

基于传播圆补偿像散的被动锁模激光器谐振腔设计方法*

张小军¹⁾ 杨富²⁾ 王勇刚³⁾ 孙利群⁴⁾ 文侨^{1)†} 牛憨笨¹⁾

1) (深圳大学光电工程学院, 光电子器件与系统(教育部、广东省)重点实验室, 深圳 518060)

2) (河北北方学院理学院, 张家口 075000)

3) (香港理工大学应用物理系, 香港)

4) (清华大学精密仪器与机械学系, 北京 100084)

(2012年6月13日收到; 2012年8月24日收到修改稿)

由于超短脉冲激光器的谐振腔大都采用多镜折叠的形式, 像散已成为影响锁模激光器性能优劣的重要问题. 本文提出了一种基于传播圆补偿像散的被动锁模激光器谐振腔设计方法, 该方法简单、直观、高效, 容易找到补偿像散的最佳位置. 理论研究表明, 当 SESAM 位于子午和弧矢传播圆交汇处附近时, SESAM 处的子午光斑和弧矢光斑大小几乎相等, 像散得到补偿. 该谐振腔对外界干扰引起的腔镜振动和热透镜焦距的变化均不敏感, 谐振腔的抗干扰性很强. 实验研究表明, 当 SESAM 位于子午和弧矢传播圆交汇处附近时, 锁模激光器可获得稳定连续的锁模激光脉冲, 且激光器的抗干扰性很强. 本文的理论研究与实验结果相一致.

关键词: 连续锁模, 像散补偿, 半导体可饱和吸收镜, 传播圆

PACS: 42.60.Da, 42.60.Fc, 42.60.Lh

DOI: 10.7498/aps.62.024211

1 引言

自 1992 年 Keller 用半导体可饱和吸收镜 (semiconductor saturable absorber mirror, SESAM) 来实现固态激光器的被动锁模, 并获得 3.3 ps 的超短脉冲后^[1], SESAM 被广泛应用于各种谐振腔中产生超短脉冲激光. 与主动锁模相比, SESAM 被动锁模具有插入谐振腔方便、使用简单等优点. 目前, SESAM 锁模是固态激光器获得皮秒、飞秒激光脉冲的主流方案之一. 克服调 Q 锁模, 实现连续锁模是 SESAM 锁模研究热点之一. 为获得稳定的连续锁模激光脉冲, 人们对锁模器件 SESAM 的结构设计和谐振腔设计等方面进行了大量研究. 谐振腔是激光器重要的组成部分, 在被动锁模激光器中尤其

重要. 谐振腔设计的优劣, 在很大程度上决定了锁模稳定的好坏, 对超短脉冲激光器的性能具有举足轻重的意义.

锁模激光器的谐振腔大都采用多镜折叠的形式. 此时, 折叠镜带来的像散是锁模激光器不可忽略的问题, 通常需要采用特定的方法来补偿腔内某位置的像散. Torben 等^[2] 利用 ABCD 矩阵对连续输出的矩形谐振腔激光器进行像散补偿, 其计算过程比较繁琐. Huang 等^[3] 对锁模激光器中的像散问题进行了研究, 他们通过利用腔内离轴放置的球面镜与布儒斯特角切割的激光棒或染料盒所引入的像散进行相互补偿来达到这一目的. 然而, 利用 SESAM 锁模的固态激光器的像散问题很少有人进行研究, 且 ps 级的固态激光器中, 晶体一般不以布儒斯特角切割, 上述方法不再有效. 本文提出了

* 国家自然科学基金 (批准号: 61108026, 61001184, 61101175)、高等学校博士学科点专项科研基金 (批准号: 20114408120001)、广东高校优秀青年创新人才培养计划项目 (批准号: LYM11107)、深圳市科技研发资金重点实验室提升发展项目 (批准号: CXB201005240011A) 和深圳大学科研基金资助面上项目 (批准号: 201033) 资助的课题.

