

基于相移光纤光栅的光纤环形腔激光器 不稳定现象的研究

施展^{1,2}, 丁孟^{1,2}, 陈迪俊¹, 王迪^{1,2}, 魏芳¹, 张茜^{1,2}, 李璇¹, 蔡海文¹

¹中国科学院上海光学精密机械研究所上海市全固态激光器与应用技术重点实验室, 上海 201800;

²中国科学院大学, 北京 100049

摘要 提出一种基于半导体光放大器(SOA)的光纤环形激光器,在一定范围内可以实现激光的单频输出,同时在该激光器中发现一种新的脉冲不稳定现象,这种不稳定现象与电流调节方向有关。分析和对比实验表明,产生这种现象是由相移光纤光栅的光热效应所致,减弱光热效应可以使得激光器输出更加稳定。

关键词 光纤光学; 相移光纤光栅; 光热效应; 环形腔; 窄线宽

中图分类号 TN24

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201845.0701005

Instability of Optical Fiber Ring Cavity Laser Based on Phase Shift Fiber Grating

Shi Zhan^{1,2}, Ding Meng^{1,2}, Chen Dijun¹, Wang Di^{1,2},

Wei Fang¹, Zhang Xi^{1,2}, Li Xuan¹, Cai Haiwen¹

¹Shanghai Key Laboratory of All Solid-State Laser and Applied Techniques, Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China;

²University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Abstract A fiber-optic ring laser based on semiconductor optical amplifier (SOA) is proposed. In a certain range, a single frequency output of the laser can be realized. At the same time, a new pulse instability phenomenon is found in the laser. This instability phenomenon and current regulation direction is related. The analysis and comparison experiments show that this phenomenon is caused by the photothermal effect of phase-shifted fiber gratings, and weakening the photothermal effect can make the laser output more stable.

Key words fiber optics; phase-shift fiber grating; photothermal effect; ring cavity; narrow linewidth

OCIS codes 060.3735; 140.3510; 140.3560; 140.6810

1 引言

相移光纤光栅^[1](PSFBG)具有透射峰线宽极窄、透射峰处的色散较高的特点,被广泛用于线窄带滤波器,是目前应用最多的光纤光栅器件之一,在激光器、微波光子学和光纤传感等领域有重要作用。

在半导体激光器领域,PSFBG作为一种窄带滤

波器,为稳频技术提供频率参考。将 PSFBG 插入到光纤环形激光器中,只要 PSFBG 的透射峰线宽和纵模间隔接近相等,就可以选出单纵模。这种结构还需要一个普通光纤光栅,PSFBG 的透射峰必须落在这个普通光栅的反射带内(这种情况叫匹配),以滤除 PSFBG 反射带以外的边模^[2]。这种结构只有普通光纤光栅与 PSFBG 相互匹配时,腔内损耗

收稿日期: 2018-02-06; 收到修改稿日期: 2018-03-05

基金项目: 国家自然科学基金(61535014,61775225)、“十三五”航天领域预研专用技术项目(30501020107HT02)、中国科学院实验室创新基金(CXJJ-17S010)、中国科学院青年创新促进会

作者简介: 施展(1993—),女,硕士研究生,主要从事单频激光器方面的研究。E-mail: 461811658@qq.com

导师简介: 陈迪俊(1982—),男,博士,研究员,主要从事单频稳频激光器技术及其空间应用等方面的研究。

E-mail: djchen@siom.ac.cn(通信联系人)

才较小,否则损耗会很大。

环形腔结构的激光器通过单向传输,可以有效抑制空间烧孔效应,将 PSFBG 与环形腔结构相结合,既能通过 π 相移光纤光栅(π -PSFBG)透射窗口的带宽实现有效选模,又能克服线形腔结构存在的空间烧孔效应和功率受腔长限制的缺陷,获得窄线宽的激光输出。系统可以实现全光纤化,利于集成,受环境影响较小。

1995年,Guy等^[2]利用腔内相移光纤光栅作为一种窄带滤波器,实现了1.55 μm 波段的单频窄线宽环形激光器,并且获得了功率约0.25 mW、激光线宽小于2 kHz的单频激光输出。2013年,Zhao等^[3]将 π -PSFBG作为波长选择器件,插入到光栅谐振腔当中,从而获得线宽为900 Hz的单纵模激光输出。2017年,Sun等^[4-5]设计的基于 π -PSFBG的窄线宽掺铒光纤激光器中,在波长1549.5 nm处实现功率为2.22 W、线宽为1 GHz的单频激光输出,最大倾斜效率为35.8%。以上激光器采用的增益介质皆为掺铒光纤^[7-10]。

