



“十一五”国家重点图书 航天科学与工程丛书

激光器动力学

LASER KINETICS

王骥 赵永蓬 编著



哈尔滨工业大学出版社
HARBIN INSTITUTE OF TECHNOLOGY PRESS



“十一五”国家重点图书 航天科学与工程丛书

激光器动力学

LASER KINETICS

王骥 赵永蓬 编著



哈尔滨工业大学出版社
HARBIN INSTITUTE OF TECHNOLOGY PRESS

内 容 简 介

本书以具体激光介质的研究为例,系统地介绍了不同激励方式下,气体激光器动力学模型的建立方法,以及根据动力学模型对各种气体激光产生机理的深入理解。主要内容包括在相干光、激光等离子体软 X 射线、飞秒激光、一般气体放电、射频放电、毛细管放电、电子束等激励方式下,阐述新型气体激光介质中动力学过程及研究结果。

本书可作为高等学校物理电子学研究生专业课教材,也可供气体激光器、新型气体激光介质、软 X 射线激光等研究领域的人员参考。

Abstract

In this book, many examples for the study on specific laser medium are given to systematically introduce the kinetics model building of gas laser pumped by different ways. According to the model of laser kinetics, the production mechanisms of different gas lasers are described. The main contents of this book include the kinetics processes and research results of new gas laser media pumped by coherent light, soft X-ray from laser produced plasma, femtosecond laser, gas discharge, radio-frequency discharge, capillary discharge or electron beam.

The book is a teaching material for postgraduate of physical electronics. Furthermore, the book is also a reference for science research workers, who are engaged in gas laser, new gas laser medium, soft X-ray laser and so on.

图书在版编目(CIP)数据

激光器动力学/王骥,赵永蓬编著. —哈尔滨:
哈尔滨工业大学出版社, 2008.6
(航天科学与工程丛书)
ISBN 978-7-5603-2678-8

I. 激… II. ①王…②赵… III. 激光器-动力学
IV. TN248

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2008)第 048533 号

策划编辑 杜 燕
责任编辑 杜 燕
出版发行 哈尔滨工业大学出版社
社 址 哈尔滨市南岗区复华四道街 10 号 邮编 150006
传 真 0451 - 86414749
网 址 <http://hitpress.hit.edu.cn>
印 刷 哈尔滨工业大学印刷厂
开 本 787mm × 960mm 1/16 印张 18.75 字数 400 千字
版 次 2008 年 6 月第 1 版 2009 年 2 月第 2 次印刷
书 号 ISBN 978-7-5603-2678-8
印 数 501 ~ 1 500 册
定 价 48.00 元

(如因印装质量问题影响阅读,我社负责调换)

《航天科学与工程》丛书编写委员会

顾 问 杜善义

主 任 姚 郁

副主任 曹喜滨

编 委 (按姓氏笔画排序)

于开平 于达仁 王 祁 王 钢 王 骐

齐乃明 吕志伟 孙兆伟 孙 毅 沈 毅

邹经湘 张少实 张嘉钟 姜义成 姜兴渭

赵长安 赵 阳 荆武兴 崔乃刚 谭久彬

谭惠丰 赫晓东

序

航天科技是 20 世纪人类最伟大的科技成果之一,也是我国和世界各国的重点发展领域。我国已跻身于世界航天大国之列,航天精神也铸造了中华民族宝贵的精神财富。

航天使人类活动范围从陆地、海洋、大气层到宇宙空间,航天科技的发展,不仅带动了诸多科学和技术的跃升,同时也推动了我国经济和社会事业的跨越发展。

我国航天事业与其他事业一样,将贯彻落实科学发展观,坚持“自主创新、重点跨越、支撑发展、引领未来”的科技发展指导方针,重点实施载人航天与空间站、月球探测、大型运载火箭等航天工程,使航天技术达到世界先进水平,更好地为我国经济建设、社会发展和国防现代化建设服务。

这些工程的开展,既对航天科技发展提供了机遇,同时又提出了新的挑战,这就迫切地需要提高基础研究的水平,在空间通信、高精度制导与控制、新材料、先进发动机技术等领域有的放矢地进行新理论、新方法和关键技术的研究,瞄准国际航天先进技术,突破制约航天发展的技术瓶颈。在这一背景下,把航天工作者多年的科研成果进行概括和总结,以期为未来的航天发展奠定坚实的技术基础,就显得尤为重要。

由哈尔滨工业大学出版社组织编纂的“航天科学与工程”丛书,将是我国航天领域中一套内容丰富、学科门类齐全、学术水平高和工程应用性较强的系列丛书。本套丛书被评为“十一五”国家重点图书,主要反映近 20 年来我国航天事业的最新进展,将这些理论和工程应用成果进行汇集、总结和提炼,以满足航天工作者对航天技术的需求。

