

输出镜透过率对半导体可饱和吸收镜锁模激光器的影响

陈博伦, 方晓惠*

广州大学物理与电子工程学院, 广东 广州 510006

摘要 对基于 808 nm 端面抽运的半导体可饱和吸收镜 (SESAM) 锁模 Nd:YVO₄ 激光器的输出特性进行研究, 通过选择不同透过率的输出镜, 设计一套针对不同输出功率需求的锁模激光器方案。首先系统地研究输出镜透过率对激光锁模功率和阈值的影响, 当输出镜透过率为 10%, 抽运功率为 8 W 时, 得到最高输出功率为 2.58 W 的连续锁模脉冲输出, 转换效率为 32.3%。当输出镜透过率为 0.1%, 抽运功率为 1 W 时, 得到低阈值连续锁模脉冲输出, 输出功率为 0.58 mW。然后自主搭建自相关光路测量锁模脉冲, 结合自相关曲线分析锁模激光器的寄生振荡情况, 通过优化输出镜抑制寄生振荡, 获得纯净的锁模脉冲, 其脉冲宽度为 13 ps, 重复频率为 150 MHz。

关键词 激光器; 半导体可饱和吸收镜锁模; 寄生振荡; 输出镜透过率; 低阈值; 自相关

中图分类号 O436

文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP56.191401

Influence of Output Mirror Transmittance on Semiconductor Saturable Absorber Mirror Mode-Locked Laser

Chen Bolun, Fang Xiaohui*

School of Physics & Electronic Engineering, Guangzhou University, Guangzhou, Guangdong 510006, China

Abstract This study focuses on the output characteristics of an 808-nm laser diode (LD) end-pumped Nd:YVO₄ mode-locked laser with a semiconductor saturable absorber mirror (SESAM). Further, a mode-locked laser with variable output power is designed by the selection of the output mirror transmittance. First, the influence of the output mirror transmittance on the laser mode-locked power and threshold is systematically studied. An output mirror transmittance of 10% and a pumping power of 8 W result in the highest output power of 2.58 W that corresponds to a conversion efficiency of 32.3%, whereas an output mirror transmittance of 0.1% results in a low continuous-wave mode-locked threshold of 1 W and an output power of 0.58 mW. Second, the mode-locked pulse width is measured by using a home-made autocorrelator; the parasitic oscillations of the laser are analyzed based on the autocorrelation traces. Thus, we obtain mode-locked pulses with a pulse width of 13 ps at a repetition rate of 150 MHz by optimizing the output mirror to suppress the parasitic oscillations.

Key words lasers; semiconductor saturable absorber mirror mode locking; parasitic oscillation; output mirror transmittance; low threshold; autocorrelation

OCIS codes 140.4050; 140.3480; 140.3410

1 引言

半导体可饱和吸收镜 (SESAM) 是一种非线性吸收介质, 其对激光谐振腔内激光的吸收与光的强度有关, 类似于被动调 Q, 对光场中较弱的光吸收很强, 对较强的光吸收则很弱, 这使得强度越大的激光

损耗越小, 多次振荡后即可选出特定的振荡模式, 从而得到锁模脉冲^[1]。1990 年, Keller 等^[2]首次把 SESAM 应用于被动锁模激光器, 获得了锁模脉冲输出; 之后很多研究人员对基于 SESAM 锁模的激光器进行大量研究。在高功率锁模输出的研究方面, 2007 年蔡志强^[3]使用 Nd:YVO₄ 为增益介质, 输

收稿日期: 2019-03-28; 修回日期: 2019-04-07; 录用日期: 2019-04-15

* E-mail: fangxiaphui@gzhu.edu.cn

出镜透过率为 16.5%，得到 4.8 W 连续锁模输出，转换效率为 34.3%；2010 年章强^[1]使用 3 个不同透过率(10%，20%，30%)的输出镜进行实验，利用透过率为 30%输出镜实现了高转换效率锁模，抽运功率为 35 W 时最高平均输出功率达 12.86 W，转换效率为 36.6%；2015 年葛维暘^[4]使用 35%透过率输出镜，实现了转换效率高达 47.5%的锁模，在抽运功率为 100 W 的条件下，平均输出功率稳定在 47.5 W。在低阈值锁模的研究方面，2008 年刘士华^[5]实现了低阈值连续锁模输出，输出镜透过率为 3.5%，抽运功率为 6.65 W 时，锁模激光输出功率为 2.12 W。目前 SESAM 已经被广泛应用于医疗、精密加工、非线性频率变换和遥感等领域^[6-8]。

