

# X-切向Yb:YLuGdCOB晶体的声光调Q脉冲激光性质

刘芬芬, 刘存海

海军航空大学, 山东 烟台  
Email: feixu83@163.com

收稿日期: 2021年8月3日; 录用日期: 2021年8月27日; 发布日期: 2021年9月3日

## 摘要

声光调Q是固体激光器实现脉冲运转、获得mJ量级脉冲能量的最常用方法, 声光调Q能够严格控制脉冲激光的重复率。掺Yb稀土钙氧硼酸盐晶体为低增益激光介质, 受激发射截面很小, 晶体的能量储存能力强, 适合声光调Q脉冲激光的运转。我们在937 nm半导体激光器纵向泵浦条件下, 利用平凹谐振腔, 对掺Yb稀土钙氧硼酸盐X-切向Yb:YLuGdCOB晶体的声光调Q脉冲激光特性做了深入的研究。在最佳谐振腔输出透过率为 $T = 50\%$ 条件下, 实现了重复率1~20 kHz范围内稳定的声光调Q脉冲运转。PRF = 1 kHz的重复率时, 声光调Q产生的最大脉冲能量可达1 mJ, 所产生的最大峰值功率超过166.00 kW, 激光斜率效率为26.6%, 最短脉冲宽度为6.0 ns。

## 关键词

声光调Q, Yb稀土钙氧硼酸盐晶体, 脉冲激光

# Properties of Acousto-Optic Q-Switched Pulsed Laser of X-Cut Yb:YLuGdCOB Crystal

Fenfen Liu, Cunhai Liu

Naval Aviation University, Yantai Shandong  
Email: feixu83@163.com

Received: Aug. 3<sup>rd</sup>, 2021; accepted: Aug. 27<sup>th</sup>, 2021; published: Sep. 3<sup>rd</sup>, 2021

## Abstract

Acousto-optic Q-switching is the most common method for solid-state lasers to realize pulse operation and obtain mJ pulse energy. Acousto-optic Q-switching can strictly control the repetition rate

of pulsed laser. Yb doped rare earth calcium oxyborate crystal is a low gain laser medium with small stimulated emission cross section and strong energy storage capacity. It is suitable for the operation of acousto-optic Q-switched pulse laser. Under the longitudinal pumping condition of 937 nm semiconductor laser, the characteristics of acousto-optic Q-switched pulsed laser in Yb doped rare earth calcium oxyborate X-cut Yb:YLuGdCOB crystal are studied by using a flat concave resonator. Under the condition that the optimal output transmittance of the resonator  $T = 50\%$ , a stable acousto-optic Q-switched pulse operation in the repetition rate range of 1~20 kHz is realized. When PRF = 1 kHz, the maximum pulse energy generated by acousto-optic Q-switching can reach 1 mJ, the maximum peak power generated exceeds 166.00 kW, the laser slope efficiency is 26.6%, and the shortest pulse width is 6.0 ns.

## Keywords

Acousto-Optic Q-Switching, Yb Rare Earth Calcium Oxyborate Crystal, Pulsed Laser

Copyright © 2021 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



## 1. 引言

以三价镧系稀土离子为激活离子的激光晶体, 是常用的激光材料, 在中小功率固体激光器中具有广泛的应用。掺 Yb 稀土钙氧硼酸盐(Yb:ReCOB)晶体为低增益激光介质, 受激发射截面很小, 晶体的能量储存能力强, 具有偏振吸收的特性, 优良的热机械性能[1]-[6], 适合声光调 Q 脉冲激光的运转。本文用提拉法生长了 Yb:YLuGdCOB 晶体, 该晶体是掺 Yb 的含 Lu、Y 和 Gd 三种非活性光学离子的稀土钙氧硼酸盐。声光调 Q 由外加调制信号控制所产生的激光脉冲的重复率, 通过声光介质产生的超声衍射来调制激光谐振腔的损耗或 Q 值, 是实现固体激光器脉冲运转的常用的技术途径。声光调 Q 脉冲激光性质的研究对于 Yb 离子固体激光器的应用具有重要的意义, 由声光调 Q 产生的脉冲激光运转, 重复率一般为几个 kHz 至几十个 kHz [7] [8] [9] [10]。我们利用简单的平-凹谐振腔, 在高功率半导体激光器纵向泵浦的条件下, 对 Yb:YLuGdCOB 晶体的声光调 Q 脉冲激光特性做了较全面和深入的实验研究。

