

## 综合评述

### 化学激光研究的进展和几个问题的讨论

#### 最高指示

社会的发展到了今天的时代，正确地认识世界和改造世界的责任，已经历史地落在无产阶级及其政党的肩上。

——实践论——

激光器就其实质来说，是将某种形式的能量转化为受激光发射的换能装置。视激光工作物质体系及能量转化过程的矛盾特殊性的不同，在激光工作物质的研究方面，分别形成若干学术领域。化学激光便是其中的一个新的分支。

化学激光这一学术领域所研究、考察的对象是通过化学反应激励工作粒子而产生受激光发射的过程及其具体的工作物质体系。在这一过程中，视激发工作粒子化学反应的热效应不同，用以转化为受激光发射的能量可以是化学反应体系本身所固有的化学能，也可以是体系自外界所吸收的某种形式的能量，如光能、电能或原子能等。

这样，我们可以将化学激光定义为：凡是通过化学反应激励工作粒子，而将某种形式的能量转化为受激光发射的过程，均可称之为化学激光。凡满足这一定义要求的工作物质体系，均可称之为化学激光体系。

作为一种新型的产生激光的过程，化学激光的研究无疑是具有重大的实际意义的。

化学反应体系及其产物粒子的多种多样，为获得各种波长的受激光发射提供了巨大的可能性；可以连续工作以及工作物质易于制备，为激光的普遍应用开辟了广阔的前景；尤其令人感兴趣的是，它有可能完全利用体系本身固有的化学能激励工作粒子，这就有可能大大简化、甚至完全省去激光器的附加储能系统，这样，它对于那些要求重量轻、体积小、机动灵活、长期贮存、坚固安全的军事及其他某些特殊需要来说，将是一个颇为理想的系统。正是由于具有这些优点，化学激光的研究引起了普遍的重视。

目前化学激光的研究，正处于萌芽时期。几年来，化学激光的研究正在不断地取得进展，但是，另一方面，对其发展前途也存在着争议。例如，在1964年美帝举行的第一次化学激光学术会议上。某些资产阶级学者散布一种悲观情绪。他们一方面也承认，通过化学反应产生受激光发射是可能的。但是，他们又以化学激光研究中有待解决的一些问题作为“依据”，对其实用价值及

发展前途表示忧虑和怀疑。几年来，研究工作的实践，确也暴露了化学激光体系存在的某些问题，例如，工作粒子浓度不高、激励能利用效率较低、以及激励能在工作粒子各能级间的分布较为分散等等。从而更使某些人增加了悲观情绪。

但是，我们的伟大导师毛主席教导我们说：“在生产斗争和科学实验范围内，人类总是不断发展的，自然界也总是不断发展的，永远不会停止在一个水平上。因此，人类总得不断地总结经验，有所发现，有所发明，有所创造，有所前进。停止的论点，悲观的论点，无所作为和骄傲自满的论点，都是错误的。其所以是错误，因为这些论点，不符合大约一百万年以来人类社会发展的历史事实，也不符合迄今为止我们所知道的自然界（例如天体史，地球史，生物史，其他各种自然科学史所反映的自然界）的历史事实。”<sup>[1]</sup>毛主席又指出：“一个正确的认识，往往需要经过由物质到精神，由精神到物质，即由实践到认识，由认识到实践这样多次的反复，才能够完成。这就是马克思主义的认识论，就是辩证唯物论的认识论。”<sup>[2]</sup>

一年前，我们曾就化学激光的几个基本问题进行了初步的探讨<sup>[3]</sup>。在这里，综述、回顾几年来化学激光研究的进展，并对某些问题进一步讨论，以期较符合客观实际地认识化学激光本身及其发展前景，是本文的基本内容及预定目的。

### (一) 化学激光概述<sup>[3]</sup>

化学激光的基本工作原理，和其他激光过程的原理完全相同。也就是说，为了获得激光，其工作粒子须先被激励，并在某一光学跃迁过程的上、下能级之间呈现粒子集居数分布反转状态。当上能级的粒子集居数大

于下能级粒子集居数的差值超过某一临界值时，放置在由两个反射镜组成的光学谐振腔中的工作物质体系所产生的受激光子，便可进行振荡，并有一部分以受激光发射的形式自谐振腔中输出。但是，化学激光有别于其他种种激光过程的最根本的矛盾特殊性，这就是它通过化学反应激励工作粒子。换句话说，在实现工作粒子集居数反转分布的过程中有化学反应参与，是化学激光和其他种种激光体系的最本质的差别。

从化学激光的最基本的矛盾特殊性出发，不难看出，化学激光体系应具有下列几个基本特征。首先，为了产生激光，工作物质体系固然需从外界吸收一定的能量，但这部分能量并不是直接用来激励工作粒子，在大多数的情况下，仅仅是用来引发某种化学反应，而激励工作粒子的往往是反应过程中所释放的自由能。其次，化学激光的工作粒子可以是体系中固有的某种化学粒子，但也可以是在化学反应过程中新生成的。它不仅可以是活泼的自由原子、离子或稳定的分子，而且也可以是不稳定的多原子自由基。最后，在产生激光过程中，工作物质的化学组成必然要发生改变，同时在其他物理参数，相组成上也可能发生改变。凡此种种，就构成了在研究这种激光过程时所必须考虑的特殊问题。

在化学激光体系中，通过化学反应激励工作粒子，有两条基本途径。其一是“化学激励”。另一途径是“敏化激励”。在化学激励机理中，工作粒子是通过化学反应过程中所释放的自由能而激励的，所释放的能量在产物粒子的不同自由度、不同能级间的非平衡分配，是引起粒子集居数反转分布的根本原因。显然，按这种机理激励工作粒子时，其工作粒子必然是激励它的反应过程的产物，

而激励则在生成它的过程中同时实现的。通过这种机理激励工作粒子的基元化学反应，可以是重合、加成、取代、电荷传递反应，甚至也可以是分解反应。但是，只有当这一基元过程是放热反应时，在激光过程中才可能利用体系本身所固有的化学能。敏化激励机理是化学反应中所生成的激发态产物通过能量传递而激励工作粒子的过程。此时，工作粒子不一定是通过体系中某一化学反应而生成的，而生成激发态粒子的化学反应也不一定要求其产物呈现粒子集居数反转分布，但当要求利用体系的化学能激励工作粒子时，这一化学反应必须是放热过程。

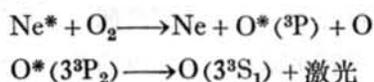
根据不同的激励机理，考虑到化学激光的矛盾特殊性，克服工作粒子浓度不高、激励能利用不充分等缺点，从而建立高能量(功率)输出、高效率利用化学能的激光体系，并研究其过程的规律性，是化学激光这一新的学科分支的基本研究内容之一。

## (二)化学激光研究进展的回顾

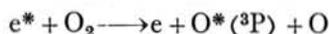
化学激光的研究是激光领域发展的必然趋势。关于这一点，有两个基本原因。首先，从激光工作物质的研究来看，气体(甚至也包括液体)激光体系的发展和改进，通过化学反应激励工作粒子将是一个基本的趋势。例如，在新型工作物质的探索方面，越来越向复杂体系方面发展。当用强大的外界能量作用于这种结构较为复杂的分子时，往往易于引起化学反应，而这些反应也往往导致生成激发态产物粒子。故通过化学反应激励工作粒子将是在复杂分子体系中产生激光的一个重要途径。其次，从能源方面来看，直接利用工作物质体系的化学能是十分理想的。但是，为了实现这一点，必须通过化学反应激励工作粒子，也就是说，必须研究直接利

用体系的化学能激励工作粒子的化学激光体系，故而它是激光领域发展的基本方向之一。几年来整个激光领域研究的进展正好说明了这种趋势。正是在围绕着这两方面的问题发展激光领域的那些研究工作的进展中，才奠定了化学激光这一新分支的基础。

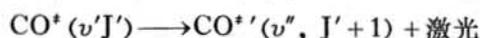
关于通过化学反应激励工作粒子而产生激光的建议，是在用红宝石晶体第一次实现光受激发射之后不久就提出的<sup>[4]</sup>(1960年)。其后，关于这一可能性曾进行了一些设想及理论分析，但是，这样一类新型激光体系，更多的是通过探索和改进放电激励的气态激光工作物质的实践过程中发现的。首先研制成功的气态激光体系是通过原子间的非弹性碰撞激励工作粒子的，但是，这种方法要求相碰撞的粒子间，在能级以及寿命方面，必须严格的相互对应，所以，它仅可适用于个别的体系。电子或亚稳态原子和多原子分子发生非弹性碰撞时，可以导致后者发生分解反应。尤其令人感兴趣的是，这些分解反应所生成的产物粒子——自由基、自由原子或离子，可以优先地集居在某一激发态能级，在这里，在相碰撞的粒子的能级对应要求方面，并不象原子-原子非弹性碰撞而选择激励时那样严格，因之，这种通过化学反应激励工作粒子的方法，便成为探索新的气态激光体系的基本方向之一。从而导致放电激励的化学激光体系的发展。在这方面第一个研制成功的激光体系，是在 He-Ne 激光基础上发展出来的氦-氧体系<sup>[5]</sup>。在放电的条件下，氦原子被激励到亚稳态，通过能量传递，使氧分子解离而优先生成 O(<sup>3</sup>P) 原子。后者是产生波长为 0.8446 微米激光的工作粒子：



当然,从一般的考虑出发,在这里有一部分  $O^*(^3P_2)$  原子是通过下列的分解反应而生成也是可能的<sup>[6]</sup>:



