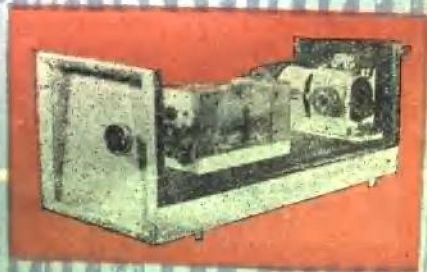


固体激光技术基础丛书之六

重复率和连续激光器

《重复率和连续激光器》编写组



上海人民出版社

.1

固体激光技术基础丛书之六

重复率和连续激光器

《重复率和连续激光器》编写组 编

上海人民出版社出版

(上海绍兴路5号)

新华书店上海发行所发行 上海市印刷三厂印刷

开本 787×1092 1/32 印张 3.75 插页 1 字数 76,000

1977年10月第1版 1977年10月第1次印刷

统一书号：15171·297 定价：0.25元

毛主席语录

领导我们事业的核心力量是中国共产党。

指导我们思想的理论基础是马克思列宁主义。

自力更生为主，争取外援为辅，破除迷信，独立自主地干工业、干农业，干技术革命和文化革命，打倒奴隶思想，埋葬教条主义，认真学习外国的好经验，也一定研究外国的坏经验——引以为戒，这就是我们的路线。

前 言

激光是一项迅速发展着的新技术。无产阶级文化大革命以来，在毛主席革命路线指引下，广大工农兵群众破除迷信，解放思想，自力更生，艰苦奋斗，发奋图强，大搞群众运动，我国的激光技术有了飞跃发展。目前已在工、农业生产、医疗卫生和科学研究方面得到广泛的应用。为了适应激光技术发展的需要，我们陆续编写了这方面的书籍。固体激光器包括内容较多，关于晶体材料和光泵等都已出版了小册子。本书着重介绍器件本身的一些问题。遵照伟大领袖毛主席的“要认真总结经验”和“洋为中用”的教导，我们在总结工作的基础上，同时综合国外有关资料，编写成《重复率和连续激光器》，希望对从事这方面工作的同志有所启发和帮助。

本书共六章，前两章说明固体激光器对材料的要求，以及高重复频率器件和连续器件因增益的高低不同对输出耦合有不同的要求。第三、四两章先介绍无源光频腔的一些基本性质，然后着重分析了固体器件的热效应，如热焦距和热双折射，并给出克服这些效应的一些方法。第五章从原理方面介绍了高重复频率电源和连续电源，并附了目前一般用的线路图。第六章讨论了高重复频率和连续激光器的冷却问题，如冷却液的选择、冷却方式和流速，介绍了这两种器件的一些实际工作情况，并附上器件结构图。本书尽可能介绍固体器件方面的一些与实际结合得紧的知识，然而固体器件所涉及内容比较广泛，发展又很迅速，所以本书是很不完善的。本书由凌君达、叶碧青和胡企铨三位同志执笔，由于编者水平有限，书中有不妥之处恳请读者批评指正。

编者 1976年12月

目 录

第一章 对激光材料的要求	1
第一节 能级结构	1
第二节 荧光寿命	2
第三节 荧光线宽	3
第四节 线宽的均匀加宽与非均匀加宽	4
第五节 基质特性	6
第六节 阈值和储能	8
第二章 光泵阈值和最佳耦合	13
第三章 激光共振腔的特性和应用	21
第一节 激光共振腔的特性	21
1. 基模	22
2. 曲面共振腔模式性质	30
3. 高阶模	32
第二节 共振腔的损耗	33
1. 低阶模的衍射损耗	35
2. 类共焦腔的衍射损耗	37
第三节 共振腔的设计和应用	41
1. 腔长	41
2. 自孔径化选模、空间烧孔现象	41
3. 几种共振腔的一些具体数据	42
4. 激光输出和模式匹配	47
第四章 热透镜和热双折射效应及其补偿	50
第一节 热焦距的分析	50