本文首先研究不同输出镜透过率对锁模激光的影响，选择不同透过率(0.1%，1%，10%)的输出镜，使用低透过率的输出镜进行研究，分析阈值和转换效率随输出镜透过率的变化情况，希望获取更低的连续锁模阈值。然后，深入研究锁模脉冲形貌，由于实验条件的限制，大部分 SESAM 锁模的研究都采用带宽为 4 GHz 以下的示波器进行脉冲探测，无法准确测量百皮秒及以下的脉冲信号，如果存在寄生振荡引起的脉冲劈裂更无法观察到。本文利用自行搭建的自相关仪测量脉冲宽度，根据自相关拟合信号，研究晶体倾角和输出镜楔角对锁模激光脉冲的影响。通过以上研究，希望获得一套灵活的 SESAM 锁模激光器设计方案，并保证锁模质量好，满足各种高性能应用需求。

2 SESAM 锁模过程

SESAM 锁模分为三个过程：调 Q、调 Q 锁模和连续锁模，具体步骤如下：

1) 在腔内能量较低的阶段，自发辐射的荧光与达到阈值所产生的随机相位关系的激光纵模之间的干涉，导致初始激光脉冲光强度出现起伏，SESAM 产生弱调制，形成自调 Q；

2) 随着腔内能量的增加，SESAM 开始对激光进行较强调制，其对不同强度光的吸收特性不同，对强脉冲激光吸收较弱，对弱脉冲激光吸收较强，但腔内激光脉冲的能量还不足以将 SESAM 完全漂白，且由于激光器的自发辐射，腔内产生自调 Q 锁模；

3) 随着腔内能量进一步增加，SESAM 被完全漂白，SESAM 对光的振幅和相位同时进行调制。调制后的光进入增益介质，由于反转粒子数被大量消耗，脉冲的前沿及中心部位的增幅较大，后沿的增

幅较小，这导致脉冲前后沿变陡，小脉冲被抑制，从而输出一系列强度高、脉宽窄的脉冲序列^[1]。

利用 SESAM 实现被动连续锁模的关键在于抑制调 Q 锁模。要实现稳定连续锁模，腔内的能量需要满足以下关系，即

$$E_p^2 > F_{\text{sat,L}} A_L F_{\text{sat,A}} A_A \Delta R, \quad (1)$$

式中：腔内脉冲能量 $E_p = P_{\text{intra}}/f$ ， P_{intra} 为腔内平均功率， $P_{\text{intra}} = P_{\text{out}}[(1+R)/(1-R)]$ ， P_{out} 为输出功率， R 为输出镜的透过率， f 为脉冲重复频率； $F_{\text{sat,L}}$ 为激光介质的饱和通量； $F_{\text{sat,A}}$ 为 SESAM 的饱和通量； A_L 、 A_A 分别为腔模在激光介质和 SESAM 上的光斑面积； ΔR 为 SESAM 的调制深度。因此，低透过率的输出耦合镜可以增大腔内的脉冲能量，从而抑制调 Q 锁模^[3]。

3 实验装置

实验光路如图 1 所示，激光谐振腔长度为 1 m，锁模脉冲重复频率为 150 MHz。采用端面抽运结构，抽运源使用杏林睿光的 808 nm 锁波长半导体激光器，连续输出的最大功率为 10 W，光纤芯径为 200 μm ，数值孔径(NA)为 0.22，使用 1:2 耦合镜进行耦合，晶体表面的光斑直径为 400 μm ；M1 为 45°二向色镜，对 808 nm 激光高透，透过率为 98%，对 1064 nm 激光高反，反射率为 99.95%；Nd:YVO₄ 晶体的尺寸为 3 mm×3 mm×5 mm，掺杂浓度(摩尔分数)为 0.3%，受激发射截面为 $25 \times 10^{-19} \text{ cm}^2 @ 1064 \text{ nm}$ ，使用紫铜块固定并散热；OC 为平面激光输出镜，使用 $T = 0.1\%$ 、 1% 、 10% 三种输出镜研究输出镜透过率对输出特性的影响，使用 $T = 1\%$ (无楔角)、 5% (无楔角)、 10% (1°楔角)三种输出镜研究楔角对锁模质量的影响；M2 为 1064 nm 激光平面高反镜，工作角度为 45°；M3 为 1064 nm 凹面高反镜，曲率半径 $R_3 = 500 \text{ mm}$ ；M4 为 1064 nm 凹面高反镜，曲率半径 $R_4 = 200 \text{ mm}$ ；SESAM 为 BATOP 公司生产的 SAM-1064-1-5ps，调制深度为 0.7%，饱和通量为 100 $\mu\text{J}/\text{cm}^2$ ，SESAM 表面的光斑半径为 70 μm ^[3]。研究锁模阈值时，通过 5 GHz 快速探测器(Thorlabs DET08C/M)和 2 GHz 带宽示波器(泰克 DPO5204B)进行锁模状态监测。研究楔角对锁模质量影响时，通过搭建强度自相关光路测量脉冲，使用自行编写的控制和处理软件进行脉宽测量^[9-12]，使用 HORIBA 生产的 IHR550 光谱仪进行光谱测量。

