

# 激光技术和应用的进展

《激光手册》 第七分册

M. L. 斯蒂琪 主编

科学出版社

# 激光技术和应用的进展

《激光手册》第七分册

M. L. 斯蒂琪 主编

《激光手册》翻译组 译

科学出版社

1986

## 内 容 简 介

本书是《激光手册》第三卷的选译本,共包括八章。内容反映了激光技术和激光应用的若干重要新进展,涉及非稳定谐振腔,波导气体激光器,准分子激光器,脉冲染料激光器,超短脉冲技术,二次谐波产生技术,激光化学反应和同位素分离技术及脉冲全息术。每篇文章都比较全面地评述了一个独特的方面,并且指出了技术的关键要点,原理和实践问题都得到相应的重视。

本书可供激光技术和应用等方面科技人员和高等院校有关专业师生参考。

M. L. Stitch ed.

LASER HANDBOOK, VOL. 3

North-Holland, 1979

## 激光技术和应用的进展

《激光手册》第七分册

M. L. 斯蒂琪 主编

《激光手册》翻译组 译

责任编辑 陈菊华

科学出版社出版

北京朝阳门内大街 137 号

中国科学院印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

\*

1986年7月第一版 开本:787×1092 1/32

1986年7月第一次印刷 印张:19 3/8 插页:1

印数:0001—2,550 字数:440,000

统一书号:13031·3221

本社书号:4185·13—3

定价:4.65元

## 中译本前言

《激光手册》是美国科学家编纂的巨著,其第一、二卷出版于1972年,内容广泛而全面,从激光物理和理论、激光器、激光技术,直到物理应用和技术应用,共分六个部分,包括论文40篇。实际上是一套“激光大全”。我们曾将它全部译出,于1977至1983年,分为六个分册陆续出版。本书的出版对国内有关的工作起了一定的有益的作用。

《激光手册》第三卷的编写宗旨与前两卷相同,出版于1979年。内容包括激光技术和激光应用的新进展,分为A、B两部分,共十二篇综述论文。这些论文每篇均由相应领域的专家撰写,全面地评述了一个独特的方面,指出技术的关键要点,理论和实践问题都得到充分的重视。我们根据过去翻译《激光手册》第一、二卷的工作结果,认为继续重点翻译第三卷是有意义的,因此选译了其中与我国国内开展的研究工作关系较密切的八篇文章,作为《激光手册》第七分册,即《激光技术和应用的进展》。没有收录在内的四篇是:“高功率、高效率电激发CO激光器”,“化学激光器和气动激光器”,“用于核聚变的高级激光器”和“染料的连续微微秒光谱学”。

本书第一、第三和第五章由杨顺华同志翻译;第二章由李维城同志翻译;第四章由程文芹、张道中同志翻译;第六章由杨顺华、李国旺同志翻译;第七章由张甫同志翻译;第八章由李国旺同志翻译,詹达三同志校订。

译 者

## 原 序

《激光手册》第三卷继续第一、二卷的编辑路线,发表一系列有关激光技术和激光应用的论文,作者都是学院,工业部门和政府研究机构的人士。

我们所用“手册”一词并非意指一个表格和公式的汇编,而是德文“Handbuch”的同意词,意指一种“大全”,例如《实验物理大全》之类。象前两卷一样,本卷中的论文都是由该领域中的工作者撰写的精练的、阐述性的专论,对象是相似或相关领域中的工作者和高年级大学生。

重点是放在有关改善模式特征和光束质量,提高效率,发展新波段,提高功率和可调谐性的技术上。这一部分内容属于“激光技术”。

属于“激光应用”部分的内容包括:能变更激光特征的物理相互作用,例如用以得到超短脉冲,或高功率二次谐波脉冲;以及科学和工程上的应用,如激光诱发化学反应和同位素分离,脉冲全息术,惯性限制聚变以及微微秒光谱学等。例如光通信和材料加工等课题的近期进展已有其它书籍很好论述,本书不准备包括。

