

# 注入种子 CuBr 激光器中的光谱控制\*

耿纪宏 张桂燕 宋秀冬 林福成

(中国科学院上海光机所, 上海 201800)

**提要** 报道了采用注入种子方法,对 CuBr 激光器进行激光模式控制的实验结果。实现了单纵模 CuBr 激光脉冲的注入放大,获得了功率为 100 mW 水平的窄线宽铜激光辐射。在理论上分析了短脉冲高增益激光器中注入种子过程,讨论了在注入种子 CuBr 激光器中进行光谱控制的实验结果。

**关键词** 注入种子, CuBr 激光器, 激光谱线, 短脉冲高增益激光器

## 1 引 言

注入锁定或注入种子是获得高质量高功率激光输出的一种简单而又非常有效的方法<sup>[1~4]</sup>。通过采用这种技术可以对激光器的时间特性、光谱特性、方向性、偏振特性等各方面进行有效的控制,人们已经对此项技术做了大量的实验和理论研究工作<sup>[5]</sup>。

铜蒸气激光器是一类常见的高增益短脉冲气体激光器。目前,国内外已有将注入锁定技术应用到铜激光器系统中的报道<sup>[6,7]</sup>。但是这些报道都集中在研究注入锁定对铜蒸气激光器的时空、能量以及偏振特性的控制上<sup>[8,9]</sup>,而忽略了对激光谱线控制作用的研究。本文报道的是在 CuBr 激光器中,注入种子对激光器放大级的激光模式控制的实验结果,并实现了单纵模 CuBr 激光的注入锁定放大,同时还分析了高增益短脉冲激光器中注入种子过程。

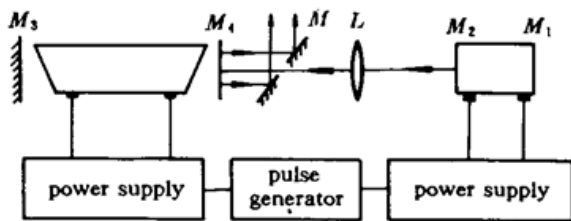


Fig. 1 Experimental setup  
 $M, M_1, M_3$ : mirrors (100%);  
 $M_2, M_4$ : glass mirrors;  $L$ : lens

## 2 实验装置

实验装置如图 1 所示。整个系统包括两台 CuBr 激光器,其中一台作为主振荡器,另一台作为被注入的放大器。两台激光器由两个独立的电源提供放电功率。由一台脉冲发生器产生两个相对延迟时间可调的电脉冲信号,分别触发两台放电电源各自的闸流管。在实验上,可以实现两台

激光器有任意的相对点火时间。放电重复频率可以在 10~25 kHz 内任意调节。

振荡器和激光放大器都有各自独立的谐振腔,它们可以是平行平面腔或平凹腔,其腔长没

\* 国家自然科学基金和中国科学院青年基金资助项目。

有任何匹配关系。改变振荡器的腔体结构,振荡级可以有不同的激光模式输出。平面全反镜  $M$  是输出耦合镜,它中央处的小孔可以确保种子激光穿过该镜注入到激光放大器中。

激光的光谱特性由一个自由光谱区为 2 GHz 的扫描干涉仪 (Spectra-Physics Model 470-03) 来监视。激光的时间波形则用一个快速响应的光电二极管和 500 MHz 带宽的示波器观察。

### 3 振荡级决定激光放大器输出的激光模式

关于振荡器的激光模式控制,我们已经发表过多篇文章<sup>[10~12]</sup>。当没有种子激光进入放大器中时,激光放大器处于自由振荡状态,由于其腔内没有采取任何措施控制其激光模式振荡,正如我们在文献[10]中所报道的,激光纵模分辨不开,其频谱为连续分布,线宽近 1 GHz,如图 2 所示。即使种子激光进入放大器,但两台激光器的相对延迟时间超出了发生注入锁定的延迟范围时,注入锁定过程不能发生<sup>[7]</sup>,激光放大器则还是按照自己的方式自由振荡。

如果激光振荡器腔内不加小孔,这时处于自由振荡状态的振荡器的光谱分布也是连续分布,如图 2 所示。但是,在抑制掉高阶横模的振荡后,振荡级激光器输出具有分立结构的光谱,如图 3(a) 所示。如果我们以这种分立结构的激光谱线作为种子激光,注入到激光放大器中,此时只要两台激光器的相对延迟时间能确保注入锁定能够发生,激光放大器也就输出类似光谱结构的激光谱线,如图 3(b) 所示。从图中可以看出,当存在注入种子过程时,激光放大器的光谱结构被种子激光锁定,而不是输出自由振荡时连续分布的频谱。而且在图 3(b) 中显示的激光模式不是放

