

化学激光手册

〔美〕 R. W. F. 格罗斯 J. F. 博特 主编



科学出版社

化学激光手册

〔美〕R. W. F. 格罗斯 J. F. 博特 主编

尹厚明 谢行滨 罗静远 译

陶愉生 等 校

科学出版社

内 容 简 介

本书全面系统地论述化学激光器的基本原理和实验技术。对非平衡反应的化学动力学、反应流的气体动力学、高增益介质的激光物理学、化学激光器的模型计算和各种化学激光器件均作了详细深入的阐述,提供了大量实用的基本数据和图表,并列出了大量参考文献。

本书不仅是一本有价值的化学激光专著,也是便于上述诸学科之间交流的一种词典,亦可作为激光系统工程师的一本手册。

本书可供化学激光和其他激光专业的科技人员参考,也可供化学动力学、激光化学、气体动力学和激光物理学等专业的科技人员和高等院校师生参考。

Edited by R. W. F. Gross J. F. Bott

HANDBOOK OF CHEMICAL LASERS

John Wiley & Sons, 1976

化学激光手册

〔美〕R. W. F. 格罗斯 J. F. 博特 主编

尹厚明 谢行滨 罗静远 译

陶愉生 等 校

责任编辑 陆晓明

科学出版社出版

北京朝阳门内大街 137 号

中国科学院印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

*

1987 年 10 月第 一 版 开本: 850×1168 1/32

1987 年 10 月第一次印刷 印张: 24 1/4

印数: 0001—2,800 字数: 639,000

统一书号: 13031·3665

本社书号: 4587·13—4

定价: 7.10 元

译 者 的 话

自 1964 年第一台化学激光器问世以来,化学激光器的发展堪称突飞猛进。今天,它已成为所有激光振荡器中输出功率和输出能量最高的激光器件。由于其效率高,比功率、比能量大,放大性能好,故化学激光器已发展成强激光器中的佼佼者,引起了人们的极大关注。它在激光武器、激光核聚变、激光化学和材料加工等方面都有着十分广阔和重要的应用前景。

化学激光是一个边缘性研究领域,涉及到非平衡反应的化学动力学、反应流的气体动力学和高增益介质的激光物理学等综合性研究课题。它的迅速发展正是各领域专家通力合作的结果。本书的著者们都是该领域的专家,大都参与了化学激光器发展的各个阶段的工作,其中很多人是多种化学激光器的发明者,他们都不同程度地对化学激光器的发展做出过较大贡献。为便于读者查考,本书附录中列出了原书撰稿人名单。

本书精辟地论述了化学激光器的化学反应动力学、气体动力学和激光物理学的理论和实践问题。既系统地阐述了各有关学科的基础理论,又详尽地阐述了各种化学激光器件的技术问题,提供了大量有用的数据和图表,还专章阐述了化学激光器的模型计算问题。本书是目前该领域的一本最全面、完整的专著。因此,本书不仅是化学激光领域的科技工作者的必备参考书,而且,对于其他激光领域的科技人员以及诸有关专业的高等院校师生,亦有一定的参考价值。

本书的翻译工作分别由尹厚明(第一、六、七、九、十二、十三章)、罗静远(第二、三、八、十章)、谢行滨(第四、五、十一章)承担。

本书的翻译工作,承蒙楼南泉、张存浩研究员和李海、胥海熊等同志热情鼓励和指导,并约请各有关专业的同志分别对本书各

章做了认真的校订,他们是:陶愉生(第一章)、陈锡荣(第二、六章)、曾宪康(第三章)、庄琦(第四章)、桑凤亭和杨柏令(第五章)、黄瑞平(第七章)、胡士珩(第八章)、方尔梯(第九、十三章)、吴大勇(第十、十一章)、张荣耀(第十二章)。在此,向他们深表谢忱。

