

半导体抽运 Nd:GdVO₄ 主动调 Q 被动锁模激光器

王旭葆 吴丹 王小磊 刘俊 米庆改

北京工业大学激光工程研究院, 北京 100124

摘要 报道了两种 Nd:GdVO₄ 主动调 Q 被动锁模激光器, 利用自锁模(KLM)和半导体可饱和吸收耦合输出镜(SOC)锁模两种不同的被动锁模方式, 分别与电光(EO)主动调 Q 元件相结合, 获得了稳定的调 Q 锁模脉冲。主动调 Q 自锁模脉冲调 Q 包络重复频率为 3 kHz, 包络脉宽约 1.2 μs, 包络下锁模脉冲重复频率为 159 MHz, 锁模脉宽约 963 ps。主动调 Q SOC 锁模脉冲调 Q 包络重复频率为 10 kHz, 包络脉宽约 300 ns, 包络下锁模脉冲重复频率为 159 MHz, 锁模脉宽约 491 ps。分别提出了自锁模等效快饱和吸收体损耗和 SOC 的非线性损耗表达式, 并给出了主动调 Q 自锁模激光器和主动调 Q SOC 锁模激光器的速率方程组。对比了两种主动调 Q 被动锁模激光器的输出特性, 结合速率方程, 提出了主动调 Q SOC 锁模受到两种锁模方式的叠加作用。

关键词 激光器; 调 Q 锁模激光; 电光调 Q; 自锁模; 半导体可饱和吸收耦合输出镜

中图分类号 TN248.1

文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP52.121403

Laser-Diode Pumped Nd:GdVO₄ Actively Q-Switched Passively Mode-Locked Laser

Wang Xubao Wu Dan Wang Xiaolei Liu Jun Mi Qinggai

Institute of Laser Engineering, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China

Abstract Two kinds of LD pumped Nd:GdVO₄ crystal actively Q-switched passively mode-locked lasers are reported. Using self-mode-locking and semiconductor saturable absorber output coupler mode-locking respectively combined with electro-optic actively Q-switch, stably Q-switched mode-locked laser is obtained. The actively Q-switched self-mode-locked laser has a Q-switched envelope repetition rate of 3 kHz and a pulse duration of about 1.2 μs, while the self-mode-locked pulses within the Q-switched envelope have a repetition rate of 159 MHz and an estimated pulse duration of 963 ps. The actively Q-switched semiconductor saturable absorber output coupler mode-locked laser has a Q-switched envelope repetition rate of 10 kHz and a pulse duration of about 300 ns, while the repetition rate of mode-locked pulses within the Q-switched envelope is 159 MHz and the pulse duration is about 491 ps. The mathematical expressions of the nonlinear loss of self-mode-locking equivalent fast saturable absorber and semiconductor saturable absorber output coupler are presented respectively. Using the fluctuation mechanism, the rate equations of electro-optic actively Q-switched self-mode-locked laser and electro-optic actively Q-switched semiconductor saturable absorber output coupler mode-locked laser are presented. Through the comparison of the output characteristics and the rate equations for these two Q-switched mode-locked lasers, the superposition of the two modulation effects is analysed.

Key words lasers; Q-switched mode-locked laser; electro-optic Q-switch; self-mode-locking; semiconductor saturable absorber output coupler

OCIS codes 140.3480; 140.3540; 140.3580; 140.4050

1 引言

被动锁模固体激光器常出现调 Q 锁模现象, 即一系列锁模脉冲包含在调 Q 包络下。然而调 Q 锁模脉冲

收稿日期: 2015-07-28; 收到修改稿日期: 2015-07-31; 网络出版日期: 2015-11-13

作者简介: 王旭葆(1972—), 男, 副研究员, 博士研究生, 从事激光技术及非线性光学方面研究。

E-mail: wangxubao@bjut.edu.cn

包络的振幅和重复频率是不稳定的,因此通常情况下希望避免这种情况的发生。但是与连续锁模脉冲相比,调 Q 锁模脉冲具有更高的峰值功率,与调 Q 脉冲相比,调 Q 锁模脉冲具有更窄的脉宽,因此获得稳定的调 Q 锁模脉冲具有十分重要的意义。为了利用调 Q 锁模脉冲高功率、窄脉宽的特点,同时避免其不稳定性,人们采用在被动锁模腔内加入主动调制元件的方法来获得稳定的调 Q 锁模脉冲^[1-3]。

自锁模又称克尔透镜锁模,是被动锁模的一种,作为一种常见的获得超短脉冲的方法,已广泛应用于获取飞秒激光脉冲^[4]。它利用腔内非线性介质的克尔效应,与腔内硬光阑或软光阑相结合,可等效为快饱和吸收体对腔内损耗进行调制,从而获得锁模脉冲。然而通常固体激光器自锁模不能自启动,需要采用敲击腔镜、插入可饱和吸收体或者插入主动调制元件的方式来启动^[5-6]。所述主动调 Q 自锁模Nd:GdVO₄激光器利用激光晶体的非线性效应以及抽运光聚焦在增益介质内形成的软光阑来获得自锁模脉冲,并且在自锁模腔内加入电光调 Q 元件对其进行调制,使调 Q 锁模包络重复频率可以主动控制,获得稳定的调 Q 锁模脉冲。

