

高光束质量、高功率稳定性激光器的设计及实验研究

安然 范小贞 卢建新 文侨

Design and experimental study on high quality beam and high stability power of laser

An Ran Fan Xiao-Zhen Lu Jian-Xin Wen Qiao

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 67, 074201 (2018) DOI: 10.7498/aps.67.20171932

在线阅读 View online: <http://dx.doi.org/10.7498/aps.67.20171932>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn/CN/Y2018/V67/I7>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

光纤放大器放大自发辐射特性与高温易损点位置

Amplified spontaneous emission characteristics and locations of high temperature vulnerable point in fiber amplifiers

物理学报.2017, 66(23): 234206 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.66.234206>

一种基于金刚石多层波导结构微环谐振器的仿真分析

Simulation analysis of micro-ring resonator based on diamond multilayer waveguide structure

物理学报.2017, 66(20): 204203 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.66.204203>

高功率梯度掺杂增益光纤温度特性理论研究

Theoretical study of the temperature distribution in high power gain fiber of gradient doping

物理学报.2016, 65(10): 104204 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.65.104204>

外腔共振和频系统中阻抗匹配的理论研究

Theoretical investigation of impedance matching in the process of sum-frequency generation in an external resonator

物理学报.2016, 65(4): 044207 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.65.044207>

一种带有U形波导的交叉信道单微环电光开关

A cross bus single microring electro-optical switch with U bend waveguide

物理学报.2014, 63(9): 094207 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.63.094207>

高光束质量、高功率稳定性激光器的设计及实验研究*

安然 范小贞 卢建新 文侨†

(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)

(2017年8月31日收到; 2018年1月23日收到修改稿)

高光束质量、高功率稳定性激光器在激光加工、激光测量等领域具有广泛的用途. 为了实现激光器腔内光斑聚焦同时减少色散和体积, 人们常常将曲面反射镜用在激光谐振腔中, 但光束倾斜入射到曲面反射镜往往会引起像散, 从而导致光斑质量恶化, 并降低激光器的性能. 另一方面, 在高功率激光器或超短脉冲激光器中, 激光增益介质热透镜焦距的起伏, 是导致激光输出功率波动的主要原因之一. 针对激光器的像散和功率波动这两个问题, 本文提出了一套简单高效的解决方案, 在考虑像散补偿和热透镜效应的基础上, 基于传播变换圆理论, 首次提出一种可实现高光束质量、高功率稳定性激光器谐振腔的设计方法, 并对采用该方法所设计出的超短脉冲激光器进行理论与实验研究. 研究结果表明, 利用该方法设计的激光谐振腔, 两端臂像散能够完全被补偿, 实验上实现了基模高斯光束输出; 当激光晶体热透镜焦距改变时, 该方法所设计出的激光谐振腔内各关键位置光斑半径的变化, 显著地小于普通谐振腔, 在相同外界条件下, 其输出激光功率稳定性明显优于普通激光器.

关键词: 高光束质量, 高功率稳定性, 谐振腔设计

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

DOI: 10.7498/aps.67.20171932

1 引言

随着超短脉冲激光器在激光精密微加工、激光测量等应用领域的推广^[1-4], 人们对激光器功率稳定性、光束质量等性能指标的要求不断提高. 谐振腔是激光器的重要组成部分之一, 激光器光束质量和输出功率稳定性等性能的优劣, 在很大程度上取决于激光谐振腔设计质量的好坏. 在固态超短脉冲激光器中, 为了减小激光器的体积, 同时在锁模器件处获得足够的功率密度, 人们常采用曲面反射镜来折叠谐振腔, 光束倾斜入射到曲面反射镜往往会引起像散, 直接导致激光器光束质量下降. 与激光器光束质量一样, 激光功率稳定性也是衡量激光性能的重要参考指标. 固态超短脉冲激光器输出

功率不稳定的主要因素有抽运源功率的波动、腔内晶体热效应^[5,6]引起的热透镜焦距波动、激光器机械振动以及激光模式跳变等, 其中增益介质热透镜焦距波动是影响激光功率稳定性的关键因素, 也是最难克服的因素之一. 因此设计高光束质量、高功率稳定性激光器谐振腔一直以来是激光器设计者们所期望解决的技术难题, 是提升激光器性能行之有效的方法之一. 针对像散补偿、激光热效应引起的功率波动问题, 目前国内外已有不少研究者就这两个问题单独展开研究^[7-16], 主要使用基于 $ABCD$ 矩阵^[7-9]的数值计算方式等进行了研究. 但这些方法用于设计激光谐振腔时, 需要繁琐的数学运算, 而且不够直观, 很难找出谐振腔的动态变化及设计的最佳方案. 最近, 文侨等提出了采

* 国家重大科研仪器设备研制专项(批准号: 2012YQ200182)、深圳市协同创新科技计划-深港创新圈联合研发项目(批准号: SGLH20150205162842428)和深圳市基础研究项目(批准号: JCYJ20170302153540973, JCYJ20170412111625378)资助的课题.

† 通信作者. E-mail: wenqiao@szu.edu.cn

用折叠腔曲面镜像散相互补偿的方法,并推导出了折叠腔双端臂像散补偿的解析解,利用所推导出的解析表达式,可以设计高光束质量的激光器.本文同时考虑像散补偿和热透镜效应,采用传播圆图解法^[14,17,18]找到一种高光束质量、高功率稳定性激光器谐振腔设计方法,该方法无需繁琐的计算,直观清晰,简便高效,易于找出激光谐振腔的最佳设计方案.利用所设计的激光谐振腔,通过实验研究该激光器的光束质量和功率稳定性.

