

化学氧碘激光器(COIL)的研究进展

郭汝海

(中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所 激光与物质相互作用国家重点实验室, 吉林 长春 130033)

摘要: 化学氧碘激光器 (COIL) 作为继 HF/DF 化学激光器以后的第二代气流化学激光器具有诸多优点, 如比第一代更短的波长和更高的光纤传输效率, 因而在军事、工业和医疗等许多领域都有重要的应用, 在过去的十多年来得到了各国专家的普遍重视。本文将对化学氧碘激光器几十年的发展进行一定回顾和分析, 并在此基础上对其未来的发展和所面临的技术挑战进行了探讨。

关键词: 化学激光器; 化学氧碘激光器; 激光武器系统; 激光加工

中图分类号: TN248.2

文献标识码: A

DOI: 10.3788/OMEI 20102705.0022

Development Review of Chemical Oxygen-Iodine Lasers (COIL)

GUO Ru-hai

(Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences,
State Key Laboratory of Laser Interaction with Matter, Changchun, 130033, China)

Abstract: Chemical oxygen-iodine lasers (COIL) have many advantages as the second generation gas chemical laser after the first HF/DF chemical laser. The shorter wavelength and higher transmission efficiency of optical fiber make it have many important applications in the fields of military, industry and medical treatment, and have been draw great attention by many experts from all over the world in the past ten years. A review and analysis of chemical oxygen-iodine lasers development will be made during recent several decades in this paper, and their evolutionary direction and technical challenges will be forecasted and discussed.

Keywords: chemical lasers; chemical oxygen-iodine lasers; laser weapon systems; laser processing

1 引言

化学激光器是指它的工作介质的粒子数反转是通过放热化学反应实现的, HF/DF 化学激光器作为第一代气流化学激光器在化学激光器研究领域和发展史中占有重要地位^[1], 通过它研究了化学激光器振-转跃迁的基本原理, 也通过它研究了化学激光器所使用的关键技术, 为后续第二代的气流化学激光器氧碘化学激光器 (COIL) 的成功研制也奠定了坚实基础^[2-4]。

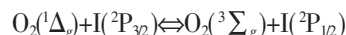
COIL 不同于第一代的化学激光器(波长 2.7-34 μm), 产生更短的波长 (1.315 μm), 正好位于大气窗口。对于大多数金属具有高的光耦合, 而且可以通过光纤传输到终端用户, 因此, 这种激光器在定向能武器、材料加工和医疗上都具有潜在的应用。

本文将重点回顾氧碘化学激光器的发展历程, 对其中涉及的关键技术做重点分析, 并对其未来可能的发展方向和技术挑战进行探讨分析。

2 COIL 概述

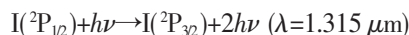
2.1 COIL 的基本原理

在介绍 COIL 研究进展之前, 有必要简单介绍一下它的基本原理^[5]。COIL 通过碘原子中电子跃迁激发出光, 这里不同的基态和激发态的电子自旋产生了集居数反转。其中最重要、最关键的一步可逆反应是 $\text{O}_2(^1\Delta_g)$ 与碘原子的近共振传能:

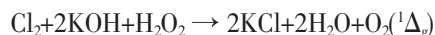


这里 $\text{O}_2(^1\Delta_g)$ 和 $\text{I}(^2\text{P}_{3/2})$ 分别是碘和氧的基态。

激射出光:



其中, $\text{O}_2(^1\Delta)$ 是在单重态氧发生器中反应产生的, 即



工作物质是从碘分子发生器蒸发出来的 I_2 , 在超音速混合喷管及光腔中与 $\text{O}_2(^1\Delta_g)$ 碰撞解离而产生的。COIL 的工作机理实际上就是电子激发的单重态分子氧 $\text{O}_2(^1\Delta_g)$ 通过近谐振把能量传递给原子碘, 形成电子激