由于吸收损耗的存在,光纤光栅吸收入射的激光会产生热量,使光纤的折射率和周期发生变化,从而导致光纤光栅的传输谱发生变化,这就是光纤光栅的光热效应。随着光纤光栅在光纤激光器中的应用和发展,尤其是在高功率激光和单频激光技术方面的应用,光纤光栅的光热效应引起了人们的注意。由于谐振效应,当入射激光波长接近透射峰时,其内部光功率可能会远大于入射光功率。这样,即使在较低功率下,PSFBG也会表现出明显的光热效应^[11]。另一方面,PSFBG透射峰线宽很窄,透射峰微小的波长漂移对它的影响也会很明显。这使得PSFBG的光热效应有别于普通的光纤光栅。

本文将PSFBG作为一种在线光纤窄带滤波器应用到半导体激光器中,用半导体光放大器(SOA)作为增益介质,搭建了基于SOA的光纤环形激光器(SFRL)结构。由于光热效应会引起PSFBG透射峰波长红移,且光热效应的弛豫时间为几十微秒量级,而SOA的响应时间在纳秒量级,故有别于常用结构所使用的掺铒光纤(能级寿命为毫秒量级),产生了一种不稳定现象。本文重点对该现象进行定性分析。

2 实验系统及结果

2.1 实验系统

基于SOA的光纤环形腔激光器的结构如图1

所示。在环形腔的基础上,它包含一个商用SOA,一个三端口环形器,一个窄带切趾光纤光栅作为粗选滤波器,一个PSFBG插入谐振腔中作为细选滤波器选出单纵模。光纤环形器中心波长为1550 nm,激光从端口1到端口2、端口2到端口3为单向传输,反向隔离度为60 dB,因此环形器除本身在系统中的功能外,还起到光隔离器的作用,确保了环形腔的单向运转,能够有效抑制空间烧孔效应;环形器的2端口连接了一个切趾的保偏光纤光栅(PMFBG),用于消除PSFBG的边带对激光器性能的影响,利用其反射特性进行初步滤波,这个PMFBG在慢轴上的布拉格波长为1548.60 nm,同时作为激光器的输出端; π -PSFBG的输入端与环形器端口3相连,输出端与SOA的输入端相连,构成环形腔结构。PSFBG采用相移相位掩模法在保偏光纤上刻写而成。它在快轴和慢轴上的布拉格波长分别为1548.87 nm和1549.61 nm。为了增加系统的稳定性,SOA只能放大一个偏振态上的光,其他所有的元件也都采用保偏器件。整个装置置于一快钢板上,密封在泡沫箱中,以减小环境变化对它的影响。

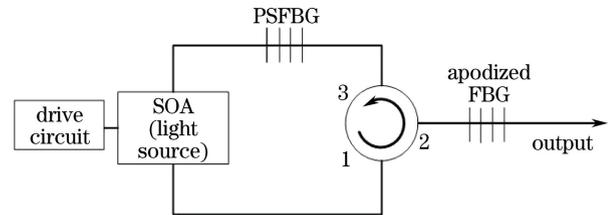


图1 实验装置示意图

Fig. 1 Schematic diagram of experiment setup

选择精度为0.04 pm的高精度光谱仪(AP-2041B),测量光栅光谱如图2所示。测量PSFBG在慢轴上的透射谱见图2(a);在快轴上的透射谱见图2(b);选择使用PSFBG慢轴与切趾光栅进行匹配,结果如图2(c)所示,切趾光栅的反射谱深度16.27 dB,反射光谱的范围为1548.50095~1548.69689 nm,相移光纤光栅的透射峰损耗为1.88 dB,深度为29 dB,透射光谱范围1548.56210~1548.77639 nm,半峰全宽为0.21429 nm,谱宽为2.655 pm。因此,PSFBG的透射峰落在切趾光纤光栅的反射带内,单纵模运转可以通过合理地调节腔纵模实现。连接成滤波器部分透射谱如图2(d)所示。

