



激 光 器 件

成 都 电 讯 工 程 学 院

蔡伯荣 王瑞丰

程泽东 徐荣甫

北 京 工 业 学 院

魏光辉 张自襄

刘敬海 穆恭谦

湖 南 科 学 技 术 出 版 社

内 容 简 介

本书是激光技术专业课教材。内容共分四篇,前三篇系统地介绍了气体激光器、固体激光器和半导体激光器;最后一篇则简要介绍了染料激光器和自由电子激光器等。其目的是让读者对于常用的几种类型激光器的基本原理和主要特性,有一个较为详细的了解,以获得制作或应用这些器件的必要知识。此外,对于其它类型激光器也能有些初步了解。

本书主要作为高等院校工科电子类激光技术专业本科“激光器件”课程的教材;也可供从事激光器件和激光技术工作的有关人员参考。

激 光 器 件

成都电讯工程学院

北 京 工 业 学 院

责任编辑:周翰宗

*

湖南科学技术出版社出版

(长沙市展览馆路14号)

湖南省新华书店发行 湖南省新华印刷二厂印刷

*

1981年4月第1版 1983年8月第2次印刷

开本: 787×1092毫米 1/16 印张: 24.5 插页: 1 字数: 603,000

印数: 4,501—8,900

统一书号: 15204·54 定价: 2.60元

前 言

本书系高等院校工科电子类激光技术专业统编教材之一。是按1978年四机部武汉教材座谈会制定的教学计划和教材编写大纲编写的。编写中，既保持了本教材的系统性，也注意了与《激光原理》和《激光技术》教材的衔接，尽量避免不必要的重复。

全书共分四篇。鉴于激光器件涉及的知识面较广，且尚处于不断发展阶段，所以力求使编写的内容在有一定广度的基础上，突出那些比较成熟、比较实用的器件。为此，前三篇较详细地介绍了气体激光器、固体激光器和半导体激光器的结构、工作原理和主要特性，并简要地给出了器件设计的初步知识；第四篇则概略地介绍了某些特殊的和新近发展的激光器。其中，气体激光器重点介绍了普通的 CO_2 激光器和He-Ne激光器；固体激光器重点介绍的是常见的Nd-YAG、红宝石和钕玻璃激光器；半导体激光器重点介绍了较成熟的GaAs/GaAlAs双异质结激光器；其它激光器一篇中，重点介绍的是染料激光器。此外，为了便于讲授，还编入了一些必要的基础知识，如在气体激光器一篇中给出了气体放电的基本原理；在第三篇半导体激光器中介绍了有关的半导体物理知识。全书内容是按教学计划规定的90学时安排的，不包括器件制作的工艺内容。有关工艺技术的问题，建议结合生产实习介绍。由于本教材内容较多，学时有限，各院校可从教学的实际情况出发，有所侧重，适当取舍。

本书由西北电讯工程学院詹玉书、安毓英、栗增、许长存等同志审阅，并在西北电讯工程学院主持下，由北京大学、清华大学、成都电讯工程学院和北京工业学院等兄弟院校参加的《激光器件》教材审稿会上正式审定。书稿由成都电讯工程学院和北京工业学院合编。其中，气体激光器的第一章和第三章由王瑞丰执笔；第二章和第四章由程泽东执笔，固体激光器的第一、二、三章和第六章由张自襄执笔；第四章由刘敬海、穆恭谦执笔；第五章由魏光辉执笔，半导体激光器一篇由蔡伯荣执笔，其它激光器一篇由徐荣甫执笔。全书由成都电讯工程学院蔡伯荣主编。

在编审过程中，北京大学、清华大学、华中工学院和天津大学等兄弟院校的激光教研室对本教材的编写大纲和初稿提出过许多宝贵的意见和建议，并在提供资料方面也给予了大力的支持和帮助，在此一并致谢！

由于编者水平所限，加之时间仓促，又因本书系激光技术专业第一次统编教材，尚缺乏编写经验，难免有不妥和错误之处，恳切期望读者批评指正！

编 者

一九七九年九月

目 录

第一篇 气体激光器

概述	(1)
第一章 气体激光器放电激励的基本原理	(3)
§ 1.1.1 气体放电的基本过程	(3)
(一) 碰撞截面与自由程	(3)
(二) 电子速度与能量分布	(6)
(三) 碰撞的类型	(8)
(四) 激发速率	(10)
(五) 夫蓝克-康登原理	(11)
§ 1.1.2 气体放电中的选择激发过程	(11)
(一) 共振激发能量转移	(11)
(二) 电荷转移	(13)
(三) 潘宁电离	(14)
(四) 电子碰撞	(15)
§ 1.1.3 繁流放电与“着火”过程	(16)
(一) 气体放电的全伏安特性	(16)
(二) 电子繁流的规律	(17)
(三) 着火电压与巴邢曲线	(18)
(四) 气体放电的相似定律	(19)
§ 1.1.4 辉光放电的光区分布	(20)
§ 1.1.5 辉光放电的负辉区	(21)
§ 1.1.6 辉光放电的正柱区	(22)
§ 1.1.7 空心阴极放电	(25)
(一) 结构与放电条件	(25)
(二) 主要特性	(25)
(三) 溅射效应	(26)
§ 1.1.8 其它放电形式	(27)
(一) 弧光放电	(27)
(二) 高频放电	(28)
(三) 脉冲放电	(28)
第二章 原子激光器	(29)
§ 1.2.1 氦-氖激光器的工作原理	(30)
(一) 激发机理	(30)

