

注入锁定铜蒸气激光器中自发辐射的影响

张 勇 梁培辉 雷建求 任 虹 沈琪敏

(中国科学院上海光机所 上海 201800)

提要 利用铜蒸气激光动力学模型模拟了注入锁定中注入光与放大自发辐射之间的竞争过程,分析了注入锁定效果与注入功率的关系,并就如何增强注入光对噪声光的抑制作用进行了讨论。

关键词 注入锁定, 铜蒸气激光, 偏振度, 自发辐射

1 引 言

应用注入锁定技术能够显著提高铜蒸气激光器的工作性能,已被一些报道所证明,如梁培辉等所报道的铜蒸气激光注入锁定前后光束方向性、偏振度的变化^[1,2],耿纪宏等所报道的注入种子的激光频率对卤化铜激光器激光频率的影响^[3],这些均表明注入光能对注入激光器的性能进行有效控制。但是从这些实验结果也可以看出,注入锁定后的输出光束的质量(包括方向性、单色性和线偏振度等)都比注入信号略差。为了弄清注入脉冲的参数与输出光束的质量之间的关系,我们应用铜蒸气激光动力学模型模拟了注入锁定过程,着重分析了注入光与腔内噪声辐射(即增益介质内的放大自发辐射)之间的相互竞争,并就如何提高注入锁定的效果进行了讨论,这些分析同样有助于我们进一步认识其他短脉冲激光器的注入锁定过程。

2 分析模型

本计算所使用的铜蒸气激光动力学模型主要参照 Kushner 的工作,细节可参阅[4,5]。

模型中所采用的注入锁定光路如图 1 所示。激光分为 I_i 分量和 I_n 分量,分别描述注入放大光和由自发辐射产生的噪声光,光强方程为

$$\frac{\partial I_i^\pm}{C\partial t} \pm \frac{\partial I_i^\pm}{\partial x} = B\Delta N I_i^\pm - \gamma I_i^\pm \quad (1)$$

$$\frac{\partial I_n^\pm}{C\partial t} \pm \frac{\partial I_n^\pm}{\partial x} = B\Delta N I_n^\pm + h\nu A Cu^* \alpha - \gamma I_n^\pm \quad (2)$$

其中 \pm 对应激光正、负传播方向,等式右端第一项表示由于受激辐射引起的光强增强, ΔN 为反转粒子

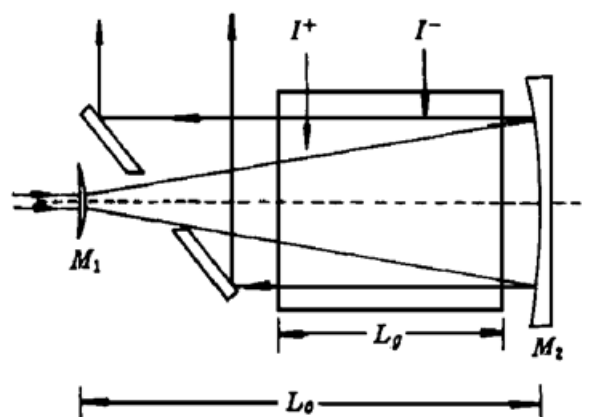


图 1 注入锁定非稳腔光路

Fig. 1 Optical schematic of the injection locked unstable resonator

数, B 为受激辐射系数; γ 表示气体吸收、窗口反射以及非稳腔内由于光束扩散等引起的损耗。式(2) 右边第二项表示噪声光由于自发辐射引起的光强增强, $h\nu$ 为光子能量, A 是上能级自发辐射系数, Cu^* 为铜激光上能级粒子数密度, α 为一几何因子, 表示放电管对自发辐射空间的限制

$$\alpha = \frac{d}{2L_g} \quad (3)$$

其中 L_g 为放电管长度, d 为放电管直径。

被注入激光腔为非稳腔。由于激光在腔内经历了振荡放大过程, 以下称之为振放腔。出于简便, 这里将非稳腔对激光的影响仅限于输出端, 因而放电开始以后($t > 0$) 注入放大光和噪声光的边界条件为

$$\begin{aligned} I_i^+(0, t) &= R_1 I_i^-(0, t) + I_{in}(0, t); & I_a^+(0, t) &= R_1 I_a^-(0, t) \\ I_i^-(0, t) &= R_2 I_i^+(L_c, t); & I_a^-(0, t) &= R_2 I_a^+(L_c, t) \end{aligned} \quad (4)$$

