

高等学校教材

激光器件

(修订本)

蔡伯荣 主编



湖南科学技术出版社

高等学校教材
激 光 器 件

(修订本)

蔡伯荣 主编

责任编辑：周翰宗

*

湖南科学技术出版社出版发行

(长沙市展览馆路8号)

湖南省新华书店经销 湖南省新华印刷二厂印刷

*

1981年4月第1版 1983年2月第2版第4次印刷

开本：787×1092毫米 1/16 印张：19.5 字数：482,000

印数：10,301—13,500

ISBN 7-5357-0277-5

TN·9 定价：4.30元

湘科 87-11

内 容 简 介

本书是光电子技术专业课教材，共三篇，系统地介绍目前比较成熟，在国民经济中有实际应用的气体激光器（主要是 CO_2 激光器、He-Ne激光器、Ar离子激光器和He-Cd激光器），固体激光器（主要是Nd-YAG激光器，红宝石激光器和铌玻璃激光器），半导体激光器（主要是GaAs-GaAlAs异质结激光器和InGaAsP-InP异质结激光器）和染料激光器（主要是脉冲激光器）。其目的是希望就这些常用激光器的基本结构、工作原理、输出特性和主要参数，尽可能给读者一些较为系统和详细的知识，以便为设计、制作和应用这些器件打下必要的基础。

本书主要作为高等院校工科电子类光电子技术专业本科《激光器件》课程的教材。也可供相近专业的师生和从事激光器件或激光技术工作的有关人员参考。

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工科电子类专业课教材的编审、出版的组织工作。从一九七七年底到一九八二年初,由于各有关院校,特别是参与编审工作的广大教师的努力和有关出版社的紧密配合,共编审出版了教材159种。

为了使工科电子类专业教材能更好地适应社会主义现代化建设培养人才的需要,反映国内外电子科学技术水平,达到“打好基础、精选内容、逐步更新、利于教学”的要求,在总结第一轮教材编审出版工作经验的基础上,电子工业部于一九八二年先后成立了高等学校《无线电技术与信息系统》、《电磁场与微波技术》、《电子材料与固体器件》、《电子物理与器件》、《电子机械》、《计算机与自动控制》,以及中等专业学校《电子类专业》、《电子机械类专业》等共八个教材编审委员会,作为教材工作方面的一个经常性的业务指导机构。并制定了一九八二~一九八五年教材编审出版规划,列入规划的教材,教学参考书、实验指导书等217种选题。在努力提高教材质量,适当增加教材品种的思想指导下,这一批教材的编审工作由编审委员会直接组织进行。

这一批教材的书稿,主要是从通过教学实践,师生反映较好的讲义中评选择优和从第一轮较好的教材中修编产生出来的。广大编审者,各编审委员会和有关出版社都为保证和提高教材质量作出了努力。

这一批教材,分别由电子工业出版社、国防工业出版社、上海科学技术出版社、西北电讯工程学院出版社、湖南科学技术出版社、江苏科学技术出版社、黑龙江科学技术出版社和天津科学技术出版社承担出版工作。

限于水平和经验,这一批教材的编审出版工作肯定还会有许多缺点和不足之处,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

再 版 前 言

本书系工科电子类第一轮《激光器件》的修订教材。经《电子物理与器件》教材编审委员会《激光与红外》编审组审定，并推荐再版。

该教材由成都电讯工程学院蔡伯荣担任主编，西北电讯工程学院过己吉担任主审。编审者均依据《激光与红外》编审组审定的修编大纲进行修编和审阅的。

激光器件的种类繁多，有气体激光器、固体激光器、半导体激光器、染料激光器、化学激光器和自由电子激光器等，为了便于读者重点了解和掌握比较成熟，又有广泛应用的几类激光器的基本结构工作原理，输出特性、主要参数和器件设计的初步知识，再版时，删去了原书中第四篇内除染料激光器外的其它几种特殊激光器，并将全书改编成三篇：第一篇气体激光器—主要介绍 CO_2 激光器、He-Ne激光器、Ar离子激光器和He-Cd激光器；第二篇固体激光器—主要介绍Nd-YAG激光器，红宝石激光器和铍玻璃激光器；第三篇半导体激光器和染料激光器—重点介绍GaAs-GaAlAs异质结激光器、InGaAsP-InP异质结激光器和脉冲染料激光器。各篇的内容在原书基础上作了较大精减，部分内容进行了修改或补充，并对原书中出现的个别错误或不妥之处作了修正。

本课程的参考学时数为80学时，不包括器件工艺和实验测试技术的内容。这些内容放在有关的生产实习和“激光实验方法”课中进行为宜。此外，为了培养学生独立思考和解决问题的能力，可按各篇章安排适当的练习题和思考题，题目可从新编“激光习题集”上选用。由于本书各篇内容有相对独立性，各院校可从教学实际出发，有所侧重，恰当取舍。