原书中的错漏之处,一经发现,均已做了订正。由于译者学识水平所限,错误不当之处难免,恳请读者批评指正。

译者

1982年4月于大连

序 言

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。会议开始的时候,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宣称,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。化学激光就是伴随着这一戏剧性事件诞生的。此后十年,正是本书的撰稿人,他们参与了这一崭新领域从基本概念到技术完善的开拓过程,获致了丰富出色的经验。

本书首次将这方面的著述汇集在一起。我们感到,当前正处于化学激光发展进程中的另一个转折点。大量的基础性科研工作,至少就一些主要的化学激光器(如 HF, CO 及碘激光器)而言,看来已接近完成。将来,这一工作将移交给工程技术人员,由他们去发展大型的激光系统,以适应激光化学、激光核聚变以及材料加工等技术应用方面的要求。

为了充分发掘化学激光的潜在能力,必须使下列三个学科结合起来:非平衡反应的化学动力学、反应流的气体动力学和高增益介质的激光物理学。然而,在其中某一学科领域工作的人,往往不熟悉另外两个学科的“语言”。所以,我们的目的是想把本书编成便于这些学科之间交流的一种词典,并作为未来激光系统工程师用的一本手册。这不是一本基础教科书,但本书试图使气体动力学家能了解化学动力学和不稳定腔的物理学,使化学动力学家能掌握化学激光器中所有重要的气体动力学问题,使激光专家能熟悉这种不寻常激光介质的一些参数,以便使他们得以协同去完

成他们的任务。

为此,本书开头安排了三篇关于这三个基本领域的基础性评述。由于高超音速流在控制强放热反应动力学和热力学方面的本领,使气体动力学起着关键性的作用;就这一课题,Grohs 和 Emanuel 在所写的第五章中进行了详细的探讨。接着的第六、七、八章,分别评述了脉冲化学激光器、转移型激光器和化学激光器的数字模型计算等方面的工作。第九和第十章是关于反应碰撞机理的理论,这种碰撞会导致构成化学激光激活介质的分子产生非平衡振动激发。第十一章是关于 CO 化学激光器的一篇新的、详细的评述。在第十二章中,第一次广泛搜集了高功率碘激光器方面的论著。本书的最后一章,是由 R.Jensen 叙述在洛斯阿拉莫斯实验室进行的有关金属原子氧化型激光器方面的工作。

为化学激光领域和本书作过贡献的有许许多多的同事、支持者和朋友,虽然他们的名字并未见诸本书,但在卷首向他们深表谢忱是理所当然的。首先要提出的是我们现在和过去在宇航公司的同事: D. Durran, W. Gaskill, R. R. Giedt, J. Herbelin, T. A. Jacobs, M. Kwok, H. Mirer, R. Varwig 和 W. Warren。没有他们的鼓励、工作和耐心帮助,本书是不能完成的。编者还要向美国空军和国防高级研究项目局 (DARPA) 热烈致谢,不仅是因为本书所述的化学激光方面的很多工作曾得到过他们的财政支持,而且在这一研究工作的兴衰起伏中,也曾得到过他们个人的鼓励、鞭策以及卓有远见的指点,其中特别要感谢的是: M. Berta, P. Clark, E. Gerry, J. McCallum, R. Oglukian, J. Rich, M. Rogers 和 L. Wilson。最后,编者对致力于原始手稿繁重校订工作的 K. Bregand 表示诚挚的谢意。

R. W. F. 格罗斯

J. F. 博特

1976 年 3 月于洛杉矶

目 录

第一章 导论	1
§ 1. 化学激光的定义	1
§ 2. 化学激光中的化学反应类型	4
2.1. 三原子交换反应	4
2.2. 提取反应	7
2.3. 消去反应	9
2.4. 光消去反应	12
2.5. 光解离反应	13
2.6. 其他类型的反应	15
§ 3. 化学激光中的影响因素	17
3.1. 总反应速率	17
3.2. 化学反应放热特性	18
3.3. 反应机制	19
3.4. 去激活过程	21
§ 4. 实验技术	23
4.1. 化学激光器的效率	23
4.2. 闪光光解引发	24
4.3. 放电引发	24
4.4. 电子束引发	24
4.5. 连续运转的化学激光器	25
4.6. 化学发光	25
4.7. 化学激光的研究	26
4.8. 分子束	26
4.9. 理论	26
§ 5. 结论	27
第二章 卤化氢化学激光器的动力学	28
§ 1. 离解反应和复合反应	30