应当指出,只通过电子—分子非弹性碰撞引发的分解反应,在某些体系中也可以使得产物粒子呈现粒子集居数反转,并产生激光。典型的例子是放电抽运的 COS 激光体系<sup>[7]</sup>,它可产生波长为 5.1~5.9 微米的激光,其工作粒子则是由 COS 分解而生成的振动激发态的  $CO^*$ 。



到目前为止,由电子或亚稳态原子和多原子分子发生非弹性碰撞、通过分解反应而选择激励工作粒子的激光体系,已发现将近四十种之多,其激光波长遍布紫外、可见、红外及亚毫米波段(见表 1、2)。尽管其中某些体系工作粒子的激励机理尚未最后确定,很可能有一些是分解反应的产物与电子碰撞而激励的,但是,可以肯定的一点是其中不少体系的工作粒子,是在化学反应过程中激励的,也就是说,它们是通过外界能量抽运由分解反应激励工作粒子的化学激光体系。

表 1 放电电离惰性气+多原子分子混合物激光体系

体系组成	工作粒子	受激跃迁过程	受激光波长(微米)	充气压力(毫米汞柱)	单程增益(%米)	功率输出(毫瓦)	能量利用效率	资料来源
Ne+O <sub>2</sub>	O	3p <sup>3</sup> P <sub>2</sub> -3s <sup>3</sup> S <sub>1</sub>	0.8446	P <sub>O<sub>2</sub></sub> =0.014, P <sub>Ne</sub> =0.35	3	2	—	[5]
Ar+O <sub>2</sub>	O	3p <sup>3</sup> P <sub>2</sub> -3s <sup>3</sup> S <sub>1</sub>	0.8446	P <sub>O<sub>2</sub></sub> =0.036, P <sub>Ar</sub> =1.3	3	2	—	[5]
He 或 Ne+CO	Cl	3p <sup>3</sup> D <sub>3</sub> -3s <sup>3</sup> P <sub>2</sub> <sup>o</sup>	1.0689	P <sub>He</sub> =2.0 或 P <sub>Ne</sub> =1.0 P <sub>CO</sub> =0.01	2	1	—	[8,9]
He 或 Ne+CO <sub>2</sub>		3p <sup>3</sup> P <sub>1</sub> -3s <sup>3</sup> P <sub>1</sub> <sup>o</sup>	1.4539	P <sub>He</sub> =2.0 或 P <sub>Ne</sub> =1.0 P <sub>CO<sub>2</sub></sub> =0.01				
He 或 Ne+CO <sub>2</sub>	O	3p <sup>3</sup> P <sub>2</sub> -3s <sup>3</sup> S <sub>1</sub>	0.8446	P <sub>He</sub> =2.0 或 P <sub>Ne</sub> =1.0 P <sub>CO</sub> =0.01	—	—	—	[9]
He 或 Ne+CO <sub>2</sub>		3p <sup>3</sup> P <sub>2</sub> -3s <sup>3</sup> S <sub>1</sub>	0.8446	P <sub>He</sub> =2.0 或 P <sub>Ne</sub> =1.0 P <sub>CO<sub>2</sub></sub> =0.01				
He 或 Ne+NO	O	3p <sup>3</sup> P <sub>2</sub> -3s <sup>3</sup> S <sub>1</sub>	0.8446	P <sub>He</sub> =2.0 或 P <sub>Ne</sub> =1.0 P <sub>NO</sub> 或P <sub>N<sub>2</sub>O</sub> =0.03	—	—	—	[9]
He 或 Ne+N <sub>2</sub> O		3p <sup>3</sup> S <sub>1/2</sub> <sup>o</sup> -3s <sup>3</sup> P <sub>3/2</sub>	1.3583	P <sub>He</sub> =2.0 或 P <sub>Ne</sub> =1.0 P <sub>NO</sub> 或P <sub>N<sub>2</sub>O</sub> =0.03				
He 或 Ne+NO	NI	4p <sup>4</sup> P <sub>5/2</sub> <sup>o</sup> -3p <sup>3</sup> D <sub>5/2</sub> <sup>o</sup>	1.4544	P <sub>He</sub> =2.0 或 P <sub>Ne</sub> =1.0 P <sub>NO</sub> 或P <sub>N<sub>2</sub>O</sub> =0.03	—	—	—	[9]
He 或 Ne+N <sub>2</sub> O		4p <sup>4</sup> P <sub>5/2</sub> <sup>o</sup> -3p <sup>3</sup> D <sub>5/2</sub> <sup>o</sup>	1.4544	P <sub>He</sub> =2.0 或 P <sub>Ne</sub> =1.0 P <sub>NO</sub> 或P <sub>N<sub>2</sub>O</sub> =0.03				
He+SF <sub>6</sub>	SI	4p <sup>3</sup> P <sub>2</sub> -4s <sup>3</sup> S <sub>1</sub> <sup>o</sup>	1.0455	P <sub>Ne</sub> =2.0, P <sub>SF<sub>6</sub></sub> =0.03	—	—	—	[9]
		4p <sup>3</sup> F <sub>3</sub> -4s <sup>3</sup> D <sub>2</sub> <sup>o</sup>	1.0628					
Ar+Br <sub>2</sub>	Br(?)	(?)	0.8446 附近四条	P <sub>Ar</sub> =1.8, P <sub>Br<sub>2</sub></sub> =0.09	—	~1	—	[9]
Ar 或 Ne-H <sub>2</sub> S	S	4p <sup>3</sup> P <sub>2</sub> -4s <sup>3</sup> S <sub>1</sub> <sup>o</sup>	1.045	P <sub>Ne</sub> =0.6~3.0 或 P <sub>Ar</sub> =0.05 P <sub>H<sub>2</sub>S</sub> =0.06	—	~0.1	—	[10]
Ne 或 He+CCl <sub>2</sub> F <sub>2</sub>	Cl	4p <sup>2</sup> P <sub>3/2</sub> <sup>o</sup> -4s <sup>2</sup> P <sub>1/2</sub>	0.9542	P <sub>Ne</sub> 或 P <sub>He</sub> =0.6~0.7 P <sub>CCl<sub>2</sub>F<sub>2</sub></sub> =0.003~0.007	5.4	11	—	[11]
He+Cl <sub>2</sub>	Cl I	3p(4D <sub>3/2</sub> ) <sup>o</sup> -4p(4P <sub>3/2</sub> )	1.9755	P <sub>He</sub> =1.5, P <sub>Cl<sub>2</sub></sub> =0.1	—	1	6×10 <sup>-6</sup>	[12]
	Cl I	3p(4D <sub>5/2</sub> ) <sup>o</sup> -4p(4P <sub>3/2</sub> )	2.0199	P <sub>He</sub> =1.5, P <sub>Cl<sub>2</sub></sub> =0.1	—	—	—	[12]

