

文章编号: 0258-7025(2009)08-1937-04

SESAM 锁模自倍频激光器中特殊机制的理论研究和计算

薛迎红¹ 刘庆文¹ 柴路¹ 王清月¹ 李静² 王继扬²

(¹ 天津大学精密仪器与光电子工程学院, 光电信息科学技术教育部重点实验室, 天津 300072)
² 山东大学晶体材料国家重点实验室, 山东 济南 250100)

摘要 对自倍频(SFD)效应在半导体可饱和吸收镜(SESAM)锁模激光器中抑制调 Q 倾向的机制进行了详细的理论研究和数值模拟。推导了含有自倍频效应的 SESAM 锁模激光器中非线性损耗的表达式,建立了描述激光器内脉冲能量变化的方程组。用微扰法分析了锁模激光器的稳定性条件,证明了适当强度的自倍频效应能够抑制激光器的调 Q 倾向,降低稳定锁模的阈值。用计算机仿真模拟了锁模激光器在有和无自倍频效应时的特征,验证了理论推导的结论。

关键词 非线性光学; 自倍频; 半导体可饱和吸收镜; 调 Q 锁模; 微扰法

中图分类号 0437; TN248.1 文献标识码 A doi: 10.3788/CJL20093608.1937

Theoretical Research and Calculation of Special Mechanism in Self-Frequency-Doubled Mode-Locked Laser with SESAM

Xue Yinghong¹ Liu Qingwen¹ Chai Lu¹ Wang Qingyue¹ Li Jing² Wang Jiyang²

¹ School of Precision Instruments and Optoelectronics Engineering, Key Laboratory of Optoelectronic Information Technical Science, Chinese Ministry of Education, Tianjin University, Tianjin, 300072, China

² State Key Laboratory of Crystal Materials, Shandong University, Jinan, Shandong 250100, China

Abstract The mechanism which suppresses Q-switched tendency by self-frequency-doubled (SFD) effect in a SFD mode-locked laser with a semiconductor saturable absorbed mirror (SESAM) was theoretically studied and numerically simulated. The expression of nonlinear losses, including the saturable loss of SESAM and the nonlinear loss caused by SFD effect, was deduced. The partial differential equations for intracavity pulse energy were developed. The stable conditions of the mode-locked laser were theoretically studied by the perturbation method. It was proved that suitable SFD effect can suppress Q-switching instabilities and reduce the threshold of stable mode-locking. Numerical simulations of mode-locked laser with and without SFD effect were carried out, which certificated the theoretical analysis.

Key words nonlinear optics; self-frequency-double; semiconductor saturable absorbed mirror; Q-switched mode-locked; perturbation method

1 引 言

自 20 世纪 60 年代锁模用于超短脉冲(皮秒,飞秒量级的光学相干脉冲)的产生以来^[1],锁模技术在近几十年里有了长足的进步,主要经历了同步抽运锁模、碰撞锁模、附加脉冲锁模、非线性镜锁模、克尔

透镜锁模以及半导体可饱和吸收镜(SESAM)锁模等几个阶段^[2~8]。尤其 SESAM 的出现不但解决了锁模自启动的难题,而且使锁模激光器变得更加稳定。但是对于上能级寿命较长的激光介质,如掺镱(Yb^{3+})的晶体和光纤,使用 SESAM 锁模时激光器

收稿日期: 2009-01-15; 收到修改稿日期: 2009-03-12

基金项目: 国家 973 计划(2006CB806000)、国家 863 计划(2002AA311030)和中国博士后科学基金(20070410194)资助课题。

作者简介: 薛迎红(1978—),女,博士后,主要从事新型全固态超短脉冲激光技术的产生及其应用等方面的研究。

E-mail: yinghongxue@gmail.com

容易产生调 Q 倾向,难以获得稳定脉冲,制约了这类锁模激光器的发展。最近研究发现,在 SESAM 锁模激光器中,适度的非线性效应,例如双光子吸收效应与倍频效应等,有助于抑制锁模激光器的调 Q 倾向,提高连续光锁模的稳定性^[9]。随着光电子技术的不断发展,自倍频(SFD)激光器越来越受到人们重视。这种激光器的增益介质自身具有非线性作用,它不需要在腔内插入额外的非线性晶体而可以将基频激光直接转换为倍频光实现可见光运转。恰当地利用这种特殊激光器的自倍频效应,可以抑制基频光锁模的调 Q 倾向,降低基频光稳定锁模的阈值。