其中 R_1, R_2 分别为腔镜 M_1, M_2 的反射率, L_c 为振放腔长度, M 为被注入腔放大率。方括号中的 $I_{in}(0, t)$ 为注入光强度, 只对注入放大光有效。 $I_{in}(0, t)$ 的波形可采用振荡腔模型中所产生的输出波形, 也可用超高斯形模拟, 在峰值强度、脉宽相同时对结果的影响差别不大。本文中所采用的形式为

$$I_{in}(t) = I_0 \exp \left[- \left[\frac{t - t_d - \frac{x}{C}}{t_w} \right]^4 \right] \quad (5)$$

其中 I_0 为注入光峰值强度, t_w 为注入光脉宽, t_d 为注入光进入振放腔的延时。相应输出光强度

$$I_{in}(t) = I_{in}^-(0, t) \left[1 - \frac{1}{M^2} \right] \quad (6)$$

为了便于配合实验分析, 假定注入光为全偏振光($I_{//}$ 分量), 则可以按输出光的偏振度大小来判定注入锁定效果。定义输出光强度的偏振度(Polarization Degree)为

$$P_d(t) = \frac{I_{//}(t) - I_{\perp}(t)}{I_{//}(t) + I_{\perp}(t)} \quad (7)$$

相应的平均偏振度

$$P_d = \frac{P_{//} - P_{\perp}}{P_{//} + P_{\perp}} \quad (8)$$

其中 $P_{//}, P_{\perp}$ 分别为注入放大光和噪声光的输出功率。功率与光强的关系为

$$P_{in} = \frac{\pi}{4} d^2 \nu \int_0^{1/K} I(t) dt \quad (9)$$

其中 ν 为激光器放电频率。由于振放腔无特别起偏和退偏效应, $P_{//} = P_i + P_n/2, P_{\perp} = P_n/2$, 代入(8) 式中, 得到

$$P_d = \frac{P_i}{P_i + P_n} \quad (10)$$

由此可见以偏振度来表征注入锁定的效果于计算和实验都是很方便的方法。

3 计算结果与分析

取被注入激光器放电功率 4 kW, 放电频率 $\nu = 6$ kHz, 计算中所用到的其它参数见表 1。同

时给出注入光参考脉宽,以模拟实际铜激光脉宽。

Table 1

parameter	value	units	parameter	value	units
L_c	225	cm	A	1/784	ns^{-1}
L_g	90	cm	B	6.386×10^{-15}	cm^2
R_1	0.5		d	4	cm
R_2	1		γ	0.007	1/cm
M	4		t_w	30	ns

在振放介质净增益开始以前,腔内始终存在由于上能级自发辐射产生的噪声光(P_n 分量),但强度很低。如果无注入或注入强度极低,则噪声光将逐渐积累,最终形成激光输出。从净增益开始到噪声光达到峰值之间需有超过 30 ns 的积累时间^[2],在这段时间内只要注入光强度大于腔内噪声光强度,注入光即可因大量消耗反转粒子数而抑制噪声光。在以前的工作中我们已说明注入脉冲出现的最佳延时(以脉冲前沿峰值的 1/e 处进入振放腔时间为标准)对应着振放介质净增益的开始时刻,而此时噪声光强度很低,因而注入光强度比较低时即可使输出光的偏振度受到很大控制。在本计算中,如图 2 所示,注入功率为输出功率的 8×10^{-3} 时输出光偏振度即达 90% 以上,注入光对振放腔模式的控制效果非常明显。再提高注入功率时,偏振度的增加非常缓慢,最终停滞于 97% 左右。这是由于在增益过程中的放大自发辐射使输出光中始终存在少量噪声光,从而限制了注入锁定效果的进一步提高。

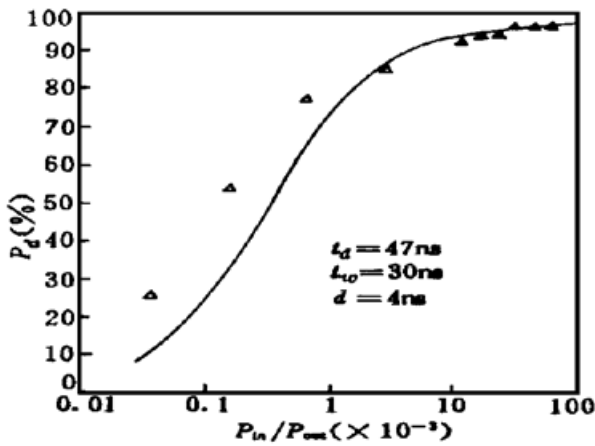


图 2 输出偏振度随注入功率变化计算曲线。注入光出现的延时为最佳延时, $t_d = 47$ ns。△——实验结果

Fig. 2 Computer calculations of the output polarization degree versus the ratio of injected power to output power. The emerge time of the injected light is the optimum delay $t_d = 47$ ns. The Δ points are experimental data