2 设计方法

在基于可饱和吸收体的被动锁模超短脉冲激光器中,为了便于半导体可饱和吸收镜(semiconductor saturable absorber mirror, SESAM)的漂白,一般要求SESAM处有足够高的能量密度.设计超短脉冲激光器时,一般先根据实际情况选定SESAM处的光斑半径大小 ω_0 .

如图1所示,SESAM位于 M_0 处,其光束参数 b_0 和光斑半径 ω_0 之间的关系可表示为

$$b_0 = \frac{\pi\omega_0^2}{\lambda}. \quad (1)$$

在 M_0 右侧某一位置倾斜放置曲面反射镜 M_1 ,过侧焦点 F_0 与光轴相切于 M_1 可画出圆(π_1),此圆直径表示 M_1 处光斑大小;过侧焦点 F_0 ,同时与曲面镜前表面相切可画一圆,此圆的直径表示曲面镜处波前曲率半径,任意给定曲面镜 M_1 的焦距 f_1 与倾斜角 θ_1 ,则曲面反射镜在子午和弧矢面的焦距分别为:

$$f_t = f \cos \theta, \quad (2)$$

$$f_s = \frac{f}{\cos \theta}. \quad (3)$$

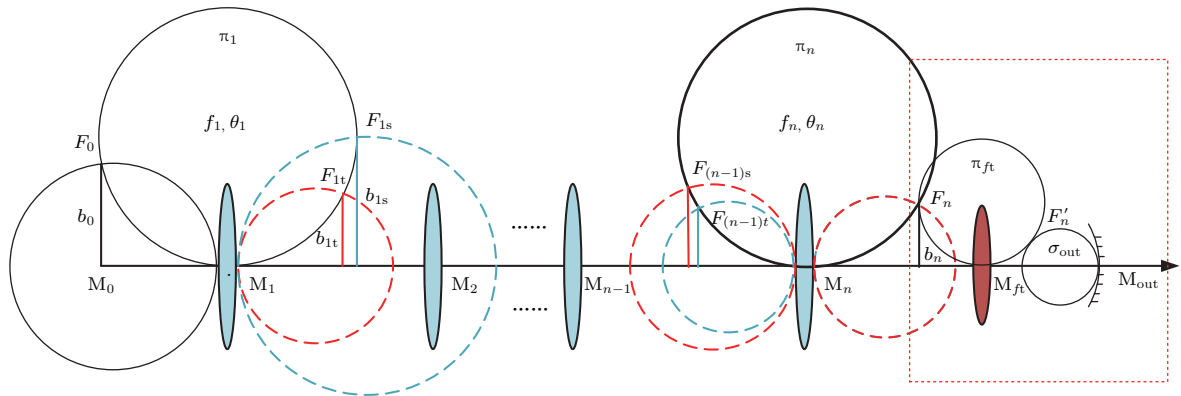


图1 基于传播圆法设计的高光束质量、高功率稳定性激光器谐振腔设计图

Fig. 1. Resonator design of high beam quality and high power stability laser based on propagating circle.

根据透镜前后高斯光束曲率半径的关系

$$\frac{1}{R'} = \frac{1}{R} - \frac{1}{f}, \quad (4)$$

我们可以求得 R'_t 和 R'_s 的大小,其中上标'表示像平面.则分别以 R'_t 和 R'_s 为直径画圆,圆心在光轴上,且与 M_1 后表面相切,这两个圆与 M_1 处 π 圆的交点即为子午面(红色)弧矢面(蓝色)的侧焦点,于是子午(红色)弧矢面(蓝色)束腰参数 b_{1t} 和 b_{1s} 便可得知.由于 b_{1t} 和 b_{1s} 既是曲面镜 M_1 的像方参数,也是曲面镜 M_2 的物方参数,此时,重复上述操作,可得到 M_2 像方的束腰参数 b_{2t} 和 b_{2s} .以此类推,最后可得到 M_{n-1} 像方束腰参数 $b_{(n-1)t}$ 和 $b_{(n-1)s}$.要实现 M_n 镜后像散补偿,必须使 M_n 镜上子午、弧矢面光斑大小相等,因此,对 M_n 的放置位置有严格要求.该要求的做图步骤为:同时过子午面弧矢面侧焦点 $F_{(n-1)t}$ 和 $F_{(n-1)s}$,与光轴相切可以画出一个圆,其切点位置就是曲面反射镜 M_n 的放置位置.相切圆即为 M_n 处的 π_n 圆,根据 π_n 圆的定义,可知子午、弧矢面光束在 M_n 处光斑大小完全相同. M_n 镜位置确定后, M_n 镜处物方子午、弧矢面波前曲率半径也可知.要实现 M_n 镜后的像散得到补偿,必须使 M_n 像方子午、弧矢面束腰重合,这样才能保证 M_n 处像方子午、弧矢面的波后曲率半径相同,结合(2)—(4)式,可推导出:

$$\frac{1}{R_t} - \frac{1}{R_s} = \frac{1}{f_n \cdot \cos \theta_n} - \frac{1}{f_n / \cos \theta_n}. \quad (5)$$

(5)式给出了在 M_n 镜出光斑半径相等的情况下, M_n 镜后光束曲率半径实现补偿时,焦距 f_n 与倾斜角 θ_n 之间的关系.以上是利用传播圆理论,采用图解法实现曲面镜像散相互补偿,从而实现高光束质量激光器谐振腔的设计方法.

在此基础上, 下面介绍采用图解法, 设计出热透镜焦距波动对激光功率影响最小的谐振腔, 从而实现激光器的高稳定输出功率. 一般情况下, 当激光增益介质采用非布儒斯特角放置时, 激光束垂直入射到热透镜上, 热透镜不会产生新的像散; 因此, M_n 镜后的像散仍然可以获得完全补偿. 此时, 选择一输出镜 M_{out} , 当输出镜的 σ_{out} 圆与热透镜处的 π 圆相切于像方侧焦点 F'_n 时 (此时 π 圆与 t 圆重叠), 该谐振腔对热不敏感, 这是符合高功率稳定的激光谐振腔设计条件.