## 2. 声光调 Q 脉冲激光实验装置

与被动调 Q 相比, 关于 Yb 离子激光材料声光调 Q 的研究相对较少。本节中, 我们将分析和讨论 976 nm 泵浦下 X-切向 Yb:YLuGdCOB 晶体的声光调 Q 脉冲激光特性。激光实验中仍使用简单的平凹谐振腔。图 1 所示为激光实验装置示意图, 声光 Q 开关(AO)超声频率为 80 MHz, 射频(rf)驱动功率 16 W, 声光介

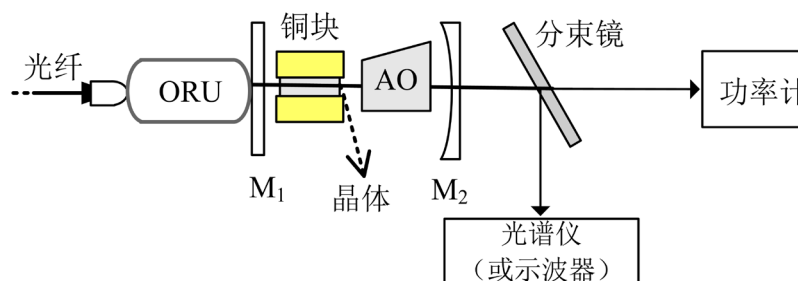


Figure 1. Acousto-optic Q-switched laser experimental device

图 1. 声光调 Q 激光实验装置示意图

质长度 20 mm, 两个端面镀 1.06  $\mu\text{m}$  增透膜。谐振腔的凹面输出镜曲率半径  $R_2 = 50$  mm, 腔长为 60 mm。实验中 Yb:YLuGdCOB 晶体样品和声光 Q 开关都由温度为 10 $^{\circ}\text{C}$  的循环水冷却。

为了减小脉冲激光运转中腔内光学元件表面出现光损伤的可能性, 提高脉冲激光输出功率水平和获得大的单脉冲能量, 声光调 Q 激光谐振腔的输出耦合透过率  $T$  也应当足够高。另外, 使用高的谐振腔输出透过率, 也有利于抑制声光调 Q 脉冲激光运转中连续波振荡的产生和多脉冲现象的出现。

### 3. X-切向 Yb:YLuGdCOB 晶体的声光调 Q 脉冲激光实验

#### 3.1. 脉冲激光输出功率随吸收泵功率的变化

利用图 1 所示平凹谐振腔, 976 nm 半导体激光器纵向泵浦, 实验测量了 X-切向 Yb:YLuGdCOB 晶体的声光调 Q 脉冲激光输出功率随泵浦功率的变化, 结果表明 X-切向 Yb:YLuGdCOB 晶体可在输出耦合透过率  $T = 10\% \sim 60\%$  的范围内, 实现稳定的声光调 Q 脉冲激光运转。由实验确定的谐振腔最佳输出透过率为  $T = 50\%$ , 和连续波运转的最佳透过率在  $T = 5\%$  不同。

在最佳输出透过率  $T = 50\%$  条件下, Yb:YLuGdCOB 晶体能够在脉冲重复率 PRF = 0.2~20 kHz 的范围内实现稳定的声光调 Q 激光振荡。图 2 展示了重复率 PRF = 0.2~1 kHz 情况下, 脉冲输出功率随着吸收泵功率的变化关系。为便于比较, 图中也给出了  $T = 50\%$  下的连续波(cw)输出功率, 是在声光 Q 开关留在腔内、但未施加射频驱动功率情况下测得的, 以尽量维持激光谐振腔的构型不变。在高重复率 PRF = 10~20 kHz 的范围内, Yb:YLuGdCOB 晶体的声光调 Q 输出特性的差别很小。一定泵浦功率下产生的脉冲输出功率, 略低于连续波输出功率水平。例如, 在吸收泵浦功率  $P_{\text{abs}} = 22.7$  W, 重复率为 20 kHz 时, 产生的脉冲输出功率为 4.7 W, 低于连续波输出功率 5.3 W; 而脉冲激光斜率效率  $\eta_s = 26.6\%$ , 略低于连续波运转的斜率效率 28.7%。在 PRF = 1 kHz 的低重复率条件下, 声光调 Q 阈值泵浦功率  $P_{\text{abs,th}} = 2.1$  W; 超过阈值后, 脉冲输出功率以  $\eta_s = 10.0\%$  的斜率效率增加, 在泵浦功率  $P_{\text{abs}} = 13.6$  W 时单脉冲能量为 1 mJ, 但是脉冲输出功率  $P_{\text{avr}}$  仅为 1 W。