2.2 实验结果

实验用精度为0.04 pm的光谱仪测量了激光器的输出特性,如图3所示。结果发现,在电流增加和

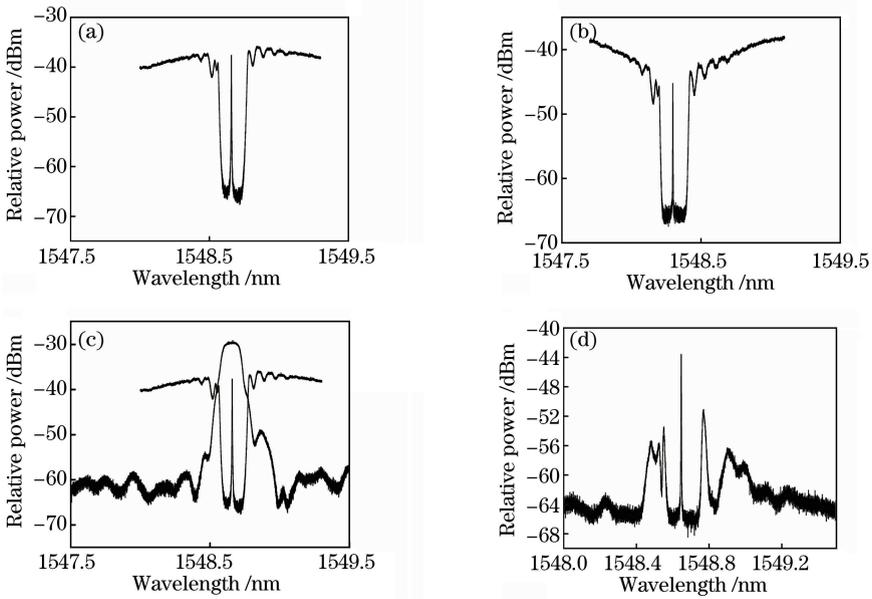


图 2 滤波器的光谱图。(a) PSFBG 慢轴上;(b) PSFBG 快轴上;(c) 光纤匹配时;(d) 滤波器部分光谱

Fig. 2 Spectra of the filter. (a) PSFBG slow axis; (b) PSFBG fast axis; (c) optical fiber matching; (d) filter partial spectrum

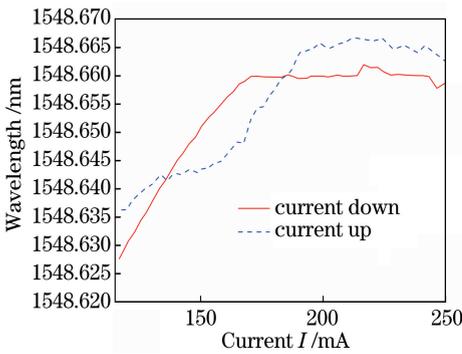


图 3 激光器的波长-电流曲线

Fig. 3 Wavelength-current curves of the laser

减小的过程中,功率和波长随电流变化的情况是不同的。当电流增加时,功率随电流的变化近似于二次曲线;当电流 I 减小至 170 mA 后,功率随电流线性下降。测量输出光谱时,在电流上升的时候,没有出现稳定的单频区域;只有在电流下降的过程中,才会出现稳定单频输出。

对比电流上升和下降时的输出光谱带宽如表 1 所示,可以看出,在电流上升过程中,微小的电流改变会引起输出光谱带宽增加,纵模个数增多;在电流下降的单频区域中,输出光谱的带宽变化不大。

表 1 不同电流的输出光谱带宽

Table 1 Output spectral bandwidth of different currents

Current up	I /mA	119.9	121.8	123.8	125.7	127.8	129.9	133.8
	Bandwidth /pm	0.17968	0.72654	1.89839	2.78119	4.19522	4.71865	4.65616
Current down	I /mA	150.3	145.2	140.4	135.6	130.4	125.6	120.4
	Bandwidth /pm	0.20312	0.20312	0.20312	0.18750	0.17187	0.17187	0.17187

当电流上升时,新的纵模不断出现,所以在电流上升的全部过程中,并没有明显的单频区域出现。为了分析激光器的功率和波长出现回线的原因,测量了不同电流情况下输出激光的纵模特性,如图 4 所示。

电流下降的时候则不同:当电流从 300 mA 开始下降时,输出激光依然是多纵模的状态;当电流下降到 170 mA 的时候,出现单模,随着电流的不断减小,激光器输出一直稳定在单模的状态。用精度为

0.04 pm 的光谱仪测量,下文的波长均是指激光器输出激光的峰值波长。在电流从 170 mA 下降到 120 mA 的过程中,从图 5 中可以看到,不同的控制电流均可以获得稳定的激光输出。在这个稳定的单频输出的范围里,波长漂移量为 0.029 nm。