† 通讯作者. E-mail: wenqiao@szu.edu.cn

一种基于传播圆补偿像散的被动锁模谐振腔设计方法,该方法简单、直观、高效,容易找到克服像散的最佳位置.本文利用该方法设计了一锁模激光器的谐振腔,并在侧泵 Nd:YAG 激光器上进行了 SESAM 锁模实验.研究结果表明,本文的理论研究与实验结果非常符合.

2 激光谐振腔的设计

SESAM 的反射率依赖于该处光强的大小,而光强则受 SESAM 处光斑半径大小的影响.因此,被动锁模谐振腔的损耗强烈地依赖于 SESAM 处光斑半径大小.当 SESAM 处光斑半径受外界干扰时,将引起谐振腔损耗无规则地变化,最终影响锁模激光器的稳定性.一个性能优异的被动锁模激光器,至少要满足两方面要求.一是谐振腔 SESAM 处光斑半径小,且该处的光斑半径沿光轴方向变化缓慢.光斑半径小有利于 SESAM 饱和;光斑变化缓慢,表明外界条件变化时,光斑半径的变化幅度很小,有利于增强谐振腔的抗干扰能力.另一方面是 SESAM 处要有较好的光束质量,因此,必须消除像散等因素引起光斑弥散.对锁模激光器谐振腔设计第一方面的要求,我们已经进行了详细研究^[4],本文主要研究锁模激光器谐振腔设计如何满足后者要求,并实现稳定的连续锁模.

传统设计谐振腔一般采用 ABCD 矩阵方法.该方法虽然已经比较成熟,但不够直观,在分析谐振腔动态变化时,需不断改变谐振腔的各项参数反复进行计算.特别是在设计复杂的折叠腔和环形腔等具有大量参数的谐振腔时,变得更加复杂.张光寅等^[5]在前人设计方法的基础上,提出了光学谐振腔的传播圆法.该方法具有物理图像清晰、直观等优点,且能方便地分析腔内各参数动态变化的趋势.在本节中,我们基于传播圆法设计出能够补偿像散的被动锁模谐振腔.

设计谐振腔前,我们先利用非对称平平腔临界稳定条件法^[6,7]测量晶体的热透镜焦距,将晶体作薄透镜处理.选用 5% 透过率的平面镜作为耦合输出镜,将 SESAM 作为另一面端镜.根据传播变换圆理论^[5],平面输出镜和 SESAM 的 σ 传播圆为一平面.谐振腔要获得稳定的激光振荡,平面输出镜经后面光学系统变换得到的像传播圆必须与 SESAM 所在平面相交.根据模像理论^[5],传播变换圆经焦

距 f 透镜,其变换关系式为

$$\frac{1}{d} + \frac{1}{d'} = \frac{1}{f}, \quad (1)$$

$$\frac{1}{O} + \frac{1}{O'} = \frac{1}{f}, \quad (2)$$

其中, d, d' 分别表示高斯光束物波面、像波面与光轴的交点距薄透镜的距离; O 与 O' 分别表示物波面与像波面曲率中心距薄透镜的距离.为了有利于 SESAM 饱和, SESAM 处的光斑半径要尽可能小;为了实现一定数量的纵模振荡且满足相位锁定,谐振腔的长度要满足一定的条件.我们在腔内插入一个由不同曲率半径的凹面镜组成的光学系统满足上述要求,最终得到的谐振腔如图 1 所示.在图 1 中, F_t 为晶体的等效薄热透镜; M_1 为 5% 平面输出镜; M_2 表示为凹面镜,焦距为 25 cm; M_3 为焦距为 5 cm 的凹面镜; M_4 为 SESAM.光束在凹面镜 M_2, M_3 上的入射角分别为 0.041 和 0.133 rad. $L_{1,h}$ 表示 M_1 到晶体主平面的距离, $L_{2,h}$ 表示 M_2 到晶体主平面的距离.这样,设计图中的腔长比实际腔长缩短 $(1 - 1/n_0)l$, 其中 n_0 和 l 分别表示晶体的折射率与长度.根据 (1), (2) 式得到平面输出镜的传播圆 σ_1 经过 F_t, M_2, M_3 变换后,得到的像 σ 传播圆分别为 $\sigma'_1, \sigma'_2, \sigma'_3$.根据传播圆理论,只要 σ_4 与 σ'_3 相交,该谐振腔即能获得稳定的激光振荡. σ_4 与 σ'_3 圆的两个交点之间的距离为 $2b$, b 为侧焦距,它与该点光斑大小 ω 满足如下关系^[5]:

$$\omega = \sqrt{\frac{b\lambda}{\pi}}. \quad (3)$$

由于 M_3 采用小曲率半径的凹面镜,因此,在 SESAM 处能获得了较小的光斑,能满足 SESAM 锁模对光通量的要求.

