国防科学技术大学光电科学与工程学院, 湖南长沙 410073

摘要 光抽运中红外气体激光器可以实现高光束质量、高能中红外激光输出, 具有高量子效率、气体介质易于流动散热、可定标放大以及结构紧凑等特点, 表现出巨大的发展潜力。概述了光抽运中红外气体激光器基本原理, 回顾了其发展历史, 分析总结了其发展的重点、难点所在, 并预测了未来的发展趋势。

关键词 激光器; 光抽运中红外气体激光器; 气体; 光纤激光器

中图分类号 TN248.2; O436 **文献标识码** A

doi: 10.3788/LOP52.010005

Optically Pumped Mid-Infrared Gas Lasers

Chen Yubin Wang Hongyan Lu Qisheng Si Lei

*College of Opto-Electronic Science and Engineering, National University of Defense Technology,
Changsha, Hunan 410073, China*

Abstract Optically pumped mid-infrared gas laser is a potential way to achieve high beam quality and high power mid-infrared laser output, showing great development prospective in the future due to its extremely high quantum efficiency, outstanding heat dissipation, great ability for power scaling and extraordinary compactness. The basic principle and history of optically pumped mid-infrared gas laser are introduced, the critical blocks and difficulties in its progress are analyzed, and the expectation of optically pumped mid-infrared gas laser is forecasted

Key words laser; optically pumped mid-infrared gas laser; gas; fiber laser

OCIS codes 140.3340; 140.4130; 140.3070

1 引言

中红外激光器, 尤其是 2~5 μm 中红外激光器在大气远距离传输、红外遥感、激光雷达、通信、化学检测、分子光谱检测等方面有巨大的应用价值^[1-2]。目前, 注入锁频的掺 Tm、Ho 固体激光器能够实现单纵模、窄线宽的中红外输出^[3]; 掺 Tm、Ho 的光纤激光器也已经达到千瓦功率水平^[4], 光束质量接近衍射极限^[5]; 但是全固态激光器尚难以实现 3 μm 以上中红外输出。虽然光学参量振荡器(OPO)中红外光谱较宽, 但受限于晶体的热效应难以向大功率发展^[6]。量子级联的半导体激光器^[7]可以实现 3~25 μm 的中远红外输出, 但是转换效率低下^[8-9], 大功率运行存在严重的热管理问题。总的来说, 无论是固体、光纤、OPO 还是量子级联激光器目前都难以实现 3 μm 以上长波段的大功率激光。鉴于中红外光源的巨大应用价值以及目前紧凑型光源紧缺的实际, 近年来光抽运中红外气体激光器又得到了科学界的重视。

中红外气体激光器涵盖的分子输出波长非常丰富、介质易于流动散热、热损伤阈值高^[1-10], 当采用全固态抽运源时, 能够实现紧凑的结构。更为重要的是, 光抽运气体激光器一直被认为是实现高光束质量、高能激光输出的有效途径。比如碱金属蒸汽激光器就具有量子效率高、输出光束质量好、可定标放大等优越性能^[11-14], 目前流动介质的半导体抽运 Cs 蒸气激光器已经实现 1 kW 的激光输出^[15]。早在 20 世纪 70 年代, 美国空军研究实验室^[16]就关注并重视光抽运中红外气体激光器的发展, 但因为气态原子、分子的能级结构特性决定了

收稿日期: 2014-06-09; 收到修改稿日期: 2014-08-13; 网络出版日期: 2014-11-28

作者简介: 陈育斌(1986—), 男, 博士研究生, 主要从事光抽运中红外气体激光器方面的研究。

E-mail: 13677334110@139.com

导师简介: 陆启生(1942—), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事高能激光技术、激光与物质相互作用等方面的研究。

E-mail: luqisheng@public.cs.bn.cn

其对抽运源指标要求比较高,所以发展比较缓慢,直到最近又重新迎来发展的巨大机遇。

本文系统地综述了光抽运气体激光器,特别是光抽运中红外气体激光器的原理、发展历程。通过对其20世纪70年代、90年代,以及近年来3个发展阶段特点的分析,总结了光抽运中红外气体激光器的重点和难点所在,最后,基于近两年2 μm 单频脉冲光纤激光器的飞速发展,提出了一种光纤抽运的中红外气体激光器。

