

全正色散被动锁模光纤激光器中滤波器效应的研究

徐中巍 张祖兴

(江西师范大学物理与通信电子学院 江西省光电子与通信重点实验室, 江西 南昌 330022)

摘要 全正色散被动锁模光纤激光器以其能产生高能量、高线性啾啾耗散孤子脉冲而备受关注。全正色散耗散孤子产生的机理是激光腔内多种效应,包括增益、损耗、增益饱和、非线性和滤波等综合作用的结果。研究了全正色散耗散孤子光纤激光器中有无滤波器和滤波器带宽对激光输出性能的影响。通过数值模拟发现,加入带通滤波器后输出耗散孤子脉冲的时域脉宽较无滤波器时变窄,对应的光谱半峰全宽变宽,脉冲稳定锁模所需的时间减小。脉冲的峰值功率会随着滤波器带宽减小而增加,脉冲能量则在一定带宽变化范围内保持不变,但是过窄带宽的滤波器会带来额外的损耗,从而使得脉冲能量快速下降。这些结论为设计搭建高能超快全正色散耗散孤子光纤激光器提供理论参考。

关键词 激光器;全正色散;被动锁模;耗散孤子

中图分类号 TN253 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/LOP50.021405

Study of the Filter Effect in All-Normal-Dispersion Mode-Locked Fiber Lasers

Xu Zhongwei Zhang Zuxing

(Key Laboratory of Photoelectron and Communications of Jiangxi Province, College of Physics and Communication Electronics, Jiangxi Normal University, Nanchang, Jiangxi 330022, China)

Abstract All-normal-dispersion mode-locked fiber lasers can generate high-energy and high-linear-chirp dissipative soliton pulses, so they have attracted much attention. The generation of dissipative solitons is attributed to an integrated result of all kinds of effects in the laser cavity, such as gain, loss, gain saturation, nonlinear effects and filtering. The effect of filter on the performance of output dissipative soliton pulses is detailedly investigated. Numerical simulation shows that dissipative solitons obtained in the fiber lasers with band-pass filter have narrower pulse duration and broader spectrum width than those from the lasers without a filter. Moreover, the establishing time of stable mode locking is shorter. The peak power of dissipative soliton pulses increases with the filter bandwidth decreasing, while the pulse energy almost keeps invariable within certain range of filter bandwidth. But in the limiting case of narrow filter bandwidth, the pulse energy decreases abruptly due to the large induced loss.

Key words lasers; all normal dispersion; passive mode-locking; dissipative soliton

OCIS codes 140.3510; 140.3560; 140.4050

1 引言

近年来光纤激光器研究快速发展,光纤激光器在光通信、激光加工、光检测、激光医疗设备等很多应用领域中都发挥着越来越重要的作用^[1]。激光器的锁模机理和类型也由传统的保守孤子锁模^[2]、展宽脉冲锁模^[3]和自相似子激光器^[4]发展到了全正色散耗散孤子激光器^[5]。特别值得指出的是,最近实现了第五种类型的被动锁模激光器,即孤子-自相似子激光器^[6,7],孤子与自相似子共存于同一激光器中,分别从激光腔的不同部分输出。传统的孤子脉冲光纤激光器由于负色散和自相位调制的平衡作用,累积的相移互相抵消从

收稿日期: 2012-11-20; **收到修改稿日期**: 2012-11-21; **网络出版日期**: 2013-01-07

基金项目: 国家自然科学基金(60807014, 60967002)和江西省教育厅科学基金(GJJ12170)资助课题。

作者简介: 徐中巍(1987—),男,硕士研究生,主要从事光纤激光器方面的研究。E-mail: z. w. xu@hotmail.com

导师简介: 张祖兴(1975—),男,博士,副教授,主要从事光纤激光器和光处理等方面的研究。

E-mail: stellarzhang@hotmail.com(通信联系人)

