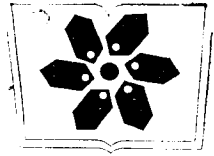


脉冲放电气体激光器

● 楼祺洪 徐捷 傅淑芬 庄斗南 陈建文 编著

科学出版社



中国科学院科学出版基金资助出版

脉冲放电气体激光器

楼祺洪 徐捷 陈建文 编著
傅淑芬 庄斗南

科学出版社

1993

(京)新登字 092 号

内 容 简 介

本书详细阐述了各种脉冲放电气体激光器的原理、工作性能及有关工艺技术,并按章节对脉冲气体激光器不同类型的器件做了专门论述。内容包括横向激励大气压(TEA)CO₂激光器、准分子激光器、金属蒸气激光器、化学激光器、光泵气体激光器、电子束控制气体激光器和氮分子激光器等。本书最后还介绍了脉冲气体激光器在各方面的应用。

本书可供从事激光研究和应用的科技工作者阅读,也可供物理、化学专业的大专院校师生参考。

脉 冲 放 电 气 体 激 光 器

楼祺洪 徐捷 陈建文 编著
傅淑芬 庄斗南

责任编辑 马长芳

科学出版社出版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码: 100717

北京怀柔黄坎印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

*

1993年12月第 一 版 开本: 850×1168 1/32

1993年12月第一次印刷 印张: 13 3/4

印数: 1—1 180 字数: 354 000

ISBN 7-03-003631-X/TM·37

定价: 15.50 元

7:7712
2

序

脉冲放电气体激光器主要包括横向放电二氧化碳激光器、准分子激光器、氮分子激光器、金属蒸气激光器、脉冲化学激光器以及光泵脉冲气体激光器等。相对于大多数连续气体激光器而言，脉冲气体激光器出现较晚。由于时间上的原因，目前国内出版的专著中，对于脉冲气体激光器仅作很简单的介绍，而对于准分子激光器、金属蒸气激光器介绍更少。本书则填补了这一空白。

激光技术经历了 30 多年的发展，书中介绍的各类脉冲放电气体激光器的发展已日趋成熟，不少已从实验室研究阶段发展到商品生产和应用阶段，它们在激光武器、激光核聚变、激光同位素分离、激光通信和测距、激光工业应用（包括激光退火、激光淀积和激光光刻等）、激光医学（包括光刀，光动力学诊治癌症等），以及科学研究中都有较大的应用潜力。为了加快这一领域的发展，充分发挥激光的特性，促进工业、农业、科学技术和军事技术水平的提高，本书的出版无疑是有益的。

由中国科学院上海光机所楼祺洪等撰写的《脉冲放电气体激光器》（其中，楼祺洪撰写第一、二、九章，徐捷撰写第四、七章，傅淑芬撰写第五章，庄斗南撰写第三、八章，陈建文撰写第六章，上海科学技术大学蔡英时撰写绪论），系统而全面地介绍了这一领域的内容，叙述了基本原理、激光器特性、设计方法。书中部分章节还介绍了激光动力学过程，最后一章专门介绍了脉冲放电气体激光器在各个领域中的应用前景。它对于我们了解和掌握脉冲放电气体激光技术是很有帮助的。感谢科学出版社及时地组织出版这样的专著。愿这本书受到科技人员、研究生以及大专院校有关专业师生的欢迎。

王之江

1992 年 3 月

绪 论

激光与其它光相比，其主要特点是功率高、发散角小、单色性好、输出的光脉冲窄和输出光谱可连续调谐。这些优异的特性现在已达到很高水平。在功率方面，激光连续输出可达 100kW，脉冲输出达 10^{13} W。许多激光器以单横模 TEM₀₀ 运转，输出的高斯光束传输性能很好，可达衍射极限，而某些大口径的激光器的光束发散角也已改善到几倍衍射极限的水平。频率的稳定度 $\Delta\nu/\nu \sim 10^{-14}$ (ν 为激光频率， $\Delta\nu$ 为频率偏差)。激光的脉宽可小到皮秒级以下。这些特点使激光成为一个强有力的工具，深入到人类活动的各个方面。不长的激光历史已经证明，激光是 20 世纪下半叶最重要的科学技术进展之一。