2 基本工作原理

光抽运气体激光器基本覆盖了紫外到毫米波段的光谱范围^[1-2,10],引起了人们的高度关注。图1所示为光抽运气体激光器的波长覆盖范围^[2]。

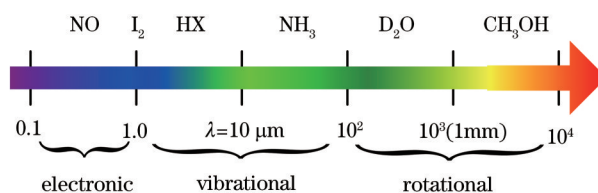


图1 光抽运气体激光器的波长覆盖范围

Fig.1 Wavelength range of optically pumped mid-infrared gas lasers

光抽运中红外气体激光器的增益介质为气态的分子气体,包括强极性的双原子分子气体,如卤化氢(HX)类的HF、DF、HBr、HCl、HI和CO等,以及CO₂、NH₃等多原子分子气体。气体分子一般具有由振动量子数 v 和转动量子数 J 决定的振转能级结构^[17-18],如图2所示。振转能级结构中,相邻振动能级基本等间距,又由于振动的失谐性导致相邻振动能级间距的微小差异;存在基频跃迁、泛频跃迁两种跃迁方式,但是泛频跃迁的爱因斯坦系数要比基频低一个量级;跃迁选择定则决定其电子基态的振转动支只能有P支和R支,一般情况下P支的简并使得其强度大于R支,所以在实际的激光器中,一般仅存在P支激光跃迁,比如化学激光器和CO激光器。

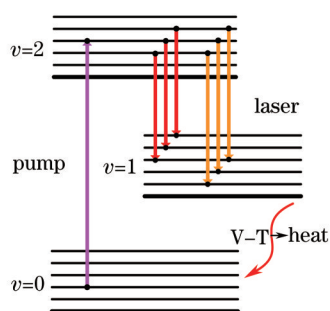


图2 气体分子能级结构

Fig.2 Schematic energy level diagram of gas molecule

常温下,分子绝大部分处于振动基态,处于高阶振动态的粒子几乎为零,因此只要将基态的粒子抽运到激光上能级比如 $v=2$,这时候在 $v=2$ 和 $v=1$ 之间就能很快形成粒子数反转。事实上,还存在弛豫过程与之相竞争,根据其特征时间差异,分为转动弛豫和振动弛豫,转动弛豫导致能量在不同转动能级上的重新分配,而振动弛豫是指在不同振动能级的能量转移,比如HF分子的转动弛豫速率大约为 $10^{-10} \text{ cm}^3/\text{s}$ 量级,弛豫时间在纳秒量级,转动弛豫过程会导致多谱线输出同时削弱激光的增益。振动弛豫最快能达到微秒量级,剧烈的振动弛豫会大量消耗上能级反转粒子数导致激光增益的降低。为了减弱弛豫过程对激发态气体分子的去激活作用,激光器一般工作在低气压条件下,大约为0.01~0.1 MPa。多普勒加宽在低压条件下起主导作用,导致气体的吸收线宽很窄大约在百兆赫兹量级。

总的来说,这些特点决定了对抽运源的要求:

1) 谱线要对准,指抽运波长对准气体吸收中心波长,要求抽运源具备一定的波长调谐能力,并且可以通用稳频装置实现频率稳定;

2) 线宽要匹配,气体分子吸收线宽为百兆赫兹,要求抽运线宽要与之匹配才能提高抽运吸收效率,提供足够的抽运强度;

3) 脉冲抽运,为了保证在上能级弛豫寿命内有效抽取反转能量,一般采用纳秒量级的短脉冲抽运方式。

3 发展历史

光抽运气体激光器兴起于20世纪70年代初期,在四十几年的发展过程中,随着抽运源技术以及结构的发展,光抽运中红外气体激光器的发展经历了3个发展机遇期。

3.1 兴起时期

20世纪70年代是光抽运中红外气体激光器的兴起时期,科学家以脉冲化学激光器、CO₂激光器作为抽运源开展了大量的实验。这一时期,化学激光器飞速发展,需要大量的实验来完成对化学激光介质特征弛豫速率等参数的测量。一方面,化学激光器可以直接作为气体激光器的抽运源,另一方面光抽运激光器的研究可以为化学激光器积累广泛的实验数据。