第二节	热焦距的测定	57
第三节	内有热透镜激光腔的等效	59
第四节	内有热透镜激光腔的补偿	63
1.	修端面	63
2.	用凸镜补偿	64
3.	成象镜的利用	65
4.	实测热焦距的数据处理	66
第五节	热双折射的分析	67
第六节	热双折射效应的处理	72
第五章	固体高重复频率和连续激光器的供电	75
第一节	闪光灯的触发	76
1.	外触发	76
2.	内触发	77
3.	预电离导电方式	79
4.	触发频率提高时,可控硅的闭锁问题	80
第二节	高重复频率激光器的供电	82
1.	高重复频率激光器的供电	82
2.	纯电阻限流供电方案	84
3.	可控硅-电感-电容共振充电供电方案	86
4.	半波整流 50 C/S 分频供电方案	92
第三节	连续激光器的供电	96
第六章	高重复频率和连续激光器的冷却	98
第一节	冷却剂的选择	98
第二节	冷却方式	101
第三节	冷却剂的流量和温度	103
第四节	两种固体激光器的性能	110

第一章 对激光材料的要求

可用来做高重复频率(简称重复率)和连续工作的固体激光材料,首先必须要有低的振荡阈值。阈值是由激活离子的能级结构、光谱特性、浓度、基质和共振腔等因素决定的,在各种因素中,激活离子和基质特性是重要因素。一般来说,能产生激光作用的材料有好几十种。但是,适合于高重复频率和连续工作的激光材料仅有限的几种。最早是用红宝石在液氮温度下做出连续激光,其他有氟化钙(Ca_2F_2)中掺 Dy^{3+} 、 Tm^{2+} 、 U^{3+} 、钨酸钙(CaWO_4)和钼酸锶(SrMoO_4)中掺 Nd^{3+} , 钹玻璃,掺钹钇铝石榴石、铝酸钇和氟磷酸钙中掺 Nd^{3+} 等。早期红宝石和氟化钙 Dy^{3+} 等实现的连续输出,因需低温条件,输出也不大,没有实用价值。近期用钇铝石榴石,铝酸钇获得了连续和高重复频率的高功率激光输出,用红宝石和钹玻璃获得了中等重复频率的特高功率输出,表明它们是一些优良而有成效的激光材料。这些绝不是偶然的现象。下面我们从高重复频率和连续激光器所共有的一些特点来分析对材料的要求。