发态的自旋轨道上能级, $\text{I}(^2\text{P}_{1/2})$, 如图 1 所示^[6]。

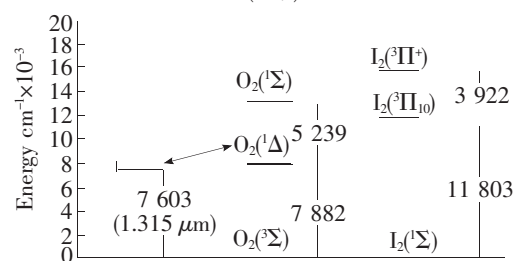


图1 COIL能级图^[6]

上述的工作原理及能级图决定了该激光器一般由以下 5 个部分构成: 单重态氧 $\text{O}_2(^1\Delta)$ 产生器、碘产生器、除水气冷阱、氧碘混合气喷嘴以及光学谐振腔, 而且由于考虑消激发的原因, 大多数当前的 COIL 在低压 (5~50 torr) 采用超音速通过谐振腔, 因此还额外需要压力恢复系统将废气排到大气中, 这些部分如图 2 所示。

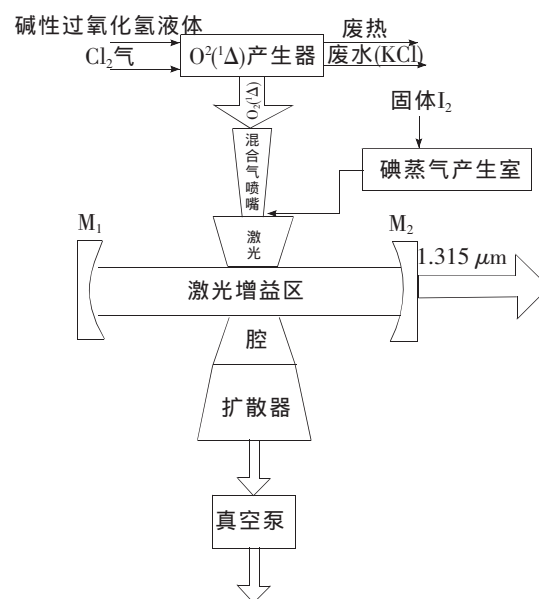


图2 COIL 原理概念示意图

2.2 COIL 的发展历程

2.2.1 COIL 的历史

从上世纪 60 年代开始, 基础物理的原理演示验证打开了 COIL 激光发射的历史。1972 年, 英国科学家 Thrush 首先提出了 COIL 的基本理论, 此理论简要概括为单重态氧 $\text{O}_2(^1\Delta)$ 与基态碘原子近谐振传能产生激发态碘原子的过程。1978 年, 美国空军武器实验

室首次研制成功 COIL, 发射功率仅为毫瓦量级。但从 1978 年到 1982 年短短 4 年间, 亚音速的 COIL 已达到数千瓦的功率水平, 1982 年世界上第一台超音速 COIL(ReCOIL)输出约 2 kW, 所有这些 COIL 都是由鼓泡式 $O_2(^1\Delta)$ 发生器驱动的。上世纪 80 年代早期, TRW (现在的 Northrop-Grumman) 公司开发了转盘式的发生器, 大大提高了化学效率, 在美国空军武器实验室开发了称为 RotoCOIL 装置, 出光功率达到了 37 kW, 化学效率 26%。Rocketdyne (现在的波音公司) 升级了装置技术, 于 1989 年出光功率已经超过 100 kW, 光束质量达到了近衍射极限 (没有波前修正的情况下)。1996 年, TRW 公司采用均匀液滴喷射式 $O_2(^1\Delta)$ 发生器, 在代号为 BDL-2 的 COIL 上实现了 200 kW 的激光输出^[2,7]。

COIL 诞生不久, 许多国家相继建立起自己的装置, 他们都对 COIL 的发展做出了重要贡献。我国的 COIL 是从上世纪 80 年代初开始的, 主要从事光引发和放电引发脉冲 COIL 研究。1996 年, 大连化物所在完成亚音速 COIL 研制以后, 已成功研制出了超音速 COIL, 激光器输出功率为 5 kW, 化学效率 20%^[2]。超音速相比于亚音速具有更多的优势, 减少了传输时间, 增加了化学效率, 提高了工作介质的均匀性。图 3 给出了美国空军武器实验室亚音速和超音速 COIL 的尺寸对比^[6], 图片中的背景大激光器是亚音速



