

含负克尔效应半导体可饱和吸收镜的五镜腔 飞秒钛宝石激光器的理论分析*

王 专[†] 王清月 宋有建 邢岐荣 柴 路

(天津大学精密仪器与光电子工程学院超快激光研究室, 光电信息技术科学教育部重点实验室, 天津 300072)

(2004 年 12 月 3 日收到, 2005 年 4 月 4 日收到修改稿)

基于半导体可饱和吸收镜 (SESAM) 的负克尔效应, 对含 SESAM 的五镜腔进行了理论计算和分析. 结果表明, 由于 SESAM 的负克尔效应, 与没有 SESAM 的相比, 锁模激光器的稳区在上稳区的内边缘有明显扩展, 这使得激光器锁模启动的工作点更加靠近直流运转时的稳区边缘, 从而获得更大的非线性因子. 这说明 SESAM 的可饱和吸收机理具有锁模自启动效应外, 其负克尔效应也有助于锁模的自启动.

关键词: 半导体可饱和吸收镜, 负克尔效应, 五镜腔

PACC: 4260D, 4265J, 4280W

1. 引 言

克尔透镜锁模钛宝石激光器是一种优秀的飞秒脉冲激光光源, 其锁模机理主要是利用腔内的自聚焦效应使得脉冲能够比 CW 获得更高的增益^[1,2]. 因为克尔效应与腔内的瞬时功率密度成正比, 因此随着脉冲的缩短与峰值功率的增加克尔透镜效应带来的锁模机理也变得更强. 但是在脉冲明显变窄之前这种锁模机理的作用是很弱的, 因此通常情况下克尔透镜锁模激光器是不能自启动的, 但是如果在腔内加入低损耗的宽带半导体可饱和吸收镜作为自启动元件, 就完全可以解决克尔透镜激光器的自启动问题^[3-5].

天津大学超快激光实验室的邢岐荣等人在采用反射式 Z 扫描技术研究宽带低损耗半导体可饱和吸收镜 (SESAM) 样品克尔效应的实验中发现, SESAM 的非线性折射率呈负值, 且样品的非线性折射率不单纯来自于可饱和吸收量子阱 (其厚度仅为 5 nm), 量子阱的两夹层对非线性折射也有很大贡献. 实验中测到的负的 Kerr 效应是二者综合结果^[6].

本文主要是基于 SESAM 负的克尔效应, 对含

SESAM 的克尔透镜锁模钛宝石五镜腔进行理论研究.

2. 理论计算与结果分析

由于 SESAM 有负的非线性折射率, 这会引入激光光束的自散焦, 所以相比于四镜腔而言, 引入 SESAM 的五镜腔必然会有许多新的特性, 这些特性集中体现在激光器锁模后稳区的变化上.

2.1. 稳区分析

为了方便计算, 我们不考虑像散. 简化了的五镜谐振腔结构如图 1 所示. 图中, M_1 和 M_5 为平面反射镜, M_2 , M_3 和 M_4 为曲率半径 $R = -100\text{mm}$ 球面反射镜简化而来的正透镜, 等效焦距 $f = 50\text{mm}$. 腔长参数 $L_0 = 800\text{mm}$, $L_2 = 550\text{mm}$ 为定值. L_1 和 L_3 为变量.

当腔内峰值功率很高时, 钛宝石和 SESAM 都具有很强的克尔效应, 分别引起光束的自聚焦和自散焦. 依据文献 [7], 克尔介质等效的非线性 ABCD 传输矩阵是

$$M = \begin{bmatrix} 1 & \frac{d_c}{2} \\ 0 & 1 \end{bmatrix} M_k \begin{bmatrix} 1 & \frac{d_c}{2} \\ 0 & 1 \end{bmatrix},$$

* 国家重点基础研究发展规划 (批准号: G1999075201) 资助的课题.

