

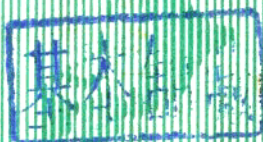
935861

高等学校教材

激光器件与技术(Ⅱ)

蓝信钜
郭振华

丘军林
赵家驹



华中理工大学出版社

激光器件与技术(Ⅱ)

蓝信钜 丘军林

郭振华 赵家驹

华中理工大学出版社

激光器件与技术(Ⅰ)

蓝信钜 丘军林

郭振华 赵家驹

责任编辑 常江南

*

华中理工大学出版社出版发行

(武昌喻家山)

新华书店湖北发行所经销

华中理工大学出版社印刷厂印刷

开本: 850×1168 1/32 印张: 10.5 字数: 256 000

1991年5月第1版 1991年5月第1次印刷

印数: 1—1 200

ISBN 7-5609-0566-8/TN·19

定价: 2.74 元

内 容 提 要

本书较系统地阐述了各种新型激光器件与技术的基本原理、装置结构和工作特性。内容主要包括有：准分子激光器、空心阴极激光器、色心激光器、化学激光器、自由电子激光器、X 射线激光器、激光可调谐与变频技术、激光注入锁定技术等。

本书的特点是着重于各种器件与技术基本原理的论述，内容叙述深入浅出。适用作光电子技术专业选修课教材，也是从事光电子技术的科技人员的参考书。

出版说明

根据国务院关于高等学校教材工作分工的规定,我部承担了全国高等学校、中等专业学校工科电子类专业教材的编审、出版的组织工作。由于各有关院校及参与编审工作的广大教师共同努力,有关出版社的紧密配合,从1978年至1985年,已编审、出版了两轮教材,正在陆续供给高等学校和中等专业学校教学使用。

为了使工科电子类专业教材能更好地适应“三个面向”的需要,贯彻“努力提高教材质量,逐步实现教材多样化,增加不同品种、不同层次、不同学术观点、不同风格、不同改革试验的教材”的精神,我部所属的七个高等学校教材编审委员会和两个中等专业学校教材编审委员会,在总结前两轮教材工作的基础上,结合教育形势的发展和教学改革的需要,制订了1986~1990年的“七五”(第三轮)教材编审出版规划。列入规划的教材、实验教材、教学参考书等近400种选题。这批教材的评选推荐和编写工作由各编委会直接组织进行。

这批教材的书稿,是从通过教学实践、师生反映较好的讲义中经院校推荐,由编审委员会(小组)评选择优产生出来的。广大编者、各编审委员会和有关出版社为保证教材的出版和提高教材的质量,作出了不懈的努力。

限于水平和经验,这批教材的编审、出版工作还会有缺点和不足之处,希望使用教材的单位,广大教师和同学积极提出批评建议,共同为不断提高工科电子类专业教材的质量而努力。

电子工业部教材办公室

前 言

本教材是根据工科电子类专业教材“七五”编审规划而编写的,是理工科高等学校光电子技术专业(激光)本科生和研究生的选修课教材和教学参考书。近十几年来若干新型激光器件与新的激光技术陆续出现并得到蓬勃发展,但现有的《激光器件》与《激光技术》教材未包括这些内容。本教材拟选编在理论上、技术上比较成熟的而且有很好的发展前景的新型激光器件与技术,作为这两门教材的后续内容。学生通过学习本教材,能掌握这些器件的基本原理,了解其装置结构、工作特性及新的发展趋向。

本教材的内容主要包括有:准分子激光器,空心阴极激光器,色心激光器,化学激光器,自由电子激光器,X射线激光器,激光可调谐与变频技术,激光注入锁定技术等八章。

本教材由蓝信钜(华中理工大学)主编并执笔第四、五、六、七、八章;第一章由郭振华(华中理工大学)执笔;第二章由丘军林(华中理工大学)执笔;第三章由赵家驹(上海交通大学)执笔;并由蓝信钜统编全稿。北京理工大学魏光辉担任主审。

在编写本书时,参阅了一些编著者的著作和文章,在参考文献中未能全部一一列出,在此一并表示诚挚感谢。由于编者水平有限,书中一定会存在一些缺点和错误,殷切希望广大读者批评指正。