半导体可饱和吸收体被动锁模激光器具有结构简单、稳定性高和光束质量好等特点,因此得到了广泛应用。近年来,人们通常采用半导体可饱和吸收镜(SESAM)作为锁模元件^[7-8],折叠反射镜作为输出镜,获得两束输出方向不同、能量几乎相同的锁模光,然而应用时仅能使用其中一个方向的光,使得激光输出能量不能被充分利用。采用半导体可饱和吸收耦合输出镜(SOC)作为锁模元件,该元件将半导体可饱和吸收体与耦合输出镜结合在一起,作为锁模器件的同时可以兼作输出镜,简化了谐振腔结构,并且可以方便地实现激光单路输出。通过主动调 Q 和半导体可饱和吸收体被动锁模双损耗调制的方式,获得了比单被动调 Q 锁模更加稳定的调 Q 锁模脉冲。

当利用半导体可饱和吸收体锁模时,腔内同时存在的自锁模调制作用常常被忽略,半导体可饱和吸收体锁模与自锁模两种调制方式的叠加作用还未见报道。通过实验对比主动调 Q 自锁模和主动调 Q SOC锁模的激光输出特性,并通过数学方法分析自锁模和SOC锁模两种调制的叠加作用。

2 主动调 Q 自锁模激光器

主动调 Q 自锁模实验装置如图1所示。采用LD端面抽运Nd:GdVO₄晶体得到1064 nm近红外激光,抽运源为北京凯普林光电生产的光纤耦合输出的半导体激光系统,中心波长为808 nm,输出光纤芯径为400 μm ,数值孔径为0.22,标称最高输出功率为30 W。抽运光通过耦合透镜组聚焦到Nd:GdVO₄晶体上,Nd³⁺掺杂原子数分数为0.5%,尺寸为3 mm \times 3 mm \times 10 mm,沿 a 轴方向切割,晶体两端镀对1064 nm和808 nm的增透膜。晶体用铝箔纸包裹,放在紫铜块内,通过外部液冷循环系统进行传导冷却。谐振腔为Z型4镜折叠腔,M1为曲率半径200 mm的平凹镜,镀有对808 nm增透膜,凹面镀有对1064 nm高反膜;M2、M3分别为曲率半径300 mm和200 mm的平凹镜,镀有1064 nm高反膜。OC作为输出镜,在1064 nm的透射率为10%。主动调 Q 元件为BBO电光 Q 开关,BBO晶体长度为10 mm, Q 开关到M3的距离为120 mm。M1到M2、M2到M3、M3到M4之间的距离分别为290、480和170 mm,激光谐振腔总长为940 mm。利用 $ABCD$ 矩阵数值模拟了腔内振荡光斑半径,使激光晶体和电光 Q 开关分别位于两个束腰位置,光斑半径分别为140 μm 和155 μm 。腔内光斑半径可通过凹面反射镜的曲率半径和腔长进行控制。

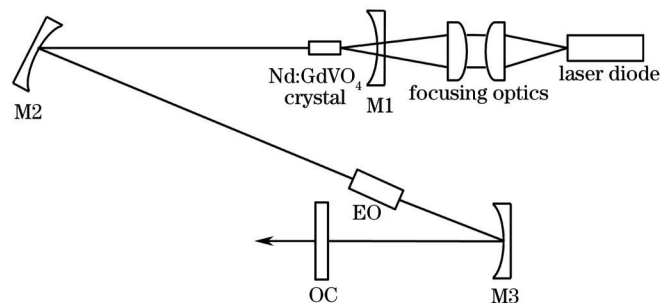


图1 主动调 Q 自锁模Nd:GdVO₄激光器实验示意图

Fig.1 Schematic of actively Q -switched self-mode-locked Nd:GdVO₄ laser

当抽运光功率为18 W时,调节腔镜得到主动调 Q 自锁模脉冲如图2所示,在一个调 Q 脉冲包络下包含了一系列的锁模脉冲,包络脉宽约为1.2 μs 。展开的锁模脉冲序列如图3所示。加入 Q 开关后调 Q 脉冲重

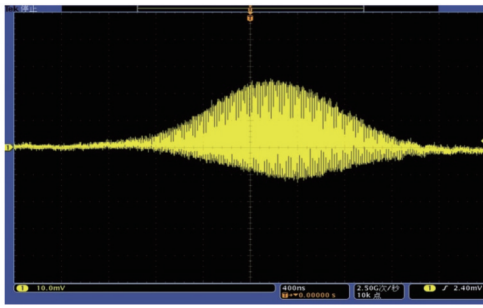


图2 主动调Q自锁模脉冲包络(400 ns/div)

Fig.2 Oscilloscope traces of typical actively Q-switched self-mode-locked laser pulse envelope (400 ns/div)

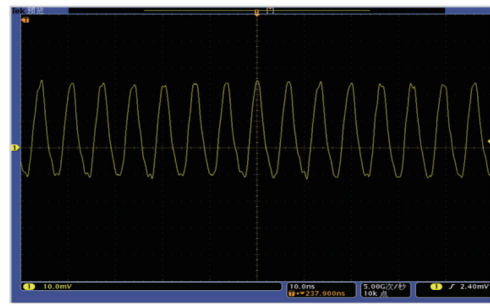


图3 调Q包络内自锁模脉冲展开序列(10 ns/div)