第一节 能级结构

固体激光器中,红宝石是典型的三能级系统(图1a)。三能级系统的基态即终态,为了达到必须的粒子数反转,要有

半数以上的基态粒子被激发到高能级上。因此阈值条件较高。固体激光器继三能级系统之后发展了四能级系统(图1b), Nd^{3+} 的能级是其典型例子。

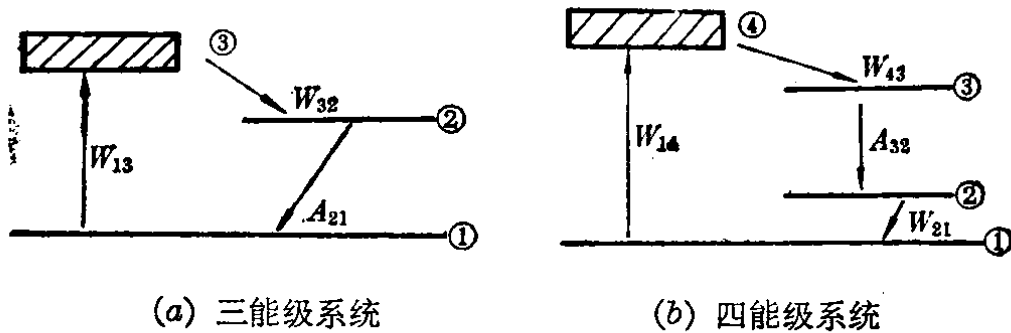


图1 工作物质能级图

Nd^{3+} 的发光是 ${}^4\text{F}_{3/2}-{}^4\text{I}_{11/2}$ 多重态间的跃迁, 最强者为 ${}^4\text{F}_{3/2}-{}^4\text{I}_{11/2}$, 位于 1.064 微米。终态离基态相当高, 约有 2000 厘米^{-1} 。因此, 四能级系统在室温情况下终态能级几乎是空的, 假定粒子数按玻耳兹曼分布, 在室温下终态能级 2 上的粒子数只有基态粒子数的万分之一。在亚稳态 3 稍有粒子数积累就能达到粒子数反转, 所以振荡阈值大大降低, 四能级系统不需很高的激发功率。因此, 在高重复频率和连续器件的较低的光泵水平下, 四能级系统是有利的。

为了有效的吸收光泵激励功率, 激活离子应有较宽的吸收带, 吸收波段应和光泵有很好的匹配, 吸收系数应较高。为了达到此目的, 敏化的方法也是常常采用的。这时激光材料中除了激活离子外还掺杂了敏化杂质。

第二节 荧光寿命

光泵将基态的粒子激发到亚稳态, 光泵愈强激发的粒子愈多愈快。在光泵停止后, 亚稳态上的粒子将由于自发辐射而

减少。荧光寿命是衡量粒子在亚稳态上停留的时间。荧光寿命长，有利于激发粒子在亚稳态上积累，也即有利于能量的贮存。这对低光泵连续的和高重复频率的激光器是有利的。有人曾分析了三能级系统和四能级系统的阈值，阈值功率和 $\frac{\Delta\nu}{\tau_{\text{自发}} \cdot \tau_{\text{腔}}}$ 成比例，荧光寿命愈长阈值愈低，这里 $\tau_{\text{自发}}$ 对四能级系统是 τ_{32} (或对三能级系统是 τ_{21})。自发辐射跃迁几率是荧光寿命的倒数。寿命愈短跃迁几率愈强，一般我们用寿命时间的长短说明跃迁几率的强弱。

在脉冲光泵作用下，阈值在很大程度上取决于光泵的脉冲持续时间相对于荧光寿命的长短。同样光泵能量，作用时间愈短，激光器的阈值愈低，然而考虑到灯的寿命，作用时间愈长愈有利，一般高重复频率能量器件的光泵作用时间等于或略长于荧光寿命。在光泵功率不变情况下，通过延长光泵时间来达到阈值是行不通的。因为粒子数反转在光泵持续两三个荧光寿命时间内就达到平衡，这个原则对高重复能量器件和连续器件都是适用的。在高重复频率调 Q 器件的情况下，要将高能态积累粒子一次化为激光，所以光泵作用时间长于荧光寿命是没有意义的，否则高能态上粒子白白消耗于自发辐射，连续光泵调 Q 器件也是如此，连续激光器经 Q 调制后以重复频率的巨脉冲输出时，其最佳的重复频率约为 $\tau_{\text{自发}}$ 分之一。

第三节 荧光线宽

激光材料所发出荧光波长具有一定范围，这个波长范围

即荧光谱线宽度。不同的激活离子有着不同的荧光线宽。由于激光共振腔的作用，激光线宽比荧光线宽要窄得多。荧光线宽中只有与激光线宽重合的那一部分对激光才有贡献。光泵愈强，亚稳态上的粒子也愈多，单位线宽上的荧光强度 I_0 也愈大。激光的增益 g_0 和 I_0 成比例， $g_0 \propto I_0$ 。荧光线宽下的面积代表荧光强度的总和，它和亚稳态上粒子反转数成比例。在增益相同 (I_0 相同) 的情况下，荧光线宽愈宽所需要的