编 者

1990年3月

目 录

第一章 准分子激光器	(1)
§ 1.1 概述	(1)
§ 1.2 准分子激光器的工作原理	(5)
一、准分子的能态特性	(5)
二、准分子激光器运转的泵浦要求	(7)
三、电子束泵浦准分子激光器的机理	(8)
四、脉冲放电泵浦准分子激光器的机理	(16)
五、准分子激光器的动力学过程	(17)
§ 1.3 准分子激光器的泵浦技术	(23)
一、准分子激光器泵浦用的电子束	(23)
二、放电技术	(26)
§ 1.4 准分子激光器的光学系统	(29)
§ 1.5 几种主要的准分子激光器	(34)
一、Xe ₂ 激光器	(35)
二、XeF 激光器	(41)
三、已成熟的准分子激光器概况	(43)
四、三原子准分子激光器	(48)
§ 1.6 高光谱亮度准分子系统	(63)
一、引言	(63)
二、KrF 准分子系统(248nm)	(64)
三、ArF 准分子系统(193nm)	(65)
参考文献	(68)
第二章 空心阴极离子激光器	(69)
§ 2.1 空心阴极放电理论	(69)
一、空心阴极效应	(69)
二、阻塞放电	(72)

三、阴极溅射	(73)
四、气体吸附	(75)
五、空心阴极放电粒子数方程式	(76)
§ 2.2 空心阴极放电惰性气体离子激光器	(79)
一、惰性气体离子激光谱线	(79)
二、氦-氖离子激光器的动力学过程	(80)
三、氦-氖离子激光器	(82)
§ 2.3 空心阴极金属蒸汽离子激光器	(85)
一、金属蒸汽离子激光谱线	(85)
二、空心阴极氦-镉离子激光器	(85)
三、空心阴极铜离子激光器	(88)
参考文献	(90)
第三章 色心激光器	(92)
§ 3.1 色心激光的物理基础	(93)
一、碱卤晶体中的 F 心	(93)
二、光学增益	(95)
三、受 M^{+} 扰动的 F 型激光工作色心	(97)
四、F 聚集型激光工作色心	(103)
五、其他的一些激光工作色心	(111)
六、激活色心的产生方法	(111)
§ 3.2 色心激光器	(113)
一、色心激光器的特点	(113)
二、色心激光器的结构	(115)
三、色心可饱和吸收体	(124)
四、同步泵浦锁模色心激光器	(128)
参考文献	(131)
第四章 化学激光器	(133)
§ 4.1 概述	(133)
§ 4.2 化学激光器的基本原理	(136)

一、化学激光产生的机理·····	(136)
二、弛豫(去激活)过程的影响·····	(139)
三、粒子数反转分布与分子的放大作用·····	(140)
四、化学激光中的化学反应类型·····	(143)
五、化学激光器的引发技术·····	(147)
六、化学反应动力学·····	(150)
§ 4.3 化学激光器的种类·····	(152)
一、连续 HF(DF)化学激光器·····	(152)
二、脉冲 HF(DF)化学激光器·····	(165)
三、能量转移型化学激光器·····	(177)
四、CO 化学激光器·····	(185)
五、电子态跃迁与碘原子激光器·····	(192)
参考文献·····	(201)
第五章 自由电子激光器 ·····	(202)
§ 5.1 概述·····	(202)
§ 5.2 自由电子激光器的原理及主要组成部分·····	(204)
一、工作原理·····	(204)
二、主要组成部分·····	(207)
§ 5.3 自由电子激光器的类型·····	(219)
一、磁韧致辐射自由电子激光器·····	(220)
二、切伦科夫辐射自由电子激光器·····	(225)
§ 5.4 自由电子激光器的理论·····	(228)
一、量子理论·····	(228)
二、单粒子运动理论·····	(228)
三、动力学理论·····	(229)
四、流体理论·····	(229)
§ 5.5 发展现状及前景·····	(230)
参考文献·····	(232)
第六章 X 射线激光器(简介) ·····	(233)

§ 6.1 概述	(233)
§ 6.2 产生 X 射线激光的主要原理方案	(235)
一、电子碰撞激发	(235)
二、等离子体膨胀冷却激发	(238)
三、光共振激发	(239)
四、使用离子亚稳态的两步激发	(239)
§ 6.3 电子碰撞激发 X 射线激光器的实验装置及结果分析	(240)
§ 6.4 X 射线激光器的发展动向及应用前景	(244)
参考文献	(245)
第七章 激光可调谐与变频技术	(246)
§ 7.1 概述	(246)
§ 7.2 利用激光器本身特性实现可调谐的原理	(251)
一、某些激光工作物质荧光带的特点	(251)
二、波长可调谐的基本原理	(259)
三、实现波长可调谐的方法	(261)
四、主要的调谐激光器	(273)
§ 7.3 利用非线性效应实现变频和可调谐	(289)
一、非线性光学效应	(289)
二、非线性介质中强光相互作用的耦合波方程	(291)
三、光学参量振荡器	(293)
四、光参量振荡器的波长调谐	(294)
五、差频振荡可调谐	(299)
参考文献	(300)
第八章 激光注入锁定技术	(302)
§ 8.1 概述	(302)
§ 8.2 激光注入锁定的基本原理	(304)
§ 8.3 注入锁定理论	(306)