1.1. 氢和氘的离解与复合	31
1.2. 卤素的离解和复合	33
1.3. 卤化氢的离解和复合	39
§ 2. 泵浦反应	42
2.1. H_2-Cl_2 体系的泵浦反应	45
2.2. $H_2(D_2)-F_2$ 体系的泵浦反应	50
2.3. $H_2(D_2)-Br_2$ 和 $H_2(D_2)-I_2$ 体系的泵浦反应	59
§ 3. 能量转移反应	60
3.1. V-T, R 能量转移	60
卤化氢的自弛豫	62
卤化氢被其他卤化氢弛豫	73
卤化氢被原子和其他分子 V-R, T 去激活	74
3.2. V-V 能量转移	81
第三章 化学激光器的光学问题	89
§ 1. 光学共振腔的物理原理	90
1.1. 化学激光器光学方面需考虑的关键问题	90
1.2. 稳定共振腔和光束质量	91
1.3. 不稳定共振腔	104
§ 2. 理论结果	110
2.1. 不稳定共振腔的几何解	111
2.2. 衍射分析法——均匀反射率	114
2.3. 衍射分析法——非均匀反射率	127
2.4. 反射镜倾斜对不稳定共振腔模式的影响	138
2.5. 激光介质的影响和更复杂的相位扰动效应	145
§ 3. 激光光学实验	153
3.1. 引言	153
3.2. 超音速扩散型连续波 HF(DF)多谱线激光器	155
3.3. 超音速扩散型连续波 HF 选线激光器	171
3.4. 亚音速扩散型连续波 HF(DF) 激光器	189
§ 4. 概要和结论	192
第四章 连续波卤化氢激光器	197
§ 1. 热驱动激光器	199

1.1. 激波管及 HF 火焰激光器	205
1.2. 电弧加热超音速扩散型激光器	207
1.3. 电阻加热器驱动的激光器	237
1.4. 燃烧驱动和化学驱动的激光器	240
§ 2. 放电驱动的激光器	244
2.1. 激光介质的研究	245
2.2. 探测激光器和激光光源	249
第五章 超音速混合型激光器中的气体动力学问题	255
§ 1. 燃烧驱动连续波 HF 激光器	257
1.1. 引言	257
1.2. 概述	258
1.3. 燃烧室	260
1.4. 喷管组件	267
1.5. 光腔	273
1.6. 扩压器	287
§ 2. 混合型激光器光腔中的流场	290
2.1. 光腔中的气流结构, 概述	291
2.2. 混合层的结构	298
2.3. 光腔入口结构的影响	323
2.4. 对湍流的、超音速的和带反应的混合的分析	335
§ 3. 预言激光器性能的简单模型	338
3.1. 目的	338
3.2. 混合层的解析模型	339
3.3. 层流混合和湍流混合的估算	344
3.4. 计算规律	353
3.5. 与更细致的分析作比较	358
3.6. 与观察到的激光器性能的关系	362
3.7. 小信号增益分布的预期值和测量值	375
第六章 脉冲卤化氢化学激光器	380
§ 1. 非链反应 HF 激光器	381
1.1. 闪光光解引发	381
1.2. 放电引发	386

