

文章编号: 0253-2239(2010)04-1046-05

全固态 SESAM 锁模激光器的锁模特性研究

班文政¹ 王 丽¹ 范 锋^{1,2} 李 光¹ 门艳彬¹ 张新平¹

(¹ 北京工业大学应用数理学院, 北京 100124; ² 河北工程大学理学院, 河北 邯郸 056038)

摘要 对全固态 SESAM 锁模激光器的锁模特性进行了理论研究。基于抑制调 Q 锁模理论模型和结合全固态 LD 抽运的 Yb:YAG 激光器等,数值模拟分析了在不同调制深度、非饱和损耗、饱和通量和输出镜透射比等参数下的 SESAM 的反射率,以及抑制调 Q 锁模所需要的临界抽运功率。以同样的脉冲通量入射到 SESAM 上,SESAM 的调制深度、非饱和损耗和饱和通量与它的反射率都呈一个反比关系。调制深度、饱和通量、输出镜透射比、激光光腰和腔长的减小都会降低临界抽运功率,使其更容易抑制调 Q 锁模。在晶体长度为 1.9 mm 时,可获得最小临界抽运功率。

关键词 激光器; 抑制调 Q 锁模; SESAM 的反射率; 临界抽运功率; 调制深度

中图分类号 TN248.1 文献标识码 A doi: 10.3788/AOS20103004.1046

Research on Mode Locking Characteristics of All-Solid-State Mode-Locked Laser with Semiconductor Saturable Absorber Mirror

Ban Wenzheng¹ Wang Li¹ Fan Feng^{1,2} Li Guang¹ Men Yanbin¹ Zhang Xinping¹

(¹ College of Applied Sciences, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China)
(² School of Science, Hebei Engineer University, Handan, Hebei 056038, China)

Abstract Theoretical research on the mode locking characteristics of mode-locked all-solid-state laser with semiconductor saturable absorber mirror has been carried out. According to theoretical model of suppressing Q-switched mode locking and combining with LD-pumped all-solid-state Yb:YAG laser, the reflectivity of SESAM and the critical pump power of suppressing Q-switched mode locking have been studied by numerical simulated calculations under the conditions of different modulation depths, non-saturable losses, saturation fluences, transmittance of the output mirror and other parameters. When the incident pulse fluences on the SESAM are the same, modulation depth, non-saturable loss and saturation fluence have inverse relations with SESAM reflectivity. With the decrease of modulation depth, saturation fluence, transmittance of the output mirror, beam waist and cavity length, the critical pump power also decreases, and suppressing Q-switched mode locking becomes easier. When the crystal length is 1.9 mm, the minimum critical pump power can be obtained.

Key words lasers; suppressing Q-switched mode locking; reflectivity of SESAM; critical pump power; modulation depth

1 引 言

1992 年,半导体可饱和吸收镜 (SESAM) 由 U. Keller 等^[1]研制成功并应用于锁模激光器。此后,它在飞秒和皮秒激光器中得到了广泛应用,与主动锁模和染料被动锁模激光器相比,SESAM 被动锁模激光

器具有结构简单紧凑、稳定可靠和光束质量好等特点^[2]。它在光纤通讯、材料加工、光谱学、医疗诊断以及非线性频率变换等方面具有很大的应用价值和前景^[3]。

在 SESAM 锁模中,为了获得高质量的稳定连

收稿日期: 2009-08-02; 收到修改稿日期: 2009-10-09

基金项目: 高等学校博士学科点专项科研基金(200800050013)资助课题。

作者简介: 班文政(1983—),男,硕士研究生,主要从事激光超短脉冲与激光可调谐技术方面的研究。

E-mail: banwenzheng@emails.bjut.edu.cn

导师简介: 王 丽(1958—),女,教授,博士生导师,主要从事光学频率变换及其激光调谐技术、强光与物质相互作用的非线性光学和脉冲激光沉积氧化物半导体材料的物理性质等方面的研究。E-mail: Lwang.1@bjut.edu.cn (通信联系人)