看来一种技术的成熟会导致若干学科的结合。我记得在25年前微波波谱学如何从物理学和微波电子学发端,而且逐步地进入化学领域。现在,从本卷的材料看来,我们把它称为“量子电子学”的这个学科,将会愈来愈多地包括使化学方面的学者,甚至航空工程及核工程方面的工作者感兴趣的内容。

# 目 录

<b>第一章 不稳定谐振腔</b> .....	1
1. 引言 .....	1
2. 几何模式和设计方程 .....	3
3. 空腔的波动光学分析——锐变边缘情况 .....	8
4. 输出的远场图样 .....	14
5. 边缘波分析——渐变边缘光孔 .....	16
6. 充有活性介质的不稳定谐振腔 .....	21
7. 不稳定环型谐振器 .....	34
8. 不稳定谐振器的频率控制和谱线选择 .....	36
9. 使用不稳定谐振腔的功率放大器和注入锁定振荡器 .....	40
<b>第二章 波导气体激光器</b> .....	46
1. 引言 .....	46
1.1 历史的发展 .....	46
1.2 波导激光器的独特性能 .....	48
2. 波导激光器谐振腔 .....	48
2.1 空心介质波导模 .....	50
2.2 耦合损耗 .....	52
2.3 波导谐振腔理论 .....	59
2.4 谐振腔设计 .....	73
3. 用于波导激光器的定标关系式 .....	75
4. CO <sub>2</sub> 波导激光器 .....	78
4.1 波导 CO <sub>2</sub> 激光器的特性 .....	78

• • •

4.2 特殊装置 .....	81
5. 其他波导气体激光器 .....	94
5.1 惰性气体 .....	94
5.2 分子 .....	95
5.3 远红外波导激光器 .....	96
6. 结论 .....	99
<b>第三章 准分子激光器</b> .....	<b>101</b>
1. 引言 .....	101
2. 准分子激光器概述 .....	103
2.1 历史 .....	103
2.2 若干一般的介质特征 .....	107
2.3 抽运要求 .....	111
3. 准分子光谱学 .....	115
3.1 术语 .....	115
3.2 准分子发射光谱 .....	119
3.3 准分子介质中的吸收体 .....	127
4. 准分子激光器动力学 .....	134
4.1 电子束激发稀有气体 .....	134
4.2 电子束激发稀有气体卤化物 .....	142
4.3 放电激发稀有气体卤化物 .....	153
5. 准分子激光器装置的技术 .....	158
5.1 准分子激光器所用电子束 .....	159
5.2 放电技术 .....	168
5.3 准分子激光器的光学构件 .....	173
<b>第四章 脉冲染料激光器</b> .....	<b>177</b>
1. 引言 .....	177
2. 染料激光器的工作原理 .....	179
2.1 染料的性质 .....	179
2.2 染料激光器分析 .....	182

3. 结构和性能 .....	195
3.1 激光激励的脉冲染料激光器 .....	195
3.2 闪光灯泵浦的染料激光器 .....	203
3.3 调频方法 .....	212
4. 染料激光放大器 .....	216
5. 振荡-放大器系统 .....	219
6. 注入锁定 .....	224
7. 两波长工作 .....	229
8. 蒸气染料激光器 .....	232
9. 可调频紫外及红外辐射的产生 .....	235
9.1 谐波产生及和频 .....	235
9.2 差频产生 .....	243
10. 短脉冲产生 .....	246
10.1 共振腔瞬态效应 .....	247
10.2 锁模 .....	249
<b>第五章 带宽限制的超短脉冲产生技术</b> .....	<b>254</b>
1. 引言 .....	254
2. 带宽限制的脉冲 .....	255
2.1 光脉冲的结构 .....	256
2.2 纵模锁定 .....	258
2.3 超短脉冲测量 .....	259
3. 主动锁模 .....	260
3.1 均匀锁模 .....	263
3.2 失谐 .....	267
3.3 标准具的效应 .....	269
3.4 瞬态脉冲形成 .....	272
3.5 Nd:YAG 激光器 .....	274
3.6 染料激光器 .....	278
4. 固体激光器的被动锁模 .....	278