30 多年来，激光器件得到了深入的研究，许多种激光器进入了工业生产。然而，激光器的研究目前仍然处于十分活跃的阶段，其原因在于某些波段尚属空白，激光器的效率低，稳定性不好及波长的不易调谐，等等。激光器件的研究大致分为三个方面：(1) 寻找新的工作机制，包括新的工作物质和新技术的运用，期望得到新的波段的激光和性能优良的激光器。(2) 改善器件的运转性能，提高输出功率和效率。(3) 改善光束质量，提高光谱输出特性以及改善器件运转的稳定性。国内外对各类激光器开展了上述各方面的研究试制工作。其中，脉冲气体激光器以其发展速度快和应用领域宽而受到普遍的重视。

激光器可分为固体激光器、气体激光器、染料激光器和半导体激光器。根据最近的发展，还可将自由电子激光器另行分为一类，其中，气体激光器中的放电气体激光器是内容最丰富的一个分支。目前在气体放电中获得的激光跃迁已达 5000 个以上；几乎半数以上的化学元素的原子和离子在放电中可得到激光，100

种以上化合物的分子通过放电产生激光。无可置疑，这一领域将会进一步地扩展，新的激光发射将不断出现，并将有不少器件进入工业生产。

气体放电激光器又可分为连续波放电气体激光器和脉冲放电气体激光器。依据跃迁的类型，连续波放电气体激光器一般可分为原子(如 He-Ne)激光器、离子(如 Ar^+ , Kr^+ , He-Cd⁺, He-Se⁺)激光器、分子(如 CO_2 , H_2O , HCN)激光器。脉冲放电气体激光器现有五类：离子(如 Xe^+ , Ne^+ , Ar^+ , Kr^+)激光器、分子(如 CO_2 , HF, CO)激光器、自终止型(如 Cu, Au, Mn, Pb, N_2)激光器、准分子(如 XeF, XeCl, ArF, KrF)激光器、复合(如 Sr^+ , Ca^+)激光器。

连续放电气体激光器均能工作于脉冲放电体制。运用脉冲放电的手段，激光的种类远远扩大，并且输出功率大幅度地提高。在寻找新的激光波段和提高激光的某些性能方面，利用脉冲放电作为泵浦方式是一种重要的方法和技术。这主要是因为脉冲放电泵浦具有三个重要的优越性：泵浦功率很大，可达每立方厘米兆瓦以上；可做到大体积的均匀激发；可使工作气体的压力大幅度提高。这些特别有利于提高激光的输出功率，因而可以说脉冲气体激光器的重要特点是高功率输出。脉冲放电泵浦的上述特性，使准分子发射激光成为可能，因为这种准分子的上能级寿命非常短，需要非常高的泵浦速率，而准分子的有效形成又需要高的工作气压，这些要求在连续放电的条件下是无法满足的。另外，还有些激光工作体系在稳态时根本不能产生粒子数反转，只有在脉冲激发的前沿和后沿由于激光的上下能级粒子数增加或减小的速度不同，才产生了粒子数反转。利用前沿产生激光的一类激光器是金属蒸气激光器，这类工作物质中存在一个自终止的工作能级，从而决定了这一工作特征；利用后沿产生激光的一类激光为复合激光，它取决于激光上下能级的复合速度。

脉冲气体激光器的发展很大程度上取决于均匀放电技术的进展。这项技术在 60 年代末至 70 年代初有很大突破，奠定了脉冲气体激光器飞速发展的基础，其具体体现在下列四项技术在激光