图 3 亚音速和超音速 COIL 大小对比照片。背景的大激光器 (COIL IV) 具有 4 m 增益长度, 0.5 mole/s Cl_2 气流速, 功率约 4 kW。图中工作人员手持 25 cm 长超音速激光器的喷嘴, 为 0.2 mole/s Cl_2 气流速, 功率约 2 kW^[6]。

COIL, 具有 4 m 的增益长度。工作人员手持的是超音速喷嘴, 长仅 25 cm, 可以得到和背景大激光器相同的输出功率。

2.2.2 COIL 的优势

COIL 的优点主要包括以下几点:

(1) 良好的大气传输性; (2) 单频窄线宽的输出波长; (3) 良好的光纤传输特性; (4) 长时间发射激光模式; (5) 100 kW 输出级别近衍射极限的光束质量。图 4 给出了 COIL 大气传输特性^[6] (注意图中线表示 COIL 波长, 也代表激发跃迁的自然谱线的线宽)。窄线宽波长操作有利于光束控制和波前修正, 较长的相关长度对于光学系统也具有潜在优势, 即相对而不是固定的相位控制也可以用于模块化的光学系统中。短波长 ($1.315 \mu m$) 同时也有助于明显提高激光器的亮度。

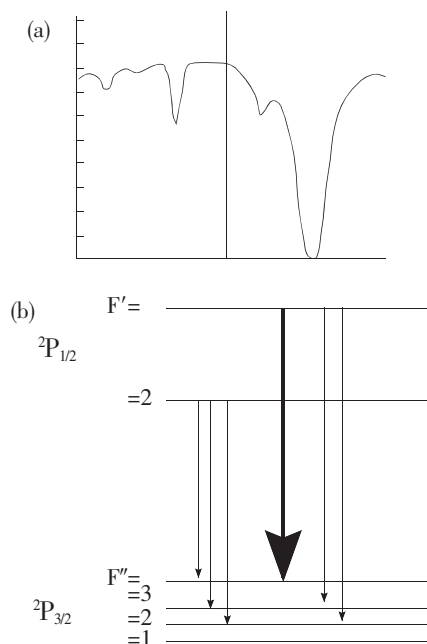


图 4 (a) COIL 大气透过率; (b) COIL 激光器跃迁的能级图。

2.2.3 COIL 的劣势

COIL 化学燃料的供应问题一直是困扰其发展的主要障碍, 特别是一些在战场上或者在太空上的军事应用, 这种问题就显得尤为突出。大多数 COIL 无一例外地都运转在低腔压下, 在现有的技术水平下, 其被动恢复压力都低于一个大气压, 需要复杂而庞

大的压力恢复系统将废气排到大气中去；而且化学燃料有毒并存在污染，制备条件也较为苛刻，这都造成 COIL 的体积和重量过于庞大。目前，波音公司正在积极开发一种电-化学再生方案试图来解决这个问题^[8]。COIL 现在都采用液态的燃料，非常不适用于太空应用，因为燃料和热管理系统所占的重量在大多数 COIL 中都超过 50%以上。

3 COIL 的应用

3.1 COIL 军事应用

基于上述 COIL 的优势，其非常有利于地基、机载和太空基的激光武器应用。对于地基和机载系统，美国已进行大量实验证明技术路线可行，而对太空基 COIL 的战术应用，仍处于摸索阶段，需要的经费也将是庞大的。无论哪种军事应用都必须保证化学燃料能够比较容易获得。下面就以上几方面的军事应用做一简要概述^[6,9-11]。

3.1.1 战术地基和机载 COIL

对于任何输出功率超过 MW 量级的激光器，其远程应用技术都相当复杂，这就决定了地基和机载 COIL 比太空基的系统在技术上更加成熟和切实可行。良好的大气传输性能和 ATP（捕获、跟踪和瞄准控制系统的简称）技术发展使中继镜系统的技术方案非常吸引人（如图 5 所示）。它的主要思路是通过地基 COIL 发射大功率激光准确进入太空的中继镜系统，然后通过中继镜改变方向打击远程空中或地面的目标。中继镜系统可以使高能激光在大气层外完成主要的传输过程，这就可以极大地提高激光的传输距离和防御范围。从已有的研究结果看，中继镜的应用在一定程度上解决了高能激光的传输问题。