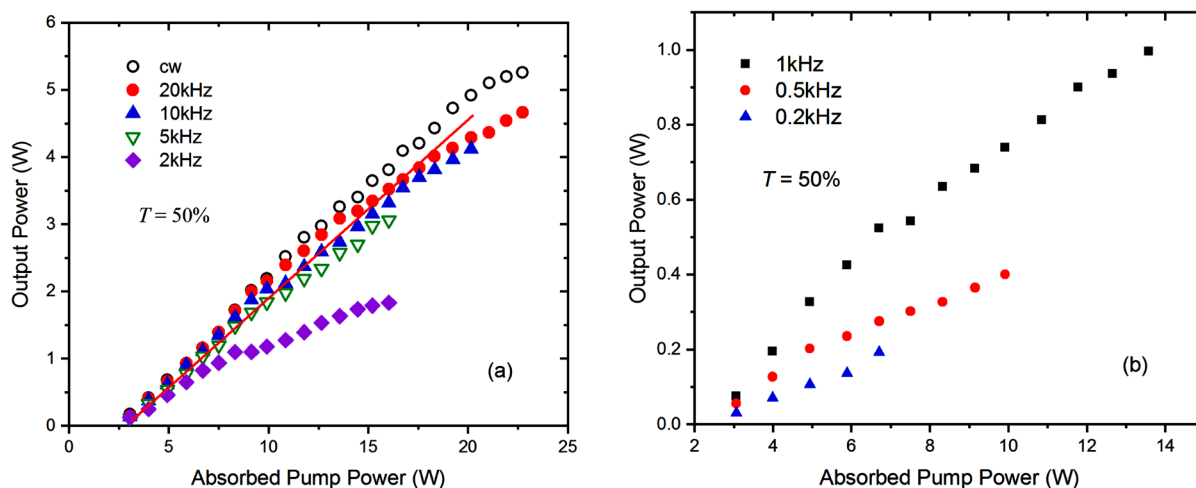


Figure 2. Change of output power versus absorbed pump power of X-cut Yb:YLuGdCOB crystal acousto-optic Q-switched pulsed laser

图 2. X-切向 Yb:YLuGdCOB 晶体声光调 Q 脉冲激光输出功率随吸收泵功率的变化

应当指出,  $T = 50\%$  是由实验确定的、实现低重复率下高功率或高能量声光调 Q 脉冲运转的最佳输出透过率, 但脉冲激光效率相对较低, 因为远离谐振腔的连续波运转最佳输出透过率  $T = 5\%$ 。当减小谐振腔输出耦合透过率时, 脉冲激光效率可获得显著的提升, 但却增加了腔内光学元件(激光晶体、声光介质)

表面遭受光损伤的可能性[11] [12] [13] [14] [15], 实验中观察得到在低输出透过率下得到的最大脉冲输出功率远低于  $T = 50\%$ 。

### 3.2. 脉冲激光发射谱

利用光谱仪测量 X-切向 Yb:YLuGdCOB 晶体的声光调 Q 脉冲激光发射谱, 实验结果显示, 在  $T = 50\%$  的高输出耦合透过率下, 发射谱几乎不随重复率或泵浦功率变化。图 3 给出了泵浦功率  $P_{abs} = 11.9 \text{ W}$  下测得的 PRF = 5 kHz、10 kHz 和 20 kHz 的激光发射谱, 我们看到, 声光调 Q (1031~1034 nm) 的激光波长已非常接近 Yb:YLuGdCOB 晶体主发射峰(1030.0 nm)的峰值位置。

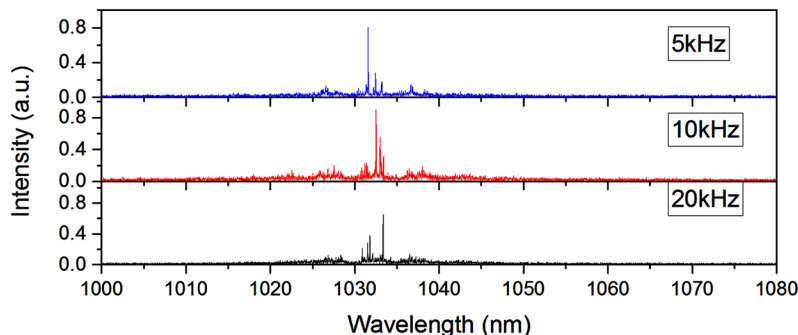


Figure 3. Emission spectrum of absorbed pump power  $P_{abs} = 11.9 \text{ W}$  for the Yb:YLuGdCOB crystal acousto-optic Q-switched pulsed laser