表 2 放电解离多原子分子的激光体系

体系组成	工 作 子 粒	受 激 跃 迁 过 程	受 激 光 波 长 (微米)	充 气 压 力	单 程 增 益 (%米)	功 率 输 出	能 量 利 用 效 率	资 料 来 源	
I <sub>2</sub>	I	—	3.236, 3.431	—	—	—	—	(13)	
HI	I	( <sup>1</sup> D <sub>2</sub> )5d[2] <sub>5/2</sub> —( <sup>1</sup> D <sub>2</sub> )6p[1] <sup>0</sup> <sub>3/2</sub>	2.7571	—	—	—	—	(14)	
		( <sup>1</sup> D <sub>2</sub> )5d[2] <sub>5/2</sub> —( <sup>3</sup> P <sub>2</sub> )6p[1] <sup>0</sup> <sub>3/2</sub>	3.2359	—	—	—	—	"	
		( <sup>3</sup> P <sub>2</sub> )5d[4] <sub>7/2</sub> —( <sup>3</sup> P <sub>2</sub> )6p[3] <sup>0</sup> <sub>5/2</sub>	3.4305	—	—	—	—	"	
		( <sup>3</sup> P <sub>1</sub> )6d[2] <sub>3/2</sub> —( <sup>3</sup> P <sub>2</sub> )7p[1] <sup>0</sup> <sub>3/2</sub>	1.4542	P <sub>HI</sub> =0.3 P <sub>Ne</sub> =0.3	—	—	—	(15)	
		( <sup>3</sup> P <sub>1</sub> )5d[2] <sub>3/2</sub> —( <sup>3</sup> P <sub>1</sub> )6p[1] <sup>0</sup> <sub>3/2</sub>	2.5987		—	—	—	"	
HBr	Br	( <sup>3</sup> P <sub>2</sub> )4d[3] <sub>7/2</sub> —( <sup>3</sup> P <sub>2</sub> )5p[2] <sup>0</sup> <sub>5/2</sub>	2.2854	P <sub>HBr</sub> =0.3	—	—	—	(14)	
		( <sup>3</sup> P <sub>2</sub> )4d[3] <sub>5/2</sub> —( <sup>3</sup> P <sub>2</sub> )5p[2] <sup>0</sup> <sub>3/2</sub>	2.3511		—	—	—	"	
		( <sup>3</sup> P <sub>2</sub> )4d[3] <sub>7/2</sub> —( <sup>3</sup> P <sub>2</sub> )5p[3] <sup>0</sup> <sub>7/2</sub>	2.8375	—	—	—	—	"	
HCl	Cl	3d( <sup>4</sup> D <sub>7/2</sub> )—4p( <sup>4</sup> D <sub>1/2</sub> <sup>0</sup> )	2.4470	P <sub>HCl</sub> =0.3 P <sub>He</sub> 或P <sub>Ne</sub> =0.1	—	—	—	(15)	
		3d( <sup>4</sup> P <sub>3/2</sub> )—4p( <sup>4</sup> D <sub>3/2</sub> <sup>0</sup> )	1.3893		—	—	—	"	
		3d( <sup>2</sup> D <sub>5/2</sub> )—4p( <sup>2</sup> D <sub>5/2</sub> <sup>0</sup> )	1.3863	—	—	—	—	"	
Cl <sub>2</sub>	Cl I	3d( <sup>4</sup> D <sub>7/2</sub> )—4p( <sup>3</sup> P <sub>3/2</sub> )	1.9755	—	—	—	—	(12,15,16)	
	"	4p( <sup>3</sup> P <sub>2</sub> )—4s( <sup>3</sup> S <sub>1</sub> <sup>0</sup> )	2.0199		—	—	—	—	"
	"	4p( <sup>2</sup> P <sub>3/2</sub> )—4s( <sup>4</sup> P <sub>1/2</sub> )	0.9452		—	—	—	—	"
	Cl II	4p( <sup>3</sup> P <sub>2</sub> )—4s( <sup>3</sup> S <sub>1</sub> <sup>0</sup> )	0.5219		—	—	—	—	(17)
	"	4p( <sup>3</sup> P <sub>1</sub> )—4s( <sup>3</sup> S <sub>1</sub> <sup>0</sup> )	0.5221		—	—	—	—	"
	"	4p( <sup>1</sup> F <sub>3</sub> )—4s( <sup>1</sup> D <sub>2</sub> <sup>0</sup> )	0.5392		—	—	—	—	"
	Cl II <sup>(a)</sup>	4p'( <sup>2</sup> D <sub>3</sub> <sup>0</sup> )—4s'( <sup>2</sup> D <sub>1</sub> )	0.3392		—	—	—	—	(18)
	"	4p'( <sup>2</sup> D <sub>2</sub> <sup>0</sup> )—4s'( <sup>2</sup> D <sub>2</sub> )	0.3393		—	—	—	—	"
	"	4p'( <sup>2</sup> F <sub>3</sub> <sup>0</sup> )—4s'( <sup>2</sup> D <sub>2</sub> )	0.3530		—	—	—	—	"
	"	4p'( <sup>2</sup> F <sub>2</sub> <sup>0</sup> )—4s'( <sup>2</sup> D <sub>1</sub> )	0.3560		—	—	—	—	"
	"	4p( <sup>4</sup> D <sub>2</sub> <sup>0</sup> )—4s( <sup>4</sup> P <sub>1</sub> )	0.3612		—	—	—	—	"
	"	4p( <sup>3</sup> D <sub>2</sub> <sup>0</sup> )—4s( <sup>3</sup> P <sub>1</sub> )	0.3720		—	—	—	—	"
Br <sub>2</sub>	Br I <sup>(b)</sup>	4p( <sup>3</sup> D <sub>2</sub> <sup>0</sup> )—4s( <sup>3</sup> P <sub>2</sub> )	0.3748	—	—	—	—	"	
		5p'( <sup>1</sup> F <sub>3</sub> )—5s( <sup>1</sup> D <sub>2</sub> <sup>0</sup> )	0.5332	—	—	—	—	(19)	
		5p'( <sup>3</sup> P <sub>2</sub> )—5s( <sup>3</sup> S <sub>1</sub> <sup>0</sup> )	0.5182	—	—	—	—	"	
SF <sub>6</sub>	S I	4p( <sup>3</sup> P <sub>2</sub> )—4s( <sup>3</sup> S <sub>1</sub> <sup>0</sup> )	1.0455	P <sub>SF<sub>6</sub></sub> =0.03	—	—	—	(9)	
		4p'( <sup>1</sup> F <sub>3</sub> )—4s'( <sup>1</sup> D <sub>2</sub> <sup>0</sup> )	1.0628		—	—	—	—	"
SF <sub>6</sub> 或PF <sub>5</sub>	F(?) <sup>(c)</sup>	?	0.6347	—	—	—	—	(18)	
		?	0.6371	—	—	—	—	"	
PF <sub>5</sub>	P I <sup>(d)</sup>	4p( <sup>3</sup> D <sub>2</sub> )—4s( <sup>3</sup> P <sub>1</sub> <sup>0</sup> )	0.6024	—	—	—	—	"	
		4p( <sup>3</sup> D <sub>3</sub> )—4s( <sup>3</sup> P <sub>2</sub> <sup>0</sup> )	0.6043	—	—	—	—	"	
O <sub>2</sub>	O I, O II	3p-3s, 跃迁	0.3749~ 0.6712	P <sub>O<sub>2</sub></sub> =0.02 ~0.03	—	—	—	(20)	
CO <sub>2</sub>	C II	3p( <sup>3</sup> P <sub>2</sub> <sup>0</sup> )—3s( <sup>3</sup> S <sub>1</sub> )	(共11个波长) 0.4674	P <sub>CO<sub>2</sub></sub> =0.02 ~0.03	—	—	—	"	
NH <sub>3</sub>	C II N I, N II N II	3p( <sup>3</sup> P <sub>1</sub> <sup>0</sup> )—3s( <sup>3</sup> S <sub>1</sub> ) 3p-3s 跃迁	0.4650 0.3478~ 0.4630	" P <sub>NH<sub>3</sub></sub> = 0.02~0.03	—	—	—	"	
COS	CO <sup>±</sup>	v=14~7 的 P 支跃迁	(共6个波长) 5.1~5.9	P <sub>COS</sub> =1.4	—	—	—	(21)	
NOCl	NO <sup>±</sup>	v=11~6 的 P 支跃迁	(共29个波长) 5.8~6.4	P <sub>NOCl</sub> =0.5 P <sub>He</sub> =5.8	—	—	—	(22)	
HCN	CN		(共62个波长) 337	—	—	—	—	(23)	
CH <sub>3</sub> CN	"		~1	—	—	—	—	(23~28)	
C <sub>2</sub> H <sub>5</sub> CN	"	v=10, K=10—v=10, K=9	310.8	—	—	10瓦	—	(23~24)	
CH <sub>3</sub> SCN	"	v=2, K=8, J=8½—v=2, K=7, J=7½	336.4	—	—	10瓦	—	"	
C <sub>2</sub> H <sub>5</sub> OCN	"	v=2, K=8, J=7½—v=2, K=7, J=6½	336.5	—	—	10瓦	—	"	
NH <sub>2</sub> CN	"			—	—	—	—	"	
BrCN	"			—	—	—	—	"	
ICN	"			—	—	—	—	"	

表 2

(续)

体系组成	工作粒子	受激跃迁过程	受激光波长(微米)	充气压力	单程增益(%米)	功率输出	能量利用效率	资料来源
ICN	CN	$v=2, K=5, J=5\frac{1}{2}-v=2,$ $K=4, J=4\frac{1}{2}$	537.7	0.1~0.5	—	0.5瓦	—	"
ICN	"	$v=2, K=4, J=4\frac{1}{2}-v=2,$ $K=4, J=3\frac{1}{2}$	538.2					
C <sub>2</sub> N <sub>2</sub>	"		337.311	P <sub>C<sub>2</sub>N<sub>2</sub></sub> = 0.15(e) P <sub>H<sub>2</sub>O</sub> =0.15	—	—	—	(26)

(a)在 0.2632 到 0.4678 微米间共 12 个波长。这里仅列出较强的几个谱线。

(b)在 0.4742 到 0.5332 微米间共 5 个波长。由 BrI 电子跃迁产生。这里仅列出较强的几个谱线。

(c)在 0.2759 到 0.6371 微米间共 9 个波长，其中有 4 个尚未被鉴定出其跃迁过程，其余 5 个波长由 F I, F II 和 F III 产生。这里仅列出较强的谱线

(d)在 0.3347 到 0.6671 微米间共 8 个波长，由 P I, P II 和 P III 的电子跃迁产生。这里仅列出较强的谱线。

(e)只有在有 H<sub>2</sub>O 存在时才有 CN 的受激光发射。

(f)在 H<sub>2</sub>O, D<sub>2</sub>O 中放电也可以有波长处于亚毫米波段的受激光发射。其工作粒子是 OH 或 H<sub>2</sub>O 尚未作结论。

最初，萧洛和陶恩斯也曾建议采用光泵激励原子的方法获得激光<sup>[29]</sup>。光泵抽运铯原子 Cs 的激光体的研究成功<sup>[30]</sup>，证实了这种最初设想的正确性。但是，由于原子的吸收谱带很窄，在光泵能量利用方面十分不利，索别尔曼<sup>[31]</sup>和古尔德<sup>[32]</sup>分别提出了光分解

多原子分子而选择激励其产物粒子的改进建议。这样，气态激光工作物质的研究，基于另外的一种考虑也部分地转向了探索光引发分解反应激励工作粒子的化学激光体系方面。根据这一设想，目前已在一些体系中获得激光(见表 3)。光解碘甲烷或三氟碘甲烷

