

激光器

《激光手册》 第二分册

F. T. 阿 里 克 主编
E. O. 舒尔茨-杜波依斯

科学出版社

激 光 器

《激光手册》第二分册

F. T. 阿雷克 E. O. 舒尔茨-杜波依斯 主编

《激光手册》翻译组 译

科 学 出 版 社

1980

内 容 简 介

本书扼要地介绍各类激光器(包括固体激光器、原子、分子、离子激光器以及液体激光器、半导体激光器)的工作原理,对一些激光器作了专门介绍。书中讨论了这些类型激光器中各种参量对输出功率的关系以及它们对设计的影响,给出了几种激光器的典型设计参量,同时讨论了制作中的工艺问题。此外还介绍了固体和气体激光器中的几项重要技术,如Q开关、选模和锁模等。本书可供从事激光器研制的科技人员和工人参考。

F. T. Arecchi, E. O. Schulz-DuBois

LASER HANDBOOK

North-Holland, 1972

激 光 器

《激光手册》第二分册

F. T. 阿雷克 E. O. 舒尔茨-杜波依斯 主编

《激光手册》翻译组 译

*

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

*

1980年8月第一版 开本: 787×1092 1/32

1980年8月第一次印刷 印张: 16 3/4

印数: 0001—5,610

字数: 383,000

统一书号: 13031·1253

本社书号: 1746·13—3

定 价: 2.10 元

中译本前言

自从第一台激光器出现以来,激光理论和激光技术的发展非常迅速。目前激光已在国防、国民经济和科学技术的许多方面得到了广泛应用。《激光手册》综述了激光的物理原理、技术设计及其应用,虽出版于1972年,但书中论述的许多基本原理和基本技术仍然适用。遵照毛主席关于“洋为中用”的教导,我们将它译成中文,以供读者参考。

本书原著分为基础理论(A)、各类激光器(B)、激光器件与技术(C)、非线性光学材料(D)、物理应用(E)及技术应用(F)等六个部分,共收综述性文章40篇,分为上下两卷出版。中译本对部分章节做了调整,准备分六个分册出版。原书的A部分为第一分册,原书的B和C两部分调整为第二和第三分册,从原书E部分选出一篇文章与D部分合编成第四分册,E部分的其他文章为第五分册,F部分为第六分册。

第二分册前六章由潘承志、韩家瑞、张伦、李世英同志翻译,张志三、杨顺华、李维城同志校订;第七章由傅克坚译,张志三校订;第八、九两章由顾士杰译,杨顺华校订。由于译者水平有限,肯定会有错误和不足之处,欢迎读者批评指正。

目 录

中译本前言

第一章 固体离子激光器..... 1

1. 引论 1

2. 激光器原理 2

3. 离子的激光性质 7

3.1. 稀土元素 7

3.2. 镧系元素 23

3.3. 过渡金属元素 24

4. 几种固体激光器 31

4.1. 红宝石激光器 31

4.2. 钕玻璃激光器 37

4.3. 掺钕钇铝石榴石激光器 (Nd:YAG) 42

5. 有关固体激光器的几个附表 48

参考文献 51

第二章 固体激光器的设计..... 61

1. 引论 61

2. 一般考虑 61

3. 非均匀抽运的激光参量 63

4. 激光棒对抽运光的折射和吸收 67

4.1. 非吸收性激光棒的折射效应 67

4.2. 激光棒内的吸收 69

4.3. 闪光灯的浸没 73

4.4. 表面粗糙的激光棒 73

5. 抽运系统 74

5.1. “白盒”系统 74

5.2. 焦线照射的单圆柱形聚光器 76

5.3. 焦线照射的多重椭圆形聚光器	78
5.4. 非焦线照射的椭圆形聚光器	80
5.5. 圆柱形聚光器	81
5.6. 旋转椭球形非焦点抽运系统	82
5.7. 圆球型抽运系统	84
5.8. 其他抽运系统	85
6. 抽运光光源	87
7. 固体激光器的几项特殊工艺	91
8. 固体激光器的设计举例	92
参考文献	99
第三章 固体激光技术	102
1. Q 开关激光器	102
1.1. 电光快门	103
1.2. 机械快门	103
1.3. 利用可饱和染料的快门	104
1.4. Q 开关理论	105
2. 选模	113
3. 锁模	116
4. 微微秒脉冲的测量	130
5. 微微秒脉冲的特性	137
参考文献	139
第四章 原子、分子和离子气体激光器	144
1. 引论	144
2. 激发机理	146
2.1. 用带电粒子直接激发	148
2.2. 通过共振或近共振能量转移引起的激发	152
2.3. 气动过程引起的激发	157
2.4. 化学过程引起的激发	159
2.5. 彭宁效应引起的激发	161
3. 反转机理	165
3.1. 激光器增益和振荡条件的计算(初等模型)	165
3.2. 相对于基态的反转: 基本的三能级激光器	166