图 3. 吸收泵浦功率  $P_{abs} = 11.9 \text{ W}$  时 X-切向 Yb:YLuGdCOB 晶体声光调 Q 脉冲激光发射谱

### 3.3. 脉冲宽度随吸收泵浦功率的变化关系

对于声光调 Q 脉冲激光运转, 脉冲宽度通常随泵浦功率水平的提高而减小, 这一特征在高重复率下尤为显著。实验利用示波器测量不同重复率下的脉冲宽度, 图 4 示出了  $T = 50\%$  下的重复率 PRF = 0.2~20 kHz 范围内, Yb:YLuGdCOB 晶体声光调 Q 激光脉冲宽度随泵浦功率的变化情况。在 PRF = 20 kHz 的高重复率下, 随着泵浦功率自阈值开始增加, 脉冲宽度从 259 ns 逐渐地缩短至 21 ns ( $P_{abs} = 22.7 \text{ W}$ ); 而在 PRF = 1 kHz 的低重复率下, 脉冲宽度仅在  $P_{abs} < \sim 5.5 \text{ W}$  的低泵浦功率区域有所减小, 高功率下近似地

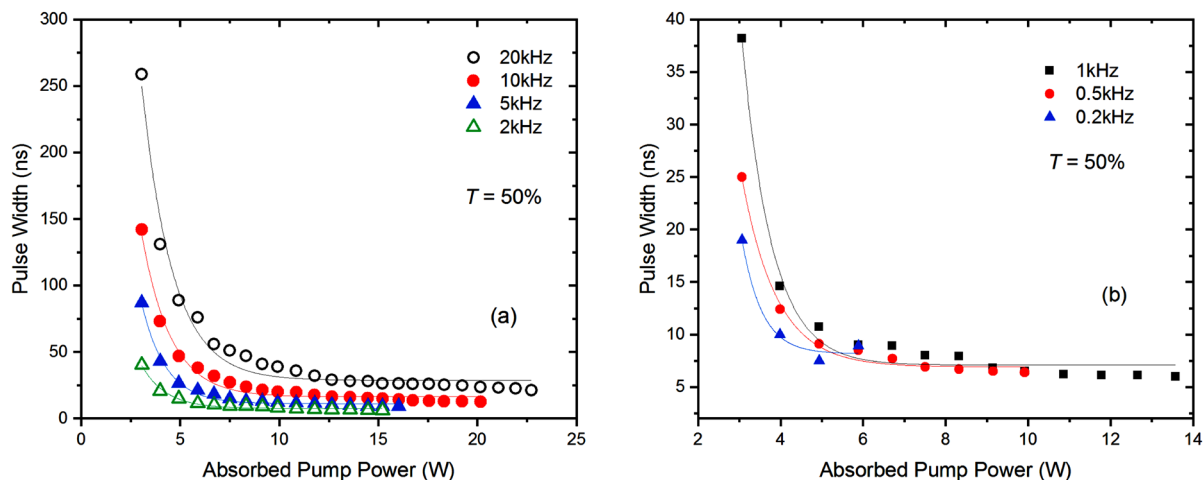


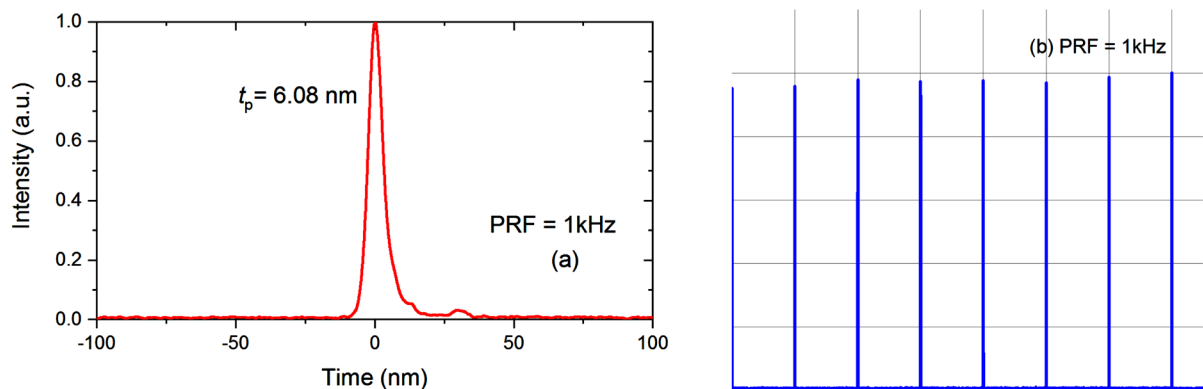
Figure 4. Change of pulse width versus absorbed pump power for the X-cut Yb:YLuGdCOB crystal acousto-optic Q-switched pulsed laser under output couplings of  $T = 50\%$