表 3 多原子分子光解激光体系

工作物质	工作粒子	受激跃迁过程	受激光发射波长(微米)	单程增益	充气压力(毫米汞柱)	功率输出 <sup>(a)</sup> (瓦)	能量输出 <sup>(b)</sup> (焦耳)	激励能利用效率	资料来源
CH <sub>3</sub> I	I	$5^2P_{1/2}-5^2P_{3/2}$	1.315	—	P=7.5	0—	—	—	[33, 34, 35]
C <sub>2</sub> H <sub>5</sub> I	I	"	"	—	"	—	—	—	[34]
n-C <sub>3</sub> H <sub>7</sub> I	I	"	"	—	"	—	—	—	[34]
n-C <sub>4</sub> H <sub>9</sub> I	I	"	"	—	"	—	—	—	[34]
i-C <sub>4</sub> H <sub>9</sub> I	I	"	"	—	"	—	—	—	[34]
CF <sub>3</sub> I	I	"	"	106分贝	P <sub>CF<sub>3</sub>I</sub> =15 <sup>(c)</sup>	10 <sup>4</sup>	65	$1.6 \times 10^{-3}$	[33~37]
C <sub>2</sub> F <sub>5</sub> I	I	"	"	—	P=15	—	—	—	[34]
n-C <sub>3</sub> F <sub>7</sub> I	I	"	"	—	"	—	—	—	[34]
i-C <sub>3</sub> F <sub>7</sub> I	I	"	"	—	"	—	—	—	[34]
NOCl	NO	$^2\Pi_{1/2}$ 的 $v=8\sim 6$ 的 p 支跃迁和 $^2\Pi_{3/2}$ 的 $v=9\sim 7$ 的 p 支跃迁	5.95~6.09 共15个波长	10~40%	P <sub>NOCl</sub> =1, P <sub>k<sub>e</sub></sub> =100	10	$\sim 5 \times 10^{-5}$	$\sim 5 \times 10^{-8}$	[38]

a) 采用目前已达到的最高水平。

b) 一般均未认真测量，采用估算值，数据用目前已达到的最高水平。

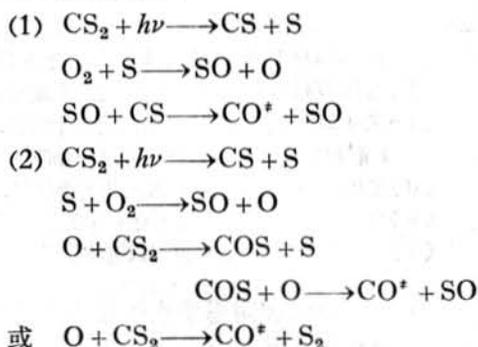
c) 测激光总体结构，管径不同而不同，当  $\phi=10$  毫米左右时，最佳压力在 80~150 毫米汞柱范围内。

而构成的碘原子激光体系，便是一个典型的例子<sup>[33]</sup>。这里附带说明一点， $C_2N_2$  分子在光抽运的条件下，虽然是由它的分解产物—— $CN^*$  自由基作为工作粒子产生了激光<sup>[39]</sup>，但  $CN^*$  并不是通过分解反应而激励的，所以尽管它也具有化学激光体系的某些特征，但严格的说来，它并不是化学激光体系。

几年来化学激光研究的另一方面，是围绕着利用工作物质体系的化学能问题而进行的。关于这个问题，直到 1964 年以前，并未取得实质性的进展，而只是停留在从理论上探讨及设想其具体的反应体系阶段。在此期间，在波拉尼最初设想的基础上<sup>[4]</sup>，杨讨论了利用 N、O 原子的重合反应构成化学激光体系的可能性<sup>[40]</sup>，达尔罗译<sup>[41]</sup>和奥拉尼夫斯基<sup>[42]</sup>讨论了利用链反应实现化学激光的条件。赫兹伯尔格<sup>[43]</sup>指出：咸土金属卤化物和卤素的化学反应体系有可能产生受激光发射。纽伊波尔特和伯雷克罗达<sup>[44,45,46]</sup>认为，通过火焰反应能够将体系的化学能转化为受激光。在 1964 年 9 月曾召开了关于化学激光的讨论会。只是在会议的前夕，皮门特尔和卡斯珀才在实验上获得了突破，在光引发的氢和氯的气相爆炸反应体系中，首次实现了利用化学反应过程中所释放的能量激励工作粒子的激光<sup>[47]</sup>。尽管为了获得激光，必须自外界输入比激光输出大得多的能量去引发化学反应，但它的工作粒子毕竟是利用化学反应中所释放的化学能而激励的： $H + Cl_2 \rightarrow HCl^* + Cl + 45 \text{ 仟卡/克分子}$ 。这一进展的意义在于，它将是建立完全不依靠外界能量的化学激光体系的良好开端。换句话说，这一激光体系的实现，标志着化学激光的研究进入了一个新的发展阶段。

到 1967 年 4 月为止，已发现约 30 种这种利用化学能激励工作粒子的激光体系（见

表 4），但是，除个别的体系外，由于其化学反应机理较为复杂，目前尚难以确定其激励工作粒子的具体基元反应。例如在较为简单的  $CS_2 + O_2$  体系中<sup>[51]</sup>，其激光无疑是由振动激发态  $CO^*$  在振转跃迁过程中产生的，但关于  $CO^*$  的生成机理则尚难以从两种可能途径中外出抉择。



从反应的放热性来看，似乎第一种途径的可能性更大。其他如氢+氟利昂<sup>[49]</sup>、氢+氧、氧+甲烷<sup>[49]</sup>、丙酮或苯+氮<sup>[25]</sup>和甲醇或乙醇+氮或氨<sup>[36]</sup>等化学激光体系的机理，则更难于推断，但是可以肯定一点，即：相应的工作粒子 HF、 $H_2O$  ( $HO_2$ ) 以及 CN 等决不是在分解反应过程中激励的，其激励过程是放热的取代反应或重合反应。

表 4 中所列的各种激光体系，和  $H_2 + Cl_2$  体系一样，虽然，工作粒子是通过生成它的那个基元过程所释放的化学能进行激励，但是为了获得激光仍须自外界吸收相当多的能量。通过火焰反应产生激光，曾被认为是建立不依靠外界能量的化学激光体系的最有希望的方向，但是，几年来人们在火焰体方面进行的努力<sup>[52-55]</sup>，尚未取得令人鼓舞的进展\*。

综观几年来化学激光的进展，可以看出，

\* 据最近消息报道<sup>[48]</sup>，已实现了火焰激光——编者注。

表 4

工作物质体系	体系的组成	引发方式	工作粒子	受激跃迁过程	受激光波长 (微米)	充气压力 (毫米汞柱)	功率输出 (瓦)	能量输出 (焦耳)	引发能 利用率 <sup>(a)</sup>	增益	资料来源
H <sub>2</sub> +Cl <sub>2</sub>	H <sub>2</sub> : Cl <sub>2</sub> =2:1(静态)	闪光	HCl <sup>*</sup>	P <sub>1-0</sub> <sup>(s)</sup> , P <sub>1-0</sub> <sup>(o)</sup> , P <sub>1-0</sub> <sup>(oo)</sup> , P <sub>1-0</sub> <sup>(u)</sup> , P <sub>1-1</sub> <sup>(s)</sup>	3.69~3.84 间5个波长	15	10	~10 <sup>-4</sup>	~10 <sup>-7</sup>	2-5分贝	[47]
H <sub>2</sub> +Cl <sub>2</sub>	H <sub>2</sub> : Cl <sub>2</sub> =1:1(流动态) (流动态)	放电	HCl <sup>*</sup>	—	3.64附近 3.7~4.0间 10个波长	10 <sup>-2</sup>	—	—	—	1.6%	[48]
H <sub>2</sub> +Cl <sub>2</sub>											[49]
HI+Cl <sub>2</sub>	"	"	HCl <sup>*</sup>	—	3.82附近	10 <sup>-2</sup>	—	—	—	5%	[48]
D <sub>2</sub> +Cl <sub>2</sub>											[49]
H <sub>2</sub> +Br <sub>2</sub>	"	"	HBr <sup>*</sup>	—	24个波长	—	—	—	—	—	[49]
D <sub>2</sub> +Br <sub>2</sub>	"	"	DBr <sup>*</sup>	—	23个波长	—	—	—	—	—	[49]
H <sub>2</sub> +氟利昂 <sup>(b)</sup> *	"	"	HF <sup>*</sup>	P <sub>3-2</sub> <sup>(j)</sup> , P <sub>3-1</sub> <sup>(j)</sup> , P <sub>1-0</sub> <sup>(j)</sup>	5.7~6.3间 17个波长	~1	—	—	—	—	[49]
CH <sub>4</sub> +氟利昂 <sup>(b)</sup>	"	"	HF <sup>*</sup>	—	"	—	—	—	—	—	[49]
CHCl <sub>3</sub> +氟利昂 <sup>(b)</sup>											[49]
D <sub>2</sub> +氟利昂 <sup>(b)</sup>											[49]
H <sub>2</sub> +UF <sub>6</sub> <sup>(c)</sup>											
D <sub>2</sub> +UF <sub>6</sub> <sup>(c)</sup>	H <sub>2</sub> : UF <sub>6</sub> =1.5:1(静态)	光解	HF <sup>*</sup>	P <sub>4-3</sub> <sup>(j)</sup> , P <sub>3-2</sub> <sup>(j)</sup> , P <sub>2-1</sub> <sup>(j)</sup> , P <sub>1-0</sub> <sup>(j)</sup>	3.63~4.18 间共30个波长	—	—	—	—	—	[50]
CS <sub>2</sub> +O <sub>2</sub>	D <sub>2</sub> : UF <sub>6</sub> =1:1(静态)		DF <sup>*</sup>	P <sub>3-2</sub> <sup>(j)</sup> , P <sub>2-1</sub> <sup>(j)</sup>	2.76~2.91间	—	—	—	—	—	[50]
	CS <sub>2</sub> : O <sub>2</sub> =1:1(静态)		CO <sup>*</sup>	P <sub>3-2</sub> <sup>(j)</sup> , P <sub>2-1</sub> <sup>(j)</sup>	3.67~3.89间	0.15	—	—	—	—	18分贝 ~18分贝
CH <sub>3</sub> COCH <sub>3</sub> +N <sub>2</sub> 或空气	—	放电	CN <sup>*</sup>	v=6~14的Δv =1的P支 ?	5.10~5.67 共31个波长	—	0.5W	~5× 10 <sup>-6</sup>	~2× 10 <sup>-9</sup>	—	[25]
C <sub>2</sub> H <sub>6</sub> +N <sub>2</sub> 或空气	—	放电	CN <sup>*</sup>	?	—	—	—	—	—	—	[25]
C <sub>2</sub> H <sub>5</sub> OH+N <sub>2</sub>	—	放电	CN <sup>*</sup>	?	—	—	—	—	—	—	[26]
C <sub>2</sub> H <sub>5</sub> OH+NH <sub>3</sub>	—	放电	CN <sup>*</sup>	?	—	—	—	—	—	—	[26]
CH <sub>3</sub> OH+NH <sub>3</sub>	—	放电	CN <sup>*</sup>	?	337, 311, 211, 138.75	—	—	—	—	—	[26]
H <sub>2</sub> +O <sub>2</sub>	"	放电	?	?	28.27, 27.97 23, 36	—	—	—	—	—	[49]
CH <sub>4</sub> +O <sub>2</sub>											

