

国家科普知识重点图书

高新技术科普丛书

化学激光

桑凤亭
金玉奇
周大正
庄琦
编著

出版社



国家科普知识重点图书

高新技术科普丛书

化 学 激 光

桑凤亭 周大正 编著
金玉奇 庄 琦

化 学 工 业 出 版 社

· 北 京 ·

(京)新登字 039 号

图书在版编目(CIP)数据

化学激光/桑凤亭等编著. —北京: 化学工业出版社, 2000. 11
(高新技术科普丛书)
ISBN 7-5025-2969-1

I. 化… II. 桑… III. 化学激光器-普及读物
IV. TN248.5-49

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2000) 第 69166 号

高新技术科普丛书

化 学 激 光

桑凤亭 周大正 编著

金玉奇 庄 琦

责任编辑: 丁尚林

责任校对: 李 丽

封面设计: 田彦文

*

化学工业出版社出版发行

(北京市朝阳区惠新里 3 号 邮政编码 100029)

发行电话: (010)64918013

[http:// www.cip.com.cn](http://www.cip.com.cn)

*

新华书店北京发行所经销

北京市云浩印制厂印刷

三河市东柳装订厂装订

开本 850×1168 毫米 1/32 印张 4 $\frac{1}{4}$ 字数 85 千字
2000 年 11 月第 1 版 2000 年 11 月北京第 1 次印刷

印 数: 1—6000

ISBN 7-5025-2969-1/TQ · 1294

定 价: 10.00 元

版权所有 违者必究

该书如有缺页、倒页、脱页者, 本社发行部负责退换

序

数万年来，人类一直在了解、开发、利用我们周围的自然界，同时不断地认识着自身，科学技术也从一开始就随着人类的生存需求而产生和发展着。人类发展史充分验证了邓小平“科学技术是第一生产力”的论断。科学技术的发展，促进了人类文明和社会的发展。

21 世纪是信息时代，21 世纪是生命科技的世纪，21 世纪是新材料和先进制造技术迅速发展和广泛应用的世纪，21 世纪是高效、洁净和安全利用新能源的世纪，21 世纪是人类向空间、海洋、地球内部不断拓展的世纪，21 世纪是自然科学发生重大变革、取得突破性进展的时代。科学技术的发展、新技术的不断涌现，必将引起新的产业革命，对我国这样的发展中国家来说，既是挑战，也是机遇，而能否抓住发展机遇，关键在于提高全民族的科学文化水平，造就一支具有科学精神、懂得科学方法、具有知识创新和技术创新能力的高素质劳动者队伍。所以，发展教育和普及科学知识、弘扬科学精神、提倡科学方法是我们应对世纪挑战的首要策略。为此，1999 年 8 月，江总书记在视察中国科学院大连化学物理研究所时进一步强调了科普工作的重要性：“在加强科技进步和创新的同时，我们应该大力加强全社会的科学普及工作，努力提高全民族的科学文化素质。这项工作做好了，就可以为科技进步和创新提供广泛的群众基础。”

为了普及和推广高新技术，化学工业出版社组织几位两院院士和专家编写了《高新技术科普丛书》。本套丛书的特点是：介绍当今科学产业中的一些高新技术原理、特点、重要地位、应用及产业化的现状与发展前景；突出“新”，介绍的新技术、新理论和新方法不仅经实践证明是成熟、可靠的，而且是有应用前景的实用技术；力求深入浅出，图文并茂，知识性、科学性与通俗性、可读性及趣味性的统一，并充分体现科学思想和科学精神对开拓创新的重要作用。

《高新技术科普丛书》涉及与我国经济和社会可持续发展密切相关的高新技术，第一批9个分册包括绿色化学与化工、基因工程技术、纳米技术、高效环境友好的发电方式——燃料电池、最新分离技术（如超临界流体萃取、吸附分离技术、膜技术）、化学激光、生物农药等。本套丛书以后还将陆续组织出版多种高新技术分册。相信该套科普丛书对宣传普及科技知识、科学方法和科学精神，正确地理解、掌握科学，提高全民族的素质将会起到积极的作用。