本修编教材中第一篇的第一、三章由王瑞峰（成电）执笔；第二、四章由程泽东（成电）执笔。第二篇的第一、二、四、五章由刘敬海（北京工业学院）执笔；第六章由魏光辉（北工）执笔；第三章由冯龙岭（北工）执笔。第三篇的第一、二、三章由蔡伯荣（成电）执笔；第四、五、六章由张国威（北工）执笔。全书由蔡伯荣统编。

参加审阅的还有安毓英、石顺祥同志（西电）并对该教材提出过许多宝贵的意见。修编过程中清华大学，华中工学院、哈尔滨工业大学、南京工学院和天津大学等兄弟院校的同志们也提出过不少宝贵的意见或建议。在此一并表示诚挚的感谢！

由于编者水平有限，再版中难免还有某些缺点和错误，殷切希望广大读者批评指正。

编 者

一九八四年五月

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 气体放电现象 (3)

一、放电的形式 (3)

二、辉光放电的光区分布 (4)

三、着火电压 (5)

四、阴极溅射 (6)

§ 1.1—2 气体放电的基本过程 (7)

一、粒子碰撞的基本规律 (7)

二、气体放电中的激发过程 (9)

三、带电粒子在气体中的运动 (11)

§ 1.1—3 正柱区的理论分析 (12)

一、带电粒子的浓度分布 (13)

二、电子温度 (13)

第二章 原子激光器 (17)

§ 1.2—1 氦-氖激光器的工作原理 (18)

一、激发机理 (18)

二、激光上、下能级粒子数和增益 (20)

三、增益线型和增益饱和 (22)

§ 1.2—2 氦-氖激光器的输出功率 (24)

一、输出功率公式 (24)

二、最佳充气情况和最佳放电电流 (26)

三、透过率和损耗对输出功率的影响 (30)

四、谱线竞争效应对输出功率的影响 (30)

§ 1.2—3 模式和发散角 (32)

一、横模 (32)

二、单横模运转 (33)

三、多模振荡带宽 (34)

四、单纵模运转 (35)

五、发散角 (36)

六、远场发散角和光斑尺寸的测量 (37)

§ 1.2—4 氦-氖激光器的设计 (40)

一、主要几何尺寸的确定 (40)

二、激光器的结构设计 (45)

§ 1.2—5 氦-氖激光器的放电特性与 电源 (46)

§ 1.2—6 其它原子激光器简介 (48)

第三章 分子激光器 (50)

§ 1.3—1 普通CO₂激光器的工作 原理 (51)

一、CO₂分子的振-转能级和光谱 (51)

二、能级寿命和弛豫过程 (54)

三、激发过程 (56)

§ 1.3—2 普通CO₂激光器的工作特性 (58)

一、增益系数和饱和强度 (58)

二、输出功率 (62)

三、输出激光频谱和转动竞争效应 (66)

四、器件寿命 (67)

§ 1.3—3 器件设计 (68)

一、基模激光器的设计 (68)

二、多模激光器设计原则 (70)

§ 1.3—4 波导二氧化碳激光器 (70)

一、波导激光器的主要特点 (71)

二、光在空心介质波导中的传播 (71)

三、波导谐振腔 (72)

四、频率调谐宽度 (73)

五、冷却问题 (74)

六、射频激励CO₂波导激光器 (74)

§ 1.3—5 横向激励大气压CO₂激光器 (75)

一、单放电方法 (76)

二、双放电的方法(预电离技术) (76)

三、电子束控制放电方法 (77)

§ 1.3—6 氮分子激光器 (78)

一、工作原理 (78)

二、器件结构	(79)
§ 1.3—7 准分子激光器	(81)
一、快放电激励XeF ⁺ 激光器	(82)
二、电子束激励XeF ⁺ 激光器	(86)
第四章 离子激光器	(88)
§ 1.4—1 氦离子激光器	(88)

一、激发机理	(88)
二、激光器结构	(90)
三、工作特性	(91)
§ 1.4—2 氦-铜离子激光器	(94)
一、工作原理	(94)
二、激光器结构	(96)
三、正柱区He-Cd激光器的工作特性	(97)
主要参考资料	(98)

第二篇 固体激光器

概述	(99)
第一章 固体激光器的基本结构和输出特性	(100)
§ 2.1—1 固体激光器的基本结构及能量转换	(100)
§ 2.1—2 固体激光器的阈值	(102)
一、固体激光器的损耗	(102)
二、固体激光器的阈值	(103)
§ 2.1—3 输出能量(或功率)、效率和最佳透过率	(106)
一、输出能量(或功率)和效率	(106)
二、最佳透过率	(109)
§ 2.1—4 固体激光器输出的稳定性、光谱特性、偏振特性和方向性	(110)
一、固体激光输出的稳定性	(110)
二、光谱特性	(112)
三、激光束的方向性	(114)
四、激光的偏振特性	(114)

第二章 固体工作物质	(115)
§ 2.2—1 基本概念及要求	(115)
一、对工作物质的要求	(115)
二、激活离子和基质	(116)
三、掺杂浓度	(117)
四、双掺与敏化	(117)
五、工作物质的劣化	(117)
六、工作物质的破坏	(118)
七、激光棒的几何尺寸及加工要求	(119)
§ 2.2—2 红宝石	(120)
一、红宝石晶体的结构及其理化性质	(120)
二、能级结构与光谱特性	(120)