而产生稳定的孤子脉冲,但是由于孤子脉冲的阈值很低,所以能输出的单脉冲能量不高^[8]。通过在激光器中使用正负色散光纤实现激光腔的色散管理,脉冲在激光腔内经历展宽放大,这类展宽脉冲锁模光纤激光器因而能够输出纳焦耳级的飞秒脉冲^[9]。自相似脉冲光纤锁模激光器产生的自相似抛物线型脉冲尽管存在很大的非线性相移,但是脉冲具有的啁啾是线性啁啾,因此可以避免脉冲的波分裂^[10],从而容纳大能量。全正色散锁模光纤激光器是最近光纤激光器研究的热点,这是因为全正色散激光器产生的大啁啾耗散孤子脉冲也可能具有更高的脉冲能量^[11]。全正色散耗散孤子产生的机理是激光腔内包括增益、损耗、增益饱和、非线性和滤波等多种效应综合作用的结果。全正色散光纤激光器中,脉冲在全部是正色散的光纤中传播累积了较大的啁啾,为了获得稳定的锁模脉冲,通常需要在激光腔内插入一定带宽的滤波器,起到平衡脉冲啁啾的作用。最近也报道了一种腔内没有加入带通滤波器而实现了被动锁模的全正色散光纤激光器^[12],这时有限增益带宽或激光腔内固有双折射引入的等效双折射滤波器在产生耗散孤子脉冲中发挥相应的作用。可见,全正色散光纤激光中有无滤波器以及滤波器的带宽都对激光器性能有较大影响。

本文报道了对带有滤波器的全正色散被动锁模掺镱光纤激光器(YDFL)的数值模拟,研究了有无滤波器及滤波器带宽对全正色散激光器性能的影响。通过在激光器中加入滤波器,然后调节滤波器带宽,可以使激光器输出脉冲的时域脉冲宽度减小,对应的光谱宽度增加,脉冲的峰值功率会因滤波器在频谱上的滤波调制作用而上升。但是使用带宽过窄的滤波器会给输出脉冲带来额外的损耗,使得脉冲能量下降。

2 仿真模型

图 1(a)是带滤波器全正色散被动锁模 YDFL 的结构图。由激光二极管(LD)通过波分复用器(WDM)抽运,一段单模光纤(SMF)和一段掺镱光纤(YDF)组成的全正色散环形腔,后面插入一个频谱滤波器(SF),两个偏振控制器(PC)分别位于偏振隔离器(PDI)的两边,它们组成了激光器锁模的部分,耦合比为 10:90 的耦合器作为激光器的输出端。图 1(b)是根据激光器结构结合基本的腔内动力学过程所做出的对应仿真模型,根据文献[13]中所描述的理论,结合我们所使用的激光器,这里将滤波器放置在 YDF 之后,因为经过 YDF 后脉冲能量最大,滤波器对脉冲所产生的滤波效果最明显。

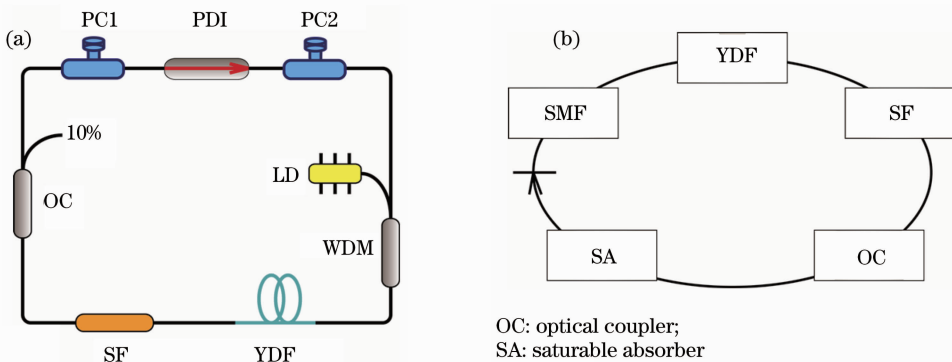


图 1 全正色散掺镱被动锁模光纤激光器。(a)结构示意图;(b)仿真模型图

Fig. 1 All-normal-dispersion Yb-doped mode-locked fiber laser. (a) Schematic diagram of structure; (b) model of simulation