接着分析热透镜焦距变化时谐振腔光参数变化过程. 如图 2 所示, 当输出镜 M_{out} 的曲率半径确定后, 谐振腔满足稳定腔条件时, 不管热透镜焦距怎么变化, 输出镜 M_{out} 处的 σ_{out} 圆固定不变; 透镜焦距变化时, σ_{out} 圆经过热透镜的像 σ'_{out} 和 σ^*_{out} 与 π 圆交点在 F_n 附近来回移动, 在符合高功率稳定的激光谐振腔设计条件时 (π 圆与 t 圆重叠, 图 2 中用 π_{ft} 表示), F_n 的移动是几乎可以忽略的, 因此热透镜左侧的光参数变化也是可以忽略的. 相反地, 若 π 圆与 t 圆不重叠 (图中用 π^*_{ft} 表示 π 圆), 对于输出镜 σ_{out} 圆同样的像 σ'_{out} 和 σ^*_{out} , σ_{out} 圆的像与 π^*_{ft} 的交点变化较之前明显, 表示侧焦点变化明显, 即光束束腰变化明显增大.

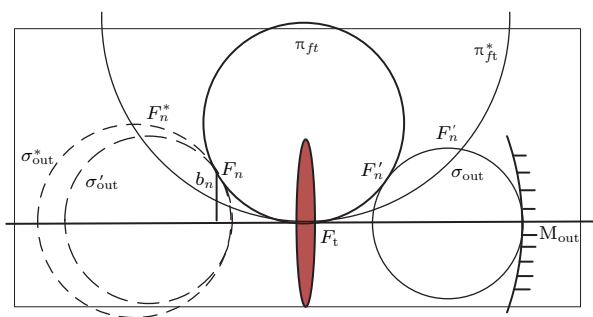


图 2 热透镜焦距变化动态分析

Fig. 2. Dynamic analysis of focal length varies with thermal lens.

3 理论分析

根据上述设计方法, 我们设计了如图 3 的激光谐振腔. 该谐振腔中各参数为 $\omega_0 = 40 \mu\text{m}$, $b_0 = 4.7242 \text{ mm}$, $L_1 = 53 \text{ mm}$, $f_1 = 50 \text{ mm}$, $\theta_1 = 8^\circ$, $L_2 = 780.1787 \text{ mm}$, $f_2 = 200$, $\theta_2 = 12.258^\circ$, 这些条件符合高光束质量激光器谐振腔的设计条件. 利用非对称平平腔临界稳定条件 [14,19,20], 我们测量出在抽运电流为 10 A 时热透镜焦距为

$f_t = 800 \text{ mm}$, 当 $L_3 = 195.3 \text{ mm}$, 输出镜选用平面镜时, 符合高功率稳定的激光谐振腔设计条件是 $L_4 = 56.97 \text{ mm}$. 为了方便, 我们将所设计的高光束质量、高功率稳定性激光器谐振腔称为优化腔.

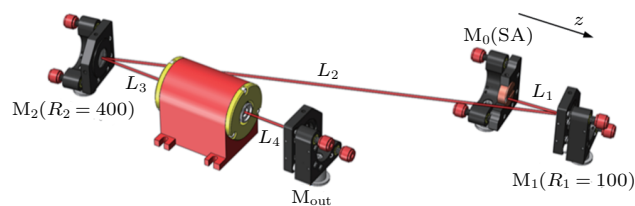


图 3 高光束质量、高功率稳定性激光器谐振腔结构图

Fig. 3. Resonator schematic configuration of high beam quality and high stability power laser.

3.1 设计的激光器实现高光束质量的理论分析

为了验证我们所设计的激光器谐振腔两端臂的像散可获得补偿, 可输出高光束质量的激光, 利用 $ABCD$ 矩阵进行验证计算, 图 3 谐振腔 (优化腔) 的腔内各点光斑大小如图 4 所示. 从图 4 中可知, M_0-M_1 端与 M_2-M_{out} 端各点子午弧矢面光斑大小相同, 中间端 M_1-M_2 子午弧矢面光斑大小不同, 说明两端臂的像散获得完全补偿.

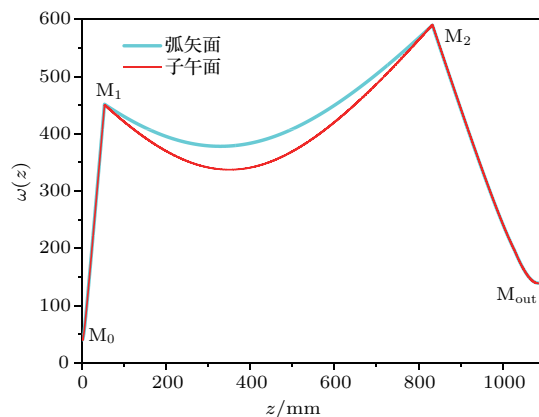


图 4 优化腔的腔内各点光斑大小

Fig. 4. Beam spot size in optimized cavity.

当外界环境等因素变化时, 热透镜的焦距将发生改变, 假设其焦距变化范围在 700—900 mm 内. 为了研究所设计的激光谐振腔的性能, 选择一个不满足上述设计方法和条件的谐振腔作为对比腔型进行研究. 例如, 将优化腔参数中的 f_2 改成 250 mm, 显然, 该谐振腔不满足高光束质量、高功率稳定性激光器设计方法和条件, 我们称该腔为普通腔.