三、温度对红宝石性能的影响	(122)
§ 2.2—3 掺钕钇铝石榴石(Nd ³⁺ :YAG)	(124)
§ 2.2—4 钕玻璃	(127)
§ 2.2—5 其它固体工作物质	(129)
§ 2.2—6 固体工作物质的质量及其检验	(130)
一、光学均匀性	(130)
二、散射颗粒及其检验方法	(131)
三、消光比	(132)
四、工作物质的内部损耗系数	(134)
第三章 泵浦光源	(135)

§ 2.3—1 基本要求及主要的泵浦光源	(135)
一、惰性气体放电灯	(135)
二、金属蒸气放电灯	(136)
三、白炽灯	(136)
四、半导体光泵	(136)
五、日光泵	(136)
§ 2.3—2 气体灯的放电过程	(137)
§ 2.3—3 气体灯的输出特性及效率	(138)
一、脉冲灯的光辐射输出波形及电光转换效率	(138)
二、气体灯的输出光谱	(139)
三、影响气体灯输出的主要因素	(139)
§ 2.3—4 气体灯的技术参数与工作寿命	(143)
§ 2.3—5 气体灯的触发与预燃	(146)
§ 2.3—6 气体灯的电学性质及其放电回路	(148)
一、电学性质	(148)

二、气体灯的放电回路	(148)
§ 2.3—7 储能电容的充电回路和连续弧光灯电源	(153)
第四章 冷却、滤光及聚光系统	(159)
§ 2.4—1 冷却与滤光	(159)
一、冷却	(159)
二、滤光	(161)
§ 2.4—2 聚光器	(162)
一、泵浦方式及聚光器类型	(162)
二、聚光器材料的选择	(165)
三、聚光器反射表面的选择	(165)
四、聚光效率	(166)
五、泵浦光在激光棒内的分布	(170)
六、聚光器结构设计的一些考虑	(172)
第五章 工作物质的热效应	(174)
§ 2.5—1 连续激光器的热效应	(174)
一、激光棒内的温度分布	(174)
二、激光棒中的热应力及热应变	(176)
三、激光棒的热致双折射	(177)
四、激光棒的热透镜效应	(180)
五、热焦距的测量	(183)
§ 2.5—2 单次和重复率脉冲激光器	

的热效应	(184)
一、单次工作方式	(184)
二、重复率脉冲工作方式	(187)
§ 2.5—3 热效应的消除及补偿措施	(188)
一、光学补偿法	(188)
二、采用非圆柱工作物质	(188)

第六章 谐振腔参数的选择	(190)
§ 2.6—1 谐振腔腔模参数关系的一般描述	(190)
§ 2.6—2 腔内有一个透镜的谐振腔	(193)
§ 2.6—3 腔内含有两个透镜的谐振腔	(199)
一、G参数与稳定性	(199)
二、望远镜谐振腔的光束参数	(201)
三、望远镜谐振腔的热不灵敏条件	(203)
§ 2.6—4 激光束在类透镜介质中的传播	(204)
一、类透镜介质对光线的变换	(204)
二、类透镜介质对激光束的变换	(206)
§ 2.6—5 固体激光器的横模选择	(208)
一、孔径选模	(208)
二、非稳腔选模	(210)
主要参考资料	(211)

第三篇 半导体激光器和染料激光器

概述	(213)
第一章 半导体激光器原理	(215)
§ 3.1—1 半导体p-n结及其能带结构	(215)
§ 3.1—2 载流子注入与复合	(219)
§ 3.1—3 半导体的光增益	(221)
§ 3.1—4 注入式激光器振荡条件	(224)
第二章 半导体激光器的特性	(228)
§ 3.2—1 阈值性质	(228)
一、阈值电流密度的测量	(228)
二、阈值电流密度与波长和反射率的关系	(230)
三、温度和结构对阈值电流密度的影响	(230)
§ 3.2—2 输出功率与转换效率	(232)
§ 3.2—3 光谱特性与光束发散角	(234)

§ 3.2—4 热学性质	(238)
§ 3.2—5 器件寿命	(239)
第三章 半导体异质结激光器	(241)
§ 3.3—1 异质结、能带及其作用	(241)
§ 3.3—2 短波长双异质结激光器	(245)
一、器件结构	(245)
二、阈值电流	(249)
三、室温连续工作条件	(251)
四、振荡模式	(252)
五、器件寿命	(258)
§ 3.3—3 长波长双异质结激光器	(260)
一、 $\text{Ga}_x\text{In}_{1-x}\text{As}_y\text{P}_{1-y}/\text{InP}$ 长波长激光器	(260)
二、其它长波长激光器	(263)

