

铜蒸气激光注入锁定的数值模拟

张 勇 梁培辉 沈琪敏 任 虹 雷建求

(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过程,分析了注入脉冲强度、宽度和延时对激光输出的影响,获得两点重要结论,即注入光出现的最佳延时与增益开始时刻相一致,注入光最佳脉宽与净增益时间宽度相一致。

关键词 注入锁定,铜蒸气激光,速率方程

1 引 言

采用注入锁定技术能方便地获得高功率、高质量(包括窄线宽、频率稳定性、方向性等)的激光,在 CO₂、钛宝石、准分子等激光器中做过许多实验和理论研究^[1-3],结果表明这种方法特别适用于高增益、短脉冲激光器。

铜蒸气激光具有高增益、短脉冲、光束发散角大的特点。通常提高铜蒸气激光输出方向性的方法是采用非稳腔。注入锁定技术运用于铜蒸气激光,可以方便地在振荡器中使用高倍非稳腔,并在注入光路上进行滤波而获得方向性好的光,注入到功率较高的振放腔内从而获得高功率、高方向性的激光输出^[4]。注入锁定的效果与注入光的强度、延时、脉宽等均有密切关系。本文利用铜蒸气激光动力学模型模拟了铜激光注入锁定过程,主要从激光强度方面探讨了注入光参量变化对输出的影响,获得了一些重要的结论。

2 计算模型

注入锁定的过程是将一定波形和强度的脉冲信号经过延时注入到振荡放大谐振腔(简称振放腔)中,信号与放大介质相互作用形成功率放大的输出光束。对此过程的模拟是用激光速率方程描写激光的放大过程,用多粒子碰撞的动力学过程描写铜及缓冲气体氖原子的激发和消激发过程。

铜激光的动力学模型已有过很多报道^[5-7],本文主要参照 Kushner 的模型模拟铜激光注入锁定过程。本计算采用了以下几点近似:(1)铜蒸气激光器中电子束能量一般不超过 5eV,因而假定电子能量分布仍然服从 Maxwell 分布;(2)假定放电管内气体温度径向均匀(放电管直径 $D \leq 4$ cm),忽略其它各参量的径向变化;(3)光强的变化采用一维输运方程描述,由于粒子反转时间很短 ($\tau < 100$ ns),故假设其它各参量在轴向无输运;(4)铜原子激光辐射态包

括 510.6 nm 和 578.2 nm 两种波长的跃迁,在此仅考虑 510.6 nm 波长一种,另一种可类似。

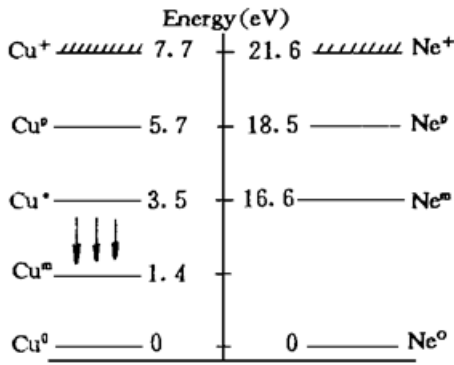


图 1 铜和氖原子能级图

Fig. 1 Energy levels of copper and neon atoms

模型中所考虑的铜和氖原子的能级如图 1 所示。当放电开始之后增益介质内各态粒子和电子间的主要动力学反应可分为两类,一类是原子与电子碰撞反应,包括碰撞激发、碰撞电离及其逆过程超弹性碰撞、辐射复合、碰撞辐射复合和弹性碰撞;另一类是原子与原子碰撞反应,包括 Penning 碰撞、碰撞消激发等。相应各态粒子和电子的密度方程可综合表示为

$$\frac{dN_i}{dt} = \sum_j F_{ij} N_j - \sum_j F_{ji} N_i - W_i N_i \pm (A N_i + B I \Delta N) \quad (1)$$

其中 F_{ij} 表示铜或氖原子从 j 态跃迁到 i 态的所对应的碰撞频率, $F_{ij} = K_{ij}(T_e) N_{ij}$, $K_{ij}(T_e)$ 和 N_{ij} 分别为碰撞跃迁所对应的碰撞速率和粒子密度。等式右边第三项表示粒子扩展到管壁引起的损耗, W_i 为相应的损耗系数。第四项代表激光上、下能级由于自发辐射和受激辐射引起的粒子密度变化, A, B 分别为上能级的自发辐射和受激辐射系数。本方程代表了十个子方程,分别描述铜的五个能级、氖的四个能级和电子的密度变化;另外还有放电回路方程。各方程和碰撞速率的详细情况可参阅文献[6, 7]。