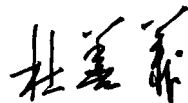
该丛书充分结合民用和国防航天这一高新技术领域,在总体架构及内容的选择上进行了长期准备和精心安排。首先,突破了以往大而全的做法,重点瞄准航天领域所出现的新原理、新方法、新装备、新工艺,突出一个“新”字。这些新技术是现在和未来航天领域所关心的一些重要方向,是汇集了航天专家们所承担的国家自然科学基金、国家“973”、国家“863”、预先研究、航天创新基金和大量航天工程项目的科研成果而成的,是对科研和教学工作的总结和提升,反映了目前航天领域的最新进展。该丛书的另一个突出特点是注重科学性和工程性。作者们特别注意从大量的科研工作中提炼出一些具有普遍意义的科学原理和方法,并将其融入到书中,大大提高了丛书的学术价值;大量的学术研究是结合工程背景而开展的,有些理论和设备已经在实际工程中得到应用,具有很强的工程实用性,对从事航天技术的科研工作者将具有重要的参考价值。

本丛书体系清晰、内容较完整,涵盖了航天飞行器设计、研制和飞行中所涉及的材料科学与工程、航天力学、控制科学与工程、动力工程等诸多领域。本丛书在写作上重视创新,密切结合实际,学术水平高,工程应用性强。

综上所述,“航天科学与工程”丛书将是一套在航天领域的具有较高学术价值和工程应用价值的科技图书,特予以推荐。

哈尔滨工业大学教授

中国工程院院士



前 言

本书是根据马祖光院士最早提出的提纲撰写的,撰写过程中对其有所拓展和补充。书中内容主要来源于多年来为硕士研究生开设的“激光器动力学”课的教学笔记和学生们做的总结,以及经过整理的涉及激光器动力学研究的博士论文。

本书根据泵浦方式划分章节,结合具体的泵浦方式介绍了其建立激光器动力学的方法和特点。由于不同的泵浦方式所涉及的知识内容明显不同,为了方便读者的理解,在各章的开头对必要的基础知识进行了适当的介绍。

全书共分4章,涉及光泵浦、放电泵浦和电子束泵浦等内容。其中第1章绪论和第2章中选择性光泵浦和激光等离子体软X射线激励由王骥和赵永蓬撰写;第2章中光场感生电离及其激励的X光激光由陈建新撰写;赵永蓬撰写了第3章中一般的气体放电泵浦和毛细管放电泵浦X光激光一节的部分内容;田兆硕和程元丽分别撰写了射频气体放电泵浦和毛细管放电泵浦X光激光部分内容;第4章电子束泵浦由赵永蓬撰写。

在撰写过程中,哈尔滨工业大学光电子信息科学与技术系的许多教师 and 研究生给予了帮助,在此表示感谢。本书中涉及的科研课题是在国家自然科学基金和高技术863资助下完成的,在此深表谢意。

由于时间十分仓促,撰写中难免有疏漏之处,恳请读者给予指正。

王骥 赵永蓬

2007年11月于哈尔滨

目 录

第 1 章 绪 论	(1)
1.1 主要研究对象	(1)
1.2 激光器动力学在激光科学发展中的作用	(2)
1.3 动力学过程的分析方法	(7)
参考文献	(11)
第 2 章 光泵浦	(13)
2.1 选择性光泵浦	(14)
2.1.1 选择性光泵浦的条件	(15)
2.1.2 分子势能曲线的计算	(19)
2.1.3 Na_2 分子光谱常数的拟合	(22)
2.1.4 Na_2 分子跃迁能级的确定	(25)
2.2 激光等离子体软 X 射线(LPX)激励	(35)
2.2.1 激光等离子体软 X 射线辐射动力学	(35)
2.2.2 LPX 激励稀有气体氟化物离子准分子动力学	(51)
2.3 光场感生电离(OFI)及其激励的 X 光激光	(69)
2.3.1 强场电离理论	(71)
2.3.2 原子参数及激光参数的计算理论	(85)
2.3.3 基于 OFI 的 X 射线激光实验研究装置	(89)
2.3.4 基于 OFI 的电子碰撞机制的理论和实验研究	(90)
2.3.5 基于 OFI 的复合机制类硼氮系统的理论和实验研究	(107)
2.3.6 超短脉冲激光与团簇的相互作用	(118)
参考文献	(126)
第 3 章 气体放电泵浦	(133)
3.1 一般的气体放电泵浦	(133)
3.1.1 气体中带电粒子的产生和消失	(134)
3.1.2 气体放电激光器动力学	(144)