1972年,美国贝尔实验室^[19]最先报道了第一台光抽运中红外气体激光器,气体放电脉冲HBr化学激光器作为抽运源抽运CO₂气体,产生了10.6 μm的脉冲中红外激光输出,峰值功率为80 W。随后,气体放电脉冲HF、DF化学激光器以及CO、CO₂等气体激光器也被作为抽运源,应用于光抽运中红外气体激光器中。

随着气体弛豫过程理论研究的深入发展,光抽运传能激光器作为研究弛豫过程的有效工具得到了重视。比如光抽运CO-C₂H₂传能激光器^[20],CO分子与C₂H₂分子的振动传能产生了8 μm的中远红外连续波输出。以CO作为传能分子的光抽运CO-OCS(羰基硫)、CO-CO₂、CO-N₂O、CO-C₂H₂、CO-CS₂传能激光器^[21]也相继报道,典型地以倍频横向受激大气压(TEA)CO₂激光器作为抽运源。以HF/DF化学激光器为抽运源,HF/DF分子为传能分子的有HF-HCN/DF^[22-23]、DF-CO₂/N₂O/HBr^[24-25]为代表的化学激光器抽运的传能激光器。

随着HF/DF为代表的化学激光器发展渐趋成熟以及磁偶极电子态跃迁氧碘化学激光器^[26]的大力发展,化学激光器对光抽运气体激光器的推动力正在减弱;从光源的角度讲,难以克服抽运源结构复杂、体积庞大的缺点,无法推向实用;于是,光抽运中红外气体激光器在20世纪80年代进入了一段缓慢的发展时期。

3.2 迅速发展时期

20世纪90年代起,以美国空军研究实验室(AFRL)为代表的研究单位对于HX和CO的2~5 μm波段的光抽运气体激光器展开了广泛的研究,在90年代先后相继报道了光抽运HF、DF、HCl、HBr、CO激光器^[27-31]。这一时期,2~5 μm中红外光源在大气远距离传输、红外遥感、激光雷达等领域存在巨大的应用需求,并且Nd:YAG、Nd:glass、Tm:YAG、Ho:YLF等近红外固体激光器的发展、商业化程度的不断提高^[1-2]为光抽运气体激光器提供了合适的抽运源,促使了光抽运中红外气体激光器的迅速发展。

Miller等^[32]于1993年最先报道了光抽运的HF激光器,以低功率的染料激光器作为抽运源泛频抽运HF,产生(2,0)振动带的2.7 μm激光。接着,建立了短脉冲光抽运HF激光器理论模型^[33],该模型重点考虑了光抽运项和转动弛豫项,耦合了15个转动弛豫项以分析转动弛豫过程对抽运吸收效率的重要影响。后来,又报道了光抽运HBr激光器^[34],该激光器以Nd:YAG抽运的2 μm脉冲OPO激光器作为抽运源,P支泛频抽运HBr气体,通过基频跃迁产生4 μm的中红外激光输出。抽运脉宽为纳秒量级,线宽小于500 MHz,在吸收3.47 mJ抽运能量后单脉冲最大输出0.85 mJ,转换效率达24%。值得一提的是,著名固体激光器制造商Aculight^[35]公司为AFRL推出20 W的全固态Tm:YAG泵源,输出波长2 μm、重频5 kHz,专门用于HBr激光,标志着光抽运中红外气体激光器的发展高潮。对于光抽运卤化氢中红外气体激光器,AFRL专门申请了一系列专利,以保护这种实用紧凑型并有望实现大功率输出的中红外光源,专利中所用抽运源为近红外紧凑型光源,如半导体抽运的Tm:YAG固体激光器^[36]等。

到了90年代后期,美国有关光抽运中红外气体激光器研究的相关工作在New Mexico大学得到了延续,并于2004年报道了调Q的Nd:YAG固体激光抽运HBr气体激光器,产生(3,2)、(2,1)振动带的4 μm级联输出^[31]。2010年,Amarin等^[10,37]在原有的基础上继续光泵HBr气体的研究,并探索了用1.5 μm的OPO激光抽运C₂H₂和HCN产生3 μm中红外输出的可行性。2011年,Ratanavis^[38]又报道了光抽运HI激光器的理论研究,继续光抽运中红外气体激光器的相关工作。

在美国大量开展光抽运中红外气体激光器研究的同时,其他国家也对2~5 μm光抽运中红外气体激光器进行实验和数值模拟研究。1997年,法国报道了Cr⁴⁺:Forsterite抽运HF、DF激光器^[39];2000年,意大利报道