§ 3.3.4 分布反馈式半导体激光器	(263)	§ 3.5—3 选频、调谐与谱线压窄技术	(283)
一、DFB激光器	(263)	§ 3.5—4 闪光灯泵浦的染料激光器	(290)
二、DBR激光器	(266)		
第四章 染料激光器的工作原理	(268)	第六章 连续波染料激光器	(292)
§ 3.4—1 激光染料的结构及其性质	(268)	§ 3.6—1 连续波染料激光器的阈值条件与增益	(293)
§ 3.4—2 染料的能级图与光谱特性	(271)	一、阈值条件	(293)
§ 3.4—3 染料激光的速率方程	(273)	二、染料的透过与增益分析	(295)
§ 3.4—4 染料激光的泵浦	(275)	§ 3.6—2 连续波染料激光器的腔型分析	(296)
第五章 脉冲染料激光器	(278)	§ 3.6—3 行波环形腔染料激光器	(299)
§ 3.5—1 激光泵浦的脉冲染料激光器组成和工作原理	(278)	主要参考资料	(301)
§ 3.5—2 脉冲染料激光器的振荡条件与增益	(280)		

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,以氟化氩(ArF)、氟化氙(XeF)准分子气体为典型代表,其输出波长分别为1930埃和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:首先是寻求新型实用的,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CO₂气体激光器,输出10.6微米激光,效率20%左右,寿命可高达2~3万小时。He-Ne气体激光器输出的0.6328埃激光,单色性最佳、可达 6×10^{-16} 量级、寿命最高可达10万小时以上。Ar⁺激光器输出激光波长常为4880埃和5145埃。此外,还要求这些器件小型化。如小型封离式N₂激光器,器件全长几毫米,充一个大气压,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CO₂激光器的充气压强为几百托时,最小长度已作到只有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,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量输出。HgBr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CO₂激光器,输出波长9.4~11.3微米,最高脉冲功率可达 10^{12} 瓦。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。最近发展起来的辉光放电电子束激励金属蒸汽离子激光器和准分子激光器,都是很有希望的高功率可见光和紫外激光器,两者的总效率均为百分之几,其中He-Zn⁺离子激光器

已能在可见光（波长为4911.6埃）范围得到1.2瓦的连续输出。

气体激光器发展很快，种类繁多，限于篇幅，不可能一一介绍，本篇仅择其中常见且具代表性的激光器，就其原理、特性和设计的基本知识作必要的探讨和介绍。

第一章 气体激光器放电激励的基本原理

气体激光器的泵浦能源可以是光能、核能、热能、化学能或气体放电。其中以气体放电进行激励最为普遍，实用激光器的绝大多数就是用这种方法激励的。这是因为气体放电激发设备比较简单，能量转换效率较高，从而使得激光器可以做得比较紧凑和小型化。为了便于了解气体放电激发产生激光的工作原理和工作特性，在叙述气体激光器之前，有必要先介绍有关气体放电的一些基本知识。

§ 1.1—1 气体放电现象

一、放电的形式

冷阴极充气二极管的典型伏-安特性与实验电路如图1.1—1所示。图中的特性曲线也称作全伏-安特性曲线，意即此曲线包括了多种放电形式，兹对其分段讨论如后。

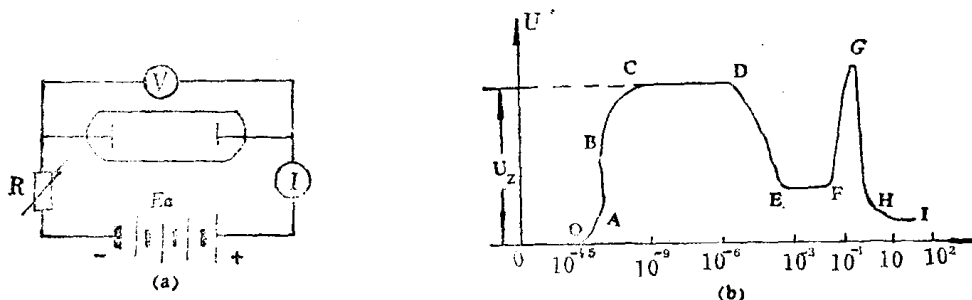


图1.1—1 气体放电管的伏-安特性
(a) 实验管与电路 (b) 伏-安特性曲线

伏-安特性曲线的OAB段所对应的放电形式称为被激导电。众所周知，在平常情况下气体是很好的绝缘体，每单位体积中一般只有几个到几百个带电的粒子和电子，其值决定于外界对气体的影响，如X射线、 γ 射线、紫外线、宇宙射线等在气体中辐射引起的电离，这些因素在气体放电中称为催离剂。当放电管两端电极上的电压从零开始增大时，由于此时电压还低，外因引起的电子通过气体时尚不能产生电离碰撞，当外电压逐渐升高时，电子能全部到达阳极而呈现电流饱和现象。

伏-安特性曲线的BCD段所对应的放电称为繁流放电。随着外加电压的升高，少量电子在电场中能积聚较大能量而引起气体的电离。当电场足够强时，电离出来的新电子又可产生电离作用，同时产生出来的正离子碰撞阴极也会发射出二次电子。如此连锁进行，电离呈现“巨浪”式的增长，导致电流急剧上升。以上两种放电主要取决于外因是否存在，如外因一旦去除放电立即停止，故称非自持放电。

