

# 复合腔 CuBr 激光器中的模式研究\*

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

本文报道了在两种结构的多镜复合腔中 CuBr 激光器的纵模淬灭现象, 并得到了重复频率几倍于基频纵模间隔的多重锁模脉冲串, 最高重复频率可达 440 MHz. 实验结果表明, 通过调整复合腔的结构参数, 可以在不缩短增益介质长度的条件下, 实现 CuBr 激光多重锁模脉冲串高重复频率的大范围调节.

**关键词** 溴化亚铜激光器, 复合腔, 模式淬灭, 自锁模.

## 1 引 言

通常采用复合腔对激光器进行选纵模<sup>[1,2]</sup>, 以抑制能够振荡纵模数, 从而实现激光器的单纵模运转. Junzo Hinano 等人<sup>[3]</sup>曾在 He-Ne 激光器中研究部分纵模受到抑制, 剩下的仍可以振荡的纵模再得到锁定的锁模现象, 那么所得的锁模脉冲串的频率将是基频纵模间隔的整数倍.

CuBr 激光器和纯铜激光器一样, 是一种高增益高重复率的脉冲激光器. 由于铜原子存在两种同位素成分以及复杂的能级超精细结构, 铜激光的光谱线型通常是非常复杂的. 在自由振荡的铜激光器中, 可以存在许多纵模和各级横模的同时振荡, 因此激光的模式无法清晰分辨开来<sup>[4-7]</sup>. 最近, 报道<sup>[8]</sup>了通过抑制高阶横模的振荡, 将 CuBr 激光器的诸多纵模清晰地分辨出来. 并且与此同时还得到了高度稳定完全调制的自锁模脉冲串. 本文报道采用复合腔结构, 通过模式淬灭在 CuBr 激光器中大大减少了振荡的纵模数, 并因此得到了重复频率几倍于基频纵模间隔的稳定的多重锁模脉冲串.

## 2 实验装置

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, 放电管总长 100cm, 两个放电电极间距为 56 cm, 放电管内充有 2.67 kPa 的氩气作为缓冲气体. 放电管的放电重复频率为 16 kHz. 实验用到了两种常用的复合腔结构来抑制纵模的振荡, 如图 1 所示. 三镜法布里-珀罗型谐振腔和四镜迈克尔逊(Michelson)型谐振腔都是根据复合腔的模式竞争和淬灭来实现纵模抑制的. 球面全反镜  $M$  的曲率半径为 4 m,  $M_1$  和  $M_2$  分别是反射率为 20% 和 50% 的平面反射镜,  $M_3$ 、 $M_4$  则都是平面全反镜. 腔内一个孔径小于 2 mm 的光阑  $A$  用来抑制激光高阶横模的振荡. 绿光和黄光可以同时腔内振荡, 在腔外用一个棱镜将它们分开后分别加以探测.

收稿日期: 1992年3月18日; 收到修改稿日期: 1992年5月15日

\* 本课题得到国家自然科学基金的资助

用一个上升时间在 1 ns 以内的光电二极管和一个自由光谱区为 2GHz 的扫描干涉仪 (Spectral-Physics Model 470) 同时监测激光输出的时间波形和频谱。

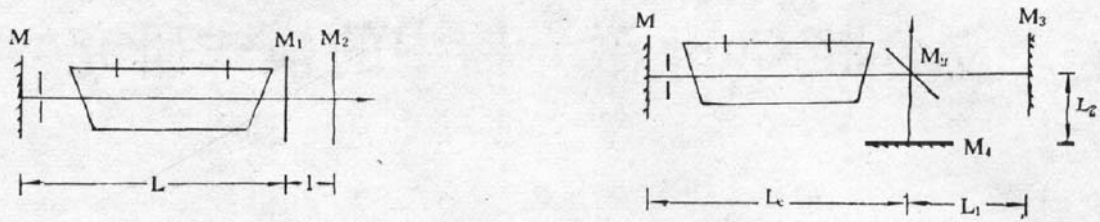


Fig. 1 The experimental set-up (b)