图5给出了优化腔、普通腔两种不同腔型, 两端的臂像散量随热透镜焦距变化情况. 图中纵坐标为当热透镜焦距变化时, 腔内不同位置的子午、弧矢面光斑半径最大差值的绝对值, 即反映了该位置的最大像散量. 从图中可知, 热透镜焦距在700—900 mm 范围变化时, 优化谐振腔两端的像散仍然得到了很好的补偿, 而普通谐振腔显然不具备这一功能. 这意味着我们所设计的优化谐振腔, 在图5不同的热透镜焦距下, 均可输出高光束质量的光斑.

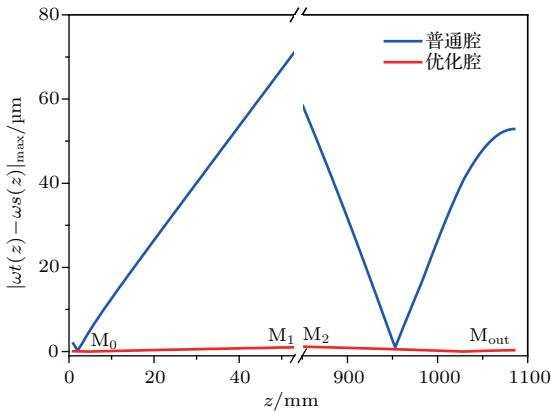


图5 谐振腔两端的臂像散量随热透镜焦距变化情况
Fig. 5. Astigmatism in two arms of laser versus focal length of thermal lens.

3.2 所设计的激光器实现高功率稳定性的理论分析

SESAM的反射率依赖于入射光强度, 当热透镜焦距改变引起SESAM处光斑变化时, 意味着腔内净增益将发生变化, 即激光输出功率发生波动, 严重时甚至会导致锁模失败. 图6为SESAM处子午面、弧矢面光斑半径的相对变化值随着热透镜焦距变化而发生变化的情形. 从图中可知, 在我们所设计的优化腔中, 在无论子午面还是弧矢面上, 热透镜焦距波动引起SESAM处光斑大小的变化几乎可以忽略不计, 而对普通腔显然不具备这种优势.

我们所设计的优化谐振腔, 不仅确定了各曲面镜之间的约束关系, 而且寻找到了该激光器中, 放置激光增益介质的最佳位置. 图7给出了晶体放置在不同位置, 当激光热透镜焦距在700—900 mm变化时, SESAM处子午、弧矢面上光斑半径的相对变化情况. 图7中的横坐标 $\Delta L_3 = 0$ 对应着我们所设计的优化谐振腔, ΔL_3 值表示增益介质放置位置

偏离优化腔时, 导致图3中曲面镜与增益介质之间距离 L_3 的改变量. 从该图中可知, $\Delta L_3 = 0$ 时, 热透镜焦距变化时引起SESAM处光斑半径的变化最小. 热透镜引起SESAM处光斑半径变化越小, 越有利于谐振腔的功率稳定和锁模性能提高.

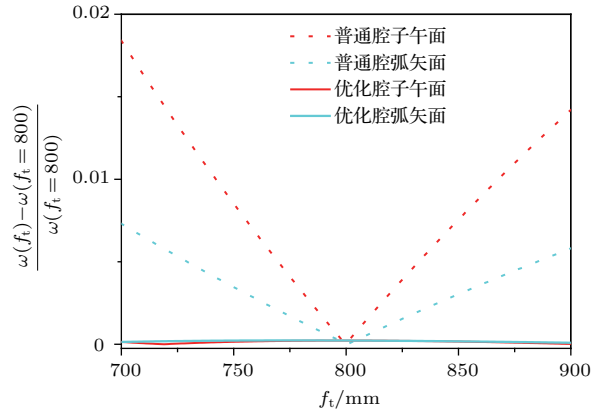


图6 SESAM处光斑变化量随热透镜焦距的改变情况
Fig. 6. Amount of laser beam spot radii change at SESAM vary with focal length of thermal lens.

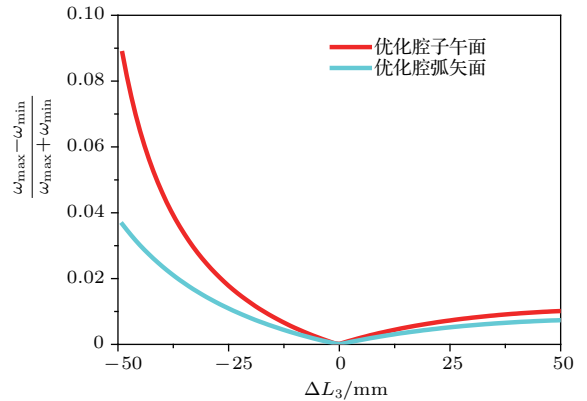


图7 热扰动时热透镜不同位置对SESAM上光斑大小的影响
Fig. 7. Amount of laser beam spot radii change at SESAM vary with ΔL_3 when thermal perturb focal length of thermal lens.

以上主要研究了热透镜焦距变化时, 超短脉冲激光器关键位置 (SESAM处) 光斑半径的变化规律, 下面研究热透镜焦距对腔内其他位置光斑的影响. 从图8中可知, 热透镜焦距在线相同的变化范围内 (700—900 mm), 优化腔内各点光斑变化明显小于普通谐振腔. 根据图6和图8可知, 与对比的普通谐振腔相比, 优化腔不仅在腔内的关键位置 (SESAM处), 而且在腔内其他位置光斑半径的变化均达到最佳情况.

