

XeCl 激光器的增益特性

陈建文 傅淑芬 刘妙宏 赵黎明* 郭维忠*
(中国科学院上海光学精密机械研究所)

提 要

本文根据稳态均匀加宽激光器的模型,按照激光器的输出功率与小信号增益系数 g_0 ,恒定的吸收损耗系数 α_0 ,饱和强度 I_s ,腔长 L 之间的近似关系式,利用变换输出耦合的方法,对采用紫外预电离的Blumlein快放电激励XeCl激光器的增益进行测量。并讨论了器件的最佳透过率。发现最佳透过率是泵浦功率的函数。

一、引 言

对准分子激光器增益的测量通常是把待测器件作为放大器,用振荡器作为诱发信号,对输入及输出同时进行测量。测得参数作为输入及输出的函数^[1~3]。这种方法尽管数据处理比较简便,但实验装置较为复杂。还要选用两器件在相同的光谱范围内工作,并要求同步运转。

本文用饱和增益系数的平均值代替饱和增益系数,得到了均匀加宽激光器的输出功率与小信号增益系数 g_0 ,吸收损耗系数 α_0 ,饱和强度 I_s 以及腔长 L 之间关系的近似表达式。采取变化输出耦合方法测量了XeCl激光振荡器的小信号增益系数,从而估算器件的最佳透过率。

二、理 论

假定器件具有稳定的光学谐振腔,非饱和的增益系数,均匀分布的吸收损耗。则饱和增益系数 g 表示为:

$$\frac{1}{\beta_+} \frac{d\beta_+}{dz} = -\frac{1}{\beta_-} \frac{d\beta_-}{dz} = \frac{g_0}{1 + \beta_+ + \beta_-} - \alpha_0 = g, \quad (1)$$

式中: g_0 是小信号增益系数(cm^{-1}), α_0 是吸收损耗系数(cm^{-1}), g 是饱和增益系数, $\beta_{\pm} = I_{\pm}/I_s$,增益介质内沿 z^+ 、 z^- 方向传播的归一化辐射强度, I_s 是饱和强度参量。

假定腔长 L ,对(1)积分:

$$\beta_+ \cdot \beta_- = \beta_0^2 = c \quad (c \text{ 是常数}), \quad (2)$$

$$\int_{\beta_1}^{\beta_2} \left[\frac{1}{\beta_+} + 1 + \frac{\beta_0^2}{\beta_+^2} \right] d\beta_+ = \int_0^L [g_0 - \alpha_0(1 + \beta_+ + \beta_-)] dz, \quad (3)$$

令两腔镜之一为全反射,即 $r_1(0) = 1$, $r_2(L) < 1$ 。辐射在两端面上的边界条件为:

收稿日期: 1981年12月22日

* 长春光学精密机械学院毕业实习生。

$$\left. \begin{aligned} \beta_+(0) = \beta_1 = \beta_0, \quad \beta_+(L) = \beta_2 = \beta_0 \sqrt{r_2}, \\ \beta_-(0) = \beta_1 = \beta_0, \quad \beta_-(L) = r_2 \beta_2 = \sqrt{r_2} \beta_0, \\ r_2 \frac{\beta_+(L)}{\beta_-(L)} = \frac{\beta_+(0)}{\beta_-(0)} = 1. \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

利用(3)、(4)式变为

$$(g_0 - \alpha_0)L + \ln \sqrt{r_2} = \beta_2(1 - r_2) + \alpha_0 \int_0^L (\beta_+ + \beta_-) dz, \quad (5)$$

上式左边表示的是辐射在腔内的净增益。右端第一项 $\beta_2(1 - r_2)$ 表示辐射经腔镜 r_2 的输出, 积分式子表示辐射在激活介质内的损耗。如果上式右端为 0, 刚好表明器件的阈值。所以解法在物理上是满足的。

对均匀饱和增益的一维激光器, 用饱和增益系数的平均值 \bar{g} 代替 g , 则有^[3]:

$$\beta_+(z) = \beta_+(L)e^{\bar{g}(z-L)}, \quad \beta_-(z) = \beta_-(0)e^{-\bar{g}z}. \quad (6)$$