根据光路结构和上述给出的参数，可用(1)式计算得到连续锁模的最低腔内能量为 0.076 μJ ；再根

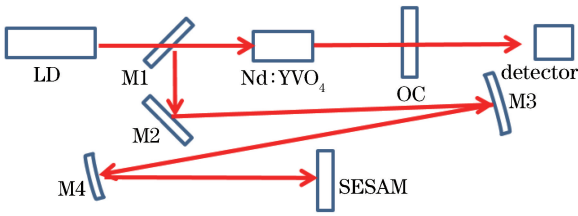


图 1 基于 SESAM 锁模的实验装置图
Fig. 1 Experimental setup based on SESAM mode locking

据腔内功率与腔外功率的关系,得到使用 $T = 0.1\%$ 、 1% 、 10% 三种透过率的输出镜的最低连续锁模输出功率分别为 5.7, 68, 1140 mW。

使用自主搭建的非共线强度自相关光路进行脉宽测量,使用焦距为 50mm 的平凸透镜进行聚焦,使用

$\theta = 90^\circ, \varphi = 23.5^\circ$ 的 KTP 晶体进行和频。移动臂为 200 mm 行程的电控位移台,可提供大于 1 ns 的延时,脉宽测量范围为 1~250 ps,通过软件编程进行控制和测试拟合^[13]。

4 实验结果与分析

4.1 输出镜透过率对锁模激光器特性影响

分别选用 $T = 0.1\%$ 、 1% 、 10% 三种透过率的输出镜进行光路搭建和研究,分析 SESAM 锁模激光器的出光阈值、调 Q 锁模阈值、连续锁模阈值和功-功转换效率。图 2(a)所示为调 Q 锁模的信号,脉冲序列的强度和重复频率不稳定;图 2(b)所示为连续锁模的信号,脉冲序列稳定,重复频率为 150 MHz。实验中通过观察示波器信号来判断激光器的锁模状态。

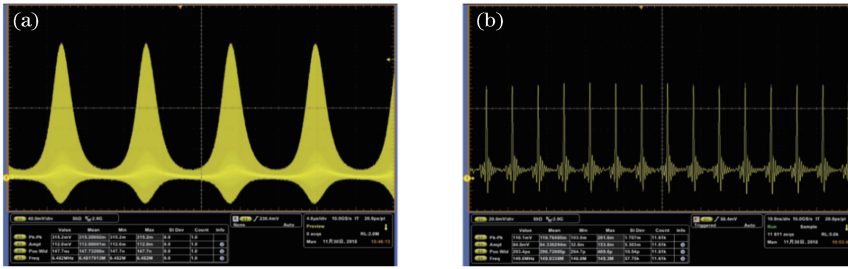


图 2 SESAM 锁模信号探测结果。(a)调 Q 锁模;(b)连续锁模

Fig. 2 Detection results of SESAM mode-locked signal. (a) Q-switched mode locking; (b) CW mode locking

图 3 所示为使用不同透过率输出镜情况下的输出功率和转换效率随抽运功率变化的曲线。使用 $T = 0.1\%$ 输出镜,连续出光阈值抽运功率为 0.07 W,调 Q 锁模阈值抽运功率为 0.51 W,连续锁模阈值抽运功率为 1.02 W,连续锁模输出功率为 0.0063 W;对于 $T = 1\%$ 输出镜,连续出光阈值抽运功率为