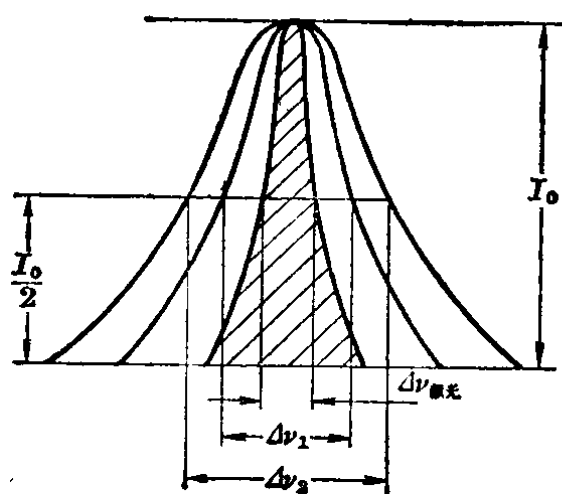


图2 荧光线宽和激光线宽

粒子反转数也愈大，如图2所示。 $\Delta\nu_2 > \Delta\nu_1$ ，在同样增益情况下， $\Delta\nu_2$ 所需要粒子反转数要比 $\Delta\nu_1$ 的多。例如钕玻璃荧光线宽要比掺钕钇铝石榴石的宽30倍，因而，同样增益情况下，钕玻璃的粒子反转数比掺钕钇铝石榴石要大30倍。因此线宽窄

有利于制作连续器件和一般脉冲工作的重复频率器件。

但是应该指出，线宽较窄不利于能量的贮存。对于以巨脉冲工作的重复频率器件，线宽较窄限制了输出功率。

第四节 线宽的均匀加宽与非均匀加宽

假如激活离子在基质中受到完全相同的作用，那么因离子间相互作用而产生的一定谱线宽度叫作均匀加宽线宽。我们激发个别粒子时，由于粒子间的相互作用很强，可将激发能量传递给整个离子系统。激光共振腔的线宽比均匀加宽的线

宽窄，在激光作用的瞬时不断抽空 $\Delta\nu_{\text{激光}}$ 范围内的那一部分粒子，然而由于粒子相互作用（或者离子与基质的相互作用），整个荧光线下下的粒子都可以不断补充 $\Delta\nu_{\text{激光}}$ 的空缺，使谱线仍保持原来的形状，只是幅度减小而已。均匀加宽的谱线所对应的高能态粒子对激光输出都有贡献。这种提供激光输出的方式是储存能量方式，而不是直接提高单程增益，因而对巨脉冲方式工作特别有利。由于激光技术不断的发展，巨脉冲越来越窄，在微微秒脉冲情况下，应考虑均匀加宽的烧洞（或称凹陷效应）影响。

由于基质不均匀而引起的谱线加宽，叫做非均匀加宽。实际的谱线是两种加宽并存。如果均匀加宽的线宽比非均匀加宽线宽窄很多，则总的荧光线下可以看成是许多均匀加宽线宽的迭加，如图 3(a) 所示。虚线表示均匀加宽的窄线，包络线是非均匀加宽线，以实线表示， f_0 是线型中心频率。例如掺钕钇铝石榴石均匀加宽线宽 2 埃，由于晶体质量差，使能级弥散，原来荧光中心线为 10641 埃，分散后加宽为 20 埃。一旦激光作用瞬间抽空中心频率为某一值的粒子，其他粒子因实际处于不同的状态，不可能填补这一空缺。这样谱线的轮廓线上就有一凹陷，产生了所谓非均匀加宽烧洞现象，如图 3(b) 所示。非均匀加宽不利于激光输出。不对应激光频率的那些高能态上粒子白白地吸收光泵能量，而对激光输出毫无贡献，反而因其耗散的热量产生激光材料的热畸变，这是高重复频率和连续器件中应竭力避免的事。

