



北京市激光技术学习班

一九七四年十月

毛 主 席 语 录

入门既不难，深造也是办得到的，只要有心，只要善于学习罢了。

中国人民有志气，有能力，一定要在不远的将来，赶上和超过世界先进水平。

说 明

本教材供激光技术学习班学员学习和参考用。

教材包括固体激光器、气体激光器和半导体激光器三部份。分别由从事各该种器件研制工作的京字126部队、京字122部队和北大物理系激光专业编写。

由于本教材涉及面较广，在讲授和自学中可根据实际需要自选某些章节学习。

目 录

第一编 固体激光器件

第一章 固体激光装置与结构..... 1

§1.1 固体激光器的一般结构..... 3

§1.2 固体激光器对激光材料的要求..... 5

§1.3 泵灯及供电方式..... 8

§1.4 聚光装置——聚光器..... 13

§1.5 介质膜的选取..... 18

§1.6 固体激光器冷却方式..... 19

第二章 固体激光调Q技术..... 20

§2.1 调Q的必要性和一般方法..... 20

§2.2 转镜调Q..... 23

§2.3 电光晶体调Q..... 25

§2.4 染料调Q..... 40

§2.5 声光调Q..... 42

第三章 激光放大与倍频..... 46

§3.1 激光放大..... 46

§3.2 激光倍频技术..... 50

目 录

第二编 气体激光器件

第一章 氦氖激光器	2·1
§1·1 气体放电简介	2·1
1. 气体放电中的主要过程	2·2
2. 辉光放电和弧光放电	2·6
§1·2 氦氖激光器工作原理	2·9
1. 激光器的基本结构	2·9
2. 激发机理	2·12
3. 各种参量对输出功率影响	2·15
§1·3 输出特性	2·21
1. 输出特性参量	2·21
2. 输出的稳定化	2·25
§1·4 激光器设计的简单考虑	2·27
§1·5 提高输出功率的措施	2·31
1. 一般考虑	2·31
2. 采用同位素 H_3	2·32
3. 抑制 3.39μ 振荡	2·34
§1·6 寿命和阴极	2·40
1. 寿命	2·40
2. 阴极	2·43
§1·7 应用	2·44
附录: 氦镭激光器简介	2·46

第二章 二氧化碳激光器.....	2·50
§2·1 引言.....	2·50
§2·2 二氧化碳激光器工作原理.....	2·50
§2·3 二氧化碳激光器结构及设计考虑.....	2·53
§2·4 影响二氧化碳激光器输出功率的因素.....	2·56
§2·5 简单的制造工艺.....	2·61
§2·6 新型的二氧化碳激光器.....	2·62
1. 横向激励大气压二氧化碳激光器.....	2·62
2. 气动激光器.....	2·64
§2·7 二氧化碳激光器的应用.....	2·65
第三章 氩离子激光器.....	
§3·1 概况.....	
1. 历史概述.....	
2. 氩离子激光器特点.....	
3. 实用氩离子激光器的组成.....	
§3·2 放电管中主要物理过程.....	
1. 激发过程.....	
2. 集数反转.....	
3. 输出功率的计算.....	
4. 分段金属放电管电位分布.....	
§3·3 放电管的管壁材料.....	
1. 管壁材料的重要性.....	
2. 管壁材料的选择.....	
§3·4 分段石墨放电管.....	

1. 放电管结构.....	
2. 设计考虑.....	
3. 内部回气管.....	
§3.5 氦离子激光器性能.....	
1. 输出功率与放电电流关系.....	
2. 输出功率与气压的关系.....	
3. 轴向磁场的作用.....	