实验结果表明,利用半导体光放大器 SOA 作为增益介质,将 PSFBG 插入环形腔作为腔内滤波器可以选出单纵模;搭建这种基于 SOA 的光纤环形激光器结构,在特定条件下可以实现单纵模输出。

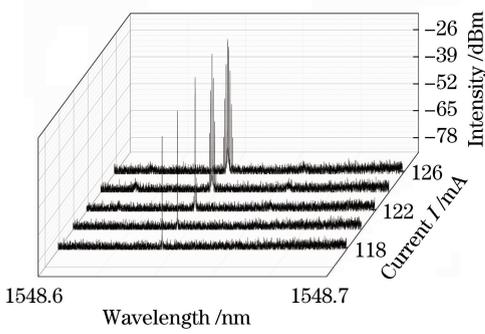


图 4 电流增加时不同电流对应的光谱图
Fig. 4 Spectra of different currents when the current increases

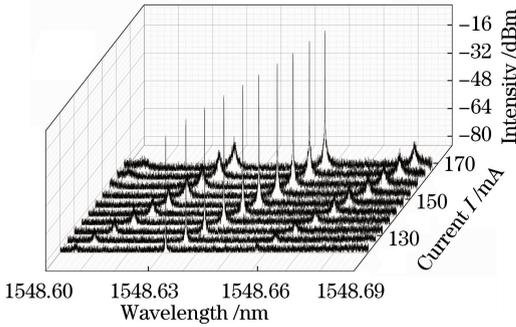


图 5 电流减小时不同电流对应的光谱图
Fig. 5 Spectra of different currents when the current reduces

然而随着电流的增加或者减小会有不同的现象产生,如出现一种不稳定的现象。

采用基于 3×3 耦合器的非平衡迈克耳孙干涉仪的噪声测试技术,分别对激光器的频率噪声及线宽进行噪声测试^[12]。通过对待测激光的差分相位进行解调,得到瞬时频率波动功率谱密度(PSD)。对工作温度为 $25\text{ }^\circ\text{C}$ 时激光器的频率噪声进行测试,结果如图 6 所示。频率噪声谱的低频段为 $1/f$ 噪声,高频段为白噪声,分别决定了激光器的积分线宽及极限线宽。如图 6 中的绿色圆点所示,线宽随着积分带宽下限的减小而增大,在积分时间为 1 ms 时所对应的积分线宽为 18.6 kHz ,积分时间为 0.2 ms 时所对应的积分线宽为 8.582 kHz 。频率噪声的白噪声极限为 $S_w = 566.5\text{ Hz}^2/\text{Hz}$,所对应的极限线宽为 $\Delta\nu = \pi S_w \approx 1.8\text{ kHz}$ 。

实验还测试了不同电流下的功率输出,发现输出是脉冲式的,当 SOA 的电流调至 340 mA 时,其结果如图 7 所示,图 7(a)中的时域跨度为 $750\text{ }\mu\text{s}$,图 7(b)中的时域跨度约为 $50\text{ }\mu\text{s}$,含有两个脉冲,为了更仔细地观察,画出了 A、B、C、D 4 个点的放大图,分别见(c)、(d)、(e)、(f)所示。其中 A 点是脉冲

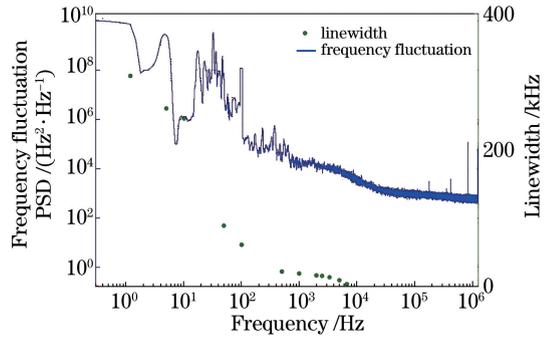


图 6 激光器线宽测试结果
Fig. 6 Test results of laser linewidth

的下降沿,B 点是脉冲比较低的震荡状态,C 点是另一种震荡状态,D 点是脉冲的下降沿。可以看到在脉冲的上升沿和下降沿,观察到一种类似于弛豫振荡的现象。

为了便于分析,对图 7(d)作了滑窗傅里叶变换,其结果如图 8 所示,可以看到,在脉冲比较高时,傅里叶变换的结果没有高频项,即此时激光输出是单纵模运转;当激光功率比较高时,有分立的高频项,间隔约为 60 MHz ,与激光的纵模间隔相等,而且不同震荡状态其傅里叶变换结果也不同。也就是说即使是在光谱仪测试的多纵模区域,其输出是脉冲式的,在脉冲的高电平时段,激光器是单纵模运转;而在脉冲的低电平阶段,激光是多纵模运转。