[†] E-mail: wangzhuanbj@163.com

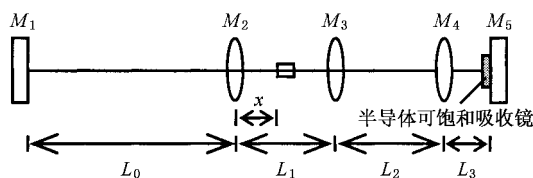


图1 含 SESAM 的钛宝石激光器等效直腔结构

其中

$$M_k = \frac{1}{\sqrt{1-\gamma}} \begin{bmatrix} 1 - \frac{\gamma}{2} & -\frac{\gamma d_e}{4} \\ -\frac{\gamma}{d_e} & 1 - \frac{\gamma}{2} \end{bmatrix},$$

$$\gamma = \left[1 + \frac{1}{4} \left(\frac{2\pi\omega_c^2}{\lambda d_e} - \frac{\lambda d_e}{2\pi\omega_0^2} \right)^2 \right]^{-1} \frac{P}{P_c},$$

d_e 为介质的有效长度, P_c 为克尔介质自陷临界功

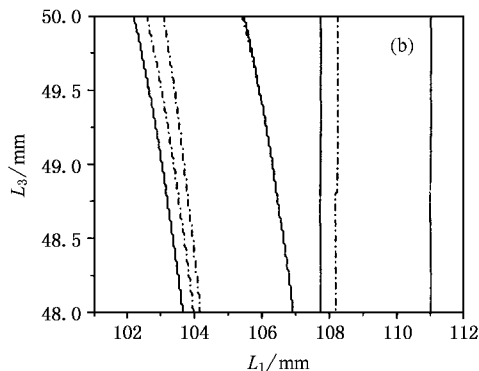
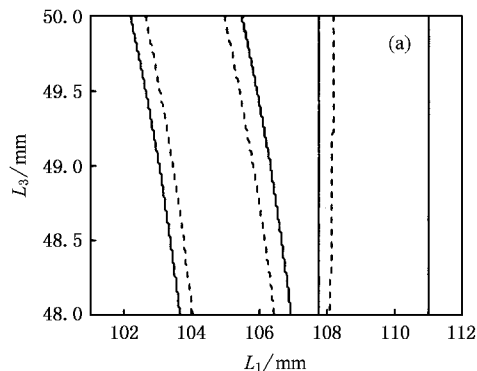


图2 激光器在 CW 运转和锁模运转情况下稳区的比较图 (a) 不考虑 SESAM 负克尔效应的五镜腔的情况 (b) 考虑 SESAM 负克尔效应的五镜腔的情况 (计算中取腔内功率 $P = 1.2 \times 10^6$ W)。实线为 CW 运转状态, 虚线为只考虑钛宝石的非线性, 点划线为同时考虑钛宝石和 SESAM 的非线性

对图 1 所示的五镜腔, 用 ABCD 矩阵计算的线性和非线性状态下的稳区图如图 2 所示(考虑到紧聚焦条件, 所以我们仅就 L_3 在 49mm 左右的稳区进行讨论)。由图可知, 如果只考虑钛宝石的自聚焦效应, 激光器锁模时的稳区比 CW 运转时的稳区明显变小, 如图 2(a) 所示。如果同时考虑钛宝石和 SESAM 的克尔非线性效应, 稳区的弯曲部分相对于只考虑钛宝石的非线性来说有明显的扩大趋势, 如图 2(a)(b) 所示, 而在竖直稳区部分却没有明显的变化。我们推测, 弯曲稳区的变化结果是 SESAM 的自散焦作用抵消了一部分自聚焦作用的结果。图 3 给出了 $L_3 = 49$ mm 时, 钛宝石晶体中心处和 SESAM 上光斑尺寸在两个凹面镜之间的距离为 L_1 情况下的变化曲线。在 L_1 较小的上稳区部分(对应于弯曲稳区部分)钛宝石晶体处束腰和 SESAM 上的光斑半

率 P 为腔内循环功率, P_c 为非线性材料的自陷功率, ω_0 和 ω_c 分别为激光器 CW 运转时, 激光束的束腰半径和克尔介质中心的光斑半径。计算参数为: 钛宝石晶体长 5mm, 折射率 1.76; SESAM 厚 500nm, 折射率 2.69。由此可以计算出钛宝石自聚焦临界功率 $P_{CP} = 1.8 \times 10^6$ W, SESAM 自聚焦临界功率 $P_{CP} = 517.5$ W。由此可以分别计算出钛宝石和 SESAM 的 γ 因子, 及它们等效的非线性传输矩阵。需要指出的是, 在计算 SESAM 的 γ 因子时, 我们取腔循环功率为 $4P$ 。这是因为 SESAM 很薄且集成在高反镜之上, 当脉冲前沿穿过半导体可饱和吸收体被平面镜反射后, 后沿还没有进入吸收体, 这样被反射镜反射的脉冲前沿光电场会与刚进入的后沿光电场相干叠加, 叠加后功率 $P' = |2E|^2 = 4P^{[8]}$ 。