然而,在上述 Z 形腔中,因采用凹面镜折叠,导致凹面反射镜在子午面和弧矢面内的焦距不同^[8],

$$f_{it} = \frac{R_i}{2} \cos \varphi_i, \quad (4)$$

$$f_{is} = \frac{R_i}{2} \sec \varphi_i, \quad (5)$$

其中 i 分别取 2, 3 表示 M_2, M_3 , 下标 t, s 分别表示子午面和弧矢面, φ 为光束在凹面镜上的入射角.虽然我们在调整 Z 形腔时,总是尽可能地减小入射角.然而,实际中由于器件尺寸的限制,总会产生一个不可忽视的角度.根据 (1), (2) 式, σ'_2, σ'_3 将分裂为两个圆,即 σ_1 圆经过变换得到的子午像和弧矢像不再重合.由于 SESAM 处光斑半径的变化对锁模影响很大,因此我们将分析 σ'_3 圆的子午圆

σ'_{3t} 和弧矢圆 σ'_{3s} , 如图 2 所示. 由于像散的影响, σ'_{3t} 和 σ'_{3s} 不仅在轴向位置有一定平移, 且大小不等, σ_4 分别与 σ'_{3t} 和 σ'_{3s} 的相交情况决定了激光器锁模的运行状态. 当 $L_4 = 5.55$ cm 和 $L_4 = 5.78$ cm 时, 由于 σ_4 被 σ'_{3t} 与 σ'_{3s} 所截的弦长度不等, 即子午侧焦距和弧矢侧焦距不相等, 由 (3) 式可知, SESAM 处的子午光斑和弧矢光斑大小不等, 那么 SESAM 上的光斑是一椭圆. 由于 SESAM 的反射率与光

强成正比例关系; 因此, 椭圆光斑所带来的光斑弥散导致 SESAM 不易饱和, 以及对外界扰动的异常敏感. 但若将 SESAM 置于子午圆和弧矢圆的交点或其附近处, 如当 $L_4 = 5.66$ cm 时, 则由图 2 可知, 在 SESAM 处子午光斑和弧矢光斑大小相等, SESAM 上为圆形光斑, 也就是说此时在 SESAM 处是像散得到补偿的. 下面我们将分析其稳定性.