续锁模,其中一个很关键的问题是如何更好的抑制调 Q 锁模。C. Hönninger 等^[4]曾对腔内脉冲参数与抑制调 Q 锁模的关系做了理论研究,但由于腔内脉冲参数是无法直接控制和确定的,因此并不能直接地指导实验。而同时,由于腔内脉冲参数和抽运有一定关系,那么有必要对抽运功率和调 Q 锁模的关系进行研究讨论,以达到更好地指导实验的目的。另外,对不同 SESAM 参数下的反射率曲线进行数值模拟和分析,也会对实验中如何提高锁模质量有很好的指导作用。因此本文以此两点为主要内容,对全固态 SESAM 锁模激光器的锁模特性做了一定的理论研究。

2 SESAM 的反射率曲线

由于半导体可饱和吸收镜具有非线性吸收特性,当入射到 SESAM 上的脉冲通量变化时,使得 SESAM 的反射率呈现一种非线性变化。对于调制深度 ΔR 小于 10% 的饱和吸收体,SESAM 的反射率随入射的脉冲通量而变化的公式可写成如下^[4]:

$$R(F_{p,A}) = (1 - \Delta R_{ns}) \cdot \left\{ 1 - \Delta R \frac{F_{sat,A}}{F_{p,A}} \left[1 - \exp\left(-\frac{F_{p,A}}{F_{sat,A}}\right) \right] \right\}, \quad (1)$$

式中 $R(F_{p,A})$ 是 SESAM 的反射率, ΔR_{ns} 是非饱和损耗, $F_{sat,A}$ 是饱和通量, $F_{sat,A} = h\nu / (2\sigma_A)$, $h\nu$ 是光子能量, σ_A 是 SESAM 的吸收截面面积。 $F_{p,A}$ 是入射到 SESAM 上的脉冲通量。从式中可以看出, $R(F_{p,A})$ 与 $F_{p,A}$ 的关系同时受调制深度、非饱和损耗以及饱和通量影响。依据(1)式,分别模拟了在不同调制深度、非饱和损耗与饱和通量下的 SESAM 的反射率曲线。

图 1 给出的是在不同调制深度下的 SESAM 的反射率曲线图,其中选择 $F_{sat,A} = 50 \mu\text{J}/\text{cm}^2$, $\Delta R_{ns} = 1.5\%$ 。可见,随着入射到 SESAM 上的脉冲通量的增加,反射率增加,并且反射率的增加趋势是刚开始增加迅速,后逐渐缓慢,最后就趋近一定值。这是由 SESAM 中饱和吸收体造成的,那么最后趋近的定值就是 1 和非饱和损耗的差值。同时入射脉冲通量受到两方面条件的限制,一是 SESAM 的抗损伤阈值,二是它不能远大于饱和通量,因为此时激光器会倾向于工作在低能量、长脉宽的双脉冲或多脉冲状态^[6]。

从图 1 中还可以看出,在同样的入射脉冲通量下,调制深度越小,反射率越大。随着脉冲通量的增加,对应的反射率之间差别减小,由于非饱和损耗是

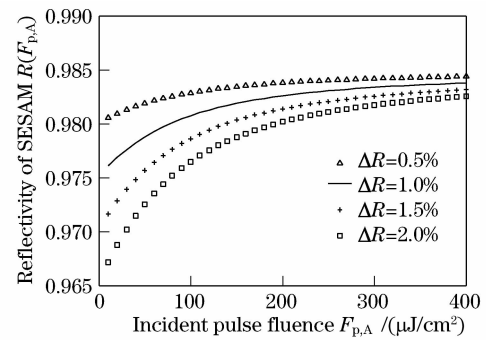


图 1 在不同调制深度下 SESAM 的反射率与脉冲通量的关系

Fig. 1 Relation of reflectivity of SESAM and pulse fluence with different modulation depths

一定的,所以最终是趋近同一定值。另外,调制深度越小,曲线的变化趋势越缓慢,SESAM 的饱和吸收效应越弱,那么当调制深度过小时,这样会导致脉宽变化缓慢,不利于锁模的实现^[5]。

图 2 给出的是在不同非饱和损耗下的 SESAM 的反射率曲线图,其中选择 $\Delta R = 1.5\%$, $F_{sat,A} = 50 \mu\text{J}/\text{cm}^2$ 。从图 2 可以看出,非饱和损耗越小,SESAM 的反射率越大,这样输出的平均功率就会越大。随着入射到 SESAM 上的脉冲通量的增加,每条曲线都是趋近 $1 - \Delta R_{ns}$ 。由于调制深度一定,故各条曲线中入射脉冲通量很大时的反射率和入射脉冲通量很弱时的反射率之差相同,即都等同于调制深度。