洛角祥

2000年9月

前 言

自1960年激光问世至今已40年了,在这40年中激光技术发展的非常快,并正在影响着人类生活的各个方面。在今天看来,很难找到一个领域没有激光应用在其中,就连“死光”也开始变为现实。从古代开始,人类就梦想着“死光”,像古代小说封神演义中所描述的那样,“一道白光使敌方的人头落地”。在不久的将来,不仅人头落地,就连敌方的导弹、飞机都将被激光打下来,只不过是“白光”,而是化学激光器发射出的“红外光”。

化学激光器是在固体激光器出现后不久产生的一种新型激光器。它的能源不是电,而是将化学反应的能量变为激光能。第一个这样的激光器是氯化氢激光器。20世纪60年代末出现了HF/DF化学激光器,70年代末出现了氧碘化学激光器。此激光器的共同点是不用电,粒子数反转是靠纯化学反应形成的。

化学激光器突出的优点是工程放大性能非常好。不论HF/DF激光还是氧碘化学激光,目前其输出功率已可达百万瓦水平,光束质量可达近衍射极限。由于它的高亮度特性,加上化学激光不用带极其庞大的电源等特点,使它在工业和军事应用方面都具有很好的发展前景,并已引起国内外工业界和军界的极大注意。美国和日本等国研究单位积极开展氧碘化学激光在核电站的拆除和维修方面的研究,并已取得令人信服的结果。这主要归功于氧碘化学激光波长 $1.315\mu\text{m}$,非常适用光纤将激光传送到所需场地,

再配以机器人进行切割或焊接，其效果是其他激光可望而不可及的。在军事应用方面，美国空军已先后投资几十亿美元研究并开发一种利用氧碘化学激光作为光源的机载激光武器，计划在2003年完成第一台样机，并于2003年前后部署了3架这样的机载激光武器。

科学家致力于的另一大目标是发展出可见波段的化学激光，虽然目前还没有成功，但前方已呈现出胜利的曙光，在不久的将来，可见波段的化学激光一定会研究成功。

本书出版的目的是，就是希望更多的人能了解化学激光，了解化学激光发展历史，了解化学激光的基本概念和单元技术，提高大家的兴趣，让更多年青人投身到化学激光研究中去，进一步推动我国化学激光研究事业的发展。

在国家863高技术计划的重点支持下，我国氧碘化学激光研究已取得长足的发展，其研究工作水平已跨入世界先进行列，并已有一支很好的科技队伍和良好的技术基础。但是，在化学激光领域还有许多问题需要我们去解决，还有许多关键技术需要大家去突破，希望本书的出版对此有所帮助。

基于以上考虑，本书共分五章。第一章绪论，第二章HF/DF化学激光，由周大正同志撰写；第三章氧碘化学激光由桑凤亭同志和金玉奇同志撰写；第四章其他类型化学激光由周大正同志编写；第五章化学激光的应用由庄琦同志编写。全书由周大正同志负责统编。

本书是在化学工业出版社图书指导委员会的指导下完成的，在编写过程中得到中科院大连化物所的指导和专家的支持，编者在此表示由衷的感谢。特别要感谢大连化物所化学激光室的许多

同志为本书提供一些有用的资料并提出许多宝贵意见。

虽然编者们的确是从事多年化学激光研究的专家但编写高级科普书还是头一回，本书难免有一些缺点及不尽读者意之处，请多批评指正。

桑凤亭 庄琦

2000年6月

《高新技术科普丛书》编委会

主任

路甬祥 中国科学院院长，中国科学院院士，
中国工程院院士

委员

汪家鼎	清华大学教授，中国科学院院士
闵恩泽	中国石油化工集团公司石油化工科学研究院教授，中国科学院院士，中国工程院院士
袁 权	中国科学院大连化学物理研究所研究员，中国科学院院士
朱清时	中国科学技术大学教授，中国科学院院士
孙优贤	浙江大学教授，中国工程院院士
张立德	中国科学院固体物理研究所研究员
徐静安	上海化工研究院（教授级）高级工程师
冯孝庭	西南化工研究设计院（教授级）高级工程师

