

长脉宽脉冲 Nd:YAG 激光器性能的研究

叶碧青 马忠林 王明琪

(中国科学院上海光学精密机械研究所)

1987 年 5 月 4 日收到

提 要

已研制成功 200 W 平均输出功率、500 W 峰值功率的毫秒级脉宽的脉冲 Nd:YAG 激光器。对这种长脉宽脉冲 Nd:YAG 激光器的性能进行了研究,其理论分析与实验结果相符。

一、引 言

随着 60 年代初激光器的问世,短脉宽的固体激光器迅速发展起来,并把这种激光器用于工业加工,诸如钟表钻石打孔,宝石琢磨。激光加工具有定位精度高,非接触操作等优点,因此受到人们的极大重视。60 年代末高功率连续固体激光器研制成功,由单根激光棒运转到多根激光棒串接振荡,输出功率由百瓦上升到千瓦。这种连续激光器为材料切割、打孔、退火和热处理等工业应用开辟了广阔的前景^[1]。

在实践中,人们发现无论短脉宽脉冲激光器,还是连续激光器,它们都存在一些弱点。激光退火半导体具有明显的优越性。脉冲激光可以完全恢复辐射引起的损伤,获得高的杂质替代率和掺杂度,但功率密度很高的激光脉冲会使表面出现波纹。连续激光可以克服这个弱点,然而并不能消除半导体中的位错和缺陷。一般说来,用脉冲激光打孔,由于激光对材料的有限穿透能力,不能获得深孔。而用连续激光打孔,虽然可获得深孔,但激光热量会扩散至较大区域,使激光打孔的部分优点消失。人们发现,如果使用脉冲能量为几十焦耳、脉宽为几毫秒的脉冲激光器,则可以克服上述的一系列缺点。例如,这种激光器应用于材料焊接时,它既可以焊接不同的材料,而且热量的扩散只局限于很小的区域^[2]。

因此,近年来人们着手研制一种新型的高平均功率长脉宽 Nd:YAG 激光器。这种激光器具有许多新颖的性能,其平均功率可达几百瓦,脉冲能量达几十焦耳,脉冲宽度由 100 微秒到 10 毫秒,甚至可以连续运转。如果与光学纤维相结合,则可以实现轻便灵活的高效率弯曲导光或多股分光传输^[3,4],从而制成新一代的多用途激光加工器。

最近,我们研制成一台高平均功率长脉宽脉冲 Nd:YAG 激光器,其平均输出功率和脉冲输出功率分别为 200 和 500 W^[5]。在供电方式上,不是沿用通常的谐振充电和电感电容成形方案^[6],以及目前时髦的变换电流方案¹⁾,而是采用一种独特的新颖方案。这种电源装置除了能供给脉冲泵浦功率,还能供给连续泵浦功率。在这种长脉宽脉冲激光器中,由于其平均泵浦功率很高,因而象在连续固体激光器中那样,热效应十分显著^[7]。

1) 英国专利。

本文从理论和实验上研究了这种激光器的运转特性、激活介质中的热效应及其补偿的有效措施,得到了激光输出功率和光束发散角对泵浦能量、工作频率和谐振腔结构的依赖关系,从而为设计和制作稳定的高平均功率长脉宽脉冲 Nd:YAG 激光器提供了有力的依据。

二、理论分析

对于高平均功率长脉宽脉冲 Nd:YAG 激光器,如果其激活介质并不充满整个谐振腔,则其运转过程可由如下速率方程描述^[8,9]:

$$\frac{dn_3}{dt} = W_p(n_0 - n_3) - \frac{n_3}{T_{32}}, \quad (1a)$$

$$\frac{dn_2}{dt} = \frac{V_a}{V} B \phi (n_1 - n_2) + \frac{n_3}{T_{32}} - \frac{n_2}{T_{21}}, \quad (1b)$$

$$\frac{dn_1}{dt} = \frac{V_a}{V} B \phi (n_2 - n_1) + \frac{n_2}{T_{21}} - \frac{n_1}{T_{10}}, \quad (1c)$$

$$n_0 + n_1 + n_2 + n_3 = N, \quad (1d)$$

$$\frac{d\phi}{dt} = \frac{V_a}{V} \phi B (n_2 - n_1) + \frac{V_R}{V^2} B n_2 - \frac{\phi}{T_c}, \quad (1e)$$