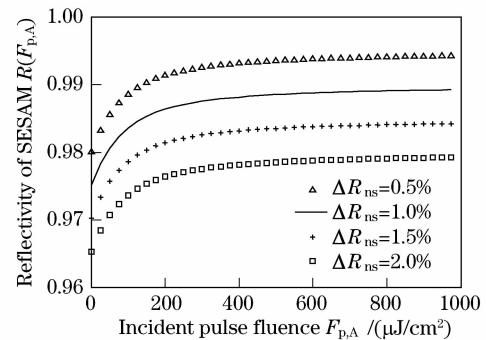


图 2 在不同非饱和损耗下 SESAM 的反射率与脉冲通量的关系

Fig. 2 Relation of reflectivity of SESAM and pulse fluence with different non-saturable losses

在不同饱和通量下的 SESAM 的反射率曲线,如图 3 所示,其中选择 $\Delta R = 1.5\%$, $\Delta R_{ns} = 1.5\%$ 。饱和通量越大,反射率越低,输出激光的平均功率就会越小。另外,虽然四条曲线的调制深度相同,但是饱和通量越大的曲线,反射率趋近 $1 - \Delta R_{ns}$ 需要的脉冲通量就越大,而脉冲通量因受前述两方面原因

的限制,这样很可能使 SESAM 的调制深度得不到完全利用。对于图 3 中的四条曲线的斜率变化,在曲线前半部分中,饱和通量较大的曲线的斜率比饱和通量小的曲线的斜率小,在后半部分中则稍大。

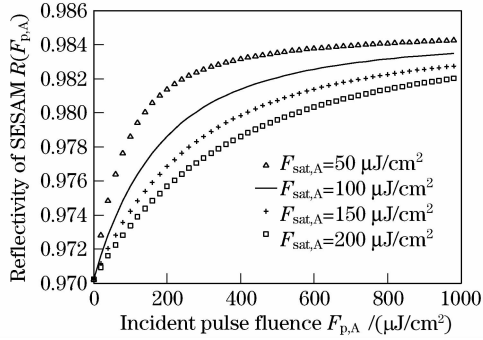


图 3 在不同饱和通量下 SESAM 的反射率与脉冲通量的关系

Fig. 3 Relation of reflectivity of SESAM and pulse fluence with different saturation fluences

3 抑制调 Q 锁模

3.1 临界抽运功率

用 SESAM 进行锁模时,随着抽运功率的增加,激光器的运转会经历三个状态:连续运转,调 Q 锁模,连续锁模^[7]。那么想要获得连续锁模,获得稳定的输出,必须要抑制调 Q 锁模。

F. X. Kärtner 等^[8]曾经从锁模激光器的速率方程出发,获得抑制调 Q 锁模实现连续锁模的理论公式

$$E_p \left| \frac{dq_p(E_p)}{dE_p} \right|_{\bar{E}_p} < \frac{T_R}{\tau_L}, \quad (2)$$

式中

$$q_p(E_p) = q_0 \frac{F_{sat,A} A_{eff,A}}{E_p} \left[1 - \exp\left(-\frac{E_p}{F_{sat,A} A_{eff,A}}\right) \right], \quad (3)$$

(3)式是由饱和和吸收体引起的腔内往返损耗^[4],此处饱和和吸收体是慢饱和吸收体,其中 q_0 是腔内平均功率为 0 时的可饱和吸收系数; E_p 是入射到 SESAM 上的脉冲能量; $A_{eff,A}$ 是入射到 SESAM 上的光斑面积, $A_{eff,A} = \pi \omega_A^2$, ω_A 是 SESAM 上的光斑半径; \bar{E}_p 表示稳态值; T_R 是激光在腔内来回一周的时间,考虑基模锁模下,一个周期腔内只有一个锁模脉冲; τ_L 是激光晶体上能级寿命; $r = 1 + P/P_{sat,L}$, P 是腔内入射到 SESAM 上的光平均功率, $P_{sat,L}$ 是腔内增益的饱和功率, $P_{sat,L} \tau_L = E_{sat,L}$, $E_{sat,L}$ 是腔内增益的饱和能量,同时 $F_{sat,L} = E_{sat,L}/A_{eff,L} = h\nu/(m\sigma_L)$, $F_{sat,L}$ 是腔内饱和通量, $A_{eff,L}$ 是腔模在激光晶体内的光斑面积, ν 是激光频率, m 是一个周期内激光通过激光晶体的次数,环形腔 $m = 1$,驻波腔