了用于光抽运 HBr 激光器的可调谐稳频 Tm:Ho:YAG 固体激光器抽运源^[40];同年,俄罗斯报道了 2.5~4.2 μm 光抽运 CO 气体激光器^[41],并进行了理论模拟^[42]。

表 1 列出了主要的光抽运中红外卤化氢激光器的研究成果,受限于现有短脉冲、窄线宽 2 μm 中红外抽运源发展水平,激光器实际转换效率普遍较低,最高只达到 24%,远低于 70%^[38]的理论计算水平。相信在将来随着抽运源技术的成熟,实际激光器转换效率将有大幅度的提高。

表 1 HX 型光抽运中红外气体激光器主要研究成果

Table 1 Experimental results of HX type optically pumped mid-infrared gas laser

Year	Institute	Gas	Pumped source	Pulse energy /mJ	Efficiency /%
1994	AFRL	HBr	OPO linewidth 500 MHz, duration 10 ns	0.85	24
1996	PSI	HF/DF/HBr	Raman/Dye linewidth 0.12 cm^{-1} , duration 8 ns	0.02	20
2004	UNM	HBr	Nd:YAG duration 400 ns	-	-
2009	CSIR	HBr	Ho:YLF duration 366 ns	2.5	12
2010	UNM	HBr/C ₂ H ₂ /HCN	Raman/dye or OPO	-	-
2011	UKM	HI	OPO	-	-
2014	CSIR	HBr	Ho:YLF linewidth 400 MHz, duration 370 ns	2.4	6.3

3.3 最新发展

最近十几年来,随着大功率半导体激光器的成熟以及包层抽运技术的发展,光纤激光器扮演了越来越重要的角色,结合光纤的发展,光抽运中红外气体激光器又有了新的发展。

2009 年,南非科学和工业研究委员会(CSIR)报道了光抽运 HBr 气体激光器^[43],采用掺 Tm 光纤抽运的 Ho:YLF 激光器为抽运源,单脉冲输出能量最高达 2.5 mJ,是目前报道的光抽运 HBr 气体激光器最高单脉冲能量输出。最近,CSIR 再次报道了以 Ho:YLF 激光器抽运的 HBr 中红外选线激光器^[44],利用腔内闪耀光栅实现了 3.87~4.014 μm 以及 4.07~4.453 μm 的中红外选线输出,并在 4.133 μm 获得 2.4 mJ 最大单脉冲输出。CSIR 报道的光抽运 HBr 激光器虽然获得了较高的单脉冲能量,但是激光器能量转换效率比较低,主要是因为 366 ns 的抽运脉宽相比于 HBr 气体上能级的弛豫寿命过长,弛豫过程消耗了大量的上能级反转粒子数;其次,采用吸收效率较低的 P₂₋₀(9)支抽运;再者,在选线激光器中,由于使用的衍射光栅效率较低,增加了腔内损耗,进一步降低了系统的能量转换效率。

进入 21 世纪,随着空芯光子晶体光纤这种长程吸收结构气体池的发展^[45],出现了光抽运空芯光子晶体光纤激光器,该激光器可以将抽运光完全约束于光纤之中,具有对抽运光很好的吸收效果^[46-47],同时结合了光纤和气体的优点,输出光束质量接近衍射极限,是一种很有前景的大功率中红外光源。在由美国 New Mexico 大学、Kansas State 大学以及英国 Bath 大学研究人员联合署名的一篇综述文献中指出^[48]:空芯光子晶体光纤的非线性效应阈值要比常规固态纤芯光纤高几个量级,损伤阈值也远高于常规固态纤芯光纤,比如固态纤芯光纤的 SBS 阈值为 50 W,而空芯光子晶体光纤则能高达 10 MW;固态纤芯光纤的损伤阈值为 1.3 GW/cm²,而空芯光子晶体光纤的损伤阈值可达 30 GW/cm²;采用介质循环的空芯光子晶体光纤^[49]还能进一步提高激光器的效率。目前 New Mexico 大学、Kansas State 大学以及 Bath 大学关于光抽运空芯光子晶体光纤激光器的报道比较多。2010 年,New Mexico 大学^[50]以脉冲 OPO 激光器抽运 C₂H₂ 以及 HCN 气体,进行光抽运空芯光子晶体光纤的初步研究。接着,以充 C₂H₂ 气体的空芯光子晶体光纤为增益介质^[51-52],首次验证了光纤中的粒子数反转^[53-54]。同时,英国 Bath 大学分别就纳秒量级脉宽的 2 μm 光纤抽运源^[55]、3~4 μm 波段的低损耗空芯光子晶体光纤^[56]以及抽运光在空芯光子晶体光纤中的传输^[57]等问题进行了相关的研究。由于光纤在中红外波段的强吸收损耗,光抽运空芯光子晶体光纤无法实现 3.5 μm 以上的激光输出^[48],人们提出了一种可以实现中远红外输出的波导气体激光器^[58-59],该激光器以具有波导结构的毛细管代替空芯光子晶体光纤^[60-61],可以将抽运源有效地约束在波导中,增强抽运吸收,目前这种类型的激光器还处于起步发展阶段。