3.2 射频气体放电泵浦	(160)
3.2.1 射频激励基本原理	(160)
3.2.2 射频击穿理论	(161)
3.2.3 射频气体放电方式	(164)
3.2.4 α 射频放电理论模型	(164)
3.2.5 电光调 Q 射频激励波导 CO_2 激光器及动力学过程分析	(167)
3.3 毛细管放电泵浦 X 光激光	(182)
3.3.1 毛细管放电 Z 箍缩效应	(183)
3.3.2 毛细管放电泵浦软 X 射线实验装置	(193)
3.3.3 类氦氩的原子参数	(204)
3.3.4 毛细管放电激励类氦氩离子产生 X 光激光物理模型与方程	(209)
3.3.5 X 光在等离子体中的传播	(218)
3.3.6 预脉冲与毛细管放电软 X 射线激光	(226)
3.3.7 毛细管放电软 X 射线激光实验	(231)
3.3.8 毛细管放电实现更短波长的可能性	(239)
3.3.9 毛细管放电软 X 光激光的应用研究	(239)
参考文献	(243)
第 4 章 电子束泵浦	(250)
4.1 强流相对论电子束装置介绍	(250)
4.1.1 电子束装置的基本结构和原理	(251)
4.1.2 二极管的原理与结构	(252)
4.2 气体腔中的高能电子分布	(255)
4.2.1 求解高能电子分布的玻耳兹曼(Boltzmann)方程	(255)
4.2.2 电离截面和激发截面的选取	(259)
4.2.3 玻耳兹曼方程的求解结果	(268)
4.3 电子束泵浦氩的反应动力学模型	(272)
4.3.1 电子束能量沉积反应	(273)
4.3.2 氩离子准分子动力学过程	(275)
4.3.3 速率方程组的求解及增益的讨论	(280)
参考文献	(284)

第 1 章 绪 论

自 20 世纪 60 年代激光被发明以来,已经取得了迅速的发展,并在众多的领域中得到广泛的应用。按照工作介质的形态,激光器可被分为固体激光器、液体激光器、气体激光器和半导体激光器等。相比之下,气体激光器中涉及的动力学过程更为复杂,因此本书针对各种新型的气体激光器,介绍了其动力学研究的方法和成果。根据不同种类激光的产生要求,已经发展了多种泵浦方式,如相干光泵浦、非相干光泵浦、放电泵浦、电子束泵浦等。因为对不同的泵浦方式的激光器研究其动力学的方法和过程明显不同,所以本书以泵浦方式的不同划分章节。在不同的泵浦方式下,涉及的知识领域不同,这使得本书的知识体系比较复杂,其中要涉及分子光谱、等离子体物理、强场物理、原子物理、光电子原理、X 射线激光原理、气体放电、高功率脉冲技术等多方面的知识。为了方便理解书中的内容,我们将在涉及这些知识的章节,对相关的知识给予必要的介绍。

激光器的发展一方面要提高激光输出性能,另一方面要探索新型的激光介质以及新的泵浦方式,在这两方面激光器动力学都起到了至关重要的作用。激光器动力学的深入研究有助于选择合适的泵浦方式,也有助于将更多的粒子泵浦到激光上能级实现高效、高能量的激光输出。同时新型激光介质的研究更是离不开动力学的研究。动力学的深入研究,会为新型介质通过泵浦能否实现激光输出提供判据。从以上分析可以看出,研究激光器动力学具有重要的意义。本章将分别介绍激光器动力学研究的主要对象、研究意义和研究方法。

1.1 主要研究对象

激光器动力学是研究在激光介质中如何通过各种反应和途径获得激光上能级粒子数布居的课程。其主要研究对象包括两个方面。

1. 介质中激发态粒子数集聚的途径

研究激发态是如何获得粒子数布居和实现粒子数反转的。也就是说研究原子和分子各种可能的激发机理,受激粒子的激发机理。

激光器动力学课程与激光物理课程研究内容的重点不同。激光物理这门课主要是描述在具备了产生激光的条件后(或者说实现了粒子数反转后),形成激光的属性的基本理论,描述输出功率、能量、饱和参量、空间分布、时间分布等激光属性。激光物理中讨论粒子数反转时通常是研究在稳态分布情况下粒子数的分布。而激光器动力学,是研究粒子数反转的形成过程,研