图 4.  $T = 50\%$  时, X-切向 Yb:YLuGdCOB 晶体声光调 Q 脉冲宽度随吸收泵浦功率的变化

保持不变, 其值约为 6.0 ns ( $P_{\text{abs}} = 13.6$  W)。对于 PRF = 5 kHz, 阈值附近的低功率下脉冲宽度随泵浦功率升高而快速地减小; 在高泵浦功率区域脉冲宽度也近似地保持不变。

### 3.4. 激光脉冲波形

图 5(a)给出了低重复率 PRF = 1 kHz 的条件下, 由 Yb:YLuGdCOB 晶体声光调 Q 获得的最短激光脉冲波形, 脉冲宽度为 6.08 ns, 是在最高泵浦功率  $P_{\text{abs}} = 13.6$  W 测得的。图 5(b)所示为相应的激光脉冲序列, 脉冲幅度涨落不超过 10%; 与被动调 Q 情形不同的是, 这里的脉冲重复周期是由外加调制信号决定的, 不存在可观察到的时间抖动。本文计算了 X-切向 Yb:YLuGdCOB 晶体声光调 Q 脉冲激光主要参数, 如表 1 所示。这些参数包括最大脉冲输出功率  $P_{\text{avr}}$ , 脉冲能量  $E_p$ , 脉冲宽度  $t_p$ , 峰值功率  $P_p$ 。可以看出在重复率 PRF = 1 kHz 的条件下, 活动最大脉冲能量  $E_p = 0.996$  W, 最高峰值功率  $P_p = 125.00$  W。



**Figure 5.** Acousto-optic Q-switched pulse profile (a) and pulse sequence (b), measured at pump power  $P_{\text{abs}} = 11.2$  W  
**图 5.** 泵浦功率  $P_{\text{abs}} = 11.2$  W 下测得的声光调 Q 脉冲轮廓(a)和脉冲序列(b)

**Table 1.** Laser parameters of X-cut Yb:YLuGdCOB crystal at different repetition frequencies

**表 1.** X-切向 Yb:YLuGdCOB 晶体不同重复频率下的激光参数

PRF (kHz)	0.2	0.5	1.0	2.0	5.0	10.0	20.0
$P_{\text{avr}}$ (W)	0.136	0.400	0.996	1.789	3.062	4.12	4.663
$E_p$ (mJ)	0.680	0.800	0.996	0.894	0.612	0.412	0.233
$t_p$ (ns)	8.9	6.4	6.0	6.2	9.2	12.6	21.2
$P_p$ (kW)	76.40	125.00	166.00	144.27	66.57	32.70	11.00

## 4. X-切向 Yb:YLuGdCOB 晶体的声光调 Q 脉冲激光特性理论计算

根据准三能级材料主动调 Q 脉冲激光参数的理论计算公式[11] [12] [13] [14] [15], 可由 Yb:YLuGdCOB 晶体的光谱学参数、晶体样品参数、谐振腔和泵浦光束参数等出发, 计算给定重复频率下的声光调 Q 脉冲激光输出特性、脉冲能量和脉冲宽度等。所需要的参数值在表 2 中列出。

**Table 2.** Parameters used in the theoretical calculation of acousto-optic Q-switched pulsed laser characteristics of X-cut Yb:YLuGdCOB crystal

**表 2.** X-切向 Yb:YLuGdCOB 晶体声光调 Q 脉冲激光特性理论计算过程中所用到的参数

参数	数值
激光发射波长 $\lambda_l$ (nm)	1030
受激发射截面 $\sigma_{\text{em}}$ ( $10^{-20}$ cm <sup>2</sup> )	1.62