虽然激光晶体的谱线是均匀加宽的，也还会有烧洞现象，在激发作用下，工作物质棒某一部分的粒子反转数，被某一激光模式消耗掉，其他的粒子反转数，由于空间弛豫缓慢无法补

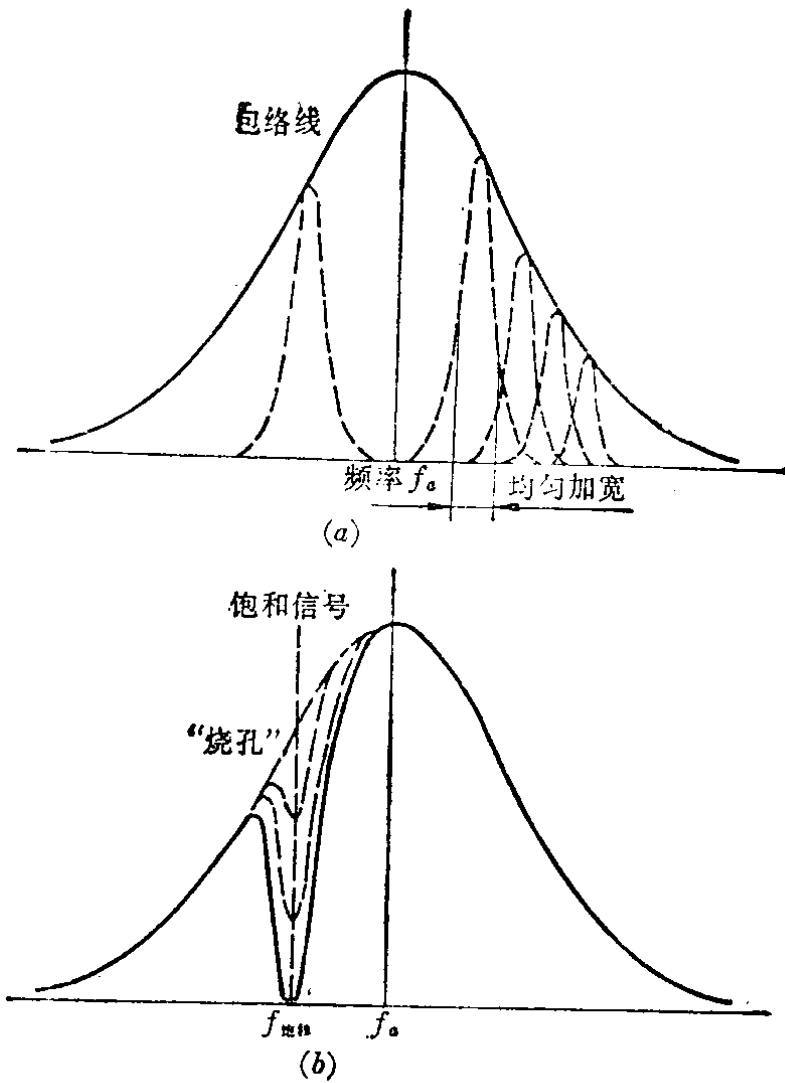


图3 实际的谱线形状及烧孔现象

充,因而形成该局部区域粒子数反转抽空现象,这就是空间烧洞现象。不同模式在棒的空间内分布不同,一种模式因空间烧洞现象淬灭了,反而有利于另一种模式振荡的建立,激光器在多模工作情况下,往往因为空间烧洞现象而引起各种模式之间竞争,因而造成输出不稳定。

第五节 基质特性

材料基质的选择在很大程度上会影响掺杂离子的光谱和

激光特性，合适的基质是制备优良的高重复频率和连续工作的激光材料的保证，基质的选择除了希望能满足有合适的激活离子光谱和激光特性以及优良的光学质量外，它们的物理化学特性也是必须考虑的因素。高重复频率和连续工作的激光材料除了和一般脉冲器件的激光材料一样要考虑其机械性能好(强度高, 硬度大, 加工容易等)、稳定性高(温度、湿度、光照及辐射的影响小和耐化学腐蚀性等)，制备容易和价廉外，更须关心其热学性质，例如要求膨胀小，热导率高，折射率温度系数小等。因为在高重复频率和连续工作的激光器要求其激光材料具有优良的热学特性，以便很好地消散因材料内部无用损耗而产生的热，以求减少热状态对激光性能的影响。激

