

CuBr 自锁模激光器的实验研究*

耿纪宏 张桂燕 宋秀冬 林福成

(中国科学院上海光学精密机械研究所, 上海 201800)

提 要

首次报道在纵向放电的 CuBr 激光器中, 通过抑制高阶横模的振荡, 同时得到高度稳定完全调制的绿光和黄光自锁模脉冲串, 并在实验上研究了高阶横模, 泵浦功率和谐振腔腔长对 CuBr 激光自锁模脉冲串及其纵模频谱的影响。

关键词 溴化亚铜激光器, 自锁模, 激光模式。

1 引 言

早在 1965 年, 人们就在某些气体^[1] 和固体激光器^[2] 中观察到了自锁模现象, 并对此进行了大量的实验和理论工作。实验表明, 实现自锁模的条件相当苛刻, 并且自锁模行为本身也不稳定。许多因素都可以影响激光器的自锁模状态, 这些因素包括: 谐振腔的 Q 值, 激光介质在腔内的位置, 泵浦功率, 激光腔的腔长以及介质的同位素成分等等。这些工作绝大多数都集中在 He-Ne 激光器和 Xe 激光器等这类连续激光器中。

对于铜蒸汽激光器, 1977 年, Fahlen^[3] 报道了一种由于放电管内未激发原子吸收而引起的“被动”式的自锁模现象。1986 年, 李世芳等人^[4] 报道了一种由于反转粒子数空间分布不均匀而引起的自锁模现象。同年, Kiegn Im^[5] 在横向放电铜蒸汽激光器中也报道了自锁模现象。但是, 上面报道的这些自锁模行为都很不稳定, 调制度也很低。本文报道了在 CuBr 激光器中, 通过控制横模振荡, 同时得到了绿光(510.6 nm)和黄光(578.2 nm)完全调制的稳定自锁模脉冲串, 并在实验上研究了在各种泵浦功率和各种腔长的情况下, CuBr 激光自锁模脉冲串的特性。

2 实 验 方 法

自制的 CuBr 激光器采用封离式自加热和纵向放电的方式工作。放电管长 100 cm, 两个放电电极间距 56 cm, 放电管内径 3 cm。放电管内充有 2.67 kPa 的氩气作为缓冲气体。为了进一步提高输出平均功率和转换效率, 管内同时充有少量的氢气。电源的充电电容为 1470 Pf, 放电的重复频率为 16 kHz。

在如图 1 所示的实验装置中, 全反镜 M_1 (曲率半径为 4 m) 和平面半反镜 M_2 构成一法布里-珀罗谐振腔, 腔内一个可以调节大小的光阑用来控制激光振荡的横模。输出镜 M_2 紧

收稿日期: 1991 年 12 月 31 日; 收到修改稿日期: 1992 年 2 月 26 日

* 本课题得到国家自然科学基金的资助。

挨放电管, 改变全反镜 M_1 的位置可以形成不同长度的腔长. 绿光和黄光可以在腔内同时振荡, 位于腔外的棱镜 P 将它们分开. 用快速响应的光电二极管和一个自由光谱区为 2GHz 的扫描干涉仪同时监测自锁模脉冲的时间波形和频谱.

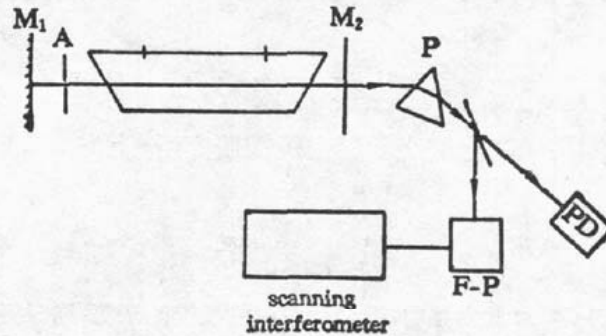


Fig. 1 Experimental set-up

3 稳定的自锁模脉冲及高阶横模的影响

如果腔内不加小孔, CuBr 激光器处于自由振荡状态, 此时的绿光和黄光脉冲为几十毫微秒的光滑脉冲. 但是, 如果在腔内放入一个直径小于 2mm 的小孔时, 那么立刻就可以同时得到绿光和黄光稳定的自锁模脉冲串. 图 2(a) 给出的就是小孔直径为 1.5mm 时黄光稳定的自锁模脉冲串. 绿光的自锁模脉冲串和黄光完全类似. 自锁模脉冲串中两个相邻脉冲的间隔都是约 7ns , 这与脉冲在腔内的往返时间 $2L/c$ 一致(谐振腔腔长此时为 106cm). 每个脉冲的宽度约为 2ns , 这已经到了实验所用探测系统的极限. 与以前的报导^[3~5]相比, 这里所观察到的自锁模行为非常稳定, 而且完全调制. 对于一个非常大范围的激发功率, 其可重复性和近似完全调制的特性, 都能始终保持. 因此, 它非常有希望发展成为有用的短脉冲激光光源.

