

# 对撞增强腔和 LiF 晶体实现稳定的被动锁模

吴逢铁 张建荣

(华侨大学信息科学与工程学院, 福建 泉州 362021)

**摘要** 理论分析 LiF : F<sub>2</sub><sup>-</sup> 色心晶体的能级结构, 计算其激发态吸收的饱和光强, 指出基态恢复时间为纳秒量级的 LiF 实现被动锁模的可能性. 利用对撞增强腔 Nd : YAG 激光器实现 LiF 晶体的锁模激光输出, 获得平均能量为 11.8 mJ, 稳定性大于 98% 的锁模单脉冲序列.

**关键词** 对撞增强腔, LiF : F<sub>2</sub><sup>-</sup> 色心晶体, 被动锁模, 激发态吸收

**中图分类号** TN 248.3<sup>+</sup>5

**文献标识码** A

超短光脉冲是研究超快过程必不可少的工具, 目前获得皮秒级光脉冲主要采用锁模技术. 在多种模式锁定技术中, 采用可饱和吸收体的被动锁模操作最简单, 仪器设备最便宜. 然而, 传统采用的染料溶液(如五甲川+1, 2-二氯乙烷等)的被动锁模, 由于可饱和吸收体的热效应及不稳定性引起激光输出起伏较大. 因此, 如果能利用固体可饱和吸收体实现稳定的锁模激光输出是很有意义的. 本文通过对 LiF : F<sub>2</sub><sup>-</sup> 色心晶体的特性分析, 采用对撞增强腔, 获得了稳定的被动锁模激光输出.

## 1 LiF : F<sub>2</sub><sup>-</sup> 色心晶体的调 Q 及锁模机理

氟化锂 F<sub>2</sub><sup>-</sup> 色心晶体(即 LiF : F<sub>2</sub><sup>-</sup> 晶体)是一种成熟的调 Q 晶体. 它具有染料 Q 开关那种使用简便的优点, 又具有像 LiNbO<sub>3</sub> 晶体那种长期稳定的光学质量, 且 LiF 晶体有较高的热导率(0.1 W · (cm · °C)<sup>-1</sup>) 和高的光损伤阈值(大于 40 GW · cm<sup>-2</sup>).

LiF 晶体的 F<sub>2</sub><sup>-</sup> 心可采用简单的四能级结构图来描述, 如图 1 所示. 作为可饱和吸收体, 除了能级①→能级③的基态吸收外, 它还表现出能级②→能级④的激发态吸收. 其基态和激发态吸收截面分别为  $\sigma_g = 1.3 \times 10^{-17} \text{ cm}^2$  和  $\sigma_{ex} = 2.0 \times 10^{-18} \text{ cm}^2$ <sup>[1]</sup>. 通常情况下, LiF : F<sub>2</sub><sup>-</sup> 色心晶体被用来作为调 Q 元件. 当腔内光强不太强时, 晶体主要产生基态吸收. 这时可忽略能级④的粒子数分布, 即  $N_4 \approx 0$ , 被激发到能级③的粒子迅速弛豫到能级②, 粒子主要分布在能级①, ②上. 可采用二能级的跃迁和弛豫来描述, 其粒子密度速率方程为<sup>[2]</sup>

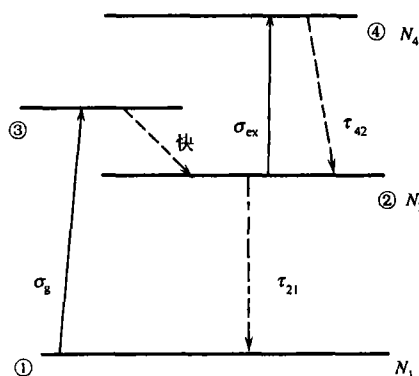


图 1 LiF : F<sub>2</sub><sup>-</sup> 的能级结构图

$$\frac{\partial N_1}{\partial t} = -N_1 \left( \frac{\sigma_g}{h\nu} \right) I + \frac{N_2}{\tau_{21}}, \quad (1)$$

$$\frac{\partial N_2}{\partial t} = N_1 \left( \frac{\sigma_g}{h\nu} \right) I - \frac{N_2}{\tau_{21}}. \quad (2)$$

