

铜蒸气激光增益的研究

尹宪华 梁宝根 陶永祥 崔健力 陈莉菲

(中国科学院上海光学精密机械研究所)

提 要

本文采用振荡-放大装置测量了铜蒸气激光 5106 Å 谱线的增益和饱和能量密度, 它们分别为 0.2 cm^{-1} 和 $22.3 \mu\text{Jcm}^{-2}$, 并对实验结果进行了讨论。

关键词: 空间和时间匹配。

一、引 言

气体激光器的增益是一个重要参数, 了解激光介质的增益、饱和物性, 有助于合理设计激光放大器。本文报道了对铜蒸气激光 5106 Å 振荡谱线增益特性的研究, 并对实验结果进行分析和讨论。

二、脉冲传播公式

由于很难给出一个完整的光学模型来描述这类自限跃迁激光放大系统的动力学过程, 通常只是经验地给出一个合适的增益饱和参数, 并把实验结果代入光学模型, 进行比较修正, 确定增益参数^[1]。描述这种动力学过程有三种方式: (1) Frantz-Nodvik 脉冲传播公式。(2) 简化的稳态非均匀加宽公式。(3) 简化的稳态均匀加宽公式。这些模型的主要差别取决于把输运方程作为稳态解还是非稳态解, 其次考虑了谱线加宽形式。Hargrove 采用了第三种模型求得了钝铜激光器的增益参数^[2]。我们认为铜蒸气激光脉冲有一定的宽度 (20~30 ns), 在光脉冲通过放大器介质时, 由于脉冲前沿消耗的反转粒子数不可能很快由电激励得以补充, 即反转粒子密度不满足稳态条件 $\partial\Delta/\partial t = 0$ (Δ 为反转粒子密度)。结果信号脉冲前沿的增益将大于后沿的增益^[3]。因此采用第一种模型更为合理。增益参数是通过一个振荡-放大系统测得。根据 Frantz-Nodvik 模型^[4], 放大器的输出能量可以表示为:

$$E_0 = E_i \ln [e^{gL} (e^{E_i/E_s} - 1) + 1] \quad (1)$$

这里 E_i 和 E_0 分别是输入信号和输出信号的能量密度, E_s 是饱和能量密度, g 是小信号增益系数, L 是激活长度。在推导该公式时为简单起见, 没有涉及激活介质的谱线形状的影响, 同时还作了以下三个假设:

- (1) 在放大期间上、下能级的所有泵浦和驰豫过程都不预考虑。
- (2) 光的损耗不预考虑。

收稿日期: 1987年4月6日; 收到修改稿日期: 1987年5月11日

(3) 入射光是单色的(实际 5106 \AA 线宽为 10 GHz)^[3]。这三个假设对实际激光器来说似乎很难办到,而且实验测到的增益值与许多特殊条件有关,诸如入射光时间、入射光在放大器端面位置等,尤其前者会引起测量值较大起伏。实验中是固定其它条件,通过调节触发延迟看输出光强变化来确定最佳入射光时间。考虑到公式(1)简化和放大器内激活粒子空间分布、纵向驰豫的不均匀,实验中获得 g 和 E_s 应具有时间、空间和光谱范畴平均值意义。从图2看到适当选择 g 和 E_s 参数,该公式同实验结果符合得很好。由于放大自发发射份量很小,测量功率时被光阑挡住,不予考虑。如果 $E_i \gg E_s$, 公式(1)可以简化为:

$$E_0 \approx E_i + gLE_s, \quad (2)$$

gE_s 是从激光介质中提取的能量密度,与反转粒子密度 Δ 有关:

$$g \cdot E_s = \frac{1}{2} h\nu \cdot \Delta. \quad (3)$$

这里 $h\nu$ 是 5106 \AA 光子能量。 $1 \mu\text{J} \cdot \text{cm}^{-3}$ 提取能量密度相当于 $\Delta = 5.1 \times 10^{12} \cdot \text{cm}^{-3}$ 反转粒子密度。