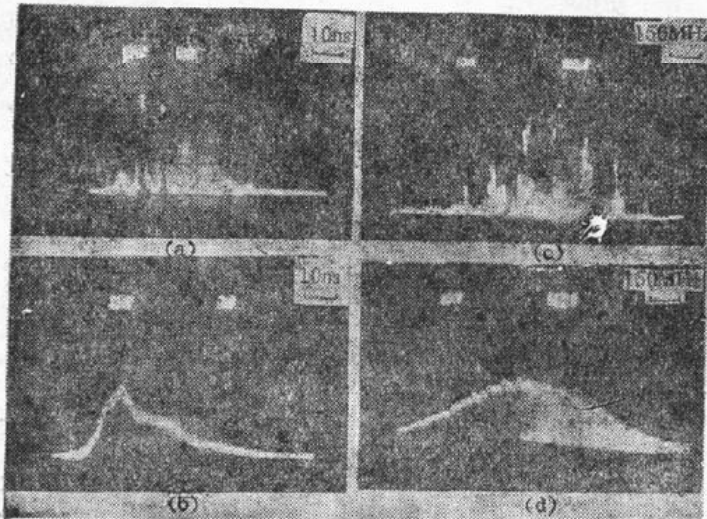


Fig. 2 The self-mode locking pulses and the corresponding frequency spectra of the yellow light for $L=106\text{cm}$ and for the diameter of the aperture equal to: (a), (c), 1.5mm ; (b), (d), without the aperture

在本文的实验中, 腔内的光阑对自锁模的产生起着决定性的作用. 通过改变光阑孔径的大小, 可以同时看到它对自锁模激光脉冲串及其频谱的影响.

当小孔直径小于 2mm 时, 自锁模脉冲串是完全调制的[图 2(a)], 而且非常稳定, 用扫描干涉仪可以看出此时有 $6\sim 8$ 个纵模同时振荡[图 2(c)], 两相邻纵模间隔大约为 140MHz (与 $c/2L$ 对应). 在这种情况下, 自锁模激光的线宽(半高宽度)大约为 $\Delta\nu_H=500\text{MHz}$, 而从图中看到的自锁模脉冲宽度大约为 $\Delta t=2\text{ns}$, 这样

$$\Delta\nu_H \times \Delta t = 1, \quad (1)$$

实际上, 由于探测系统的限制, 实际脉宽可能小于 2ns , 即 $\Delta\nu_H \times \Delta t$ 有可能比 1 还小. 因此, 这里得到的自锁模脉冲几乎达到了变换

极限,也可以说参加振荡的几个纵模全部被锁定.当小孔直径大于 2mm 时,由于高阶横模也能够同时振荡,频谱图中两相邻纵模的中间出现了高阶横模的贡献.大家知道,TEM_mn_q 的谐振频率为

$$\nu_o = \frac{c}{2L} \left[q + \frac{1}{\pi} (m+n+1) \cos^{-1} \sqrt{g_1 g_2} \right]. \quad (2)$$

那么,同一纵模的相邻横模之间的模距为

$$\Delta\nu_{mn} = \frac{C}{2\pi L} \cos^{-1} \sqrt{g_1 g_2} = \Delta\nu_q \frac{1}{\pi} \cos^{-1} \sqrt{g_1 g_2}, \quad (3)$$

其中 $\Delta\nu_q$ 为同一横模的相邻纵模间距,在本文的实验中, $g_1 = 1 - (L/R_1) = 3/4$, $g_2 = 1 - (L/R_2) = 1$, 因此, $\Delta\nu_{mn} = \Delta\nu_q/6$. 所以高阶横模的振荡,使分立的纵模变模糊,到最后去掉光阑时,频谱连成一片[图 2(d)],分不出各级纵模.由于高阶横模竞争的影响,自锁模状态逐渐被打破,黄光脉冲的调制度下降,到最后完全失去调制[图 2(b)].