$m = 2$, σ_L 是对应激光波长的发射截面面积。

由于 $E_p/A_{eff,A} = F_{p,A}$,将(3)式和(1)式比较,再根据 $\Delta R \approx q_0$, $1 - \Delta R_{ns} \approx 1$ 这个条件,有

$$R(E_p) = R(F_{p,A}) \approx 1 - q_p(E_p), \quad (4)$$

(4)式代入(2)式可得到

$$E_p \left| \frac{dR_p(E_p)}{dE_p} \right|_{\bar{E}_p} < \frac{T_R}{\tau_L} r, \quad (5)$$

(5)式右边项展开有

$$\frac{T_R}{\tau_L} r = \frac{T_R}{\tau_L} \left(1 + \frac{P}{P_{sat,L}} \right) = \frac{T_R}{\tau_L} + \frac{E_p}{E_{sat,L}},$$

考虑到 Yb:YAG 的 τ_L 会比 T_R 大很多,在调 Q 锁模与连续锁模的临界状态时 P 比 $P_{sat,L}$ 会大很多,则(5)式近似为

$$E_p \left| \frac{dR_p(E_p)}{dE_p} \right|_{\bar{E}_p} < \frac{E_p}{E_{sat,L}}, \quad (6)$$

在调 Q 锁模与连续锁模的临界状态时,入射到 SESAM 上的脉冲通量要比饱和通量大很多,再根据(3)式和(4)式,SESAM 的反射率公式可简化为

$$R(E_p) = 1 - \Delta R \frac{F_{sat,A} A_{eff,A}}{E_p}, \quad (7)$$

把(7)式代入(6)式,化简可得

$$E_p^2 > E_{sat,L} E_{sat,A} \Delta R, \quad (8)$$

式中 $E_{sat,A} = F_{sat,A} A_{eff,A}$,

$$P^2 > F_{sat,L} F_{sat,A} \Delta R A_{eff,L} A_{eff,A} \frac{1}{T_R^2}, \quad (9)$$

定义 $E_p = E_{p,c} = (E_{sat,L} E_{sat,A} \Delta R)^{1/2}$ 是临界腔内脉冲能量^[4],

$$F_{p,A} = F_{p,c} = (F_{sat,L} F_{sat,A} \Delta R \frac{A_{eff,L}}{A_{eff,A}})^{1/2}$$
 是临界腔内脉冲通量,

$$P = P_c = \left(F_{sat,L} F_{sat,A} \Delta R A_{eff,L} A_{eff,A} \frac{1}{T_R^2} \right)^{1/2}$$
 是临界腔内平均功率。

在腔内脉冲参数小于临界条件时,可获得调 Q 锁模;在腔内脉冲参数高过临界条件时,可获得连续锁模,当足够高时,才可获得稳定性更好的连续锁模。在临界腔内脉冲参数确定时,此时对应的抽运功率,叫做临界抽运功率,用 $P_{in,c}$ 表示。腔内脉冲参数是无法直接控制和确定的,但和它有关系的抽运是可以直接控制的,因此讨论临界抽运功率对实验具有更直接的指导意义。容易看出临界抽运功率越小,越容易抑制调 Q 锁模,获得连续锁模,这样在高抽运功率时,连续锁模更稳定,质量更好。

临界抽运功率可由临界腔内脉冲参数结合激光器的输出特性导出,下面以 Yb:YAG 激光器为例来讨论。在锁模状态时由于输出脉冲的重复频率很高,

那么输出激光处于一种准连续状态,因此此时 SESAM 锁模的 Yb:YAG 激光器输出功率可由 Yb:YAG 连续激光器输出功率(10)式来近似代替,且只需在(10)式中损耗项多加一个由 SESAM 带来的损耗,但据下边的讨论参数,在 SESAM 锁模的 Yb:YAG 激光器处于调 Q 锁模与连续锁模的临界状态时,利用反射率公式计算得出 SESAM 的最大损耗是 0.2%,故此可忽略不计。