目 录

§ 1	引言	3. 1
§ 2	砷化镓结型激光器的制作	3. 2
§ 2. 1	对GaAs单晶材料的要求和衬底的制备	3. 5
§ 2. 2	F-N结的形成	3. 8
§ 2. 3	欧姆接触的形成	3. 11
§ 2. 4	谐振腔的形成及激光管的封装	3. 14
§ 3	P-N结和半导体激光器原理	3. 17
§ 3. 1	结的单向导电性	3. 17
§ 3. 2	P-N结的能带	3. 19
§ 3. 3	半导体受激光发射条件。粒子的 反转分布	3. 26
§ 3. 4	半导体受激光发射的阈值条件和结 型激光器的阈值电流密度	3. 32
§ 4	砷化镓结型激光器的特性	3. 35
§ 4. 1	阈值性质	3. 35
§ 4. 1. 1	阈值电流的测定	3. 35
§ 4. 1. 2	阈值电流的实验研究	3. 40
§ 4. 2	功率输出和转换效率	3. 45
§ 4. 3	光谱性质	3. 51
§ 4. 4	GaAs P-N结激光器光束的空间分布	3. 57

§4.5	脉冲工作.....	3.62
§4.6	GaAs激光器的损伤和老化.....	3.65
§5	室温连续工作的 $\text{Ga}_{1-x}\text{Al}_x\text{As-GaAs}$	
	双异质结激光器.....	3.67
§5.1	$\text{Ga}_{1-x}\text{Al}_x\text{As-GaAs}$ 双异质结	
	激光器的构造.....	3.67
§5.2	能带结构和载流子、光波限制作用.....	3.71
§5.3	阈值电流密度和有源区宽度d的关系...	3.75
§5.4	室温连续工作条件.....	3.77
§5.5	双异质结激光器室温连续工作的	
	寿命问题.....	3.81
§6	其他类型的半导体激光器.....	3.85
§6.1	外腔式GaAs结型激光器.....	3.85
§6.2	可调谐半导体激光器.....	3.89
§6.3	电子束激励的半导体激光器.....	3.95

固 体 激 光 概 况

固体激光是出现最早的一种激光，第一台脉冲固体激光器是在1960年试制成功的，当时采用红宝石做为激光材料，用脉冲氙灯做激光光源，其发射激光波长为 6943Å 。由于激光的出现使古老的光学领域得到了新的发展。目前已先后研制出钕玻璃、掺钕磷酸钙、掺镨氟化钙、钕铝石榴石和铝酸钕等固体激光材料。它们的发射波长都在近红外区，但由于性能优劣不同，有些材料已被淘汰了，其中以钕玻璃生长尺寸最大，输出水平最高，材料制备容易，目前应用最广，但是激光发射效率，光泵激励域值不如钕铝石榴石优越，石榴石晶体还具有导热性能较好，温度变化对激光发射影响较小等优点，所以目前中小功率的连续激光器和高重复频率脉冲激光器多采用石榴石做激光材料，由于石榴石晶体主要采用拉晶法和熔盐法生长，目前获得几十厘米长的大晶体还有不少困难，今后随着石榴石晶体尺寸的增大，应用必将前途宽广。铝酸钕是最近两年新研制的一种晶体，许多性能可以和石榴石比美，据报导它的光激励效率比石榴石还要高些，但在制备上现在还未完全过关。

随着激光材料的发展，固体激光器件的水平不断提高。工作方式也出现多种，按主要工作状态分类，可以分成：

单脉冲式——按此方式，激励光源和激光发射均是一个单次脉冲过程，目前单脉冲钕玻璃固体激光器的发射能量可以达到一万焦耳以上。

重复脉冲式——激光光源和发射激光是采取重复频率脉冲方式工作，其重复频率可以从每秒一次到几十次，最高可达几百次。对

于几十次重复频率工作的石榴石器件每次发射能量可达几焦耳。

连续方式——用连续光源激励工作物质，输出激光也是连续的。目前石榴石晶体是比较理想的连续工作物质，它在常温冷却下就可以实现连续发射，其发射功率已达1000瓦左右。还有一种准连续方式也属于连续方式之列，准连续器件激励光源直接用50周/秒交流市电点燃的，因为交流电正半周与负半周对于点燃泵灯是完全等效的，所以输出激光是每秒100次毫秒数量级宽脉冲。

高频脉冲式——这种方式与重复脉冲式不同点是它的重复频率更高，一般在1000次/秒以上，最高已达5000次/秒，它的激励光源采用连续工作方式，用电开关或其它形式开关对激光进行调制而获得高频激光脉冲。目前对于5000次/秒的高频激光脉冲输出可达10000瓦以上。