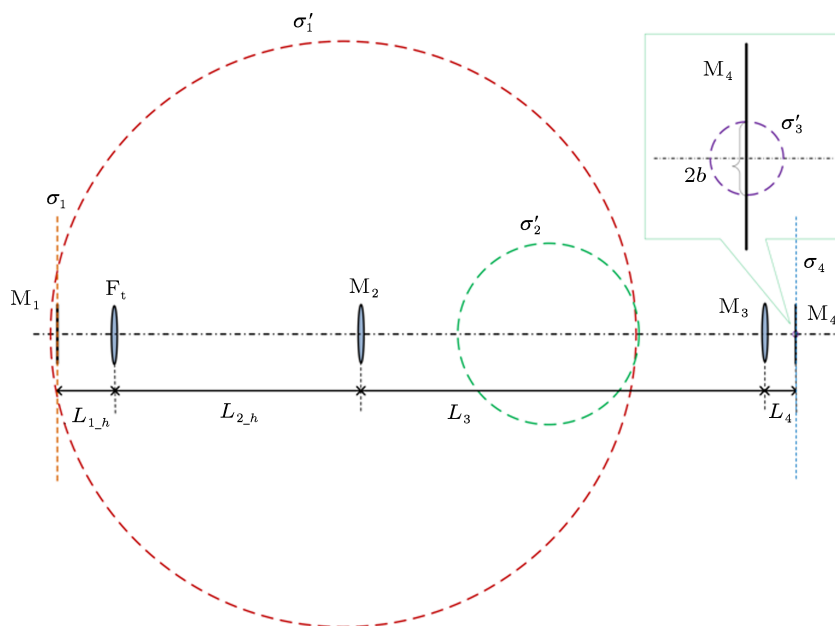


图 1 传播圆方法谐振腔设计图

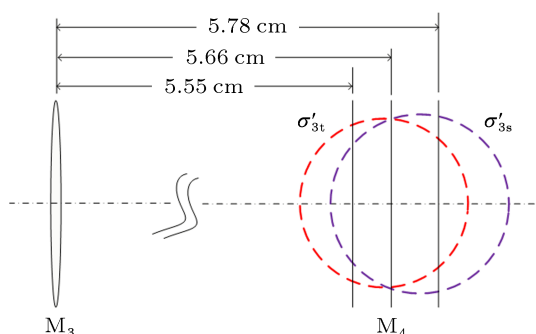


图 2 SESAM 不同位置与 σ'_3 圆的相交情况

图 3 描述了当 SESAM 位于不同位置时, 子午和弧矢光斑半径的相对差值即子午与弧矢的光斑半径之差的绝对值与它们平均值的比值, 随着 L_4 的变化. 由图 3 可知, 当 SESAM 位于距 M_3 镜子 5.66 cm 附近时, 随着 L_4 的变化, 子午光斑与弧矢光

斑的相对差值变化缓慢. 这意味着, SESAM 放置在该位置时, 锁模激光器对外界干扰引起腔镜振动不敏感. 当 SESAM 远离 σ'_{3t} 与 σ'_{3s} 相交位置时, 情况变得完全不同, L_4 的轻微变化将导致子午光斑与弧矢光斑的相对差值剧烈地变化. 同样地, 这也意味着 SESAM 放置在该位置时, 锁模激光器对外界干扰引起腔镜振动很敏感.

由于激光工作物质的内部热不均匀分布和热应变光弹性会引起折射率不均匀变化, 从而产生热透镜效应^[9]. 在大功率激光器或腔内功率大的脉冲激光器等激光系统中, 激光晶体的热透镜效应严重影响了激光的输出特性, 甚至将破坏谐振腔的稳态条件导致激光器不出光. 热透镜的焦距起伏同样也会影响 SESAM 处的像散. 利用非对称平平腔临界稳定条件法^[6,7], 我们测得 9.4 A 的 LD 抽运电流时晶体的热透镜焦距约为 89.18 cm. 假定热透镜焦距变化起伏 10 cm. 图 4 描述了 SESAM 处子午和弧

矢光斑半径的相对差值随着晶体热透镜焦距变化关系. 图 4 中蓝色曲线代表 SESAM 位于距 M_3 镜子 5.55 cm 处, 红色曲线代表 SESAM 位于距 M_3 镜子 5.78 cm 处, 黑色曲线代表 SESAM 位于距 M_3 镜子 5.66 cm 处. 比较三图, 明显得知, 当 SESAM 位于 5.66 cm 处时, 不仅子午和弧矢光斑半径的相对差值较小, 而且此时, 该值随着 f_t 的变化不明显, 最大值与最小值之差仅仅为 0.01. 也就是说, SESAM 放置在该位置时, 锁模激光器对温度变化不敏感, 或者说该锁模激光器抗温度干扰性强. 与黑色曲线相比, 蓝色与红色曲线的子午和弧矢光斑半径的相对差值较大, 且该值随着 f_t 的变化比较明显, 红色曲线与蓝色曲线的最大值与最小值之差分别为 0.02 和 0.15, 分别是黑线的最大值与最小值之差的 2 倍和 15 倍. 这意味着, SESAM 放置在 $L_4 = 5.78$ cm 和 $L_4 = 5.55$ cm 处, 该锁模激光器 SESAM 处的像散值较大, 抗温度干扰性也较差.

