

掺杂色心 Nd:YAG 晶体的应用研究

姚广涛 张兰敏 李 坚 谷幼英 白菜坡

(华北光电技术研究所, 100015)

提要: 掺杂色心 Nd:YAG 晶体可做工作物质或被动调制器。被动 Q 开关脉冲宽度 ≥ 7 ns, 主被动锁模脉冲宽度 ≥ 270 ps。当连续泵浦时脉冲重复频率在 1~10 kHz 之间, 脉宽 ≥ 260 ns。主被动锁模脉冲宽度在 ns 或亚 ns, 倍频输出平均功率约为 300 mW。

关键词: 色心 Nd:YAG 晶体

Study on application of doped colour center Nd:YAG crystals

Yao Guangtao, Zhang Lanmin, Li Jian, Gu Youying, Bai Rongpo

(North China Research Institute of Electro-Optics, Beijing)

Abstract: The doped colour center Nd:YAG crystal can be used as an active medium or a passive modulator. The passive Q-switching pulse width is equal to or greater than 7 ns, the active and passive mode-locking pulse width is equal to or greater than 270 ps. When the pulse repetition rate is within 1~10 kHz, the pulse duration is equal to or greater than 200 ns. Nanosecond or subnanosecond active and passive mode-locking pulse durations are obtained and the frequency-doubling average output power is about 300 mW.

Key words: colour center Nd:YAG crystal

掺杂色心 Nd:YAG 晶体(或色心 YAG 晶体)是一种多功能激光晶体,它在 $1.06 \mu\text{m}$ 具有增益和可饱和吸收双重特性,既可做激活介质亦可做被动调制元件。当做为工作物质使用时可实现 $1.06 \mu\text{m}$ 自 Q 开关或自 Q 开关自锁模激光输出,具有自选单横模能力,输出光束偏振;当做 Nd 激光器的被动调制元件使用时,具有同样的效果。若在上述激光器腔内插入一主动的声光锁模调制器则可获得相当稳定的、亚 ns 锁模脉冲激光输出。近年来我们与国内其他单位共同利用本研究所提供的掺杂色心 Nd:YAG 晶体进行了一系列的应用研究,本文简要综述该项研究中较为典型的实验结果。

一、脉冲(Xe 闪光灯)泵浦条件下的实验

1.1 自 Q 开关脉冲激光

因掺杂色心 Nd:YAG 晶体对 $1.06 \mu\text{m}$ 有增益和可饱和吸收双重特性,所以只须在两镜一棒的条件下即可实现 Q 开关脉冲激光输出。典型实验数据为:

(1) (TEM_{00})每脉冲输出能量: 6 mJ, 脉冲半宽度: 7 ns, 阈值: 38 J, 晶体 $1.06 \mu\text{m}$ 初始透

过率: 24.5%;

(2) (TEM_{00}) 每脉冲输出能量: 2.4 mJ, 脉冲半宽度: 13 ns, 输出偏振: 17:1, 阈值: 9 J, 晶体对 $1.06 \mu\text{m}$ 初始透过率: 53%;

(3) 多模每脉冲输出能量: 66 mJ, 脉冲半宽度: 20 ns, 阈值: 32 J, 激光效率: 0.2%, 晶体 $1.06 \mu\text{m}$ 初始透过率: 8%。此时易引起激光损伤。

1.2 自 Q 开关自锁模脉冲激光

在自 Q 开关条件下, 将谐振腔适当拉长, 通常大于 100 cm, 即可观察到在自锁模脉冲包络中含有自锁模脉冲序列, 由于掺杂色心 Nd:YAG 晶体的色心能级恢复时间较长(大于 10 ns), 因而锁模脉冲调制深度较浅而且有明显涨落, 脉宽也比较宽, 典型实验数据如下:

(1) (TEM_{00}) 序列脉冲输出包络能量: 2 mJ, 脉冲包络半宽度: 110 ns, 锁模脉冲半宽度: 2 ns 左右, 调制深度在 50% 的约占一半, 锁模几率: 100%, 输出偏振: 19:1, 阈值: 16 J, 晶体对 $1.06 \mu\text{m}$ 对初始透过率: 53%;

(2) (TEM_{00}) 序列脉冲包络能量: 12 mJ, 包络半宽度: 40 ns, 锁模脉冲半宽度: >1 ns, 输出偏振: 227:1, 锁模脉冲调制深度在 50% 的约占一半, 锁模几率: 100%, 阈值: 27 J, 晶体对 $1.06 \mu\text{m}$ 初始透过率: 18%^[4]。

1.3 自 Q 开关主被动锁模

在自 Q 开关自锁模激光器谐振腔内插入一声光锁模调制元件, 即可观察到自 Q 开关主被动锁模激光输出, 主动调制元件的引入大大提高了锁模的稳定性并且压缩了锁模脉冲的宽度, 典型实验数据如下:

(1) (TEM_{00}) 序列脉冲包络能量: 8 mJ, 锁模脉冲间隔: 5 ns, 锁模脉冲半宽度: 300 ps, 锁模脉冲幅度抖动小于 15%, 锁模几率: 100%, 输出偏振, Q 开关重复频率: 2~35 pps, 晶体对 $1.06 \mu\text{m}$ 初始透过率: 35.8%^[4];

(2) (TEM_{00}) 序列脉冲包络能量: 6.79 mJ, 包络半宽度: 35 ns, 锁模脉冲半宽度: 272 ps, 输出能量起伏小于 $\pm 5\%$, 晶体 $1.06 \mu\text{m}$ 初始透过率: 41%^[5]。

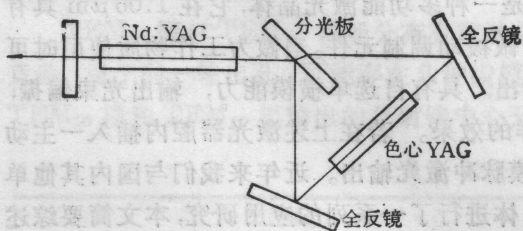


图1 对撞脉冲锁模光路

1.4 对撞脉冲锁模

在各种锁模技术中, 目前公认对撞锁模获得的脉冲宽度最窄, 用色心 YAG 晶体做可饱和吸收体放在 Nd:YAG 激光器谐振腔内非谐振环中点(图1)所进行的对撞锁模实验, 获得了小于 200 ps 的锁模脉冲, 输出稳定, 调制深度 100%, 输出光束完全 S 偏振, TEM_{00} 模。

二、连续(Kr 灯)泵浦条件下的实验

将色心 YAG 晶体(通光面双面增透)插入 Nd:YAG 激光器谐振腔内, 或其一个面增透另一个面镀全反膜使之代替谐振腔全反射镜使用(增透面朝腔内), 二者均可获得连续泵浦条件下的被动 Q 开关锁模激光输出, 若在谐振腔内插入声光锁模调制元件则可实现连续泵浦条件下的被动 Q 开关主被动锁模激光输出, 典型实验数据如下:

2.1 连续泵浦被动 Q 开关锁模

光路示于图 2(a)、(b)。图 2(a) 中色心 YAG 晶体 $1.06\ \mu\text{m}$ 初始透过率为 90%，输出镜透过率为 10~20%，Nd:YAG 晶体尺寸为 $\phi 6 \times 110\ \text{mm}$ ，腔长 $\sim 180\ \text{cm}$ ，当光泵(Kr 弧灯)输入电功率 3.3 kW 时(TEM₀₀ 或以 TEM₀₀ 为主)，平均输出功率为 4 W 左右，功率起伏 $< \pm 5\%$ (一小时内)，Q 开关频率 3~10 kHz，其频率由色心晶体 $1.06\ \mu\text{m}$ 初始透过率和光泵功率决定(在单横模条件下)，初始透过率越高，光泵功率越高，则 Q 开关频率也越高，Q 开关脉冲包络为 700 ns(由色心 YAG 晶体 $1.06\ \mu\text{m}$ 初始透过率决定)，见图 3(a)，锁模脉冲半宽度 $\sim 2.5\ \text{ns}$ ，见图 3(b)，明显看出锁模脉冲调制深度较浅(最大为 $\sim 50\%$)，脉冲呈三角波(色心能级恢复时间长造成的)，脉冲幅度抖动大约在 $\pm 10\%$ 。在该激光器腔内插入 KTP 晶体腔内倍频， $0.53\ \mu\text{m}$ 平均输出功率约 200 mW 左右。图 2(b) 中色心 YAG 晶体 $1.06\ \mu\text{m}$ 透过率为 85%，输出镜透过率为 10~20%，Nd:YAG 晶体尺寸为 $\phi 6 \times 110\ \text{mm}$ ，腔长 $\sim 120\ \text{cm}$ ，当光泵输入 3.3 kW 时(TEM₀₀ 或以 TEM₀₀ 为主)平均输出功率为 4 W 左右，功率起伏 $< \pm 5\%$ (一小时内)，Q 开关频率 0.6~4 kHz，Q 开关包络半宽度 $\sim 300\ \text{ns}$ ，锁模脉冲宽度 $\sim 2.5\ \text{ns}$ ，最大调制深度 $> 50\%$ ，脉冲幅度抖动 $\sim \pm 10\%$ ，用 KTP 晶体腔内倍频 $0.53\ \mu\text{m}$ 平均输出功率 $> 300\ \text{mW}$ 。