(二) 增益与放电条件的关系	(33)
(三) 小信号增益曲线	(35)
(四) 增益饱和	(37)
§ 1.2.2 氦-氖激光器的输出特性	(38)
(一) 输出功率	(38)
(二) 模式和发散角	(50)
(三) 频率特性	(57)
(四) 偏振特性	(58)
§ 1.2.3 氦-氖激光器输出参数的稳定性	(59)
(一) 光束方向稳定性	(59)
(二) 频率稳定性	(60)
(三) 输出功率的稳定性	(62)
§ 1.2.4 氦-氖激光器的设计	(64)
(一) 主要几何尺寸的确定	(64)
(二) 激光器的结构设计	(70)
§ 1.2.5 氦-氖激光器的放电特性与电源	(72)
§ 1.2.6 其它原子激光器简介	(73)
第三章 分子激光器	(75)
§ 1.3.1 普通二氧化碳激光器的工作原理	(75)
(一) 二氧化碳分子的结构和振动能级	(75)
(二) 二氧化碳分子的振-转光谱和谱线强度	(76)
(三) 激发过程	(78)
(四) 弛豫过程	(81)
(五) 电子能量分布与能量交换率	(82)
§ 1.3.2 普通二氧化碳激光器的结构与电源	(85)
(一) 器件结构	(85)
(二) 激光器电源	(87)
§ 1.3.3 普通二氧化碳激光器的工作特性	(87)
(一) 放电特性	(87)
(二) 气体成分和气压	(88)
(三) 温度效应	(90)
(四) 输出波长与转动能级竞争效应	(92)
(五) 激光器尺寸对输出功率的影响	(93)
(六) 器件工作寿命	(94)
§ 1.3.4 普通二氧化碳激光器的增益与饱和	(95)
(一) 增益系数	(95)
(二) 饱和光强	(98)
(三) 增益系数与饱和光强的测量	(100)
§ 1.3.5 小型二氧化碳激光器的设计方法	(101)
(一) 反射镜透过率与输出功率的计算	(101)
(二) 基模激光器的设计	(104)
§ 1.3.6 二氧化碳激光器的稳频简介	(106)

(一) 频率特性	(106)
(二) 一般的稳频方法	(107)
(三) 氟化氢气体吸收稳频法	(107)
§ 1.3.7 二氧化碳波导激光器	(109)
(一) 波导激光器的结构与工作原理	(110)
(二) 参数计算	(114)
(三) 设计步骤	(117)
§ 1.3.8 高压二氧化碳激光器	(117)
(一) 高压横向激励二氧化碳激光器	(117)
(二) 气体流动二氧化碳激光器	(124)
§ 1.3.9 氮分子激光器	(124)
(一) 激光上能级的激发	(125)
(二) 粒子数反转的条件	(126)
(三) 激励方法	(129)
§ 1.3.10 光泵远红外激光器	(130)
(一) 基本原理	(130)
(二) 器件结构	(131)
(三) 特性和应用	(132)
§ 1.3.11 准分子激光器	(132)
(一) XeF准分子的能级结构和电子跃迁	(133)
(二) 实验装置	(134)
第四章 离子激光器	(137)
§ 1.4.1 氩离子激光器	(137)
(一) 激发机理	(137)
(二) 激光器结构	(140)
(三) 工作特性	(141)
§ 1.4.2 氦-镉激光器	(143)
(一) 激光器结构	(143)
(二) 激发机理	(144)
(三) 工作特性	(145)
(四) 空心阴极氦-镉激光器	(146)

第二篇 固体激光器

概述	(149)
第一章 固体激光工作物质	(152)
§ 2.1.1 固体激光工作物质的基本概念及要求	(152)
§ 2.1.2 红宝石晶体	(154)
(一) 晶体的物理化学性质	(155)
(二) 红宝石的光谱特性	(155)
(三) 温度对红宝石性能的影响	(158)
§ 2.1.3 掺钕钇铝石榴石晶体	(159)
(一) 晶体结构和物理化学性质	(159)

(二) 能级结构与光谱特性·····	(160)
§ 2.1.4 钕玻璃·····	(163)
§ 2.1.5 三种固体工作物质的性能比较·····	(165)
§ 2.1.6 其它固体激光工作物质·····	(167)
§ 2.1.7 固体工作物质的光学质量及检验·····	(168)
(一) 光学均匀性·····	(168)
(二) 光损耗系数·····	(170)
(三) 散射损耗·····	(170)
(四) 退偏损耗·····	(171)
(五) 色心·····	(173)
(六) 激光损伤·····	(173)
§ 2.1.8 激光棒的几何尺寸及加工要求·····	(174)

第二章 泵浦光源·····(176)