3 讨 论

3.1 弛豫振荡

首先考虑弛豫振荡对激光器输出的影响。当脉冲电流注入激光器,或者直流电流有突变时,激光器将会发生振荡,称为弛豫振荡^[13],即当弛豫振荡频率接近共振频率时,在阶跃电流注入后,载流子浓度上升到激射阈值有一段延迟。由于材料和器件内部机理,半导体激光器在一定情况下,其载弛豫振荡频段会发生持续的振荡,从而出现自脉冲现象。

一般情况下,半导体激光器的弛豫振荡频率很高,在吉赫兹量级,根据输出测量,在电流上升过程中,自脉冲的频率在千赫兹量级,两者的振荡频率不在一个数量级上,半导体激光器的自脉冲不会出现在这么低的频率上,因此可以认为,弛豫振荡对自脉冲的产生没有影响,在电流上升过程中产生的自脉冲现象不是由弛豫振荡引起的,可能是由光热效应所导致的不稳定性引起的。

3.2 光热效应

由于刻写光栅过程引入的损耗会导致光热效

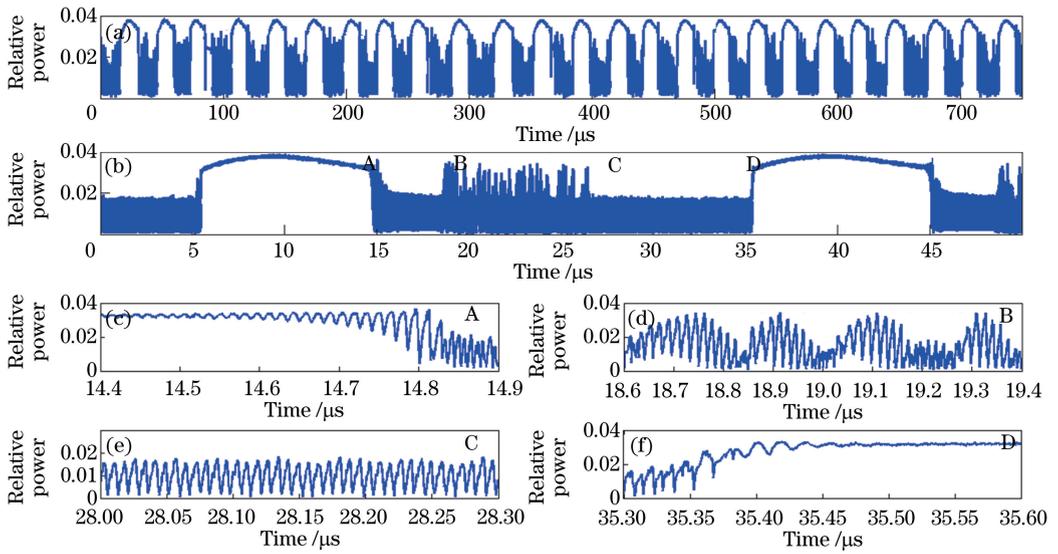


图 7 时域上的激光输出

Fig. 7 Laser output in the time domain

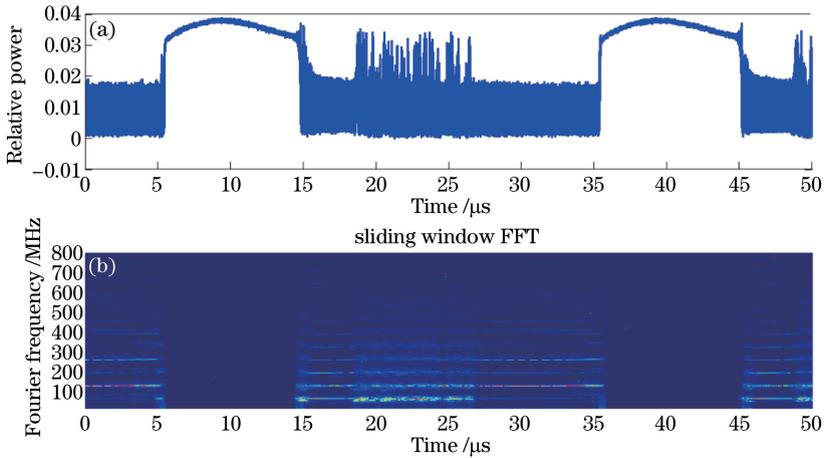


图 8 SOA 输出激光的滑窗傅里叶变化。(a)输出功率测量图;(b)傅里叶变化图

Fig. 8 Slide window Fourier transform of the SOA output laser. (a) Output power measurement diagram; (b) Fourier transform diagram