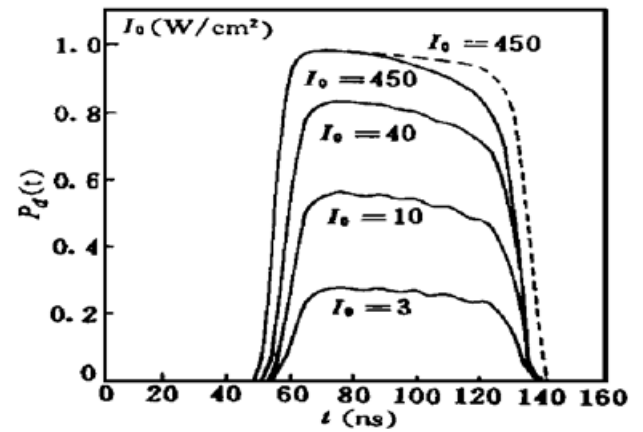


图 3 对应于不同注入峰值功率的输出脉冲偏振度计算结果(实线),注入脉宽 $t_w = 30$ ns。虚线是注入光脉宽加宽到 80 ns 时的输出脉冲偏振度计算结果

Fig. 3 Calculated pulse polarization degree with various injected peak intensities (solid lines), the injected pulse width t_w is 30 ns. The dashed line is the result of injected light with pulse width $t_w = 80$ ns

图 3 给出激光脉冲的偏振度时间变化波形。图中的实线对应注入脉冲宽度为 30 ns,虚线

对应注入脉宽为 80 ns。偏振度的时间波形近似于方波,但都在达到峰值后即逐渐下降,这可从两方面来理解。一是由于噪声光的的增长项中包含自发辐射项(见式(1),(2)),从而噪声光的的增长比注入放大光更快;另一方面是由于注入光的出现比输出光的出现时间稍前,且注入脉宽较短,激光输出刚达到峰值后不久注入光即衰弱,式(5)中注入放大光正向初值 $I_i^+(0, t) \approx I_i^-(0, t)/M^2$,这使得注入放大光对噪声光的抑制作用大大减弱。其中后一方面原因在注入强度较强时表现得更加明显,因为此时注入强度已可与腔内噪声光强度相比拟,所以图 3 中注入强度越高,脉冲后沿的偏振度下降越明显。为印证注入脉冲宽度对输出光偏振度时间行为的影响,图 3 中同时给出注入脉宽加宽后的脉冲偏振度波形(虚线)。峰值相同,脉宽加宽后注入功率将相应升高,表 2 列出不同注入参数对应的输出平均偏振度,由此可见加宽注入脉冲宽度对提高注入锁定的效果具有一定的作用。不同于连续和长脉冲激光器,铜激光脉宽很短,激光输出时间内介质增益都高于阈值,自发辐射总能得到放大,因而注入脉冲宽度加得太长时是无益的,而是与振放介质净增益时间宽度相匹配时方能达到最佳效果。图 3 中,当注入强度不太高时脉冲的偏振度存在微弱的起伏,其周期与光在腔内往返一周的时间相等,是由于振放腔边界条件造成的。

Table 2

I_0 (W/cm ²)	P_{in} (W)	t_w (ns)	P_d (%)
450	0.84×10^2	30	95
1200	1.92×10^2	30	96
450	1.92×10^2	80	96.8

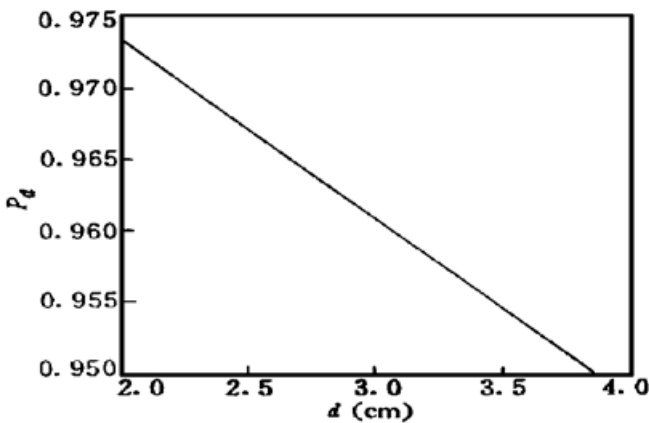


图 4 输出偏振度与放电管直径关系计算结果。注入脉冲的参数为 $t_d = 47$ ns, $t_w = 30$ ns, $I_0 = 400$ W/cm²

Fig. 4 Calculated output polarization degree versus the diameter d of the discharge tube. The parameters of injected pulse are $t_d = 47$ ns, $t_w = 30$ ns and $I_0 = 400$ W/cm²