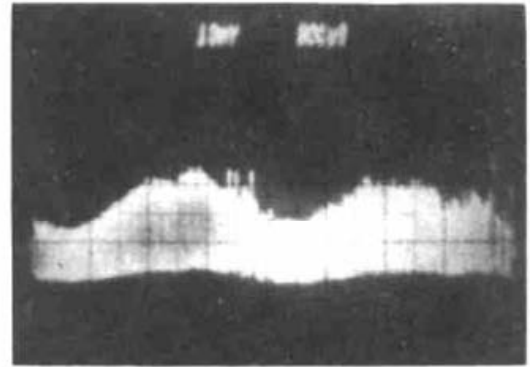


Fig. 2 The spectrum of the yellow line in a free-running CuBr laser

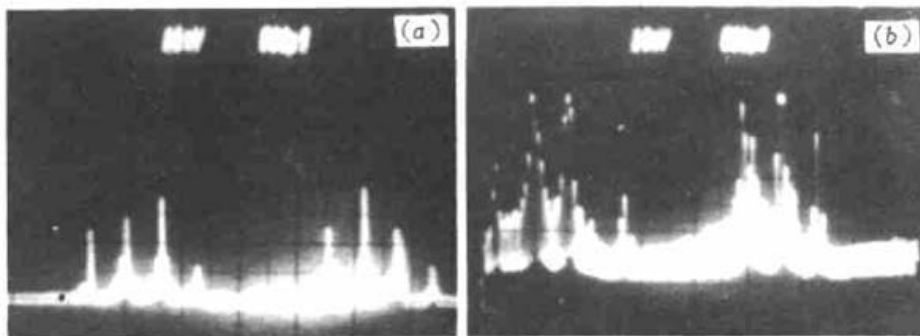


Fig. 3 The spectral properties of (a) the seed laser and (b) the injection-seeded output laser in the situation of multiple longitudinal modes

大级本身的本征纵模,而是振荡级输出的激光纵模的功率放大。因此,种子激光的注入,抑制了激光放大器本身的模式形成过程。在时域上的观察也同样确证了这一点。图 4 所示的就是种子激光与激光放大器输出的激光时间波形。实际上振荡器和放大器的激光腔长相差甚远,但是激光放大器的时间波形具有振荡器自锁模脉冲相同的调制频率,此频率与振荡器的腔长相对应。实际上,图 4 就是图 3 中光谱结构在时间域上的反映。因此,在 CuBr 激光系统的注入种子

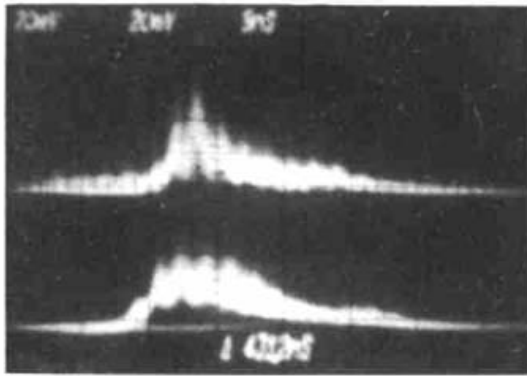


Fig. 4 The temporal properties of the seed laser (upper curve) and the injection-seeded output laser (lower curve)

过程中,模式匹配是不需要的。从以上这些图中还可以看出,激光放大器输出的激光谱线没有振荡器的谱线清晰,并且存在一个背景本底,这说明在高增益的 CuBr 激光中,种子激光经过放大器后光谱纯度变差。实验表明,在种子激光功率不变的情况下,激光放大器的增益越高,光谱纯度就越低,这是因为增益增大后,种子激光在同放大自发辐射竞争放大器的激光增益时,变得越来越不利,这可从我们后面的讨论中清楚地看出。

#### 4 单纵模铜激光的注入锁定放大

我们已经报道过<sup>[12]</sup>,在短尺寸的 CuBr 激光器中,通过采用复合腔来抑制激光纵模振荡,可以实现 CuBr 激光的单纵模运转,但其输出功率很低,只有 1 mW 左右。如果以这种单纵模激光作为种子激光注入到放大器中,那么就可以得到功率放大百倍以上的线宽为 200 MHz 的铜激光辐射,如图 5。同样,随着放大器增益的提高,激光输出功率加大,但其光谱纯度变差。