4.1	起伏模型 .....	280
4.2	实验研究 .....	293
4.3	吸收体寿命效应 .....	296
4.4	钕玻璃激光器 .....	298
4.5	新材料 .....	308
5.	染料激光器的被动锁模 .....	310
5.1	准连续模型 .....	310
5.2	实验研究 .....	313
6.	主动锁模和被动锁模的结合 .....	317
7.	超短脉冲产生和成形的其它技术 .....	318
8.	结论 .....	321
<b>第六章</b>	<b>高平均功率、高效率二次谐波产生 .....</b>	<b>323</b>
1.	引言 .....	323
2.	二次谐波产生的原理 .....	326
2.1	位相匹配 .....	328
2.2	角度位相匹配 .....	332
2.3	90° 位相匹配 .....	338
2.4	二次谐波产生接受温度 $\delta T$ .....	340
2.5	SHG 晶体中的光学不均匀性 .....	342
2.6	SHG 晶体中的自热效应 .....	343
3.	用于高平均功率 SHG 的激光器 .....	346
3.1	为高平均功率 SHG 用的理想激光器的特性 .....	346
3.2	提高激光亮度的方法 .....	348
3.3	高功率 SHG 中通常应用的激光器 .....	351
4.	为高平均功率 SHG 用的晶体 .....	356
4.1	理想晶体的性质 .....	356
4.2	高平均功率 SHG 晶体 .....	357
4.3	晶体工学 .....	363
5.	高平均功率二次谐波产生中的热问题 .....	365
5.1	电光调谐(EOT)和压光调谐(POT) .....	365

5.2	例: $CD^*A$ 中的二次谐波产生 .....	368
5.3	EOT 和 POT 的其它应用 .....	376
5.4	用角度调谐实现热补偿 .....	377
5.5	利用光束成形控制温度梯度 .....	377
5.6	高平均功率 SHG 实验的设计 .....	391
6.	结论 .....	395
7.	记号 .....	395
<b>第七章</b>	<b>激光引起的化学反应与同位素分离</b> .....	<b>398</b>
1.	引言 .....	398
2.	红外激光化学 .....	400
2.1	激光增强的双分子反应 .....	402
2.2	可能被曲解的实验 .....	412
2.3	难于解释的实验 .....	419
2.4	更为明确的激光引起的化学实验 .....	422
3.	多光子反应模型 .....	436
3.1	名称与定义 .....	436
3.2	几何效应 .....	438
3.3	单分子反应模型 .....	440
4.	多原子分子的无碰撞多光子的激光激发理论 ...	459
4.1	一般的物理描述 .....	459
4.2	振动能级 .....	464
4.3	约化密度矩阵运动方程 .....	470
4.4	相干驱动, Rabi 振荡, 功率增宽 .....	475
4.5	$SF_6$ 与别的分子的无碰撞激光激发的多光子理论	478
4.6	相干多能级运动方程的解 .....	481
4.7	转动效应 .....	484
4.8	模之间的振动弛豫 .....	486
4.9	主方程及主方程的近似 .....	500
4.10	热库谱密度的求值与振动耦合 .....	502
4.11	约化密度矩阵运动方程的计算法研究 .....	509