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 化学激光的定义	2
1.2 化学激光的基本特点	3
1.3 化学激光的发展简史	5
1.4 化学激光的基本概念	8
第 2 章 HF/DF 化学激光器	13
2.1 概述	13
2.2 脉冲 HF/DF 化学激光器	14
2.2.1 非链反应脉冲 HF 化学激光器	15
2.2.2 链反应脉冲 HF 化学激光器	16
2.2.3 脉冲 HF 激光引发技术	17
2.2.4 脉冲 HF/DF 化学激光器研究态势	32
2.3 燃烧驱动 HF/DF 连续波化学激光器	33
2.3.1 概述	33
2.3.2 连续波 HF/DF 化学激光器基本结构部件	36
2.3.3 HF 泛频跃迁激光器	46
第 3 章 氧碘化学激光器	50
3.1 连续波氧碘化学激光器的基本原理	50
3.1.1 化学方法产生激发态氧 $O_2(^1\Delta)$	51
3.1.2 激发态氧 $O_2(^1\Delta)$ 的猝灭	52
3.1.3 碘分子解离与氧碘传能	53

3.1.4 氧碘化学激光增益特性	54
3.2 连续波氧碘化学激光器的效率	57
3.2.1 反应效率	57
3.2.2 激发效率	57
3.2.3 提取效率	58
3.2.4 体积效率	58
3.2.5 化学效率	59
3.3 脉冲氧碘化学激光的基本原理	59
3.3.1 光引发脉冲氧碘化学激光器	60
3.3.2 放电引发脉冲氧碘化学激光器	61
3.4 连续波氧碘化学激光调Q	62
3.5 氧碘化学激光器的关键技术	67
3.5.1 激发态氧产生的机理	68
3.5.2 产生激发态氧的反应装置——激发态氧 $O_2(^1\Delta)$ 发生器	69
3.5.3 $O_2(^1\Delta)$ 的产率	75
3.5.4 激发态氧的传输	75
3.5.5 碘分子的解离	76
3.5.6 氧与碘混合及碘蒸气发生器	76
3.5.7 氧碘化学激光介质的小信号增益系数	78
3.5.8 超音速喷管降温技术	79
3.5.9 氧碘化学激光基本过程	81
3.5.10 氧碘化学激光常用的光腔类型	81
3.6 典型的 COIL 装置	83
3.6.1 亚音速氧碘化学激光装置	84
3.6.2 超音速氧碘化学激光装置	84
第4章 其他的化学激光器	86

4.1	氯化氢和溴化氢化学激光器	86
4.1.1	氯化氢化学激光器	86
4.1.2	溴化氢化学激光器	87
4.2	CO 化学激光器	88
4.3	卤化氢(HX)-CO ₂ 转移型化学激光器	91
4.4	纯化学 N ₂ O 连续波激光器	94
第 5 章	化学激光在 21 世纪的发展和应用前景	97
5.1	独领风骚的化学激光	97
5.1.1	化学激光器是真正实用的高功率激光武器	98
5.1.2	影响激光武器主要性能的各种因素	99
5.1.3	激光器的“亮度”	101
5.1.4	美国“星球大战”计划的出台带动激光武器大发展	102
5.1.5	化学激光在诸多激光武器研制中脱颖而出	103
5.2	化学激光在激光武器研究领域中的重大进展	105
5.2.1	美“机载激光实验室”的成功与教训	106
5.2.2	美“中红外先进化学激光器”号称西方功率 最高的激光器	107
5.2.3	“机载激光器”计划的重大进展	110
5.2.4	美国首次激光反卫星试验震惊世界	111
5.2.5	“星球大战”计划的核心——天基化学激光武器	113
5.3	化学激光在工业应用方面的特点及进展	114
5.3.1	美国将氧碘化学激光应用于工业加工方面的概况	116
5.3.2	氧碘化学激光在清理与拆除核装置方面的应用前景	118
5.4	化学激光发展前景	120