(a) 引发能和激光能量输出之比。

(b) 氟利昂包括 CF<sub>4</sub>, CBrF<sub>3</sub>, CCl<sub>2</sub>F<sub>2</sub>, CCl<sub>3</sub>F, CClF<sub>3</sub>。(c) 该作者声称, 将 UF<sub>6</sub> 换成 SbF<sub>5</sub> 时, 也可以获得受激发射。\* 最近又报导用放电引发 H<sub>2</sub> 和 CF<sub>4</sub> 反应所生成的 HF 的转动跃迁也可以产生受激发射, 现已在 10.2 到 21.8 微米之间观察到 29 个波长的受激发射。  
[T. F. Deutsch; Appl. Phys. Letters, 11 (1) 18 (1967)].

目前虽然已发现将近八十种化学激光体系。尽管体系的化学组成是多种多样的，工作粒子的激励机理也不相同，但是它们的特性参数方面却有一些共同的弱点。概括地说来，这些弱点是工作粒子的浓度不高、激光输出的能量不大，激励能的利用不充分。具体地说：除个别体系外，体系的粒子总浓度约为 $10^{16}\sim 10^{17}$ 粒子/毫升左右；单位体积的工作物质所输出的激光能量也很低；（目前许多化学激光体系的能量输出尚未认真地定量测量，根据已有的报道数据，一般约为 $10^{-6}\sim 10^{-7}$ 焦耳/毫升，只有 $\text{CF}_3\text{I}$ 光解体系的能量输出达到 $1.4\times 10^{-3}$ 焦耳/毫升<sup>[39]</sup>）；这些激光体系，其中也包括那些本来可期望充分利用体系的化学能产生受激发射的激光体系，在目前仍须自外界输入大量的能量才可进行工作，而且能量利用效率也很低（最高的效率是0.16%<sup>[39]</sup>）。问题在于，如何估价化学激光研究几年来的进展？我们的伟大导师毛主席教导我们说：“我们必须学会全面地看问题，不但要看到事物的正面，也要看到它的反面。”<sup>[57]</sup>“马克思主义者看问题，不但要看到部分，而且要看到全体。”<sup>[58]</sup>。在考察化学激光研究的进展方面也应如此。首先应当指出的是：短短的几年中即发现了大量的化学激光体系这一事实本身，表明了通过化学反应产生激光，不仅在理论上是可能的，而且在技术上也是现实的；它不是一个或某些个别反应体系所特有的现象，恰恰相反，而是在相当多的反应体系中，可以通过各种可能的机理产生激光，换句话说，化学激光体系是一个有待大力探索的广阔领域。已有的各种化学激光体系雄辩地表明：在化学激光过程中，其工作粒子不仅可以是简单的原子或离子，而且还可以是活泼的中间产物或价键饱和的稳定态分子。工作粒子的多样性，为

获得各种波长的激光提供了物质基础，可以产生从紫外到亚毫米波段中某些波长激光的可能性，已获得证实。目前已有的实验事实虽暴露了化学激光体系的某些缺点，但是，也正是这些事实却从另外一方面为克服这些缺点提供了启示。关于这方面的问题将在下面分别讨论，在这里我们着重指出两个有兴趣的事实。其一，光引发的化学激光体系，同样也可采用放电引发，例如 $\text{NOCl}$ 和 $\text{H}_2 + \text{Cl}_2$ 激光体系。值得注意的是：在用放电引发 $\text{NOCl}$ 分解激光体系时，可以比光引发时在更多的波长处观察到激光<sup>[22,38]</sup>，很可能用这种方法时，能量的利用效率更高。曾有人认为<sup>[59]</sup>：微波放电方法有利于提高气体激光的激励效率。如果考虑到微波放电还可以更有效地使 $\text{N}_2$ 、 $\text{O}_2$ 、 $\text{H}_2$ 等分子分解的话<sup>[60]</sup>，那末可以说，微波放电技术对于探索化学激光新体系将是一个十分令人感兴趣的引发方法。另一个很有意思的实验事实是，在静态时可以产生激光的体系<sup>[47]</sup>，例如 $\text{H}_2 + \text{Cl}_2$ ，在流动态的条件下也可以同样工作<sup>[48]</sup>。这一事实不仅证实了化学激光连续工作在技术上的现实性，同时，它也将为探索完全依靠工作物质体系的化学能进行工作的化学激光体系，提供一个有力的实验方法。

最后强调指出：化学激光的研究目前仍处于萌芽阶段。几年来的进展在暴露某些有待解决的问题的同时，也预示出这一领域进一步发展的广阔前景。可以预期：新的化学激光体系将相继地大量涌现。此外，基于流动态化学激光实验技术的成功，以及氟化氢 $\text{HF}^+$ 化学激光体系的出现<sup>[49,50]</sup>，可以相信，无需外加能量引发的流动态 $\text{RH}$ 或 $\text{H}_2 + \text{F}_2$ 化学激光体系的成功是指日可待的。显然，这种完全利用化学能进行工作的激光体系一

旦实现,将使化学激光的研究进入一个更高级的发展阶段。

### (三)激光能量输出问题

从目前已实现的各种化学激光体系来看,其能量输出都很低,据报道<sup>[37]</sup>:目前 $\text{CF}_3\text{I}$ 光解激光体系的总能量输出已达到65焦耳,但其单位体积的能量输出仅为 $1.4 \times 10^{-3}$ 焦耳/毫升,远低于固体激光体系的水平。增大化学激光工作物质体系的体积,固然,可以在一定程度上获得较大的输出能量(这对化学激光体系来说,技术上并不比其他激光体系更为困难)。但是,更令人感兴趣的是,能否进一步提高其单位体积的能量输出。在本节中,我们就这一问题进行一些简要的探讨。

首先我们从分析现有的化学激光体系的情况出发。从表1到表4的实验数据中不难看出,这些体系的粒子总浓度就不高,其工作粒子的有效浓度,即可以产生受激光子的工作粒子数,必然处于一个更低的水平。如果考虑到化学激励的工作粒子只能工作一次,即只能进行一次受激跃迁的话,那末,显而易见,工作粒子有效浓度不高是现有种种化学激光体系能量输出不大的根本原因。但是,另一方面,我们又可以看到:不同的化学激光体系,其最佳的粒子浓度数值又有明显的不同;例如: $\text{CF}_3\text{I}$ 光解激光体系,视激光器件的几何结构、尺寸、照明方式等方面的不同,工作物质体系的总压力可以在15到150毫米汞柱之间变动<sup>[36]</sup>,而 $\text{COS}$ 分解激光体系工作物质粒子的最佳总压力仅为1.4毫米汞柱左右<sup>[21]</sup>。此外,不同的添加气体对同一体系可以有截然相反的效果,而同一种添加气体对不同体系的作用也可各不相同。例如:He的存在可以提高 $\text{COS}$ 分解

激光体系 $\text{CO}^*$ ( $00^{\circ}1$ )激光跃迁的能量输出,但当加入CO时,则对受激光发射有猝灭作用<sup>[21]</sup>;在 $\text{NOCl}$ 光解激光体系中,有He作为稀释气时,有利于发生受激振荡<sup>[38]</sup>,但在引气发的 $\text{H}_2 + \text{UF}_6$ 链反应激光体系中加入He气,则无任何作用<sup>[50]</sup>。