1.3. 其他引发方法.....	388
§ 2. 链反应 HF 激光器	389
2.1. 引发方法.....	391
2.2. 时间分辨的激光光谱.....	392
2.3. 实验与理论的对比.....	398
§ 3. 链和非链反应 DF 激光器	404
§ 4. 高效引发的卤化氢激光器.....	408
§ 5. 脉冲 HCl 激光器	410
5.1. 化学反应泵浦的 HCl 激光器.....	410
5.2. 光消去型 HCl 激光器.....	413
§ 6. 脉冲 HBr 化学激光器	413
§ 7. 脉冲转移型化学激光器.....	414
第七章 转移型化学激光器.....	418
§ 1. 振动能的转移和去激活.....	419
1.1. HX-CO ₂ 体系 $V \rightarrow V, R$ 和 $V \rightarrow R, T$ 能量 转移的实验 测量.....	423
1.2. HX-CO ₂ 体系中 $V \rightarrow V, R$ 能量转移理论	429
§ 2. 连续波亚音速 DF-CO ₂ 化学激光器	431
§ 3. 连续波超音速 DF-CO ₂ 转移型化学激光器	438
§ 4. 脉冲 DF-CO ₂ 化学激光器	445
§ 5. 结论.....	450
第八章 化学激光器的数字模型计算.....	452
§ 1. 增益方程.....	454
1.1. 增益系数.....	454
1.2. 能量和转动配分函数.....	456
1.3. Einstein 系数	464
1.4. 线型函数.....	469
1.5. 数值实例.....	479
§ 2. 预混连续波模型.....	481
2.1. 绪言.....	481
2.2. 光学模型.....	482

2.3. 方程式的建立	487
2.4. 方程式的数值表述	490
2.5. 计算方案	497
2.6. 解的分析	499
2.7. 饱和强度	500
2.8. 与物理光学相耦合的方法	500
§ 3. 脉冲模型	503
3.1. 绪言	503
3.2. 方程式的建立	504
3.3. 激射跃迁的时间序列	507
§ 4. 简单混合模型	511
4.1. 绪言	511
4.2. 方程式的建立	511
4.3. 混合模型的结果	517
§ 5. 复杂混合模型	523
附录 A 漏泄流管模型	526
附录 B 在初始奇点上的解	529
第九章 双分子反应的经典动力学	531
§ 1. 势能面	531
1.1. 计算方法	532
1.2. 势能面的重要特征	541
1.3. 说明举例	545
§ 2. 轨迹的研究	546
2.1. 计算方法	547
2.2. 动力学变量的初值	548
2.3. 终态的分析	549
2.4. 轨迹的分析	550
2.5. 碰撞的详细历程	551
第十章 粒子数反转的统计-动力学模型	556
§ 1. 产物态分布的表征	557
1.1. 粒子数反转	557
1.2. 熵和惊奇度	561

1.3. 产物态分布	562
1.4. 振动分布	565
1.5. 转动分布	568
§ 2. 在化学激光器中的应用	571
2.1. 无弛豫布居	571
2.2. 无振动弛豫的转动热平衡布居	574
2.3. 部分平衡布居	575
§ 3. 约束和温度参数	576
3.1. 最大熵原理	576
3.2. 转动温度参数	578
§ 4. 动力学-统计模型	579
4.1. 粒子数反转的非绝热模型	580
4.2. 统计理论	586
第十一章 CO 化学激光器	591
§ 1. CO 激光介质的化学	591
§ 2. O+CS 反应的振动分布	594
§ 3. 在 CO 化学激光介质中的分子传能	597
§ 4. 光学数据	602
§ 5. 连续混合型激光器的模型	602
5.1. 流体的流动与混合	602
5.2. 化学动力学, 气流的加热作用以及膨胀	605
5.3. CO 的形成和弛豫	606
5.4. 受激辐射	607
5.5. 模拟计算的结果	609
§ 6. 连续波 CO 化学激光器的实验	614
6.1. 纵向流动连续波激光器	614
6.2. 横向流动连续波激光器	617
6.3. 亚音速流的实验	617
6.4. 超音速流动的实验	620
§ 7. 连续波 CO 火焰激光器	622
§ 8. 脉冲的 CO 化学激光器	626
§ 9. CO 和 HF-DF 激光体系的比较	632