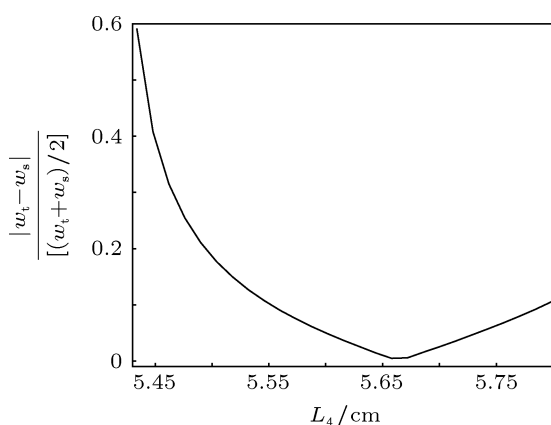


图 3 SESAM 处子午光斑与弧矢光斑相对差值随 L_4 的变化

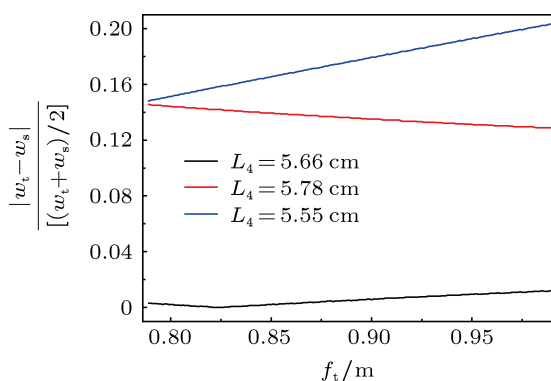


图 4 SESAM 处子午光斑与弧矢光斑相对差值随 f_t 的变化

综上所述, 我们设计的 Z 形腔不仅能满足 SESAM 处有较小光斑的要求, 有利于 SESAM 饱和. 而且, 通过传播圆设计方法, 找到了在 SESAM

上补偿像散的最佳位置, 使 SESAM 上有较好的光斑质量, 满足实现稳定连续锁模的条件.

3 实验

根据图 1 设计的谐振腔草图, 我们得到了能够补偿 SESAM 处像散的被动锁模 Z 形折叠谐振腔, 如图 5 所示. 增益介质和抽运采用的是北京吉泰基业科技有限公司的 GTPC-75S 侧泵模块, 增益介质为 Nd:YAG, 尺寸为 $\Phi 3 \times 65$ mm, 增益介质被围绕着它的 12 块 LD 阵列侧泵; 侧泵模块最大电流 25 A 对应的输出功率为 75 W (冷却水温度 20 °C, 腔长为 170 mm 的平平腔, 输出镜透过率 20%). M_1 为对 1064 nm 光透过率为 5% 的输出镜, M_2, M_3 为 HR@1064 nm 曲面镜, 曲率半径分别为 50 cm 和 10 cm, M_4 为由中科院半导体所提供的 SESAM, L_1, L_2, L_3, L_4 分别为 7.95 cm, 40.12 cm, 80.26 cm, 5.66 cm, 对应的腔长约为 1.4 m. 图 5 中, p.p. 表示晶体主平面, h 为晶体端面至主平面的距离. 需要注意的是, 镜 M_1 和 M_2 到 Nd:YAG 热透镜晶体左右两主面 (不是晶体端面) 的距离, 等于图 1 中两镜到热透镜的距离即 $L_{1,h}$ 和 $L_{3,h}$. 对于焦距很长的热透镜, 其主面的位置近似为 $h = l/2n_0$, 该值与焦距长度无关. 其中 l 是增益晶体的长度, n_0 是增益晶体在激发波长处的折射率, 当热透镜焦距大于 15 cm 时, 上述近似引起的误差小于 0.5%^[7,10,11]. 图 5 谐振腔的整个长度为约 1.4 m, 比图 1 的等效谐振腔长 $(l - l/n_0) = 0.29$ cm.