在式(1), (2)中,  $I$  为激光光强,  $\frac{\partial I}{\partial z} = -I(\sigma_g N_1 + \sigma_{ex} N_2)$ ,  $h\nu$  是一个光子的能量, 而  $t$  和  $z$  分别是时间和

收稿日期 2005-08-14

作者简介 吴逢铁(1958-), 男, 教授, 主要从事光电子与激光方面的研究. E-mail: ftwu@public.qz.fj.cn

基金项目 福建省自然科学基金资助项目(A0410017)

纵向坐标,  $\sigma_{ex}$  是  $N_2$  粒子的激发态吸收截面. 由以上方程解得饱和吸收体基态吸收的饱和光强, 即

$$I_{s(g)} = \frac{h\nu}{\sigma_g \tau_{21}}. \quad (3)$$

将  $\sigma_g = 1.3 \times 10^{-17} \text{ cm}^2$  及基态恢复时间  $\tau_{21} = 68 \text{ ns}^{[3]}$  代入式(3), 解得  $I_{s(g)} = 0.21 \text{ MW} \cdot \text{cm}^{-2}$ . 也就是说, 只要共振腔内激光光强大于  $0.21 \text{ MW} \cdot \text{cm}^{-2}$ , LiF 就可以作为很好的 Nd:YAG 激光器的被动调 Q 元件.

下面讨论当腔内激光光强远大于上述饱和光强时 LiF 的高激发态吸收. 可近似认为在一段时间内, 基态粒子被完全抽空 ( $N_1 = 0$ ), 粒子只在能级②, ④间跃迁. 类似上面的分析推导, 可解得激发态吸收饱和光强为

$$I_{s(ex)} = \frac{h\nu}{\sigma_{ex} \tau_{42}}. \quad (4)$$

由于激发态寿命  $\tau_{42}$  远小于  $\tau_{21}$ , 相差了 3~4 个数量级<sup>[1]</sup>, 甚至更短. 将  $\sigma_{ex} = 2 \times 10^{-18} \text{ cm}^2$  和  $\tau_{42} = 10 \text{ ps}$  代入式(4), 可解得  $I_{s(ex)} = 9.4 \text{ GW} \cdot \text{cm}^{-2}$ . 由此可见, 基态和激发态吸收的饱和光强相差 4 个数量级.

在一般光强下, 主要产生基态吸收 (因为  $\sigma_g > \sigma_{ex}$ ), 由于  $\tau_{21}$  为几十纳秒, 所以 LiF 只能作为调 Q 元件, 而不能实现被动锁模. 但是, 如果腔内光强足够大, 使得激发态吸收达到饱和, 由于  $\tau_{42}$  为皮秒量级, 甚至更短, 则 LiF 可实现被动锁模.

## 2 实验结果

根据以上的理论分析, 我们在传统的平-平直腔式激光器中, 利用 LiF 晶体获得了稳定的调 Q 激光输出. 图 2 为典型的调 Q 单脉冲示波器照片, 脉冲为 18 ns. 我们采用带抗共振环 (ARR) 的对撞增强腔, 在一定的实验条件下获得了稳定的锁模激光输出. 实验中, 激光工作物质尺寸为  $4.5 \text{ mm} \times 99.0 \text{ mm}$  的 Nd:YAG 棒, 由双脉冲氙灯泵浦, 调制元件 LiF 晶体尺寸为  $8 \text{ mm} \times 10 \text{ mm} \times 68 \text{ mm}$ , 通光长度为 68 mm, 对  $1.06 \mu\text{m}$  小信号光透过率  $T_0$  为 33.06%. 激光输出能量由 PT-1 型激光能量计测量, 同时利用快速 PIN 管和 300 MHz 存储示波器观察和记录输出脉冲波形. 利用对撞增强腔实现稳定的 LiF 晶体被动锁模的实验结果和机理, 其实验装置图如文[4, 5]所描述, 对撞增强腔的关键结构在于 ARR 的引入. 3 个平面镜组成 ARR, 晶体置于 ARR 中心以获得对撞增强效应, 控制泵浦电压使激光器逐渐变化到稳定的锁模运转. 当锁模几率超过 90%, 所测得的平均输出能量为 11.8 mJ (10 次以上测定的平均值), 输出能量稳定性 ( $1 - \Delta E / \bar{E} = 1 - \sum_{i=1}^n \frac{|E_i - \bar{E}|}{n\bar{E}}$ ) 为 98.2% 稳定的锁模单脉冲序列, 如图 3 所示. 由图 3 可粗略估计, 锁模脉冲序列中间相邻的脉冲时间间隔约为 7 ns, 恰好是光在腔内来回一周的渡