伏-安特性曲线的DE段对应着非自持放电到自持放电的转换过程，也就是通常所说的放

电“着火”。在此过程中放电管呈现出负阻特性。若外电路没有串联电阻来限流，电流就会一直增加，直至烧毁放电管。这在使用时是必须注意的。“着火”时的电压称为着火电压。

伏-安特性曲线的EF段所对应的放电就是辉光放电。所谓辉光放电就是一种放电电流密度比较小的自持放电。此时，阴极附近存在较大的电位降（几百伏），维持放电全靠放电本身的作用，即去除外界催离剂的作用时放电仍能继续进行，故称自持放电。放电的电流范围随阴极有效面积的增大而增大。辉光放电时管内发出明暗交替的柔和辉光，当极间距离不是太小时，主要的发光区是正柱区，也叫等离子区，He-Ne、CO₂等气体激光器大都是利用这个区域工作的。

伏-安特性曲线的FG段所对应的放电称为反常辉光放电。反常辉光放电时，阴极发生很强烈的溅射，一般应防止放电管在此状态下工作。

伏-安特性曲线的GH段所对应的放电称为弧光放电，弧光放电与辉光放电的情况刚好相反，它的放电电流很大（辉光放电电流强度为几十到几百毫安量级，而弧光放电则至少大于1安培），而阴极位降却很低（几十伏）。阴极和气体温度炽热，发射出强烈白光辐射。在气体激光器中有一些离子激光器，如氩离子激光器，氦离子激光器等，它们要求在弧光放电的条件下进行工作。

以上对伏-安特性曲线几种主要放电形式的介绍是不全面的，还有另外一些放电形式也一并简介如下。

高频放电：这是一种在高频电场或磁场作用下的气体放电。它与低频交流放电和直流放电相比有很大的区别。高频放电可以是内电极，也可以是外电极，甚至可以是无电极的。由于电子在高频场（频率在30~100兆周）的作用下，不断来回运动，故与气体粒子的碰撞次数大为增加，其电离能力也大大加强，使得用以维持放电所需要的电压比较低，因此气体的分解和吸收现象也比较弱，这一点对提高小型封离激光器的输出功率和延长工作寿命有很大的意义。

火花放电：在气体压强很高（1个大气压以上），电极间电场分布较均匀，而且电源功率不够大的情况下，将发生火花放电。火花放电也是自持放电，此时放电沿着曲折分支的通道流过气体，这些通道很细，放电时出现火花并发出噼啪之声，所以叫做火花放电。

脉冲放电：在放电管两电极上施加脉冲电压而产生的放电称为脉冲放电，其着火电压高于直流放电，二者之间有如下关系：

$$V'_s = \delta V_s$$

式中 V'_s 为脉冲着火电压； V_s 为直流着火电压； δ 为与脉冲持续时间及前沿陡度有关的脉冲系数。

二、辉光放电的光区分布

辉光放电是一种高电压、小电流的放电。放电靠正离子轰击阴极发射二次电子来维持（称 γ 过程）。放电管着火以后，可以看到管内充满辉光，只要极间距离不是太短，一般都有八个区域（见图1.1—2）

① **阿斯登暗区：**紧靠阴极表面厚度约1毫米的一层不发光区。从阴极发射出的电子在电场加速下向阳极运动。其初始能量很小（约1电子伏），虽经阿斯登暗区的加速也只能达到5~10电子伏，不足以激发气体。但又没有机会与正离子复合，因为靠近阴极表面处的正离子

的数目不多，故在此区间原子不发光而形成一个很薄的暗区。

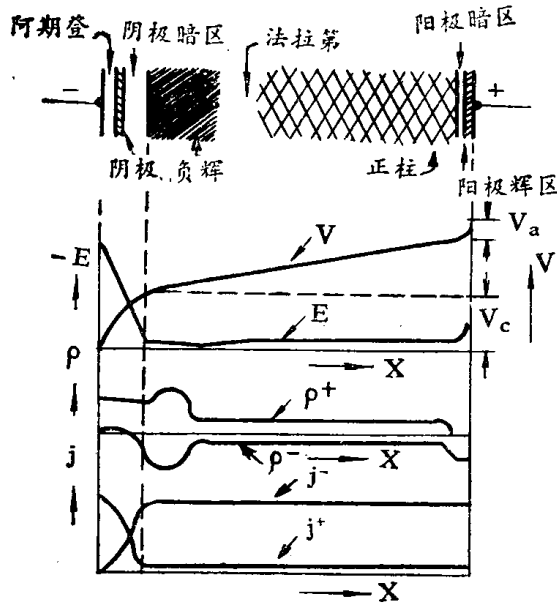


图1.1—2 正常辉光放电的光区、电位 V 、电荷密度 S 、电场强度 E 及电流密度 j 的空间分布 (V_c —阴极位降)

② **阴极辉区**：紧邻阿斯顿暗区的一个发光层。发光很微弱，跟右面阴极暗区的界线不甚明显。在这层辉区里，电子能量尚小，只能把原子激发到较低的激发态，但此能量对低能级的激发几率却较大，所以在这个区域里，能观察到激发能较小能级的谱线。