Fig.3 Expanded oscilloscope traces of train of mode-locked pulses (10 ns/div)

复频率由主动调Q元件控制,调Q重复频率为3 kHz,调Q锁模调制深度为100%。

由图3可以看出,锁模脉冲的间隔为6.3 ns,与光子在腔内往返时间一致,锁模脉冲重复频率为159 MHz。由示波器可以读出单个锁模脉冲的上升时间 t_m 为1.31 ns,实验中探测脉冲使用的快速光电二极管上升时间 t_b 为1 ns,泰克示波器(Tektronix DPO4104B 1 GHz, 5 Gs/s)的上升时间 t_o 为350 ps。根据相关参数和实验测量值,由 $t_m = \sqrt{t_{re}^2 + t_b^2 + t_o^2}$ 可以估算出锁模脉冲的实际上升时间 t_m 为770 ps,而锁模脉冲的实际宽度可估算为上升时间的1.25倍,即963 ps。

腔内未加入电光调Q元件时,锁模现象非常不稳定,而加入电光Q开关后,调Q锁模现象明显,调Q包络下为清晰的锁模脉冲,稳定性较好。分析原因认为一方面腔内加入主动调制元件可以起到启动自锁模的效果,另一方面电光晶体两通光面的标准具效应起到了选模和加强自锁模的作用^[9]。自锁模现象的出现,是由于增益介质的克尔自聚焦效应,其内部功率密度分布不均匀,功率密度高于增益介质饱和吸收强度的部分会出现吸收饱和。处于吸收饱和状态的增益介质对光的损耗是与光强有关的函数 $\alpha = \alpha_0 - \gamma|E|^2$,当外界扰动引发的脉冲经过其中时,其前沿后沿不断损耗而中部得到放大,由此对脉宽进行了压缩。克尔非线性强度表达式为 $\delta = [1/\omega(d\omega/dp)]_{p=0}$,只有当 $\delta < 0$ 时才有自聚焦现象,并且 δ 的绝对值越大,自锁模越容易启动。

3 主动调Q SOC锁模激光器

主动调Q SOC被动锁模实验装置如图4所示,腔型结构与主动调Q自锁模实验相同,主动调Q元件仍采用BBO电光调Q,将输出镜OC更换为半导体可饱和吸收耦合输出镜SOC,其作为锁模元件的同时可以兼作输出镜,使激光腔结构紧凑,又可以方便地实现激光单路输出。所用SOC的饱和吸收体厚度为625 μm ,吸收区下方的布拉格反射层为部分反射,其反射率与膜层对数有关,GaAs衬底底部镀有1064 nm增透膜。SOC由德国BATOP公司提供,固定于直径为25.4 mm的铜块上,其具体参数为:饱和吸收率12%、透射率11%、非饱和损耗9%、调制深度14%、饱和通量 $20 \mu\text{J}/\text{cm}^2$ 、弛豫时间常数为50 ps。通过ABCD矩阵模拟计算,SOC处振荡光斑半径约145 μm ,处于腔内束腰位置。

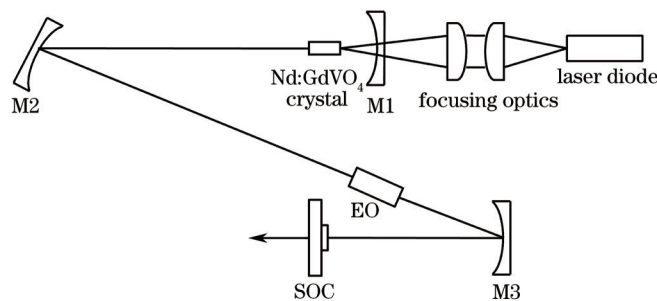
图4 主动调Q SOC锁模Nd:GdVO₄激光实验示意图

Fig.4 Schematic of actively Q-switched SOC mode-locked Nd:GdVO₄ laser

主动调Q SOC被动锁模脉冲包络如图5所示,包络脉宽约300 ns,调制深度为100%。图6为调Q锁模包络的脉冲序列,调Q重复频率为10 kHz。受电光调Q元件控制,其脉冲稳定性和重复性较好。

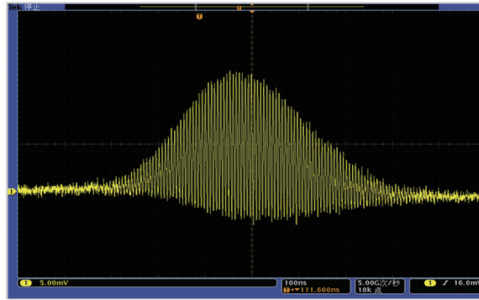


图5 主动调Q SOC被动锁模脉冲包络(100 ns/div)

Fig.5 Oscilloscope traces of typical actively Q-switched SOC mode-locked laser pulse envelope (100 ns/div)