电子温度 T_e 需求解能量守恒方程

$$\frac{3}{2} k \frac{dT_e}{dt} = S(t) + \sum_{ij} G_{ij} \Delta \epsilon_{ij} - \sum_{ij} D_{ij} \Delta \epsilon_{ij} - W_{Te} \frac{3}{2} k T_e \quad (2)$$

其中 k 为 Boltzmann 常数,等式右端第一项表示外电场对电子温度的贡献;第二项表示由于 Penning 碰撞和超弹性碰撞对电子温度的贡献,第三项表示由于碰撞激发、碰撞电离和弹性碰撞而造成的电子能量损耗, $\Delta \epsilon_{ij}$ 表示电子能量的改变量, G_{ij} 和 D_{ij} 代表各电子-原子碰撞的碰撞频率,意义与 F_{ij} 相同。所有的粒子数密度方程正是通过由电子温度 T_e 所决定的碰撞频率而相互耦合起来;最后一项表示电子扩散到管壁而损耗的能量, W_{Te} 为相应损耗系数。

模型中所采用的非稳腔光路如图 2(a) 所示,可将激光在腔内的传输过程展开,如图 1(b) 所示。激光分为正、负传播方向,光强方程为

$$\frac{\partial I^\pm}{c \partial t} \pm \frac{\partial I^\pm}{\partial x} = B \Delta N I^\pm + h\nu A C_u^* \alpha - \frac{\ln(M)}{L_c} I^\pm - \gamma I^\pm \quad (3)$$

其中 \pm 对应激光正、负传播方向,等式右端第一、二项分别表示由于受激辐射和自发辐射引起的光强增强, ΔN 为反转粒子数, $h\nu$ 为光子能量, C_u^* 为铜上能级粒子数密度, α 为几何因子;第三项代表由于光束扩散引起的损耗, M 为腔放大率, L_c 为腔长; γ 代表由于气体吸收、窗口反射等引起的损耗。

设注入光强为 $\phi_m(x, t)$, 在放电开始以前 ($t \leq 0$), 腔内各位置的光强为

$$\begin{cases} I^+(x, 0) = \phi_m(x, 0) & (0 < x < L_c) \\ I^-(x, 0) = \phi_m(2L_c - x, 0) & (L_c < x < 2L_c) \end{cases} \quad (4)$$

放电开始以后 ($t > 0$) 的光强边界条件为

$$\begin{cases} I^+(0, t) = R_1 I^-(0, t) + \phi_m(0, t) \\ I^-(L_c, t) = R_2 I^+(L_c, t) \end{cases} \quad (5)$$

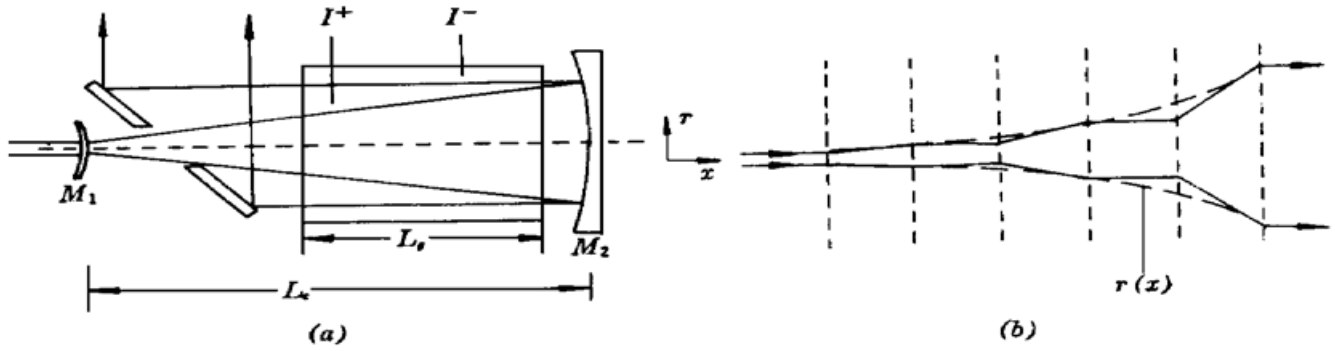


图 2 注入锁定非稳腔光路及其伸展模型。(b) 中的虚线代表由函数 $r(x) = r_0 \exp\left[\frac{1}{2} \frac{\ln(M)}{L_c} x\right]$