器中的有效应用: (1) 预电离过电压均匀放电 (亦称自持均匀放电) 技术。这项技术首先用于 CO_2 激光器, 使工作气压上升至 1atm, 输出功率提高到兆瓦至百兆瓦。由于激发电流的方向和激光方向垂直, 所以称应用了自持均匀放电技术的激光器为横向激发大气压 CO_2 激光器, 一般简称为 TEA (Transversely Excited Atmosphere) CO_2 激光器。(2) Blumlein 短路传输线放电技术。用它获得 N_2 的真空紫外激光。用这一技术使 N_2 激光的功率提高到 0.1 MW 以上, 从而使 N_2 激光得到了广泛使用。这一技术同样属于自持均匀放电范畴, 但其特点是放电脉宽窄, 一般可达 20ns。(3) 电子束控制的均匀放电 (亦称非自持均匀放电) 技术。这一技术的运用使器件在扩大体积方面取得了显著的进展, 器件的工作体积甚至可以扩大至几立方米的数量级。(4) 强流电子束用于泵浦气体工作物质。电子束能量的大小在泵浦时影响不大, 在 10^4 — 10^7 eV 的范围内变化并不明显。因此, 这一技术特别适用于气压和阈值功率很高的情况。

由于技术上的不断进步, 近年来脉冲气体激光器已经成为激光器的一个重要分支。目前, 在这方面已研制出许多种大型器件, 这使其输出功率可以和任何其它类型激光器相比。同时, 脉冲气体激光器领域中的五种类型器件的运转水平已经能满足各方面应用的要求, 从而成为常用的激光器 (见表 0-1)。

表 0-1 五种常用脉冲气体激光器典型工作特性

名 称	波 长(μm)	输出功率	重复率(Hz)
TEA CO_2 激光器	10.6	1—5 MW 1—5J/脉冲	1—100
准分子激光器	0.193—0.35	5—20 MW 0.25J/脉冲	100
铜蒸气激光器	0.5106	平均功率 5W 1 MW	10 000—20 000
氮分子激光器	0.337	10 mJ/脉冲	1—100
脉冲氟化氢激光器	2.7—3	2—25MW 1—5J/脉冲	1—100

脉冲气体激光器的迅速发展体现在两方面：一是从器件的研究中了解到，这些器件在改善激光器性能，提高输出功率，填补必要的波段方面具有很大的潜力；二是它们展示出广泛的应用前景。它们在下列四个领域的应用将得到优先的考虑。

(1) 强激光的应用。

激光核聚变的实验断定， 10^6J ， $1-10\text{ns}$ 脉宽的激光脉冲照射充热核燃料的小球靶时，将获得 $1-100$ 倍的热核能量增益。为此目的，用 CO_2 激光器建造了特大型的大功率系统，输出为 10^4J ， 10^{13}W 。准分子激光由于波长短，更适于激光核聚变而受到重视。 HF 化学激光中实现了化学能转变成激光能，可大大减小高能激光器的体积，使它具有制成激光武器的可能性。

(2) 激光分离同位素和激光化学。

在这方面，人们最重视的是核燃料的生产，即铀同位素的分离。在铀同位素分离中，铜蒸气激光器是最重要的部分。因为用铜蒸气激光器泵浦染料可获得高平均功率的可调谐激光，其输出的谱线宽度小于同位素位移的宽度。为此，建造了平均功率高达 200W 的铜蒸气激光器，而且有望将该激光器的效率提高到 5% 。这一优点是其它激光器不能比拟的。在用原子法分离同位素中，准分子激光器也具有重要的地位，因为它发射的紫外光可为原子提供足够的离化光子能量。

另一条分离铀同位素的途径是分子法。它依靠高功率红外激光产生的选择性多光子分解来完成。目前的重点在 $16\mu\text{m}$ 激光分解 UF_6 体系，面临的任务是必须大幅度提高 $16\mu\text{m}$ 激光的功率和效率。同时，也正在探索一种铀的化合物，用 $10.6\mu\text{m}$ 得到选择性多光子分解。

至于激光化学，则是一个非常广阔的领域。可以说，多种类型的激光器已普遍被激光化学实验室使用。

(3) 激光雷达。

脉冲气体激光器高功率和光谱范围广的特点已被广泛地用于测污雷达。在此，仅举出两个突出的例子。其一是脉冲 CO_2 激光

雷达，它和现在使用的钎激光雷达相比有明显的四个优点：对烟尘雨雾的穿透性好；器件效率高；人眼不受损伤；器件的单频工作性能好。因而，它可制成多普勒雷达。目前已制成一种便携式的，测距为 5km 的测距仪和重复率为 100Hz，测风速用的多普勒 CO₂ 脉冲激光雷达。另一种是水下激光雷达要求的蓝绿色激光。对此，HgBr 准分子激光器在这方面进展颇大，该激光器已发出约 10J，兆瓦级以上功率的 0.5 μ m 波长的激光，其效率高达 1.8%。