对于绿光 510.6 nm 振荡,实验表明有类似的结果,随着高阶横模参与了竞争,自锁模状态逐渐被破坏.

显然,用小孔光阑控制高阶横模的振荡时,不仅会抑制掉高阶横模的输出,同时也会影响到基模输出以及总的激光输出.实验表明,在不同孔径光阑的情况下,只要激光可以振荡,在单位截面积(即光电二极管的接收光信号的截面)内的激光功率基本相同,而激光光斑的大小与光阑孔径的大小成正比.激光功率密度近似不变这一特性应归因于 CuBr 激光的高增益.因为激光只在腔内振荡几次就输出,并很快使增益达到饱和,小孔光阑对允许的这几次振荡限制很少,而只是限制了参与振荡的激活介质截面积.

上面的实验结果指出,自锁模行为的关键在于抑制高阶横模的振荡,也就是腔内小孔光阑孔径的大小.但是实验同时表明,对于相同孔径的光阑,它在腔内的具体位置对自锁模行为没有任何影响,在不同谐振腔腔长的情况下,都表明了这一实验结果.

4 泵浦功率的影响

在腔长为 106 cm 的情况下,当激光电源的输入功率为 4000 V × 200 mA 时,光开始在腔内振荡形成激光,这是激光器的阈值泵浦功率.随着泵浦功率的增加,激光振荡迅速增强.图 3 给出了黄光自锁模脉冲及其纵模频谱在各种泵浦功率下的情况.从图中可以看到,当泵浦功率为 4200 V × 210 mA 时,只有 6~7 个纵模能够振荡,自锁模脉冲是 100% 调制的,并且在腔长对应的往返时间 $2L/C$ 内没有其它子脉冲.当泵浦功率提高到 5000 V × 260 mA 时,能够振荡的纵模数明显增多,其范围超过了扫描干涉仪 2 GHz 的自由光谱范围,此时激光增益没有高到引起高阶横模的振荡,所以其自锁模脉冲还是完全调制的.这时,在 $2L/C$ 时间内基本上没有子脉冲出现,但偶尔会出现一个很小的子脉冲.随着泵浦功率进一步提高,从纵模频谱图中可以看出,高阶横模开始部分参加振荡,其结果导致自锁模脉冲的调制度开始下降,此时在 $2L/C$ 时间内出现子脉冲的几率增大.当泵浦功率达到 5500 V × 320 mA 以上时,高阶横模的影响越来越厉害,使黄光脉冲的调制度进一步下降,甚至使部分脉冲失去调制.

实验中,也观察了绿光的自锁模振荡随泵浦功率提高而变化的情况,其结果与黄光类似.只是由于绿光的增益更高,在相对黄光较低的泵浦功率下(4700 V × 240 mA),高阶横

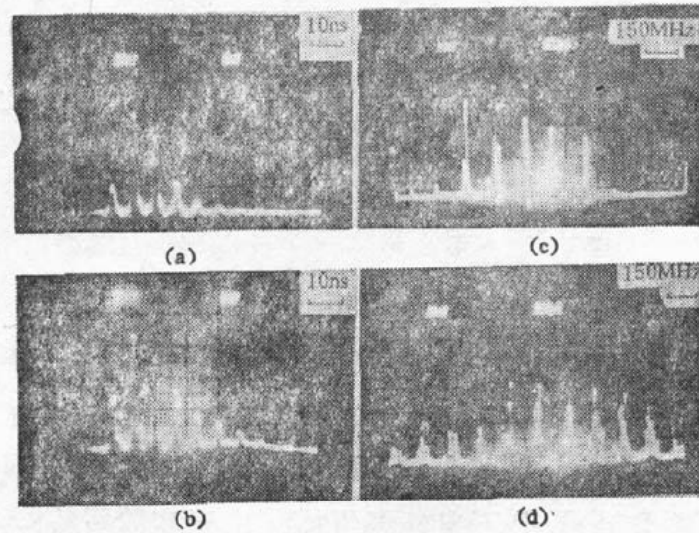


Fig. 3 The self-mode locking pulses and the corresponding spectra of the yellow light with the aperture of 1.5mm for the pump power equal to: (a), (c), $4200\text{ V} \times 210\text{ mA}$; (b), (d), $5000\text{ V} \times 260\text{ mA}$