应,且 PSFBG 吸收部分激光也会产生光热效应,而在激光器腔内的 PSFBG 的光热效应会引起损耗增加^[14],从而导致激光器腔的损耗增加,故会出现自脉冲现象^[15]。

激光器的输出主要取决于 PSFBG 的透射峰波段,故需关注 PSFBG 透射峰红移现象。当入射激光(以下统称为抽运光)接近透射峰时,光强增强效应将会增加,透射峰将会发生红移,如图 9 所示。

PSFBG 透射峰红移的过程描述如下:当抽运波长 λ_{pump} 从短波边接近光栅的透射峰时,光强增强效应会变得越来越强,透射峰波长同步发生红移。当抽运波长继续增加时,由于光强增强效应减小,透射峰的红移量减小,抽运波长与透射峰红移量增大,这

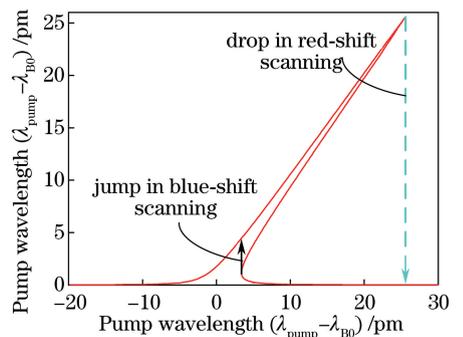


图 9 相移光纤光栅透射峰波长 λ_{peak} 与抽运波长 λ_{pump} 之间的关系

Fig. 9 Relationship between the wavelength of PSFBG transmission peak and pump wavelength

是一个正反馈过程,因此透射峰将会迅速回落到原始的布拉格波长 λ_{B0} ;当抽运波长从长波边接近光栅的透射峰时,透射峰同样会红移,但这时透射峰与抽运激光波长的移动方向相反,因此它们的波长差迅速变小,这是一个双稳态过程。很明显,抽运光的正向扫描导致透射峰同向移动,反向扫描导致透射峰相向移动,这是一个推拉过程。

当 PSFBG 应用到激光器中时,在实验中电流的上升或者温度的下降过程中,正是由于光热效应产生的推拉现象产生了多模的输出。当 SFRL 工作时,腔内损耗在 PSFBG 的透射峰处受到透射峰的调制。只有工作在 PSFBG 透射峰附近的纵模才能实现满足激光激射的条件(腔内增益大于损耗)。由于模式之间的竞争,最后只有最靠近中心频率的模式取胜,形成稳定的振荡。根据实验测量数据,PSFBG 透射峰约为 100 MHz,纵模间隔约为 60 MHz,示意图如图 10 所示。

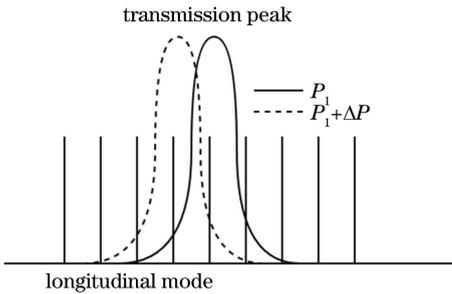


图 10 透射峰漂移和纵模之间的关系

Fig. 10 Relationship between transmission peak drift and longitudinal mode

在电流上升的时候,电流的增加导致激光功率的增加,此时光热效应增强,使谐振腔升温,腔内光程增加,导致腔内损耗增加,推作用使得激光频率降低,透射峰向左漂移。由于透射峰的漂移逐渐远离原本最靠近峰值波长的纵模,而靠近峰值波长偏小的纵模,导致新的纵模在模式竞争中取胜,实现激光输出。随着 PSFBG 回到冷腔工作的状态,由于腔内损耗较高,新的起振点处于一种不稳定的状态,因此在这种不稳定状态中透射峰来回漂移,不稳定状态将会持续下去,导致了多纵模的激光输出,这就是自脉冲产生的原因。