3.3. 两个受激态之间的反转	168
3.4. 部分反转	169
4. 几种振荡系统	179
4.1. 氦-氖原子系统	179
4.2. 二氧化碳分子系统	182
4.3. 氦-镉离子系统	192
4.4. 分子氢系统	196
5. 气体介质中的谱线展宽机理	197
5.1. 多普勒展宽	198
5.2. 相互作用展宽	199
5.3. 多普勒展宽和相互作用展宽的组合	200
6. 基本测量	201
6.1. 分子寿命的测量	202
6.2. 分子能量转移速率	204
6.3. 高分辨率光谱学测量	206
6.4. 精密的绝对频率测量	212
7. 结论	216
参考文献	218
第五章 气体激光器的设计	222
1. 引论	222
2. 最佳输出功率和单横模运转	223
2.1. 最佳输出透射率和损耗效应	223
2.2. 获得 TEM ₀₀ 模式的方法	230
3. 激光谐振腔的构造	232
3.1. 机械设计考虑	232
3.2. 布儒斯特窗和反射镜的选择	235
3.3. 内反射镜管	237
3.4. 稜镜和光栅	237
4. 直流(连续工作)等离子体管的设计	239
4.1. 直流气体放电特性和电源	239
4.2. 阴极和阳极	241
4.3. 噪声	243

4.4.电泳	244
4.5.气体的抽运	244
4.6.等离子体管结构	245
5.放电参量和激光参量之间的关系	247
6.几类具体的气体激光器	250
6.1.引言	250
6.2.氦-氖激光器	251
6.3.氦-镉和其它金属蒸汽离子激光器	252
6.4.惰性气体离子激光器	253
6.5.二氧化碳和其它远红外激光器	254
7.射频放电	255
7.1.引言	255
7.2.电容放电	255
7.3.电感放电	258
8.脉冲气体激光器	258
8.1.脉冲电路	258
8.2.脉冲氩激光器	259
8.3.脉冲空心阴极汞激光器	260
8.4.脉冲氮激光器	261
参考文献	262
第六章 气体激光技术	264
1.引论	264
2.气体激光器的模式	266
3.纵模锁定技术	268
3.1.内调制	270
3.2.自锁	289
3.3.饱和吸收体	295
3.4.其它方法	300
4. Q 开关和倾腔输出	301
4.1.转镜 Q 开关	302
4.2.无功 Q 开关	305
4.3.无源(饱和吸收体) Q 开关	307

4.4. 光闸Q 开关	310
4.5. 倾腔输出	312
5. 横模锁定技术	313
5.1. 扫描光束输出	315
5.2. 脉冲扫描光束输出	319
5.3. 横模锁定的其它结果	320
6. 单频激光器	321
6.1. 超模激光器	321
6.2. 选频耦合	324
6.3. 干涉量度技术	327
6.4. 吸收法选模	334
6.5. 其它单频技术	335
7. 稳频	336
7.1. 激光器的频率不稳定性	337
7.2. 无源稳定的激光器	338
7.3. 原子谐振伺服控制激光器	339
7.4. 非原子基准伺服控制激光器	351
7.5. 双反馈系统	353
7.6. 用时标锁定激光器	354
结束语	355
参考文献	356
第七章 液体激光器	362
1. 引论	362
2. 无机和金属-有机化合物体系	363
2.1. ScOCl_2 或 POCl_3 中的铽	363
2.2. 稀土螯合物	365
3. 有机体系	366
3.1. 具有共轭双键的有机化合物(染料)的光谱性质	366
3.2. 染料激光器的振荡条件	382
3.3. 利用基态不稳定的样品的抽运	392
4 实验结果	397
4.1. 一般的设计考虑	397