<b>第八章 脉冲全息术</b> .....	513
1. 引言 .....	513
2. 相干光源 .....	515
2.1 红宝石和 Nd:YAG 激光器 .....	517
2.2 空间相干性 .....	521
2.3 时间相干性 .....	523
2.4 多脉冲工作 .....	532
2.5 全息照相机 .....	533
3. 记录材料 .....	538
3.1 卤化银照相乳胶 .....	539
3.2 热塑膜片 .....	541
3.3 光聚合物 .....	543
4. 实验技术和应用 .....	544
4.1 脉冲全息干涉量度术 .....	544
4.2 周围环境的研究 .....	547
4.3 无损检验 .....	549
4.4 流动的显示 .....	559
4.5 微粒研究 .....	562
4.6 人物照相 .....	564
5. 全息图再现 .....	567
6. 激光安全措施 .....	568
6.1 辐射危险性 .....	568
6.2 电气危险性 .....	569
6.3 适用于固体激光器的安全保护措施 .....	569
<b>参考文献</b> .....	571

# 第一章 不稳定谐振腔

William H. Steier

**提要** 评述了不稳定谐振腔的优点和用途,给出了几何设计公式。讨论了空的锐边(光孔)谐振腔和渐变边缘(光孔)谐振腔中衍射对于损耗和模式图样的影响。对于充有介质谐振腔近来的计算机分析进行了评述,也概述了关于充有介质谐振腔的简单光线分析。最后,讨论不稳定谐振腔的若干新应用,包括作为环型谐振器,作为频率控制振荡器,以及作注入锁定振荡器或再生放大器。

## 1. 引言

不稳定谐振腔现今正广泛而成功地用于许多高能激光器中,不稳定谐振腔的性质使得它们在这些场合下特别合适。已发表了许多论文论述这类谐振腔的性质,并且,也许除了关于应用具有显著折射率不均匀性和增益不均匀性激光介质的最佳谐振腔设计问题之外,这类谐振腔已经得到了很好的理解。这篇评述首先总结几何性质以及以几何光学为基础的设计方程,然后讨论衍射和渐变边缘光孔的影响,目的在于说明在何种情况下衍射是重要的,以及何时它必须考虑计入空谐振腔的设计方程。关于含有增益不均匀性及折射率不均匀性谐振腔的几节向读者介绍近来发表的计算机技术和发射光线分析方法,使读者跟上现代的发展。最后讨论关于环型不稳定

谐振腔以及关于应用不稳定腔的注入锁定振荡器和功率放大器的若干近期工作。

不稳定谐振腔特别适合于具有下列特性的激光器：(a) 增益体积的半径对长度之比较大，即 0.1 或更大；(b) 激光器的参数(增益、饱和)是这样，使最佳输出耦合较大(50% 或更大)。这些特性描述了许多高能量激光器(CO<sub>2</sub>, CO, HF-DF, KrF 等)，近年来不稳定谐振腔在这些系统中得到了广泛的应用。

不稳定谐振腔的优点首次为 Siegman (1965, 1971, 1974) 及 Siegman and Arrathon (1967) 指出，他们的文章和评述是光学的这个领域的基石。Ananév 等(1970)和 Ananév (1972)也作出了重大的贡献；特别是，他们的工作对于这类谐振腔的性质提供了很好的物理解释。

稳定的和不稳定的谐振腔这两者传统上都是用参数  $g_1$ 、 $g_2$  来描述：

$$g_1 = 1 - \frac{L}{R_1}, \quad (1)$$

$$g_2 = 1 - \frac{L}{R_2}, \quad (2)$$

$L$  = 反射镜间间距，

$R_1, R_2$  = 反射镜的曲率半径。(对于凹镜  $R_1, R_2$  为正。)

稳定谐振腔满足条件：

$$0 \leq g_1 g_2 \leq 1, \quad (3)$$

它是第一类经过分析的并为激光器应用而发展的谐振腔。稳定谐振腔的模式是高斯-拉盖尔模式，在文献中有广泛的描述 (Kogelnik and Li, 1966)。最低阶模的特征是具有“线状”的模体积，它半径对长度的比值近似地是  $(\lambda/2L)^{1/2}$ ，或数量级为  $10^{-3}$ 。可以应用半径较大的镜来增大这个径长比，但在实