根据上面设计的 Z 形腔, 我们进行锁模实验, 实验中利用 1 GHz 带宽的高速数字示波器 (DSO6104A, 安捷伦, 美国) 和高速光电探测器 (PIN2-02-13, 海特光电, 中国) 对锁模脉冲的输出特性进行观察. 图 6 给出了两种不同的谐振腔的锁模实验结果, 这两种谐振腔的差异在于图 6(a), (b) 中 $L_4 = 5.66$ cm, 该谐振腔对应图 3 中, SESAM 处子午光斑和弧矢光斑大小相等, 即 SESAM 处为圆形光斑, SESAM 的像散得到补偿; 图 6(c), (d) 中 $L_4 = 5.55$ cm, 该谐振腔对应图 3 中, SESAM 处的光斑子午和弧矢差距较大, 即 SESAM 处为明显的椭圆光斑, 像散比较明显.

$L_4 = 5.66$ cm 的激光器的出光阈值电流为 6.2 A, 当 LD 抽运电流增大至 7.1 A 时能获得稳定的连续锁模, 此时激光器的输出功率为 130 mW; 当 LD 驱动电流为 9.4 A, 激光器的输出功率为 620 mW,

图 6(a), (b) 为此时的输出脉冲序列图. 此时激光器实现了稳定连续锁模, 脉冲重复频率约为 102 MHz. 在图 3 中, 我们得知, 当 SESAM 位于 5.66 cm 附近时, 子午光斑与弧矢光斑的相对差值随着 L_4 变化缓慢. 这表明 SESAM 放置在该位置时, 锁模激光器

对外界干扰引起腔镜振动不敏感. 根据前面的图 4, 我们已得知, 当 SESAM 位于 5.66 cm 附近时, 子午和弧矢光斑半径的相对差值较小, 而且随着 f_t 的变化不明显. 理论和实验都表明, 该锁模激光器抗温度干扰性强.