表 1 主要激光工作物质的物理性质

项 目	红宝石	YAG	FAP	YAlO	钕玻璃
成 份	$\text{Al}_2\text{O}_3(\text{Cr}^{3+})$	$\text{Y}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}$	$\text{Ca}(\text{PO}_4)\text{F}$	YAlO_3	K-B-Si
晶 系	六方晶系	立方晶系	六方晶系	斜方晶系	固熔体
密度(克/厘米 ³)	3.9~4.0	4.18	3.20	5.18	2.6
熔点(°C)	2040	1950	1705	1875	~600°C 渐冷点
硬度(莫氏)	9	8.5	5~5.5	8.5~9	
折射率(N_D 线)	n_o 1.768 n_e 1.760	1.826	n_o 1.634 n_e 1.631	$n_a=1.97$ $n_b=1.97$ $n_c=1.94$	1.52
热膨胀系数 (°C ⁻¹ 室温)	6×10^{-6}	7.7×10^{-6}	9×10^{-6}	2.2×10^{-6}	10×10^{-2}
导热率(室温) (卡/厘米·秒·°C)	0.077	0.03	0.005	0.03	0.002

光材料的发热对激光器性能的影响简单说来有：材料发热引起激活离子量子效率的减小；使放大系数降低；振荡阈值提高；输出的能量减少；激光波长的漂移；材料因热产生形变和应力；引起热焦距、热双折射和激光输出偏振态的改变；材料内的温度梯度引起激光共振腔几何尺寸的改变；折射率分布的不均匀；使激光输出模式和方向性改变。至于如何克服热状态的影响，我们在第四章还要详细叙述。

现将主要激光工作物质的物理性质列于表 1。

第六节 阈值和储能

前面我们讨论了线宽、荧光寿命对阈值的影响，此外吸收截面对增益和阈值都有影响，在实际测定中，定义吸收截面 σ 为

$$\sigma = \frac{AC^2}{8\pi\nu_0^2\Delta\nu} g(\nu_0) \quad (1-1)$$

其中 A ——自发跃迁几率，

$g(\nu_0)$ ——线型因子，

$\Delta\nu$ ——线宽，

ν_0 ——工作频率。

从上式可以看出吸收截面与自发跃迁几率成正比，与线宽成反比，双程增益为

$$G = \exp[2\Delta N\sigma l] \quad (1-2)$$

其中 ΔN ——是在光泵作用下每立方厘米内粒子反转数。

工作物质内的增益恰好能抵消损耗时，就达到了阈值条

件, 因此有

$$R \exp[(\Delta N_0 \sigma - \delta) 2l] = 1 \quad (1-3)$$

式中 R ——输出镜反射率;

l ——棒长;

δ ——工作物每厘米的损耗;

ΔN_0 ——在阈值时, 每立方厘米内粒子反转数。

另一反射镜为全反射, 所以上式代表双程增益与损耗的关系。在求阈值条件时, 一般采用高反馈条件即输出镜反射率 R 接近 1。工作物质的损耗差异很大, 能作为激光材料使用的损耗都较小, 现在假定

$$\delta = -0.01 \text{ 厘米}^{-1}$$

因而, $\Delta N_0 \sigma = +0.01 \text{ 厘米}^{-1}$ (1-4)

表 2 中的第 5 项 ΔN_0 就是根据 (1-4) 式计算得到的。红宝石是三能级工作系统, 所以还要将基态粒子数泵浦一半到高能态上去, 所以要增加 80×10^{17} 。将 ΔN_0 除以荧光寿命就得到阈值功率。实际测得的阈值列于表 2 第 7 项, 并标明工作物尺寸。