究获得粒子数布居的手段,也就是说它研究的是非平衡态的问题。平衡态即是在没有外界作用下,热力学系统的性质永远保持不变的状态,除此之外都是非平衡态。

2. 研究处于激发态的粒子的流向

从时间上去追踪激发态粒子的运动规律,也就是研究处于激发态粒子的物理运动学过程,粒子分布的时间演变的过程。

第1项研究内容即是研究各种可能的激发机理,寻找最有效的激发途径。本书主要介绍该项研究内容。第2项研究内容即是用地豫理论描述非平衡态过程,研究粒子分布的时间演变。对于该研究内容本书不予介绍。

1.2 激光器动力学在激光科学发展中的作用

在激光器的研究中,研究其动力学过程和激发机理是非常有意义的。在激光科学的发展中,每一激光的发现、发展及成熟的历史,都是由于对其激发机理及动力学过程的认识不断探索、不断深化、不断寻找到新的规律的历史。下面我们分别以 CO_2 激光器和 Na_2 第一三重态跃迁为例,说明激光器动力学在激光发展中的重要作用。

例一: CO_2 激光器发展

1964年 Patel 等人首先报道了用 CO_2 气体,观察到大约 $10.6 \mu\text{m}$ 的连续激光作用,但由于其发表时,对离子及分子的新激光跃迁研究正处于高潮,所以这种新的激光与当时已报道过的数百种其他激光跃迁相比,并未引起人们的更多注意,几个月后 Patel 使 CO_2 连续波输出达到毫瓦量级。尔后两年中由于激光器动力学的深入研究,特别是找到了共振能量转移的动力学途径,使 CO_2 激光器研究取得了一些重大进展。第一项是利用 N_2 和 CO_2 混合气体作为激活介质。由于 N_2 被激励后,从 N_2 的亚稳态($v=1$)振动能级向 CO_2 上激光能级(00^0_1)共振转移,这种转移效率之高,使 CO_2 激光上能级粒子数集聚增加了几个数量级,从而使 CO_2 激光器输出从毫瓦级迅速增加到10瓦左右,增加了4个量级。随后又发现了 He 具有与 N_2 气相同的作用,利用流动的 $\text{CO}_2 - \text{N}_2 - \text{He}$ 混合气体使 CO_2 激光获得了大于100瓦的非常惊人的连续波输出,从而使 CO_2 激光器发展极为迅速。至今 CO_2 激光器已经成为一种目前最具有应用价值的几种激光器之一,特别在工业、医疗、国防等领域都有了重大的应用。

例二: Na_2 第一三重态跃迁

1. 准分子特性、准分子跃迁

准分子是指在通常情况下这种分子是不存在的,只有当组成分子的一个原子被激发,处于激发态时,它与一个基态的另一原子组成一个分子,这种分子处于激发态。当它通过跃迁回到基态时,由于处于基态的这类分子是不存在的,这类分子便迅速分解成各自的原子。因此,这种分子与通常存在的分子是不同的,其不同就在于,它只存在于激发态中,基态中不存在。为了区别这类分子,称其为准分子(excimer)。所谓存在不存在,是用寿命来衡量的,“存在”意味



有着可观的寿命,“不存在”即寿命非常之短。上述定义只适用于两个原子组成的准分子。除此之外还有多原子组成的准分子,如 Xe_2F 三原子准分子和四原子准分子等。可以将准分子定义成具有结合的激发态、离解的基态的复合物。

这种分子能级间的跃迁主要特征是束缚-自由跃迁。由于基态是自由态,不存在粒子数的集聚,也就不存在瓶颈问题,所以准分子跃迁的激光系统,应该有最大的量子效率,不存在瓶颈,因而就可以获得最大的能量输出。

依据准分子这样的特点,将束缚-自由跃迁的结构,称为准分子跃迁,这类系统也就是准分子系统,如 Na_2 的第一对三重态间跃迁(简称第一三重态跃迁)。

20 世纪 70 年代人们首先发现了准分子激光系统,在稀有气体氟化物中实现了准分子跃迁,如今 KrF 、 XeCl 、 ArF 等很多准分子激光器已经得到了广泛的应用,准分子激光已成为目前紫外大能量激光系统的代表之一。这之后人们就致力于寻找各种准分子激光系统,发展各种波长的新型准分子激光,拓展激光器的覆盖波长范围,因而也就带动了激光器动力学、激光光谱学等新兴学科的发展。