在抽运电流下降的过程中,激光功率下降,此时光热效应减弱,腔内光程开始收缩,瞬时共振频率迅速恢复到其在瞬时激光频率之上的冷频率,导致腔内损耗较少,透射峰左移,但是由于腔内损耗减小,补偿了激光功率的下降量,实现了负反馈,因此可以

在一定区域内实现单频输出。

为了验证 PSFBG 的光热效应对实验结果的影响,改变实验条件,在一定程度上减小光热效应的影响,进行对比实验。将 PSFBG 粘贴在铝片上,增加热导,得到的实验结果如图 11 所示。当电流上升的时候,电流-波长曲线不稳定地线性增长,然而依然会出现自脉冲现象。红色线代表电流下降时波长的变化曲线,可以看到,当电流下降到 210 mA 时,波长会出现明显的线性变化区域,也就是光谱图中对应的单频区域,所以贴铝片后,增加了 PSFBG 的散热,电流下降时的单频区域范围有明显的增加,稳定性更好。

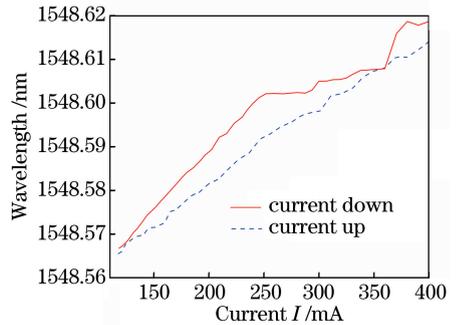


图 11 贴铝片后波长-电流图

Fig. 11 Wavelength-current curves of the laser with the aluminum

测量不同电流对应光谱的纵模特性,得到图 12 和图 13,从两图中可以看出,波长随电流变化曲线中,当电流上升时,依然会随着电流增加而出现更多的纵模,而在电流下降的过程中,当电流下降到 210 mA 时,开始出现单频区域。相比于之前贴铝片增加散热的情况,单频范围变大。在这个稳定的单频输出的范围里,波长漂移量为 0.035 nm。根据对比实验可知,增加散热,减少 PSFBG 的光热效应,确实会对激光器的输出产生影响。

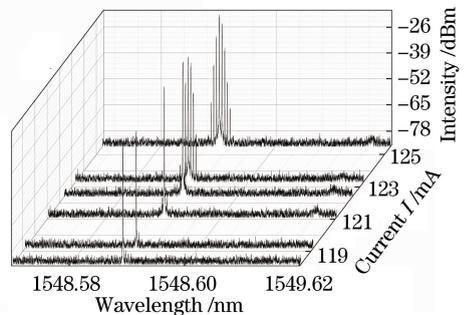


图 12 贴铝片后电流增加对应的光谱图

Fig. 12 Spectra of different currents with the aluminum when the current increases

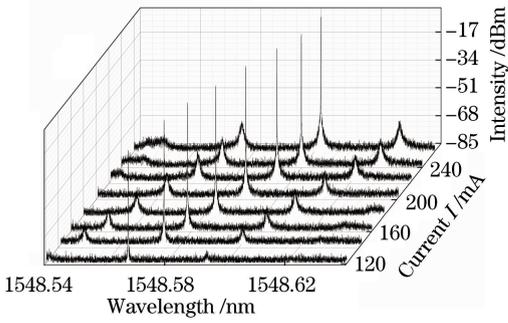


图 13 贴铝片后电流减小对应的光谱图

Fig. 13 Spectra of different currents with the aluminum when the current reduces

实验结果表明,贴铝片在一定程度上降低了光热效应,在下降的过程中更多地减少了腔内的损耗,因此输出的单频区域范围会更大,符合实验结果。进一步理论分析正在进行中。

由于光热效应的时间为几十微秒量级,而铒离子的能级寿命为几个纳秒量级,因此如果增益介质采用掺铒光纤,则铒离子的存在相当于功率的一个低通滤波器,使得在跳模的时候激光功率不会出现快速的跳变,即不会出现本文所叙述的这种不稳定现象。

3.3 稳定输出的讨论

减小 PSFBG 的光热效应,有望进一步稳定激光器的激光输出。一方面,在光纤光栅制备过程中,减小相移光纤光栅透射峰的最大漂移量,也就是通过改进刻写工艺或者 PSFBG 的结构,降低光栅损耗系数、相移点的光强增强因子或者热阻,减少透射峰的漂移,从而可以达到稳定的结果。另一方面,根据对比实验结果可以看出,改变相移光纤光栅所处的外在环境,增加热耗散,也可以在一定程度上减弱光热效应对输出稳定性的影响。