4.2. 光谱	406
4.3. 染料激光器的波长选择方法	409
4.4. 时间行为	416
4.5. 染料激光器的锁模	423
参考文献	431
第八章 半导体激光器理论	436
1. 引论	436
2. 结构、激发和阈	438
3. 态密度	441
4. 局部增益系数	444
5. 其它方面的理论	451
参考文献	452
第九章 半导体激光器器件	455
1. 引论	455
2. 激发技术	456
2.1. 电子束抽运的激光器	457
2.2. 光抽运的激光器	461
2.3. 碰撞电离激发	464
2.4. 正向偏置 p-n 结(注入式激光器)	464
3. 激光二极管的主要结构	468
3.1. 同质结激光器	468
3.2. 单异质结“紧密限制”(SH-CC) 激光器	469
3.3. 双异质结(DH) 激光器	470
3.4. 大光腔(LOC) 激光器	471
4. 激光二极管工艺	472
4.1. 扩散同质结激光器	472
4.2. 气相外延(VPE) 技术	472
4.3. 液相外延(LPE) 技术	473
4.4. 激光二极管的构造	476
4.5. 晶体缺陷对激光器特性的影响	478
4.6. 激光二极管的热性能	479
5. 光波在激光二极管内的传播	480

5.1. 介电常数在垂直结面方向上的变化	481
5.2. 纵模(法布里-珀罗腔)	484
5.3. 光波在三层波导内的传播	484
5.4. 激光二极管的内吸收	488
5.5. 高级横模	491
5.6. 远场辐射图样	496
6. 激光二极管的性能	497
6.1. 一般关系	497
6.2. 吸收系数——理论与实验的比较	503
6.3. 阈值电流密度——理论与实验的比较	504
6.4. 功率输出和转换效率(脉冲和连续工作)	510
7. 激光二极管的可靠性	512
7.1. 突然退化	512
7.2. 逐渐退化	514
8. 各种材料的激光二极管	516
8.1. Ga(AsP) 和 (AlGa)As	516
8.2. 硫化物 Pb-Sn	518
9. 结论	520
参考文献	520

第一章 固体离子激光器

R. B. Chesler, J. E. Geusic

提要 本章扼要介绍激光器的重要工作原理。讨论在固体基质中稀土元素、过渡金属元素和铜系元素与激射有关的特性，并综述各类离子的实验结果。总结了几种成熟的固体激光器(红宝石激光器、钕玻璃激光器和掺钕钇铝石榴石激光器)的特性。

1. 引 论

首次演示激光作用的是红宝石固体离子系统 (Maiman, 1960a)。接着很快又报道了另外几种脉冲固体激光器：掺 U^{3+} 的 CaF_2 (Sorokin and Stevenson, 1960)，掺 Sm^{2+} 的 CaF_2 (Sorokin and Stevenson, 1961b) 和掺 Nd^{3+} 的玻璃 (Snitzer, 1961)。继后不久又报道了第一台连续工作的固体激光器——掺 Nd^{3+} 的 $CaWO_4$ (Johnson et al., 1962c)。60 年代出现的许多发出可见光和近红外光的固体激光器都是以在稀土元素离子、过渡金属离子和铜系元素离子在各种固体基质中的跃迁为基础的(见 1.3 和 1.4)。第 1.4 节讨论几种成熟的固体激光器：红宝石激光器、钕玻璃激光器和掺钕钇铝石榴石激光器 (Geusic et al., 1964)。本章所列的参考文献是有代表性的，但并不是完整的。论述固体离子激光器的其他参考文献和资料可以在下列书籍和评述性文章中查到：Birnbbaum (1964)，

Evtuhov 和 Neeland (1966), Geusic 和 Scovil (1964), Goodwin 和 Heavens (1968), Johnson (1966), Kaminskii 和 Osiko (1967), Kiss 和 Pressley (1966), Lengyel (1966), Nassau (1970), Röss (1969), Smith 和 Sorokin (1966), Snitzer (1966b), Snitzer 和 Young (1968), Yariv 和 Gordon (1963) 以及 Young (1969)。

作为激光器的一类, 固体离子激光器在某些方面不同于其他类型激光器。它们的激活离子密度介于气体激光器和注入式激光器之间(表 1)。在很多场合下, 固体激光器的离子密度都体现了光源的紧密度和激活介质冷却能力之间最佳的调和。固体激光器中粒子数反转的能量贮存时间比较长(表 1), 这非常适于采用像 Q 开关这样的技术来产生高功率脉冲。最后, 固体激光器是利用光抽运的。在许多情况下, 抽运灯限制了激光器可达到的效率和寿命。

表 1
(引自 Kiss and Pressley, 1966)

激光器类型	激活离子或激活离子对的典型密度 [厘米 ⁻³]	典型贮存寿命 [秒]
气体激光器	$10^{15} - 10^{17}$	10^{-6}
固体离子激光器	$10^{17} - 10^{20}$	10^{-3}
注入式激光器	10^{22}	10^{-9}