图7为调Q包络展开后的锁模脉冲序列,锁模脉冲的间隔为6.3 ns,与光子在腔内往返时间一致,锁模脉冲重复频率为159 MHz。可以看出,示波器测得的锁模脉冲上升时间 t_m 约1.13 ns,光电探测器上升时间 t_b 为1 ns,示波器上升时间 t_o 为350 ps。根据相关参数和实验测量值,由 $t_m = \sqrt{t_{re}^2 + t_b^2 + t_o^2}$ 可以估算出锁模脉冲的实际上升时间 t_{re} 为393 ps,而锁模脉冲的实际宽度约为491 ps。

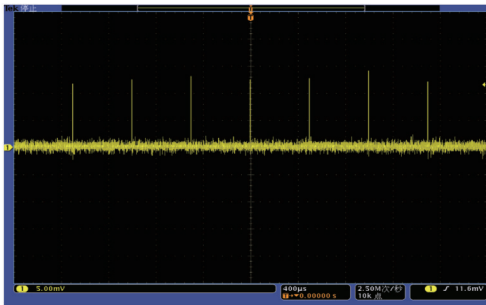


图6 主动调Q SOC被动锁模调Q包络序列(400 μs/div)

Fig.6 Oscilloscope traces of train of Q-switched pulses (400 μs/div)

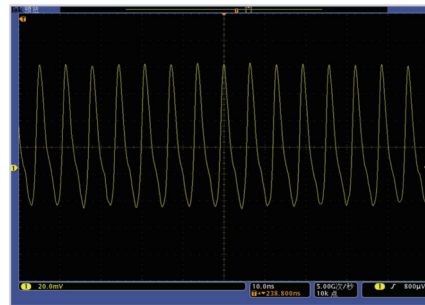


图7 主动调Q SOC被动锁模包络内脉冲展开序列(10 ns/div)

Fig.7 Expanded oscilloscope traces of a train of mode-locked pulses (10 ns/div)

实验中腔内未加入Q开关时,只采用SOC锁模容易产生不稳定的被动调Q锁模状态,调Q包络重复频率会随抽运功率变化而改变,其脉冲重复性和稳定性较差。而通过腔内加入主动调Q元件对锁模脉冲进行调制,获得的主动调Q被动锁模脉冲与单被动调Q锁模相比稳定性更好^[12-13],且调Q重复频率可人为调整。

对比Q开关打开前后的调Q锁模脉冲发现,与SOC单被动调Q锁模脉冲(E0关闭)相比,腔内增加主动Q调制后,调Q包络脉宽从480 ns减小到300 ns,且脉冲稳定性明显改善。当抽运功率为14 W时,单被动调Q锁模脉冲的重复频率为14.7 kHz,平均输出功率为1.05 W,可得调Q锁模包络的脉冲能量约为71.4 μJ,根据锁模脉冲腔内往返时间,可估算出单个锁模脉冲平均脉冲能量约为0.94 μJ,锁模脉冲峰值功率为1.2 kW。而主动调Q SOC锁模脉冲(E0打开)包络重复频率由EO主动控制为1 kHz,同样抽运功率时平均输出功率为0.96 W,其包络的脉冲能量为960 μJ,单个锁模脉冲平均脉冲能量约为20.2 μJ,是单被动调Q锁模脉冲能量的21倍,锁模脉冲峰值功率41.1 kW,约为单被动调Q锁模脉冲的34倍。实验证明,与SOC单被动调Q锁模相比,主动调制元件的加入能够有效压缩脉宽,增加脉冲稳定性并且极大地提高了单脉冲能量和峰值功率。

4 两种主动调Q被动锁模实验结果对比

激光平均输出功率随抽运功率变化的曲线如图8所示,3条曲线分别为连续激光输出、电光主动调Q自锁模脉冲输出、电光主动调Q SOC被动锁模脉冲输出。连续光输出和主动调Q自锁模输出采用透射率为10%的输出镜,主动调Q SOC被动锁模采用透射率为11%的SOC。可以看出,连续光出光阈值抽运功率约4 W,最大输出功率为5.22 W;主动调Q自锁模激光器出光阈值约为4 W,在抽运功率为30 W时可以获得最大平均输出功率4.69 W;主动调Q SOC锁模出光阈值约为6 W,当抽运功率为30 W时可获得最大平均输出功率3.04 W。增大抽运功率的过程中,输出功率未见饱和现象,但随着抽运功率接近最大,激光输出效率均有所下降,认为是由于晶体热透镜效应引起的衍射损耗造成的。由于SOC的输出透射率与输出镜OC的透射率相当,输出镜换成被动锁模元件SOC后激光器出光阈值略有增大,整体输出功率偏低,说明SOC额外引

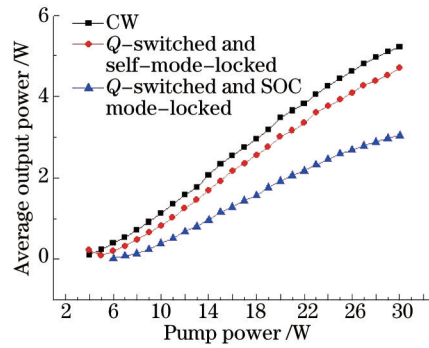


图8 输出功率随抽运功率的变化曲线

Fig.8 Average output power versus pump power

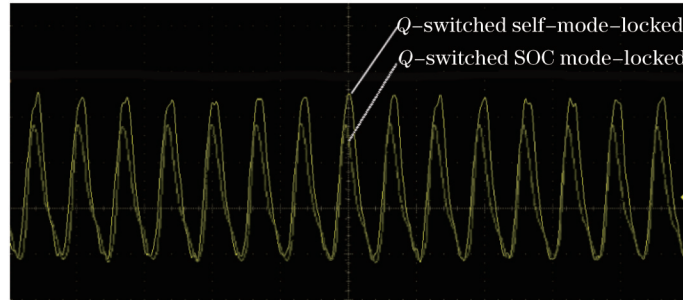


图9 两种主动调Q被动锁模脉冲的对比(10 ns/div)