(4) 其它方面的应用。

准分子激光器发射的紫外光很适合于某些表面处理。例如，用 ArF 激光辐照能使铍离子渗入硅表面 0.3—0.4 μ m，而形成 p-n 结，从而可使太阳能电池的生产速度大大加快。

随着器件的发展，必将把许多脉冲气体激光器用于医疗的临床实验。此外，脉冲气体激光器也是光谱分析方面的良好工具。由于复合激光器离实际应用尚远，因此本书没有包括有关这类激光器的论述。

目 录

序

绪论	(xi)
第一章 脉冲气体放电物理学	(1)
§ 1-1 气体放电中的基本过程	(1)
1-1-1 平均自由程	(1)
1-1-2 弹性碰撞和非弹性碰撞	(3)
1-1-3 碰撞截面	(4)
§ 1-2 离化机构	(6)
1-2-1 单电子碰撞离化	(6)
1-2-2 串级电子碰撞离化	(7)
1-2-3 彭宁离化	(7)
1-2-4 光离化	(7)
1-2-5 X 射线和其它射线引起的气体电离	(8)
1-2-6 电荷转移过程	(10)
§ 1-3 吸附和复合	(10)
1-3-1 吸附	(10)
1-3-2 离子-离子复合	(11)
1-3-3 离子-电子复合	(13)
1-3-4 离子的扩散	(14)
§ 1-4 激发和猝灭过程	(14)
1-4-1 电子碰撞激发	(15)
1-4-2 共振激发能量转移	(18)
1-4-3 电荷转移激发	(20)
1-4-4 彭宁效应	(20)
1-4-5 分解激发机构	(21)
§ 1-5 电子能量分布函数	(23)

1-5-1	统计量的平均	(24)
1-5-2	玻耳兹曼输运方程	(25)
1-5-3	玻耳兹曼输运方程的简化	(28)
1-5-4	一个例子——CO ₂ 激光等离子体中的电子能量分布函数	(31)
§ 1-6	脉冲气体放电的形成	(32)
1-6-1	低气压下的汤生击穿理论	(33)
1-6-2	高气压下的击穿理论	(35)
1-6-3	非自持放电理论	(41)
1-6-4	脉冲气体放电的稳定性和均匀性	(43)
	参考文献	(46)
第二章	横向激励大气压 (TEA) CO₂ 激光器	(47)
§ 2-1	TEA CO ₂ 激光器的基本特征	(47)
§ 2-2	高气压均匀辉光放电技术	(51)
2-2-1	针电阻型横向放电技术	(51)
2-2-2	双放电型 TEA CO ₂ 激光器	(52)
§ 2-3	紫外预电离 TEA CO ₂ 激光器	(55)
2-3-1	紫外光源	(55)
2-3-2	紫外光源的光谱特性	(59)
2-3-3	紫外光电离机构	(60)
2-3-4	紫外预电离 TEA CO ₂ 激光器	(63)
§ 2-4	典型紫外光预电离 TEA CO ₂ 激光器的设计	(64)
2-4-1	横向放电均匀场电极的设计	(64)
2-4-2	放电回路的设计	(67)
2-4-3	TEA CO ₂ 激光器对真空系统的要求	(77)
2-4-4	谐振腔及模的控制	(77)
§ 2-5	紫外预电离 TEA CO ₂ 激光器的特性和参量测量	(82)
2-5-1	电学测量	(84)
2-5-2	光学测量	(87)
§ 2-6	各种特殊的 TEA CO ₂ 激光器	(92)
2-6-1	短脉冲 TEA CO ₂ 激光器	(92)