最近几年,随着掺 Tm、Ho 光纤激光器的迅猛发展,光抽运中红外气体激光器又迎来了新的发展机遇。Tm、Ho 光纤激光器是实现 2 μm 波段中红外激光的有效手段^[62],继 2007 年 IPG 公司^[5]报道的 415 W 全光纤

掺Tm光纤激光器之后,掺Tm光纤激光放大器^[63]已经获得大于1 kW的功率输出;主振荡功率放大结构的单频脉冲掺Tm光纤激光器已经能够实现脉宽为几十纳秒、峰值功率达到千瓦量级的2 μm中红外输出^[64-67];Tm、Ho共掺的光纤激光器已达到了83 W的功率水平^[68],输出波长比掺Tm光纤更长;掺Ho光纤激光器也已经实现400 W以上的功率水平^[69],被认为是实现2.1 μm波段最有前景的方法;而脉冲的全光纤结构Q开关掺Ho激光器已经获得20 ns脉宽2 kW峰值功率的激光输出^[70]。Tm、Ho光纤激光器发展迅速、成果日新月异,未来2 μm掺Tm、Ho光纤激光器将会达到更高的发展水平,更为重要的是,其波长恰好对应HBr气体的吸收带,可以作为HBr激光器的抽运源。因此,预期以掺Tm、Ho等2 μm光纤激光器为抽运源的光泵中红外气体激光器必将迎来新的发展,当单路光纤激光器泵源峰值功率不够时,可以利用光纤的易拓展性和多个抽运源实现功率定标放大从而实现高光束质量的大功率中红外输出。

4 结 论

纵观中红外气体激光器的发展历史,存在几个因素制约其全面发展,主观方面:由于分子的结构决定了必须使用窄线宽脉冲抽运源,目前,窄线宽、高峰值功率、短脉冲抽运源尚不成熟,商业化程度不高等因素限制了光抽运中红外气体激光器的发展;客观方面:随着固体、光纤近红外、中红外技术的发展,近、中红外固体、OPO、光纤激光器对光抽运中红外气体激光器形成很大的竞争压力。

总体而言,未来光抽运中红外气体激光器的发展存在几个难题:首先要解决抽运源高成本、商业化程度不够的问题;其次,气体吸收截面小,泛频吸收系数小,如何解决在有限的条件下增强抽运吸收的难题;空芯光子晶体光纤虽然具有长程抽运吸收结构,但是模体积极有限,如何实现大功率输出也是一个难题。随着光纤激光器等抽运源的成熟以及商业化,以上难题将得到解决,光抽运中红外气体激光器将在中红外高能激光领域扮演越来越重要的角色。