## Continued

共振吸收截面 $\sigma_{\text{abs}}$ ( $10^{-20} \text{ cm}^2$ )	0.12
晶体荧光寿命 $\tau_f$ (ms)	0.93
Yb 离子浓度 $N_i$ ( $1020 \text{ cm}^{-3}$ )	6.23
晶体样品长度 $l$ (cm)	0.50
谐振腔光学长度 $L_c$ (cm)	12.6
泵浦光斑半径 $w_p$ (cm)	0.01
激光模半径 $w_l$ (cm)	0.007
谐振腔输出透过率 $T$	0.5
谐振腔杂散损耗 $L_i$	0.02
激光光子能量 $h\nu_l$ ( $10^{-19} \text{ J}$ )	1.94
泵浦光子能量 $h\nu_p$ ( $10^{-19} \text{ J}$ )	2.13

在平面波(或平均场)近似下, 理论计算所需的两个中间量, 泵浦速率  $R_p$  和激光介质内有效模体积  $V_a$ , 可按下面的公式计算[16] [17]:

$$R_p = \frac{1}{h\nu_p} \frac{P_{\text{abs}}}{\pi w_p^2 l} \quad (1)$$

$$V_a = \pi w_l^2 l \quad (2)$$

对重复率 PRF = 1, 2, 5, 10, 30 kHz, 泵浦功率  $P_{\text{abs}} = 10.8 \text{ W}$  的条件下, 声光调 Q 脉冲能量和脉冲宽度做了理论计算。表 3 给出了计算值和测量值的比较。表中  $E_{p,\text{cal}}$  和  $E_{p,\text{exp}}$  分别为脉冲能量的计算值和测量值; 而  $t_{p,\text{cal}}$  和  $t_{p,\text{exp}}$  分别为脉冲宽度的计算值和测量值。我们看到, 不同重复率下, 脉冲能量的理论计算结果与实验测量值符合得相当好; 但对于脉冲宽度, 理论计算与实验测量之间却存在着很大差异, 这在低重复率下尤为显著。这一问题的根源在于, 我们的理论计算是基于平面波或平均场近似, 其中假定激光介质内反转粒子数密度  $N$  和光子数  $\phi$  都具有均匀的横向空间分布(即与  $(r, \theta)$  或  $(x, y)$  无关)。这一假设, 对于主动调 Q 激光脉冲能量理论计算的影响很小, 但却会给脉冲宽度的计算带来很大的误差[17]。

**Table 3.** Comparison between calculated and measured values of Yb:YLuGdCOB acousto-optic Q-switched pulse energy and pulse width at different repetition rates

**表 3.** 不同重复率下 Yb:YLuGdCOB 声光调 Q 脉冲能量和脉冲宽度计算值与测量值的比较

PRF (kHz)	1.0	2.0	5.0	10.0	30.0
$N_i$ ( $1020 \text{ cm}^{-3}$ )	1.82	1.21	0.74	0.59	0.49
$N_f$ ( $1020 \text{ cm}^{-3}$ )	0.04	0.11	0.25	0.34	0.41
$E_{p,\text{cal}}$ (mJ)	2.360	1.450	0.638	0.325	0.109
$E_{p,\text{exp}}$ (mJ)	3.100	1.550	0.636	0.337	0.114
$t_{p,\text{cal}}$ (ns)	2.8	4.0	8.7	17.2	64.0
$t_{p,\text{exp}}$ (ns)	23.9	24.3	24.6	26.0	42.0

表 3 中除了脉冲能量和脉冲宽度外, 还列出了  $N_i$  和  $N_f$  的计算值。我们看到, 随着重复率降低(泵浦时间  $\tau_p$  缩短), 激光脉冲开始建立时的反转粒子数密度  $N_i$  很快地减小; 而脉冲结束时激光介质内剩余的反

转粒子数密度  $N_f$  则不断增加。当脉冲重复率提高至  $\text{PRF} = 30 \text{ kHz}$  时,  $N_i$  和  $N_f$  的差值已相当小, 这意味着激光介质内储存能量的利用率很低。应当指出, 高重复率下储能利用率降低, 仅表明在主动调 Q 的一个重复周期内, 激光介质反转粒子数的利用率降低, 但剩余的反转粒子数或储能并没有损失, 而是继续用于后一重复周期内激光脉冲的形成。因此, 高重复率条件下储能利用率的降低, 对声光调 Q 脉冲激光效率没有影响。事实上, 声光调 Q 脉冲激光效率通常会随重复率提高而增加。