为了模拟我们所展示的带滤波器全正色散掺镱被动锁模光纤激光器,在模拟激光脉冲在 YDF 和 SMF 中传播时采用了 Ginzburg-Landau 方程,然后使用分步傅里叶法来计算得到方程的数值解^[14]:

$$\frac{\partial A}{\partial z} = -\frac{i\beta_2}{2} \frac{\partial^2 A}{\partial t^2} + \frac{\beta_3}{6} \frac{\partial^3 A}{\partial t^3} + i\gamma |A|^2 A + \frac{g}{2} A + \frac{gT_2^2}{2} \frac{\partial^2 A}{\partial t^2}, \quad (1)$$

式中 A 为脉冲的振幅, β_2 和 β_3 分别为二阶和三阶色散系数, γ 为非线性系数, g 为增益光纤中的饱和增益,在 SMF 中则是负数损耗,这里先不考虑其中的损耗,而是最后将腔内的损耗并入到耦合输出比中。YDF 的增益为

$$g = G_0 \exp \left[-\frac{\int |A|^2 dt}{E_{\text{sat}}} \right], \quad (2)$$

式中 G_0 为小信号增益系数, E_{sat} 为饱和能量。偶极子弛豫时间 $T_2 = 2\pi/ck^2 \Delta\lambda_g$, $\Delta\lambda_g$ 为激光器增益带宽。光纤激光器通过非线性偏振旋转实现激光器的被动锁模, 这里可以等效为快饱和吸收体, 锁模方程由下式来描述:

$$T(\tau) = 1 - \frac{\Delta R}{1 + |A(\tau)|^2/P_A}, \quad (3)$$

式中 ΔR 为非饱和损耗, P_A 为饱和功率。这里主要以研究带高斯型滤波器的光纤激光器, 所以滤波器的透射率方程为

$$T_{\text{SF}} = \exp\left[-\left(\frac{\omega^2}{2\omega_0^2}\right)\right], \quad (4)$$

式中 ω 为光波角频率, ω_0 为滤波器强度透射率极大值 $1/e$ 处的通带半宽度, 3 dB 带宽 $\Delta\omega$ 按照 $\omega_0 = \Delta\omega/1.665$ 换算得到。

仿真中使用以下参数: YDF 和 SMF 的长度分别为 2 m 和 3.6 m, 群速度色散(GVD)系数分别为 -38 ps/(nm·km)和 -60 ps/(nm·km), 激光腔内的净色散为 0.16 ps²。YDF 和 SMF 的非线性系数都取 $\gamma=5.7$ W⁻¹/km。YDF 的增益带宽 $\Delta\lambda_g=40$ nm, 增益饱和能量 $E_{\text{sat}}=1$ nJ, 小信号增益系数 $G_0=3.0$ m⁻¹。等效饱和吸收体的非饱和损耗 $\Delta R=70\%$, 饱和功率 $P_A=800$ W。最后考虑光纤激光腔中各部分损耗取耦合器输出比为 50%。根据图 1(b)所示仿真模型, 加入初始脉冲后在各组成部分间循环计算直到输出稳定的锁模脉冲为止。

3 仿真结果与分析

在模拟仿真中, 首先对有无高斯滤波器这两种情况进行对比。由图 2(a), (d)脉冲的时域波形对比可以发现, 激光器输出的脉冲峰值功率在有滤波器时更高, 脉冲宽度更窄, 脉冲所具有的线性啁啾的斜率更大。对比图 2(b), (e)所示的有无滤波器两种条件下的脉冲时域演化过程可以看到, 加入滤波器后脉冲在第 25 次循环后稳定锁模[图 2(e)中白色箭头标识处], 而不带滤波器的情况下脉冲需要到 35 次循环后才能稳定