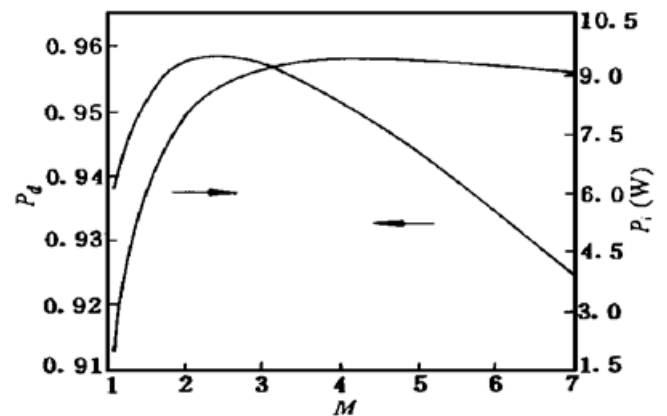


图 5 输出偏振度和注入放大光功率 (P_i) 与非稳腔放大率关系计算曲线

Fig. 5 Output polarization degree and amplified injected light power (P_i) versus amplification of the unstable resonator

为提高注入光对噪声光的抑制作用,应尽量降低自发辐射对噪声光的贡献,这主要边线在几何因子 α 中。根据式(3), α 与放电管长 L_g 、直径 d 密切相关,实际上一旦激光器做好之后这两

个参量很难再改变。这里不妨固定腔长, 改变直径 d , 计算出的输出平均偏振度如图 4 所示。图 4 中, 当放电管直径减小时输出光偏振度略有升高, 说明激光器放电管参数的选取对注入锁定的效果有一定的影响。

另一种抑制噪声辐射的方法是改变振放腔的损耗, 这主要体现在振放腔放大率 M 上。图 5 给出放大率改变时输出平均偏振度和注入放大光输出功率随腔放大率改变而变化的曲线。图中最佳输出偏振度所要求的腔放大率比较小, 仅 2.6 左右, 但此时注入放大激光能量输出也较小; 而当提高腔放大率, 即提高了输出耦合后噪声光也会因反馈的注入信号减弱而令自发辐射获得充分放大, 造成输出平均偏振度下降。因此为使激光器工作于较好的状态, 应在效率和注入锁定效果之间取一折中的腔放大率。

4 结 论

通过以上分析可见注入激光能有效控制振放腔的模式, 但由于放大自发辐射的原因输出光不可能达到百分之百的控制, 而且注入强度越大, 输出脉冲后沿的偏振度下降越明显。提高注入锁定效果的方法有增加注入脉冲宽度, 提高放电管对自发辐射的空间限制能力, 选择适当的腔放大率等, 这些方法可在实验中视情况适当选取。

本文虽然以铜蒸气激光为例考察了自发辐射在注入锁定过程中的作用, 但其研究方法及其结果同样有助于深入理解其它脉冲激光器(包括准分子、染料等)的注入锁定。

参 考 文 献

- 1 梁培辉, 任 虹, 沈琪敏 等. 注入锁定铜蒸气激光器的实验研究. 光学学报, 1987, 7(9): 783~ 787
- 2 任 虹, 沃敏政, 沈琪敏 等. 注入锁定铜蒸气激光器的时空、能量以及偏振特性. 中国激光, 1990, 17(3): 129~ 133
- 3 耿纪宏, 张桂燕, 宋秀冬 等. 注入种子 CuBr 激光器中的光谱控制. 中国激光, 1995, A23(2): 166~ 170
- 4 M. J. Kushner. A model for the dissociation pulse, afterglow, and laser pulse in the Cu/CuCl double pulse laser. *J. Appl. Phys.*, 1980, 51(6): 3020
- 5 M. J. Kushner. A self-consistent model for high repetition rate copper vapor lasers. *IEEE J. Quant. Electr.*, 1981, QE-17(8): 1555

Influence of Spontaneous Emission in Injection Locked Copper Vapor Laser

Zhang Yong Liang Peihui Lei Jianqiu Ren Hong Shen Qimin
(Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800)

Abstract The competition between the injected laser and the amplified spontaneous emission in an unstable resonator is studied numerically with a dynamic model of injection locked copper vapor laser, and the effectiveness of injection locking is analyzed with injected power. At last the problem about how to increase the effectiveness of injection locking is discussed.

Key words injection locking, copper vapor laser, polarization degree, spontaneous emission