$$P = - \frac{\phi V h \nu \ln(1 - T)}{T_R},$$

其中 n_0, n_1, n_2 和 n_3 分别为能级 0, 1, 2 和 3 上的粒子数密度, ϕ 为腔内光子数密度, P 为激光脉冲输出功率, B 为与感应跃迁有关的量 ($B = \sigma c$, σ 为 Nd^{3+} 离子受激辐射截面, c 为激光棒中的光子速度), V_a 为激光棒的激活体积, V_R 为激光棒体积, V 为谐振腔体积, T_c 为腔内辐射的衰减时间, T_R 为一个光子在腔内来回一周的时间, T_{10}, T_{21} 和 T_{32} 分别为能级 0, 1, 2 和 3 的弛豫时间, N 为 Nd^{3+} 的掺杂浓度, T 为谐振腔输出镜透射率. 基态和泵带间的泵浦速率 $W_p = g_0 / T_0 (\sigma N - g_0)$, g_0 为与泵浦功率有关的激光棒的小信号增益, T_0 为能级 2 的荧光寿命。

在稳态条件下,从方程组 (1a)~(1e) 可以得到谐振腔内光子数密度和激活介质中粒子数密度. 现在,由于脉冲泵浦功率比较高,必须考虑上述方程组中的非线性项^[10],但可以忽略自发辐射项 $\frac{V_R}{V^2} B n_2$. 于是,求得

$$\frac{n_0}{N} = \frac{\left(1 - \frac{V}{V_a B T_c N}\right) (1 + W_p T_{32})}{1 + 2 W_p (T_{32} + T_{10})}, \quad (2a)$$

$$\frac{n_1}{N} = \frac{W_p T_{10} \left(1 - \frac{V}{V_a B T_c N}\right)}{1 + 2 W_p (T_{32} + T_{10})}, \quad (2b)$$

$$\frac{n_2}{N} = \frac{W_p T_{10} + \frac{V}{V_a B T_c N} [1 + W_p (2 T_{32} + T_{10})]}{1 + 2 W_p (T_{32} + T_{10})} \quad (2c)$$

$$\frac{n_3}{N} = \frac{W_p T_{32} \left(1 - \frac{V}{V_a B T_c N}\right)}{1 + 2W_p(T_{32} + T_{10})}, \quad (2d)$$

$$\frac{\phi}{N} \frac{T_{21}}{T_c} = \frac{W_p(T_{21} - T_{10}) - \frac{V}{V_a B T_c N} [W_p(2T_{32} + T_{10} + T_{21}) + 1]}{1 + 2W_p(T_{32} + T_{10})} \quad (2e)$$

$$P = \frac{h\nu V N T_c \ln[1/(1-T)]}{T_{21} T_R [1 + 2W_p(T_{32} + T_{10})]} \left\{ W_p(T_{21} - T_{10}) - \frac{V[W_p(2T_{32} + T_{10} + T_{21}) + 1]}{V_a B T_c N} \right\}.$$

对于由激光棒和平面腔镜构成的对称激光谐振腔,在薄透镜近似下,其等效空腔的参数 g_1 , g_2 和等效腔长 L 为^[11]

$$g_1 = g_2 = 1 - \frac{l}{2f}, \quad (3)$$

$$L = l - \frac{l^2}{4f}, \quad (4)$$

其中 f 为激光棒热透镜的焦距, l 为谐振腔长度.

如果采用具有凹面端面的激光棒作为工作物质,则在单次或低泵浦频率运转时,谐振腔偏离稳定条件,属于非稳腔. 这时,球面共振波型的放大率 m 和能量损耗率 M 为

$$m = 2g_1^2 + 2g_1\sqrt{g_1^2 - 1} - 1, \quad (5)$$

$$M = 1 - \frac{1}{m^2}. \quad (6)$$

由能量损耗率 M 和谐振腔输出反射镜的透射率 T 可以决定谐振腔内辐射的衰减时间

$$T_c = T_R / [\ln m^2 - \ln(1 - T)], \quad (7a)$$

而由等效空谐振腔的腔面半径 $\left(\frac{L}{1 - g_1}\right)$ 和激光棒的棒套光阑可以决定非稳谐振腔激光器的 V_a/V 值和输出光束的发散角.