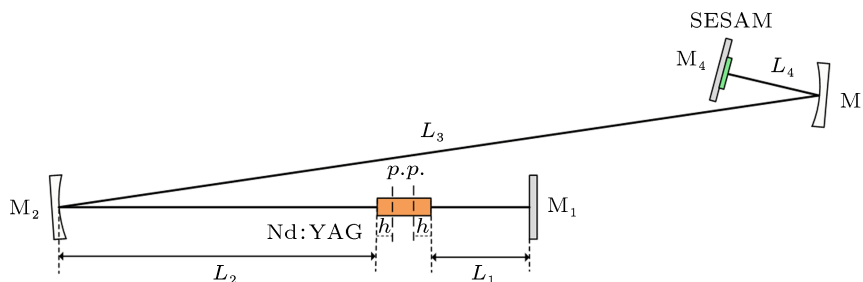


图 5 Z 形腔结构示意图

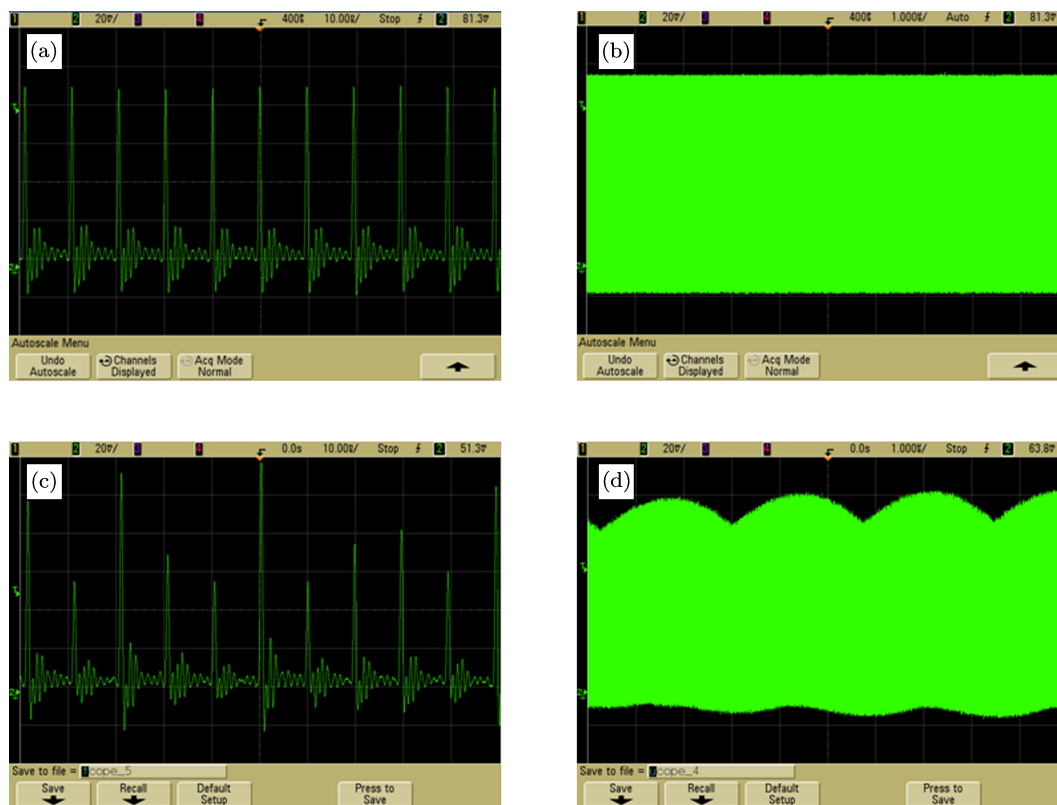


图 6 SESAM 位于不同位置时的输出脉冲序列 (a) $L_4 = 5.66$ cm 短时间脉冲序列; (b) $L_4 = 5.66$ cm 长时间脉冲序列; (c) $L_4 = 5.55$ cm 短时间脉冲序列; (d) $L_4 = 5.55$ cm 长时间脉冲序列

图 6(c), (d) 中 $L_4 = 5.55$ cm, 此时, 激光器的锁模脉冲序列不太稳定, 呈现出锁模脉冲的峰值不平坦, 外界的轻微扰动均能影响锁模的状态, 该锁模激光器对于干扰较为敏感. 同样地, 由图 3 我们知道, $L_4 = 5.55$ cm 时, SESAM 处的子午光斑与弧矢光斑大小不等, SESAM 上的光斑是一椭圆, 且处于子午光

斑与弧矢光斑的相对差值随 L_4 变化较大, 表明该锁模激光器 SESAM 处的像散对外界干扰引起腔镜振动比较敏感, 抗干扰性较差. 根据图 4 我们已得知, 当 SESAM 位于 5.55 cm 附近时, 子午和弧矢光斑半径的相对差值较大, 而且随着 f_t 的变化较明显. 理论和实验都表明, 该锁模激光器抗温度干扰

性差. 对比本文的理论研究与实验结果, 可知它们的一致性非常好.

4 结 论

本文提出一种基于传播圆补偿像散的被动锁模谐振腔设计方法. 研究表明, 当 SESAM 位于子午和弧矢传播圆交汇处附近时, SESAM 处子午光斑与弧矢光斑大小几乎相等, 像散得到补偿. 该

谐振腔对外界干扰引起腔镜振动和热透镜焦距的变化等均不敏感, 谐振腔的抗干扰性很强. 实验上可获得的稳定的连续锁模激光脉冲. 反之, 谐振腔像散较大, 谐振腔对外界干扰敏感, 谐振腔抗干扰性很差, 实验上则表现为激光器的锁模脉冲序列不稳定. 理论研究与实验结果相符合. 利用本文提出的被动锁模激光器谐振腔设计方法, 能够简单、有效地找到 SESAM 处消像散的最佳位置, 且腔形结构简单, 容易调节.