准分子激光系统上能级通常是高位电子态,与基态间的能量间隔比较大,当产生准分子跃迁时,辐射的光子能量很大,因而准分子激光大都是高效的紫外激光系统。

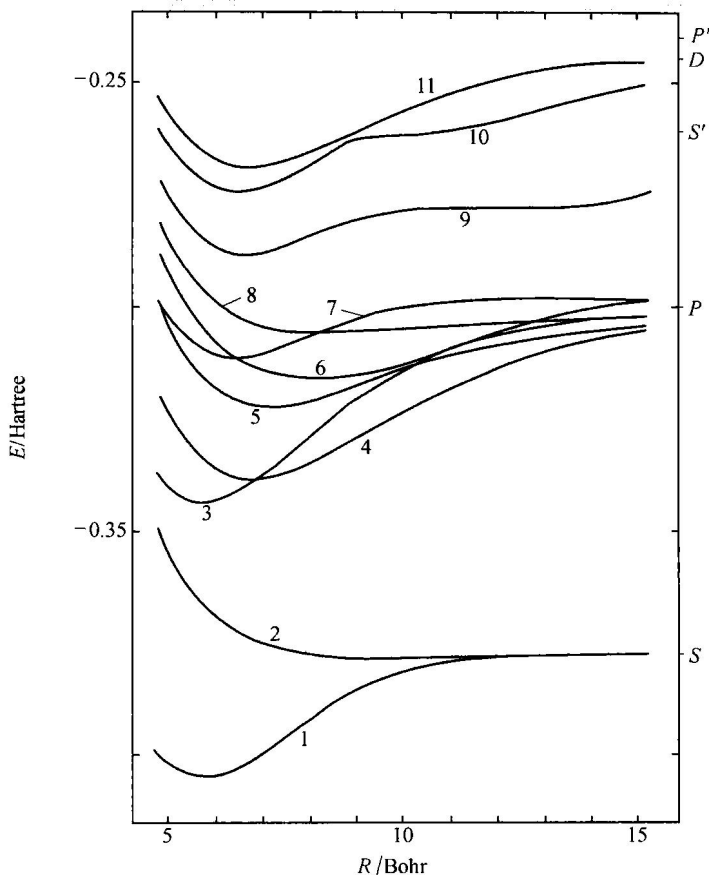
在 70 年代末,80 年代初,美国 Konowalow 通过 *ab initio* 计算,预言了钠双原子分子第一三重态跃迁^[1]。 Na_2 分子势能曲线如图 1.1 所示^[2],第一三重态跃迁是指与基三重态($x^3\Sigma_u^+$ 态)有光学联系的第一对三重态间跃迁($b^3\Sigma_g^+ \rightarrow x^3\Sigma_u^+$),是束缚自由跃迁,是一种准分子激光系统,这是一个近红外可宽带调谐的新激光介质系统。图 1.1 中横坐标 R 为核间距,单位为 Bohr(玻尔), $1 \text{ Bohr} = 5.291\,77 \times 10^{-11} \text{ m}$;纵坐标 E 为能量,单位为 Hartree(哈特里), $1 \text{ Hartree} = 4.359\,81 \times 10^{-18} \text{ J}$ 。

2. 关于 Na_2 第一三重态跃迁的研究

在这之前人们对 Na_2 作为激光介质作了大量的研究,但都只限于与基态单重态有光学联系的单态间跃迁的研究,对于与基态的另一个三重态有联系的三重态的跃迁,研究的还比较少。在 Konowalow 预言前后,国际上有若干个小组已对 Na_2 第一三重态跃迁发生了很大的兴趣,相继开展了工作,当时国际上比较典型的研究小组的工作情况如下。

普林斯顿大学研究小组,曾试图利用氩离子激光使处于基态的 $X^1\Sigma_g^+$ 粒子激发到 $B^1\Pi_u$ 态再通过碰撞弛豫,在 $b^3\Sigma_g^+$ 上获得粒子数布居^[3]。碰撞激发,是三体间相互作用,碰撞截面应是 $\Sigma = N\sigma$, N 是碰撞伙伴粒子数密度, σ 是碰撞微分截面,所以要使截面增大,必须提高 N ,也就是要在高饱和气压条件下。但是气压高,碰撞的粒子数增多,也会同时使上能级粒子数碰撞猝灭概率增加,因而使上能级寿命大大降低,这是互相矛盾的,这种办法不是有效的激励办法。

萨格勒布大学研究小组,曾用放电激励电子碰撞的办法,试图在 $b^3\Sigma_g^+$ 态上获得粒子数布居^[4],但是由于电子碰撞截面太小,直到 1990 年前后才观察到很弱的第一三重态跃迁的荧光谱,这也不是一种很有效的激励办法。

图 1.1 Na_2 分子势能曲线

1— $X^1\Sigma_g^+$; 2— $x^3\Sigma_u^+$; 3— $a^3\Pi_u$; 4— $A^1\Sigma_u^+$; 5— $b^3\Sigma_g^+$; 6— $2^1\Sigma_g^+$;
7— $B^1\Pi_u$; 8— $C^1\Pi_g$; 9— $3^1\Sigma_g^+$; 10— $C^3\Pi_u$; 11— $C^1\Pi_u$