随着激光器泵浦功率的增高,非稳谐振腔将变为稳定腔. 对于稳定谐振腔,其衍射耗损项可以忽略,这时腔内辐射的衰减时间为

$$T_c = T_R / \ln(T - 1). \quad (7b)$$

在薄透镜近似下,激光棒的传输特性可用一个变换矩阵 $\begin{pmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{1}{f} & 1 \end{pmatrix}$ 描述. 相似地,对称

激光谐振腔中每一个光学元件的传输特性都可以用一个变换矩阵来描述. 因此,在激光系统内谐振腔输出端 1、激光棒两端面 2 和 3、以及谐振腔后反射端 4,相应的双程传输

矩阵可以写成 $\begin{pmatrix} A_i & B_i \\ C_i & D_i \end{pmatrix} (i = 1, 2, 3, 4)$. 于是这些端面处的基横模半径 W_i 可以表示成

$$W_i = \sqrt{\frac{2\lambda B_i}{\pi \sqrt{4 - (A_i + D_i)^2}}}, \quad (8)$$

其中 λ 为激光振荡波长, 若 l_i 为 i 端面与 $(i+1)$ 端面之间的空间间距, 则有

$$\frac{V_a}{V} = \frac{l_2(W_2^2 + W_3W_3 + W_3^2)}{\sum_{i=1}^3 l_i(W_i^2 + W_iW_{i+1} + W_{i+1}^2)}. \quad (9)$$

如果 W 为 W_2 和 W_3 中的较大者, 则多模振荡时, 最高谐振模数 N_m 由下式决定:

$$N_m = INT \left\{ \frac{1}{2} \left[\left(\frac{\alpha}{M} \right)^2 - 1 \right] \right\}, \quad (10)$$

其中 $\alpha (< 1)$ 为激光棒的填充因子, 稳定腔激光器的远场发散角可以表示为

$$\theta = \frac{\lambda \sqrt{2N_m + 1}}{\pi W_1}. \quad (11)$$

在进行数字计算时, 我们选取的数据有^[12]: YAG 棒中掺杂 1% Nd, 即 $N = 1.4 \times 10^{20} \text{ cm}^{-3}$; 而 $T_{10} = 30 \text{ ns}$, $T_{21} = 761 \mu\text{s}$, $T_{32} = 30 \text{ ns}$ (假定), $\sigma = 5 \times 10^{-19} \text{ cm}^2$ 和 $T_0 = 230 \mu\text{s}$; 激光棒尺寸为 $\phi 5 \times 100 \text{ mm}$, 棒的两端面的凹面曲率半径为 800 mm , 以及谐振腔长为 300 mm . 如果取激光系统的泵浦系数为 $72 \times 10^{-6} \text{ W}^{-1}$, 则 $g_0 = 1.44 \text{ cm}^{-1}$, $W_p = 95.2 \text{ s}^{-1}$.

计算结果示于图 1 和图 2. 图 1 表示激光谐振腔输出镜透射率为 60% 时脉冲输出功率(曲线 P)和光束发散角(曲线 θ)对激光棒的焦距倒数 ($1/f$) 的依赖关系. 图 2 为激光器单脉冲运转时输出能量随输出镜透射率变化的函数关系.

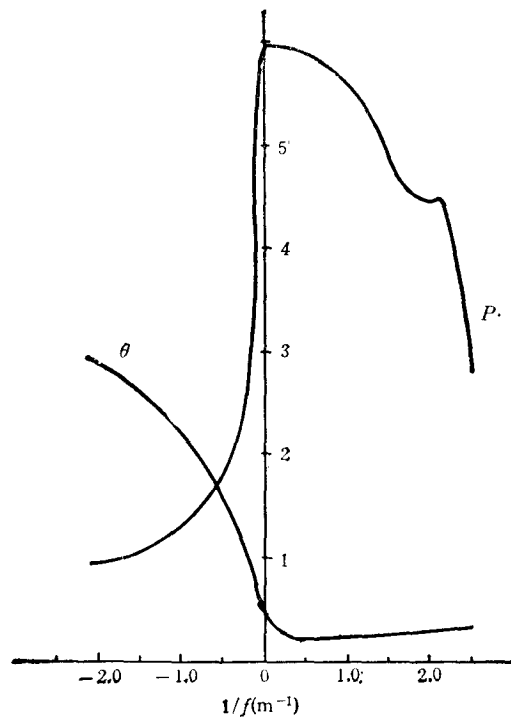


图 1

在高平均功率长脉冲固体激光器中, 平均泵浦功率很高, 因此由激光棒感生的热透镜效应十分显著. 随着平均泵浦功率增大, 激光棒的热焦距不断变小, 从而使具有凹面端面的激光棒的等效焦距减小. 从图 1 可以看到, 当激光棒焦距的倒数增大时, 激光脉冲输出功率逐渐升高而达到一个最大值, 然后逐渐下降, 而激光束的发散角在激光棒透镜