§ 8.4 注入锁定 Q 开关 Nd : YAG 激光器	(311)
一、主振荡器	(312)
二、副振荡器	(313)
三、注入锁定激光器的输出特性	(313)
§ 8.5 其他注入锁定激光器	(316)
一、注入锁定染料激光器	(316)
二、注入锁定 TEACO ₂ 激光器	(319)
三、注入锁定准分子激光器	(320)
参考文献	(322)

第一章 准分子激光器

§ 1.1 概 述

早在 1927 年,瑞利爵士就观察到了 Hg 蒸汽 330nm 的紫外宽带辐射谱,并认出它发自 Hg_2^* 准分子回到离解基态的跃迁,后来又认出了一个对应低能态的准分子 Hg_2^* 辐射 480nm 连续谱。1930 年 Hopfield 在放电的高气压 He 中,发现了 60nm~100nm 的真空紫外连续谱,并归结为 He_2^* 到离解基态的跃迁。后来 Herzberg, Basov 等人相继讨论了 Xe_2^* 、 Kr_2^* 、 Ne_2^* 、 Ar_2^* 等稀有气体准分子的辐射谱。Tanaka, Zelikoff 分别在 1954、1955 年提出了“准分子”这一名词。所谓“准分子”是指在激发态能够暂时结合成不稳定分子,而在正常的基态又迅速离解成原子的缔合物,因而也可称“受激准分子”。在早期文献中称两个同核原子形成的准分子为“dimer”,两个异核原子形成的准分子叫“exciplex”,三个核原子形成的准分子叫“trimer”。它们一般又通称为“excimer”即准分子。在准分子激光体系中,激光跃迁发生在束缚的激发态和排斥的(或弱束缚)基态之间,属于束缚-自由跃迁,故准分子激光器也可称为“束缚-自由跃迁”激光器。

用束缚→自由态电子跃迁产生增益的概念,早在激光器刚刚发明的 1960 年就提出来了。当时 Houtermous 指出把准分子作为激活介质产生光振荡的可能性。1970 年 Basov 等人首先利用强流电子束激发液体 Xe,成功地获得了 Xe_2^* 激光辐射,波长为 176nm,这是世界上第一台准分子激光器。其后人们积极地研究激励高压气态准分子激光,振荡波长从红外到真空紫外。劳伦斯·利弗莫尔实验室的 Hoff 等人研制成了气相 Xe_2^* 准分子激光器,并严格论

证了得到的受激辐射。不久又相继研制成 Kr_2^* 、 Ar_2^* 等稀有气体准分子激光器,其激光波长都在真空紫外区。电子束泵浦的稀有气体准分子的荧光效率很高,但报道的激光效率却很低。为了寻求可见和近紫外激光源, Powell 等人提出了将稀有气体氧化物准分子作为激活介质的设想,并在 1974 年实现了 XeO 、 KrO 和 ArO 的绿带激光振荡,其波长在 557nm 附近。1975 年 Velazco 等人观察到了稀有气体卤化物准分子的辐射谱线,它是由 Xe 在低气压下与卤素分子发生亚稳反应所产生的。同年 Burnham 首先实现了 XeBr^* 激光振荡;其后,另外一些稀有气体卤化物准分子,如 XeF^* 、 KrF^* 、 ArF^* 、 KrCl^* 和 ArCl^* 等准分子激光器也先后制成。1977 年还研制成了金属蒸汽卤化物准分子激光器,如 HgCl 、 HgBr 等。已成功运转的一些准分子激光器及其波长归纳于表 1.1 中。

表 1.1 准分子激光器及其波长(nm)

Xe_2^*	Kr_2^*	Ar_2^*	XeO^*	KrO^*	ArO^*	XeF^*
169~176	145.7	126.1	550	557.8	557.6	351.1
XeCl^*	XeBr^*	KrF^*	KrCl^*	ArF^*	HgCl^*	
308	281.8	248.4	223	193.3	558.4	