本文系统地研究了 SESAM 锁模激光器中自倍频效应抑制基频光调 Q 锁模倾向的机制,并通过数值模拟对理论进行了验证。

2 自倍频锁模激光器中的非线性损耗

对于锁模运转的激光器,腔内脉冲能量 E 的变化方程为^[10]

$$T_R \frac{dE}{dt} = (g - l - q')E, \quad (1)$$

其中, T_R 为脉冲在腔内往返一周所用的时间, l 为腔内的线性损耗系数, g 为介质的增益系数, q' 为非线性损耗系数。对于利用 SESAM 锁模的自倍频激光器, (1) 式中 q' 为自倍频作用和 SESAM 的可饱和吸收作用对激光的损耗之和。

由 SESAM 启动并维持锁模的激光器,忽略色散和非线性作用时,腔内的脉冲宽度只取决于 SESAM 的参数和腔内的线性损耗^[11]。由小信号倍频公式^[12],得到自倍频产生的损耗为

$$\frac{2\omega^2 d_{\text{eff}}^2 l^2}{S_L n_{2\omega} n_{\omega}^2 c^3 \epsilon_0} \text{sinc}^2 \left(\frac{\Delta k l}{2} \right) \int_{-T_R/2}^{T_R/2} P^2(t) dt = \beta E^2, \quad (2)$$

式中 ω 为基频激光的频率, d_{eff} 是晶体的有效非线性系数, L 为晶体长度, $n_{2\omega}$ 和 n_{ω} 分别是晶体对自倍频激光和基频光的折射率, c 为光速, ϵ_0 为介电常数, $P(t)$ 为脉冲的瞬时功率,与脉冲能量 E 的关系为:

$$E = \int_{-T_R/2}^{T_R/2} P(t) dt. S_L \text{ 为非线性晶体上的通光面积,}$$

Δk 为波矢失配量。由于自倍频产生的损耗正比于脉冲能量的平方,因此,相应的损耗系数为 βE ,其中 β 由晶体的参数、波矢失配量和脉冲形状等参数决定。

SESAM 的带间弛豫时间 T_A 一般远大于脉冲的持续时间,属于慢可饱和吸收体。SESAM 对整

个激光脉冲的损耗 q 为^[9]

$$q = \frac{q_0 E_A}{E} \left[1 - \exp \left(- \frac{E}{E_A} \right) \right], \quad (3)$$

式中 q_0 为 SESAM 的小信号损耗系数, E_A 为 SESAM 通光面积上的饱和能量。在实际的锁模激光器中, SESAM 处于深度饱和状态, $E \gg E_A$, 此时指数项可以忽略不计, $q \approx \frac{q_0 E_A}{E}$ 。综上所述,自倍频效应与 SESAM 吸收带来的总的非线性损耗系数为

$$q' = q + \delta = \frac{q_0 E_A}{E} + \beta E. \quad (4)$$

3 SESAM 锁模自倍频激光器的稳定条件

锁模激光器中,激光增益介质的增益与激光脉冲能量的关系满足方程^[13]

$$\frac{dg}{dt} = \frac{g_0 - g}{T_L} - \frac{E}{T_R E_L} g, \quad (5)$$

式中 g_0 为小信号增益系数, T_L 和 E_L 分别为增益介质的弛豫时间和增益介质在通光面积上的饱和光强。

微分方程(1)与(5)分别描述了谐振腔内激光脉冲的能量与介质的增益所遵循的规律。如果此方程组存在稳态解,即腔内的平均功率和增益可以稳定在某个状态下,谐振腔就可以实现稳定锁模运转。反之,如果方程组没有稳态解,则意味着激光器腔内的脉冲功率无法稳定下来,也就不能实现稳定的锁模运转。

微分方程组存在稳态解的条件可以用微扰法来分析。设方程(1)与(5)式有一个与时间无关的特解 (E_s, g_s)

$$g_s - l - q'_s = 0, \quad (6)$$

$$\frac{g_0 - g_s}{T_L} - \frac{E_s}{T_R E_L} g_s = 0, \quad (7)$$

对此特解施加一个微扰: $E = E_s + \Delta E$, $g = g_s + \Delta g$ 。代入(1)式并略去二阶无穷小项,得

$$T_R \frac{d\Delta E}{dt} = -E_s \Delta q' + E_s \Delta g, \quad (8)$$

式中 $\Delta q'$ 是脉冲能量的微扰 ΔE 引起的非线性损耗的微扰,

$$\Delta q' = \frac{dq'}{dE} \Delta E, \quad (9)$$

同样,由(7)式得增益的微扰方程为

$$T_R \frac{d\Delta g}{dt} = -\frac{g_s}{E_L} \Delta E - \left(\frac{E_s}{E_L} + \frac{T_R}{T_L} \right) \Delta g, \quad (10)$$