我们的伟大导师毛主席教导我们:“……世界上的每一差异中就已经包含着矛盾,差异就是矛盾。”<sup>[61]</sup>“……人们要善于去观察和分析各种事物的矛盾的运动,并根据这种分析,指出解决矛盾的方法。”<sup>[61]</sup>”根据主席的指示,我们可以看出,这里起作用的因素可能是多种多样的,但引起我们所看到差异的主导原因是猝灭作用。在 $\text{CF}_3\text{I}$ 光解体系中,其工作粒子是电子激发态的碘原子 $\text{I}^*(5^2\text{P}_{1/2})$ ,体系中的其他组分,如 $\text{CF}_3\text{I}$ , $\text{C}_2\text{F}_6$ 等对 $5^2\text{P}_{1/2}$ 态碘原子的猝灭作用不大,(其效率一般为 $10^{-5}$ 左右<sup>[62]</sup>),故允许在较高的压力下工作。但是过高的压力对激光输出也是不利的,其原因很可能是:当 $\text{CF}_3\text{I}$ 浓度很大时,对 $\text{I}^*(5^2\text{P}_{1/2})$ 有强烈猝灭作用的 $\text{I}_2$ 分子大量地生成之故( $\text{I}_2$ 对 $\text{I}^*(5^2\text{P}_{1/2})$ 的猝灭效率约为 $10^{-1}$ <sup>[62]</sup>)。在 $\text{COS}$ 、 $\text{NOCl}$ 等解离激光体系中,其工作粒子 $\text{CO}^*$ , $\text{NO}^*$ 等处于振动激发态。这种振动激发态分子易于和多原子分子发生能量传递,很可能这是导致该类体系不宜于在高压下工作的主要原因。外加气体的不同影响也可以用猝灭情况不同来解释。一般说来,惰性气体可起稀释作用,或者阻止激发态工作粒子扩散到管壁,或者降低工作粒子和猝灭剂分子间相互碰撞的几率,从而降低了激发态工作粒子被猝灭的可能性。从另一方面来看,外加的气体也可能对激发态粒子有猝灭作用,此时将引起激光输出降低,甚至完全不能发生受激振荡。但当它可以选择猝灭激光下能级时,则将提高

工作粒子进行受激跃迁的效率,从而增大了激光输出。例如:在  $\text{CS}_2 + \text{O}_2$  激光体系中, He 可以增大激光输出的原因,曾经用选择猝灭下能级的机理进行了解释<sup>[51]</sup>。但这里我们指出,因为在这一激光体系中,化学反应体系的组分,如 COS,或某一产物,对  $00^{\circ}1$  振动激发态的  $\text{CO}^*$  可能有猝灭作用,所以,低与  $\text{CO}^*$  相撞的几率,也可能是 He 的存在有利于激光输出的一个原因。

综上所述,我们可以得出一条结论,即:对于一定的化学激光体系来说,适当地添加某些组分,是提高其单位体积激光能量输出的一条途径。

但是,我们也应该看到:影响工作粒子有效浓度的不仅仅是工作粒子的猝灭问题,激励工作粒子的效率,也就是说,工作粒子被有效地激励到激光跃迁上能级的选择性,也是一个影响能量输出的一个重要原因。不难设想:当工作粒子在各能级间的分布较分散时,不仅对激励能有效利用的程度有影响,同时也直接关系到工作粒子产生受激光子效率,这对于提高单位体积激光能量输出是不利的。问题在于,如何提高激励的选择性。我们知道,当工作粒子是通过化学反应直接激励时,过程中所释放的自由能在各产物粒子间分配的情况,与该反应过程的过渡态活化络合物的结构有关,而在某一产物各自由度的不同能级间的分配情况,则主要取决于该产物粒子的化学结构。一般说来,当产物粒子是自由原子或简单分子,且其电子能级被激励时,这种化学反应的激励选择性是较高的。当释放能的化学反应的产物处于振动激发态,而通过敏化激励机理激发结构较为简单的工作粒子时,激励的选择性将会有所改进。这样,我们又可得出一条结论,即:合理的选择化学反应体系是获得单位体积输

出能量较高的化学激光体系的一个重要环节。如果考虑到受激光波长也是决定其能量输出大小的一个因素的话,选择体系的重要性更是显而易见的。

不言而喻,激励工作的粒子的速率对其有效浓度的积累是极端重要的。这里不仅涉及到所选择的体系的化学性质,同时,引发该反应的方法也必须充分考虑。可以设想,若工作粒子可以被快速地激励,以致在猝灭因素开始起作用之前,体系中的工作粒子已大量地生成并进行受激跃迁,那末必将大大地增大其激光能量输出。当然,如何选择引发方法,则视具体的化学反应而定,这里不拟赘述,而只是强调指出,从引发方法方面考虑也是一个、甚至是很重要提高能量输出的途径。

此外,附带指出一点,从考虑化学激光的矛盾特殊性出发,还可看到另外一些提高能量输出的途径。例如,利用某些化学反应抽空激光下能级的粒子数,或消灭体系中的猝灭性粒子等。尽管具体途径是很多的,但其根本的一点是通过化学反应使有利于粒子集居数反转和工作粒子浓度积累,而降低其猝灭的可能性。

总之,可以相信,正确地选择和设计化学激光体系及其引发方法,其单位体积能量输出达到某些固体工作物质体系的水平,决不是不可能的。

#### (四)激励能的利用效率问题

激励工作粒子的能量被利用的充分程度,可以用能量利用效率  $\eta$  表示。其物理意义是受激发射输出能量的总和与过程中总的能量消耗之比。在理想的条件下,所要求的激励能仅仅是消耗于将工作粒子激励到激光上能级,且每一个处于上能级的粒子均可以产生一个受激光子。这样,这种体系的能量

利用效率便可以用激光上能级的激发能  $E_2$  和受激跃迁过程的上、下能级间的能量差  $E_2 - E_1$  的比值来表示:

$$\eta_{\text{理想}} = \frac{E_2 - E_1}{E_2}$$

但在实际的激光体系中,所提供的激励能  $Q + \Delta H$  并非全部用于激励工作粒子,同时也不是每个上能级工作粒子均可产生一个受激光子,此时,为了表示激光体系的激励能利用效率。可用激励能总量  $Q + \Delta H$  和激光输出总能量  $E$  之比。

$$\eta_{\text{实际}} = \frac{E}{Q + \Delta H}$$

显然,这一数值必小于理论值。式中  $Q$  表示自外界供给体系的激励能或用于引发化学反应的能量;  $\Delta H$  是激励工作粒子过程中化学反应所释放的化学能。不言而喻,当通过分解反应激励工作粒子时,这一反应是吸热的,也就是说没有化学能可供利用,即  $\Delta H = 0$ , 此时,能量利用效率将简单地用  $E/Q$  来表示;而当利用化学能激励工作粒子时,若用以引发该反应体系的能量较小,而可忽略不计时,则用  $E/\Delta H$  表示化学能利

用的有效程度。

显而易见,影响工作粒子激励选择性、影响工作粒子有效浓度的诸因素,同样也影响体系激励能的利用效率。这也就是说,上节中所讨论的有关提高单位体积激光能量输出的种种考虑,对于提高该体系的激励能利用效率来说,也完全适用。

但是,对于那些依靠外界能量激励的解离化学激光来说,除了上述的各点之外,影响其激励能利用效率的,还有一些特殊因素,换句话说,还必须考虑的一个问题是:外界供给的能量是否有效地转化为工作粒子的激励能。关于这一点,我们在本节中进行补充讨论。这些讨论虽然是以目前已研究得较多的光分解化学激光体系为例,但这些考虑的基本原则,对于那些利用其他形式的能量激励的化学激光体系也是适用的。

在光解激光体系中,目前已研究得较多的一种是  $CF_3I$  的光解体系。从某些具有可比性的实验结果的分析比较中,可以得出一些有趣的结论。在表 5 中列出了用不同光源抽运  $CF_3I$  激光体系时所得能量利用效率的实验结果。

表 5 不同光源抽运时  $CF_3I$  激光体系的能量利用效率比较

$CF_3I$ 充气压力 (毫米汞柱)	抽运光源	放电脉冲宽度 (微秒)	激光脉冲宽度 (微秒)	输出耦合 百分比 %	效率 %	数据来源
80	脉冲氙灯	40	10	6.4	$3 \times 10^{-3}$	(33)
81	“	40	10	—	$1 \times 10^{-3}$	(34)
80~100	脉冲氙灯	40	20	1	$6 \times 10^{-4}$	(35)

从表中所列的数据可以看出:用具有不同光谱特性的光源抽运时,其激励能的利用效率有明显的不同。氙灯较氪灯更富于紫外辐射,而  $CF_3I$  的吸收带正处于紫外光谱区,这样,氙灯的光辐射将被更充分地吸收

而转化为工作粒子的激励能,故其能量利用效率也较高。所以说:光谱匹配的情况好坏是影响光解激光体系能量利用效率的一个因素。关于这一论断的正确性,也可以从现有的实验数据中获得证明。氙灯的发光光谱呈

连续谱, 且  $\lambda_{\text{最大}}$  处于可见光谱区, 从光谱的匹配情况来考虑, 工作物质的吸收谱带较宽、吸收峰的  $\lambda_{\text{最大}}$  处于较长的波长处时, 其

能量利用效率应该更高, 表 6 所列的实验数据正好证明了这一推论:

表 6 脉冲氙灯抽运吸收光谱特性不同工作物质体系时的激励能利用效率

工作物质	吸收带的 $\lambda_{\text{最大}}$ (微米)	吸收带宽(微米)	吸收系数 (1/厘米·毫米汞柱)	相对功率输出	数据来源
CF <sub>3</sub> I	0.2650	0.0300	$1.9 \times 10^{-2}$	1	(36, 37)
C <sub>2</sub> F <sub>2</sub> I	0.2710	0.0440	$2.4 \times 10^{-2}$	1.25	(36, 37)