迄今,不但准分子激光体系越来越多,而且激励方式不断改进,功率和效率也不断提高。脉冲输出能量已达百焦尔量级,峰值功率达到千兆瓦以上(KrF^* 、 ArF^* 准分子激光器),脉宽已能拉长到 1 μs ,脉冲重复率达 200Hz(Blumlein 电路驱动的 XeF^* 激光器),总效率达 10%,输出发射角达到衍射极限值,波长调谐范围超过 2nm(KrF^* 、 ArF^* 激光器)。中小功率的准分子激光器商品,到 1989 年最大平均功率有 200W 以上,重复频率最高的是 1000Hz,单脉冲能量最大值是 2000mJ,脉宽有 250ns,光束发散角 0.15mrad。另外 Tittel 等人还研究了稀有气体卤化物三原子准分子激光辐射,如 Kr_2F^* 、 Xe_2Cl^* 准分子激光器能在蓝绿波段内进行宽

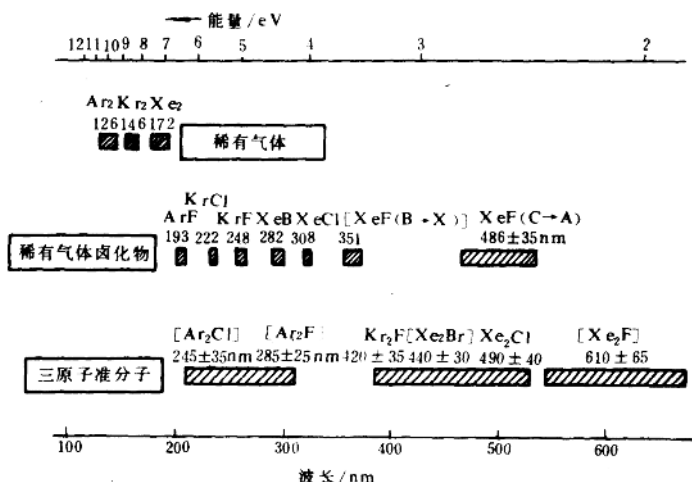


图 1.1 准分子激光器波谱范围和中心波长

带发射,图 1.1 给出了一般稀有气体卤化物准分子激光器的波谱范围和中心波长位置。

准分子激光器的特点是:

① 在一般激光器中,是利用长寿命亚稳态能级储存激励能量以实现比某个激光下能级的粒子数反转分布,并用于产生激光振荡,如 CO_2 激光器,其(001)能级的自发辐射寿命为秒量级;红宝石激光器上能级寿命为毫秒级,但是原子、分子的自发辐射寿命一般反比于波长的三次方,故要发射短波长的激光,其上能级寿命将非常短。然而准分子却不同于一般分子或原子,它是只在激发态才存在的“准”分子,基态(即激光跃迁下能级)寿命很短,约为 $10^{-13}s$,激发态寿命也仅为 $10^{-8}s$ 量级,因此,只能以其特征辐射谱的出现为标志来判断准分子的生成。这些特征辐射谱对应于低激发态到

排斥的(或弱束缚的)基态之间跃迁,其荧光谱为一连续带,这是准分子光谱的特征。由于准分子激光体系的能级结构具有许多共性,我们用图 1.2 来说明

它们的辐射特征。图中 C 表示排斥的基态, B 表示准分子的低能态, A 为较高的激发态。在核间距 R_0 处,能级 B 有最小值,而与 R_0 相对应的基态位能曲线是排斥的,处于此核间距的基态分子很不稳定,它将沿排斥的位能曲线向 R 增大的方向移动,以致最终离解为独立的原子。因此,在 R_0 附近的弗兰克-康登区内很容易形成

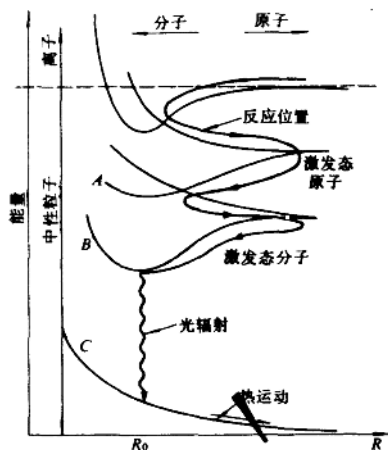


图 1.2 准分子体系能级示意图和反应路径

B 与 C 间的粒子数反转分布。而相应的跃迁下能级(排斥的 C 态)的抽空时间仅为弛豫振动量级,即使是超短脉冲运转, C 能级也可视为空的。因此,准分子体系对巨脉冲激光器特别优越。