4 结 论

本文将相移光纤光栅用作窄带滤波器,应用于半导体激光器中,实现激光输出,但是这个过程在一定条件下会出现与电流或者温度调节方向有关的不稳定现象。经分析可知,这种自脉冲现象的产生并非是由弛豫振荡产生,而是由光栅的光热效应所引起的。定性分析了在电流的上升和下降阶段对光热效应的影响,并且根据对比实验的结果提出了在一定程度上减弱光热效应的方案。解决了上述问题有望实现窄线宽的激光输出。

参 考 文 献

[1] Kashyap R. Fiber Bragg gratings[M]. New York:

Academic Press, 1999.

[2] Guy M J, Taylor J R, Kashyap R. Single-frequency erbium fiber ring laser with intracavity phase-shifted fiber Bragg grating narrowband filter[J]. Electronics Letters, 1995, 31(22): 1924-1925.

[3] Zhao Y J, Chang J, Wang Q P, *et al.* Research on a novel composite structure Er³⁺-doped DBR fiber laser with a π -phase shifted FBG [J]. Optics Express, 2013, 21(19): 22515-22522.

[4] Sun J J, Wang Z F, Wang M, *et al.* Fabrication of π phase-shifted fiber Bragg grating and its application in narrow linewidth 1.5 μ m Er-doped fiber lasers[J]. Optics Communications, 2018, 407: 344-348.

[5] Sun J J, Wang Z F, Wang M, *et al.* Narrow linewidth erbium-doped fiber laser with a π phase-shifted fiber Bragg grating [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2017, 54(8): 081406. 孙俊杰, 王泽锋, 王蒙, 等. 基于 π 相移 FBG 的窄线宽掺铒光纤激光器实验研究[J]. 激光与光电子学进展, 2017, 54(8): 081406.

[6] Chen X F, Yao J P, Zeng F, *et al.* Single-longitudinal-mode fiber ring laser employing an equivalent phase-shifted fiber Bragg grating[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2005, 17(7): 1390-1392.

[7] Cheng X P, Shum P, Tse C H, *et al.* Single-longitudinal-mode erbium-doped fiber ring laser based on high finesse fiber Bragg grating Fabry-Perot etalon [J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2008, 20(12): 976-978.

[8] Sun J Q, Yuan X H, Zhang X L, *et al.* Single-longitudinal-mode fiber ring laser using fiber grating-based Fabry-Perot filters and variable saturable absorbers[J]. Optics Communications, 2006, 267(1): 177-181.

[9] Lin H Z, Ma L N, Hu Y M, *et al.* Single-longitudinal-mode fiber ring laser employing a polarization-maintaining fiber Bragg grating made by the pre-stress method for wavelength match [J]. Optics and Lasers in Engineering, 2013, 51(7): 822-825.

[10] Wang W T, Song Z Q, Qi H F, *et al.* Study of a single longitudinal fiber ring laser with a π phase-shifted fiber Bragg grating [J]. Optics Communications, 2017, 396: 88-91.

[11] Ding M, Chen D J, Fang Z J, *et al.* Photothermal effects in phase shifted FBG with varied light wavelength and intensity[J]. Optics Express, 2016, 24(22): 25370-25379.

[12] Xu D, Lu B, Yang F, *et al.* Narrow linewidth single-frequency laser noise measurement based on a

- 3×3 fiber coupler [J]. Chinese Journal of Lasers, 2016, 43(1): 0102004.
- 徐丹, 卢斌, 杨飞, 等. 基于 3×3 耦合器的窄线宽单频激光器噪声测量技术 [J]. 中国激光, 2016, 43(1): 0102004.
- [13] Zhou B K, Gao Y Z, Chen T R, *et al.* Laser Principle [M]. 6th ed. Beijing: National Defense Industry Press, 2011: 175-177.
- 周炳琨, 高以智, 陈倜嵘, 等. 激光原理 [M]. 6 版. 北京: 国防工业出版社, 2011: 175-177.
- [14] Chow J H, Sheard B S, McClelland D E, *et al.* Photothermal effects in passive fiber Bragg grating resonators [J]. Optics Letters, 2015, 30(7): 708-710.
- [15] Agrawal G P, Radic S. Phase-shifted fiber Bragg gratings and their application for wavelength demultiplexing [J]. IEEE Photonics Technology Letters, 1994, 6(8): 995-997.