§ 2.2.1 对光源的基本要求及泵浦光源类型·····	(176)
(一) 惰性气体放电灯·····	(176)
(二) 金属蒸气放电灯·····	(177)
(三) 白炽灯·····	(177)
(四) 半导体光泵·····	(178)
(五) 日光泵·····	(178)
§ 2.2.2 惰性气体放电灯的脉冲放电过程及发射光谱分布·····	(179)
§ 2.2.3 脉冲灯的光输出波形及辐射效率·····	(181)
§ 2.2.4 脉冲放电过程中的电学性质·····	(183)
§ 2.2.5 惰性气体放电灯的触发·····	(185)
§ 2.2.6 惰性气体放电灯的寿命和极限负载·····	(188)
§ 2.2.7 泵浦光源的供电系统·····	(190)
(一) 脉冲放电回路·····	(191)
(二) 储能电容的充电回路·····	(195)

第三章 泵浦腔·····(198)

§ 2.3.1 泵浦方式及泵浦腔类型·····	(198)
§ 2.3.2 泵浦腔的能量传输效率·····	(200)
§ 2.3.3 泵浦光在激光棒内的分布·····	(205)
§ 2.3.4 泵浦腔的反射表面·····	(207)
§ 2.3.5 泵浦腔结构设计中的—些考虑·····	(208)

第四章 热效应·····(209)

§ 2.4.1 引言·····	(209)
§ 2.4.2 连续激光器的热效应·····	(209)
(一) 激光棒内的温度分布·····	(209)
(二) 激光棒中的热应力·····	(211)
(三) 激光棒的热应力双折射·····	(212)

(四) 激光棒的热透镜效应·····	(215)
(五) 热焦距的测量·····	(218)
§ 2.4.3 单次或重复率脉冲激光器的热效应·····	(219)
(一) 单次脉冲工作方式·····	(219)
(二) 重复率脉冲工作方式·····	(221)
§ 2.4.4 防止热效应的措施·····	(222)
(一) 冷却措施·····	(222)
(二) 光学补偿方法·····	(225)
(三) 采用非圆柱工作物质·····	(225)
第五章 谐振腔参数选择·····	(227)
§ 2.5.1 光学谐振腔的腔、模参数关系·····	(227)
§ 2.5.2 类透镜介质对激光束的变换·····	(236)
(一) 类透镜介质对光线的变换·····	(237)
(二) 类透镜介质对激光束的变换·····	(239)
§ 2.5.3 类透镜效应的补偿与热不灵敏腔·····	(244)
(一) 类透镜效应的补偿·····	(244)
(二) 热不灵敏腔·····	(245)
§ 2.5.4 结构设计考虑·····	(251)
(一) 机械结构·····	(251)
(二) 光学零部件·····	(251)
(三) 谐振腔的调整·····	(253)
第六章 激光输出特性·····	(255)
§ 2.6.1 激光振荡器的参数计算·····	(255)
(一) 增益饱和·····	(255)
(二) 在阈值时的激光器工作情况·····	(257)
(三) 在阈值以上时的工作情况·····	(260)
§ 2.6.2 固体激光器的输出特性·····	(263)
(一) 尖峰结构·····	(263)
(二) 输出功率、能量和效率·····	(264)
(三) 激光光谱·····	(268)
(四) 激光束的方向性·····	(269)
§ 2.6.3 激光功率和能量的测量·····	(270)
(一) 脉冲激光的光热测量法·····	(270)
(二) 脉冲激光的光电测量法·····	(273)
(三) 连续激光功率的测量·····	(274)
(四) 激光衰减·····	(275)