利用(4)式的条件得到:

$$\left. \begin{aligned} \bar{g} = -\frac{1}{L} \ln \sqrt{r_2}, \\ e^{-\bar{g}L} = \sqrt{r_2} \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

$$\therefore \int_0^L (\beta_+ + \beta_-) dz = -L \frac{\beta_2(1 - r_2)}{\ln \sqrt{r_2}}. \quad (8)$$

$$\therefore (g_0 - \alpha_0)L + \ln \sqrt{r_2} = \beta_2(1 - r_2) - \alpha_0 L \beta_2 \frac{1 - r_2}{\ln \sqrt{r_2}}. \quad (9)$$

与介质中的吸收损耗相比, 忽略腔镜对辐射的吸收。归一化的辐射强度可近似表示成:

$$\beta_{out} = I_{out}/I_s \simeq \beta_2(1 - r_2). \quad (10)$$

激光器的输出功率

$$P = AI_s \beta_{out} \simeq AI_s \frac{(g_0 - \alpha_0)L + \ln \sqrt{r_2}}{1 - \frac{\alpha_0 L}{\ln \sqrt{r_2}}}. \quad (11)$$

A 为光束截面。(11)式表示输出功率是腔镜反射率 r_2 的函数。由于方程中有三个未知数 α_0 、 g_0 、 I_s , 所以使用三块不同反射率的输出镜, 通过测量输出功率, 可以很方便地确定 g_0 、 α_0 、 I_s 。当然, 使用一系列不同反射率的输出镜, 还可以估算器件的最佳射率。

三、实验装置及实验方案

实验装置如图 1 所示。其中 1 为 XeCl 激光振荡器, 2 为会聚透镜, 3 为接收炭斗, 4 为检流计。激光器件的结构如图 2 所示, 1 为尼龙板, 2 为火花隙, 3 为铜箔, 4 为闪光板, 5 为电极。激光气室用环氧圆筒制成。内径 106 mm, 长 930 mm。两端面与两块腔片一起被密封。气室内一对黄铜电极长 760 mm, 其截面形状如图 2 所示。分别用 19 根接线柱紧固在气室内壁的两侧, 电极间距 20 mm。平板电容器容量分别为 25.07 nf 和 12.91 nf。两条预电离火花板与两电极等间距地固定在气室内壁上。光学腔之一为曲率半径 4000 mm 的全反铝镜, 另一块是反射率为 8% 的石英平板。预电离与主放电触发延时约 $1 \mu s$ 。激光输

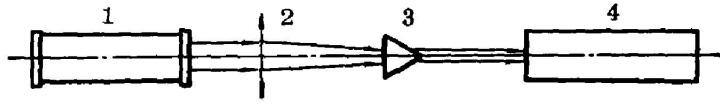


图 1 实验装置简图

Fig. 1 Schematic diagram of the experimental setup

出接收选用 AC15/4 型直流复射式检流计。炭斗接收口径 $\phi 16\text{ mm}$ 。为实现变化输出耦合, 在器件输出镜前面先放置两块反射率分别为 24% 和 8% 的石英平板腔片, 然后依次移去。为使炭斗更有效地接收激光输出能量, 在炭斗前面 900 mm 处放置一焦距为 1000 mm 的会聚透镜。此时炭斗接收到的光强约占光束强度的 90%。