际中不能超过 10 倍。这些模在横向方向上是充分受到约束的,其衍射损耗在代表性情况下可以略去。

在能量激光器中增益介质的径-长比大大超过  $10^{-3}$ ;企图采用稳定谐振腔得到高效的衍射受限输出是不现实的,得到一个能充满增益介质的稳定模根本上要求平反射镜。这是不能令人满意的一种腔体设计,因为平镜-平镜谐振腔的模式质量可能被增益介质的光学不均匀性所严重损害。如果腔体这样设计,使其稳定模体积大大小于增益体积,就会导致多横模振荡,它不是衍射受限的。输出光束基本上以某一角度衍射,此角由最低阶模的尺寸决定,后者与总的输出光孔相比较小很多。

稳定谐振腔的这些限制性在不稳定腔中可以避免。不稳定谐振腔是  $g_1 g_2$  乘积超出上述范围的谐振腔。模式在横向上不受约束,模式尺寸由系统中的某个限制光孔所确定。因此,这种谐振腔可以设计为能充满任意模体积。由于不存在横向约束,所以在腔光孔上有相当大的衍射损耗,后者一般可以用作激光器输出。

## 2. 几何模式和设计方程

关于不稳定模式首次和最简单的分析是一个纯粹的几何图象 (Siegman 1965, 1971; Kahn 1966, Barone 1967; Bergstein, 1968; Streifer, 1968)。这些结果给出模式的基本特征,并在许多情况下给出实际的设计方程组。参看图 1.1,问题是要求得两个点光源的位置,这两个点光源通过反射镜彼此成为对方的象,即离开反射镜 1 的光波犹如是从  $S_1$  出发的,它被反射镜 2 所反射后犹如从  $S_2$  出发;反之亦然。这样,在一次环行后,光源成象于其自身,而光线图样被复现。

我们定义一个放大率  $M_{12}$ , 它表示光束由反射镜 1 进行至镜 2 的几何扩大。几何图象假定光束的横向分布是均匀的, 以此为基础, 我们能够计算反射镜 1 上的衍射耦合本领  $\delta_1$  和反射镜 2 上的  $\delta_2$ , 由  $M_{12}$  和  $M_{21}$  确定。注意横模尺寸由充满一个镜或两个镜的光束决定, 因此增大镜光孔可以增大横模尺寸。两个反射镜上总的输出耦合由镜的半径和其间距决定。不过在总输出中各个端耦合输出所占部分可以通过改变镜的相对孔径来加以调整。表 1 中给出不稳定谐振腔设计的基本公式。