将(9)式代入(8)式,并与(10)式联立得

$$T_R \frac{d}{dt} \begin{pmatrix} \Delta E \\ \Delta g \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -\frac{dq'}{dE} E_s & E_s \\ -\frac{g_s}{E_L} & -\left(\frac{E_s}{E_L} + \frac{T_R}{T_L}\right) \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} \Delta E \\ \Delta g \end{pmatrix} = \mathbf{A} \begin{pmatrix} \Delta E \\ \Delta g \end{pmatrix}. \quad (11)$$

如果特解(E_s, g_s)是稳态解,即 ΔE 和 Δg 会随着时间的增长而趋近于 0,也就是激光器能够实现稳定锁模,矩阵 \mathbf{A} 应该同时满足条件:

$$\det \mathbf{A} > 0, \operatorname{tr} \mathbf{A} < 0, \quad (12)$$

即

$$-\frac{dq'}{dE} < \frac{g_s}{E_L \left(\frac{E_s}{E_L} + \frac{T_R}{T_L}\right)}. \quad (13)$$

$$-\frac{dq'}{dE} < \left(\frac{E_s}{E_L} + \frac{T_R}{T_L}\right) \frac{1}{E_s}. \quad (14)$$

下面分析不等式(13),(14)成立的条件:

由(7)式得

$$g_s = \frac{g_0}{1 + \frac{T_L E_s}{T_R E_L}}, \quad (15)$$

利用(15)式,(13)式可写为

$$-\frac{dq'}{dE} < -\frac{dg_s}{dE} \Big|_{E=E_s}, \quad (16)$$

当 $E = E_s$ 时,需要满足 $\left| \frac{dq'}{dE} \right| < \left| \frac{dg_s}{dE} \right|$ 。所有能够自启动的激光器,在腔内没有激光或激光强度很低时都有增益大于损耗,即 $g_0 > l + q'_0$,以产生激光振荡;而当腔内脉冲的能量达到稳态 E_s 时增益等于损耗,即 $g_s = l + q'_s$ 。显然,当 $E = E_s$ 时,增益曲线的斜率一定大于损耗曲线的斜率。因为 SESAM 锁模激光器能够自启动,(16)式总是成立的。

因此,对于 SESAM 锁模激光器,(14)式是决定能否实现稳定锁模运转的条件。

利用(4)式,(14)式可以写为

$$\frac{E_A}{E_s^2} q_0 - \beta < \frac{1}{E_L} + \frac{T_R}{T_L} \frac{1}{E_s}, \quad (17)$$

整理后得到

$$E_s > \frac{q_0 E_A}{\frac{T_R}{T_L} + \left[\left(\frac{T_R}{T_L}\right)^2 + 4 \left(\frac{1}{E_L} + \beta\right) E_A q_0 \right]^{1/2}}, \quad (18)$$

腔内的脉冲能量 E_s 必须超过某个阈值,才能使激光器实现稳定锁模运转。显然,该阈值是 β 的单调递减函数。 β 的出现,降低了实现稳定锁模时所需的脉冲能量阈值,使得激光器能够在较低的脉冲能量下抑制调 Q 倾向,实现稳定锁模运转。

4 数值验证

为了验证上述理论分析的结果,进行了计算机仿真模拟。增益介质采用近几年自倍频激光器中热门研究的 Yb:YAB 晶体,激光器的腔长为 1.5 m,所用 SESAM 的调制深度为 1%,腔内线性损耗为 4%。在此条件下计算得激光开始振荡时的小信号增益为 $g_0 = 0.057$ 。数值仿真表明,在没有自倍频效应存在的条件下,为了实现稳定锁模,需要将小信号增益增加到 $g_0 = 0.298$ 。而在腔内引入一定的自倍频效应(相当于长度为 3 mm 的 Yb:YAB 自倍频晶体在失配角为 0.31° 时的倍频强度)之后,得到稳定锁模的小信号增益阈值降低到了 $g_0 = 0.196$ 。下图 1,2 演示了在小信号增益为 $g_0 = 0.2$ 时,腔内激光脉冲的能量受到微扰后的演化过程。没有自倍频效应的情况下,腔内激光演化为调 Q 锁模(如图 1 所示);而存在自倍频效应时,腔内激光很快过渡到稳定的锁模运转状态(如图 2 所示)。