所模拟的光束半径, M 为腔放大率

Fig. 2 Optical schematic of an injection locking unstable resonator and its unfolded amplifier model. The dashed line in (b) represents a modelled beam radius by a function of $r(x) = r_0 \exp\left[\frac{1}{2} \frac{\ln(M)}{L_c} x\right]$, in which M is the magnification of the resonator

其中 R_1, R_2 分别为腔镜 M_1, M_2 的反射率。注入光 ϕ_m 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, 在峰值强度和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

$$\phi_m(x, t) = \begin{cases} I_0 \exp\left[-\left(\frac{t - t_a - \frac{x}{c}}{t_{w_1}}\right)^4\right] & t - t_a - \frac{x}{c} < 0 \\ I_0 \exp\left[-\left(\frac{t - t_a - \frac{x}{c}}{t_{w_2}}\right)^4\right] & t - t_a - \frac{x}{c} \geq 0 \end{cases} \quad (6)$$

其中 I_0 为注入光峰值强度, t_w 为注入光脉宽, $t_w = t_{w_1} + t_{w_2}$, t_a 为注入光出现的延时。

3 计算结果与分析

取放电功率 4 kW, 放电频率 6 kHz, 计算中所用到的其它参数见表 1。为研究注入光参数变化对输出的影响, 被注入激光器的参数相对固定。同时给出注入光参考脉宽, 以模拟实际铜激光脉宽, 其中前沿脉宽 t_{w_1} 保持不变, 以下当改变脉宽时只改变后沿脉宽 t_{w_2} 。文献[8]报道了以平-平腔作为振放腔的注入锁定实验结果, 由于本计算中非稳腔的作用仅限于式(3)中所增加的损耗项, 计算结果基本上可与该实验结果相比较。

Table 1

Parameter	Value	Units	Parameter	Value	Units
L_c	200	cm	A	1/784	1/ns
L_g	90	cm	B	6.39×10^{-15}	cm^2
R_1	0.5		α	10^{-5}	
R_2	1		M	10	
γ	0.007	cm^{-1}	t_{w_1}	10	ns
D	3.8	cm	t_{w_2}	20	ns

3.1 输出光波形分析

图3给出无注入和有注入的情况下输出光脉冲波形及注入光波形。没有注入光时,振放腔中的自发辐射经不断放大而产生激光输出,这需要一个由弱而强的过程,而一般远强于自发辐射的注入光的引入使得这一过程被大大缩短,输出光的出现比无注入时提前(约14 ns)。比较文献[8]中的实验结果,无注入时振放腔激光输出比注入光滞后59 ns,有注入时减少到44 ns,说明注入放大光比单纯振荡输出提前了15 ns,与计算结果相符。相应地,实验中激光脉宽在注入前后由36 ns增加到48 ns,计算表明增加的脉宽主要加在脉冲前沿。在上述滞后时间中,排除注入光在空间传输所需的24 ns,注入光进入振放腔后经过了20 ns的小信号放大过程才开始出现相当强度的激光输出,本模拟中这一过程约在40至57 ns之间。

由于实验所用的铜激光谐振腔菲涅耳数很大,激光的形成过程非常复杂,故观察不到图3中独立振荡波形所具有的峰值特征,但通过上节分析可见本模拟基本上是符合铜激光注入锁定过程的。