对于机载 COIL，美国 ABL 进行了有益的尝试。2010 年 2 月 12 日，美国导弹防御局宣布，“机载激光器”（ABL）系统于 11 日成功击落一枚弹道导弹。这是美军“定向能”激光武器首次完成导弹拦截试验。据悉，本次拦截试验在加利福尼亚州中部的穆谷点海军航空兵基地内进行。试验中，大功率激光

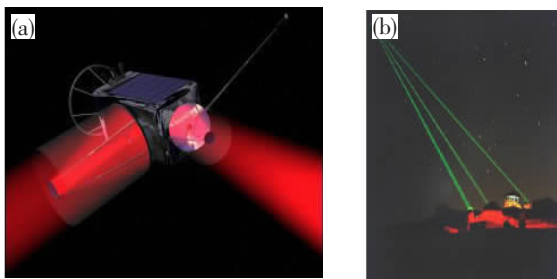


图 5 (a)COIL 太空中继镜概念与(b)星火靶场试验平台

器系统（COIL）由一架波音 747 飞机携带升空，在飞行过程中对一枚“液体燃料”推进的弹道导弹实施了成功拦截。这次试验从一定程度上验证了 ABL 系统的作战能力，因而对该计划具有重要的里程碑意义。

ABL 飞机搭载的系统有 MW 级的 COIL，红外跟踪和高速目标截获系统，及高精度激光目标跟踪光束控制系统。激光武器由 3 个激光发射系统组成：一个高功率的硬杀伤激光系统（主系统）、激光指示系统和激光照明系统。主激光系统为机身后部的 MW 级 COIL，激光束经过贯穿前后部的导光系统，而导光系统贯通分隔前后机舱的压力隔舱。最终激光束穿过光束控制系统后射出，最前面光束的发射炮台指示方向非常快速。图 6 和图 7 给出了 ABL 载机巡航及机舱布局图^[10]。升级 COIL 功率，利用高级光束控制和下一代的波音 747 载机，就完全可以建立一个处理更多紧急任务的高级 ABL 系统。



图6 美国ABL载机巡航

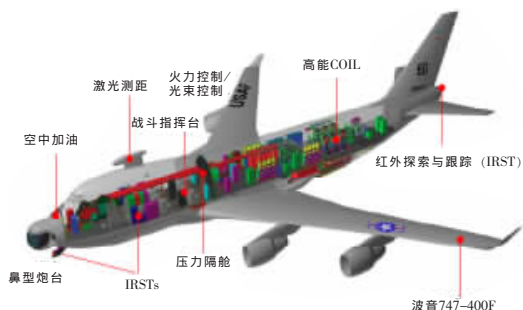


图 7 美国 ABL 载机内部系统组成

3.1.2 太空基 COIL

目前, COIL 技术还没有对太空应用进行工程化, 大部分工作仍停留在论证阶段。论证的关键技术包括:

- 功率升级下保持良好的光束质量问题;
- 零重力下 $O_2(^1\Delta)$ 产生器问题;
- 零重力下液体化学燃料供应问题;
- 零重力下的热管理问题;
- 远程控制问题。

对于太空基应用, 采用全气相碘激光器 (AGIL) 和电-光 $O_2(^1\Delta)$ 产生器正在受到广泛关注。预计初期零重力 COIL 技术论证的投入是必要的, 而可代替技术方案 AGIL 和电-光 $O_2(^1\Delta)$ 产生器研发对于未来太空基 COIL 将可能是至关重要的。

3.2 COIL 商用和民用

COIL 除了广泛的军事应用以外, 多年以来, COIL 也已经被认为是材料加工处理的理想激光源, 因为它具有极高平均功率和近乎完美的光束质量。然而, 其化学激光器的属性限制了它在工业中的应用。平均功率 kW 级别 COIL 的窄线宽和极佳的光学质量将使它成为世界上最好的材料加工处理工具, 适用于焊接、切割、激光表面处理和激光微加工等领域。而且它的波长非常适于光纤传播, 在激光材料加工处理工厂可以通过光纤从一台高平均功率的 COIL 设备传输到一系列的单独激光加工的工作站上。它的窄线宽同样增加了频率转换效率, 可以通过倍频或三倍频开发出更短波长的高功率激光源, 这非