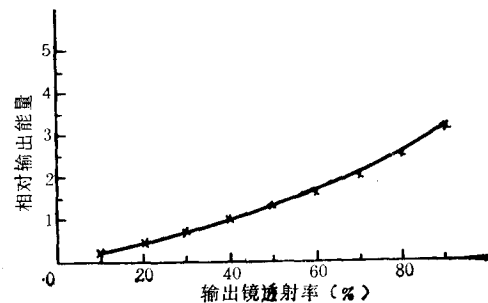


图 2

焦距为某一值时达到一个最小值. 如果激光棒凹面端面或谐振腔结构不同, 则激光棒的

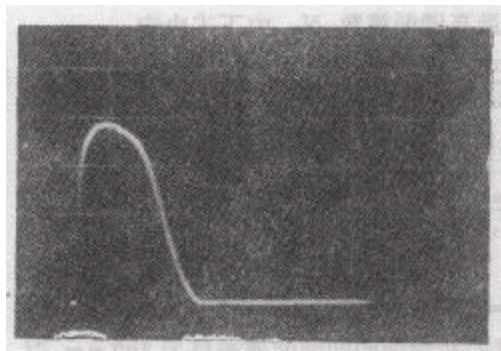


图 3
水平: 2ms/格

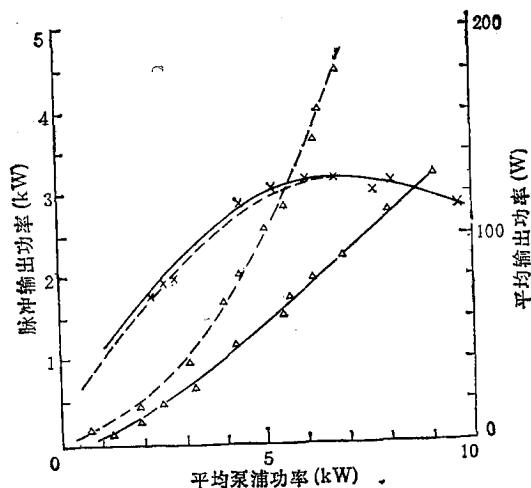


图 4 泵浦脉冲宽度不同时, $\phi 5 \times 98$ mm 的 Nd:YAG 棒的输出脉冲功率(x)和平均功率(Δ)对平均泵浦功率的依赖关系 ---为 2.4 ms; —为 3.5 ms

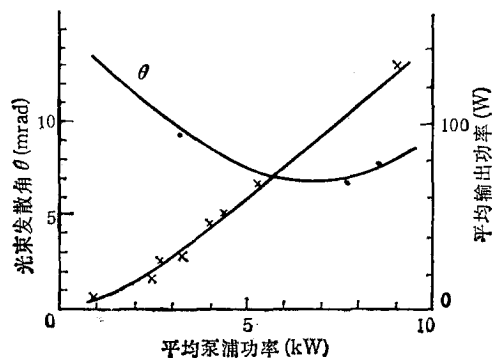


图 5 $\phi 5 \times 95$ mm 的 Nd:YAG 棒的激光光束发散角和平均输出功率对平均泵浦功率的依赖关系

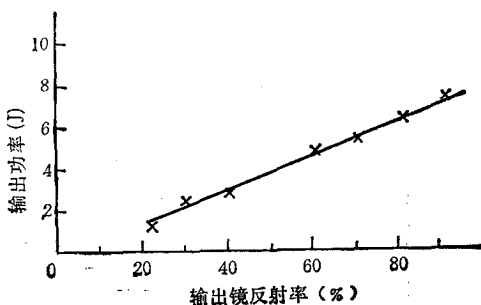


图 6 激光单脉冲工作时, $\phi 5 \times 95$ mm 的 Nd:YAG 棒的激光输出能量对输出镜透射率的依赖关系

等效焦距倒数与平均泵浦功率之间有着不同的关系, 激光器输出功率的最大值对应于不同的平均泵浦功率值。在高平均功率长脉冲固体激光器的运转过程中, 随着平均泵浦功率不断增长, 一台精心选择的激光器的谐振腔结构将由非稳腔向稳定腔再向非稳腔过渡, 激光器的性能随之发生很大的变化。因此, 如果合理设计谐振腔结构, 选择一定的泵浦功率和泵浦频率, 则激光器可以获得最大的平均和脉冲输出功率。