Yb:YAG 激光器输出功率的理论公式为^[9]

$$P_{\text{out}} = \frac{(P_{\text{in}} - P_{\text{th}})T\eta_t}{\frac{\delta_i(d+1)^2}{d(d+2)} - \frac{2N_a^0\sigma l}{n}\left(\frac{1+d}{2d}\right)}, \quad (10)$$

其中阈值 $P_{\text{th}} = \frac{\pi h\nu_p(\bar{\omega}_p^2 + \omega_o^2)}{4\eta_p\eta_a(f_a + f_b)\sigma\tau_L}\delta_i$, (10) 式中 Yb:YAG 晶体的参数取值如表 1 所示。

表 1 Yb:YAG 晶体参数

Table 1 Parameters of Yb:YAG crystal

Length of crystal l/mm	1
Index of crystal n	1.82
Emission cross section of crystal (for 1030 nm) σ/cm^2	2.2×10^{-20}
Fluorescence lifetime of crystal $\tau_L/\mu\text{s}$	970
Occupancy of particle on upper and lower levels f_a and f_b	0.046, 0.772
Absorption coefficient of crystal α/cm^{-1}	5.6
The number of particle on lower level under the condition of heat balance N_a^0/cm^{-3}	6.35×10^{18}

P_{in} 是抽运功率; T 是输出镜透射比; $\eta_t = (h\nu_o/h\nu_p)\eta_p\eta_a$, 其中 ν_o, ν_p 是激光和抽运光对应的频率, 本文采用激光和抽运光波长分别是 1030 和 940 nm, η_p 是抽运量子效率, 本文取值为 1, $\eta_a = 1 - \exp(-\alpha l)$, 它是吸收效率; $\delta_i = \delta + T + 2N_a^0\sigma l$, δ_i 为考虑再吸收后的腔内往返总损耗, 其中 δ 本文中取为 0.5%; $d = (\omega_o/\bar{\omega}_p)^2$, $\bar{\omega}_p = \left(\frac{1}{l}\int_0^l \omega_p^2 dz\right)^{1/2}$ 是抽运光在激光晶体内的平均尺寸, $\omega_p = \omega_{p0} + \theta_p(z - z_0)$, 考虑到了抽运光的发散作用, ω_o 是输出激光束腰半径, d 就表示激光和抽运光的平均横截面积之比。

临界时腔内外功率关系式为

$$P_{\text{out}} = P2T, \quad (11)$$

P_{out} 是获得的激光输出。以 V 型腔和 Z 型腔为例, SESAM 作为其中一个反射端镜, 折叠镜作为输出镜, 则在输出镜处获得两路的激光输出, 此时有两路输出功率近似相同, 并且在一个周期的时间里只有一个锁模脉冲。

把(10)式, (11)式和临界腔内平均功率式子联

立, 导出 SESAM 锁模的 Yb:YAG 激光器临界抽运功率和 SESAM 参数及腔参数的关系式:

$$P_{\text{in,c}} = \frac{2}{\eta_t} \left\{ \left(F_{\text{sat,L}} F_{\text{sat,A}} \Delta R A_{\text{eff,L}} A_{\text{eff,A}} \frac{1}{T_R} \right)^{1/2} \cdot \left[\frac{\delta_i(d+1)^2}{d(d+2)} - \frac{2N_a^0\sigma l}{n} \left(\frac{d+1}{2d} \right) \right] \right\} + P_{\text{th}}. \quad (12)$$

3.2 数值模拟及分析

进行数值模拟时其他参数(当该参数不变时)取值如下:驻波腔 $m=2$, Yb:YAG 的 $F_{\text{sat,L}}$ 经计算是 $4369772 \mu\text{J}/\text{cm}^2$, $F_{\text{sat,A}} = 50 \mu\text{J}/\text{cm}^2$, $\Delta R = 1.5\%$, $\bar{\omega}_p = \omega_o = \omega_A = 50 \mu\text{m}$, $L = 1 \text{ m}$, $T = 0.02$ 。利用(12)式, 代入以上参数数值模拟出临界抽运功率和相关参数的关系。