三、实验装置

图1是实验装置示意图。振荡器是一个稳定输出的铜蒸气激光器,激活区域 $\phi =$

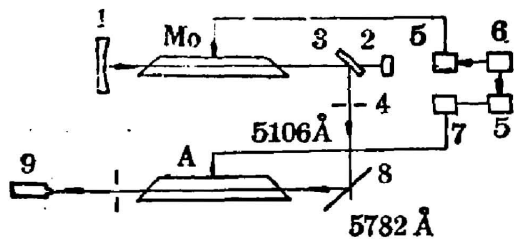


Fig. 1. Schematic diagram of the apparatus

M_0 —a laser master oscillator; A —an amplifier;
1, 2, 3—mirrors of unstable resonator; 4—
apertures of diameter; 5—pulse generator;
6—master generator; 7—time interval; 8—
optical filter; 9—power meter

26 mm, $l = 800 \text{ mm}$; 输入电源功率为 2500 W 时,最大输出功率为 10 W 。通常铜蒸气激光二条振荡谱线 5106 \AA , 5782 \AA 的强度之比为 $7:3$ 。在信号光进入放大器之前,黄光 5782 \AA 透过 45° 角滤光片,不进入放大器。所有自限跃迁激光器在稳定腔条件下工作都有较大的光束发散度,这就导致了输入到放大器中的一部分光被放电管内壁散射。为了降低角发散度,采用非稳腔输出。非稳腔放大率 $M = 55$, $R_1 = 5 \text{ m}$, $R_2 = -0.9 \text{ m}$,斜孔板相对于管轴 45° 角构成耦合输出。光束直径 $\phi = 20 \text{ mm}$,发散角 $\theta = 0.5 \text{ mrad}$ 。

放大器的放电管同样采用放电自加热形式,激活区域 $\phi = 26 \text{ mm}$, $l = 800 \text{ mm}$,放大器的出、入射窗口都是平行平板玻璃,为了消除寄生振荡,平板玻璃与管轴构成 5° 角。 Ne 作为缓冲气体,充气压 $20 \sim 40 \text{ Torr}$ 。在稳腔工作时,当输入电源功率为 3000 W 时,激光输出功率为 13 W 。用一台主脉冲信号发生器发出的信号同时控制二台相同型号的脉冲信号发生器,而后者同时经功率放大后分别触发振荡器和放大器电源的闸流开关。调节后二台脉冲信号的相对时间延迟,即可控制振荡器和放大器之间的同步。

四、实验结果与讨论

(一)图2给出了放大器输入和输出的平均光能量密度关系。点是实验结果,曲线是根

据公式(1)计算得出的数据, 可以看到该公式与实验结果符合得很好。经最小均方根处理, 增益参数被确定为 $g=0.2\text{ cm}^{-1}$, $E_s=22.3\ \mu\text{J}\cdot\text{cm}^{-2}$, $g\cdot E_s=4.46\ \mu\text{J}\cdot\text{cm}^{-2}$ 。这也意味着在饱和范围内放大器具有 $7\text{ W}(5106\ \text{\AA})/\text{m}$ 输出。若把放大器的效率定义为:

$$\eta = \frac{\text{信号光激发出的功率}(5106\ \text{\AA})}{\text{在稳腔条件下输出功率}(5106\ \text{\AA})}$$

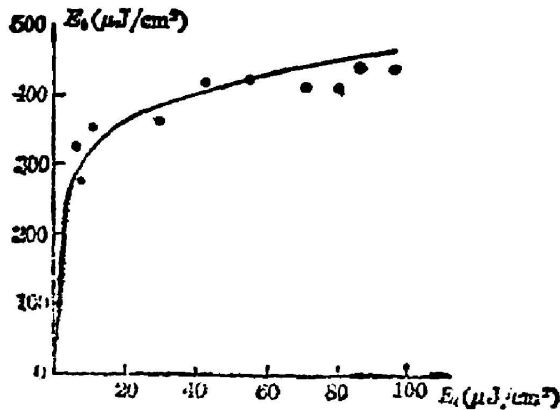


Fig. 2 Dependence of laser output energy density on energy density of amplifier input signal, at $I=560\ \text{mA}$, $V=5000\ \text{V}$, $f=5\text{ kHz}$, $P_{N_0}=30\ \text{Torr}$