③ **阴极暗区**：此暗区是相对右面的负辉区而言的，但较之阿斯顿暗区则要亮一些。它与负辉区的界限很明显。实验表明其宽度与气压 P 的乘积是一常数。在此区域中，电子从电场获得更大的能量，甚至超过了激发函数极大值处的能量，致使激发几率下降，激发数目减少，因而发光减弱。但电子电离的几率却增大了。所以，从这里开始，电子可以繁流。由于正离子向阴极迁移的速度远小于电子向阳极迁移的速度，故在暗区里积累了很强的空间正电荷，这样便产生很大的电位降落从而出现了“阴极位降”区。

④ **负辉区**：这是阴极暗区右面最明亮的一个区域。进入负辉区的电子主要是由阴极发射后直接穿过暗区，未经碰撞而进入负辉区的，数量不大的快速电子，与数量较大的慢速电子组成。后者的电离能力很小，但对原子的激发几率却很大，因而使负辉区发出强烈的光辉。随着距离的增加，电子能量逐渐消耗，发光强度亦随之逐渐减弱。

⑤ **法拉第暗区**：这一暗区与正柱区有明显的界限，但与负辉区的界限则较模糊。这主要是由于电子在负辉区能量消耗殆尽，没有能量再去激发原子发光，故在此又形成了一个暗区。

⑥ **正柱区**：这是一个很长的发光区。电子经过法拉第暗区之后，受到电场加速而重新获得能量，当其进入正柱区时，又有了足够的能量去激发和电离原子。在此区域里电子密度和正离子密度几乎相等。由于电子的密度很高 (约 $10^{10} \sim 10^{12}/\text{厘米}^3$)，且迁移率也高，故这一区域具有良好的导电性能。

最后两个区为阳极暗区与阳极辉区，这是两个无关紧要的光区，它们是否出现与外电路电流强度、阳极形状及面积有关，故不再赘述。

三、着火电压

巴邢首先发现，在其它条件不变时，着火电压 V_s 不仅单独和压强或极间距离 d 有关，而且直接与 pd 乘积有关。尽管两个放电管的 p 和 d 各不相等，但若 pd 乘积相等则着火电压 V_s 相同。即 V_s 是 pd 乘积的函数，这个关系就称为巴邢定律。

$$V_s = f(pd)$$

(1.1—1)

V_s 与 pd 关系曲线如图1.1—3所示。曲线的特征是随 pd 变化有一最小着火电压 V_{smin} 。当 pd 小于 $(pd)_{min}$ 时 V_s 急剧上升；在 (pd) 大于 $(pd)_{min}$ 时， V_s 的增长较缓慢。前者那段曲线称为巴邢曲线左支，后者这段曲线则称为巴邢曲线右支。对巴邢曲线可解释如下。

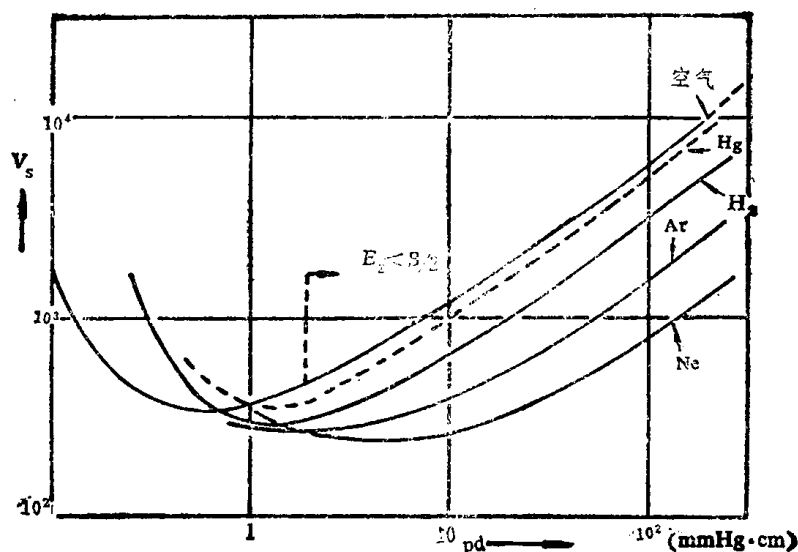


图1.1-3 巴邢曲线

当 pd 由小变大时，影响电离的因素有二：其一是电子与气体粒子总的碰撞次数增加，这通常有利于放电；其二是电子在每个自由程中所获得的能量减小，这一般又不利于放电。故着火电压 V_s 与 pd 关系就取决于上述两因素的对比。如果 pd 偏小，则电子从阴极到阳极的路程中的碰撞次数不多，要使放电着火就必须加大电场强度，使电子能量增加，从而提高电离几率以产生足够的电离碰撞次数，此时 V_s 就要升高。反之，若 pd 偏大，总的碰撞次数虽多，但由于电子具有的能量很小，因而总的电离碰撞次数并不多。为了提高电子能量，以使电离几率加大，同样必须加大外加电压，因而这时着火电压也将升高。由此可知， pd 偏小或偏大都会使电离效果变差，总的电离碰撞次数减少，仅当 pd 值等于 $(pd)_{min}$ 时，其碰撞次数适中，电离效果最好，电离碰撞次数最多，从而着火电压最低。除 pd 值外，还有某些因素也能影响 V_s 。例如若气体中混合有亚稳态原子气体，且其亚稳态能量大于基本气体的电离电位，则混合气体的着火电压就比纯气体低。又如当氖或氦气中含有少量的氩或汞蒸汽时， V_s 就会降低；如果混入的气体会降低基本气体原子亚稳态寿命，那末混合气体着火电压将升高（如在含汞或含氩的惰性气体中混入少量氮气，着火电压也会显著地增大）。此外，空间电荷、电极材料和表面情况，空间电场分布，以及外电离源的强弱都会影响着火电压。