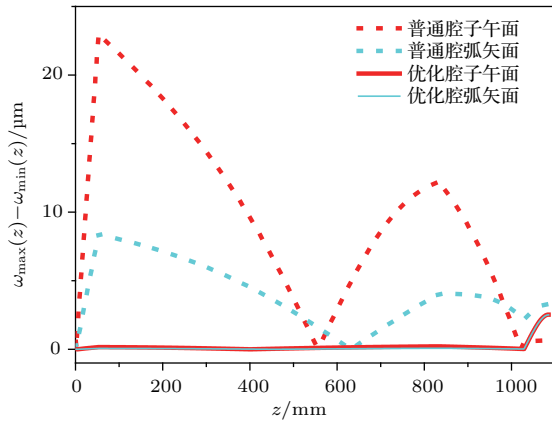


图8 热透镜焦距变化时谐振腔内不同位置光斑大小变化情况

Fig. 8. Amount of laser beam spot radii change vary with optical axis z (zero point from M_{out} , following M_2 , M_1 and M_0) intracavity.

4 实验研究

为了验证设计及理论研究的正确性, 我们根据所设计的高光束质量、高功率稳定性激光器谐振腔结构图, 在Nd:YAG侧泵超短脉冲激光器中进行实验研究. 增益介质和抽运采用北京吉泰基业科技有限公司的GTPC-75S侧泵模块, $\Phi 3 \text{ mm} \times 65 \text{ mm}$ 的Nd: YAG晶体被围绕着它的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 $20 \text{ }^\circ\text{C}$, 腔长为170 mm的平平腔, 输出镜透过率20%). 实验中采用1 GHz带宽的高速数字示波器(DPO4104B, Tektronix, Inc, USA)和高速光电探测器(PIN2-11-12, Hi-Teck Optoelectronics Co. Ltd, China)对锁模脉冲进行观察, 利用功率计(30A-P-17, Optronics Solutions Ltd, Israel)对输出光功率进行测量.

为了研究所设计的优化腔锁模的稳定性, 采用恒温冷水机冷却晶体, 当水温为 $20 \text{ }^\circ\text{C}$ 时, 优化腔、普通腔在都可以获得连续锁模, 如图9所示. 为了进一步研究两种腔型热稳定性的差异, 将恒温水箱的水温分别调整到 $15 \text{ }^\circ\text{C}$ 和 $25 \text{ }^\circ\text{C}$, 此时发现优化腔仍然可以实现稳定的连续锁模, 但普通腔锁模开始出现了紊乱, 有时甚至会出现失锁, 如图10所示.

我们采用光束分析仪(Dataray, BeamMap2-XYZ Scanning Slit System)测量了优化腔在近场、远场的光斑形貌, 从图11(a)可知, 优化腔近场、远场激光器输出的都是标准的基模光束, 说明我们所设计的优化腔激光器中的腔像散获得了完全补偿, 输出高光束质量的激光光束, 与理论分析图4的结果相一致. 采用该光束分析仪测量优化腔激光器输出光束子午面、弧矢面的 M^2 因子分别为1.03和

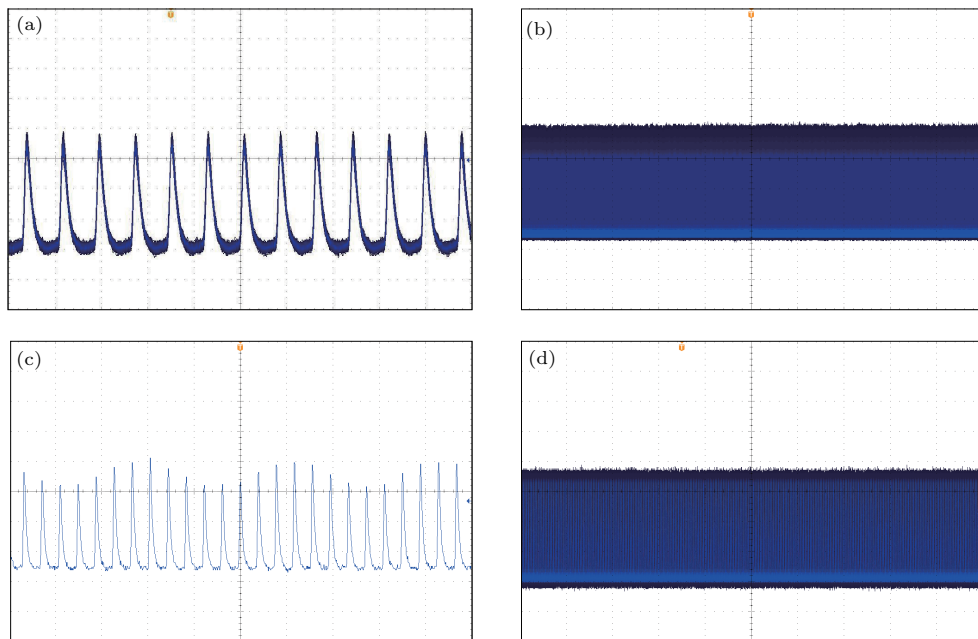


图9 水温 $20 \text{ }^\circ\text{C}$ 时, 优化腔、普通腔的锁模脉冲序列图 (a), (b) 优化腔输出脉冲序列; (c), (d) 普通腔输出脉冲序列

Fig. 9. oscilloscope trace of the pulse envelope when laser crystal was cooled by $20 \text{ }^\circ\text{C}$ temperature cooled water: (a), (b) oscillograms of the mode-locked laser trains of optimized resonators; (c), (d) oscillograms of the mode-locked laser trains of universal resonators.