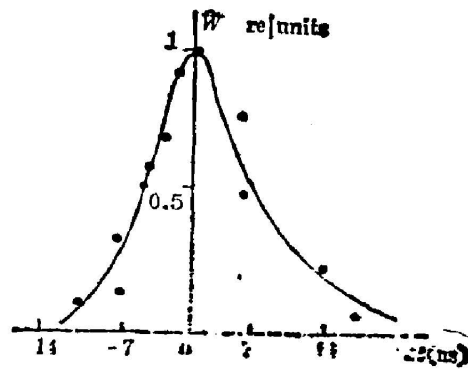


Fig. 3 Dependence of output power in saturated gain regime on timing mismatch of the input signal relative to attainment of maximum inversion in amplifier active medium: $W_{1s}=100\ \text{mW}/\text{cm}^2$

则我们的效率为 $65\sim 70\%$ 。Hargrove 指出^[4]: “在饱和范围内, 采用自终止激光介质的放大器效率不超过 90% ”。因为不可能在振荡-放大器之间有理想的时间和空间匹配, 非理想匹配导致放大器内部反转能量以放大自发辐射形式射出。

(二) 实验中得到增益参数是与测量瞬时粒子数反转密度有关, 为了获得最大增益参数, 振荡器脉冲信号与放大器内最大反转的时间同步是非常重要的。实验中发现由于各种原因引起的同步失调(如触发电源不稳定, 电信号时间漂移等), 引起放大器入射光时间和产生最大反转时间的时差发生变化, 结果使放大器输出功率明显降低, 甚至出现自吸收现象。图 3 给出了触发信号延迟误差与相对输出功率的关系(符号+和-分别对应于输入信号的超前和延迟)。当触发延迟误差 $5\ \text{ns}$ 时, 功率下降一半; 当误差大于 $12\ \text{ns}$ 时, 增益几乎消失。另外, 当输入信号超前于最大粒子数反转时, 其功率下降要比迟后于最大粒子数反转时小。这是因为输入光脉冲有一个较长的尾巴被放大所致。当输入信号迟后于最大粒子数反转时, 则只有信号光的前沿被放大, 功率就衰减慢一些。

(三) 在某些实际应用中有一个数据是评价放大器输出光束质量的重要参数, 即放大器输出光能中被放大的信号光与超辐射光之比。我们在实验中发现, 有三个条件影响着这个参数。(1) 信号光: 在没有信号光输入时, 放大器输出光就是一个强度均匀分布的荧光本底, 随着信号光的输入增强, 这个本底就减弱。当信号光强超过饱和强度时, 这本底强度就减弱至 $1\sim 2$ 个数量级。(2) 振荡器和放大器之间的同步: 当同步被干扰时, 放大器的本底也加强。(3) 入射光束直径: 适当增加入射光束的直径也会使放大器输出的放大自发发射噪声减弱, 使被放大信号光功率增加。这就是前面提到的空间和时间匹配问题。

参 考 文 献

- [1] B. S. Hargrove, R. Grove *et al.*; *IEEE, J. Q. E.*, 1979, **QE-15**, No. 11 (Nov), 1228.
[2] L. M. Frantz, J. S. Nodvik; *J. Appl. Phys.*, 1963, **34**, No. 8 (Aug), 2346.
[3] 梁宝根等人;《中国激光》, 1986, **13**, No. 6 (Jun), 334。
[4] 《固体激光导论》编写组;《固体激光导论》, (上海人民出版社, 1975), 376。

Investigation of the gain of copper vapor laser
Yin Xianhua, Liang Baogen, Tao Yongxiang

YIN XIANHUA, LIANG BAOPEN, TAO YONGXIANG, CUI JIANLI AND CHEN LIFEI
(*Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Academia Sinica*)

(Received 6 April 1987; revised 11 May 1987)

Abstract

The gain and saturation energy density of the 5106 Å line of Copper Vapor Laser measured with an oscillator and a single-pass amplifier are 0.2cm^{-1} and $22.3\mu\text{J}\cdot\text{cm}^{-2}$ respectively. The experimental results are also discussed.

Key words: spatial and temporal matching.