参 考 文 献

- 1 Ratanavis A. Optically pumped molecular gas lasers in mid infrared region[J]. The Journal of Applied Science, 2011, 10 (2): 95-102.
- 2 Jones R C. Review of laser-pumped molecular lasers[C]. SPIE, 1995, 2502: 460-468.
- 3 Dai Tongyu. Research on Injection-Seeded Holmium Single-Doped Laser[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 299013.
戴通宇. 单掺Ho注入锁频激光器研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2013.
- 4 Zhou Renlai. Study on All Fiber Tm³⁺-Doped Pulse Laser and Amplifier[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2013.
周仁来. 全光纤掺Tm³⁺脉冲激光器及放大器的研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2013.
- 5 Meleshkevich M, Platonov N, Gapontsev D, *et al.* 415 W single-mode CW thulium fiber laser in all-fiber format[C]. The European Conference on Lasers and Electro-Optics, 2007.
- 6 He Z, Jiang C, Huang K, *et al.* Research on quasi-phase-matched mid-infrared optical parametric oscillator[C]. SPIE, 2013, 8796: 87962E.
- 7 Yao Y, Hoffman A J, Gmachl C F. Mid-infrared quantum cascade lasers[J]. Nature Photonics, 2012, 6(7): 432-439.
- 8 Cockburn J. Mid-infrared quantum cascade lasers[J]. Mid-infrared Semiconductor Optoelectronics, 2006, 118: 323-355.
- 9 Edeagu S O. Mid-infrared quantum cascade lasers[J]. Nigerian Journal of Technology, 2012, 31(3): 227-232.
- 10 Amarín R. Theoretical and Experimental Studies of Optically Pumped Molecular Gas Lasers[D]. Albuquerque: The University of New Mexico, 2010.
- 11 Krupke W F, Beach R J, Kanz V K, *et al.* Resonance transition 795-nm rubidium laser[J]. Optics Letters, 2003, 28(23): 2336-2338.
- 12 Zhdanov B V, Ehrenreich T, Knize R J. Highly efficient optically pumped cesium vapor laser[J]. Optics Communications, 2006, 260(2): 696-698.
- 13 Zhdanov B V, Stooke A, Boyadjian G, *et al.* Rubidium vapor laser pumped by two laser diode arrays[J]. Optics Letters, 2008, 33(5): 414-415.

- 14 Yang Zining, Wang Hongyan, Lu Qisheng, *et al.*. Research development of laser diode pumped alkali lasers[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2010, 47(5): 051405.
杨子宁, 王红岩, 陆启生, 等. 半导体抽运碱金属蒸气激光器研究进展[J]. *激光与光电子学进展*, 2010, 47(5): 051405.
- 15 Bogachev A V, Garanin S G, Dudov A M, *et al.*. Diode-pumped caesium vapour laser with closed-cycle laser-active medium circulation[J]. *Quantum Electronics*, 2012, 42(2): 95-98.
- 16 Jones C R. Optically pumped mid IR lasers[J]. *Laser Focus*, 1978, 14: 68-74.
- 17 Gross R W F, Bott J F. *Handbook of Chemical Lasers*[M]. Beijing: Science Press, 1987.
格罗斯, 博特. *化学激光手册*[M]. 北京: 科学出版社, 1987.
- 18 Zhou Binkun, Gao Yizhi, Chen Jiahua. *Principles of Lasers*[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 1995.
周炳琨, 高以智, 陈家骅. *激光原理*[M]. 北京: 国防工业出版社, 1995.
- 19 Chang T Y, Wood I O R. Optically pumped atmospheric-pressure CO₂ laser[J]. *Applied Physics Letters*, 1972, 21(1): 19-21.
- 20 Stregack J A, Wexler B L, Hart G A. CW CO-CS₂, CO-C₂H₂, and CO-N₂O energy-transfer lasers[J]. *Applied Physics Letters*, 1975, 28(3): 137-139.