模就有了振荡,致使绿光自锁模脉冲的调制度开始下降。

5 谐振腔腔长的影响

固定 M_2 的位置, 改变全反镜 M_1 的位置, 可以形成不同腔长的谐振腔. 实验表明, 在各种不同腔长的情况下, 自锁模行为都可以发生, 但却表现出了不同的输出特征. 当腔长为 106 cm 时, 前面已经看到, 在较低的泵浦功率下 ($4500\text{ V} \times 225\text{ mA}$), 自锁模脉冲串全部都是以 $2L/C$ 为间隔. 但是, 在相同的泵浦功率下, 随着腔长的增加, 自锁模脉冲串在一个往返时间 $2L/C$ 内出现了另外的子脉冲, 并且腔长越长, 这种多个子脉冲出现的几率越大, 而且子脉冲的个数也越多. 图 4 给出了腔长为 146 cm 时, 自锁模脉冲的三种典型的不同类型. 腔长为 146 cm 时, 自锁模脉冲有三种输出, 后面两种输出形式的几率很大, 第一种输出形式 (不出现子脉冲) 的几率很小. 当腔长为 200 cm 时, 出现子脉冲的个数以两个和三个为主, 偶尔出现四个子脉冲, 也有只出现一个子脉冲的自锁模, 但是以 $2L/C$ 时间为间隔的自锁模 (即不出现子脉冲) 则基本消失. 当腔长增加到 250 cm 时, 出现的子脉冲个数更多, 其中两个、三个或四个子脉冲的自锁模几率最大, 偶尔更有多达五个子脉冲的自锁模出现. 表 1 给出了不同腔长的情况下, 在光的往返时间 $2L/C$ 内出现子脉冲的个数. 绿光的情况与黄光类似, 表 1 中也列出了在各种腔长的情况下, 绿光自锁模中在 $2L/C$ 时间内子脉冲出现的个数.

以前, 在对一些 OW 激光器自锁模的研究中, 也有类似这种与腔长有关的自锁模输出



Fig. 4 Temporal properties of the self-mode locking pulses of the yellow light for the cavity length L equal to 146 cm

Table 1 The number of the pulses in the round trip time for various cavity lengths

Cavity length (cm)	$2L/c(\mu s)$	the number of the pulses in round trip time $2L/c$	
		yellow light	green light
106	7.1	1	1 or 2
132	8.8	1 or 2	1, 2 or 3
146	9.7	2, 3 or 1	2, 3 or 1
170	11.3	2, 3 or 1	3, 4 or 2
200	13.3	2, 3, 4 or 5	3, 4, 5 or 3
250	16.7	2, 3, 4, 5 or 6	

形式的报导^[6,7]. T. Uchida 等人根据兰姆理论,分析了这种自锁模特性同反转粒子数的各级空间付里叶分量的关系^[6]. 以基频纵模间隔 $f_p = c/2L$ 调制的自锁模(即没有子脉冲出现),由反转粒子数的二级空间傅里叶分量 N_2 决定;而以 m 倍基频纵模间隔 $mf_p = mc/2L$ 调制的自锁模(即在 $2L/c$ 时间内出现 $(m-1)$ 个子脉冲),则由反转粒子数的 $2m$ 级空间傅里叶分量 N_{2m} 决定

$$N_{2m} = 1/L \int_0^L dz N(z) \cos(2m\pi z/L) = N_0/L \int_{L_1}^{L_2} dz \cos(2m\pi z/L)$$