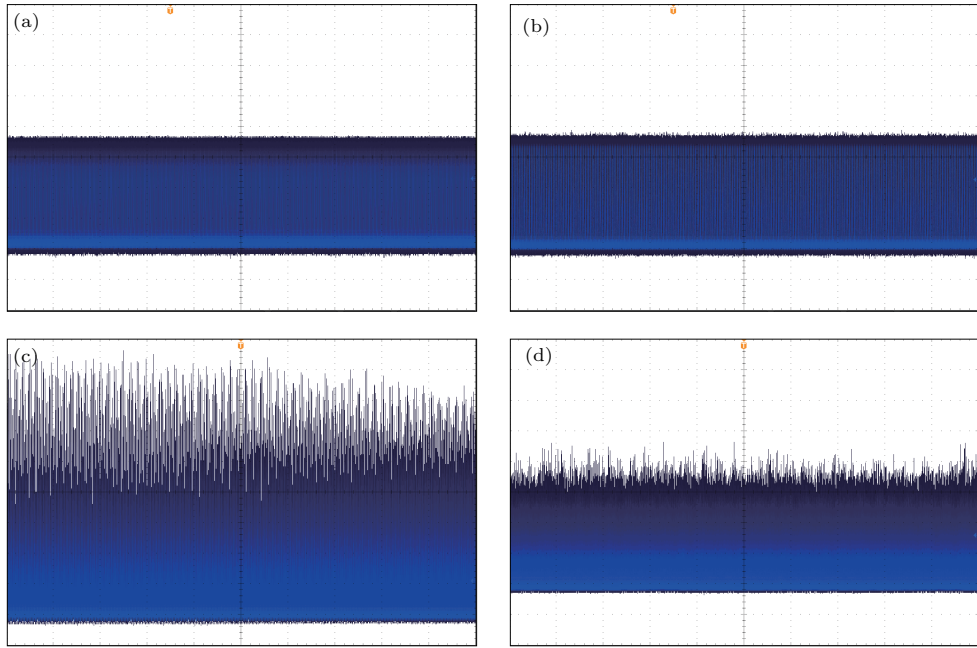


图 10 水温波动时, 优化腔、普通腔的锁模脉冲序列图 (a), (b) 优化腔输出脉冲序列; (c), (d) 普通腔输出脉冲序列 (a), (c) 水温为 15 °C, (b), (d) 水温为 25 °C
 Fig. 10. Oscillograms of the continuously mode-locked laser trains at different cooled water temperature: (a), (b) Oscillograms of the mode-locked laser trains of optimized resonators; (c), (d) oscillograms of the mode-locked laser trains of universal resonators; (a), (c) crystal was cooled by 15 °C temperature cooled water; (b), (d) crystal was cooled by 25 °C temperature cooled water.

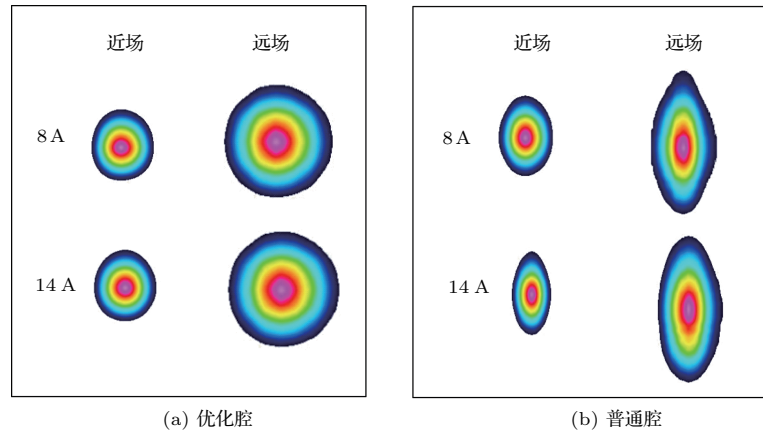


图 11 水温 20 °C 时, 优化腔、普通腔在不同抽运电流时的输出光斑图
 Fig. 11. Output spot intensity profiles for optimized resonators and universal resonators laser at different pump current when crystal was cooled by 20 °C temperature water.

1.05, 对比实验的普通谐振腔激光器输出光束子午面、弧矢面的 M^2 因子分别为 1.68 和 1.81, 说明我们所设计的激光器可实现高光束质量的激光器输出. 进一步研究抽运电流对光斑形状的影响, 抽运电流从 8 A 变化到 14 A 时 (对应热透镜焦距从 1025 mm 变为 525 mm), 优化腔激光器输出光斑的形貌几乎没有发生变化, 反映了优化腔激光器在不同热透镜焦距时, 均可以输出高光束质量的激光光束, 实验与理论结果完全符合. 而在对比实验的普通谐振腔

中, 激光器输出光斑为椭圆形状, 说明普通谐振腔中的像散没有获得完全补偿, 当抽运电流从 8 A 增大到 14 A 时, 光斑椭圆加剧, 光束质量继续变差.

下面对优化腔激光器和普通腔激光器的功率稳定性进行对比研究. 图 12 反映了激光晶体在三种不同水温 (15 °C, 20 °C, 25 °C) 时, 两种不同谐振腔 (优化腔、普通腔) 的激光器的功率稳定性. 实验中, 我们在不同时刻记录激光器的功率值, 每个条件下共记录 50 次, 然后根据这 50 次数

据求出激光器的平均值 P_{out} , 标准差 $\sigma_{P_{out}}$. 从图中可知, 优化腔激光器的功率稳定性明显优于普通腔. 普通腔激光器中, 即使功率波动最小的值 ($\sigma_{P_{out}}/P_{out} = 0.12$, 对应条件为水温 $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、抽运电流 10 A), 仍比在相同条件下的优化腔激光器高一个数量级(相同外界条件下, 优化腔激光器的 $\sigma_{P_{out}}/P_{out}$ 小于 0.01). 在水温 $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的条件下, 抽运电流 10 A 时, 优化腔激光器输出功率为 660 mW , 普通腔输出功率为 360 mW . 在优化腔激光器中, 激光晶体在三种不同水温 ($15\text{ }^{\circ}\text{C}$, $20\text{ }^{\circ}\text{C}$, $25\text{ }^{\circ}\text{C}$) 时功率波动均很小, 水温 $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 所对应的曲线(图中红色虚线)最平坦, 且值最小, 说明优化腔激光器在不同驱动电流下, 功率均非常稳定. 我们设计优化腔时, 晶体热透镜焦距是采用晶体在 $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 水温时所测量的值, 理论与实验研究相符合.