2-6-2	重复频率和封离型 TEA CO ₂ 激光器	(95)
2-6-3	超高气压 TEA CO ₂ 激光器	(96)
§ 2-7	TEA CO ₂ 激光器的动力学过程	(97)
	参考文献	(104)
第三章	电子束控制放电的气体激光器	(105)
§ 3-1	概念与分类	(105)
§ 3-2	电子束传播的物理过程	(106)
3-2-1	电子束的用途	(106)
3-2-2	电子束的能量损耗	(106)
3-2-3	较高能的电子束传播	(113)
3-2-4	二次电子的产生与分布	(114)
§ 3-3	泵浦过程	(121)
3-3-1	泵浦模型	(121)
3-3-2	激发效率	(127)
3-3-3	泵浦的均匀性	(130)
§ 3-4	受激过程的建立	(131)
3-4-1	光强公式的导出	(131)
3-4-2	快泵浦激光特性	(134)
3-4-3	上激光能级长寿命的激光特性	(135)
3-4-4	任意泵浦函数的增益	(137)
3-4-5	激光放大	(138)
§ 3-5	激光器和放大器的运转特性	(138)
3-5-1	结构与运转过程	(138)
3-5-2	CO ₂ 激光器运转特性	(139)
3-5-3	放大器运转特性	(145)
§ 3-6	激光系统设计与参量测量	(150)
3-6-1	总体设计考虑	(150)
3-6-2	典型器件设计参数	(151)
3-6-3	小型器件的设计	(159)
3-6-4	放大器设计	(161)
3-6-5	系统参量测量	(171)
§ 3-7	常用电子枪特性	(172)

3-7-1	冷阴极电子枪	(173)
3-7-2	二次发射枪	(179)
3-7-3	其它类型电子枪	(181)
3-7-4	各种枪特性比较	(183)
3-7-5	常用的枪电源	(185)
	参考文献	(187)
第四章	金属蒸气激光器	(189)
§ 4-1	概述	(189)
§ 4-2	自终止跃迁激光器	(192)
4-2-1	一般考虑	(192)
4-2-2	自终止跃迁有效反转的条件	(194)
§ 4-3	铜蒸气激光器	(196)
4-3-1	铜原子能级	(196)
4-3-2	器件分类方式	(198)
4-3-3	纯铜蒸气激光器	(199)
4-3-4	卤化铜激光器	(202)
4-3-5	电源线路	(205)
§ 4-4	铜蒸气激光器工作特性	(210)
4-4-1	铜蒸气密度	(210)
4-4-2	工作参数	(212)
4-4-3	工作寿命	(215)
4-4-4	光束质量	(216)
§ 4-5	基本动力学过程	(217)
4-5-1	理论模型	(217)
4-5-2	动力学过程的实验研究	(225)
§ 4-6	其它脉冲金属蒸气激光器	(230)
4-6-1	铅蒸气激光器	(230)
4-6-2	锰蒸气激光器	(232)
4-6-3	金蒸气激光器	(233)
4-6-4	钡蒸气激光器	(235)
	参考文献	(237)
第五章	准分子激光器	(238)

§ 5-1	准分子的发现及其定义	(238)
§ 5-2	准分子激光器发展简介	(239)
5-2-1	准分子能级结构及其特性	(239)
5-2-2	准分子激光器的发展	(240)
§ 5-3	准分子激光器的泵浦装置	(241)
5-3-1	最小泵浦功率与激活体系的关系	(241)
5-3-2	电子束泵浦	(243)
5-3-3	电子束控制放电泵浦	(244)
5-3-4	放电泵浦	(245)
§ 5-4	稀有气体准分子激光器	(248)
5-4-1	位能曲线和辐射跃迁	(249)
5-4-2	准分子的形成和猝灭	(250)
5-4-3	Xe ₂ 准分子激光器	(252)
5-4-4	Kr ₂ 和 Ar ₂ 准分子激光器	(254)
§ 5-5	稀有气体单卤化物准分子激光器	(255)
5-5-1	稀有气体单卤化物的光谱	(255)
5-5-2	增益系数、饱和强度和感应辐射截面	(259)
5-5-3	动力学过程	(262)
5-5-4	典型器件	(266)
5-5-5	输出特性研究和器件性能改进	(272)
§ 5-6	其它准分子激光器	(289)
5-6-1	汞卤化物准分子激光器	(289)
5-6-2	金属-稀有气体及金属-金属准分子激光器	(291)
5-6-3	稀有气体氧化物准分子激光器	(291)
5-6-4	三元体系准分子激光器	(292)
参考文献		(293)
第六章 氮分子激光器		(294)
§ 6-1	工作原理	(295)
6-1-1	工作能级及其跃迁	(295)
6-1-2	粒子数反转条件	(296)
6-1-3	Franck-Condon 因子和谱线相对强度	(298)
§ 6-2	氮分子激光器的输出特性	(301)