四、阴极溅射

阴极溅射是辉光放电的固有特征，凡是放电所及的阴极表面都发生溅射现象。若阴极表面上的电流密度分布不均匀而局部严重发热，或由于局部电场强度很大，受正离子剧烈的轰击，都会使阴极溅射变得严重。从阴极溅射出来的物质会向四面飞散，致使放电管及其光学元件，如布氏窗片和共振腔反射镜受到污染，降低光学质量，增加了共振腔内的光学损失，而且也增加了对气体的吸收和吸附，使工作气体比例和气压发生变化，偏离正常的最佳工作条件。所以，阴极溅射现象对气体激光器的寿命有相当严重的影响。因此，在制造激光器时必须考虑尽量降低阴极溅射。

从气体放电的研究中可观察到阴极溅射的规律如下：

1. 在其它条件相同时，气压越高阴极溅射就越小。
2. 轰击阴极的离子质量越大，阴极溅射就越厉害。

3. 当阴极位降的值等于或接近正常阴极位降时, 阴极溅射不严重, 只有经过很长时间(几百小时)的放电以后才显示出来; 当阴极位降不断增加时, 阴极溅射也越来越厉害。

4. 放电管内电流密度越大, 阴极溅射就越厉害, 溅射量大致正比于电流密度的平方。

5. 不同的金属材料, 其溅射的效应不同。几种常用的阴极材料按溅射效应由弱到强的顺序排列如下:

钽→镁→铝→铁→钼→镍→铂→铜→金→银。

为了减少阴极溅射对气体激光器寿命的影响, 必须选择溅射效应小的材料做阴极, 电极尺寸也要选择适当, 以避免电极上电流密度分布不均匀和负载过大。此外, 使用时也应注意控制工作条件, 特别要防止其放电过渡到反常辉光放电区域。

§ 1.1—2 气体放电的基本过程

一、粒子碰撞的基本规律

1. 碰撞的类型 电子和离子在气体中运动时, 不断与气体粒子发生碰撞, 而气体粒子间也不断地相互碰撞, 从而发生各种方式的能量传递、动量变化、电荷转移等诸过程。故根据能量、动量、电荷等物理量的变化, 可将碰撞分为如下两大类。

弹性碰撞: 即粒子在碰撞中只交换动量和动能, 亦即在碰撞前后粒子的结构不变或内能不变。一般情况下, 气体放电中发生的碰撞大多属弹性碰撞, 因而弹性碰撞具有普遍的重要性。根据动量和能量守恒定律, 可以求出质量为 m_1 的粒子在碰撞过程中传递给质量为 m_2 粒子的动能比例为:

$$\Delta = E_2/E_1 = \frac{4m_1m_2}{(m_1+m_2)^2} \cos^2\theta \quad (1.1-2)$$

式中 E_1 、 E_2 分别表示粒子 m_1 与 m_2 的动能, θ 为碰撞后粒子 m_2 的运动方向与粒子 m_1 碰撞前的运动方向的夹角。显然 $\theta=0$ 时为对心碰撞, 此时能量交换为最大:

$$\Delta_{\max} = 4m_1m_2/(m_1+m_2)^2$$

若粒子 m_1 为电子, m_2 为原子, 则 $\Delta_{\max} \approx 4m_1/m_2 \ll 1$, 可见电子在弹性碰撞中, 所失去的能量是微不足道的, 即其速度大小几乎不变, 仅改变运动方向; 反之, 若入射粒子 m_1 为快速原子则 $\Delta_{\max} \approx 1$ 。可见原子在弹性碰撞中可失去全部能量。这就说明了在辉光放电的等离子区中, 为什么电子能量比离子和中性气体粒子的能量高得多的原因。

非弹性碰撞: 碰撞粒子既交换动能又交换内能的碰撞为非弹性碰撞, 故粒子的结构要发生变化, 如电离、激发等。非弹性碰撞也可以通过能量守恒方程求出粒子动能转化为内能的比例

$$\Delta_{\max} = \Delta E_{\max} / \frac{1}{2} m_1 v_0^2 = m_2 / (m_1 + m_2)$$

式中, $\Delta E_{\max}$ 为碰撞粒子 m_1 将动能转化为粒子 m_2 内能的最大值, v_0 为 m_1 粒子碰撞前的速度。由上式可看出 $\Delta_{\max}$ 与粒子本身的速度大小无关, 仅与质量有关。如: 当

$$m_1 \ll m_2 \text{ 时 } \Delta_{\max} \approx 1; \quad m_1 \approx m_2 \text{ 时, } \Delta_{\max} \approx 1/2; \quad m_1 \gg m_2 \text{ 时, } \Delta_{\max} \approx 0$$