在计算储能时, 因选定最高可达到的增益 G 值不同, 而有不同结果。现表 2 中列有红宝石, 红宝石能达到的最大增益是有限的。假定红宝石的粒子反转数是粒子总数的一半, 求得的 G 值是 5, 所以我们根据 $G=5$ 计算了其他几种材料的储能值。 δ 相对于增益可以忽略,

$$G = \exp[\Delta N_0 \sigma \times 2l] = 5 \quad (1-5)$$

式中 ΔN_0 ——假定工作物的截面是 1 平方厘米, 棒长 5 厘米, 我们将结果列于表 2 第 8 项 ($G=5$) 一列。

对于红宝石来说 $G=5$ 是很高的值, 也是它的实际极限

表 2 主要激光工作物质的性能参量

项 目	1	2	3	4	5	6	7		8
							实际测量阈值	储能 $\Delta N_c h\nu$	
工作物质基 质与离子	典型离子 浓度 (厘米 ⁻³)	跃迁截面 σ (厘米 ²)	荧光寿命 τ (秒)	线宽 $\Delta\nu$ (厘米 ⁻¹)	增益为 1% 厘米 ⁻¹ (ΔN_c /厘米 ³)	计算阈值 $\Delta N_c h\nu/\tau$ (瓦)	脉冲 (焦耳)	连续 (瓦)	$G=5$ (焦耳/厘米 ³) $G=10^8$
红宝石 Cr ³⁺	1.6×10^{19}	2×10^{-20}	3.0×10^{-3}	21	$(80+5) \times 10^{17}$	810	280 ($\phi 7 \times 120$)		1.2
YAG:Nd ³⁺	6.0×10^{19}	80 $\times 10^{-20}$	0.25 $\times 10^{-3}$	7.5	0.12×10^{17}	9.3	2~5 ($\phi 6 \times 75$)	900 ($\phi 6 \times 75$)	0.038 0.16
FAP:Nd ³⁺	8.0×10^{19}	50 $\times 10^{-20}$	0.24 $\times 10^{-3}$	6	0.20×10^{17}	16		145 ($\phi 3 \times 50$)	0.061 0.26
钕玻璃 Nd ³⁺	23×10^{19}	1.4 $\times 10^{-20}$	0.56 $\times 10^{-3}$	180	7×10^{17}	234	100 ($\phi 7 \times 120$)		2.20 9.4

值。然而对于四能级材料可以达到更高的 G 值, 根据我们的分析, 工作物棒端的超辐射强度等于荧光辐射强度时, 对于给定工作物尺寸 $G=10^3$, 我们用 $G=10^3$ 进行计算的储能列在第 8 项的第二列, 第 8 项数值只有对给定工作物尺寸和 G 值才是有意义的。各种不同材料有不同的 ΔN_s 值, 以它们的相对值来比较各种材料的优缺点还是有用的, 例如在表 2 中, 可以看出 YAG 的 ΔN_s 较小, 容易获得高增益, 低阈值, 但是储能小不宜做特大功率器件。

综上所述, 作为高重复频率和连续激光器的激光材料最好是四能级系统, 要阈值低, 荧光寿命长, 线宽窄, 光学质量好, 机械性能好, 稳定性和热学性能良好。要求一种激光材料同时在各方面都最优异是不现实的, 我们只能根据需要作综合性的取舍。表 1 中列出了目前一些最常用的激光材料数据, 从中我们可以看出在红宝石、钕玻璃和掺钕钇铝石榴石三者中, 前两者它们的增益低, 储能大, 适合于作脉冲或大功率激光器。红宝石是三能级系统, 阈值高, 要有较强的光泵才能达到粒子数反转, 但它的热学性能较好, 热导率高, 机械强度大, 光学质量也较好, 所以虽然连续的红宝石激光器实用性不大, 但是仍可以做成重复频率每秒数十次的中等功率(几十兆瓦至几百兆瓦)激光器件, 有其一定的实用价值。钕玻璃在其他方面都很优异, 但是机械强度差, 热导率低是大缺点, 限制了它的连续和高重复频率的应用。目前玻璃基质在不断改进, 它可以做成重复频率每秒几次的大功率(几百兆瓦以上)激光器件。如果玻璃质量提高, 重复频率可望增加。掺钕钇铝石榴石比起前两者是最合适做固体高重复频率和连续的激光器。此外它的光学质量和掺钕浓度是两个相互矛盾的因素, 同