§ 10. 目前 CO 化学激光器的研究方向	634
10.1. 改善激光器性能	634
10.2. 需要考虑的实际问题	635
10.3. 基础研究	636
第十二章 光化学碘激光器	637
§ 1. 碘激光体系的化学动力学	639
1.1. 基本的光解过程	640
1.2. 激光介质的自再生	644
1.3. 动力学的模拟研究	646
§ 2. 激光跃迁光谱	649
2.1. 跃迁的超精细结构	650
2.2. 受激发射截面	651
2.3. 压力加宽	652
2.4. 塞曼分裂	656
2.5. 子能级的弛豫	657
§ 3. 短脉冲碘激光振荡器	658
3.1. 5×10^{-8} 到 5×10^{-7} 秒脉冲持续时间的振荡器	658
3.2. 3 到 50 毫微秒脉冲持续时间的振荡器	659
3.3. 0.1 到 3 毫微秒脉冲持续时间的振荡器	660
§ 4. 高功率碘激光放大器	661
4.1. 反转的产生	662
4.2. 在放大器中能量的储存	663
4.3. 能量的提取	666
第十三章 金属原子氧化型激光器	669
§ 1. 爆炸丝金属原子氧化激光器	674
§ 2. 激波蒸发金属板型激光器	689
§ 3. 流动混合的连续波金属原子氧化型激光器	692
附录 本书撰稿者	696
索引	698
参考文献	716

第一章 导 论

G. C. PIMENTEL K. L. KOMPA

§ 1. 化学激光的定义

编写本书时,化学激光已有近十年的历史了。美国光学协会在 1964 年就组织了这一学科的第一次学术会议,会议对这一领域的迅速发展寄予很大的希望。接着于 1965 年,由伯克利的 Kasper 和 Pimentel^[1] 首次在实验上实现了化学激光发射。发射发生在光引发的氢-氯气体爆炸过程中。在这项发明之前,即 1964 年,他们就描述过第一台光解离激光器^[2]。这种激光器则是以光诱导的方法打断烷基碘的键而生成激发态碘原子为基础的。

从此,这样的激光器就为研究基元反应的分子动力学提供了一条富有成效的途径,并且促进了碰撞能量转移过程的研究。最近,亦将化学激光用作光谱和动力学研究工作中具有专门用途的激励光源。

1970 年前后,才出现从技术上发展化学激光的兴趣。情况之所以如此,部分原因是由于化学激光具有复杂的理论基础。不仅它们的多能级泵浦方式复杂,而且由于碰撞去激活过程的效率高,其增益和谱线分布就会随时间迅速地变化。因此,化学激光既能在理论上又能在工艺上取得进展之先,就必须将各个不同学科分支的概念结合起来。可是,大约从 1969 年开始,在文献中已出现了数量日增的有关化学激光的技术性论文。尚发表了一些综合性文章^[3-6]。以几个不同反应为基础的连续的化学激光器正在运转当中,而脉冲的化学激光器在功率上已被放大到技术上令人感兴趣的地步。评价化学激光器发展前途所需的大部分资料已经具备。

因此,本书是写给对化学激光有兴趣的物理学家、物理化学家以及激光工程师的。一般着重于介绍应用性的物理知识,激光工程,并且兼顾某些化学基础知识。为了这些读者,我们将把化学激光定义为在放热的化学反应过程中,直接或者间接地形成粒子数反转而运转的激光。而且,我们的定义将扩大到所有类型的化学发光激发,例如包括:光诱导作用,甚至电子冲击诱导作用打断化学键的过程中产生的泵浦作用,以及由原子或是分子辐射缔合产生的泵浦作用。最后,我们也将研究在激射前化学能被转移到混合物中而发生的激射作用。