径基本一样大; 而在下稳区部分, SESAM 上的光斑半径是晶体束腰的三倍, 且越接近稳区边缘 SESAM 上的光斑尺寸越大, 而钛宝石晶体处的束腰却越小。由 γ 因子的表达式可知, 它与 CW 运转时克尔介质处束腰光斑尺寸成反比; 由此, 我们推断激光器腔内加入负的克尔介质后, CW 稳区变化不明显, 是因为当激光器工作在直边稳区时, SESAM 上的光斑尺寸过大造成 γ 值太小从而使 SESAM 负的克尔效应太弱造成的, 同时也证明了, SESAM 负克尔效应带来的自散焦作用抵消了钛宝石的自聚焦作用使得弯曲稳区部分在锁模与 CW 状态相比变化不大。

2.2.8 因子的计算分析

小信号情况下光斑相对变化量是分析和设计激光器谐振腔时经常用到的参数, 其定义为

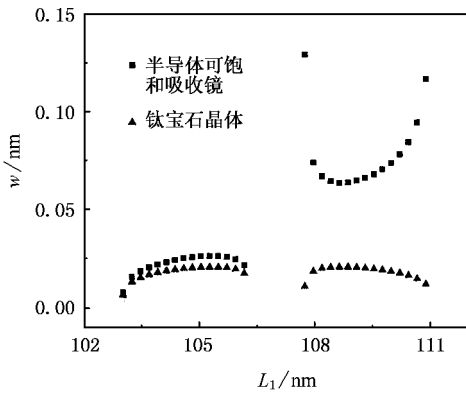


图3 CW运转情况下,钛宝石和 SESAM 上的束腰随 L_1 的变化曲线

$$\delta = \left[1/w \left(dw/dp \right) \right]_{p=0}^{[9]}$$

其中 w 是给定平面上的光斑尺寸. 对于一个给定的激光器谐振腔, 在其中一臂的端镜处可以获得最大的 δ 值. 根据 δ 的定义, 只有在 $\delta < 0$ 的位置才有利于实现锁模运转. 如果在 $|\delta|$ 取得最大值的位置放置一个合适大小的小孔光阑引入非线性损耗, 就可以使非线性效应达到最大. 对于非对称臂长的激光器, 在分裂的两个稳区的内边缘可以使 $|\delta|$ 达到最大值. 若激光器腔内不包含 SESAM, 在锁模状态下, 稳区在内边缘两侧有明显的缩小, 因此在激光器的实际操作中, 必须使激光器的工作点离稳区边缘一定的距离以保证激光器运转的稳定性; 在这种情况下, 只能使激光器工作在一个比最大值小很多的 $|\delta|$ 值的稳区位置, 从而使激光器的非线性效应大大降低, 不利于启动锁模和锁模状态下激光器腔内脉冲的光谱展宽. 但是如果腔内包含 SESAM, 其稳区的弯曲部分在锁模状态下比 CW 状态下其内边缘没有明显的缩小, 因此可以使激光器锁模的工作点位于比较靠近弯曲稳区边缘的位置, 以获得比较大的 $|\delta|$ 值. 根据文献 [9] 的计算方法, 我们计算并画出五镜腔 δ 的等高线图, 如图 4 所示. 可以看出, 在稳区边缘附近 δ 变化很快. 没有 SESAM 的五镜腔激光器, 由于锁模后的稳区(在图 4 中用方格阴影表示)比 CW 时的稳区缩小很多, 因此启动锁模时其工作点对应的 $|\delta|$ 值很小, 只有 0.3 左右; 而含 SESAM

的五镜腔(其稳区在图 4 中用斜线阴影表示)其锁模工作点对应的 $|\delta|$ 值可以在 0.6—0.9 之间, 比不含 SESAM 的五镜腔 $|\delta|$ 值高 2 到 3 倍. $|\delta|$ 值的提高对锁模启动很有利, 同时也更有利于腔内激光脉冲的光谱展宽, 产生更短的激光脉冲^[10].