基于上述讨论可见, 既然光源的光谱分布和工作物质体系的吸收谱带之间的匹配情况是影响能量利用效率的一个因素, 那末, 可以认为: 光谱匹配不好是现有的光解激光体系能量利用效率不高的一个原因。这一不利情况的改进, 将是提高其能量利用效率的一个途径。

不难看出, 当利用外界能量抽运时, 输入能量脉冲的波型也是影响激光体系能量利用效率的一个因素。在这里有两个参数是最主要的, 它们是上升时间及脉冲宽度。上升时间越短, 光泵抽运的效率也越高, 而合适的脉冲宽度则视具体体系的不同而不同。一般说来, 当分解反应的产物对上能态的工作粒子无猝灭作用时, 适当地增加脉冲宽度可能有利于提高能量利用效率。在相反的情况下, 则要求脉冲宽度小于猝灭性产物的生成时间是适宜的。当然, 关于这一分析是否符合实际情况, 尚有待实验验证, 但是, 现有分解激光体系的能量利用效率不高, 波型因素不理想很可能是其中的一个原因。

除了上述的光谱因素、波型因素以外, 某些技术上的问题也将影响外界能量抽运的激光体系的能量利用效率。就光抽运的激光体系而言, 照明效率显然对抽运光能的被吸收情况有影响。另外, 激光能量耦合输出的

百分比是否最佳值, 也将影响能量利用效率。目前所报导的各种激光体系的能量输出, 并不见得是在最佳的工作条件之下测定的, 故这里所讨论的数据仅有参考价值。

最后, 我们强调指出: 尽管解离反应激励的化学激光体系的能量利用效率可以进一步提高, 然而, 在其他条件相同时, 它们的能量利用效率决不会高于其他非化学激光体系。其根本原因是所吸收的能量并非全部用于激励工作粒子, 而将有相当多的一部分消耗于分解反应。故在这一类型的化学激光研究工作中, 除寻求新的体系和尽可能地提高其能量利用效率以外, 一个重要而又十分有趣的方向是探索利用化学能作为其激励能源的可能性。关于激光体系的化学能利用问题, 在下一节中进行讨论。

### (五) 化学能利用的问题

如何将工作物质体系本身的化学能转化为激光, 是化学激光研究的核心问题之一。不言而喻, 只有通过释放化学能的基元化学反应直接或间接激励工作粒子的激光体系, 才能利用体系本身的化学能。但是, 为了使这种利用化学能的体系产生受激光发射是否仍需自外界输入能量以及输入能量的多少, 则视具体反应体系的化学性质和引发该反应

的具体技术而定。这也就是说，利用化学能的激光体系，并不见得一定不要求自外界输入能量，但是，不需要自外界输入能量便可进行工作的化学激光体系，激励其工作粒子的化学反应则必须释放化学能。

在第二节中我们曾经谈到，目前已实现了约三十种利用化学能激励工作粒子的激光体系，但是，为了产生激光，它们还要求自外界输入大量的引发能。现在一个引起人们兴趣的问题是：怎样才能使这类化学激光体系完全依靠体系本身的化学能进行工作，而不须要或者只要很少的一点能量引发反应。在这里，我们以  $H_2 + Cl_2$  链反应激光体系为例，从分析它的之所以仍要求很大的外界能量的原因入手，探讨建立完全利用本身的化学能进行工作的激光体系的可能途径。

$H_2$  和  $Cl_2$  生成  $HCl$  的反应是一个链反应过程。当用光引发这一反应时，首先是  $Cl_2$  分子分解而生成用作为引发链反应初级活性中心的  $Cl\cdot$  它可以和  $H_2$  分子反应而生成  $HCl$  分子和  $H\cdot$  原子，后者进一步和  $Cl_2$  分子发生反应，在生成  $HCl$  分子的同时，可以导致  $Cl\cdot$  原子再生。再生的  $Cl\cdot$  原子再次和  $H_2$  分子反应，如此多次循环而构成反应链，最后两个发展链的活性中心相遇发生重合反应，至此使反应链终止发展。根据实验测定<sup>[63]</sup>：这一链反应的反应链长为  $10^4 \sim 10^6$ ，也就是说，一个活性中心可以导致一万到一百万个  $HCl$  分子生成。在生成  $HCl$  的两种基元反应中，只有  $H\cdot$  和  $Cl_2$  分子的反应是放热的，（其反应热效约为 45 仟卡/克分子），所以，当用这一体系作为激光工作物质时，其工作粒子  $HCl^*$  显然是通过这一基元反应激励的。从具体的反应机理和  $H + Cl_2 \rightarrow HCl^* + Cl\cdot$  反应过程中化学能

分配的情况来看，所生成的  $HCl$  分子将近一半是处于振动激发态，且激发态粒子完全是依靠体系的化学能激励的。所以从理论上说来，这一激光体系只需少量的外界能量引发，即可导致相当大量的激光产生。然而，在实际上所需要的引发能却较激光输出要大千百万倍以上<sup>[47]</sup>。其所以如此，根据我们现有的认识，可以归纳出下列几点原因。首先应当考虑的一点是这些引发能能否被充分地利用。如前所述，当用氙灯引发这一体系时，并非全部的光能均可被吸收；此外，即使体系所吸收的光能也未被充分利用。这主要是由于吸收引发能而生成的  $Cl\cdot$  可以发生重合反应重新生成  $Cl_2$  分子，而不去引发生成  $HCl$  分子的链反应（尤其当  $Cl\cdot$  浓度很大时，引发的效率将更低）。其次是化学反应激励工作粒子的效率不高。其原因有二，其一是化学能在  $HCl^*$  分子的各振动能级间分布分散，也就是说，激励的选择性差。另外，根据这种反应机理，每通过  $H\cdot + Cl_2 \rightarrow HCl^* + Cl\cdot$  生成一个振动激发态  $HCl^*$  的同时，必然要通过  $Cl\cdot + H_2 \rightarrow HCl + H\cdot$  生成一个基态  $HCl$  分子，而后者对振动激发态的  $HCl^*$  分子有着强烈的猝灭作用。这一激光体系之所以必须要求大量的光能进行引发的第三个原因，是被激励到激光上能级的工作粒子未能充分利用。这是因为整个反应体系是放热的，而根据化学动力学的近似估算表明：在一般条件下，在反应被引发之后经过几十微秒左右，将有半数以上的反应物分子发生了化学反应，在很短的时间内，释放出大量的热能，其结果将导致体系温度迅速升高。这也就意味着，在反应开始后不久，就会由于  $HCl$  的转动温度升高而使得体系不再使粒子集居数呈现局部反转状态，从而使处于激光上能级的工作粒子不充分利

用。这样，由于引发能利用效率不高、化学反应激励效率很差、以及工作粒子未被充分利用等三个因素作用的结果，使得这一利用化学能激励工作粒子的化学激光体系，为了进行工作，尚需自外界供给相当多的能量引发化学反应。

如果上述分析是符合实际情况的话，我们可以得出几点结论，即：为了获得主要依靠体系的化学能即可进行工作的化学激光体系，必须：1) 激励工作粒子的化学反应的引发是十分有效的；2) 化学反应所释放的化学能应尽可能多地转化为产物分子的内能，且这些能量的分配应具有较高的选择性；3) 激发态工作粒子难于猝灭，且反应的其他产物对工作粒子无猝灭作用。

根据上述的几点结论，可以设想几个探索这种主要依靠自身的化学能而进行工作的化学激光体系的新途径。第一方面是探索那些“一触即发”的放热化学反应，特别是支链反应。典型的例子是  $H_2 + F_2$  或  $RH + F_2$  等。利用这类反应的基本困难是反应物的快速混合问题。显然，在这种情况下利用流动态的反应系统将具有一定的优越性。第二方面是探索“自持”化学反应体系。也就是说，此时有可能利用反应本身所放出的能量来引发其他粒子进行反应，这样，将可降低要求自外界输入引发能的数量。这种反应最好在流动态的条件下进行。作为典型的例子，可举火焰反应。此时，工作粒子激励不仅可以通过化学激励机理，而且也可通过敏化激励机理进行。附带说明一点，当采用敏化激励机理时，工作粒子不仅可以是外加的某一组分，而且也可以是化学反应的某一产品。第三个值得探索的新方面是某些爆炸反应。这一体系的特点是只要外界供给少量的引发能，即可导致大量活泼粒子生成。至于其工

作粒子可以是爆炸反应的初级产物，也可以通过次级反应生成。当然，这一设想在技术上是较为困难的，但是它的某些优点，使人们不能不认为它是一个值得探索的新途径。

最后，一个令人感兴趣的问题是：通过吸热反应而激励工作粒子的化学激光体系，能否利用化学能？答案是肯定的。其途径有二。其一是利用化学光源抽运。尽管这是间接地利用化学能，同时也仅仅局限于光解激光体系。但是，探索这一途径的意义是十分明显的，例如，利用化学方法产生的冲激波光源，它的光脉冲上升时间甚短，此外其光谱特别富于紫外部分，这不仅使激光体系利用了化学能，同时也是提高该体系效率的一个途径(见第四节)。另一个途径是利用反应体系本身的热效应\*或机械能(冲激波)。在许多快速、放热的反应体系中，伴随着化学反应过程的进行，往往有冲激波产生。冲激波曾被用作产生高温的手段，那末完全可以设想：利用化学反应所产生的冲激波制造高温环境，而使得被绝热压缩气体中的某种分子发生分解反应。显然，为了获得激光，体系的选择除了一般考虑外，尚有两点基本的要求，这就是：1) 分子的分解产物必须有可能处于不同的能态，且上能态应具有适当的寿命；2) 在高温下，更有利于高能态产物粒子生成。例如 CO 的热分解反应。关于这一设想，文献中已有报导<sup>[64]</sup>，但目前尚缺乏实验验证。