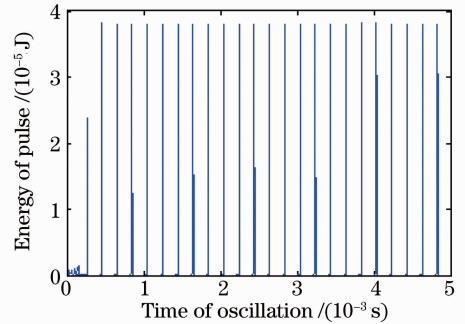


图 1 无自倍频效应时的调 Q 包络($g_0 = 0.2$)

Fig. 1 Q-switched envelope without SFD effect ($g_0 = 0.2$)

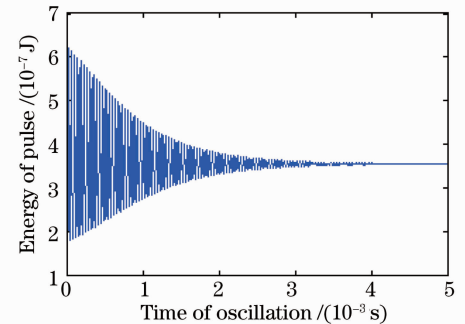


图 2 有自倍频效应时的稳定锁模($g_0 = 0.2$)

Fig. 2 Stable mode-locked pulses with SFD effect ($g_0 = 0.2$)

上述结果表明,由于自倍频效应的引入,抑制了调 Q 倾向,使 SESAM 锁模的自倍频激光器更容易实现稳定锁模。该理论很好地解释了文献[14]利用

SESAM 锁模的自倍频激光器中,实际的锁模阈值比不包含自倍频效应计算的锁模阈值低的实验现象。

自倍频虽然有利于抑制调 Q 稳定锁模,但是,如果倍频系数过大,也会破坏锁模的条件。因为在锁模过程中,SESAM 的可饱和吸收作用是启动并维持锁模的机制,而倍频会削弱这个机制,极端情况下,过强的倍频作用会导致不能锁模。

从(4)式可得,当 $\frac{dq'}{dE} < 0$ 时,总的非线性损耗是可饱和损耗,能够满足锁模条件;而若 β 过大,一旦使得 $\frac{dq'}{dE} \geq 0$,则腔内总的非线性损耗不再是可饱和损耗,此时将不能锁模。这也定量地解释了在文献[14,15]中提到的,当调节激光器达到完全相位匹配出现很强的自倍频光时,基频光很难进入稳定锁模运转状态的原因。

$$\text{对(4)式,令 } \left. \frac{dq'}{dE} \right|_{E=E_S} = 0, \text{ 得}$$

$$\beta = \frac{E_A}{E_S^2} q_0. \quad (19)$$

可以得出,允许的最大 β 值随着 E_S 的增大而减小。因此,在自倍频锁模激光器中,如果要维持稳定锁模,当腔内功率增加时应该通过各种调节减小腔内的自倍频系数。

5 结 论

详细研究了自倍频效应在 SESAM 锁模激光器中抑制调 Q 倾向的机制。推导了 SESAM 锁模的自倍频激光器中由 SESAM 的可饱和吸收作用和增益介质的自倍频效应带来的总非线性损耗的表达式,得到了激光器内脉冲能量的演化方程和增益介质的增益变化方程。用微扰法对该方程组的解的稳定性进行了分析,证明适当强度的自倍频效应能够抑制激光器的调 Q 倾向,降低基频光稳定锁模的阈值。用计算机仿真模拟了相同增益条件下,SESAM 锁模激光器中不含自倍频效应和包含自倍频效应时的脉冲能量演化过程,验证了当激光器中存在自倍频效应时更容易实现稳定锁模的结论,很好地解释了文献中的实验现象。

参 考 文 献

1 A. J. D. Maria, D. A. Stetsler, H. Heynau. Self mode-locking of lasers with saturable absorbers [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1966,