Fig.9 Comparison of two actively Q-switched passively mode-locked pulses (10 ns/div)

入了较大的饱和吸收及非饱和损耗。

由图9可以看出,与主动调Q自锁模相比,主动调Q SOC锁模的脉冲宽度较小,脉宽从963 ps减小到491 ps,压缩量接近一半。通过图2和图5的对比,发现调Q锁模包络脉宽由主动调Q自锁模的1.2 μs减小到了主动调Q SOC锁模的300 ns,调Q锁模脉宽被极大地压缩,压缩量达75%。通过对比分析,认为主动调Q SOC锁模谐振腔内有两种被动锁模机制同时对脉冲进行调制,SOC在自锁模的基础上进一步压缩了脉宽^[18]。因此,主动调Q SOC锁模脉冲的锁模机制可以考虑为自锁模和SOC锁模这两种被动锁模调制的叠加。

5 损耗表达式及速率方程

自锁模是基于腔内克尔介质的自聚焦效应产生的,克尔介质的折射率随光子密度线性变化。克尔介质和腔内光阑共同作用,可以等效为一个快饱和吸收体。自锁模的调制损耗可以表示为^[10,14]

$$\delta_{\text{self}} = q_0 \frac{\phi_{\text{sat}}}{\phi_k} \left[1 - \exp\left(-\frac{\phi_k}{\phi_{\text{sat}}}\right) \right], \quad (1)$$

式中 q_0 是等效快饱和吸收体的非线性损耗系数, ϕ_k 是 k 次往返后的脉冲通量, ϕ_{sat} 是饱和通量。

SOC的非线性调制损耗包含两个部分:吸收率 A 和透射率 T 。吸收率 A 与脉冲通量 ϕ_k 有关,即

$$A = A_0 \exp\left(-\frac{\phi_k}{\phi_{\text{sat}}}\right), \quad (2)$$

式中 A_0 是可饱和吸收体的小信号吸收(饱和吸收)。

透射率 T 包括小信号透射率 T_0 和随脉冲通量 ϕ_k 变化的非线性反射率

$$T = T_0 + \Delta R \frac{\phi_{\text{sat}}}{\phi_k}, \quad (3)$$

式中 ΔR 是SOC的调制深度。

由(2)式和(3)式可得SOC总的非线性调制损耗为

$$\delta_{\text{soc}} = A_0 \exp\left(-\frac{\phi_k}{\phi_{\text{sat}}}\right) + \Delta R \frac{\phi_{\text{sat}}}{\phi_k}. \quad (4)$$

利用光强起伏机制描述电光主动调Q自锁模激光器动力学过程,考虑激光介质克尔效应和电光Q开关

对锁模的影响,电光主动调Q自锁模激光器运转的速率方程可以表示为^[13,15]

$$\Phi_k = \Phi_{k-1} \exp \left\{ \frac{2}{\pi \omega_1^2} \int_0^\infty [2\sigma n(r, t_k) l \frac{\omega_1^2}{\omega_c^2} \exp\left(-\frac{2r^2}{\omega_c^2}\right) - \delta_{\text{self}} \frac{\omega_1^2}{\omega_a^2} \exp\left(-\frac{2r^2}{\omega_a^2}\right) - \delta_E(t) \frac{\omega_1^2}{\omega_E^2} \exp\left(-\frac{2r^2}{\omega_E^2}\right) - \left[L + \ln\left(\frac{1}{R}\right) \right] \exp\left(-\frac{2r^2}{\omega_1^2}\right) 2\pi r dr \right\}, \quad (5)$$

$$n(r, t_k) = \exp\left(-\frac{t_k}{\tau_C}\right) \prod_{m=0}^{k-1} \exp\left[-\frac{\omega_1^2}{\omega_c^2} \exp\left(-\frac{2r^2}{\omega_c^2}\right) \varphi_m\right] \times \left\{ R_{\text{in}}(r) \exp\left(\frac{t_k}{\tau_C}\right) \int_0^{t_k} \prod_{m=0}^{k-1} \exp\left[-\frac{\omega_1^2}{\omega_c^2} \exp\left(-\frac{2r^2}{\omega_c^2}\right) \varphi_m\right] dt + n_i \exp\left(-\frac{2r^2}{\omega_p^2}\right) \right\}, \quad (6)$$