作为这一节关于化学能利用问题讨论的结论，在我们看来应该是：完全利用化学能而工作的化学激光体系是一定能够实现的，同时，实现的途径也决不止一种。

\* 有许多分解反应体系，尽管生成激发态粒子的基元反应是吸热的，但总包反应过程还是放热的——编写者注。

## (六) 结 束 语

化学激光研究的发展, 目前仍处于萌芽阶段。尽管其激光能量输出方面尚未达到令人鼓舞的水平, 但是, 新体系的相继涌现, 预示着化学激光蓬勃发展的远景。

化学激光最根本的优越性是可以完全利用工作物质体系本身的化学能产生激光, 而不需自外界输入大量的能量。毫无疑问, 这类化学激光体系的探索及研究, 将是一个重要的发展方向。在  $H_2 + Cl_2$  和其他以 HF 为工作粒子的化学激光的基础上, 利用 RH 或  $H_2 + F_2$  在流动态条件下无需外加能量引发的化学激光体系的研制成功, 是指日可待的。完全利用化学能的某些火焰激光, 也可望近期内实现。

化学激光体系的探索范围将随着新引发技术(如微波放电等)的应用, 将向 N、H 和 O 原子的反应体系方面发展。利用化学能产生这类活泼粒子而引发反应, 也是一个十分有趣的探索方向。

近年来, 无机液体或染料溶液激光体系方面的进展, 将刺激人们对液相化学激光研究的兴趣。这是因为, 这种化学激光体系可望比气相激光获得更高的单位体积能量输出, 此外, 它们也较易于完全利用体系的化学能产生激光。关于这类体系的某些特殊问题及设想方案, 另文讨论。但应指出, 本文及前一文<sup>[3]</sup>中所讨论的某些原则问题, 对液相化学激光也适用。据西德的专利报导, 目前已研制成功无需外界能量引发的液相化学激光体系。关于这一报导的可靠性姑且不论, 但它至少预示着液相化学激光将成为化学激光领域中的一个诱人而且重要的研究内容。

编写者因水平有限, 文中错误难免。务希革命读者不吝赐教, 予致谢意。

## 参 考 文 献

- [1] 《毛主席语录》, 第 174 页。
- [2] 《毛主席语录》, 第 179 页。
- [3] 郭础, 《激光情报》(6), 1 (1966)。
- [4] J. C. Polanyi, *J. Chem. Phys.*, **34**, 347 (1961)。
- [5] W. R. Bennett Jr., W. L. Faust, R. A. McFarlane, C. K. N. Patel *Phys. Rev. Letters*, **8**, 470 (1962)。
- [6] W. R. Bennett Jr.; *Suppl. Appl. Optics*, **1**, 24(1962)。
- [7] T. F. Deutsch; *Appl. Phys. Letters*, **8**, 334 (1966)。
- [8] H. A. H. Boat, D. M. Clunie; *Nature*, **197**, 173 (1963)。
- [9] C. K. N. Patel, R. A. McFarlane, W. L. Faust; *Phys. Rev.*, **133 A**, 1244 (1964)。
- [10] R. U. Martinelli, H. J. Gerritsen *J. Appl. Phys.*, **37**, 444 (1966)。
- [11] 島津満吉, 須崎安治; *Japan, J. Appl. Phys.*, **4**, 381 (1965)。
- [12] R. A. Paananen, C. L. Tang, F. A. Horrigan *Appl. Phys. Letters*, **3**, 154 (1963)。
- [13] J. D. Rigden, A. D. White; *Nature*, **198**, 774 (1963)。
- [14] S. M. Jarrett, J. Nunēz, G. Gould; *Appl. Phys. Letters*, **7**, 294 (1965)。
- [15] S. M. Jarrett, J. Nunēz, G. Gould; *Appl. Phys. Letters*, **8**, 150 (1966)。
- [16] R. A. Paananen, C. L. Tang, F. A. Horrigan; *Proc. IEEE.*, **52**, 1261 (1964)。
- [17] R. A. McFarlane; *Appl. Opt.*, **3**, 1196 (1964)。
- [18] P. K. Cheo, H. G. Cooper; *Appl. Phys. Letters*, **7**, 202 (1965)。
- [19] W. M. Keeffe, W. J. Graham; *Appl. Phys. Letters*, **7**, 263 (1965)。
- [20] R. A. McFarlane; *Appl. Phys. Letters*, **5**, 91 (1964)。
- [21] T. F. Deutsch; *Appl. Phys. Letters*, **8**, 334 (1966)。
- [22] T. F. Deutsch; *Appl. Phys. Letters*, **9**, 295 (1966)。

- [23] H. A. Gebbie, N. W. B. Stone, F. D. Findley *Nature*, **202**, 685 (1964).
- [24] H. S. Steffen, J. Steffen, J. F. Moser, F. K. Kneubühl; *Phys. Letters*, **20**, 20 (1966).
- [25] W. M. Müller, G. T. Flesher *Appl. Phys. Letters*, **8**, 217 (1966).
- [26] W. M. Müller, G. T. Flesher; *Appl. Phys. Letters*, **10**, 93 (1967).
- [27] H. A. Gebbie, N. W. B. Stone, J. E. Chamberlain, W. Slough, W. A. Sberaton; *J. Chim. Phys. et de Phys.-Chim. Biol.*, **64**, 80 (1967).
- [28] 今正三, 山中正信, 山本淳也, 吉永博; *Japan. J. Appl. Phys.*, **6**, 612 (1967).
- [29] A. L. Schawlow, C. H. Townes *Phys. Rev.*, **112**, 1940 (1958).
- [30] P. Robinowitz, S. Jacobs, G. Gould; *Appl. Opt.*, **1**, 513 (1962).
- [31] И. И. Собельман, С. Г. Раутман; *ЖЭТФ*, **43**, 2108 (1961).
- [32] G. Gould; *Quantum Electronics*, (IV Intern. Congress., N. Y.) 459 (1964).
- [33] J. V. V. Kasper, G. C. Pimental; *Appl. Phys. Letters*, **5**, 231 (1964).
- [34] J. V. V. Kasper, G. C. Pimental, J. H. Parker; *J. Chem. Phys.*, **43**, 1837 (1965).
- [35] Т. А. Андреева, В. А. Пудкин, В. И. Мадлышев, Г. В. Михайлов, В. Н. Сорокин, Л. А. Новикова; *ЖЭТФ*, **49**, 1408 (1965).
- [36] M. A. Pollack; *Appl. Phys. Letters*, **8**, 36 (1966).
- [37] A. J. DeMaria, C. J. Ultee; *Appl. Phys. Letters*, **9**, 67 (1966).
- [38] M. A. Pollack; *Appl. Phys. Letters*, **9**, 94 (1966).
- [39] M. A. Pollack; *Appl. Phys. Letters*, **9**, 230 (1966).
- [40] R. A. Young; *J. Chem. Phys.*, **40**, 1848 (1964).
- [41] В. Л. Тальрозе; *Кин. и Кат.*, **5**, 11 (1964).
- [42] А. Н. Ораевский; *ЖЭТФ*, **45**, 177 (1963).
- [43] M. Hertzberg; *Optical Maser*, 417 (1963).
- [44] W. C. Nieuwpoort, R. Bleekrode; *Phys. Letters*, **12**, 204 (1964).
- [45] W. C. Nieuwpoort; *ZAMP*, **16**, 101 (1965).
- [46] R. Bleekrode, W. C. Nieuwpoort; *Appl. Opt. Suppl.*, **2**, 179 (1965).
- [47] G. C. Pimental, J. V. V. Kasper *Phys. Rev. Letters*, **14**, 353 (1965).
- [48] K. G. Anlauf, D. H. Maylotte, P. D. Pacey, J. C. Polanyi; *Phys. Letters*, **A 24**, 208 (1967).
- [49] T. F. Deutsch; *Appl. Phys. Letters*, **10**, 234 (1967).
- [50] K. L. Kompa, G. C. Pimental *J. Chem. Phys.*, **47**, 857 (1967).
- [51] M. A. Pollack; *Appl. Phys. Letters*, **8**, 237 (1966).
- [52] R. Bleekrode *ZAMP*, **16**, 107 (1965).
- [53] I. Wider, R. R. Neiman, A. P. Rodger *Appl. Opt. Suppl.*, **2**, 187 (1965).
- [54] J. A. Howe, *Appl. Opt. Suppl.*, **2**, 184 (1965).
- [55] R. Bleekrode *J. Chim. Phys. et de Phys.-Chim. Biol.*, **64**, 141 (1967).
- [56] *New Scientist*, **35**, 36 (1967).
- [57] «毛主席语录», 第 190 页。
- [58] «毛泽东选集», 第 144 页。
- [59] А. И. Максимов, *Опт. и спектроскопия*, **21**, 770 (1966).
- [60] *Образование и стабилизация свободных радикалов п-л* (1962).
- [61] «毛泽东选集», 295 页。
- [61'] «毛泽东选集», 第 292 页。
- [62] R. J. Donovan, D. Husain *Trans. Faraday Soc.*, **62**, 1050, 2023 (1966).
- [63] Н. Н. Семенов *Цепные реакция* (1933).
- [64] А. Н. Ораевский; *ЖЭТФ*, **48**, 1150 (1965).

[郭 础 编 写]