毫微秒脉冲式——在单次或重复脉冲式的基础上加有调制激光谐振腔Q值的装置，把发射激光压缩在毫微秒数量级的时间内，从而获得高峰值功率的激光脉冲，目前可获得脉宽为1—10毫微秒，峰值为千瓦左右的巨光脉冲。

微微秒脉冲式——在毫微秒脉冲式基础上加有锁模装置，然后经过选模放大，从而获得 μs （微微秒）数量级的激光脉冲，峰值功率可达兆瓦数量级。

我国的激光技术是从1961年起开始研制的，十多年来，在毛主席关于自力更生和赶超世界先进水平的教导下，特别是无产阶级文化大革命以来，激光这门新技术发展迅速，犹如雨后春笋，遍地开花之势，激光材料和器件水平都有很大进展，在国防工业、通讯、医学以及科学研究等部门获得了不少应用，今后随着激光技术的发展和普

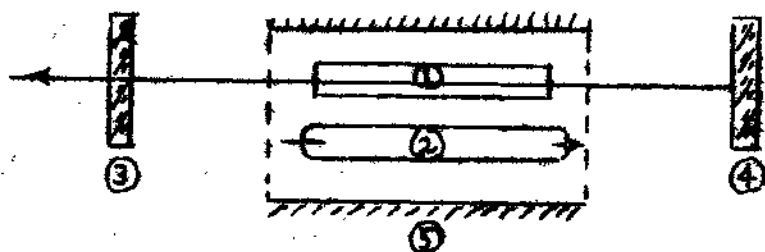
及，应用必将越来越广，在国民经济和加强国防等方面将显示出它的巨大作用。

第一章 固体激光装置与结构

§ 1-1 固体激光器的一般结构

固体激光器的基本工作原理在上一篇已经讲过了。如果我们用简单的言语概括可以归结如下：即实现激光发射的晶体材料本身存在一个非常锐的亚稳能级，当激发作用足够强时，有可能使亚稳态的粒子数超过基态（对三能级）或终态（对四能级）的粒子数，从而达到粒子数反转，构成光子放大的内在条件，采用适当结构和工艺，使光子放大作用形成稳定振荡，即超过阈值以上，便实现了受激光发射。

然而为了在实践上获得激光输出，必须合理设计一个激光装置——激光器。最简单的激光器是由晶体棒、激励灯、聚光腔和谐振腔等四部分构成的，如图一所示。



图一，固体激光装置示意图

①激光晶体棒，②激励灯，③、④谐振腔反射膜，⑤聚光腔

晶体棒是实现激光发射的物质材料，通常加工成圆柱状，两端磨成平行光学平面，激发泵灯多采用直管状汞灯，其灯弧的长度和弧径与晶体棒相匹配，为了使激发光有效地照射在晶体棒上，必须采用聚光装置——聚光腔。聚光腔的结构有多种，主要有圆柱状，单椭圆、双椭圆、和球状等聚光腔，但考虑聚光效率和加工的方便，最常用的

还是单椭圆聚光腔。晶体棒和灯分别置于椭圆的两个焦点上，从一个焦点——即灯位置发出的光被聚光腔聚焦在另一个焦点上被晶体棒吸收。晶体棒两端的反射膜构成谐振腔，在调整时与晶体棒端面相平行。反射膜是用光学玻璃平片经过真空蒸镀介质制成的，所以又称多层介质反射膜，其中一个介质反射膜的反射率近似100%，做为全反射端，另一个介质膜为部分反射膜，做为激光的输出端。

我们假定在这个装置中选用钕铝石榴石（简称YAG）晶体做为激光材料，则当激发灯点燃后便发出下列几个过程：

① 灯光被聚光器在激光晶体上并在某些波长上产生吸收，晶体内的 Na^{+3} 激活离子由基态跃迁至激发态，并很快以无辐射跃迁至亚稳态能级停留积累，

② 最先跳到亚稳态的粒子由于自发辐射开始跃迁到终态，同时发出一个光子，此光子的能量对应于亚稳态与终态的能量差，其波长为 1.06μ ，自发辐射放出的光子便从激光晶体材料的圆壁和两端向四面八方逸出，