三、实验结果

激光器中的 Nd:YAG 棒是由脉冲氪灯泵浦的。为了获得高平均输出功率, 我们采用脉冲宽度为 2.4—3.5ms 的泵浦光源, 每个泵浦脉冲的输入能量为 320—950 J, 工作频率为 1—30Hz。实验上, 在使用 $\phi 5.5 \times 120$ mm 的 Nd:YAG 棒时, 激光器输出的最大平均

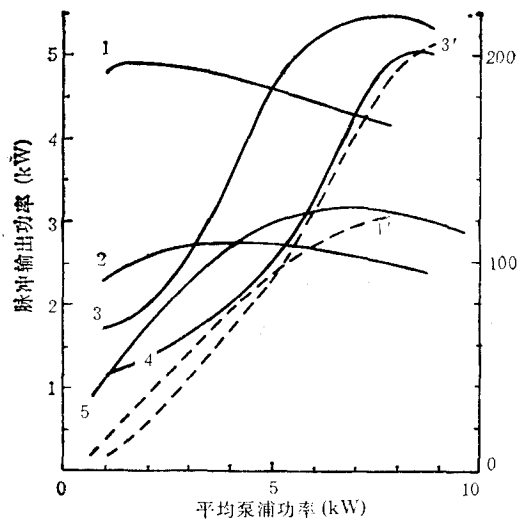


图7 泵浦脉宽为 3.5ms 时,不同 Nd:YAG 棒的激光输出脉冲功率(实线)和平均功率(虚线)对平均泵浦功率的依赖关系 曲线 1 和 1' 为 $\phi 6.5 \times 112$ mm 棒(平面端面);曲线 2 为 $\phi 6 \times 85$ mm 棒(平面端面);曲线 3 和 3' 为 $\phi 5.5 \times 120$ mm 棒(曲率半径 500 mm 的凹面端面);曲线 4 为 $\phi 5.4 \times 110$ mm 棒(曲率半径 500 mm 的凹面端面);曲线 5 为 $\phi 5 \times 98$ mm 棒(曲率半径 800 mm 的凹面端面)

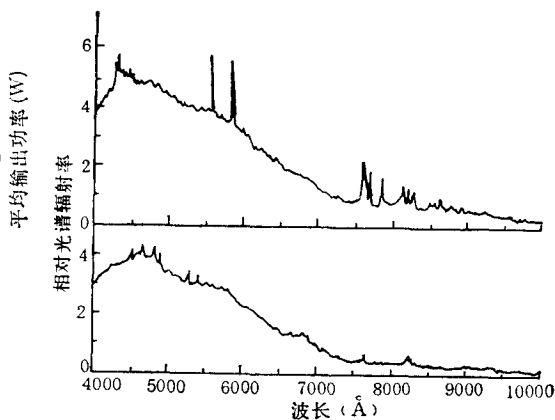


图8 输入脉冲能量为 1000 J,脉宽为 3.5 ms 和重复率为 2 Hz 时脉冲氩闪光灯(上图)和氙闪光灯(下图)的发射光谱

功率为 204 W,脉冲功率为 5300W (图 7),光束发散角约 10 mrad,平均功率泵浦效率大于 2%。激光器输出 200 W 平均功率时的激光脉冲波形示于图 3。

为了补偿激光棒的热透镜效应,将 Nd:YAG 棒的端面修磨成凹面,其修磨量由 Nd:YAG 棒的品质和平均热焦距确定。实验中使用的 5 根 Nd:YAG 棒的尺寸和端面修磨量为 $\phi 6.5 \times 112$ mm (平面端面), $\phi 6 \times 85$ mm (平面端面), $\phi 5.5 \times 120$ mm (曲率半径 500 mm 的凹面端面), $\phi 5.4 \times 110$ mm (曲率半径 500 mm 的凹面端面)以及 $\phi 5 \times 98$ mm (曲率半径 800 mm 的凹面端面)。