第 1 章 绪 论

光,自古以来就是人类认识自然和改造自然的一种有力工具,很早以前我们的祖先就已经懂得用点着的“松明子”来进行照明,这就是最早的“化学发光”。激光是在 1960 年问世的,它是继原子能、计算机、半导体之后 20 世纪又一重大科技发明。激光的方向性强、亮度大、相干性高、单色性好,是普通光源无法比拟的,有了它使人类制造光、利用光的本领产生了一个新的飞跃。20 世纪 60 年代是各种激光器诞生的全盛时期,紧接着红宝石激光器的诞生,几乎每隔一年就有新品种激光器出现,在 He-Ne 气体激光器、砷化镓半导体激光器、稀土螯合物液体激光器、氦离子激光器和 CO_2 气体激光器之后,1965 年诞生了第一个 HCl 化学激光器。在众多的激光世界的大家庭中化学激光是具有一定特色的重要分支,化学激光器是指其激活介质的粒子数反转是通过释能化学反应过程实现的激光系统、化学激光正规的可以分为两类:① 连续波(CW)流动系统;② 各种引发方式的脉冲装置。再细分还可以分为直接化学泵浦激光器和传能化学激光器,这取决于激射粒子如何接受能量而定。可以放大到高平均功率最有潜力的激光系统是连续波这一类,特别是连续波 HF/DF 化学激光器和氧碘传能化学激光器。燃烧驱动的 HF/DF 化学激光器输出功率已达到 2.2MW,比目前最大的电激励 CO_2 激光器输出功率高两个数量级,然而这些基于振-转跃迁的化学激光器的波长都较长,对远

场光斑激光亮度不利,也由于波长长,衍射极限发散角也较大,不利于远距离空间传输。目前科学家们正对它进行改造,研制 HF 泛频化学激光器,它的波长大约要比基频时缩短一半,规模也已达到几万瓦的水平。氧碘传能化学激光器是第一个电子跃迁化学激光器,有较好的大气传输窗口,可用石英光纤高效率传输,目前功率输出水平也已达到几十万瓦水平,无论是军用还是民用,均有很大发展潜力,至于脉冲化学激光器对化学激光的开拓、研制、发展起过重要的历史作用,利用小型脉冲化学激光装置可对不同化学反应体系进行动力学行为的各种考察,包括化学泵浦反应、传能过程、激发态粒子驰豫过程,安装上各种光腔腔型后可考察激光提取效率和光束质量,至今在科研上、在发展新体系的化学激光上还在经常运用脉冲型装置,此外,通过脉冲化学激光研究还可发展出各种单原子或自由基的引发技术,在激光化学研究中也起到促进作用。

除了 HF/DF、 $O_2(^1\Delta)$ -I 化学激光将作为本书中心内容讨论外,还将介绍 HF 泛频、HCl、HBr、CO、HF-CO₂ 传能等化学激光器。

总之,化学激光不仅输出功率高,而且光束质量好,可以达到近衍射极限,在激光武器和工业应用上有其广阔的发展潜力。

1.1 化学激光的定义

按定义严格地说,化学激光是通过化学反应直接产生非波尔茨曼分布的激发态工作粒子(原子、分子、自由基等)而得到的激光。广义地说化学激光是指激活介质的粒子数反转是通过释能化学反应实现的激光系统。产生化学激光必须具备如下几个条件:

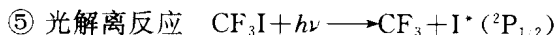
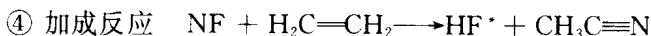
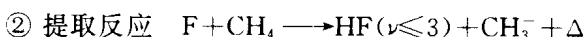
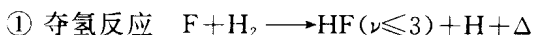
(1) 一定要有释能的化学反应，这是化学激光的能量源；

(2) 化学反应所释放的能量要转化为反应产物某个分子的内能，使其形成激发态粒子；

(3) 要求化学反应泵浦速率快，即要求到达特定能级的反应速率快，使生成的激发态粒子不致在发生激光之前由于自发辐射衰减或碰撞传能而消耗掉，这样才能保证上、下能级间达到粒子数反转；

(4) 要求激发态粒子自发辐射寿命足够短，有足够跃迁几率。

因此，在研究化学激光工作中必然涉及到释能化学反应，例如：



式中， ν 为振动能级， $\text{I}^*(^2\text{P}_{1/2})$ 为碘原子的电子激发态。

释能化学反应选定后，还需研究化学反应能量在反应产物分子中的分配方式和反应速率、激发态粒子的弛豫速率等，化学激光的基础是分子的态-态反应动力学。

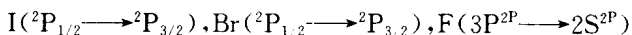
1.2 化学激光的基本特点

(1) 把化学能直接转换成激光能。大家知道，固体、气体激光器工作时都需要一个激发源才能使激光介质的工作粒子建立粒子数反转，例如：红宝石激光器需要氙灯作激发源；氦氖气体激光器需要电源或光源作激发源。化学激光则不同，原则上它不需