第三篇 半导体激光器

概述	(277)
----------	-------

第一章 半导体激光器的原理	(278)
---------------------	-------

§ 3.1.1 半导体的能带结构	(278)
------------------------	-------

(一) 导带、禁带、满带和“空穴”概念	(278)
---------------------------	-------

(二) 杂质能级, i, p, n型半导体	(282)
-----------------------------	-------

§ 3.1.2 载流子的统计分布	(285)
------------------------	-------

(一) 载流子非简并化分布	(286)
---------------------	-------

(二) 载流子简并化分布	(289)
--------------------	-------

§ 3.1.3 载流子的迁移、复合与寿命	(291)
----------------------------	-------

(一) 载流子的迁移现象	(291)
--------------------	-------

(二) 载流子的复合与寿命	(292)
---------------------	-------

§ 3.1.4 载流子扩散与非均匀半导体	(295)
----------------------------	-------

(一) 载流子的扩散, p-n结的形成	(295)
---------------------------	-------

(二) p-n结能带的定量分析	(297)
-----------------------	-------

§ 3.1.5 注入式同质结激光器的原理	(299)
----------------------------	-------

(一) 载流子注入与p-n结的场致发光	(299)
---------------------------	-------

(二) 半导体激光器产生激光的条件	(301)
-------------------------	-------

第二章 半导体激光器的特性	(306)
---------------------	-------

§ 3.2.1 阈值性质	(306)
--------------------	-------

(一) 阈值电流密度的测量	(306)
---------------------	-------

(二) 阈值电流密度与腔长和反射率的关系	(308)
----------------------------	-------

(三) 温度和结构对阈值电流密度的影响	(308)
---------------------------	-------

§ 3.2.2 功率输出与转换效率	(310)
-------------------------	-------

(一) 量子效率	(310)
----------------	-------

(二) 功率效率	(311)
----------------	-------

§ 3.2.3 光谱特性	(313)
--------------------	-------

§ 3.2.4 光束发散角	(315)
---------------------	-------

§ 3.2.5 激光器的时间响应特性	(316)
--------------------------	-------

§ 3.2.6 激光器的热学性质	(317)
------------------------	-------

§ 3.2.7 激光器的寿命	(319)
----------------------	-------

第三章 半导体异质结激光器	(321)
---------------------	-------

§ 3.3.1 异质结的形成及其作用	(321)
--------------------------	-------

§ 3.3.2 单异质结激光器(SHL)	(324)
----------------------------	-------

§ 3.3.3 双异质结激光器(DHL)	(325)
----------------------------	-------

(一) 器件结构	(325)
----------------	-------

(二) 阈值电流密度	(328)
------------------	-------

(三) 室温连续工作条件	(330)
(四) 振荡模式	(331)
(五) 温度特性	(334)
(六) 器件寿命	(335)
§ 3.3.4 长波长半导体激光器	(336)
(一) $\text{Ga}_x\text{In}_{1-x}\text{As}_y\text{P}_{1-y}/\text{InP}$ 激光器	(337)
(二) $\text{GaAs}_{1-x}\text{Sb}_x/\text{Ga}_{1-y}\text{Al}_y\text{As}_{1-x}\text{Sb}_x$ 激光器	(339)
(三) $\text{Ga}_{1-x}\text{In}_x\text{As}/\text{Ga}_{1-y}\text{In}_y\text{P}$ 激光器	(339)
§ 3.3.5 分布反馈式半导体激光器	(340)
(一) 激光器结构	(340)
(二) 基本原理	(340)
(三) 器件制备与参数	(342)
(四) 分布布喇格反射式激光器	(343)
§ 3.3.6 可调谐半导体激光器	(344)
(一) 器件结构和典型参数	(344)
(二) 调谐原理和实验数据	(345)
(三) 应用简述	(346)
(四) 自旋反转喇曼激光器	(346)

第四篇 其它激光器

第一章 无机液体激光器	(348)
§ 4.1.1 激光机理	(348)
(一) $\text{Nd}^{3+}:\text{POCl}_3 + \text{SnCl}_4 + \text{P}_2\text{O}_5\text{Cl}_4$ 无机液体激光器	(348)
(二) $\text{Nd}^{3+}:\text{SeOCl}_2 + \text{SnCl}_4$ 无机液体激光器	(349)
§ 4.1.2 无机液体激光器的结构	(349)
§ 4.1.3 无机液体激光器的优缺点及典型参数	(351)
第二章 染料激光器	(352)
§ 4.2.1 染料激光机理	(352)
(一) 染料分子结构	(352)
(二) 染料分子的能级图	(353)
(三) 染料分子的吸收和发射过程	(353)
(四) 三重态的“陷阱”作用及其解决办法	(354)
(五) 溶剂对染料分子的影响	(354)
(六) 光照的影响	(355)
§ 4.2.2 泵浦方式	(355)
(一) 脉冲泵浦	(355)
(二) 连续波泵浦	(358)
§ 4.2.3 调谐方法	(358)
(一) 染料激光器的调谐原理	(358)
(二) 波长选择装置	(359)

§ 4.2.4 典型染料激光器	(361)
(一) QJR2—1 型染料激光器的主要结构及其工作原理	(361)
(二) 实验结果	(364)
第三章 化学激光器	(366)
§ 4.3.1 化学激光器的特点及应用	(366)
(一) 能把化学能直接转换成激光	(366)
(二) 激光波长丰富	(366)
§ 4.3.2 化学激光器建立粒子数反转的原理	(366)
§ 4.3.3 化学激光器的引发方式	(368)
(一) 化学引发	(368)
(二) 热引发	(368)
(三) 放电引发	(368)
(四) 光引发	(369)
§ 4.3.4 光分解激光器	(369)
第四章 气动激光器	(371)
§ 4.4.1 二氧化碳气动激光器工作原理	(371)
§ 4.4.2 二氧化碳气动激光器	(374)
(一) 连续输出CO ₂ 气动激光器	(374)
(二) 脉冲CO ₂ 气动激光器	(376)
第五章 自由电子激光器	(378)
§ 4.5.1 概述	(378)
§ 4.5.2 自由电子激光器的工作原理	(378)
§ 4.5.3 磁致激光器	(380)

第一篇 气体激光器

概 述

气体激光器是以气体或蒸气作为工作物质的激光器。它利用气体原子、分子或离子的分离能级进行工作, 所以其跃迁谱线和相应的激光输出波长范围均较宽。例如原子气体激光器的输出波长范围在1~25微米之间, 以碘(I)原子和氦-氖(He-Ne)为典型代表, 其中He-Ne激光输出波长为0.6328微米、1.15微米和3.39微米。分子激光器的输出波长范围在5微米至2毫米之间(少数几种跃迁为可见光和紫外线), 以二氧化碳(CO₂)、一氧化碳(CO)和氮(N₂)分子等为典型代表。其中CO₂激光输出波长为10.6微米, N₂分子激光为3371埃。离子气体(包括金属离子蒸气)激光器输出波长范围则在可见光与紫外线之间(少数跃迁超过7000埃), 以氩离子(Ar⁺)气体和镉(Cd⁺)气体等为典型代表。其中Ar⁺激光器输出波长为4880埃(蓝)和5145埃(绿)。准分子气体激光器输出波长范围在紫外和真空紫外之间, 以氟化氙(XeF)准分子气体为典型代表, 其输出波长为3511埃。