0.086 W,调 Q 锁模阈值抽运功率为 0.685 W,连续锁模阈值抽运功率为 1.268 W,连续锁模输出功率为 0.118 W;对于 $T = 10\%$ 输出镜,连续出光阈值抽运功率为 0.247 W,调 Q 锁模阈值抽运功率为 1.122 W,连续锁模阈值抽运功率为 4.858 W,连续锁模输出功率为 1.53 W。测量所得的光谱如图 4 所示。

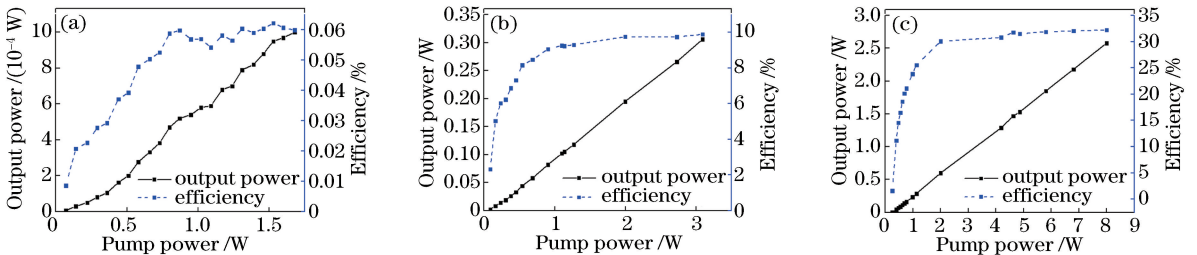


图 3 不同透过率输出镜的输出功率和转换效率曲线。(a) $T = 0.1\%$;(b) $T = 1\%$;(c) $T = 10\%$

Fig. 3 Output power curve and transfer efficiency curve of different transmittance output mirror.

(a) $T = 0.1\%$; (b) $T = 1\%$; (c) $T = 10\%$

可见不同透过率输出镜对锁模的阈值和效率影响很大, $T = 0.1\%$ 时锁模阈值低,对应的转换效率也低,而 $T = 10\%$ 时锁模阈值高,转换效率也高, $T = 1\%$ 时转化效率介于两者之间。这是因为,输出镜透过率越低,腔内积累的光功率越高,在相同抽运

功率下 SESAM 表面的 1064 nm 激光功率密度越高,更容易被完全漂白,实现锁模,所以 $T = 0.1\%$ 输出镜的锁模阈值最低,转换效率也最低。当 $T = 10\%$ 时,更易于提取腔内功率,腔内积累的光功率相对较少,SESAM 不容易被漂白,锁模的阈值高,转

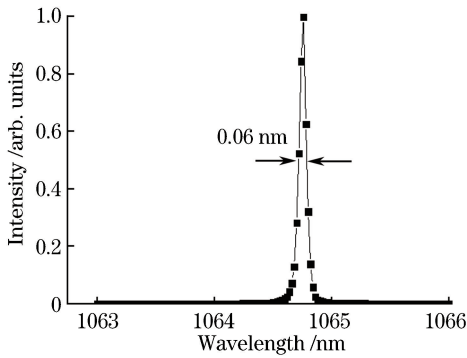


图4 锁模激光光谱

Fig. 4 Spectrum of mode-locked laser

换效率高,在抽运功率高时有优势。实际获得的最低连续锁模输出功率比理论值高出10%以上,主要是因为实验中连续锁模的状态并不能在长时间内维持稳定,偶尔会出现调Q锁模,所以需进一步增大抽运功率,才能使锁模状态在长时间内维持稳定。

4.2 输出镜楔角对锁模脉冲的影响

采用 $T=1\%$ (无楔角)、 5% (无楔角)、 10% (1° 楔角)三种输出镜研究楔角对锁模激光脉冲的影响,因为带宽为4 GHz的示波器无法准确测量百皮秒及以下的信号,更无法观测到寄生振荡引起的脉冲劈裂,所以需要使用自相关仪进行测量,纯净锁模脉

冲的自相关拟合信号为高斯曲线,非纯净锁模脉冲的自相关拟合信号会出现多峰。实验发现,除输出镜后端面会引起寄生振荡外,激光晶体两个端面也会引起寄生振荡,导致信号出现脉冲劈裂或者多脉冲。为了控制单一变量,晶体都呈 8° 倾斜放置,抑制晶体端面产生的寄生振荡,只研究输出镜对寄生振荡的影响。