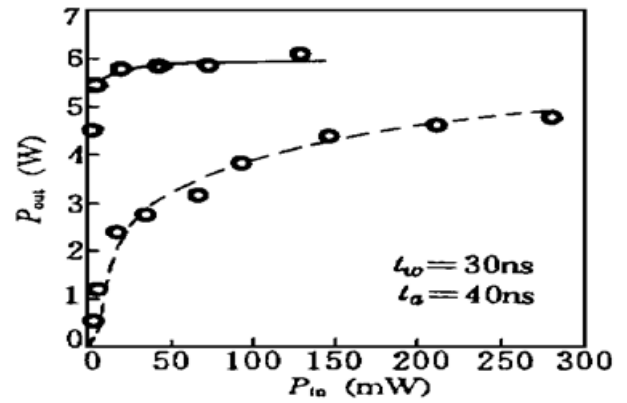
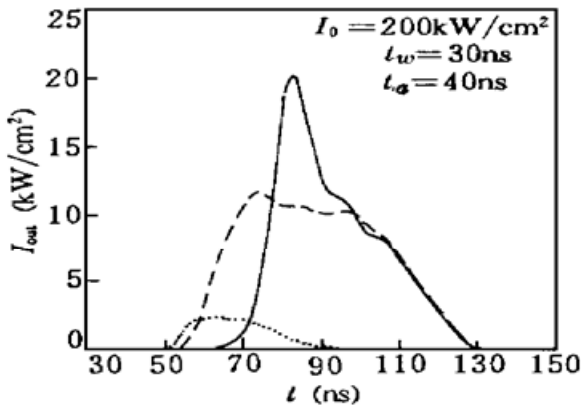


图3 计算出的注入光(点线)和输出光脉冲波形,其中实线为无注入时的输出光脉冲,虚线为注入锁定后的输出光脉冲

图4 注入锁定输出功率(实线)和行波放大输出功率(虚线)与注入功率关系计算曲线,(O)为实验结果

Fig. 3 Computer calculations of the injection power (dotted line) and the output power. The solid line (—) is the laser output power without injection, and the dashed line (—) is the output with injection

Fig. 4 Laser output energy dependence on the injection power for injection locking (solid line) and traveling amplification (dashed line). The (O) points are the experimental results

3.2 注入功率与输出功率的关系

固定延时 $t_a = 40$ ns, 逐渐提高注入功率, 计算出输出功率曲线如图4所示(实线), 图中圆圈为实验结果。为便于与已有的实验结果比较, 我们用本模型模拟了铜激光单程行波放大过程, 即取消反射镜 M_1, M_2 , 使注入光只通过放大介质一次就输出, 所获得的注入-输出功率关系如图5中虚线所示。对于注入锁定情况, 由于振放腔的反馈作用, 注入功率很小时即可获得较大功率输出, 且随着注入光的增强, 输出很快达到饱和, 输出功率比无注入时约提高10%, 说明注入光的引入有利于提高粒子反转沉积能量的利用率。行波放大输出功率随注入光增强趋向饱和的过程相对而言慢很多, 而且由于注入光脉宽(32 ns)小于放大器脉宽(36 ns), 使得注入光提取放大介质反转能量的效率受到限制。

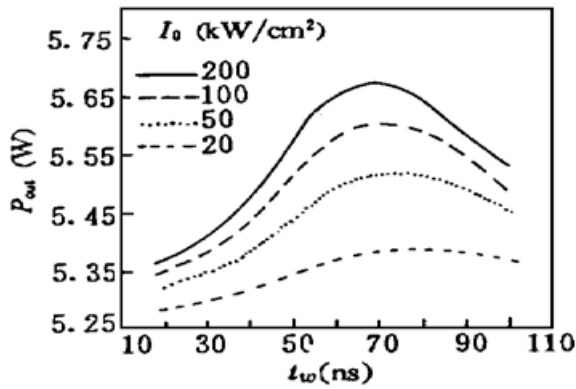


图 5 输出功率与注入脉冲宽度关系的计算曲线, 注入脉冲延时 $t_a = 40$ ns。 I_0 为注入脉冲峰值强度

Fig. 5 Calculated results of laser output dependence on the injected pulse width, $t_a = 40$ ns. I_0 is the peak value of the injected pulse

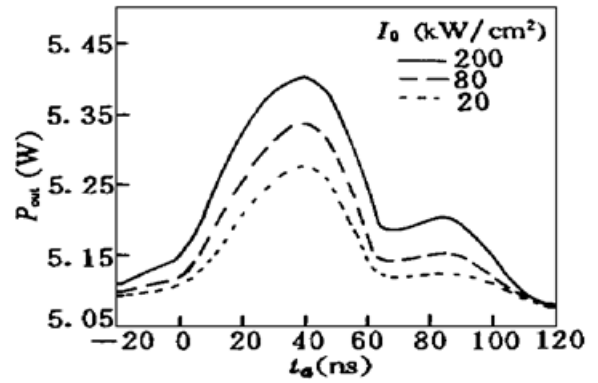


图 6 输出功率与注入脉冲延时关系曲线, 注入脉冲宽度 $t_w = 30$ ns, I_0 为注入脉冲峰值强度

Fig. 6 Calculated results of laser output dependence on the injected pulse delay, $t_w = 30$ ns. I_0 is the peak value of the injected pulse