可见电子在非弹性碰撞过程中也起重要作用, 因为在此过程中它几乎能全部交出自己的动能。

非弹性碰撞分两类: 第一类是碰撞粒子将其动能转化为另一粒子的内能或位能, 第二类

是处于激发态的原子（或分子），尤其是处于亚稳态的原子，当它与电子或处于较低能级的气体原子碰撞时会使电子的速度增大，或使处于低能级的原子跃迁到较高的能级上去。

2. 碰撞截面与自由程 在气体放电中，为了定量的描述碰撞，常常用到“有效碰撞截面”的概念。兹简要介绍如下。

考虑一束速度均匀的电子通过一厚度为 dx 的气体薄层（见图1.1—4）。假定气体的有效碰撞截面为 σ （厘米²），气体密度为 n （1/厘米³），电子束在 x 处的大小为 i ，在 $x+dx$ 处的大小为 $i+di$ 。显然， di 是电子束经过 dx 厚的气体薄层之后的减少量（电子和气体碰撞所致），因此可写成：

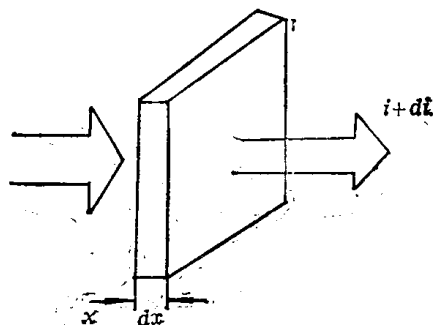


图1.1—4 电子穿过气体薄层示意图

$$-di = in\sigma dx \quad \text{或} \quad di/i = -n\sigma dx \quad (1.1-3)$$

式中， di/i 表示电子束经 dx 厚的气体薄层与粒子碰撞后，其减少量的百分比。这样 $n\sigma$ 实际上表征了单位厚度上的电子和粒子发生碰撞的程度，即单位厚度的碰撞几率。式1.1—3把粒子的有效碰撞截面 σ 和几率直接联系起来了，粒子的有效碰撞截面越大，发生碰撞的几率就越大。积分上式可得

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

式中： i_0 是 $x=0$ 处电子束的大小， i 是 x 处电子束的大小。电子束通过气体后的减少量也可以认为是由于气体吸收所致，故有

$$i = i_0 e^{-\alpha x} \quad (1.1-5)$$

式中 α 是气体对电子的吸收系数（1/厘米）。比较1.1—4与1.1—5两式可得：

$$\sigma = \alpha/n \text{ (厘米}^2\text{)} \quad (1.1-6)$$

σ 是一个微观的物理量，而吸收系数 α 是一个宏观的物理量，式1.1—6把两者联系起来了，由实验测得 α 的数值，就可以确定粒子有效碰撞截面 σ 的数值。

有效碰撞截面和粒子的平均自由程也有直接的关系，因此有时也用平均自由程来表示发生碰撞的几率。例如电子在气体中运动的有效平均自由程为 $\bar{\lambda}_e$ ，那末电子进入气体在 x 到 $x+dx$ 间距内和原子发生碰撞的几率为 $dx/\bar{\lambda}_e$ 。这个关系若用有效碰撞截面表示则为 $n\sigma dx$ 。故有：

$$dx/\bar{\lambda}_e = n\sigma dx \quad \text{或} \quad 1/\bar{\lambda}_e = n\sigma = Q \quad (1.1-7)$$

$n\sigma = Q$ 称为总有效碰撞截面（即在1立方厘米内所有该种粒子有效碰撞截面的总和）。从式1.1—7可知，电子平均自由程等于气体总有效截面的倒数。

碰撞截面这个概念并不仅只用于弹性碰撞，任何一种碰撞过程的几率都可用一个碰撞截面来表示。例如电子与某种气体原子或分子碰撞而使之电离，则可用一电离截面来表示电离几率的大小，电离截面一般用 σ_i 表示，对于激发过程则往往用 σ_{kj} 表示由第 k 能级到第 j 能级的激发截面。

若只考虑粒子受到的碰撞而不考虑其碰撞过程，则总截面为各种碰撞截面之和。即：

$$\sigma = \sum_k \sigma_k \text{ (厘米}^2\text{)} \quad Q = \sum_k Q_k \text{ (1/厘米)} \quad (1.1-8)$$

式中 σ_k 及 Q_k 分别表示任何一种可能的碰撞过程的微观截面及宏观截面。下面再介绍几个经常用到的物理量。

碰撞频度 (ν_c)：碰撞频度定义为每个粒子在单位时间内产生的碰撞次数。故有

$$\nu_c = v_r/\bar{\lambda} \text{ (1/秒)}。$$