式中 σ 是增益介质的受激发射截面, $n(r, t_k)$ 是腔内光子往返 k 次时的增益介质反转粒子数密度, l 是增益介质的长度, L 为本征损耗, R 为输出耦合镜在1064 nm的反射率, $R_{\text{in}}(r)$ 为抽运效率, ω_1 为TEM₀₀模腔内模式半径的平均值, ω_c 为TEM₀₀模在激活介质处的半径, ω_a 为腔内软光阑的等效半径, ω_p 为抽运光斑半径的平均值, α 为增益介质的吸收系数, n_i 为增益介质处起始反转粒子数密度, $\delta_E(t)$ 是 k 次往返后电光Q开关的损耗函数。

考虑半导体可饱和吸收体引起的饱和损耗 δ_{soc} ,得到描述电光主动调Q半导体可饱和吸收体被动锁模的激光器运转速率方程组^[15-16]

$$\Phi_k = \Phi_{k-1} \exp \left\{ \frac{2}{\pi \omega_1^2} \int_0^\infty [2\sigma n(r, t_k) l \frac{\omega_1^2}{\omega_c^2} \exp\left(-\frac{2r^2}{\omega_c^2}\right) - 2\sigma^+ n^+(r, t_k) l_g \frac{\omega_1^2}{\omega_g^2} \exp\left(-\frac{2r^2}{\omega_g^2}\right) - 2\sigma^0 [n_0 - n^+(r, t_k)] l_g \frac{\omega_1^2}{\omega_g^2} \exp\left(-\frac{2r^2}{\omega_g^2}\right) - \delta_{\text{soc}} \frac{\omega_1^4}{\omega_g^4} \exp\left(-\frac{4r^2}{\omega_g^2}\right) - \delta_{\text{self}} \frac{\omega_1^2}{\omega_a^2} \exp\left(-\frac{2r^2}{\omega_a^2}\right) - \delta_E(t) \frac{\omega_1^2}{\omega_E^2} \exp\left(-\frac{2r^2}{\omega_E^2}\right) - \left[L + \ln\left(\frac{1}{R}\right) \right] \exp\left(-\frac{2r^2}{\omega_1^2}\right) 2\pi r dr \right\}, \quad (7)$$

$$n(r, t_k) = \exp\left(-\frac{t_k}{\tau_C}\right) \prod_{m=0}^{k-1} \exp\left[-\frac{\omega_1^2}{\omega_c^2} \exp\left(-\frac{2r^2}{\omega_c^2}\right) \varphi_m\right] \times \left\{ R_{\text{in}}(r) \exp\left(\frac{t_k}{\tau_C}\right) \int_0^{t_k} \prod_{m=0}^{k-1} \exp\left[-\frac{\omega_1^2}{\omega_c^2} \exp\left(-\frac{2r^2}{\omega_c^2}\right) \varphi_m\right] dt + n_i \exp\left(-\frac{2r^2}{\omega_p^2}\right) \right\}, \quad (8)$$

$$n^+(r, t_k) = \left\{ \prod_{m=0}^{k-1} \exp\left[-\frac{\omega_1^2}{\omega_g^2} \exp\left(-\frac{2r^2}{\omega_g^2}\right) \varphi_m\right] \right\}^\alpha \times \left\{ \int_0^{t_k} \prod_{m=0}^{k-1} \exp\left[-\frac{\omega_1^2}{\omega_g^2} \exp\left(-\frac{2r^2}{\omega_g^2}\right) \varphi_m\right] dt \right\}^\alpha \times \left\{ \frac{\sigma^0 n_0}{2\sigma \tau_p} \times \sum_{m=0}^{k-1} \varphi_m \frac{\omega_1^2}{\omega_g^2} \exp\left(-\frac{2r^2}{\omega_g^2}\right) \text{sech}^2\left(\frac{t - mt_r}{\tau_p}\right) dt + n_0 \right\}, \quad (9)$$

式中 $n^+(r, t_k)$ 是腔内光子往返 k 次时半导体可饱和吸收体基态粒子数密度, $n^+(r, t)$ 为带正电的EL2⁺能级上的粒子数密度, ω_g 为基横模在半导体可饱和吸收体处的半径, σ^0 和 σ^+ 分别为半导体可饱和吸收体EL2⁰能级的吸收截面和半导体可饱和吸收体EL2⁺能级的吸收截面, n_0 为半导体可饱和吸收体EL2深陷能级上的总粒子数密度, $\alpha = (\sigma^+ + \sigma^0)/\sigma$, l_g 为饱和吸收体厚度, $t_r = 2L_p/c$ 为光子在腔内的往返时间。

由于主动调Q SOC锁模加入了SOC作为被动锁模元件,相对于主动调Q自锁模,腔内增加了一种调制元件,对调Q锁模脉冲起到了进一步的压缩作用。与主动调Q自锁模相比,主动调Q SOC锁模的包络宽度及包络下的锁模脉宽较小。对比两种调Q锁模的速率方程(5)式和(7)式可以看出,两式中 $2\sigma n(r, t_k) l \frac{\omega_1^2}{\omega_c^2} \exp\left(-\frac{2r^2}{\omega_c^2}\right)$, $\delta_E(t) \frac{\omega_1^2}{\omega_E^2} \exp\left(-\frac{2r^2}{\omega_E^2}\right)$, $\left[L + \ln\left(\frac{1}{R}\right) \right] \exp\left(-\frac{2r^2}{\omega_1^2}\right)$ 项均相同,表征了LD抽运增益介质的腔内增益、电光Q开关损耗以及本征损耗等。二者区别在于(5)式中 $\delta_{\text{self}} \frac{\omega_1^2}{\omega_a^2} \exp\left(-\frac{2r^2}{\omega_a^2}\right)$ 项表征了自锁模等效快饱和吸收体损耗。