$$= N_0/2m\pi [\sin(2m\pi L_2/L) - \sin(2m\pi L_1/L)]$$

这里假设放电管内反转粒子数的空间分布是均匀的, L 是总的激光腔长, L_1, L_2 分别是两放电电极到输出镜 M_2 的距离(假定激活介质只存在于两电极之间). 在实验上, M_2 的位置是固定的, 并且 $L_1 = 22 \text{ cm}$, $L_2 = 78 \text{ cm}$. 图 5 画出了几级空间傅里叶分量(用 N_0 归一化)随激光腔长 L 的变化曲线. 从图中可以看出, 当腔长为 100 cm 左右时, N_2/N_0 比其它分量大多, 实验结果同样表明, 此时的自锁模输出以基频纵模间隔 $f_p = c/2L$ 的调制占绝大多数; 当腔长 L 增加时, 图 5 给出的结果也基本上与实验结果相符. 腔长在 150 cm 以内时, 二级分量 N_2/N_0 仍较大, 调制仍以 $1f_p$ 为主, 但高级分量开始增大, $2f_p$ 和 $3f_p$ 的调制几率也逐渐增大. 当腔长为 200 cm 或更长时, 二级分量减小, 而四级, 六级等高级分量开始起主导作用, 即 $1f_p$ 的调制逐渐减少甚至消失, 而 $mf_p (m \neq 1)$ 的调制增多. 可见, 图 5 中的曲线和实验结果基本相符.

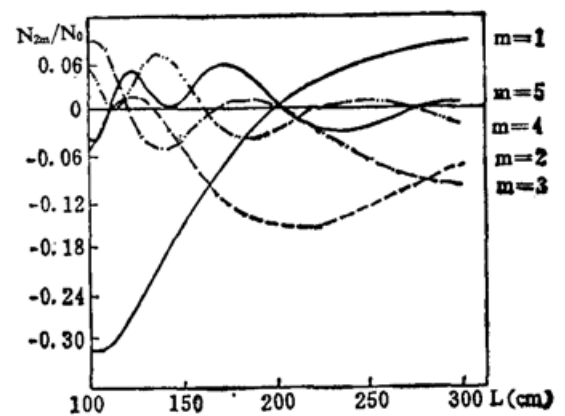


Fig. 5 Normalized spatial Fourier components of the population inversion density plotted as a function of the cavity length L

6 结 束 语

影响气体激光自锁模的因素很多. 本文报导了通过控制激光振荡的横模, 得到了稳定的完全调制的 CuBr 自锁模脉冲串, 并在实验上研究了高阶横模的竞争, 泵浦功率及谐振腔腔长对自锁模行为的影响. 实验表明, 在 CuBr 激光器中, 横模的振荡状态对自锁模的产生

起着决定性的作用;对于各种泵浦功率,只要不引起高阶横模的振荡,CuBr激光的自锁模都是非常稳定和完全调制的;随着激光腔长的增加,激光自锁模表现出了不同的输出特征.因此,在基横模振荡下同时得到的稳定的绿光和黄光自锁模脉冲为我们提供了一种可靠的短脉冲激光光源.

感谢姜世杰师傅为我们加工 CuBr 激光器提供帮助.

参 考 文 献

- [1] M. H. Crowell, Characteristics of mode-coupled lasers, *IEEE J. Quant. Electron.*, 1965, **QE-1** (1): 12~20
- [2] M. A. Duguay *et al.*, Spontaneous appearance of picosecond pulses in ruby and Nd:glass lasers, *Phys. Rev. Lett.*, 1967, **19** (17): 1014~1016
- [3] T. S. Fahlen, High pulse rate, mode-locked copper vapor laser. *IEEE J. Quant. Electron.*, 1977, **QE-13** (7): 546~547
- [4] 李世芳,胡企铨,林福成. 高增益脉冲激光器中的一种快速振荡过程及引起的自锁模现象, *光学学报*, 1986, **6** (7): 585~591
- [5] Kiegon Im, Jin J. Kim, Self-mode locking in a transverse-discharge copper vapor laser, *Appl. Phys. Lett.*, 1986, **49** (3): 131~132
- [6] T. Uohida, A. Ueki, Self-locking of gas lasers. *IEEE J. Quant. Electron.*, 1967, **QE-3** (1): 17~30
- [7] Manuela Fe H. Tarroja, Mohammad Sharafi, Lee W. Casperson, Spontaneous mode locking in long-cavity xenon lasers, *J. O. S. A. (B)*, 1989, **B6** (8): 1564~1573

Experimental studies of self-mode locking in a CuBr laser

GENG JIHONG ZHANG GUIYAN SONG XIUDONG LIN FUCHENG

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

(Received 31 December 1991; revised 26 February 1992)

Abstract

It is reported for the first time that highly stable and complete modulation self-mode locking pulse trains of the green and yellow light are obtained simultaneously in a longitudinal discharge CuBr laser. The effects of high-order transverse modes, pump power and the length of the resonator on the self-mode locking pulse trains and the frequency spectra of their modes have also been studied experimentally.

Key words copper bromide laser, self-mode locking, laser modes.