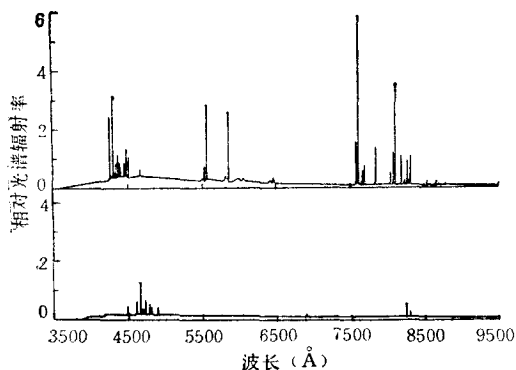


图9 输入连续功率为 1000 W 时氩灯(上图)和氙灯(下图)的发射光谱

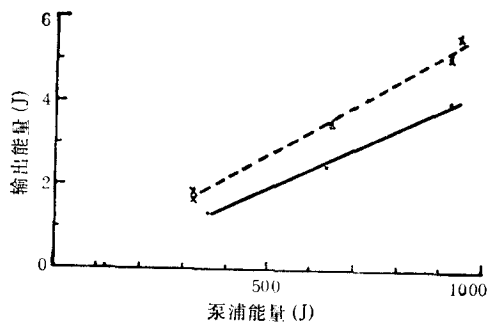


图 10

---为脉冲氩灯; —为脉冲氙灯

采用具有曲率半径 800mm 的凹面端面的 $\phi 5 \times 98$ mm 的 Nd:YAG 棒的实验结果示

于图 4. 对于一定的泵浦脉冲宽度, 激光脉冲功率随泵浦频率而变化. 在某一泵浦频率范围内存在一个最大脉冲功率区域. 对于不同的泵浦脉冲宽度, 最大脉冲功率区域出现在不同的泵浦频率范围内. 然而, 对于一根给定的 Nd:YAG 棒, 最大脉冲功率均对应于同一平均泵浦功率. 这些实验结果与我们的理论分析相一致. 因而可以根据实际需要, 选择合适的工作频率和脉冲宽度.

对于 $\phi 5 \times 98 \text{ mm}$ Nd:YAG 棒的激光器, 我们测量了激光光束发散角随平均泵浦功率变化的函数关系 (图 5), 也测量了脉冲输出能量随输出镜透射率变化的函数关系 (图 6). 测量结果与我们的理论值基本一致.

正如我们的理论分析所指出的, 对于具有不同修磨量的激光棒, 其最大激光脉冲功率对应于不同的平均泵浦功率. 实验结果也是如此, 如图 7 所示, 其曲线 1 和 2 分别对应于两根未修磨的不同尺寸的 Nd:YAG 棒, 在很低的平均泵浦功率下, 这两根棒的激光脉冲功率已达到最大值. 由图 7 可以看到, 随着 Nd:YAG 棒端面凹面修磨量增大, 对应于最大激光脉冲功率的平均泵浦功率升高. 图 7 还给出了两根具有不同修磨量的 Nd:YAG 棒的平均功率曲线.

如果激光器是在很高的输入功率下运转, 则泵浦灯将承受很高的功率密度. 这时, 在 $0.2-1.0 \mu\text{m}$ 的光谱区, 氙灯的转换效率为 $40-60\%$, 而氪灯的转换效率为 $25-30\%$, 因而, 通常的短脉宽脉冲 Nd:YAG 激光器采用氙灯泵浦. 但是, 在较低的泵浦功率下, 氪灯的发射光谱与 Nd:YAG 的吸收谱匹配得较好, 所以连续 Nd:YAG 激光器都采用氪灯泵浦. 在长脉宽脉冲 Nd:YAG 激光器中, 脉冲泵浦功率为 $2 \times 10^5 \text{ W}$, 如果使用 $\phi 8 \times 120 \text{ mm}$ 泵浦灯, 则其灯管承受的功率密度为 $3.3 \times 10^4 \text{ W/cm}^2$, 低于氙灯和氪灯泵浦转换效率的交叉区域. 因此, 我们选择脉冲氪灯为泵浦源.