(a) the three-mirror Fabry-Perot resonator (b) the modified Michelson-type resonator

### 3 三镜法布里-珀罗型复合腔

在如图 1(a)所示的三镜法布里-珀罗型复合腔中,如果只有  $M_1$  或  $M_2$  中任何一个反射镜存在并形成两镜法布里-珀罗谐振腔,都能得到稳定的完全调制的自锁模脉冲串,其重复频率对应于基频纵模间隔  $c/2L$ . 图 2 给出的就是两镜谐振腔输出的黄光脉冲的时间和频谱特性,此时  $M$  与  $M_1$  之间间距  $L = 102$  cm,而  $M$  与  $M_2$  间距  $L+l = 102$  cm + 34 cm = 136 cm,可以看出此时分别有 7 个和 11 个纵模能够振荡,它们被完全锁定后输出的锁模脉冲串间隔分别约为 7 ns 和 9 ns. 但是,如果  $M_1$  和  $M_2$  同时存在于图 1(a)的腔中,那么所组成的三镜复合腔可以

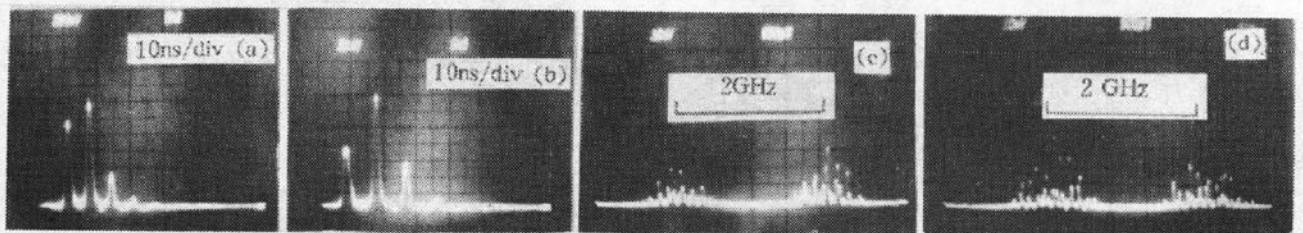


Fig. 2 The temporal and spectral properties of the yellow line in (a) (c) the resonator  $M-M_1$  without  $M_2$  and (b) (d) the resonator  $M-M_2$  without  $M_1$  respectively  $L = 102$  cm,  $l = 34$  cm

抑制许多纵模的振荡,结果仅仅只有两个纵模仍然可以振荡,并且自发地实现了相位锁定. 图 3 显示的就是两个纵模锁定的情况下黄光脉冲的时间和光谱特性,其锁模脉冲的重复频率高达 440 MHz,它等于  $M-M_1$  两镜腔锁模重复频率的三倍(图 2(a)(c));又等于  $M-M_2$  两镜腔锁模重复频率的四倍(图 2(b)(d)),并且与复合腔中  $M_1$  和  $M_2$  所形成的子腔的  $c/2l$  对应. 实验发现,由于两个纵模之间的幅度相差很大,所以其锁模脉冲的调制不是非常完全. 如果增加激光电源的激发功率,从扫描干涉仪中可以看到,在上述两个纵模附近会出现少量没有被完全淬灭掉的纵模. 这时,与这些没有被完全淬灭掉的纵模相对应,自锁模脉冲的调制会附加一个低频成分. 但是,自锁模行为始终都非常稳定.

绿光的行为与黄光完全类似,通过调换一个适合于测量绿光的扫描干涉仪,同样可以看到三镜法布里-珀罗复合腔对绿光纵模的抑制作用. 图 4(a) (b)给出的就是纵模被抑制和锁定后绿光的时间和光谱性质,这里  $M_1$  与  $M_2$  间距为  $l = 51$  cm,实验测得此时的重复频率约为 290 MHz,与  $c/2l$  相对应.