图 4 给出的是在不同饱和通量下临界抽运功率随调制深度的关系曲线。 ΔR 变化范围从 1.0% 到 10%, 当 $\Delta R = 1.0\%$, $F_{\text{sat,A}} = 50 \mu\text{J}/\text{cm}^2$ 时, 得到最小临界抽运功率 $P_{\text{in,c}} = 5.08 \text{ W}$ 。随着调制深度的增加, 临界抽运功率出现略微非线性的增大。减小

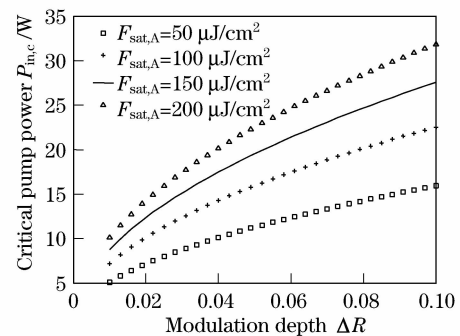


图 4 在不同饱和通量下临界抽运功率与调制深度的关系
Fig. 4 Relation of critical pump power and modulation depth with different saturation fluences

调制深度, 可获得小的临界抽运功率, 但是这样脉宽会变大, 因此需要根据具体实验情况选择适合大小的调制深度。从图 4 看出, 减小饱和通量利于获得小的临界抽运功率。根据图 3 中四条曲线的斜率变化也可看出, 饱和通量越小, 在曲线后半部分中对应的斜率就越小, 这对应着(6)式左边项的减小, 即引起最终临界抽运功率的减小, 但饱和通量也不宜过小, 因为当其他参数不变时, 减小饱和通量, 则临界腔内脉冲通量与饱和通量的比值是增大的。

图 5 给出的是在不同激光光腰下临界抽运功率随输出镜透射比的关系曲线, 其中激光光腰在晶体上。临界抽运功率与输出镜透射比基本呈线性关系, 输出镜透射比越小, 临界抽运功率越小, 越容易抑制调 Q 锁模, 但过小的输出镜透射比会使输出功

率变小。减小激光光腰,即减小了 $A_{\text{eff},L}$,可降低临界抽运功率,同时也可降低入射到 SESAM 上的脉冲通量,但 $A_{\text{eff},L}$ 也不可过小,否则使抽运光设计难度增大,致使不容易进行模式匹配^[10]。由(12)式看出,减小 $A_{\text{eff},A}$,也可降低临界抽运功率,但也要注意它对脉冲通量的增大作用。

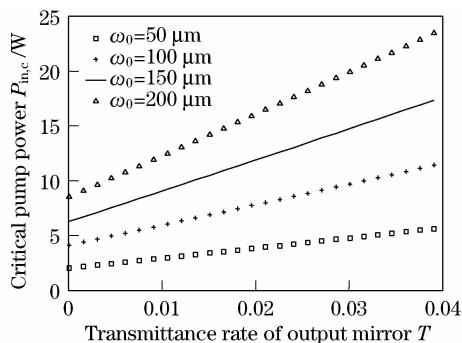


图 5 在不同激光光腰下临界抽运功率与输出镜透射比的关系

Fig. 5 Relation of critical pump power and transmittance of output mirror with different beam waists

图 6 给出的是在不同腔长下临界抽运功率随晶体长度的关系曲线。从图 6 可以看出存在一个最佳晶体长度使临界抽运功率最小,在它是 1.9 mm 时,获得最小临界泵 5.57 W,这个长度和能使激光器在抽运不变下获得最大输出功率的晶体长度是相吻合的,这点不同于输出镜透射比,虽然也存在一个最佳透射比能使输出功率最大,但这时并不能获得最小临界抽运功率。同时图 6 中显示,随着腔长的增加,可降低临界抽运功率。