## 5. 总结

和被动调 Q 一样, 声光调 Q 也是固体激光器实现脉冲运转、获得 mJ 量级(或低于此)脉冲能量的最常用方法。当需要严格的固定重复频率脉冲激光时, 声光调 Q 常是最合适而简单的选择。然而, 与被动调 Q 情形不同的是, Yb 离子激光材料的声光调 Q 的相关研究, 无论在广度还是深度上, 都难以与被动调 Q 研究相比拟。

我们在 937 nm 半导体激光器纵向泵浦条件下, 利用平凹谐振腔, 对掺 Yb 稀土钙氧硼酸盐晶体 Yb:YLuGdCOB 的声光调 Q 脉冲激光特性做了较为深入的研究, 确定了不同晶体能够实现稳定声光调 Q 的脉冲重复率范围, 实现了高效率的脉冲激光运转, 获得了近 1 mJ 的单脉冲能量, 所产生的最大峰值功率超过 166.00 kW。对于 X-切向 Yb:YLuGdCOB 晶体, 高能量声光调 Q 的最佳谐振腔输出透过率为  $T = 50\%$ 。在这一输出透过率下, 可实现 1~20 kHz 重复率范围内稳定的声光调 Q 脉冲运转。在  $\text{PRF} = 1 \text{ kHz}$  的重复率下限, 声光调 Q 产生的最大脉冲能量可达 1 mJ, 最短脉冲宽度为 6.0 ns, 而激光斜率效率为 26.6%。根据准三能级材料主动调 Q 脉冲激光参数的理论计算公式, 利用 Yb:YLuGdCOB 晶体的光谱学参数、晶体样品参数、谐振腔和泵浦光束参数, 计算出了给定重复频率下的声光调 Q 脉冲能量和脉冲宽度。

## 参考文献

- [1] Aron, A., Aka, G., Viana, B., Kahn-Harari, A., Vivien, D., Druon, F., Balembois, F., Georges, P., Brun, A., Lenain, N. and Jacquet, M. (2001) Spectroscopic Properties and Laser Performances of Yb:YCOB and Potential of the Yb:LaCOB Material. *Optical Materials*, **16**, 181-188. [https://doi.org/10.1016/S0925-3467\(00\)00075-6](https://doi.org/10.1016/S0925-3467(00)00075-6)
- [2] Liu, F., Dong, L., Chen, J. and Liu, J. (2021) Spectroscopic and Lasing Properties of a Mix (Yb, Y, Lu, Gd) Calcium Oxyborate Crystal:  $\text{Yb}_{0.19}\text{Y}_{0.34}\text{Lu}_{0.12}\text{Gd}_{0.35}\text{Ca}_4\text{O}(\text{BO}_3)_3$ . *Journal of Luminescence*, **232**, Article ID: 117789. <https://doi.org/10.1016/j.jlumin.2020.117789>
- [3] Druon, F., Augé, F., Balembois, F., Georges, P., Brun, A., Aron, A., Mougél, F., Aka, G. and Vivien, D. (2000) Efficient, Tunable, Zero-Line Diode-Pumped, Continuous-Wave  $\text{Yb}^{3+}:\text{Ca}_4\text{LnO}(\text{BO}_3)_3$  ( $\text{Ln} = \text{Gd}, \text{Y}$ ) Lasers at Room Temperature and Application to Miniature Lasers. *Journal of the Optical Society of America B*, **17**, 18-22. <https://doi.org/10.1364/JOSAB.17.000018>
- [4] Shah, L., Ye, Q., Eichenholz, J.M., Hammons, D.A., Richardson, M., Chai, B.H.T. and Peale, R.E. (1999) Laser Tunability in  $\text{Yb}^{3+}:\text{YCa}_4\text{O}(\text{BO}_3)_3$  (Yb:YCOB). *Optics Communications*, **167**, 149-153. [https://doi.org/10.1016/S0030-4018\(99\)00293-X](https://doi.org/10.1016/S0030-4018(99)00293-X)
- [5] Valentine, G.J., Kemp, A.J., Birkin, D.J.L., Burns, D., Balembois, F., Georges, P., Bernas, H., Aron, A., Aka, G., Sibbett, W., Brun, A., Dawson, M.D. and Bente, E. (2000) Femtosecond Yb: YCOB Laser Pumped by Narrow-Stripe Laser Diode and Passively Modelocked Using Ion Implanted Saturable-Absorber Mirror. *Electronics Letters*, **36**, 1621-1623. <https://doi.org/10.1049/el:20001141>
- [6] Druon, F., Balembois, F., Georges, P., Brun, A., Coujard, A., Hönninger, C., Salin, F., Aron, A., Mougél, F., Aka, G. and Vivien, D. (2000) 90-fs Pulse Generation from a Mode-Locked Diode-Pumped  $\text{Yb}^{3+}:\text{Ca}_4\text{GdO}(\text{BO}_3)_3$  Laser. *Optics Letters*, **25**, 423-425. <https://doi.org/10.1364/OL.25.000423>
- [7] Yubing, T., Huiming, T., Jiying, P. and HongYi, L. (2008) LD-Pumped Actively Q-Switched Yb:YAG Laser with an Acoustic-Optical Modulator. *Laser Physics*, **18**, 12-14. <https://doi.org/10.1134/S1054660X08010027>
- [8] Dong, L., Liu, F., Chen, J. and Liu, J. (2021) Highly Efficient Continuous-Wave and Passively Q-Switched Yb:YLuGdCOB Compact Lasers. *Optics Express*, **29**, 1838-1850. <https://doi.org/10.1364/OE.415451>
- [9] Liu, J., Dai, Q., Han, W., Wang, S., Yu, H. and Zhang, H. (2013) Actively Q-Switched Compact Yb:YSGG Laser Generating 3.1 mJ of Pulse Energy. *Optics Letters*, **38**, 3788-3791. <https://doi.org/10.1364/OL.38.003788>