- 21 Kildal H, Deutsch T F. Optically pumped infrared V-V transfer lasers[J]. *Applied Physics Letters*, 1975, 27(9): 500-502.
- 22 Finzi J, Wang J, Hui K K, *et al.*. CW HF/HCN and HF/DF optical resonance transfer lasers[J]. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 1980, 16(9): 912-914.
- 23 Wang J, Finzi J, Baily P K, *et al.*. CW optical resonance transfer lasers (ORTL)[J]. *Le Journal de Physique Colloques*, 1980, 41(C9): C9-463-C9-469.
- 24 Azarov M A, Iskhakov V A, Mashendzhinov V I, *et al.*. Computer modelling of the pulsed DF-HBr optical resonance transfer laser (ORTL)[C]. *SPIE*, 1997, 3092: 598-601.
- 25 Hui K K, Baily P K, Finzi J, *et al.*. Continuous wave DF-HBr optical resonance transfer laser[J]. *Applied Optics*, 1980, 19(6): 831-832.
- 26 Ren Guoguang, Huang Jijin. Major progress of US 2005' high-energy laser technology[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2006, 43(6): 3-9.
任国光, 黄吉金. 美国高能激光技术2005年主要进展[J]. *激光与光电子学进展*, 2006, 43(6): 3-9.
- 27 Miller H C, Mccord J, Hager G D, *et al.*. Optically pumped mid-infrared vibrational hydrogen chloride laser[J]. *Journal of Applied Physics*, 1998, 84(7): 3467-3473.
- 28 Mccord J E, Ionin A A, Phipps S P, *et al.*. Frequency-tunable optically pumped carbon monoxide laser[J]. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 2000, 36(9): 1041-1052.
- 29 Davis S J, Kessler W J, Holtzclaw K W, *et al.*. Laser-pumped gas phase mid-IR lasers[C]. *SPIE*, 1995, 2502: 469-474.
- 30 Kessler W J, Davis S J, Miller Jr H C, *et al.*. Optically pumped hydrogen fluoride laser[J]. *Journal of Applied Physics*, 1998, 83(12): 7448-7452.
- 31 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.
- 32 Miller H C, Radzykewycz D T, Hager G D, *et al.*. Gas-phase optically pumped infrared lasers[C]. *SPIE*, 1993, 1871: 2-6.
- 33 Machara N P, Hager G D. Computer modeling of an optically pumped hydrogen halide laser[C]. *SPIE*, 1993, 1871: 51-56.
- 34 Miller H C, Radzykewycz Jr D T, Hager G. An optically pumped mid-infrared HBr laser[J]. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 1994, 30(10): 2395-2400.
- 35 Lowenthal D D, Hamilton C E, Tidwell S C, *et al.*. 20-watt output power Tm:YAG laser driver for HBr mid-IR laser[C]. *SPIE*, 1995, 2502: 483-489.
- 36 Hager G, Miller H C, Radzykewycz D. Diode-Pumped Tm:YAG/HBr Four Micron Laser System: US, 005774490A[P]. 1998-6-30.
- 37 Ratanavis A, Campbell N, Rudolph W. Feasibility study of optically pumped molecular lasers with small quantum defect [J]. *Optics Communications*, 2010, 283(6): 1075-1080.
- 38 Ratanavis A. An optically pumped hydrogen iodide cascade laser operating in mid-infrared region[C]. *SPIE*, 2013, 8883: 88830.
- 39 Prigent P, Girard G M, Lavenant A, *et al.*. Experiments on optically pumped HF and DF transitions by a Cr⁴⁺:Forsterite laser[C]. *SPIE*, 1997, 3092: 589-593.