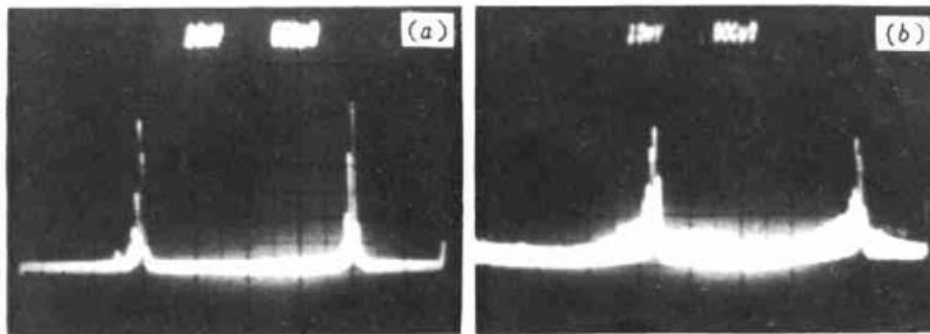


Fig. 5 The spectral linewidth narrowing of a CuBr laser by injection seeding a single-longitudinal-mode laser (a) the seed laser; (b) the injection-seeded laser

#### 5 讨 论

CuBr 激光具有高增益但增益时间短的特点,激光在腔内只来回振荡几次就结束了,这种特性与其他激光器相比差别很大,因此其注入锁定过程也不同于其他激光器。考虑到短脉冲高增益的模式形成和振荡过程,在激光往返传播  $n$  次以后,激光谱线结构由下式决定<sup>[13]</sup>

$$I_n = \frac{I_1 F^{2n}}{(F - 1)^2 + 4F \sin^2(x/2)} \quad (1)$$

其中单程有效增益系数

$$F = R_1^{1/2} R_2^{1/2} \exp(\oint \alpha dz)$$

归一化的光谱频率

$$\chi = \nu \oint (2\pi n_0/c) dz + \oint_i + \oint_s$$

$I_1$  为初始的噪声信号, 其他各参量的物理意义见文献[13]。这里为简单起见, 假设了激光在腔内  $n$  次传播的时间内激光增益  $\alpha$  为常数, 而且忽略了饱和效应对光谱分布的影响<sup>[13]</sup>。对于没有外来注入信号的情况,  $I_1$  就是激光器的自发辐射, 即激光模式是在自发辐射的基础上, 经过光腔的选频, 从而形成激光模式。当有外来注入信号时, 也就是本文所讨论的 CuBr 激光放大器,  $I_1$  则由注入信号  $I_i$  和放大器本身的自发辐射  $I_s$  共同组成

$$I_1 = I_i + I_s \quad (2)$$

那么(1)式可以写成

$$I_1 = (I_i + I_s) \cdot R(\alpha, \nu) \quad (3)$$

其中

$$R(\alpha, \nu) = \frac{F^{2\alpha}}{(F-1)^2 + 4F\sin^2(\chi/2)} \quad (4)$$

自发辐射噪声信号与增益有关, 并且可以认为

$$I_s \sim e^\alpha \quad (5)$$

$\alpha$  为激光增益常数。从(3), (4)两式可以看出, 短脉冲高增益的 CuBr 激光放大器可以看成是一个信号放大倍数为  $R(\alpha, \nu)$  的简单功率放大器, 放大倍数  $R(\alpha, \nu)$  随增益的增大而增大, 并在频域上具有选择性。放大器的信号由两部分组成: 外来注入信号和放大器本身的自发辐射。当激光增益很高时,  $F \gg 1$ ,  $R(\alpha, \nu)$  的光谱分布不表现为激光器的腔模结构形式<sup>[13]</sup>, 如果这时没有外来注入信号,  $I_s$  的光谱分布趋于连续分布。当有分立结构谱线的外来信号注入时, 并且  $F \gg 1$ ,  $I_1$  的分布则就是注入信号光谱分布的功率放大, 它不包含放大器本身的腔模特征。当提高增益但注入信号功率保持不变时, 那么自发辐射噪声指数增长, 这时光谱纯度

$$P = \frac{\int I_s d\nu}{\int I_i d\nu + \int I_s d\nu} \quad (6)$$

将大大减小。对于振荡器, 上面这些表达式仍然适用, 只不过没有外来注入信号  $I_i$ 。这时在振荡器腔内加小孔后, 就使得单程有效增益  $F$  大大降低, 并趋于 1, 振荡器就可以输出具有腔模结构的分立光谱<sup>[13]</sup>。