6-2-1	辐射功率密度与参数间的关系	(301)
6-2-2	辐射谱	(304)
6-2-3	相干性	(307)
§ 6-3	氮分子激光器的泵浦装置	(309)
6-3-1	氮分子激光器对泵浦源的要求	(309)
6-3-2	Blumlein 电路	(310)
6-3-3	电路方程	(312)
6-3-4	放电参数测量	(313)
§ 6-4	氮分子激光器的典型器件	(318)
6-4-1	纵向激发	(318)
6-4-2	横向激发	(319)
	参考文献	(329)
第七章	化学激光器	(330)
§ 7-1	化学激光器的工作原理	(330)
7-1-1	反转机理	(331)
7-1-2	HF 化学激光器原理	(334)
7-1-3	弛豫过程	(336)
§ 7-2	脉冲 HF 激光器的结构	(338)
7-2-1	电引发脉冲 HF 激光器	(338)
7-2-2	电子束引发 HF 激光器	(341)
7-2-3	重复频率 HF 激光器	(345)
§ 7-3	脉冲 HF 激光器的特性	(348)
7-3-1	电特性	(348)
7-3-2	气体参数	(351)
7-3-3	辐射谱及方向性	(353)
7-3-4	动力学过程	(355)
§ 7-4	其它化学激光器	(357)
	参考文献	(360)
第八章	光泵气体激光器	(361)
§ 8-1	基本概念	(361)
8-1-1	概念与分类	(361)

8-1-2	共振光泵浦函数和增益	(367)
§ 8-2	典型的光泵气体激光器	(368)
8-2-1	光泵耦合方法	(368)
8-2-2	光泵 NH_3 激光器	(371)
8-2-3	光泵 CF_4 激光器	(373)
8-2-4	其它光泵气体激光器	(374)
§ 8-3	光泵四波混频-受激拉曼激光器	(377)
8-3-1	光泵非线性激光器原理	(377)
8-3-2	拉曼散射增益	(378)
8-3-3	光泵四波混频方法	(382)
8-3-4	H_2 拉曼激光器结构	(384)
8-3-5	H_2 拉曼激光器的一些参数和运转特性	(387)
8-3-6	其它光泵非线性激光器	(389)
	参考文献	(390)
第九章	脉冲气体激光器的应用	(391)
§ 9-1	脉冲气体激光器在激光武器中的应用	(391)
§ 9-2	脉冲气体激光器在激光核聚变中的应用	(394)
9-2-1	短脉冲短波长振荡的获得	(397)
9-2-2	大口径放大器的研制	(398)
9-2-3	紫外高功率窗口材料及膜层研究	(399)
§ 9-3	脉冲气体激光器在激光分离同位素中的应用	(400)
§ 9-4	脉冲气体激光器在激光测距和通信中的应用	(402)
9-4-1	激光测距	(402)
9-4-2	激光通信	(404)
§ 9-5	脉冲气体激光器在工业中的应用	(406)
9-5-1	激光与材料表面相互作用的物理过程	(407)
9-5-2	激光标记	(408)
9-5-3	激光微调	(409)
9-5-4	激光退火	(410)
9-5-5	激光光刻	(411)
9-5-6	激光掺杂	(412)
9-5-7	激光沉积	(413)

§ 9-6 脉冲气体激光器在科学研究中的应用	(414)
9-6-1 激光光谱学用的光源.....	(414)
9-6-2 用非线性过程扩展激光波段.....	(416)
9-6-3 激光化学合成.....	(417)
§ 9-7 脉冲气体激光器在医学上的应用	(419)
9-7-1 利用激光光化学作用诊断和治疗癌症.....	(419)
9-7-2 紫外光刀和镇痛应用.....	(420)
参考文献	(421)