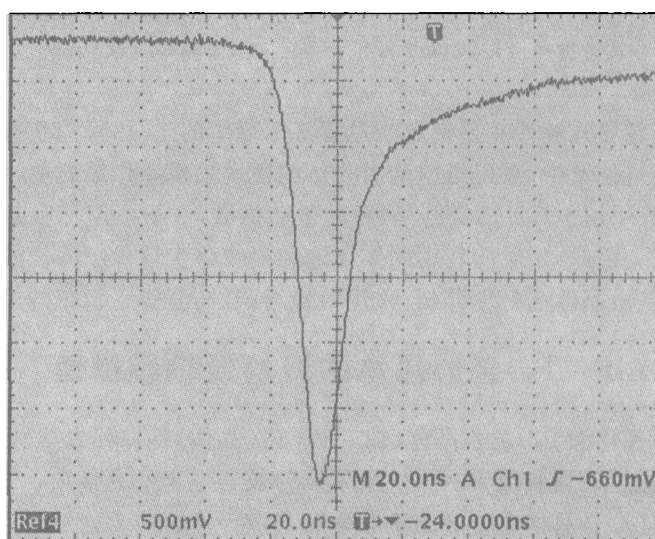


图 2 调 Q 单脉冲示波器照片

制元件 LiF 晶体尺寸为  $8 \text{ mm} \times 10 \text{ mm} \times 68 \text{ mm}$ , 通光长度为 68 mm, 对  $1.06 \mu\text{m}$  小信号光透过率  $T_0$  为 33.06%. 激光输出能量由 PT-1 型激光能量计测量, 同时利用快速 PIN 管和 300 MHz 存储示波器观察和记录输出脉冲波形. 利用对撞增强腔实现稳定的 LiF 晶体被动锁模的实验结果和机理, 其实验装置图如文[4, 5]所描述, 对撞增强腔的关键结构在于 ARR 的引入. 3 个平面镜组成 ARR, 晶体置于 ARR 中心以获得对撞增强效应, 控制泵浦电压使激光器逐渐变化到稳定的锁模运转. 当锁模几率超过 90%, 所测得的平均输出能量为 11.8 mJ (10 次以上测定的平均值), 输出能量稳定性 ( $1 - \Delta E / \bar{E} = 1 - \sum_{i=1}^n \frac{|E_i - \bar{E}|}{n\bar{E}}$ ) 为 98.2% 稳定的锁模单脉冲序列, 如图 3 所示. 由图 3 可粗略估计, 锁模脉冲序列中间相邻的脉冲时间间隔约为 7 ns, 恰好是光在腔内来回一周的渡