考虑到增益饱和效应后, 定量分析非常复杂。定性地说, 如果增益是均匀增宽的, 那么对注入信号  $I_i$  的放大倍数将不由  $R(\alpha, \nu)$  决定, 而是由  $R(\alpha, \nu)$  在整个频域上的积分所决定。由于增益饱和, 注入信号可以非常有效地抑制自发辐射噪声的放大。如果增益是非均匀增宽型的, 那么对注入信号的放大倍数将与注入信号强度有关, 并且随着注入激光强度在放大器中来回放大, 其放大倍数将逐渐饱和。这样单频注入信号就很难有效地抑制自发辐射噪声的放大。因此对于非均匀增宽的 CuBr 激光器的注入种子过程, 多纵模注入信号还可以较为有效地抑制自发辐射噪声的影响, 如获得高功率的自锁模激光脉冲以及高度空间相干的铜激光辐射, 但是对于单纵模 CuBr 激光的注入种子放大, 则抑制自发辐射噪声影响的能力非常有限。

### 参 考 文 献

- 1 Y. K. Park, G. Guiliani, R. L. Byer. Stable single axial-mode operation of an unstable resonator Nd:YAG oscillator by injection locking. *Opt. Lett.*, 1980, 5(2): 96~98

- 2 I. J. Bigio. "Injection-locked, unstable resonator dye lasers" in "High Power Lasers and Applications". K. L. Kompa, H. Walther eds. Berlin, Springer-Verlag, 1978. 116~118
- 3 A. J. Alcock, P. B. Corkum, D. J. James *et al.*. Selection of single, mode-locked CO<sub>2</sub> laser pulse by semiconductor reflection switching. *Opt. Commun.*, 1976, 18(4): 543~545
- 4 I. J. Bigio, M. Slatkine. Injection-locking unstable resonator excimer lasers. *IEEE J. Quant. Electr.*, 1983, QE-19(9): 1426~1436
- 5 Norman P. Barnes, J. C. Barnes. Injection seeding; theory. *IEEE J. Quant. Electr.*, 1993, QE-29(10): 2670~2683
- 6 B. E. Warnev. Injection locking of a copper laser oscillator. CLEO '86, paper WE1  
G. A. Naylor, A. J. Kearsley, H. Shaw. High power, low divergence, injection-locked copper vapor laser. CLEO '86, paper WE2
- 7 耿纪宏,张桂燕,宋秀冬等. 注入锁定改善大口径稳定腔 CuBr 激光器的输出特性. 光学学报, 1996, 18(1): 24~27
- 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
- 9 雷建求,梁培辉,沈琪敏等. 注入锁定铜蒸气激光器输出光脉冲方向性的时间演化过程. 中国激光, 1994, A21(4): 243~247
- 10 Jihong Geng, Guiyan Zhang, Xiudong Song *et al.*. Highly stable self-mode locking and the longitudinal mode structure in CuBr laser. *Appl. Phys. Lett.*, 1992, 60(24): 2969~2970
- 11 Jihong Geng, Guiyan Zhang, Xiudong Song *et al.*. Mode quenching and locking in a CuBr laser. *Opt. Commun.*, 1993, 98(3~6): 105~110
- 12 Jihong Geng, Guiyan Zhang, Xiudong Song *et al.*. Observations of the frequency range of self-mode locking and single longitudinal mode operation in CuBr lasers. *Appl. Phys. Lett.*, 1993, 63(25): 3235~3237
- 13 Lee W. Casperson. Output properties of short-pulse gain-switched lasers. *Appl. Opt.*, 1975, 14(2): 299~305

## Spectral Control in the Injection-seeded CuBr Laser

Geng Jihong Zhang Guiyan Song Xiudong Lin Fucheng

(Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Academia Sinica, Shanghai 201800)

**Abstract** In this paper we report the experimental results of controlling CuBr laser modes by using an injection seeding technique. We have amplified the single longitudinal mode CuBr laser pulses and obtained the narrowing-linewidth copper laser radiation with an average power of more than 100 mW. Theoretically, we have analysed the injection seeding process in short-pulse high-gain lasers and discussed the experimental results in the injection seeded CuBr laser.

**Key words** injection seeding, CuBr laser, laser mode, short-pulse high-gain lasers