③ 从圆壁射出的光子不再回到激光晶体棒内，但沿着激光晶体棒轴线射出的光子在碰到反射膜后被反射回来，当此光子重新进入激光晶体时，便发生感应跃迁，产生许多同频率、同方向、同相位、同偏振的光子，即产生光子的放大作用。当这一批光子从晶体棒另一端面射出碰到部分反射膜时，便有一部分光子再次折回，进入晶体棒，继续产生光子放大作用。如此反复，当光子放大足以克服系统的各种损耗时，便在两个介质膜中间形成稳定的光驻波振荡。在输出介质膜端耦合出去的一部分光能便是激光输出。

由此可见，没有谐振腔，激光材料就不能形成持续振荡条件，

此外，諧振腔还保证了激光的方向性，以及对振盪频率起选择作用，进一步单纯了激光的单色性。

在图一的装置中，当激发灯是处于脉冲状态工作时，諧振腔内便在一瞬间形成稳定振盪，从而得到脉冲激光输出，其脉冲的重复频率则由灯点燃的重复频率决定，如果用直流或交流灯激发，便获得连续或准连续激光输出。

§ 1-2 固体激光器对激光材料的要求

激光材料是激光器件的核心，激光材料的物理特性及光学质量的好坏对于器件起着重要影响。物理特性是制备材料时首先应该考虑的，性能优越的激光材料应该具有较长的荧光寿命，较高的量子效率，宽的吸收光谱，大的吸收系数，锐的发射光谱和良好的热导性。当激光材料的种类已经确定，则需注意其光学质量，首先，激光晶体内部应该无气泡、条纹和杂质，应力小，浓度均匀，否则将产生严重的散射损耗，吸收损耗和退偏损耗，使激光器件阈值提高、效率下降，甚至没有激光发射。

由于目前激光材料的种类是有限制的，比较成熟而且常用的激光材料只有红宝石 ($\text{Al}_2\text{O}_3 : \text{Cr}^{3+}$)、钕玻璃、钇铝石榴石 ($\text{Y}_3\text{Al}_5\text{O}_{12} : \text{Nd}^{3+}$) 等。因此在研制激光器件时，只能根据现有激光材料进行选取。上述三种材料，各有其优点和缺点，对于单脉冲大能量、大功率的应用，应该选取钕玻璃，输出几十焦耳，低重复频率（比如1次/秒至10次/秒）的应用一般选取红宝石，而对于高重复频率和连续工作则选用石榴石是最佳的。几种激光材料的器件水平和性能水平可参考下表。

几种激光材料目前水平比较表

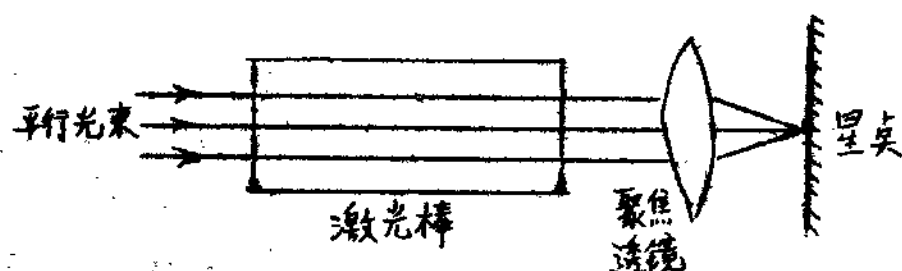
性能项目 材料	工作波长	最大尺寸	激励阈值 (尺寸相同)	适合工作率 频率	单脉冲 最高输出 能量	连续工作
红宝石	6943Å	0.5米 左右	最高	20次/秒 以下	几百焦耳	几瓦 (困难)
钕玻璃	1.06μ	1~2米 左右	中	单脉冲	万焦耳 左右	/
石榴石	1.06μ	<150 厘米	最低	1~5000次/秒	几焦耳	1000W 左右