而(7)式中 $\delta_{\text{soc}} \frac{\omega_1^4}{\omega_g^4} \exp\left(-\frac{4r^2}{\omega_g^2}\right)$ 项表征了半导体可饱和吸收体的饱和吸收及非饱和损耗,与主动调Q自锁模情况下输出镜引入的线性损耗相比,在主动调Q SOC锁模的状态下引入了表征半导体可饱和吸收体非线性吸收和透过的损耗项,对调Q锁模脉冲起到了进一步的调制作用。(7)式同时包含了表征自锁模的损耗项,表示在主动调Q SOC锁模的状态下同时考虑自锁模调制作用。

表1和表2分别为主动调Q自锁模和主动调Q SOC锁模Nd:GdVO₄激光器参数以及根据ABCD矩阵计算出的谐振腔参数。根据表1、表2给出的参数,由(1)~(9)式可计算出光子在腔内往返 k 次时的光子数密度 Φ_k 。

表1 主动调Q自锁模Nd:GdVO₄激光器参数Table 1 Parameters of actively Q-switched self-mode-locked Nd:GdVO₄ laser

Parameters	Values	Parameters	Values
σ	$1.2 \times 10^{-19} \text{ cm}^2$	R	0.9
τ_G	100 μs	ω_p	295 μm
L_p	0.94 cm	ω_i	330 μm
L	0.08	ω_G	140 μm
l	1 cm	ω_E	155 μm

表2 主动调Q SOC被动锁模Nd:GdVO₄激光器参数Table 2 Parameters of actively Q-switched SOC mode-locked Nd:GdVO₄ laser

Parameters	Values	Parameters	Values
τ_G	100 μs	R	0.77
t_r	6.3 ns	ω_p	295 μm
L_p	0.94 cm	ω_i	330 μm
L	0.08	ω_G	140 μm
l	1 cm	ω_E	155 μm
l_g	625 μm	ω_g	145 μm

考虑激光在谐振腔内的双向传输,腔内光子往返 k 次时横截面上的锁模激光功率为^[17]

$$P(r,t) = \frac{cAhv}{2} \Phi(r,t) = \frac{Ahv}{4\sigma\tau_p} \exp\left(\frac{-2r^2}{\omega_i^2}\right) \sum_{k=0}^{\infty} \Phi_k \operatorname{sech}^2\left(\frac{t-t_k}{\tau_p}\right), \quad (10)$$

式中 $A = \pi\omega_i^2/2$ 为振荡光平均光束面积, τ_p 与锁模脉宽的估计值 τ 有关, $\tau = 1.76\tau_p$ 。

在谐振腔截面上对(10)式积分,得出调Q锁模激光平均输出功率

$$P(t) = \frac{1}{A} \int_0^{\infty} P(r,t) 2\pi r dr = \frac{Ahv}{4\sigma\tau_p} \sum_{k=0}^{\infty} \Phi_k \operatorname{sech}^2\left(\frac{t-t_k}{\tau_p}\right), \quad (11)$$

将(11)式从零到无穷对时间积分,可求出整个调Q包络的脉冲能量

$$E = \int_0^{\infty} P(t) dt = \frac{Ahv}{4\sigma} \sum_{k=0}^{\infty} \Phi_k. \quad (12)$$

将 Φ_k 与 k 的关系带入(11)式和(12)式可得调Q锁模激光的平均输出功率和调Q包络的脉冲能量。

6 结 论

将电光Q开关分别与自锁模和半导体可饱和吸收耦合输出镜锁模相结合,实现了两种主动调Q被动锁模脉冲输出。获得了最大平均功率为4.69 W的主动调Q自锁模激光输出,调Q重复频率为3 kHz,包络脉宽约1.2 μs ,包络下锁模脉冲重复频率为159 MHz,锁模脉宽为963 ps。以及单路输出的最大平均功率为3.04 W的主动调Q SOC锁模脉冲输出,调Q重复频率为10 kHz,包络脉宽约300 ns,包络下锁模脉冲重复频率为159 MHz,锁模脉宽约491 ps。通过对比分析两种调Q锁模激光器的输出特性,认为与主动调Q自锁模相比,主动调Q SOC锁模由于SOC带来的损耗,其平均输出功率较低,但脉冲宽度较窄,前者调Q包络宽度为1.2 μs ,而后者仅为300 ns,脉宽压缩了75%,包络下锁模脉宽也由963 ps减小到491 ps,压缩了近一半。认为腔内额外加入被动调制元件SOC在主动调Q自锁模的基础上起到了进一步的调制作用,从而压缩了脉宽。分别提出了自锁模和SOC锁模的非线性调制损耗表达式,并分别给出了电光主动调Q自锁模和电光主动调Q SOC锁模激光器的速率方程,用数学形式表达了主动调Q SOC锁模脉冲同时受到两种被动锁模调制的叠加作用。