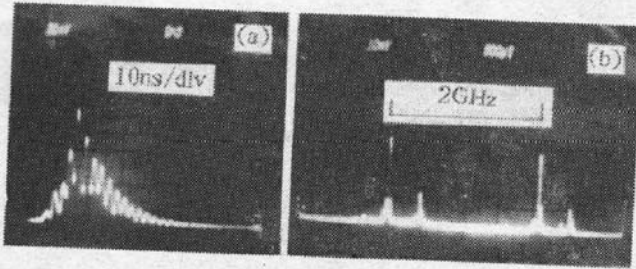


Fig. 3 The temporal and spectral properties of the yellow line in the three-mirror Fabry-Perot resonator are shown in (a) and (b) respectively  $L = 102$  cm,  $l = 34$  cm

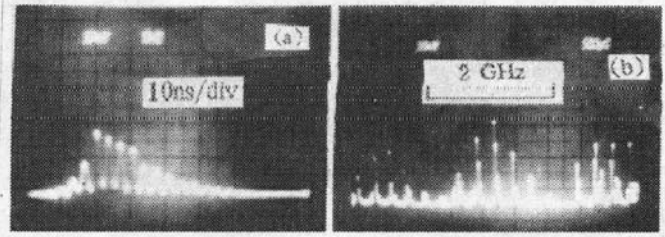


Fig. 4 The temporal and spectral properties of the green line in the three-mirror resonator are shown in (a) and (b) respectively  $L = 102$  cm,  $l = 51$  cm

#### 4 四镜迈克尔逊型复合腔

正如 DiDomenico 在 He-Ne 激光器中的研究一样,在图 1(b) 所示的四镜迈克尔逊型复合腔中,同样观察到了 CuBr 激光器的模式淬灭现象.当四镜腔中两个臂的长度相近时,模式淬灭现象最明显,应该出现单纵模的振荡,但是由于 CuBr 激光器高增益的特点,实际上在这个允许振荡的纵模附近,存在许多没有被充分淬灭的纵模振荡,所以扫描干涉仪观察到在增益带边缘附近的纵模被淬灭,而位于增益带中心附近仍然有很多纵模可以振荡,这时的自锁模脉冲串的频率仍是基频纵模间隔.当增加其中一个臂  $M_2M_3$  的长度  $L_1$  时,原则上可以看到复合腔的单纵模输出逐渐被双纵模或多纵模输出所代替,但是实际上由于激光高增益的特性,这时在双纵模周围仍然存在模式淬灭不完全的现象,实验观察到的是振荡中的纵模分成两组(与双纵模对应).图 5 给出了两臂长度分别为  $L_1 = 39$  cm,  $L_2 = 15$  cm 时,黄光脉冲典型的时间和光谱特性.可以看出,在激光波形中存在两个调制频率.容易知道,其中的低频调制对应于  $M-M_4$  谐振腔的基频纵模间隔,而非  $M-M_3$  谐振腔的.因为前者腔长较短,具有较低的衍射损耗,在模式竞争中处于更为有利的地位.图 5(a)中的高频调制是复合腔模式淬灭的结果,实验发现高频调制是低频调制的五倍,并对应于  $c/2(L_1-L_2)$ .更进一步增加臂长到  $L_1 = 75$  cm 时,允许振荡的复合腔纵模间隔减小.同时不允许振荡的纵模淬灭得很完全,如图 6 所示.这时有三到四个纵模可以振荡,并且彼此之间相位自发地被锁定,其锁模脉冲的重复频率为 250 MHz,它是  $M-M_4$  谐振腔基频纵模间隔的两倍,又是  $M-M_3$  谐振腔的三倍,并且也与  $c/2(L_1-L_2)$  相对应.如果  $M_2M_3$  臂长增加到使  $M-M_3$  腔的腔长等于  $M-M_4$  腔长的两倍时,模式淬灭现象消失,并且自锁模脉冲又类似于两镜腔  $M-M_4$  时的情形.