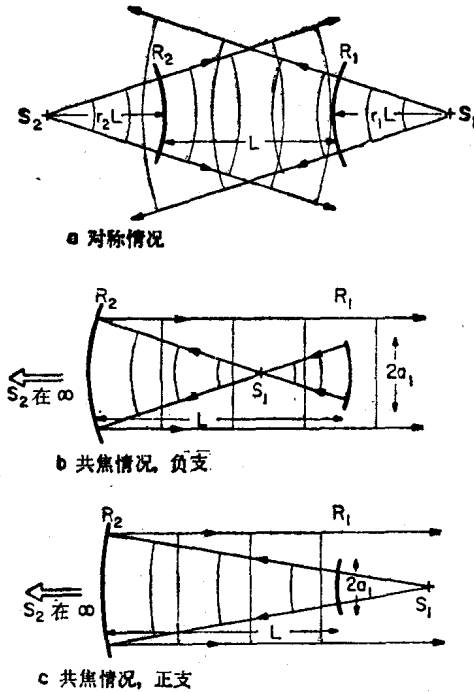


图 1.1 不稳定谐振腔。  $S_1$  和  $S_2$  是几何光学描述法中球面光波的虚中心。

描述不稳定谐振腔的一个有用参量是等价菲涅耳数; 对

于对称谐振腔它定义为

$$N_{eq} = \frac{a^2}{\lambda L} \frac{M^2 - 1}{2M}, \quad (4)$$

式中

$$M = \text{环行放大率} = M_{12}M_{21},$$

$$a = \text{反射镜光孔半径.}$$

对于非对称谐振腔,  $N_{eq}$  可以应用 Siegman and Miller (1970) 和 Siegman (1971) 推出的等价关系计算。

几何光线理论预计一个均匀模式图样, 而输出耦合公式就是以此假定为基础。如果进行更精确的光波分析并计及衍射, 模式就不是均匀的, 而耦合公式也必须修改。在下节中将要证明: 对于具有锐变边缘圆形反射镜的谐振腔, 当  $N_{eq}$  小时, 衍射效应大。衍射总是将耦合降低至低于几何值, 如下节中所讨论。不过在许多实际情况下这些条件不被满足 (即  $N_{eq}$  大或长方形孔), 几何耦合公式近似正确, 能够用于谐振腔的设计。

图 1.1b 和 1.1c 中示出共焦不稳定谐振腔 (Krupke and Sooy, 1969), 它是实际中应用最多的一种特殊情况, 因为它能产生由一端射出的准直输出。在此情况中将反射镜 2 的光孔尺寸做得很大, 而横模尺寸就由镜 1 的孔径决定。共焦条件是

$$g_1 + g_2 = 2g_1g_2, \quad (5)$$

或  $R_1 + R_2 = 2L$ 。一般避免使用负支, 因为此时出现热点, 它可能引致击穿。对于共焦谐振腔 (Rensch and Chester, 1973)

$$N_{eq} = \frac{M-1}{2} N_1, \quad (6)$$

式中  $N_1 = a_1^2/\lambda L$ ,  $a_1 =$  较小光孔之半径。

在所有不稳定谐振腔中都有一个或数个限制光孔, 或置于内部或位于镜上, 光束完全充满它们, 它们确定横模尺寸和



表 1 基本设计方程

$$g_1 = 1 - \frac{L}{R_1} \quad g_2 = 1 - \frac{L}{R_2}$$

1. 虚点源位置

$$\frac{1}{r_1} = \sqrt{\left(g_1^2 - \frac{g_1}{g_2}\right)} + g_1 - 1 \quad \frac{1}{r_2} = \sqrt{\left(g_2^2 + \frac{g_2}{g_1}\right)} + g_2 - 1$$

2. 放大率

$$M_{12} = \frac{1 + r_1}{r_1} \quad M_{21} = \frac{1 + r_2}{r_2}$$

$$M = \text{环行放大率} = M_{12}M_{21} = 2g_1g_2 + 2\sqrt{[g_1g_2(g_1g_2 - 1)]} - 1$$

3. 衍射耦合

$$\delta_T = \text{每次环行总衍射功率耦合} = 1 - \frac{1}{M^2}$$

4. 共焦谐振腔——单端耦合

$$\delta_T = \delta_1 = 1 - \frac{1}{M^2} \quad \delta_2 = 0$$

$$\text{正支: } g_1 = \frac{M+1}{2}, \quad g_2 = \frac{M+1}{2M}$$

$$\text{负支: } g_1 = \frac{1-M}{2}, \quad g_2 = \frac{M-1}{2M}$$

形状。注意：可以采用形状适当的光孔使波模充满长方或正方形截面的增益介质。画出由两个虚点光源出发的边缘光线就能求得光束的形状和大小尺寸。在所有情况下，应用几何理论，总的输出功率耦合百分数由下式给出：

$$\delta_{\text{TOT}} = 1 - \frac{1}{(M_{12}M_{21})^2}, \quad (7)$$

它由  $R_1, R_2$  和  $L$  确定。不过，耦合在各个光孔上的分布取决于光孔的尺寸和位置。

不稳定谐振腔的另一特性是：两个相对方向进行的波在腔中任何点上的位相波前具有不同的横向尺寸和半径，当采