气体激光器的另一特点是由于气体的光学均匀性较好, 较之固体激光器和半导体激光器其输出光束的质量(如单色性、相干性和光束稳定性等)也较好。对于许多实际应用来说这是很重要的。

气体激光器从问世以来已得到广泛的应用, 其本身也在不断发展。发展方向主要在以下几个方面。首先是扩展波段。这方面目前已出现了不少新型器件, 例如在远红外激光器(波长在40微米~2毫米之间)方面近年来出现了分子束或原子束振荡器, 已获得成功的有ND₂H、DCN、HCN和D₂O等。其特点是辐射功率弱, 但无碰撞增宽和多普勒增宽现象, 噪声低, 可作波长标准。其次为辉光放电远红外激光器, 成功的有NH₃、H₂O、H₂S、SO₂和HCN等。但其增益低、效率低、噪声大。在较大装置中可获得中等功率输出。最近还出现了较有希望的光泵远红外激光器, 已报导的有26种分子、525条激光谱线。最长波长为CH₃Br(液体)的1965.34微米, 最短波长为NH₃的34.26微米。但真正有效的只有CH₃F、CH₃OH、D₂O、NH₃等少数几种。与辉光放电相比, 它具有高增益、高效率、低噪声、稳定、无破坏性、结构紧凑使用方便等优点。但总的说来由于远红外激光器输出功率低、转换效率不高, 且缺乏有效的测量器件, 故应用尚不普遍。真空紫外激光器(波长在2000埃~100埃之间)方面有H₂的(B¹Σ_g⁺-X¹Σ_g⁺)赖曼系(1246埃~1426埃)和H₂的(C¹Π_u-X¹Σ_g⁺)魏纳系(1268埃~1098埃), 准分子的Xe₂(1730埃)、Kr₂(1457埃)、Ar₂(1265埃)、ArF(1930埃)、ArCl(1700埃)、NeF(1080埃)、ArXe(1730埃)。最近还出现了用氦气中七次谐波转换产生380埃的相干辐射的尝试。真空紫外激光器可能在化学反应, 光化学反应以及作为空间武器方面得到应用, 其发展的主要障碍是未找到合适的透射和反射材料。X激光器(波长在0.01~100埃)方面, 其设想的方案有内壳层方案和非直接内壳层方案两类。由于谐振腔的困难, 也有提出用波导式环形腔或干脆不用谐振腔而采用超辐射方式。γ激光器(波长小于1埃)方面, 已从方案阶段得到重大突破, 到目前为止, 都是用同质异能核(处于γ射线波段电磁场的激发态的原子核)作为工作物质, 大

体可分为三类：长寿命的， $\tau_{\text{长}} > 10^4$ 秒；短寿命的， $\tau_{\text{短}} < 10^{-4}$ 秒；中等寿命的， 10^{-2} 秒 $\leq \tau_{\text{中}} \leq 10$ 秒。就设计方案来说大体可分为弱泵浦型、强中子流脉冲泵浦型、强 γ 射线和X射线泵浦型等方案。其重大突破是将 Co^{60} 同位素冷却到0.008K外加强磁场和强射频电磁场，以控制核间距使之定向排列，实现 γ 辐射定向控制。

以上目前尚属实验阶段，因此气体激光器的另一个发展方向是寻求新型实用的，要求操作简便、寿命长、效率高和稳定度高的器件。目前较为完善的有 CO_2 气体激光器，输出10.6微米激光，效率10%左右，寿命最高的达2~3万小时。 He-Ne 气体激光器输出 λ 为6328埃，单色性最佳，可达 6×10^{-16} 量级，寿命最高的达10万小时以上。 Ar^+ 激光器， $\lambda \approx 4500 \sim 5290$ 埃，常用波长为4880埃和5145埃。此外，还要求这些器件向小型化方向发展。除半导体外，如小型封离式 N_2 激光器，器件全长几毫米，充1个大气压，平均输出功率1~5毫瓦，充15个大气压时，峰值功率达25~250瓦，电极空间可缩小至1毫米。波导型 CO_2 激光器、充气压强几百托时，最小长度已作到4厘米，输出连续功率150毫瓦，频率调谐宽度1.2千兆赫。

最后，气体激光器的另一个发展方向是探索适应新的应用所需的器件。首先是高光强激光器，如利用核泵浦的 CO 激光器，用中 U^{235} 子裂变 U^{235} ，强力裂变碎片激发气体而产生粒子数反转，效率可达50%，核泵浦激光器能够均匀地泵浦大体积高压气体，故能获得百万焦耳的高能输出。 γ 激光器也是一种引人注目的高光强激光器。其次在分离同位素方面，经常使用的如 CO_2 激光器，输出波长9.4~11.3微米，效率百分之十到百分之几十，最高功率可达 10^{12} 瓦（普通放电型）。 CO 激光器输出波长5微米，当气体冷却至77K时能量转换效率可达47%，最高脉冲功率可达 10^{11} 瓦。受激准分子 Xe_2^+ 激光器最高输出功率 0.5×10^9 瓦，波长1720埃，带宽120埃，以受激准分子激光器和可调谐激光器最有发展前途。