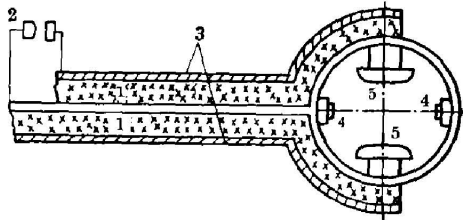


图 2 激光器件剖面图

Fig. 2 Cross-section of the laser device

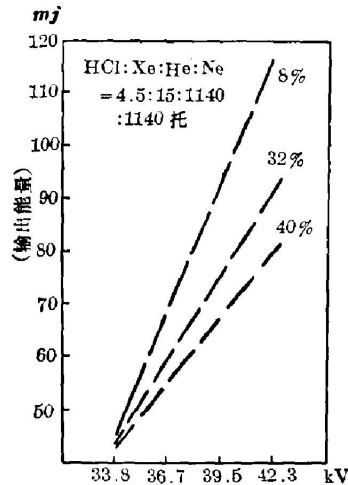


图 3 输出能量与充电电压的关系

Fig. 3 Dependence of output energy on charging voltage

激光气室内气体按比分 $\text{HCl: Xe: He: Ne} = 4.5: 15: 1140: 1140\text{ torr}$ 混合, 总气压为 3 个大气压。显然, 上述各种气体的分压比不是最佳的, 有关工作气体的激发与淬灭的动力学机理见文献[4]。在本实验中, 预电离电压保持在 47.6 kV, 主放电电压在 33.6~42 kV 内取值。每更换一次输出镜的反射率, 主放电电压就在取值范围内重复一次。记录在不同反射率时的输出功率及与之对应的激励电压。绘出相应的关系曲线, 如图 3 所示。可以看到, 输出功率随激励电压是线性增加的。

四、实验结果及讨论

图 4 是根据公式 (11) 做出的 XeCl 激光器的增益系数 g 随电压变化的曲线。它也是随电压线性增加的。这可以由 XeCl^* 的形成速率随泵浦功率成正比的关系中得到解释^[3]。

利用测得的激光器的参数 g 和 α , 还可以确定器件的最佳透过率。就一般情况而言, 准分子激光器和 N_2 , F 原子激光器一样都是放大自发辐射系统。求取最佳透过率或最佳反射率是一件比较麻烦的事情。所以迄今一些准分子激光器都用一块末镀膜石英平板做耦合输出, 实际并非最佳。图 5 就是实验测得的输出功率与腔镜透过率的关系曲线。

本文利用测得的增益和损耗系数按下式求得最佳反射率^[5]:

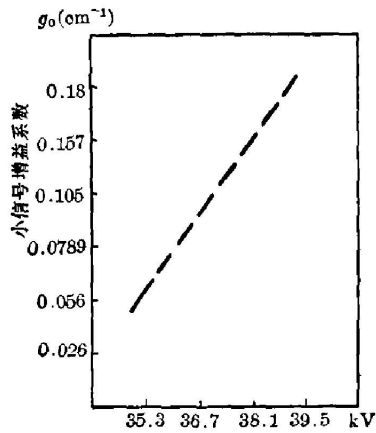


图4 小信号增益系数随充电电压变化曲线
Fig. 4 Variation of small-signal gain coefficient with charging voltage

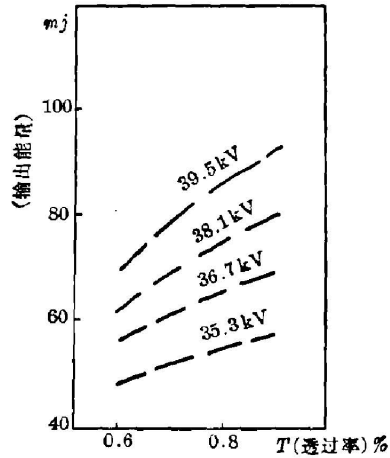


图5 输出能量与输出耦合的关系曲线
Fig. 5 Dependence of output energy on output coupling

$$-\ln \sqrt{r_{opt}} = \sqrt{\alpha_0 L} (\sqrt{g_0 L} - \sqrt{\alpha_0 L}). \quad (12)$$

当主放电电压为 39.2 kV 时, $\alpha_0 = 0.05 \text{ cm}^{-1}$, $g_0 = 0.168 \text{ cm}^{-1}$, $r_{opt} = 0.045$ 。主放电电压为 36.4 kV 时, $r_{opt} = 0.079$ 。

从前面计算可以看出,最佳反射率亦是泵浦功率的函数。泵浦功率越高,最佳反射率反而越低。这样,如果采用一块增透膜来代替石英平板,输出将会提高。

当充电电压为 39.2 kV 时,按公式 (11) 求得的饱和功率密度 $I_s = 0.126 \times 10^6 \text{ W/cm}^2$ 。由理论公式:

$$I_s = \frac{h\nu}{\sigma_{st}\tau_\theta}, \quad (13)$$

式中: $h\nu$ 是光子能量, σ_{st} 是受激辐射截面, $\tau_\theta = \frac{1}{\tau} + \sum_k \theta_k N_k + \sum_{kl} \theta_{kl} N_k N_l$ 是激光上能级寿命,包括二体和三体淬灭效应。 $\sigma_{st}\tau_\theta = 50 \text{ ns \AA}^2$, $h\nu = 6.4405 \times 10^{-19} \text{ J}$, $I_s = 0.1288 \times 10^6 \text{ W/cm}^2$ 。两个结果基本一致。