2. 激光器原理

任何激光器基本上都是由放置在由两个(或多个)反射镜构成的谐振腔内的具有光增益的介质组成。在介质中先产生自发辐射, 再通过受激发射进行放大。谐振腔对光学放大器提供反馈, 这种组合构成一个激光振荡器, 通常简称为激光器。

激光介质自发地将光发射到辐射场的各个振荡模式之

中,这些模式为数极多(Heitler, 1954)。普通光学谐振腔只对比较少的模式提供显著的反馈,这些模式通常称为谐振腔模(Kogelnik, 1964)。由于介质中的放大作用,谐振腔模能从介质中将可以利用的能量的相当大部分收集起来,而进入那些不受谐振腔反馈的模式中的能量,按每个模式计就少得多了。正是辐射这样集中到少数的量子模中,导致了激光所特有的相干性。

谐振腔模的一个重要参量是它的衰变时间 t_c 。在增益为零(这时以下所定义的粒子数反转变为零)的情况下,包含在给定谐振腔模中的非平衡能量 ΔE 呈指数式衰减: $\Delta E \approx \exp(-t/t_c)$ 。 t_c 的值与模式的环程损耗率 α 和谐振腔的往返光程长 L 之间的关系为

$$t_c = -L/c \ln(1 - \alpha), \quad (1)$$

式中 c 为光速。 α 所表征的损耗是由散射和吸收过程、衍射以及输出耦合引起的。通常, $\alpha \ll 1$, 故(1)式可以近似地表示为 $t_c = L/c\alpha$ 。

图1示出具有与辐射场的一个谐振模相互作用的两个量子能级的理想介质。这种介质可以在两个方向上产生受激跃迁,在单位时间内这两种受激跃迁的共同几率与辐射模的能量成正比。它也可能进行自发跃迁。单位时间内自发跃迁几率与辐射模的能量无关。对于受激发射过程,物质系统(以下称为电子)起初处在能级2上;而对于受激吸收过程,则能级1为初始态。只从能级2到能级1发生自发跃迁($E_2 > E_1$)。相互作用的这些简单特性是根据在量子理论中表示光子的算符的对易定则得出的(Heitler, 1954)。

为了使受激发射比受激吸收具有更大的几率,就必须实现粒子数反转,即 $N_2 - N_1 > 0$, 这里 N_1, N_2 分别是单位体积内处于每个量子态中的电子数。考虑到能级 g 重简并的可

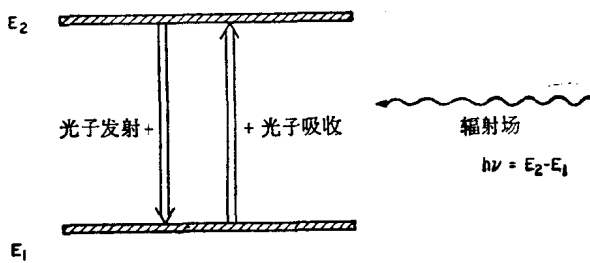


图1 二能级介质和辐射场之间的相互作用

能性,故单位体积内的粒子数反转 ΔN 更普遍地定义为(Birnbaum)

$$\Delta N = N_2 - N_1 g_2 / g_1, \quad (2)$$

而 $\Delta N > 0$ 是受激发射几率超过吸收几率所必须的条件。这里所考虑的吸收只包括激光跃迁所引起的吸收。在激光波长处有影响的其它跃迁只反映在 t_c 的数值上。

在 $\Delta N > 0$ 的情况下,会出现受激发射增益,其指数时间常数 t_g 由下式给出 (Schawlow and Townes, 1958; Yariv and Gordon, 1963):

$$t_g = 4\pi\nu^2 \Delta\nu n^3 L t_r / \Delta N c^3 L_m, \quad (3)$$

式中 ν 为激光跃迁频率; $\Delta\nu$ 为荧光线宽的 fwhm¹⁾; n 和 L_m 分别为激光介质的折射率和往返光程长; t_r 为发射能级的辐射寿命。(3) 式中已假定线形为洛伦兹型的。当多普勒展宽或作用在各个别电子上的局部场发生变化所引起的非均匀展宽占优势时,则高斯线形更适合。在那种情况下,(3) 式中的 $\Delta\nu$ 须用 $\Delta\nu/(\pi \ln 2)^{1/2}$ 代替。采用洛伦兹线形和高斯线形的折中常常更为适合 (Mitchell and Zemansky, 1961)。辐射寿命与发射态的荧光寿命 t_f 有如下关系:

1) fwhm 是“最大强度一半处的全宽度”的缩写。

$$t_s^{-1} = t_r^{-1} + \Gamma, \quad (4)$$

式中 Γ 为不能给出频率为 ν 的光子发射的发射态每秒内全部衰变的几率。

激光振荡的阈与条件 $t_g = t_c$ (即净光学增益为零的情况) 相对应。根据式 (1)、(2) 和 (3), 阈处的粒子数反转密度 ΔN_t 为 (Yariv and Gordon)

$$\Delta N_t = \frac{4\pi^2 \nu^2 \Delta \nu n^3 t_r \ln(1 - \alpha)^{-1}}{c^2 L_m}. \quad (5)$$

图 2 表示三能级和四能级激光器工作的衰变示意图。在三能级情况下, 激光跃迁终止于电子的基态上; 而在四能级情况下, 激光跃迁则终止于基态上方的一个能级上。当环境温度 $T \gg (E_1 - E_0)/k$, 或当 $1 \rightarrow 0$ 的跃迁速率不比激光器的自发跃迁速率与受激跃迁速率之和大很多时, 则对于所有的实际目的来说, 在给定环境温度 T 下, 四能级激光器的工作将和三能级激光器的工作一样。两种工作型式之间的实际差别乃是基于激光跃迁终止能级上的粒子集聚的程度。

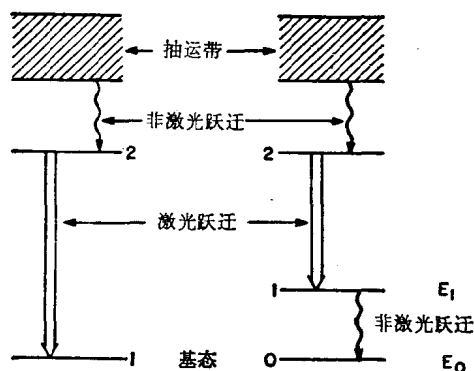


图 2 三能级和四能级激光系统跃迁示意图

在四能级激光器中, 为维持粒子数反转阈所必需的每单

位体积输入功率 P 为

$$P = \eta h\nu \Delta N_t / t_s \varepsilon, \quad (6)$$

式中 η 为平均抽运频率与 ν 之比, ε 为在抽运频率上再辐射的吸收功率或引起上激光能级粒子集聚的吸收功率对总吸收的功率之比。对于脉冲抽运运转, 输入能量密度 E (假定抽运和建立激光的持续时间比 t_s 短得多) 为

$$E = \eta h\nu \Delta N_t / \varepsilon. \quad (7)$$

对于三能级系统而言, 为维持粒子数反转阈, 相应的功率密度和输入能量密度为

$$E = Pt_s = \eta h\nu (\Delta N_t + N_{g2}/g_1)(1 + g_2/g_1)^{-1} \varepsilon^{-1}, \quad (8)$$

式中 N 为单位体积活性电子总数。对于非简并三能级系统, 为了达到阈, 必须使一半以上的活性粒子受到抽运, 而对理想的四能级系统, 当 α 变得很小时, 所需的抽运就变得任意地小了。固体激光器是用光抽运的激光器。为了达到阈, 所需输入抽运灯的电能依赖于 E 或 P 。此外, 也依赖于抽运灯的效率、抽运灯和抽运跃迁之间的光谱匹配、抽运光的收集效率、抽运跃迁的量子效率和振子强度以及 N 。对抽运的要求与激光材料的参量有关它们之间的详细理论关系以及与实验的比较, 可在文献中查到 (Yariv and Gordon, 1963; Geusic and Scovil, 1964)。

被抽运到上激光能级的一个电子, 最终将引起以下的过程之一: 1. 通过受激发射向振荡模提供给一个追加光子; 2. 产生一个频率为 ν 的自发发射光子; 或 3. 产生热能或者还加上一个或几个频率不为 ν 的光子。供给振荡模的能量或者变为相干激光输出, 或者被由 t_c 所表征的损耗机构耗散掉。输出耦合常常利用一个部分透射的谐振腔反射镜来实现。第 2 项和第 3 项的几率之比为 $t_s/(t_r - t_s)$ 。当 ΔN 变得比 ΔN_t 大以及当输出耦合成为损耗速率 t_c^{-1} 的主要部分时, 对激光器输