二十年来气体激光器发展很快，种类繁多，限于篇幅，不能一一荐介，本篇仅择其中常见且具代表性的激光器，对其原理、特性和设计等基本知识作必要的探讨和介绍。全篇共分四章，第一章介绍气体激光器放电激励的基本原理，重点讨论气体放电的基本过程，选择激发过程和辉光放电的主要特性，并扼要介绍其它放电形式。第二章和第三章分别阐述原子激光器与分子激光器，以 He-Ne 激光器和普通放电型 CO_2 激光器为代表重点叙述，并对最近发展起来的各种新型气体激光器，如铜蒸气激光器、波导激光器、 N_2 分子激光器、准分子激光器和光泵远红外激光器等作简要介绍。第四章则研究离子激光器，以 Ar^+ 激光器为重点，结合介绍 Cd^+ 激光器。

第一章 气体激光器放电激励的基本原理

气体激光器的激励方式一般都是利用气体放电,只有在某些特殊情况下才利用光激励、化学激励、热激励等方法。气态物质在平常情况下是很好的绝缘体,每立方厘米大气中通常只有几个到几百个带电的离子和电子,故施加电压于管两端电极时,管内便产生很微弱的电流。但是当电压增加到某一定值时,导电电流会突然增大,而同时放电管两端电极上的电压却突然下降(相当于出现负阻特性),气体从绝缘状态突变成导体,放电空间因而出现明亮的光辉。此现象即谓之气体的“电击穿”或“着火”。按气体导电的电压-电流特性曲线(通常叫伏安特性)来区分,着火以后气体导电又可分为正常辉光放电、反常辉光放电和弧光放电以及脉冲放电等类型。气体激光器就是利用这些放电形式来激励气体使之产生激光的。本章主要讨论气体放电的基本过程、选择激发过程、辉光放电及其它放电等内容。

§ 1.1.1 气体放电的基本过程

(一) 碰撞截面与自由程

分子平均自由程与碰撞截面这两个物理量在我们讨论气体放电时是很重要的,因为在气体放电中决定放电情况的基本物理因素就是电子、原子、分子和离子之间的碰撞。上述两个物理量对描述碰撞过程极为重要。

在气体放电中,对粒子间的碰撞要有正确的理解。对于两个刚性球来说,在它们相对运动时,只有当它们的距离小于或等于球的直径 d 时才会发生碰撞。这里刚性球的作用距离有一个明显的边界,其碰撞截面就是 πd^2 。可是电子和离子间的运动有库仑场的相互作用,较之刚性球复杂得多。故应给带电粒子的碰撞以更确切的定义,即当两个粒子相对运动时,它们之间的距离先是不断减少,到一定距离后又增加了,在这样的过程中,如果两个粒子中任一个的物理状态发生了变化,即认为它们之间发生了碰撞。由于粒子间力场的相互作用,其碰撞的距离并没有明确的分界线。为表征粒子间的相互作用,必须引进一个“有效碰撞截面”的概念。

当一束速度均匀的电子通过气体时,假如气体的有效截面为 σ 厘米²,气体密度为 n 厘米⁻³,某一个电子通过 dx 厚度的气体薄层时,在单位面积上和气体原子发生一次碰撞的几率应该是

$$f = \text{可能发生碰撞面积} / \text{总体积} = n\sigma dx / 1 = Qdx \quad (1.1-1)$$

这也是 n_e 个电子同这个气体薄层发生 n_e 次碰撞的几率。式中 σ 是气体原子或分子的有效截面,单位是厘米²。 Q 是气体的单位体积内的总有效截面,单位是 1/厘米,它的数值与气体密度 n 有关。

考虑到电子束与原子的碰撞。将偏离了原电子束方向的电子视为电子和原子发生了碰撞,那末在实验上可测出这个几率是 $\left| \frac{d_i}{i} \right|$ 即 $di/i = n\sigma dx$ (1.1-2)

式中 i 是 x 坐标某处电子束的强度, di 是在 $x+dx$ 处由于碰撞引起电子束强度的减少量, 将上式积分可得

$$i = i_0 e^{-n\sigma x} \quad (1.1-3)$$

由实验测出 i/i_0 值后, 就可以由上式计算得到该气体的原子有效截面。

另一方面, 当一束均匀速度的电子束注入气体时, 由于电子和原子的碰撞, 改变了电子的运动方向或动能, 在 x 处测量到电子束强度为

$$i = i_0 e^{-\alpha x} \quad (1.1-4)$$

式中 i_0 是在 $x=0$ 处电子束的强度, α 是气体对电子的吸收系数, 比较(1.1-3)、(1.1-4)两式可得到气体原子的有效截面 σ 和吸收系数 α 的关系是

$$\sigma = \alpha/n = 2.81 \times 10^{-17} \alpha/p (\text{厘米}^2) \quad (1.1-5)$$

式中 $n = 2.7 \times 10^{19} p/760$, p 为气体压强、单位是托。式(1.1-5)把微观物理量 σ 和宏观物理量 α 联系起来了。通过实验测量出 α 值, 用式(1.1-5)就可确定原子的碰撞有效截面 σ 。