使用 $T=1\%$ (无楔角)输出镜,晶体无倾角放置时,测量得到的锁模激光自相关曲线如图5(a)所示,在自相关曲线的主峰两侧有次峰出现,说明存在的寄生振荡引起了脉冲劈裂。进一步旋转晶体角度至 8° ,抑制由晶体引入的寄生振荡,得到的具有单一主峰的锁模自相关曲线如图5(b)所示,此时的锁模脉冲为单一脉冲,连续锁模状态稳定,脉冲宽度为13 ps。使用 $T=5\%$ (无楔角)输出镜,晶体无倾角放置时,自相关信号与图5(a)所示的信号无明显差别,即存在的寄生振荡引起了脉冲劈裂。进一步旋转晶体角度至 8° ,得到的自相关信号如图5(c)所示,次峰与主峰的比例明显下降,即寄生振荡被部分抑制,但无法获得纯净的锁模脉冲,继续增大晶体角度也无明显改善。使用 $T=10\%$ 的带楔角输出镜,晶体无倾角放置时,存在的寄生振荡引起了脉冲劈裂,旋转晶体使其呈 8° 放置,得到了纯净的连续锁模脉冲。

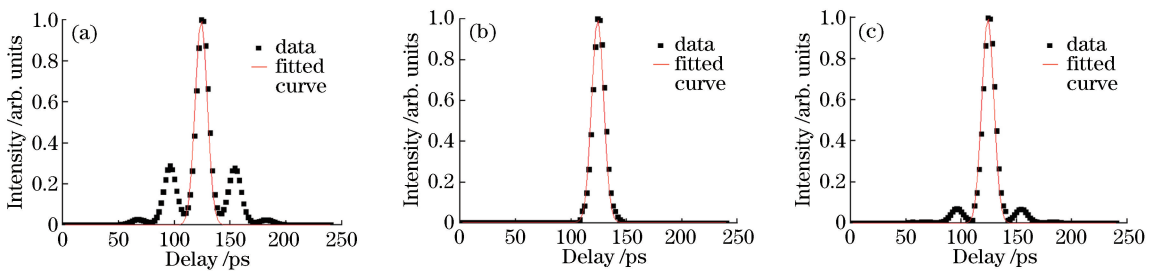


图5 连续锁模激光脉冲的自相关信号。(a)存在寄生振荡;(b)不存在寄生振荡;(c)寄生振荡被部分抑制

Fig. 5 Auto-correlation signal of CW mode-locked laser. (a) With parasitic oscillation; (b) without parasitic oscillation; (c) with less parasitic oscillation

结果表明:输出镜后端面楔角可以抑制寄生振荡。对于不带楔角的输出镜,在低透过率情况下,输出镜后端面的反射影响较小,可以得到纯净锁模脉冲,比如 $T=1\%$ 的情况;随着透过率的增大,后端面的影响变得明显,实验中使用 $T=5\%$ 不带楔角输出镜无法获得纯净锁模脉冲;使用 $T=10\%$ 带楔角输出镜时,寄生振荡可以被有效抑制,得到纯净的锁模脉冲。

5 结 论

使用三种不同透过率的输出镜进行锁模激光器

的研究,发现锁模阈值和转换效率都随着输出镜透过率的增大而增大。当 $T=0.1\%$ 时可获得低阈值锁模,连续锁模阈值抽运功率为1 W,输出功率为0.58 mW,转换效率为0.058%;当 $T=10\%$ 时可获得高功率输出,最大转换效率达32.3%。通过自行搭建的自相关光路测量锁模激光的脉冲宽度,对自相关曲线进行分析,判断锁模脉冲是否为无劈裂的单一脉冲、有劈裂的单一脉冲和多脉冲。研究表明,输出镜后端面可引起寄生振荡,当后端面存在楔角时可以抑制寄生振荡;寄生振荡的产生与输出镜前端面的透过率也有一定关系,透过率较低时,后