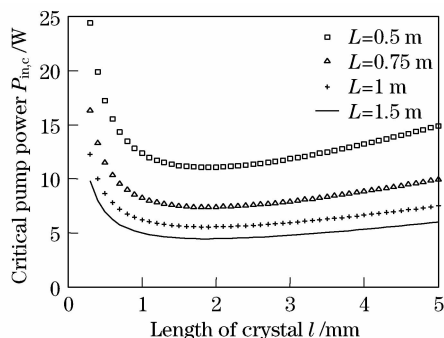


图 6 在不同腔长下临界抽运功率与晶体长度的关系
Fig. 6 Relation of critical pump power and length of crystal with different cavity lengths

4 结 论

对全固态 SESAM 锁模激光器的锁模特性做了一定的理论研究。首先,通过数值模拟,分析了调制深度、非饱和损耗和饱和通量对 SESAM 的反射率等锁模特性的影响作用。然后,对抑制调 Q 锁模的 Yb:YAG 激光器的临界抽运功率的理论公式做了推导,利用该公式做数值模拟,给出了调制深度、饱和通量和输出镜透射比等参数与临界抽运功率的具体数值关系,并分析了这些参数的影响作用。最后,在寻求降低临界抽运功率的前提下,需要防止腔内脉冲通量过大而对锁模带来不利影响。

参 考 文 献

- U. Keller, W. H. Knox, H. Roskos. Coupled-cavity resonant passive mode-locked Ti:sapphire laser [J]. *Opt. Lett.*, 1990, **15**(23): 1377~1379
- Yao Jianquan, Xu Degang. All Solid State Laser and Nonlinear Optical Frequency Conversion Technology [M]. Beijing: Science Press, 2007:457
姚建铨,徐德刚. 全固态激光及非线性光学频率变换技术[M]. 北京:科学出版社,2007:457
- Chen Meng, Zhang Bingyuan, Li Gang *et al.*. Study on SESAM passively-mode-locked Nd:YAG laser [J]. *Chinese J. Lasers*, 2004, **31**(6): 646~648
陈 檬,张丙元,李 港 等. 半导体可饱和吸收镜被动锁模 Nd:YAG 激光器的研究[J]. *中国激光*, 2004, **31**(6): 646~648
- C. Hönninger, R. Paschotta, F. Morier-Genoud *et al.*. Q-switching stability limits of continuous-wave passive mode locking [J]. *J. Opt. Soc. Am. B*, 1999, **16**(1): 46~56
- Cai Zhiqiang. Experimental research on LD pumped passively continuous-wave mode-locked lasers with SESAM [D]. Tianjin: Tianjin University, 2005:13~16
蔡志强. LD 抽运的 SESAM 被动连续锁模激光器实验研究[D]. 天津:天津大学, 2005:13~16
- Yu Haijuan. Researchs on diode pumped Yb:YAG ultrashort lasers [D]. Beijing: Beijing University of Technology, 2005:34
于海娟. LD 直接抽运 Yb:YAG 超短脉冲激光技术的研究[D]. 北京:北京工业大学, 2005:34
- S. W. Tsai, Y. P. Lan, S. C. Wang *et al.*. High-power diode-end-pumped passively mode-locked Nd:YVO₄ laser with a relaxed saturable Bragg reflector [C]. *SPIE*, 2002, **4630**: 17~23
- F. X. Kärtner, L. R. Brovelli, D. Kopf, M. Kamp *et al.*. Control of solid-state laser dynamics by semiconductor devices [J]. *Opt. Engng.*, 1995, **34**(7): 2024~2036.
- Song Yue, Wang Li. Analysis of output power property on all-solid-state laser of LD-Yb:YAG [J]. *Laser & Infrared*, 2006, **36**(8): 644~647
宋 钥,王 丽. LD 抽运 Yb:YAG 全固态激光器输出功率特性分析[J]. *激光与红外*, 2006, **36**(8):644~647
- Cai Zhiqiang, Wen Wuqi, Yao Jianquan *et al.*. Continuous-wave passively mode-locked diode end-pumped Nd:YVO₄ Laser with a semiconductor saturable absorber mirror [J]. *Chinese J. Lasers*, 2005, **32**(6): 734~738
蔡志强,温午麒,姚建铨 等. 半导体可饱和吸收镜连续被动锁模端面抽运 Nd:YVO₄ 激光器[J]. *中国激光*, 2005, **32**(6):734~738