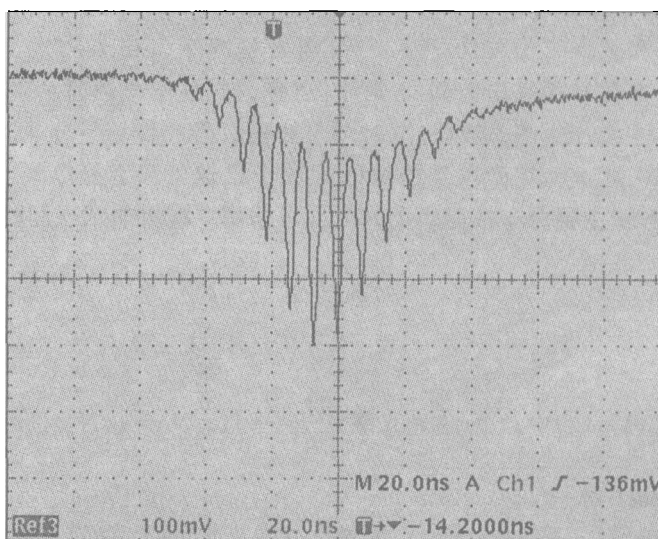


图 3 单脉冲锁模序列示波器照片

越时间  $2L/C$  (激光器的有效腔长为 1 m)。

### 3 结论

理论分析指出, 当激光腔内光强很大, 超过  $\text{LiF}:\text{F}_2^-$  色心晶体激发态吸收的饱和光强  $I_{s(\text{ex})}$  时, 由于强烈的激发态吸收, 以及高激发态的驰豫时间为皮秒量级, 甚至更短, 这样 LiF 可以实现稳定的锁模激光输出。抗共振环的分析指出, 当 LiF 晶体置于 ARR 中心, 相向传播的两列脉冲在可饱和吸收体处形成瞬态光栅效应, 使晶体内的光强出现明显的强弱空间分布。在强度最大处急剧增大的光强, 容易导致吸收体的激发态吸收饱和, 而实现锁模运转。由于 ARR 中心处对撞产生的光栅强度远大于普通直腔中产生的光栅强度, 它对稳定激光输出起了关键的作用。分析指出<sup>[6]</sup>, 相向传播的光脉冲在可饱和吸收体内迭加, 其光强包含了来自较为稳定相位相关和较不稳定相位随机两部分的贡献。瞬态光栅效应使可饱和吸收体对场的相位相关部分损耗总是小于随机部分, 也就是说吸收体对随机部分有较大的抑制作用。由于腔内增益介质的作用, 这种光场在腔内往返多次后, 光场中相位相关部分很快被突出出来, 而较不稳定的随机部分被大大抑制。因而, 可获得较为稳定的被动锁模激光输出, 它表现在锁模几率大于 90% 和输出能量稳定性高于 98. %。

本文通过对  $\text{LiF}:\text{F}_2^-$  色心晶体的结构和能级的理论分析, 指出基态恢复时间为纳秒量级的 LiF 晶体。当激光腔内光强足够大, 由于强烈的激发态吸收效应, 可实现锁模运行。实验中, 利用对撞增强腔增大可饱和吸收体处的光功率密度, 获得了稳定的被动锁模激光输出。其输出稳定性为 98. 2%, 比相关文献的被动锁模稳定性 92%~95% 高出许多<sup>[7]</sup>, 这种方便的锁模器件及较好的输出参数具有良好的应用前景。

### 参 考 文 献

- 1 Alfons P, Oliver L, Taiju T. Emission spectroscopy characterization of color centers in a LiF crystal[J]. Optical Communications, 2002, 214(1-6): 305~313
- 2 姚关清, 吴逢铁. 利用抗共振环实现稳定的 BDN 被动锁模[J]. 华侨大学学报(自然科学版), 2004, 25(2): 137~139
- 3 Oliver L, Alfons P, Taiju T. Picosecond laser saturable absorption studies on color centers in LiF crystal[J]. Optical Communications, 2002, 206(4-6): 389~400
- 4 Wu Fengtie, Zhang Wenzhen. High energy and high stability passively Q-switched laser with convex-ARR unstable resonator[J]. Optical & Laser Technology, 2000, 32(2): 107~110
- 5 吴逢铁, 张文珍. 凸-ARR 非稳定腔中  $\text{Cr}^{4+}:\text{YAG}$  调 Q 激光器的研究[J]. 中国激光, 2001, 28(1): 1~3
- 6 吴逢铁, 张文珍. 获得高稳定被动 Q 的新颖技术[J]. 福光技术, 2002, 24(2): 1~5
- 7 张行愚, 王青圃. BDN 染料的锁模特性和基态恢复时间[J]. 激光杂志, 1992, 13(3): 135~137

## The Generation of the Stable Passive Mode-Locking by Using Colliding Enhanced Resonator and LiF Crystal

Wu Fengtie      Zhang Jianrong

(College of Information Science and Engineering, Huaqiao University, 362021, Quanzhou, China)

**Abstract** By theoretic analyzing the energy level structure of the color center and calculating the saturable optical intensity of the excited state absorption, the authors point out the possibility of realizing passive mode-locking by using LiF crystal with the relaxation time of the ground state in nanosecond magnitude. In colliding enhanced resonator Nd:YAG laser, mode-locked laser was realized by using LiF crystal. The single mode-locked pulse train with the average energy of 11.8 mJ and the energy stability over 98% was obtained.

**Keywords** colliding enhanced resonator,  $\text{LiF}:\text{F}_2^-$  color center crystal, passive mode-locking, excited state absorption