- 40 Marano M, Laporta P, Sapia A, *et al.*. Absolute frequency stabilization of a tunable Tm:Ho:YAG laser to the HBr P(12) line at 2097 nm[J]. *Optics Letters*, 2000, 25(23): 1702–1704.
- 41 Basov N G, Hager G D, Ionin A A, *et al.*. Efficient pulsed first-overtone CO laser operating within the spectral range of 2.5–4.2 μm [J]. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 2000, 36(7): 810–823.
- 42 Vassiliev S V, Kuzmina M A, Basiev T T, *et al.*. Numerical modeling of the intracavity optically pumped mid-infrared molecular laser[J]. *Laser Physics*, 2002, 12(3): 533–540.
- 43 Botha L R, Bollig C, Esser M, *et al.*. Ho:YLF pumped HBr laser[J]. *Optics Express*, 2009, 17(22): 20615–20622.
- 44 Koen W, Jacobs C, Bollig C, *et al.*. An optically pumped tunable HBr laser in the mid-infrared region[J]. *Optics Express*, 2014, 39(12): 3563–3566.
- 45 Cregan R F, Mangan B J, Knight J C, *et al.*. Single-mode photonic band gap guidance of light in air[J]. *Science*, 1999, 285(5433): 1537–1539.
- 46 Benabid F, Knight J C, Antonopoulos G, *et al.*. Stimulated Raman scattering in hydrogen-filled hollow-core photonic crystal fiber[J]. *Science*, 2002, 298(5592): 399–402.
- 47 Benabid F, Couny F, Knight J C, *et al.*. Compact, stable and efficient all-fibre gas cells using hollow-core photonic crystal fibres[J]. *Nature*, 2005, 434(7032): 488–491.
- 48 Nampoothiri A 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.
- 49 Hensley C, Broaddus D H, Schaffer C B, *et al.*. Photonic band-gap fiber gas cell fabricated using femtosecond micromachining[J]. *Optics Express*, 2007, 15(11): 6690–6695.
- 50 Nampoothiri A, Ratanavis A, Campbell N, *et al.*. Molecular C_2H_2 and HCN lasers pumped by an optical parametric oscillator in the 1.5 μm band[J]. *Optics Express*, 2010, 18(3): 1946–1951.
- 51 Couny F, Benabid F, Light P S. Large-pitch kagome-structured hollow-core photonic crystal fiber[J]. *Optics Letters*, 2006, 31(24): 3574–3576.
- 52 Benabid F, Roberts P J. Linear and nonlinear optical properties of hollow-core photonic crystal fiber[J]. *J Mod Opt*, 2011, 58(2): 87–124.
- 53 Jones A M, Nampoothiri A 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.
- 54 Nampoothiri A V, Jones A M, Ratanavis A, *et al.*. Mid-IR laser emission from a C_2H_2 gas filled hollow core photonic crystal fiber[C]. *SPIE*, 2010, 7580: 785001.
- 55 Fang Q, Shi W, Kieu K, *et al.*. High power and high energy monolithic single frequency 2 μm nanosecond pulsed fiber laser by using large core Tm-doped germanate fibers: experiment and modeling[J]. *Optics Express*, 2012, 20(15): 16410–16420.
- 56 Yu F, Wadsworth W J, Knight J C. Low loss silica hollow core fibers for 3–4 μm spectral region[J]. *Optics Express*, 2012, 20(10): 11153–11158.
- 57 Urich A, Maier R, Mangan B J, *et al.*. Delivery of high energy Er:YAG pulsed laser light at 2.94 μm through a silica hollow core photonic crystal fibre[J]. *Optics Express*, 2012, 20(6): 6677–6684.
- 58 Desevedavy F, Renversez G, Troles J, *et al.*. Chalcogenide glass hollow core photonic crystal fiber[J]. *Opt Mater*, 2010, 48(11): 4468–4472.
- 59 Kosolapov A F, Pryamikov A D, Biriukov A S, *et al.*. Demonstration of CO_2 laser power delivery through chalcogenide-glass fiber with negative-curvature hollow core[J]. *Optics Express*, 2011, 19(25): 25723–25728.
- 60 Smith P W. A waveguide gas laser[J]. *Appl Phys Lett*, 1971, 19(5): 132–134.
- 61 Sui K R, Shi Y W, Tang X L, *et al.*. Optical properties of AgI/Ag infrared hollow fiber in the visible wavelength region[J]. *Optics Letters*, 2008, 33(4): 318–320.
- 62 Simakov N, Hemming A, Clarkson W A, *et al.*. A cladding-pumped, tunable holmium doped fiber laser[J]. *Optics Express*, 2013, 21(23): 28415–28422.
- 63 Ehrenreich T, Leveille R, Majid I, *et al.*. 1-kW, all-glass Tm: fiber laser[C]. *SPIE*, 2010, 7580: 758016.
- 64 Eichhorn M. High-gain Tm-doped fluoride fiber amplifier[J]. *Optics Letters*, 2005, 30(5): 456–458.
- 65 Eichhorn M. High-peak-power Tm-doped double-clad fluoride fiber amplifier[J]. *Optics Letters*, 2005, 30(24): 3329–

3331.

- 66 Shi W, Petersen E B, Fang Q, *et al.*. 220 μJ monolithic single-frequency Q -switched fiber laser at 2 μm by using highly Tm-doped germanate fiber[J]. Optics Letters, 2011, 36(18): 3575-3577.
- 67 Shi W, Petersen E B, Fang Q, *et al.*. mJ-level 2 μm transform-limited nanosecond pulses based on highly Tm-doped germanate fibers[C]. Fiber Laser Applications, 2012. FTh4A.
- 68 Jackson S D, Sabella A, Hemming A, *et al.*. High-power 83 W holmium-doped silica fiber laser operating with high beam quality[J]. Optics Letters, 2007, 32(3): 241-243.
- 69 Hemming A, Simakov N, Davidson A, *et al.*. A monolithic cladding pumped holmium-doped fiber laser[C]. CLEO: Science and Innovation, 2013. CW1M.
- 70 Sholokhov E M, Marakulin A V, Kurkov A S, *et al.*. All-fiber Q -switched holmium laser[J]. Laser Physics Letters, 2011, 8(5): 382-385.

栏目编辑: 张 雁