常有利于激光微加工和光刻蚀等应用。

美国空军研究实验室采用 COIL 进行了大量切割厚铝材和钢材的实验。10 kW 级的 COIL 可以用于切割铝、不锈钢和碳钢, 采用 N_2 气辅助 5~6 kW 的 COIL, 切割深度铝为 20 mm, 不锈钢为 50 mm, 碳钢为 41 mm。同样的激光器, 同样的功率水平在 O_2 的辅助下可以切割碳钢 65 mm, 如不要求切割质量则可以切割碳钢深度接近 100 mm。

这些实验结果表明, COIL 切割碳钢和不锈钢接近同一速率, 当这些数据 and 现有的 CO_2 与 Nd:YAG 激光器的切割数据对比时, 可以发现在给定的切割深度、功率和光斑大小, 用 N_2 气辅助, COIL 切割钢的速率比 CO_2 激光器快近 3 倍。COIL 切割碳钢速率在 O_2 气辅助下比在 N_2 气辅助下提高近 3 倍。Nd:YAG 激光器和 COIL 切割钢接近同一速率。另外, 还发现在同样惰性气体辅助下 COIL 切割铝和 CO_2 激光器切割钢的速率接近相同。图 8 给出了 COIL 切割不锈钢和铝材的照片^[12]。



图 8 COIL 切割不锈钢和铝材断面图, 前面放置的钢笔长 127 mm。

目前, Nd:YAG 激光器在连续工作模式下功率输出接近 5 kW, 而 COIL 已经升级到 40 kW 功率级别。日本学者已经通过实验说明了 COIL 激光束在高功率密度下通过光纤传输的能力, 并将 COIL 应用于许多其它工业激光很难加工的领域, 取得了许多激动人心的结果, 图 9 给出了一个 COIL 商用的典型照片^[13]。而 CO_2 激光器由于波长 $10.6 \mu m$, 限制了它在光纤传输的可能性。COIL 能通过光纤传输高功率、短波长

激光束对于解决高功率激光的工业应用是非常具有吸引力的,这往往是其它激光技术所不具备的。COIL的可能工业应用还包括它很好地适用于核能设施的净化和分解、船舶的修建、水下焊接和重机械制造业。



图9 1 kW 商用 COIL^[13]

4 COIL 的前景分析与展望

COIL 是继 HF/DF 之后的第二代气流化学激光器,是波长最短的化学激光器,区别于其它激光器具备很多独特的优势,如具有极高的化学储能(不需要庞大的电源)、大气传输性能好、适于光纤传输等诸多优点。经过几十年的发展,已经从最初的几 mW 发展到目前的几 MW 输出功率,化学效率也增加到 20%~30%,光束质量接近衍射极限,因而非常适合于军事、工业和医疗等方面的应用。本文介绍

的美国军方 ABL 实例和 COIL 切割金属板材的实验数据都能为这些应用提供很好的支持例证。

但 COIL 本身也有很多缺陷,特别是化学燃料的供应问题仍然无法得到很好的解决,各国军方也都在积极寻求其替代光源。应运而生的固态热容激光器和光纤激光器正在成为研究的热点,但从短时期来看,这些替代光源还无法达到目前 COIL 的功率水平和光束质量。

因此,COIL 作为气流化学激光器的佼佼者仍然受到各国军方和工业界的普遍重视,各国研究者也正积极寻求各种解决方案来克服 COIL 的缺陷。AGIL 和电-光 $O_2(^1\Delta)$ 产生器等新技术已开始走进人们的视线,它不但继承了 COIL 的优点,同时又克服了传统 COIL 的不足。尽管已经进行了大量的理论和实验研究,也进行了出光演示,但许多动力学过程还不是很清楚。我国在这方面的研究几乎空白,近年来只有中科院大连化物所进行了射频放电产生 $O_2(^1\Delta)$ 的初步研究,还没有出光的实验报道^[14]。