参 考 文 献

- 1 B C Johnson, W D Fountain. An active/passive mode-locked laser oscillator[C], IEEE Electron Devices Meeting, 1974, 322-

- 325.
- 2 C Theobald, M Weitz, R Knappe. Stable Q -switch mode-locking of Nd:YVO₄ lasers with a semiconductor saturable absorber [J]. Applied Physics B, 2008, 92(1): 1-3.
- 3 S Z Zhao, G Li, D Li. Dual-loss-modulated Q -switched and mode-locked Nd:GdVO₄ laser with AO and Cr³⁺:YAG saturable absorber[J]. Laser Physics Letters, 2010, 7(1): 29-33.
- 4 D E Spence, P N Kean, W Sibbett. 60-fs pulse generation from a self-mode-locked Ti:sapphire laser[J]. Opt Lett, 1991, 16(1): 42-44.
- 5 P F Curley, A I Ferguson. Actively mode-locked Ti:sapphire laser producing transform-limited pulses of 150-fs duration [J]. Opt Lett, 1991, 16(13): 1016-1018.
- 6 Zhang Ning, Xing Qirong, Han Xiuqin, *et al.*. Study on self-starting of self-mode-locked solid state laser[J]. Chinese J Lasers, 2001, 28(4): 293-297.
张宁, 邢岐荣, 韩秀芹, 等. 自锁模固体激光器自启动理论研究[J]. 中国激光, 2001, 28(4): 293-297.
- 7 Cai Zhiqiang, Wang Peng, Wen Wuqi, *et al.*. LD end-pumped all-solid-state picosecond passively mode-locking lasers[J]. Chinese J Lasers, 2007, 34(7): 901-907.
蔡志强, 王鹏, 温武麒, 等. 端面抽运全固态皮秒被动锁模激光器[J]. 中国激光, 2007, 34(7): 901-907.
- 8 Teng Songhan, Fan Zhongwei, Niu Gang, *et al.*. 888 nm LD pumped Nd:YVO₄ passively mode-locked picosecond oscillator [J]. Journal of Applied Optics, 2013, 34(5): 870-873.
滕崧寒, 樊仲维, 牛岗, 等. 888 nm LD 抽运 Nd:YVO₄ 被动锁模皮秒振荡器[J]. 应用光学, 2013, 34(5): 870-873.
- 9 Tian Fei, Luo Jia, Hu Daping, *et al.*. Experimental study on eliminating self-mode locking of Nd:YAG laser[J]. Chinese J Lasers, 2012, 39(5): 0502007.
田飞, 罗佳, 胡大平, 等. 抑制 Nd:YAG 激光器自锁模的实验研究[J]. 中国激光, 2012, 39(5): 0502007.
- 10 M Li, S Zhao, K Yang. Theoretical and experimental studies on the self- Q -switched and mode-locked Nd:GdVO₄/KTP green laser [J]. Applied Physics B, 2007, 88(4): 531-537.
- 11 T Li, S Z Zhao, Z Zhuo. Dual-loss-modulated Q -switched and mode-locked YVO₄/Nd:YVO₄/KTP green laser with EO and Cr³⁺:YAG saturable absorber[J]. Opt Express, 2010, 18(10): 10315-10322.
- 12 J H Lin, K H Lin, H H Hsu. Q -switched and mode-locked pulses generation in Nd:GdVO₄ laser with dual loss-modulation mechanism[J]. Laser Physics Letters, 2008, 5(4): 276-280.
- 13 S Zhao, G Li D Li. Dual-loss-modulated Q -switched and mode-locked Nd:GdVO₄ laser with AO and Cr³⁺:YAG saturable absorber[J]. Laser Physics Letters, 2010, 7(1): 29-33.
- 14 R Paschotta, U Keller. Passive mode locking with slow saturable absorbers [J]. Applied Physics B, 2001, 73(7): 653-662.
- 15 K J Yang, S Z Zhao, G Q Li. Diode-pumped passively Q -switched mode-locked c-cut Nd:GdVO₄ laser with a GaAs coupler [J]. Optical Materials, 2007, 29(9): 1153-1158.
- 16 Zhang Haikun, Xi Daoming, Wang Jing, *et al.*. Control of the pulse duration in a diode-pumped doubly Q -switched Nd:GdVO₄ laser[J]. Acta Optica Sinica, 2010, 30(3): 797-801.
张海鸥, 席道明, 王静, 等. 双调 Q Nd:GdVO₄ 激光器的脉宽控制[J]. 光学学报, 2010, 30(3): 797-801.
- 17 Y F Chen, J L Lee, H D Hsieh. Analysis of passively Q -switched lasers with simultaneous mode locking[J]. IEEE J Quantum Electron, 2002, 38(3): 312-317.
- 18 Han Kezhen, Hou Jia, Yang Kejian, *et al.*. Analysis of pulse dynamics for passive mode locking with dual semiconductor saturable absorber mirrors[J]. Chinese J Lasers, 2013, 40(6): 0602002.
韩克祯, 侯佳, 杨克建, 等. 双饱和吸收镜被动锁模脉冲动力学过程分析[J]. 中国激光, 2013, 40(6): 0602002.

栏目编辑: 宋梅梅