在实验中, 我们测量了氪灯和氙灯的光谱特性. 输入能量为 1000 J 脉冲宽度为 3.5 ms , 以每秒两次的重复频率点燃两支尺寸完全相同的氪灯和氙灯, 借助于 W_{41} 平面光栅单色仪测量了它们在 $4000-10000 \text{ \AA}$ 范围内的发射光谱 (图 8), 也测量了这两支灯在 1000 W 输入连续功率下的发射光谱 (图 9). 由脉冲氪灯和脉冲氙灯泵浦 $\phi 5 \times 98 \text{ mm}$ 的 Nd:YAG 棒时单次激光输出能量随泵浦能量变化的函数关系示于图 10. 光谱测量和激光实验表明, 长脉宽脉冲 Nd:YAG 激光器采用脉冲氪灯泵浦是有利的.

四、 讨 论

高平均功率长脉宽脉冲 Nd:YAG 激光器的脉冲泵浦功率为 $2 \times 10^5 \text{ W}$, 低于通常的短脉宽脉冲 Nd:YAG 激光器的泵浦功率, 而其泵浦的平均功率约 10^4 W 却与连续激光器相近, 因此这种激光器具有明显的特色和突出的优点.

在这种激光器中, 由于脉冲泵浦功率较高, 所以其激活介质的小信号增益 g_0 比连续运转时要高得多. 正如上面分析表明的, 对于 $\phi 5 \times 100 \text{ mm}$ 的 Nd:YAG 棒, $g_0 = 1.44 \text{ cm}^{-1}$, 而该棒由 10^4 W 的连续功率泵浦时, $g_0 = 0.072 \text{ cm}^{-1}$, 因此这种激光器的泵浦效率要比连续运转情况高得多. 这一特点也决定这种器件具有不太复杂的结构. 采用高效的直管脉冲氪灯泵浦, 其平均功率泵浦效率不难达到 2% 以上. 由于激光棒每立方厘米

可以长期承受 40W 以上的激光功率,因而使用两根直管脉冲氦灯泵浦 $\phi 10 \times 120$ mm 的 Nd:YAG 棒,可以获得平均功率 400W 的稳定激光输出。

这种激光器的平均泵浦功率很高, Nd:YAG 激光棒中将感生热透镜。实验表明,利用连续器件中的热补偿方法,把激光棒端面修磨成具有合适曲率半径的凹面,可以有效地消除这种激光器中的热透镜效应^[7]。

高平均功率长脉宽脉冲 Nd:YAG 激光器正越来越显示其实用价值。这种激光器兼有连续激光器的高平均功率和脉冲激光器的中等峰值功率的长处,因此它在工业应用上有着十分重要的地位,此外,由于应用这种激光光束时,热影响区域小,而且易于控制和调节,因而在医学上将获得广泛的应用。

参 考 文 献

- [1] W. Koechner, *Laser Focus*, 5(1969), 29.
- [2] P. K. Affolter, *Laser Application*, (3) (1984), 81.
- [3] G. Georgalas and M. G. Jones, The Conference on Lasers and Electro-Optics, Baltimore, Maryland, (1983), THU 14-1.
- [4] 叶碧青、马忠林, 光学学报, 5(1985), 15.
- [5] 叶碧青、马忠林、王明琪, 中国激光, 14(1987), 240.
- [6] 叶碧青等, 中国科学院上海光学精密机械研究所研究报告集, 5(1978), 99.
- [7] 叶碧青、马忠林, 激光, 7(1980), 11; 叶碧青、马忠林, 光学学报, 2(1982), 425.
- [8] C. H. Chang, K. Hirsch and H. Salzmann, *IEEE J. Quantum Electron.*, QE-16(1980), 439.
- [9] 叶碧青、马忠林、凌君达, 物理学报, 28(1979), 15.
- [10] E. L. Steele, *Optical Lasers in Electronics*, John Wiley and Sons, Inc., (1967), p. 20.
- [11] J. Staffen, J. P. Lortscher and G. Herziger, *IEEE J. Quantum Electron.*, QE-8(1972), 239.
- [12] S. Singh, R. G. Smith and L. G. Van Uitert, *Phys. Rev.*, B10(1974), 2566.

RESEARCH ON PERFORMANCE OF LONG-PULSEWIDTH PULSED Nd:YAG LASER

YE BI-QING MA ZHONG-LIN WANG MING-QI

(Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Academia Sinica)

ABSTRACT

We have developed a several-millisecond pulsewidth pulsed Nd:YAG laser with output power of 200 watts in average and 5000 watts in peak. The performance of the long-pulse-width pulsed Nd:YAG laser is investigated. The theoretical analysis agrees with the experiments quite well.