-
- [1] Keller U, Miller D A B, Boyd G D, Chiu T H, Ferguson J F, Asom M T 1992 *Opt. Lett.* **17** 505
 - [2] Torben S, Thomas M, Kjartan F, Søren L F, Christian P 2005 *J. Opt. A: Pure Appl. Opt.* **7** 645
 - [3] Huang K G, Lee W K, Wong S P, Zhou J Y, Yu Z X 1996 *J. Opt. Soc. Am. B: Opt. Phys.* **13** 2863
 - [4] Wen Q, Sun L Q, Wang Y G, Zhang E Y, Tian Q 2009 *Opt. Express* **11** 8956
 - [5] Zhang G Y, Guo S G 2003 *Graphic Analysis and Design Method of Optical Resonator* (Beijing: National Defence Industry Press) pp1–10 (in Chinese) [张光寅, 郭曙光 2003 光学谐振腔的图解分析与设计方法 (北京: 国防工业出版社) 第 1—10 页]
 - [6] Geng A C, Zhao C, Bo Y, Lu Y F, Xu Z Y 2008 *Acta Phys. Sin.* **57** 6987 (in Chinese) [耿爱丛, 赵慈, 薄勇, 鲁远甫, 许祖彦 2008 物理学报 **57** 6987]
 - [7] Song F, Zhang C B, Ding X, Xu J J, Zhang G Y, Leigh M, Peyghambarian N 2002 *Appl. Phys. Lett.* **81** 2145
 - [8] Lü B D 2003 *Laser Optics-Beam Characterization, Propagation and Transformation, Resonator Technology and Physics* (3th Ed.) (Beijing: Higher Education Press) p390 (in Chinese) [吕百达 2003 激光光学 — 光束描述、传输变换与光腔技术物理 (第三版)(北京: 高等教育出版社) 第 390 页]
 - [9] Koechner W 2006 *Solid-State Laser Engineering* (Sixth Edition) (New York: Springer Science+Business Media)
 - [10] Magni V 1986 *Appl. Optics* **25** 107
 - [11] Lancaster D G, Dawes J M 1998 *Opt. Laser Technol.* **30** 103

Method of designing astigmatic compensation cavity for mode-locked laser based on propagation circle*

Zhang Xiao-Jun¹⁾ Yang Fu²⁾ Wang Yong-Gang³⁾ Sun Li-Qun⁴⁾
Wen Qiao^{1)†} Niu Han-Ben¹⁾

1) (Key Laboratory of Optoelectronic Devices and Systems of Ministry of Education and Guangdong Province, College of Optoelectronic Engineering, Shenzhen University, Shenzhen 518060, China)

2) (College of Science, HeBei North University, Zhangjiakou 075000, China)

3) (Department of Applied Physics and Materials Research Center, Polytechnic University, Hong Kong, China)

4) (State Key Laboratory of Precision Measurement Technology and Instruments, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

(Received 13 June 2012; revised manuscript received 24 August 2012)

Abstract

The cavities of ultrashort pulsed lasers are mostly based on folded resonators with multi-mirrors. Astigmatism is an important issue to affect the performance of the mode-locked laser. An effective method of astigmatic ally compensating a continuous-wave passively mode-locked laser is presented in this paper. This method, in which the resonator propagation circle graphic theory is used, is easy and intuitive to seek the optimal location of the semiconductor saturable absorber mirror (SESAM), where the astigmatism can be compensated. Theoretical results show that the tangential and the sagittal spot size at the SESAM are equal and that the astigmatism can be compensated, when an SESAM is located at the tangential and the sagittal propagation circle intersection. The mode-locked resonator is insensitive to external perturbation including the vibration and the change of the thermal lens focal length, which leads to the instability of the mode locking operation. The antijamming ability of the resonator is outstanding. The experimental results indicate that the mode-locked laser works in a stabilized continuous-wave mode locking state and operates extremely steadily, when the SESAM is located at the tangential and the sagittal propagation circle intersection. The experimental results of the mode locking lasers show good agreement with the theoretical studies.

Keywords: continues wave mode-locked, astigmatic compensation, semiconductor saturable absorber mirror, propagation circle

PACS: 42.60.Da, 42.60.Fc, 42.60.Lh

DOI: 10.7498/aps.62.024211

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 61108026, 61001184, 61101175), the Specialized Research Fund for the Doctoral Program of Higher Education of China (Grant No. 20114408120001), the Foundation for Distinguished Young Talents in Higher Education of Guangdong, China, (Grant No. LYM11107), the Promotion and Development Program of Key Laboratories Supported by the Science & Technology Research Fund of Shenzhen Government (Grant No. CXB201005240011A), and the Science Foundation of Shenzhen University (Grant No. 201033).

† Corresponding author. E-mail: wenqiao@szu.edu.cn