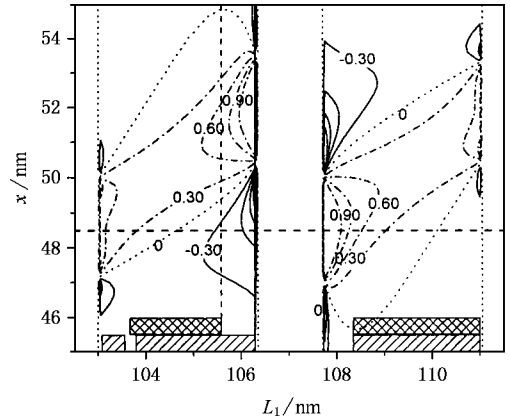


图4 小信号情况下光斑变化量 δ 的等高线图(横坐标为两个聚焦镜之间的距离 L_1 , 纵坐标为第一个聚焦镜到晶体端面的距离 x (如图 2 所示). 图中点划线表示正值, 实线表示负值. 图中按 $\delta = \pm 0.3, \pm 0.6, \pm 0.9$ 画出等高线)

3. 结 论

在腔内引入半导体可饱和吸收镜 SESAM, 可以解决克尔透镜锁模激光器的自启动问题. 实验发现, SESAM 具有负的克尔效应, 这势必对激光器的运转特性产生影响. 本文正是基于 SESAM 具有负的克尔效应这一特性, 对含 SESAM 的五镜腔激光器进行了理论分析. 计算结果表明, 在上稳区(对应弯曲稳区)部分, 由于 SESAM 的引入, 使得激光器在锁模运转状态下(考虑其非线性)稳区在内边缘相比于没有 SESAM 的情况有明显的扩展, 这样可以使激光器锁模启动的工作点更加靠近 CW 运转稳区的边缘, 从而获得更大的 δ 因子, 使激光器的自启动更容易. 可见, 在腔内插入 SESAM 除了其量子阱材料的可饱和吸收效应能启动锁模外, SESAM 的负克尔效应也有助于锁模的自启动, 同时非线性的增强也使得激光器自相位调制作用更充分, 能够产生更宽的光谱.



- [1] Krausz F *et al* 1992 *IEEE J. QE* **28** 2082
 [2] Steinmeyer G *et al* 1999 *Science* **286** 1507
 [3] Keller U *et al* 1996 *IEEE J STQE* **2** 435
 [4] Chai L , Wang Q Y , Zhang Z G , Zhao J S , Wang Y , Zhang W L and Xing Q R 2001 *Acta Phys. Sin.* **50** 68 (in Chinese) [柴 路、王清月、张志刚、赵江山、王 勇、张伟力、邢岐荣 2001 物理学报 **50** 68]
 [5] Sun J H , Zhang R B , Hu Y F , Zhang Z G and Wang Q Y 2002 *Acta Phys. Sin.* **51** 1272 (in Chinese) [孙敬华、章若冰、胡有方、张志刚、王清月 2002 物理学报 **51** 1272]
 [6] Xing Q R *et al* 2005 *Chinese Phys. Lett.* **22** 40
 [7] Magni V *et al* 1993 *Opt. Comm.* **96** 348
 [8] Stix S M *et al* 1983 *IEEE J. QE* **19** 520
 [9] Magni V *et al* 1993 *Opt. Comm.* **101** 365
 [10] Bartels A *et al* 2002 *Opt. Lett.* **27** 1839

Theoretical analysis of the five-mirror femtosecond Ti :sapphire oscillator containing a semiconductor saturable absorber mirror with negative Kerr effect *

Wang Zhuan Wang Qing-Yue Song You-Jian Xing Qi-Rong Chai Lu

(Key Laboratory of Optoelectronic Information Technical Science , Ministry of Education , China ; Ultrafast Laser Laboratory , College of Precision Instrument and Optoelectronics Engineering , Tianjin University , Tianjin 300072 , China)

(Received 3 December 2004 ; revised manuscript received 4 April 2005)

Abstract

The five-mirror laser cavity containing a semiconductor saturable absorber mirror (SESAM) with negative Kerr effect is theoretically analyzed for the first time. It shows that , compared with the cavity without a SESAM , the upper stable range of the resonator expands obviously after the introduction of SESAM. This indicates that the work point for self-starting can be more close to the edge of the stable range of the CW state , and then get higher nonlinear effect. This shows that the negative Kerr effect of the SESAM can contribute to the self-starting of the modelocked laser besides the saturable absorption mechanism.

Keywords : semiconductor saturable absorber mirror (SESAM) , negative Kerr effect , five-mirror cavity

PACC : 4260D , 4265J , 4280W

* Project supported by the National Key Basic Research Special Foundation of China (Grant No. G1999075201).