- 
- [10] Liu, J., Chen, X., Han, W., Dai, Q., Wu, K. and Zhang, H. (2013) Generation of 2.6-mJ 400-kW Pulses from a Compact Yb:Gd<sub>3</sub>Ga<sub>5</sub>O<sub>12</sub> Laser Repetitively Q-Switched by an Acousto-Optic Modulator. *Optics Express*, **21**, 26605-26611. <https://doi.org/10.1364/OE.21.026605>
- [11] 刘宗华, 郑义. LD泵浦被动调 Q-Yb<sup>3+</sup>: YAG 微晶片激光器的优化设计[J]. 发光学报, 2013, 34(9): 1219-1226. <https://doi.org/10.3788/fgxb20133409.1219>
- [12] 卢意. 掺稀土离子硼酸镧氧钙晶体的生长和光谱特性[D]: [硕士学位论文]. 福州: 中国科学院福建物质结构研究所, 2013.
- [13] Zhong, D., Teng, B., Kong, W., Ji, S., Zhang, S., Li, J., Cao, L., Jing, H. and He, L. (2017) Growth, Structure, Spectroscopic and Continuous-Wave Laser Properties of a New Yb: GdYCOB Crystal. *Journal of Alloys and Compounds*, **692**, 413-419. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2016.09.021>
- [14] 刘芬芬, 曹枢旋, 刘均海. 掺 Yb 稀土钙氧硼酸盐晶体激光器研究进展[J]. 激光与光电子学进展, 2020, 57(7): 070004. <https://doi.org/10.3788/LOP57.070004>
- [15] Zhang, Y., Lin, Z., Hu, Z. and Wang, G. (2005) Growth and Spectroscopic Properties of Yb<sup>3+</sup>: Gd<sub>0.5</sub>Y<sub>0.5</sub>Ca<sub>4</sub>O(BO<sub>3</sub>)<sub>3</sub> Crystal. *Journal of Alloys and Compounds*, **390**, 194-196. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2004.07.058>
- [16] Yakshin, M.A., Prasad, C.R., Schwemmer, G., Banta, M. and Hwang, I.H. (2011) Compact, Diode-Pumped Yb:YAG Laser with Combination Acousto-Optic and Passive Q-Switch for LIDAR Applications. 2011 *Conference Showcases Lasers & Electro-Optics Innovation, From Breakthrough Scientific Research to State of the Art Commercial Applications*, Baltimore, 1-6 May 2011, Paper No. JWA46. [https://doi.org/10.1364/CLEO\\_AT.2011.JWA46](https://doi.org/10.1364/CLEO_AT.2011.JWA46)
- [17] Koechner, W. and Bass, M. (2003) *Solid-State Lasers: A Graduate Text*. Springer, New York. <https://doi.org/10.1007/b97423>