碰撞截面与粒子平均自由程之间有一定的关系, 如令电子在气体中运动的平均自由程是 $\bar{\lambda}_e$, 那末电子进入气体中, 在 x 到 $x+dx$ 距离内和原子发生碰撞的次数应为 $dx/\bar{\lambda}_e$ 。另由以上讨论得知对应的碰撞几率是 $n\sigma dx$ 。于是就有 $dx/\bar{\lambda}_e = n\sigma dx$, 所以

$$\bar{\lambda}_e = 1/n\sigma = 1/Q \quad (1.1-6)$$

可见平均自由程与原子的总截面成反比。

上面总体地讨论了原子的碰撞截面。包括发生的所有碰撞的都不论碰撞是否造成原子激发还是电离。故以上所述系原子的总截面数值。当进一步分析时, 就应考虑到有的碰撞会造成原子激发, 有的碰撞会造成原子电离。因此, 总截面应包括激发截面和电离截面等的总和即

$$\sigma_{\text{总}} = \sigma_{\text{弹性碰撞}} + \sigma_{\text{激发}} + \sigma_{\text{电离}} \quad (1.1-7)$$

以上讨论的是电子与气体粒子发生碰撞的过程。现再讨论粒子碰撞的一般情况。设有两种不带电的粒子A和B, 其运动服从麦克斯韦速度分布定律, 可导出A粒子的平均自由程为 $\bar{\lambda} = 1/n\pi(r_1+r_2)^2 \cdot (1+v_2^2/v_1^2)^{1/2}$ 其中粒子A具有半径 r_1 , 平均动能为 $\bar{E}_1 = \frac{1}{2}m_1v_1^2$, 粒

子B半径为 r_2 , 平均动能为 $\bar{E}_2 = \frac{1}{2}m_2v_2^2$; 粒子B的密度为 n_B , 粒子A的密度 $n_A \ll n_B$, 故总的粒子密度 $n \approx n_B$ 。

若考虑同种粒子的相互作用, 即 $\bar{E}_1 = \bar{E}_2$ 、 $r_1 = r_2$, 则平均自由程为

$$\bar{\lambda} = 1/4\sqrt{2}n\pi r^2 = 1/\sqrt{2}n\pi d^2 \quad (1.1-8)$$

式中 d 为粒子的直径, 它相当于原子或分子外电子壳层的直径, 如氧原子直径 d 是 3×10^{-8} 厘米。

由于碰撞不是简单的刚性球碰撞, 而是一个很复杂的过程, 所以各类碰撞截面与粒子的种类及碰撞时的速度(或能量)有关。碰撞截面或碰撞几率随粒子能量的变化关系系统称为碰撞截面函数或分别称为激发函数、电离函数等。实验测得一些气体的碰撞截面与碰撞函数示于图1.1-1中。为便于比较, 图中还给出了He、Ne、Ar和Xe的气体动力学截面以及相应于截面大小的平均自由程长度。不难看出, 两种 $\text{He}^* + \text{Ne}$ (带·号的表示亚稳态、Ne不带花表示基态)共振转移截面比起He和Ne的动力学截面(即弹性碰撞截面)小, 其中 $\text{He}^*(2^3S_1) + \text{Ne}$ 的截面比He或Ne的动力学截面小一个数量级, 而 $\text{He}^*(2^1S_0) + \text{Ne}$ 的截面又稍小一些。

某些原子和分子的平均自由程及其碰撞截面列于表1-1。

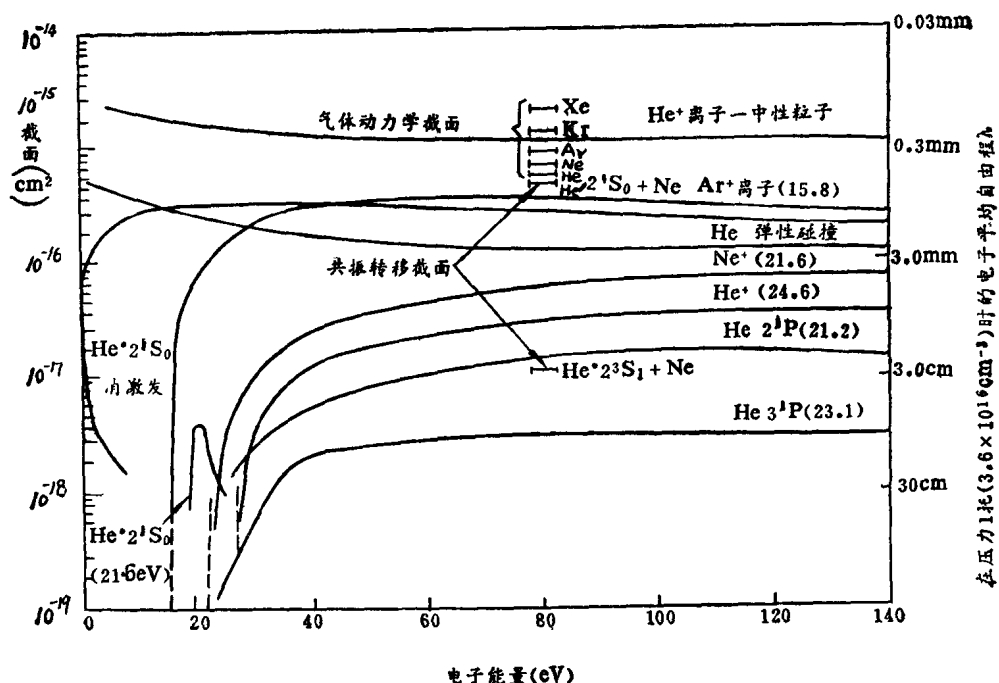


图1.1—1 各类非弹性碰撞截面与电离、激发函数和气体动力学截面的比较

表1—1 气压1托和温度273K时粒子在同种气体中的平均自由程与截面

气 体	He	Ne	Ar	Kr	Xe	N ₂	O ₂	Hg
$\bar{\lambda}$ (10 ⁻⁸ 厘米)	17.6	12	8.1	6.6	5.6	6.7	7	≈3
σ (10 ⁻¹⁶ 厘米 ²)	2.9	4.3	6.3	7.7	9.5	7.6	7.3	≈17