当选好激光材料后，需要进行光学加工，一般都加工成圆柱状，长度与直径比为10:1左右，对于连续固体激光器，这个比例应大些，可以选取12:1到15:1之间的值，激光晶体棒粗虽然对激光输出能够增加，但是相应要提高阈值如冷却效果不好使激光材料发热，甚至可能使激光材料炸裂。

激光棒圆壁一般应打毛，光洁度▽7~▽9左右，打毛比抛光容易且效率略高，两端面需磨平、抛光，其平度磨1/8光圈，光洁度优于P11，两端面平行度为5"~10"左右。

在激光器件实践中发现，有些激光材料虽然机械上两端面磨成平行，但由于浓度不均匀和存在应力，晶体内部的折射率 n 是不均匀的，造成激光棒不同区域不是等光程的，即光学上不是平行的，结果使激光光斑发散，损耗增加，效率降低。为了弥补激光材料光学上的不均匀性，加工晶体棒时需要进行等光程修磨，通常称为修星点。如图二的光路中，

一束平行光经过透镜聚焦，在焦面上将会聚成一个光点。当把加工好的激光晶体棒介入光路中，若晶体棒是完全光学均匀的，则原来的光点不应有发散，位移和形状上的变化，如果晶体棒光学不均匀，则使原来的平行光受到部分破坏，反映在光点上便造成发散和变形等等。通过对晶体棒端面局部修磨使其介入平行光路时对成像光点影响最小为止，即为完成星点修磨。当然这需要有好的加工经验和修磨技术，否则不易获得很好的效果。



图二，检验激光棒星点简单光路

在重复频率器件和连续器件中，由于冷却液只能接触激光晶体棒侧壁，并且由于激光材料的热导率都不甚良好，晶体棒直径的中心和外圆便产生温度梯度，根据热胀冷缩的道理，晶体棒中心便向外凸出，结果两端形成凸球面，造成激光近场会聚和远场发散，破坏了谐振腔内激光准直性，并使输出减小。为了克服这种热透镜效应，激光晶体棒两端不是磨成平行平面，而是磨成凹球面，凹面曲率随着重复频率次数和每次输入灯能量不同而改变，一般可用实验来确定。例如，一根 $\phi 8 \times 80 \text{ mm}$ 的钕铝石榴石晶体棒，当在每秒20次重复频率下工作，激发灯每次输入能量为40~50焦耳时，修磨晶体一端需低5~6个光圈，若两端同时修磨，每端应低2~3个光圈，其等效

四面曲率半径为2~3米左右。

§ 1—3 泵灯及其供电方式

固体激光器均采用光激发方法，脉冲激光器主要采用氙灯激励，而连续石榴石激光器则采用氪灯、镨灯或氩弧灯。红宝石常温下实现连续工作是比较困难的，但是用高亮度连续汞灯激发，获得低功率输出连续红宝石激光也是可能的。

灯的尺寸长短与灯弧直径应与激光棒匹配，弧径与晶体棒直径应相等或略小一些，而长度基本相等即可。所有激发灯管壁均采用石英材料，电极可用钍钨、铈钨和钨钨。钍钨电极灯出现较早，但由于其寿命短而逐渐被铈钨电极灯所取代，目前所研制的钨钨电极灯具有更长的寿命。例如，一支灯弧为 $\phi 6 \times 80\text{mm}$ 非水冷电极的铈钨电极的氙灯，当20次/秒、40~50焦耳/次条件工作时，可点燃5~10万次（当光效下降到起始的70%时）；而同样钨钨电极灯在同样条件下工作时，可点燃50万次以上。可以预言，随着钨钨电极灯的发展，将大大提高激光器件的稳定性，延长使用寿命，并为民用带来巨大方便。

为了使激发灯能够点燃，需采用合理的供电方式。对于钍钨灯和单脉冲氙灯点燃是比较容易的，这里不再介绍。我们着重把连续激发氙灯和重复频率下工作氙灯供电方式加以介绍。

图三是点燃连续K_Y灯的一个比较先进的实用线路略图。

（见下页）