COIL 的研究是一个大型而复杂的系统工程,同时也需要配套的计算流体动力学和化学反应动力学等理论研究,还需要诊断实验技术的相应发展,投入是相当巨大的。但与 COIL 的产出相比,本文作者认为这种投入是相当值得的,仍需继续加大 COIL 的研究力度。

参考文献

- [1] 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,2009, 27(3): 30-35.
- [2] 多丽萍,金玉奇,杨柏龄. 气流化学激光测试诊断技术[M]. 北京:科学出版社,2008.
- [3] 庄琦,桑凤亭,周大正. 短波长化学激光[M]. 北京:国防工业出版社,1997.
- [4] 沙国河. 强化化学激光器的研究与发展[J]. 中国激光,1994, 21(5): 387-390.
- [5] Kodymová J. Overview on the chemical oxygen-iodine laser technology[J]. SPIE, 2007, 6346: 634609-1-6346-12.
- [6] Duff E A, Truesdell K A. Chemical oxygen iodine laser (COIL) technology and development[J]. SPIE, 2004, 5414: 52-68.
- [7] 王戎瑞. 美国机载激光武器发展现状[J]. 激光与红外,1999, 29(4): 195-198.
- [8] Carroll D L, Solomon W C. Electri COIL: An advanced chemical iodine laser concept[J]. The Int. Soc. For Opt. Eng., 2000, 4184: 40-44.
- [9] 任国光,黄裕年. 美国高能激光武器的发展及其面临的挑战(下篇)[J]. 激光技术,2001, 25(5): 321-327.
- [10] Hon J, Plummer D N, Crowell P G, et al. Heuristic method for evaluating coil performance[J]. AIAA Journal, 1996,

34(8): 1595-1599.

- [11] Airforce-technology.com. ABL YAL 1A airborne laser, USA[OL]. [2010-4-6] <http://www.airforce-technology.com/projects/abl/>
- [12] Kar A, Scott J E, Lathan W P. Theoretical and experimental studies of thick-section cutting with oxygen-iodine laser(COIL) [J]. *Journal of Laser Applications*, 1996, 8(3): 125-133.
- [13] Carroll D L, Rothenflue J A. Experimental study of cutting thick aluminum and steel with a chemical iodine laser using an N₂ or O₂ gas assist [J]. *SPIE*, 1997, 3092: 758-763.
- [14] 多丽萍, 李留成, 王增强, 等. 电激励氧碘激光器研究最新进展[J]. *激光与光电子学进展*, 2008, 45(11): 15-21.

作者简介: 郭汝海 (1976-), 男, 汉族, 辽宁大连人, 博士, 副研究员, 美国光学学会 (OSA) 会员, 1999年于哈尔滨工业大学获学士学位, 2001年于哈尔滨工业大学获硕士学位, 2007年于哈尔滨工业大学获博士学位, 主要从事激光器光学设计及光束传输控制等方面的研究。Email: hitgrh@163.com

《发光学报》(双月刊)

《发光学报》是中国物理学会发光分会与中国科学院长春光学精密机械与物理研究所共同主办的学术期刊。

本刊是国内唯一的以发光学、凝聚态物质中的激发过程为专业方向的综合性中文核心学术刊物, 创刊于1980年。

《中国学术期刊(光盘版)》、《中国期刊网》、《万方数据资源系统》、《中国科技论文统计源期刊》、英国《科学文摘》(SA)、美国《化学文摘》(CA)、俄罗斯《文摘杂志》(PЖ)、美国《剑桥科学文摘》(CSA)、日本《科技文献速报》(CBST, JICST)、荷兰“Elsevier Bibliographic Databases”等20余种国内外著名检索刊物和文献数据库来源期刊。2010年被美国工程索引Ei收录检索。

本刊内容丰富、信息量大, 主要反映本学科专业领域的科研和技术成就, 及时报道国内外的学术动态, 开展学术讨论和交流, 为提高我国该学科的学术水平服务。

本刊网址: <http://www.fgxb.org>, 欢迎访问! 欢迎投稿! 欢迎订阅!