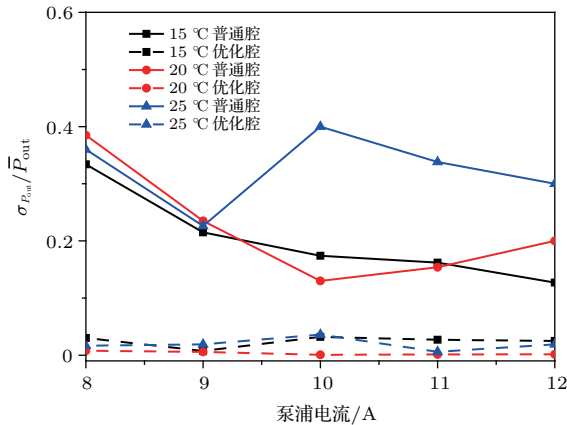


图 12 优化腔、普通腔激光器功率波动随电流的变化情况
Fig. 12. Fluctuation of output power change vary with pump current.

进一步研究激光晶体的水温变化引起激光器功率波动情况. 继续采用所设计的两种谐振腔激光器进行对比实验, 让它们分别工作在不同电流情况下, 晶体周围的水温在 $15\text{ }^{\circ}\text{C}$ — $25\text{ }^{\circ}\text{C}$ 范围变化, 每变化隔 $1\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时, 测量激光器的输出功率, 然后求出每个激光器在不同电流下, 水温在 $15\text{ }^{\circ}\text{C}$ — $25\text{ }^{\circ}\text{C}$ 变化时测量的 11 个输出功率的平均值 P_{out} 、标准差 $\sigma_{P_{out}}$. 图 13 给出了所设计的优化腔和普通腔, 增益介质的水温变化时激光器输出功率的波动情况. 从图中可知, 水温发生变化时, 优化腔激光器的相对标准差 $\sigma_{P_{out}}/P_{out}$ 优于 0.058 , 而普通腔激光器的值高于 0.64 , 说明与普通腔激光器相比, 优化腔激光器的功率稳定性提高了 1 个数量级. 我们设计优化腔激光器时, 采用的是驱动电流 10 A 对应的热

透镜焦距值 ($f_t = 800\text{ mm}$), 实验中驱动电流 10 A 时, 优化腔激光器的功率稳定性最佳; 驱动电流变化时, 优化腔激光器功率波动均较小, 且变化不大, 与图 6 中的理论研究结果非常符合.

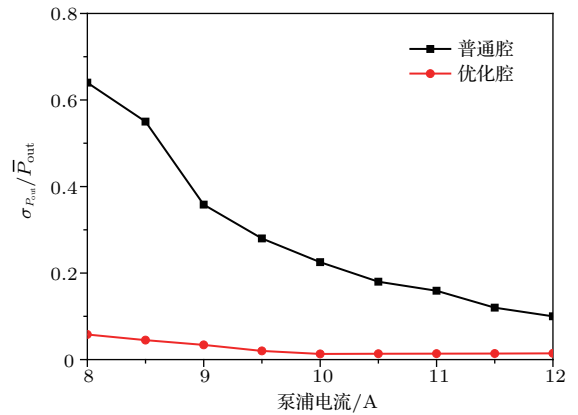


图 13 增益介质的水温变化引起激光器输出功率波动随抽运电流变化

Fig. 13. Fluctuation of output power change caused by cooled water temperature, vary with pump current.

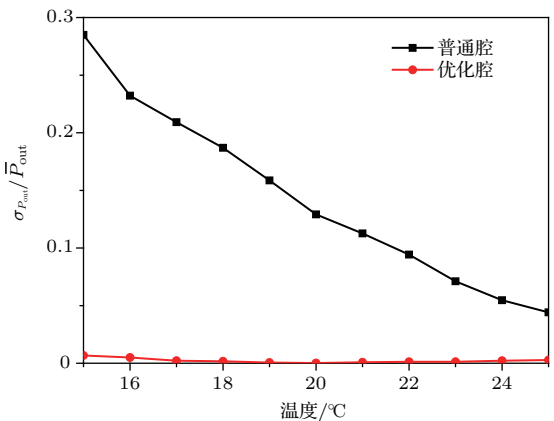


图 14 激光器输出功率随着温度的波动情况

Fig. 14. Fluctuation of output power changevary with cooled water temperature.

实验中, 优化腔采用抽运电流为 10 A 时所测的热透镜焦距值来设计, 因此我们着重分析抽运 10 A 时晶体周围的水温对优化腔输出功率的影响. 图 14 给出了抽运电流 10 A 时, 优化腔和普通谐振腔中激光输出功率的相对标准差随着温度的变化情况. 实验中, 在不同水温时, 每隔 1 min 记录 1 次激光输出功率, 实验中的每个点由 50 次实验数据来形成. 从该图可知, 晶体周围水温变化时, 优化腔激光器的输出功率相对标准差 $\sigma_{P_{out}}/P_{out}$ 明显小于普通腔激光器, 同时, 温度的变化对优化腔激光器输出功率稳定性的影响非常小, 实验与理论结果完全符合.