除了以上的工作外,其他研究小组还利用其他一些途径,来获得 $b^3\Sigma_g^+$ 态的粒子数布居,但也都迟迟没有观察到荧光辐射。

以上的途径,应该说原理上都是正确的,但在 1981 年前都始终没有能观察到第一三重态跃迁荧光,这就是说欲获得有效的第一三重态跃迁的激励,必须寻找新的途径。

3. 利用能级间的扰动及碰撞能量转移获得激发三重态粒子数布居

首次观察到第一三重态跃迁荧光谱辐射的,是马祖光教授。他在当时分析了国际上各个小组的工作后,提出了一条新的激励途径^[5]。

在当时 Woodman 工作的启发下,利用紫外激光激励并通过能级间的扰动,获得了第一三



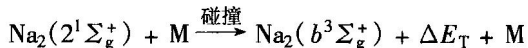
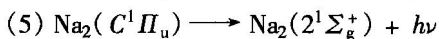
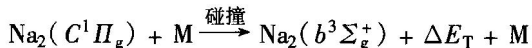
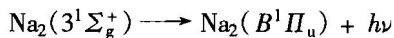
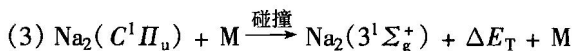
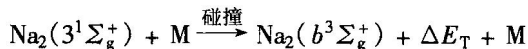
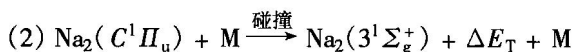
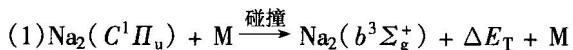
重态跃迁。Woodman的工作是用紫外激光 XeF 351 nm 将 $X^1\Sigma_g^+$ 态粒子激励到高位电子态 $C^1\Pi_u$ 态,观察到著名的紫色扩散带。扩散带是源于束缚 - 自由跃迁,可以判断 Na_2 中的紫色扩散带应是与基态三重态有光学联系的光学跃迁。也就表明较高的三重态获得了粒子数布居,与基三重态之间产生了跃迁过程,这一过程说明了紫外光激励通过能级间的能量传递使三重态获得了粒子数,可否利用这种手段获得第一三重态间的跃迁呢?马祖光利用这种思想,最终首次观察到了第一三重态跃迁荧光谱^[5,6]。

在观察到荧光谱的基础上,更重要的是如何获得有效的激励,实现粒子数反转,获得激光振荡,这就是激光器动力学的研究内容。

参考文献[2]、[7]给出了获得激光振荡的可能的动力学过程的讨论。根据文献[8]给出的 Na_2 势能曲线,可以分析这是对 Na_2 势能曲线计算中与实验结果吻合的最好的计算结果,这里依据这个势能曲线,利用泵浦光波长 339.586 nm 紫外激光激励,获得第一三重态跃迁,并进而对获得激光振荡的可能动力学过程做了初步的讨论。

泵浦光波长为 339.586 nm 时,上能级可能被激励的能级是 $C^1\Pi_u$ 态, $C^1\Pi_u$ 态被激励时,在 $b^3\Sigma_g^+$ 态上获得粒子数布居的可能途径主要有两条,第一条途径是 $C^1\Pi_u$ 态附近有一个 $C^3\Pi_u$ 态与 $C^1\Pi_u$ 非常靠近,另外是 12Bohr 两个能级交叉,按照能级间扰动的选择定则,可以判断,这两个能级是符合扰动选择定则的,也就是粒子可以通过扰动从 $C^1\Pi_u$ 过渡到 $C^3\Pi_u$ 态,同时由于两个能级间也可以通过碰撞使 $C^3\Pi_u$ 态获得粒子数布居。

第二条途径是处于 $C^1\Pi_u$ 态的粒子可以通过三体碰撞和级联跃迁最后在 $b^3\Sigma_g^+$ 态上获得粒子数布居。这些过程可以描述为下面五个产生第一三重态跃迁可能的过程:



以上五种过程各自发生的可能性,可以通过平动能 ΔE_T 的大小来分析。



$$(1) \Delta E_T = 11\,220\text{ cm}^{-1}$$

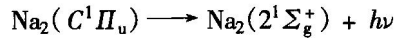
$$(2) \Delta E_T = 7\,270\text{ cm}^{-1}$$

$$(3) \Delta E_T = 1\,920\text{ cm}^{-1}$$

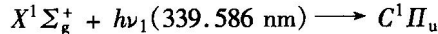
$$(4) \Delta E_T = 3\,380\text{ cm}^{-1}$$

$$(5) \Delta E_T = 900\text{ cm}^{-1}$$

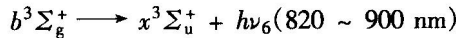
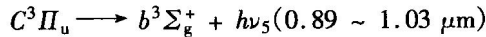
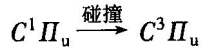
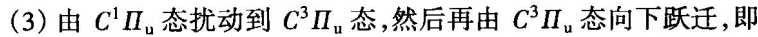
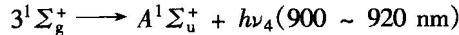
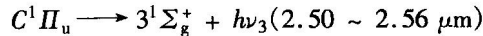
通常认为平动能变化大是传能过程效率不高的象征,上述过程中只有平动能变化明显较小的过程是最有可能发生的过程,因此以上各种过程中(5)是最可能发生的。因而,第二条途径最有可能的过程是



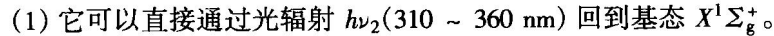
根据上述分析,基态的 Na_2 可能被激发到不同的较高能级,在这些较高能级向下跃迁时就会产生光谱辐射。如果激发到 $C^1\Pi_u$ 态,则动力学过程为



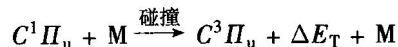
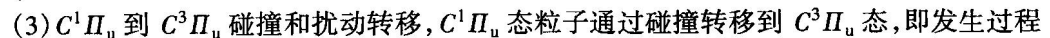
此时由 $C^1\Pi_u$ 态向下跃迁的可能辐射过程为



就是说,基态粒子在 $h\nu_1(339.586\text{ nm})$ 光子激励下使 $C^1\Pi_u$ 态获得布居, $C^1\Pi_u$ 态向下跃迁有几种可能的辐射过程。



(2) 它可辐射 1 个近红外光子 $h\nu_3(2.50 \sim 2.56\text{ }\mu\text{m})$ 到达 $3^1\Sigma_g^+$ 态,并再辐射 1 个红外光子 $h\nu_4(900 \sim 920\text{ nm})$ 到达 $A^1\Sigma_u^+$ 态。在我们的荧光谱测量中,确实观测到 910 nm 和 $2.50 \sim 2.56\text{ }\mu\text{m}$ 的光谱。



如果碰撞只发生电子态能量的变化,由势能曲线可见其碰撞前后能量相差甚小,可认为是



近共振碰撞,这样碰撞的截面可以是比较高的,通过碰撞 $C^3\Pi_u$ 态粒子获得布居,是可能的,也是一个重要通道。

在 $C^3\Pi_u$ 态上粒子,将辐射出 910 nm 附近光子到达 $b^3\Sigma_g^+$ 态,从而产生 $b^3\Sigma_g^+ \longrightarrow x^3\Sigma_u^+$ 的第一三重态的跃迁。为了在实验中验证上述动力学过程,测定了 910 nm 谱与 890 nm 谱间的时间逻辑关系。实验结果表明 910 nm 谱的确比 890 nm 谱早发生了大约 2.5 ns,这就为 910 nm 与 890 nm 谱很可能的级联跃迁关系,提供了重要的实验依据。同时也为整个动力学过程的建立提供了重要的实验数据。正是在这种思路指引下,作者于国际上首次实现了第一三重态跃迁激光振荡^[7]。

以上告诉我们探索新的激光器体系,必须对激发机理,弛豫理论的基本问题不断提出一些新的思想。这也就引导我们对自然规律的认识不断深化。

1.3 动力学过程的分析方法

分析动力学过程,第一步就是用反应方程式将可能发生的各种过程描述出来。考虑第一步时,一定要将所有可能发生的过程都考虑到,都描写出来。激光科学发展的历史证明,人们对可能发生的过程的认识,是逐步深入的。这里所说将有可能发生的过程都用反应方程式描述出来,包含两层意思:① 就目前的认识水平,将可能发生的过程考虑全;② 尽量考虑是否有新的原来没有估计到的过程发生,并可能影响现在所描述的所有过程。很可能由于认识的不断深入,还要不断地发展。