作为最简单的近似,参考通常的反应分布图,就可以考察放热反应中能量的分配情况,如图1所示。

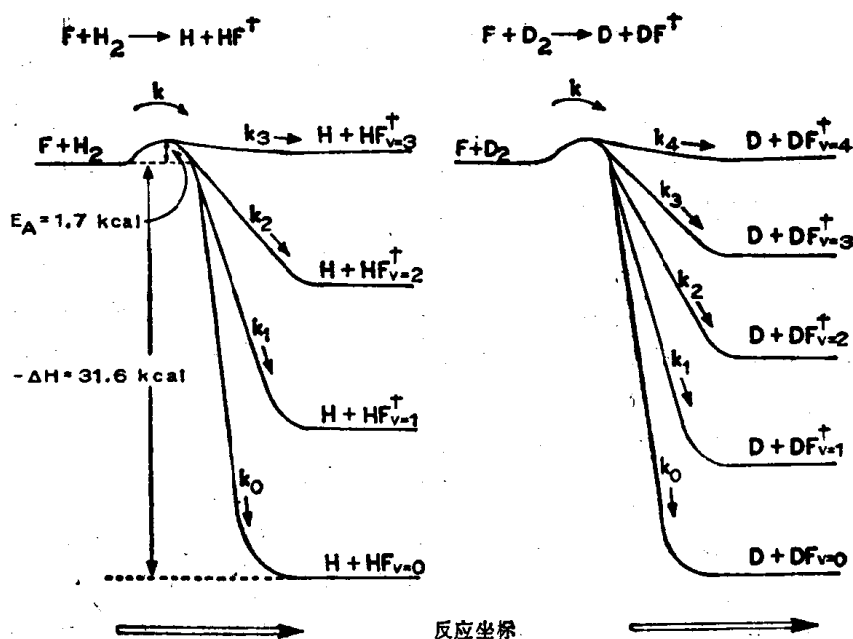


图1 $F + H_2$ 和 $F + D_2$ 反应的能级图 (k_v 为生成第 v 振动能态的速率常数)。

很明显,刚刚由活化络合物形成的那些产物分子,不会处于热平衡状态。这样的分子含有过剩的能量,这些能量既能以辐射过程也可以通过碰撞过程被释放出来,这两种过程总是在竞争着。

可是,关键的问题在于,反应是否选择性地将部分能量导入一个或多个较高的产物能态中,从而形成粒子数反转。在反应过程中,若某些动力学限制条件阻止能量作纯统计分布时,这种情况是能够出现的。

分子能够以电子的、振动的、转动的以及(在此处没有意义的)平动的自由度方式储存能量。然而,能量在不同自由度中储存的几率与导致化学激光作用的几率是大不相同的。除需要粒子数反转外,激光增益的产生也取决于受激发射截面,这个截面与受激辐射的 Einstein 系数 B_{12} 以及跃迁谱线宽度 $\Delta\nu$ 有下列简单关系:

$$\sigma = \frac{B_{12}}{\Delta\nu c} = \frac{\lambda^2}{8\pi\Delta\nu\tau}$$

因此,激光发射可能超过碰撞弛豫的机会,将随发射波长的平方而变化,并与发射能态的自发辐射寿命 τ 以及谱线宽度 $\Delta\nu$ 成反比。

这几个因素似乎较有利于电子激发的化学激光,而对振动激发的化学激光较为不利;电子跃迁波长较短,而且在大多数情况下具有非常之短的寿命 [$I^*(^3P_{1/2} \rightarrow ^3P_{3/2})$ 是例外]。但化学泵浦的振动跃迁激光普遍存在,而化学泵浦的电子跃迁激光则极为罕见。当然,在可见光范围内,即在 41 千卡/克分子(700 毫微米)和 71 千卡/克分子(400 毫微米)之间,激励跃迁所需求的能量要比一般化学反应热高。然而,确实已知有许多放热量足够多的化学反应,会产生化学发光现象。

显然,损耗过程和增益因子要一并考虑。就振动受激发射而言,碰撞去激活过程最重要;就电子跃迁激光来说,使增益增大的大 A 因子,亦能通过自发发射而限制粒子数反转的增长。

还知道有一些适合于电子能态化学泵浦的反应(譬如,包括多原子分子或含有金属原子的小分子的某些反应),预期能获得成功。但是,只是在光解离一类反应中,才实现了电子态的激光发射。也曾经观察到转动跃迁的激光发射^[7,8],但是,靠化学反应提供引起这种激光发射的粒子数反转,在任何情况下也未得到确实的证明。