#### 5 分析和讨论

在图 1(a)所示的三镜腔中,显然,仅仅只在同时满足  $MM_1$  和  $MM_2$  两个腔的驻波条件的纵模才能振荡,从而成为复合腔允许的纵模,因此,复合腔的纵模间隔  $\Delta\nu$  应该是两个两镜腔纵模间隔  $\Delta\nu_1 = (c/2L)$  和  $\Delta\nu_2 = [c/2(L+l)]$  的整数倍,如果记  $\Delta\nu = p\Delta\nu_1 = q\Delta\nu_2$ , ( $p, q$ ) 为两个互相不可约的正整数  $p \leq q$ ,那么由此可以得出三镜腔的纵模间隔为

$$\Delta\nu = (q-p)c/2l$$

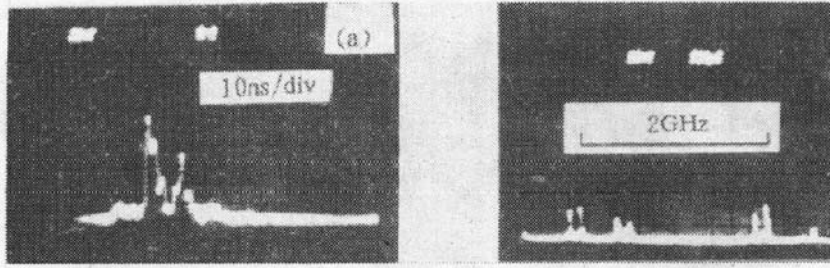


Fig. 5 The temporal and spectral properties of the yellow line in the modified Michelson-type resonator are shown in (a) and (b) respectively for  $L_1 = 39$  cm,  $L_0 = 105$  cm,  $L_2 = 15$  cm

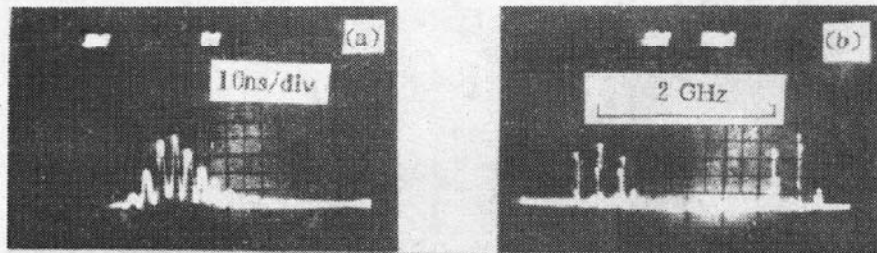


Fig. 6 The temporal spectral properties of the yellow line in the modified Michelson-type resonator are shown in (a) and (b) respectively for  $L_1 = 75$  cm,  $L_c = 105$  cm,  $L_2 = 15$  cm

在图 1(b)所示的四镜腔中,复合腔的纵模间隔也应该为  $\Delta\nu = qc/2(Lc + L_1) = pc/2(Lc + L_2)$  ( $p, q$  仍为两个互相不可约的正整数,  $p \leq q$ ), 同样可以得到

$$\Delta\nu = (q - p)c/2(L_1 - L_2)$$

在上述的实验结果中, 都有  $q - p = 1$ , 即三镜复合腔的纵模间隔为  $\Delta\nu = c/2l$ ; 四镜复合腔的纵模间隔为  $\Delta\nu = c/2(L_1 - L_2)$ , 这与很多激光方面的教科书中讨论的情况相同. 但是在我们的实验中也观察到  $q - p \neq 1$  的情形. 比如在图 1(a)中, 当  $l = 2L/3 = 68$  cm 时, 实验得到复合腔的纵模间隔为  $\Delta\nu = 440$  MHz, 与  $(q - p)c/2$  对应, 这里,  $q = 5, p = 3$ .