要这些外加激发源，而利用化学反应中释放出来的能量作为它的激发源，因此在某些特殊条件下，例如在高山、野外甚至在太空缺乏电源的地方，化学激光就可以发挥其特长。顺便说明一下，某些脉冲化学激光器工作时也需要用脉冲氙灯或放电方式供给它一部分能量，但这些能量仅仅是为了引发化学泵浦反应而不是作为直接激发源，实质上化学激光的工作物质本身就是一个蕴藏有巨大能量的激发源，例如每 kg 氟、氢燃料反应时就能释放出 $1.3 \times 10^7 \text{J}$ 的能量。所以化学激光是最有希望获得巨大功率输出的一种激光器。

(2) 激光波长光谱覆盖面大。对于化学激光器来说，产生激光的工作粒子可能是原来参加泵浦反应后产物的成分之一，也可能是化学泵浦反应生成的原子、分子，或自由基再把激发能转移给另一种原子或分子激射出光，因此化学激光的工作物质是多种多样的，它所辐射的激光波长就相当丰富，从理论上讲，从紫外，可见到红外波谱甚至到微米波段都有可能激射出光，目前已发现的化学激光工作粒子如下。

① 利用原子的电子能级跃迁的有：



② 利用分子的振动-转动能级跃迁的有：

$\text{HCl}(\nu < 5)$, $\text{HF}(\nu < 10)$, $\text{HBr}(\nu < 5)$, $\text{DCI}(\nu < 6)$, $\text{DF}(\nu < 5)$, $\text{DBr}(\nu < 6)$, $\text{CO}(\nu < 20)$, $\text{N}_2\text{O}(00^\circ 1)$, $\text{CO}_2(00^\circ 1)$

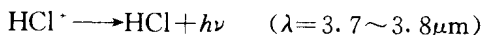
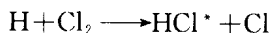
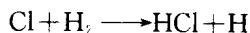
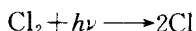
③ 利用自由基的振动-转动能级跃迁的有：

$\text{OH}(\nu < 4)$, $\text{NO}(2\pi_{1/2}, 2\pi_{3/2} \text{电子态中的 } \nu < 12)$, $\text{CN}(\nu < 5)$

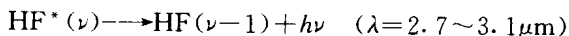
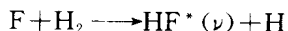
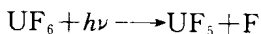
可见从碘原子 $1.315 \mu\text{m}$ 到 CO_2 的 $10.6 \mu\text{m}$ 都已出化学激光。

1.3 化学激光的发展简史

第一台化学激光的诞生是戏剧性的,1964年9月一批著名的化学家、物理学家和激光专家聚会于美国加利福尼亚州的圣地亚哥,研讨非平衡激励和化学泵浦产生激光的可能性,会议开始时,讨论纯粹是理论性的,因为当时还没有化学激光,但在会议结束时,一位来自加州大学伯克利分校的青年研究生站起来说,他已经观察到了由化学反应所产生的第一个激光脉冲,此人便是 G. Pimentel 小组的学生 J. Kasper. 他所用的激光器是闪光光解碘激光器,之后 Kasper 和 Pimentel 在 1965 年按化学激光定义在实验上真正实现了化学激光激射,这就是第一台化学激光器——氯化氢化学激光器,这台激光器的发射发生在光引发的 H_2 和 Cl_2 混合气体的爆炸过程中。



接着在 1967 年 G. Pimentel 和德国 K. Z. Kompa 首次报道了来自 HF 分子的激光辐射,激光是在 UF_6 和 H_2 的混合物受到闪光光解引发的。



又过了两年,1969 年美国科学家 D. J. Spencer 等人首次演示了连续波(CW)HF/DF 化学激光器并获得成功。这类连续波 HF/