8(7): 174~176

2 Zhu Jianqiang, Zhang Zhuhong, Chen Shaohu *et al.*. Negative feedback forced self-mode-locking in Nd:YLF laser [J]. *Acta Optica Sinica*, 1994, 14(1): 32~35

朱健强,张筑虹,陈绍和等. Nd:YLF 激光器中以负反馈强迫的自锁模技术 [J]. *光学学报*, 1994, 14(1): 32~35

3 Wang Jiaxian, Zhang Wenzhen, Wang Qingyue *et al.*. Passive mode-locking in a CPM Nd:YAG laser using Cr⁴⁺:YAG [J]. *Acta Optica Sinica*, 1998, 18(8): 983~987

王加贤,张文珍,王清月等. Cr⁴⁺:YAG 在对撞脉冲锁模的 Nd:YAG 激光器中实现被动锁模的研究 [J]. *光学学报*, 1998, 18(8): 983~987

4 Shen Xiaohua, Wang Chun, Yang Hongru *et al.*. Additive pulse mode locking of a Nd:LMA laser [J]. *Chinese J. Lasers*, 1998, A25(7): 577~580

沈小华,王春,杨鸿儒等. Nd:LMA 激光器的附加脉冲锁模 [J]. *中国激光*, 1998, A25(7): 577~580

5 Bai Yingxin, Zhang Zhuhong, Fan Dianyuan *et al.*. Mode locking conditions of a modelocked laser with a nonlinear mirror [J]. *Acta Optica Sinica*, 1994, 14(10): 1031~1035

白迎新,张筑虹,范滇元等. 非线性镜锁模激光器的锁模条件 [J]. *光学学报*, 1994, 14(10): 1031~1035

6 Yu Haijuan, Li Gang, Chen Meng *et al.*. Diode end-pumped Kerr-lens mode-locked Yb:YAG laser [J]. *Chinese J. Lasers*, 2005, 32(7): 878~880

于海娟,李港,陈檬等. 激光二极管抽运的克尔透镜锁模 Yb:YAG 激光器 [J]. *中国激光*, 2005, 32(7): 878~880

7 Xue Yinghong, Wang Qingyue, Wang Ying *et al.*. Mode-locking Yb:YAB laser by high-damage threshold SESAM [J]. *Chinese J. Lasers*, 2004, 31(11): 1407~1408

薛迎红,王清月,王颖等. 用高破坏阈值半导体可饱和吸收镜进行 Yb:YAB 激光器锁模的研究 [J]. *中国激光*, 2004, 31(11): 1407~1408

8 Zhang Zhigang, Chai Lu, Zhao Jiangshan *et al.*. Semiconductor saturable-absorber mirror for self-starting mode-locked Ti:sapphire lasers [J]. *Acta Optica Sinica*, 2002, 22(9): 1151~1152

张志刚,柴路,赵江山等. 用于钛宝石激光器自启动锁模的半导体可饱和吸收镜 [J]. *光学学报*, 2002, 22(9): 1151~1152

9 T. R. Schibli, E. R. Thoen, F. X. Kärtner *et al.*. Suppression of Q-switched mode locking and break-up into multiple pulses by inverse saturable absorption [J]. *Appl. Phys. B*, 2000, 70(S1): S41~S49

10 Hewann A. Haus. Theory of mode locking with a fast saturable absorber [J]. *J. Appl. Phys.* 1975, 46(7): 3049

11 Ursula Keller. Semiconductor saturable absorber mirrors (SESAM's) for femtosecond to nanosecond pulse generation in solid-state lasers [J]. *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.*, 1996, 2(3): 435~453

12 Fei Haosheng. Nonlinear Optics [M]. Beijing: Higher Education Press, 1990. 74~75

费浩生,非线性光学 [M]. 北京:高等教育出版社,1990,74~75

13 Hewann A. Haus. Parameter ranges for CW passive mode locking [J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 1976, QE-12(3): 169~176

14 Yinghong Xue, Qingwen Liu, Lu Chai *et al.*. Passively mode-locking of a new self-frequency-doubled Yb:GdYAB laser [J]. *Opt. Commun.*, 2009, (be submitted)

15 M. J. Lederer, M. Hildebrandt, V. Z. Kolev *et al.*. Passive mode locking of a self-frequency-doubling Yb:YAl₃(BO₃)₄ laser [J]. *Opt. Lett.*, 2002, 27(6): 436~438