另外, 在多镜 CuBr 复合腔激光器中, 由于模式淬灭, 许多纵模被大大地抑制掉, 只剩下少量几个可以允许振荡的复合腔纵模, 但是实验观察到其输出功率并不因纵模数量的减少而降低, 相反比两镜腔的输出功率还有百分之十几的提高. 事实上, 铜蒸汽激光谱线的综合均匀增宽可达 200 MHz 左右, 考虑到增益饱和的特性, 每个纵模在 Doppler 展宽的增益曲线上的烧孔宽比这个值还要大. 这样, 模式淬灭导致纵模数量的减少并不对增益曲线上烧孔面积造成很大的影响. 另一方面, 多镜腔比两镜腔具有更低的透射损耗, 反而提高了每个振荡纵模的  $Q$  值, 使没有饱和的原子也充分地输出功率作出贡献.

## 6 结束语

三镜法布里-珀罗型和四镜迈克尔逊型两种复合腔结构都可以有效地部分淬灭 CuBr 激光器中的纵模, 从而得到几倍于基频纵模间隔的多重锁模脉冲串, 锁模重复频率可高达 440 MHz. 通过调整复合腔的结构参数, 可以在不改变增益介质长度的情况下, 实现锁模重复频率的大范围调节, 这种可调高重复频率的 CuBr 锁模脉冲串将在飞秒脉冲的放大和海洋测量等领域中会有很大的应用潜力. 同时复合腔所得到两纵模和三纵模或者多纵模的锁定现象对于

理解激光器的自锁模机制也将是非常有用的。

感谢姜世杰师傅为本课题加工激光管提供的帮助!

### 参 考 文 献

- [1] P. W. Smith. Stabilized, Single-frequency output from a long laser cavity. *IEEE J. Quant. Electron.*, 1965, **QE-1**(8):343~348
- [2] M. DiDomenico Jr., Characteristics of a single-frequency Michelson-type He-Ne gas laser. *IEEE J. Quant. Electron.*, 1966, **QE**(8):311~322
- [3] Junzo Hirano, Tatsuya Kimura, Multiple mode locking of lasers. *IEEE J. Quant. Electron.*, 1969, **QE-5**(5):219~225
- [4] Kiegon Im, Jin J. Kim, Self-mode locking in a transverse-discharge copper-vapor laser. *Appl. Phys. Lett.*, 1986, **49**(3):131~132
- [5] W. C. Kreye, F. L. Roesler, High-resolution line-shape analyses of the pulsed cuprouschloride-laser oscillator and amplifier. *Appl. Opt.*, 1983, **22**(6):927~939
- [6] Wang Yongjiang *et al.*, Multiple spectral structure of the 578.2 nm copper laser line. *Appl. Phys. (B)*, 1988, **47B**(1):87~89
- [7] J. Tenenbaum, *et al.*, Structure of 510.6 and 578.2 nm copper laser lines. *Opt. Commun.* 1980, **32**(3):473
- [8] 耿纪宏,张桂燕,宋秀冬等, CuBr 自锁模激光器的实验研究, 光学学报, 1992, **12**(10):873~878

## Studies on mode in a CuBr laser with compound resonators

GENG Jihong      ZHANG Guiyan      SONG Xiudong      LIN Fucheng  
(Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Academia Sinica, Shanghai 201800)

(Received 18 March 1992; revised 15 May 1992)

### Abstract

The phenomena of longitudinal mode quenching in a CuBr laser with two types of multiple-mirror compound resonators are reported. The multiple mode-locking pulse trains at a repetition rate equal to a multiple of the fundamental longitudinal mode spacing have been obtained. The highest repetition rate is up to 440 MHz. The experimental results indicate that the multiple mode-locking pulses at high and wide-range tunable repetition rate in CuBr laser can be generated by adjusting the structure parameters of the compound resonators, without shortening the length of the active medium.

**Key Words** CuBr laser, compound resonator, mode quenching, self-mode locking.