根据求得的小信号增益系数,采用由 Braun^[6] 给出的感应辐射截面,可以估计出 XeCl^{*} 上能级粒子数密度:

$$n_{\text{XeCl}^*} = g_0 / \sigma_{st} \alpha \quad (14)$$

$V = 39.2 \text{ kV}$ 时, $g_0 L = 12.8$, $\sigma_{st} = 4.5 \times 10^{-16} \text{ cm}^2$ 。求得: $n_{\text{XeCl}^*} = 4.06 \times 10^{14} \text{ cm}^{-3}$ 。这个值可以按 XeCl 激光器动力学方程求得的粒子数密度相比较。

总之,激光器的增益系数 g , 吸收损耗 α , 饱和强度 I_s 等参量是决定激光器特性的重要参数。通过上述参量的测量,可以使器件在最佳状态下运转,提高器件的效能。

本文是采用炭斗测量输出能量的,尽管炭斗绝对误差高达 (5~10)%,但在解方程 (11) 时,只需要三次测量的能量的相对值,故炭斗误差对本实验结果无影响。由于 XeCl 激光器本身的重现性,在前 500 个脉冲不稳定性在 2%,这是本实验结果的误差范围。

参 考 文 献

- [1] Watanaba; *Appl. Phys. Lett.*, 1978, **33**, No. 2 (Jul), 141.
 [2] R. S. Taylor, A. J. Alcock *et al.*; *Optics Commu.*, 1979, **31**, No. 2 (Aug), 197.
 [3] W. C. Marlow; *J. Appl. Phys.*, 1970, **41**, No. 10 (Sep), 4019.
 [4] Chen Jianwen, Fu Shufen *et al.*; *Appl. Phys. Lett.*, 1980, **37**, No. 10 (Nov), 833.
 [5] W. W. Rigrod; *IEEE J. Q. E.*, 1978, **QE-14**, No. 5 (May), 377.
 [6] C. K. Rhodes; *«Excimer Lasers»*, (Springer-Verlag, 1979) 90.

Gain characteristics of XeCl laser

CHEN JIANWEN FU SHUFEN LIU MIAOHONG

CHAO LIMING* AND GUO WEICHONG*

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

(Received 22 December 1981)

Abstract

This paper reports the experimental measurements of gain characteristics of a XeCl laser pumped by Blumlein fast discharge device, using the method of varying output coupling, according to the relation between output power of the laser consisting of a stable cavity and homogeneously broadened gain medium, and other laser parameters, such as small-signal gain coefficient g_0 , constant absorption loss coefficient saturation intensity I_s , and cavity length finally, the optimum transmittance of laser is determined. Authors find that the optimum transmittance is a function of pumping power.

* Graduate trainee of the Changchun College of Optics and Fine Mechanics

(上接第 305 页)

第四章中讨论了“偏振中所涉及问题的两种矩阵方法”。在讨论偏振光的产生和分析后,引入了表示偏振的斯托克斯参数和 4×4 米勒矩阵,利用它们解决偏振和非偏振的问题,其次应用琼斯算法变换成麦克斯韦列,介绍了琼斯矩阵元或麦克斯韦列的实验确定法,并列举了米勒算法和琼斯算法求解的实例。

第五章涉及的是矩阵方法对光在单轴晶体中传播的应用。用矩阵形式的矢量运算表示,讨论了各向异性介质的介电特性、平面波在单轴晶体中的传播以及单轴晶体中的惠更斯子波。

书的最后引入六个附录,它们分别讨论了同心透镜系统的孔径特性、圆镜和方镜的矩阵表示、斯托克斯参数的统计推导、米勒矩阵的推导、琼斯矩阵的推导以及琼斯和米勒算法之间的联系。

本书的章节基本上是为教学目的和说明矩阵方法编排的。它对初学者是一本有益的教材。

本书已由中国科学院上海光学精密机械研究所陈时胜和竺庆春两位同志译成中文,邓锡铭教授和沃新能副教授校阅,将联系由上海科学技术出版社出版。

(沃新能)