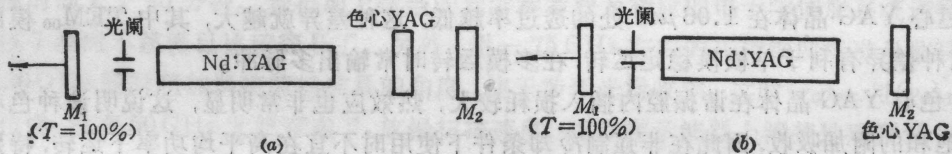


图 2 (a) 色心 YAG 晶体插入谐振腔内的被动 Q 开关锁模光路；(b) 色心 YAG 晶体与全反射腔镜合一的被动 Q 开关锁模光路

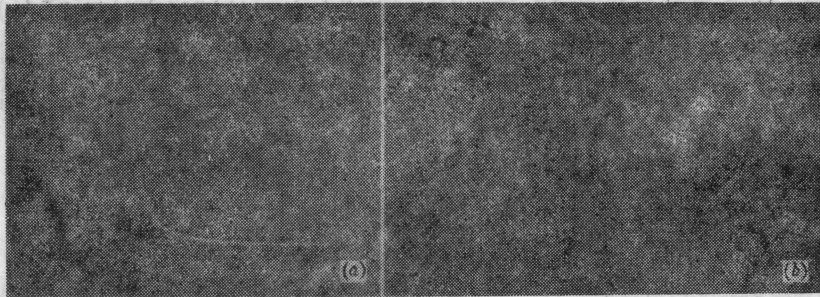


图 3 (a) 连续泵浦被动 Q 开关输出脉冲包络示波图(500 ns/div)；(b) 被动 Q 开关锁模脉冲示波图(5 ns/div)

用图 2 所示的激光器对钼、钽、银、紫铜、黄铜、铝、钢、粉末冶金、硅片和高铝瓷等材料进行加工实验均能获得均匀光滑的刻线，当用焦距为 30 mm 的单透镜会聚时可以得到宽 $40\ \mu\text{m}$ 左右的刻线，深度依材料和刻划速度而异。该激光器已提供工厂试用。

2.2 连续泵浦被动 Q 开关主被动锁模

在图 2(a) 的谐振腔内，在 M_1 与光闸之间插入一声光锁模调制器，声光调制器振荡中心频率为 50 MHz，驱动功率为 2~4 W，腔长为 150 cm。当光泵(Kr 弧灯)输入电功率 $\sim 3\ \text{kW}$ 时，可获得平均输出功率大于 1 W 的 TEM₀₀ 模输出，且光束偏振。其 Q 开关频率为 5~7 kHz(随光泵功率加大而升高)，频率抖动 $< \pm 5\%$ ，锁模脉冲序列包络(图 4(a))半宽度



图4 (a) 连续泵浦被动 Q 开关、声光主被动锁模的 Q 开关包络(半宽度 $\sim 260\text{ns}$);
(b) 锁模脉冲序列(10 ns/div)

$\sim 540\text{ns}$, 锁模脉冲调制深度达 100%, 脉冲宽度为亚 ns 量级(图 4(b)), 幅度抖动 $< \pm 10\%$, 色心 YAG 晶体初始透过率($1.06\mu\text{m}$) $\sim 90\%$, 用 KTP 晶体腔外倍频 $0.53\mu\text{m}$ 平均输出功率 $\sim 200\text{mW}$ 。

三、讨 论

1. 色心 Nd:YAG 晶体自 Q 开关或做被动调制元件使用时, 各阶横模的振荡阈值有较大差异, 色心 YAG 晶体在 $1.06\mu\text{m}$ 处的透过率越低, 这种差异就越大, 其中 TEM_{00} 模的阈值最低, 这种差异有利于单横模稳定运转, 在多模运转时常输出多脉冲。

2. 色心 YAG 晶体在谐振腔内插入损耗较大, 热效应也非常明显, 这说明该种色心晶体有非可饱和的附加吸收, 因此在非强制冷却条件下使用时不宜在高平均功率下运转, 特别不适合在多模运转, 否则易出现激光损伤或炸裂。

3. 在脉冲或连续泵浦的被动 Q 开关锁模运转时, 锁模脉冲间隔有 $2L/c$ 和 L/c 两种周期出现(L 为谐振腔长, c 为光速), 在调腔时附合周期 L/c 的示波图形有时呈 $2L/c$ 周期对称分布甚至最终只出现 $2L/c$ 周期的波形, 这一现象似可解释为出现 L/c 的周期腔内同时存在两套锁模, 它们的脉冲峰值在时间上相差 L/c , 在引入声光锁模调制器的情况下, 只出现 $2L/c$ 周期可能是最好的证明。

参 考 文 献

- 1 多掺杂 YAG 晶体激光特性实验组, 激光与红外, (10), 20(1983)
- 2 桂尤喜 *et al.*, 激光与红外, (10), 25(1983)
- 3 姚广涛 *et al.*, 中国激光, 11 (7), 441(1984)
- 4 张世文 *et al.*, 中国激光, 10(8~9), 548(1983)
- 5 陈有明 *et al.*, 中国激光, 14(12), 711(1987)