5 结 论

本文提出一种基于传播圆来设计高光束质量、高功率稳定性激光器的设计方法,并对采用该方法所设计的高光束质量、高功率稳定性超短脉冲激光器谐振腔进行理论与实验研究.理论研究结果表明,该方法不仅具有图解法直观、简便高效的优点,所设计的高光束质量、高功率稳定性激光谐振腔的两端臂像散可实现完全补偿,激光晶体热透镜焦距改变时,激光谐振腔关键位置及腔内各点光斑半径的变化都显著地优于普通谐振腔的值.实验研究结果表明,高光束质量、高功率稳定性激光谐振腔激光器,冷却激光晶体水温在较大的变化范围内,均可以实现稳定的连续锁模,而且可以输出基模光斑的激光光束,输出激光功率稳定性显著提高,实验与理论研究结果非常符合.

参考文献

- [1] Wu D, Chen Q D, Niu L G, Wang J N, Wang J, Wang R, Xia H, Sun H B 2009 *Lab. Chip.* **9** 2391
- [2] Xia H, Wang J, Tian Y, Chen Q D, Du X B, Zhang Y L, He Y, Sun H B 2010 *Adv. Mater.* **22** 3204
- [3] Wen Q, Sun L Q, Zhang E Y, Tian Q 2009 *Mod. Phys. Lett. B* **23** 2585
- [4] Wen Q, Sun L Q, Tian Q, Zhang E Y 2010 *J. Opt.* **12** 015207
- [5] Zhang X Y, Zhao S Z, Wang Q P, Zhang Q D, Ozygus B, Weber H 2000 *Chin. J. Laser* **27** 777 (in Chinese) [张行愚, 赵圣之, 王青圃, 张其第, Ozygus B, Weber H 2000 中国激光 **27** 777]
- [6] Wang Q Y 2011 *M.S. Dissertation* (Xi'an: Xidian University) (in Chinese) [王起阳 2011 硕士学位论文(西安:西安电子科技大学)]
- [7] Skettrup T, Meelby T, Faerch K, Frederiksen S L, Pedersen C 2000 *Appl. Opt.* **39** 24
- [8] Skettrup T 2005 *J. Opt. A: Pure Appl. Opt.* **7** 645
- [9] Wen Q, Liang G W, Zhang X J, Liang Z S, Wang Y G, Li J, Niu H B 2014 *IEEE Photon. J.* **6** 15022136
- [10] Kogelnik H, Ippen E P, Dienes A, Shank C V 1972 *IEEE J. Quantum Electron.* **8** 373
- [11] Kane D 1989 *Opt. Commun.* **71** 113
- [12] Jamasbi N, Diels J C, Sarger L 1988 *J. Mod. Opt.* **35** 1891
- [13] Zhang X J, Yang F, Wang Y G, Sun L Q, Wen Q, Niu H B 2013 *Acta Phys. Sin.* **62** 024211 (in Chinese) [张小军, 杨富, 王勇刚, 孙利群, 文侨, 牛憨笨 2013 物理学报 **62** 024211]
- [14] Yefet S, Jouravsky V, Pe'er A 2013 *J. Opt. Soc. Am. B* **30** 549
- [15] Wen Q, Zhang X J, Wang Y G, Sun L Q, Niu H B 2014 *Opt. Express* **22** 2309
- [16] Narro R, Arronte M, Posada E D, Ponce L, Rodríguez E 2009 *Proc. SPIE.* **7499**
- [17] Zhang G Y 1977 *Laser J.* **4** 44 (in Chinese) [张光寅 1977 激光 **4** 44]
- [18] Zhang G Y 1981 *Laser J.* **8** 11 (in Chinese) [张光寅 1981 激光 **8** 11]
- [19] 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]
- [20] Liu J J, Ding S H, Ding Z, Jia H X 2015 *Ele-Optic Technol. Appl.* **30** 25 (in Chinese) [刘佳佳, 丁双红, 丁泽, 贾海旭 2015 光电技术应用 **30** 25]

Design and experimental study on high quality beam and high stability power of laser*

An Ran Fan Xiao-Zhen Lu Jian-Xin Wen Qiao[†]

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

(Received 31 August 2017; revised manuscript received 23 January 2018)

Abstract

High-performance lasers with high-quality beam laser and high-stability power are widely used for laser machining, laser precision measuring, etc. Reflection curved mirrors are widely used in lasers to provide several small intracavity focal spots and reduce the dispersion and volume of the laser. The primary disadvantage of using reflection curved mirrors in folded resonators is that relatively large angles of incidence deform the circular transverse pattern of the output beam and limit laser performance. In addition, in high power lasers or ultra short pulse lasers, the gain medium thermal lens focal length fluctuation is the primary cause of the instability of laser output power. This paper focuses on beam quality and power stability of laser, and an effective method of solving the two problems, i.e., astigmatism and instability power of laser, is presented. The laser resonator with high-quality laser beam and high-stability power is very easy and intuitive to design by this method, in which the resonator transform circle graphic theory is used and the thermal lens and astigmatism compensation is taken into account. The theoretical investigation shows that the astigmatism in two terminal arms of the folded laser resonator can be successfully eliminated by using this method, and the experimental measurements of the pattern of the laser output beam show that the deformations of spot intensity profiles in the two terminal arms can be simultaneously compensated for completely in the cavity, which is in good agreement with the analytical prediction. When the focal length of the laser crystal thermal lens varies, the variations of radii of spots not only at some key position, but also at all locations of the laser resonance designed by this method, are overtly smaller than the variation of the normal resonant cavity. The stability of the output laser power of the laser is better than that of a universal laser resonator under the same external conditions.

Keywords: high beam quality, high stability power, resonator design

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

DOI: 10.7498/aps.67.20171932

* Project supported by the Special-Funded Program on National Key Scientific Instruments and Equipment Development of China (Grant No. 2012YQ200182), Shenzhen-Hong Kong Innovation Cooperation Project, China (Grant No. SGLH20150205162842428), and Science and Technology Innovation Commission of Shenzhen, China (Grant Nos. JCYJ20170302153540973, JCYJ20170412111625378).

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