端面的影响较小,实验中使用 $T=1\%$ (无楔角) 输出镜可以得到纯净脉冲输出。当透过率增大,后端面对锁模质量的影响也会增大,使用后端面不带楔角的 $T=5\%$ 输出镜无法获得纯净脉冲输出。本研究可为 SESAM 锁模激光器输出镜的选取提供参考,在选取输出镜透过率时,需综合考虑不同应用场景对锁模阈值和转换效率的要求。对锁模质量有严格要求的应用,需要选取后端面带楔角的输出镜,并用自相关测试手段进行评价。本研究尚有不足之处,下一步拟对自相关信号进行深入分析,通过改进算法求解出脉冲的真实形状,研究不同的寄生振荡情况。

参 考 文 献

- [1] Zhang Q. All solid state Nd : YVO₄ mode-locked laser with SESAM [D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2010: 5-19.
章强. 基于半导体饱和吸收镜的全固态 Nd : YVO₄ 锁模激光器[D]. 北京: 北京交通大学, 2010: 5-19.
- [2] Keller U, Knox W H, Roskos H. Coupled-cavity resonant passive mode-locked Ti : sapphire laser[J]. Optics Letters, 1990, 15(23): 1377-1379.
- [3] Cai Z Q. Experimental research on LD end-pumped all-solid-state passively continuous-wave mode-locked lasers[D]. Tianjin: Tianjin University, 2007: 23-38.
蔡志强. LD 端面泵浦的全固态被动连续锁模激光器实验研究[D]. 天津: 天津大学, 2007: 23-38.
- [4] Ge W Y. The study on diode pumped high-power mode-locked laser[D]. Shanghai: Shanghai Jiaotong University, 2015: 55-64.
葛维暘. 半导体激光泵浦的高功率锁模激光器研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2015: 55-64.
- [5] Liu S H. Characterization of diode-pumped passively continuous-wave mode-locked lasers with SESAM [D]. Jinan: Shandong Normal University, 2008: 21-32.
刘士华. LD 泵浦 SESAM 被动连续锁模激光特性研究[D]. 济南: 山东师范大学, 2008: 21-32.
- [6] Wang X J. 56 MHz end pumping Nd : YVO₄ SESAM CW mode-locked lasers[J]. Chinese Journal of Luminescence, 2012, 33(12): 1342-1346.
王希军. 56 MHz 重复频率端泵 SESAM 连续波锁模 Nd : YVO₄ 激光器[J]. 发光学报, 2012, 33(12): 1342-1346.
- [7] Hou J. Study on several new all solid-state mode-locked lasers [D]. Jinan: Shandong University, 2016: 9-38.
侯佳. 几种新型全固态锁模激光器件的研究[D]. 济南: 山东大学, 2016: 9-38.
- [8] Xie Z W, Dong S Y, Yan S X, *et al.* Morphological adjustment of 304 stainless steel by picosecond laser micro-nano fabrication[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2018, 55(3): 031402.
谢志伟, 董世运, 闫世兴, 等. 皮秒激光微纳加工 304 不锈钢形貌调控[J]. 激光与光电子学进展, 2018, 55(3): 031402.
- [9] Li C. Research on the measurement of femtosecond pulse based on auto-correlation [D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2016: 9-38.
李超. 基于自相关技术的飞秒脉冲测量研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2016: 9-38.
- [10] Zhang Z Z. Design of ultrashort optical pulses measuring system [D]. Nanjing: Southeast University, 2017: 18-23.
张志中. 超短光脉冲测量系统的设计[D]. 南京: 东南大学, 2017: 18-23.
- [11] Kelly T J, Davitt S J, Costello J T. A simple, low cost interferometric autocorrelator with no moving parts [J]. Measurement Science and Technology, 2016, 27(11): 117003.
- [12] He W, Cui M H, Song D D, *et al.* Collinear autocorrelation measurement of ultrashort laser pulse based on Michelson interferometer [J]. Chinese Journal of Lasers, 2018, 45(12): 1204001.
何伟, 崔明焕, 宋迪迪, 等. 基于迈克耳孙干涉仪的共线自相关超短光脉冲测量[J]. 中国激光, 2018, 45(12): 1204001.
- [13] Li T T, Yang F, Li S G, *et al.* Extraction method of line-structured light stripe center based on Gauss-Lorenz decomposition peak fitting [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2019, 56(7): 071201.
李涛涛, 杨峰, 李石庚, 等. 基于高斯-洛伦兹分峰拟合的线结构光条中心的提取方法[J]. 激光与光电子学进展, 2019, 56(7): 071201.