表1—1表明稀有气体在气压1托和温度273 K时的碰撞截面可近似取 3×10^{-16} 厘米² ~ 10×10^{-16} 厘米²，两种分子气体N₂和O₂的碰撞截面约为 7×10^{-16} 厘米²。下面介绍有关描述碰撞的概念。

碰撞频度 其定义是每个粒子每秒钟产生的碰撞次数，可由下式给出

$$v_c = v_r / \lambda \quad (1.1-9)$$

式中 v_r 为粒子的乱向速度。

对于一个原子或分子在同类气体中碰撞，每秒碰撞次数 r_c 可由等式 (1.1—8) 和 (1.1—9) 得到，即

$$v_c = 4\sqrt{2} \cdot n \cdot \sigma v_r \quad (1.1-10)$$

在气压1托和温度273K时，一个O₂分子的 v_c 近似为 6×10^6 秒⁻¹。一个电子在气体中的碰撞频度 v_e ，可由等式 (1.1—9) 和 (1.1—6) 得到

$$v_e = n \sigma_e v_e \quad (1.1-11)$$

式中 n 是原子或分子的密度， v_e 是电子的乱向速度。每秒钟所有电子的碰撞次数 Σv_e 为

$$\Sigma v_e = n_e \cdot n \cdot \sigma_e \cdot v_e \quad (1.1-12)$$

电子的碰撞频度计算不如原子或分子的碰撞频度容易，因为 σ_e 取决于电子的速度。

电离效率 电子电离效率 η_i 的定义是一个电子在气压1托和温度273K的气体中运动、经过每厘米路程产生离子对的数目。它与一个原子或分子电离的几率有以下关系

$$\eta_i = f_i / \lambda_e \quad (1.1-13)$$

由于 $\lambda_e = 1/n\sigma_e$, f_i 应为电离分子有效截面对电子总有效截面 σ_e 之比, 因此, 可得到

$$\eta_i = n\sigma_i = Q_i \quad (1.1-14)$$

Q_i 与电子能量的关系一般由实验测定, 其结果示于图1.1—2。

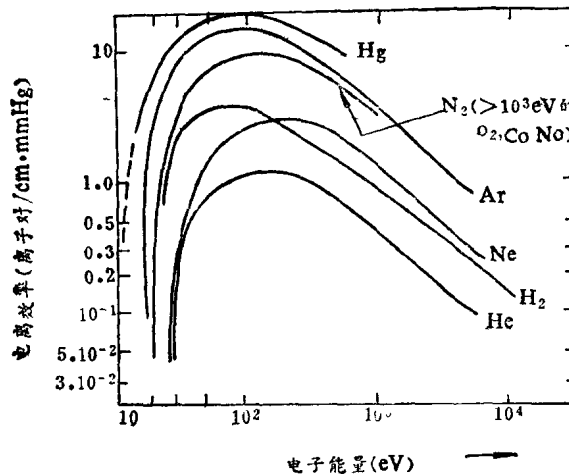


图1.1—2 电子电离有效截面与电子能量的关系
(气压1托和温度300K)

在气体激光器中, 外加电场主要是通过电子向气体输送能量的。电子通过气体之后, 其能量或速度怎样分布显然是十分重要的问题。否则就无法确定电离或激发的程度。故应对电子速度与能量的分布作必要的探讨。

(二) 电子速度与能量分布

若乱向运动着的粒子, 彼此间相互作用很强烈, 则在热平衡时应具有一定的, 且仅与粒子的平均能量和质量有关的速度分布。由于在平衡条件下能量是常数, 与粒子质量无关, 仅随温度变化。因此, 能量分布只取决于绝对温度。玻耳兹曼指出, 当粒子进行大量刚球弹性碰撞而处于热平衡时, 只能存在一个特征分布。这个分布的平均或最可几值是相同的, 只是平均值随温度移动。麦克斯韦在研究粒子统计系统时也得到了相同的结果。粒子只能存在一个特征分布的结论就是麦克斯韦——玻耳兹曼分布定律, 这种分布又称为麦克斯韦分布 (见图1.1—3)。

温度为 T 的气体中, 分子的麦克斯韦分布 $nf(v)dv$ 由下式给出:

$$dn/n = (4/\pi^{1/2})x^2 e^{-x^2} \cdot dx \quad (1.1-15)$$

式中 $x = v/v_m$, dn/n 是速度在 $v \sim v + dv$ 范围内的分子比例, 最可几速度 v_m 是分布的最大值, 其中 $mv_m^2/2 = kT$, 因此 $v_m = (2kT/m)^{1/2}$ 。均方根($r.m.s$)速度为

$$(\overline{v^2})^{1/2} = (3kT/m)^{1/2} = 1.22v_m \quad (1.1-16)$$

平均速度 $\bar{v}$ 为