实际上,我们会看到,这样总结出的过程将是十分复杂的。我们在这里试图描述的微观过程、微观世界的运动规律,是用概率概念来描述的,即任何一个过程都有发生的可能,可能具有一定的概率,只是概率存在大小不同而已。针对一个具体体系过程而言,描述各种过程的模型是十分复杂的,这种模型往往是不可能用解析表达式对其求解,因而在讨论时,我们往往对系统的模型进行简化。简化的依据,就是写出全部过程之后,讨论各种过程发生的概率,对过程发生的微分截面和发生的速率进行讨论。截面是从概率概念来讨论的,对截面大的过程往往是影响较大的过程,肯定应是我们研究的重点,截面小的过程可以在我们第一步讨论中暂时忽略。速率问题是从时间上讨论过程发生的快慢,这样对时间上追踪粒子数运动的规律就更为重要,在我们讨论的模型中,如果主要过程是一个快过程(如转动弛豫),那么对同时产生的一些相对慢的过程,它们的影响就会较小,就可以暂时被忽略。讨论的过程如果是一个慢过程(如振动弛豫),那么那些变化速率大的过程,可能在考虑主要过程前就已经结束,也对讨论的主要过程影响不大,也可以暂时予以忽略。这样就可能暂时忽略相当多的一些过程,做到过程的简化。

真正讨论动力学过程,应首先依据简化后的模型进行讨论,简化的依据是各种可能发生的过程的截面和速率,这是动力学过程讨论的第二步。

经过以上两步后,主要过程就讨论清楚了,特别是讨论清楚了影响主要过程的宏观因素,

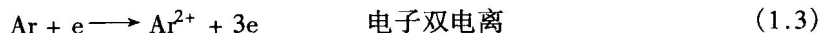
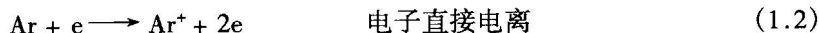
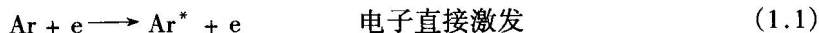


并讨论清楚宏观条件对这些因素影响的趋势,以便可以控制这些宏观条件的发生,朝着有利于我们所需要的方向发展。这一主要过程讨论清楚之后,如果进一步考虑,那就应有第三步,进一步反过来考虑曾被忽略过程的因素,究竟它们对整个系统的影响是什么样的,有没有什么问题。有了一定的实验基础之后,要考虑主要实验现象与理论描述吻合情况,特别要注意发现理论与实验有出入的地方,发现问题进一步修改理论模型,这样可能会使实验中的很多现象得到进一步的解释。下面举两个例子,来说明这一思路。

第一个例子是离子准分子跃迁过程。

20 世纪 70 年代后期,人们发现了准分子激光体系,以电子束激励 KrF 准分子激光为例,人们对它的动力学过程理解越来越深入,因而 KrF 准分子获得激光输出能量越来越大,至今人们已总结出大约 100 多个可能发生的过程。在对准分子激光体系深入研究的基础上,1985 年 Sauerbrey 与 Basov 分别独自提出了离子准分子体系,认为这是获得真空紫外波段的好的激光介质系统^[10~12],并预言稀有气体卤化物离子准分子具有可以与 KrF 准分子相比较的受激发射截面,因而是一种优秀的 VUV 激光介质系统。该预言涉及卤素二价离子 Rg^{2+} 与 F^- 结合成 $Rg^{2+}F^-$ 离子准分子,因此引入了一系列与二价离子有关的动力学过程。这使得稀有气体与卤素气体组合的混合气体激励时的动力学过程,较之以往中性准分子的动力学过程增加了新的内容。这说明了人们对事物认识的不断深入,对动力学过程的描述越来越全面。采用 LPX 激励已经观察到了稀有气体氟化物 VUV 波段辐射, $Ar^{2+}F^-$ 125 nm 和 $Kr^{2+}F^-$ 148 nm 的 VUV 荧光辐射^[13~14]。

Langhoff 1988 年对氩在 185 ~ 200 nm 谱段观察到的第三谱带进行了理论研究,分析指出这是 Ar^{2+} 与 Ar 组成的 Ar_2^+ 离子准分子的跃迁^[15]。文献[16]中用强流相对论电子束(0.5 MeV, 20 kA)激励,实验亦观察到这一 VUV 波段的辐射。按照前面讲述的动力学过程分析方法,可以描述这一系统的动力学模型,包括几十个反应过程。为了深入理解 Ar_2^+ 离子准分子的形成过程,需要根据反应过程的截面和反应速率常数等判断反应发生的概率,再根据反应概率对动力学模型进行简化。经简化以后可以把反应过程分为两类:一类是与电子束能量沉积有关的反应;另一类是与电子束不直接相关的反应过程。首先讨论与电子束能量沉积有关的反应。当相对论电子束注入腔中后,腔中的各种反应过程就开始了。这里电子束能量沉积的反应主要包括三个反应



除了上述过程外,整个腔中的其他反应过程是非常复杂的,其中与 Ar_2^+ 离子准分子形成和猝灭有关的反应主要有四个,即