② 由于激光跃迁的下能级是基态,基本上没有什么无辐射损耗,因此,量子效率很高,这是实现高效率激光运转的必要条件。

③ 由于激光跃迁下能级的粒子迅速离解,故无“瓶颈”效应限制,因而,拉长脉宽和高重复率运转都没有原则困难。

④ 由于准分子的荧光谱为一连续带,故可以实现频率可调谱运转。

以上这些特点,使准分子激光器具有强大的生命力,到目前为

止,国际市场上已有数百种牌号的 XeCl 、 ArF 、 KrF 、 XeF 准分子激光器商品出售,并采用微电脑控制、磁开关、油冷却、可更换电极、插入式综合气瓶、光纤机内传输信息等等先进技术,使准分子激光器能满足人们的各种不同需要。因此,它在同位素分离、光化学、医学、生物学、微电子工业加工和泵浦染料激光器等方面获得了越来越多的应用;在军事应用上也受到特别的重视。

§ 1.2 准分子激光器的工作原理

一、准分子的能态特性

准分子跃迁产生激光是基于原子相互接近形成准分子激发态和基态势能曲线的特殊分布。由两个相同稀有气体原子构成的准分子(二聚物),都具有几乎完全类似的能态结构。因此,可用图 1.3 所示的 Xe_2^+ 准分子的能级结构示意图来说明该系统的工作原理。图中 $^1\Sigma_g^+$ 表示排斥的基态, $^3\Sigma_g^+$ 表示最低激发态, $^1\Sigma_u^+$ 表示较高的激发态。基态上的原子沿一条排斥势能曲线发生碰撞,如果一个原子中的电子被激发,则可能与另一个原子相结合产生一个激发态分子。由于基态准分子浓度非常小,进入准分子高能态的激发通道是十分迅速的,初始的激发可能进入离子或原子激发态。例如用强电子束泵浦 Ar , 开始形成离子 Ar^+ 及激发态原

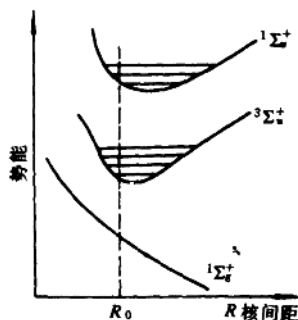


图 1.3 稀有气体准分子典型势能曲线

子 Ar^+ 、 Ar^{++} 等, Ar^+ 通过三体碰撞反应: $\text{Ar}^+ + 2\text{Ar} \rightarrow \text{Ar}_2^+ + \text{Ar}$ 与中性 Ar 原子结合, 生成分子离子 Ar_2^+ , 这个二聚物离子被电子中和后形成激发态原子 Ar^* 、 Ar^{*+} 。在高气压下, Ar^* 借助于三体碰撞与 Ar 结合成准分子 Ar_2^* 。对于这类准分子, 可以采取一个近似模型: 将准分子的两个原子核与全部基态电子一起看作为一个离子核心, 一个受激电子处在远距此核心的轨道上运动, 这样准分子的振动频率、转动惯量和平衡核间距等, 主要由离子核心定出。

稀有气体原子与卤素组成的准分子, 其能态结构也具有共同的特点(图 1.4)。以 KrF 准分子为例, 它是典型的稀有气体卤化物, 其基态原子是 $\text{Kr}(^1\text{S})$ 和 $\text{F}(^2\text{P})$, 它们相互碰撞产生的低势能曲线有两条, $\text{X}^2\Sigma_{1/2}$ 态和 $\text{A}^2\Pi_{1/2, 3/2}$ 态; 由于 $\text{X}^2\Sigma_{1/2}$ 态对应于一个电子和一个卤素原子空穴沿核间轴排列的结构, 所以其势能

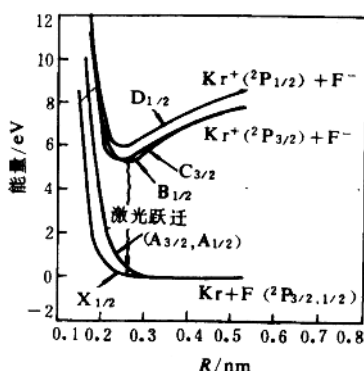


图 1.4 KrF 势能曲线

能曲线最低, 而 $\text{A}^2\Pi_{1/2, 3/2}$ 态对应于卤素的未配对电子和空穴的离轴排列结构, 其势能曲线稍高一点。激光高能级则对应离子对态(或电荷转移态), 即束缚离子对 Kr^+F^- , 它的库仑势能曲线当核间距 R 很大时降低到 $\text{Kr}^+ + \text{F}$ 导出的势能线以下。库仑力是长程力, 所以离子势能曲线范围很大。 $\text{Kr}^+ + \text{F}$ 产生的态能量高出几个电子伏, 卤族负离子是 ^1S 态, 稀有气体正离子是 $^2\text{P}_{1/2, 3/2}$ 态, 两者相互作用