3.3 注入光脉宽对输出的影响

固定延时 $t_a = 40$ ns, 改变注入光的脉宽, 计算出的输出功率变化曲线如图 5 所示, 曲线中的纵轴为输出功率减去相应注入功率, 以消除由于注入功率随脉宽增加而增加所带来的影响。由图可见, 输出功率的增长量随注入脉宽的增加而增加, 直到脉宽为 70 ns 左右, 这恰对应于介质中增益大于损耗的时间宽度。这表明当注入光脉宽接近于净增益时间宽度时最有利于利用粒子反转能量。

3.4 注入延时的改变对输出功率的影响

固定脉宽 $t_w = 30$ ns, 改变注入光出现的延时, 相应输出功率的计算结果如图 6 所示。当注入光进入振荡腔过早, 介质中铜上、下能级粒子数尚未达到反转, 部分注入光就会被吸收, 影响对介质反转沉积能量的提取。仔细的分析表明, 注入光进入振荡腔的最佳延时恰对应于介质净增益开始时刻 ($t_a = 40$ ns), 此时注入光能最充分地消耗反转粒子数。由于净增益开始时自发辐射还很弱, 增益能量将主要转化为注入放大能量输出, 由此可以理解文献[4]中所观察到的在延时最佳时低阶模功率输出最高, 高阶模功率输出最小。若注入延时大于最佳延时, 由于自发辐射的迅速增长, 注入光的作用很快减小; 延时超过 60 ns 后注入锁定的效果降到一极低值, 之后有一段平稳下降过程。文献[8]中的延时实验结果同样表明注入光的延时有一最佳值, 且在延时小于该值时功率变化较缓, 大于该值时功率变化较陡。

4 结 论

以上应用铜蒸气激光动力学模型模拟了铜激光注入锁定过程, 并与相关实验结果进行了比较, 说明本模型能够很好地符合实际铜激光注入锁定过程。通过模拟计算还得到了两点重要结论, 即注入最佳延时恰为增益大于损耗时刻, 最佳脉宽与增益时间宽度相一致, 这些结果将对实验具有重要参考价值。

致谢 在本工作中与尹宪华先生进行了有益的讨论, 在此表示感谢。

参 考 文 献

- 1 J. L. Lachambre, P. Lavigne, G. Otis *et al.*. Injection locking and mode selection in TEA-CO₂ laser oscillators. *IEEE J. Quant. Electr.*, 1976, **QE-12**(12) : 756
- 2 J. C. Barnes, N. P. Barnes, L. G. Wang *et al.*. Injection seeding $\overline{\Gamma}$: Ti:Al₂O₃ experiments. *IEEE J. Quant. Electr.*, 1993, **QE-29**(10) : 2684
- 3 I. J. Bigio, M. Slatkine. Injection-locking unstable resonator excimer lasers. *IEEE J. Quant. Electr.*, 1983, **QE-19**(9) : 1426
- 4 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
- 5 M. J. Kushner. A Self-consistent model for high repetition rate copper vapor lasers. *IEEE J. Quant. Electr.*, 1981, **QE-17**(8) : 1555
- 6 B. L. Borovich, N. L. Yurchenko. Analysis of the excitation and relaxation kinetics in a copper vapor laser excited by a longitudinal discharge. *IEEE J. Quant. Electr.*, 1984, **QE-14**(10) : 1391
- 7 尹宪华,梁宝根,陶永祥 等. 铜蒸气激光器的数值模拟. 中国激光, 1992, **19**(4) : 263~ 270
- 8 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

Numerical Simulation of Injection Locking in Copper Vapor Laser

Zhang Yong Liang Peihui Shen Qimin Ren Hong Lei Jianqiu

(Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800)

Abstract Injection locking in copper vapor laser is studied numerically with a dynamic model, the effect of injected pulse power, width and delay time is calculated, and two important conclusions are obtained. One is that the optimum delay time should be consistent with the beginning of gain, the other is that the optimum pulse width should equal to the net gain width.

Key words injection locking, copper vapor laser, rate equation