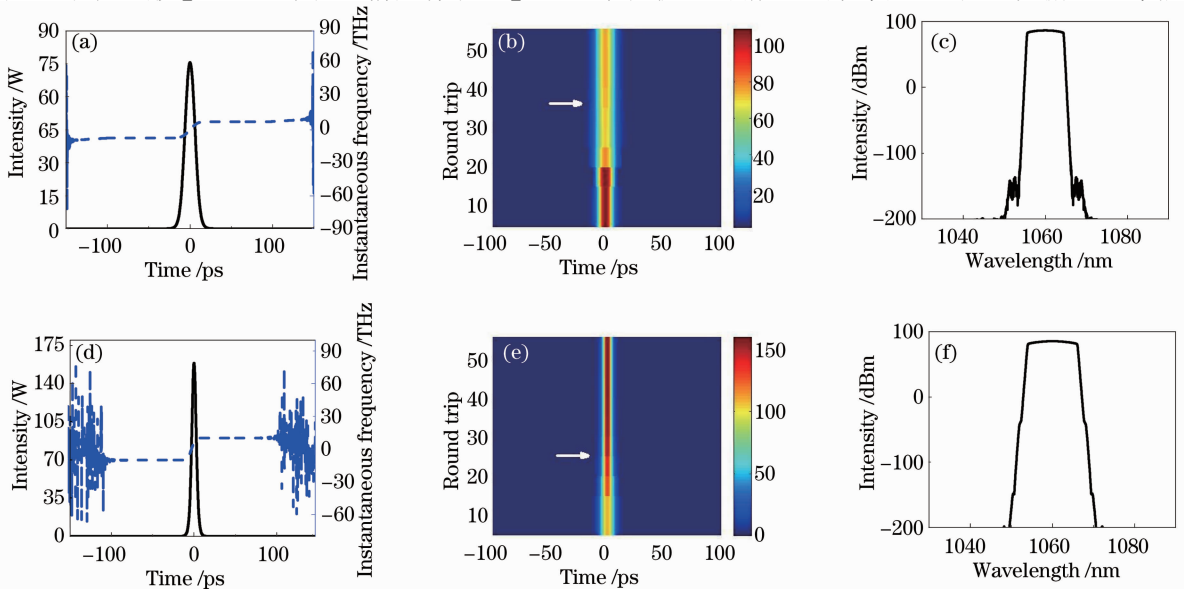


图 2 有无滤波器全正色散被动锁模光纤激光器输出耗散孤子脉冲对比图。循环 50 次后的不带滤波器时输出脉冲的(a)时域波形(实线)和啁啾曲线(虚线), (b)时域演化过程, (c)光谱。(d)循环 50 次后的带有 10 nm 带宽高斯滤波器时输出脉冲的(a)时域波形(实线)和啁啾曲线(虚线), (e)时域演化过程, (f)光谱

Fig. 2 Output dissipative soliton pulses in the all-normal-dispersion fiber lasers without or with band-pass filter. (a) Pulse in time domain (solid line) and chirp curve (dotted line), (b) pulse evolution, (c) spectrum without filter after the 50th calculation, (d) pulse in time domain (solid line) and chirp curve (dotted line), (e) pulse evolution, (f) spectrum with the 10 nm filter after the 50th calculation

输出[图 2(b)中白色箭头标识处],可见加入滤波器后脉冲稳定锁模所需的时间更短。为了能更清楚地看到脉冲在何时锁模稳定,只截取到第 50 次循环,脉冲在 50 次循环后会依然持续保持稳定不再列出。对比图 2(c),(f)所示的脉冲光谱可以发现,加入滤波器后输出的脉冲光谱宽度更宽,并且光谱边缘更光滑。

调节滤波器的带宽大小,发现在时域上随着滤波器带宽的减小,脉冲峰值功率增大,脉冲宽度减小[图 3(a)]。我们考虑的是全正色散光纤环形腔,所以激光器输出的脉冲属于耗散孤子,在光谱上可以看到具有陡峭边缘的脉冲光谱。由图 3(b)可以看出对应光谱的 3 dB 谱宽是随滤波器带宽的减小而增大的。这是由于腔内近似线性的啁啾导致各频率分量的均匀分布,窄的滤波器带宽可以产生更强的滤波效果,使得脉冲两翼获得的增益小于脉冲中间的部分。经过滤波器之后的脉冲时域和谱域宽度都明显减小,同时脉冲峰值功率增大。达到平衡时,稳定激光输出光谱宽度增加,脉冲宽度减小。图 3(c),(d)给出的是无滤波器的全正色散光纤激光器中不同激光器增益带宽时的激光脉冲和光谱输出。可以看出,滤波器带宽的变化对输出脉冲的影响类似于增益带宽变化所带来的影响。

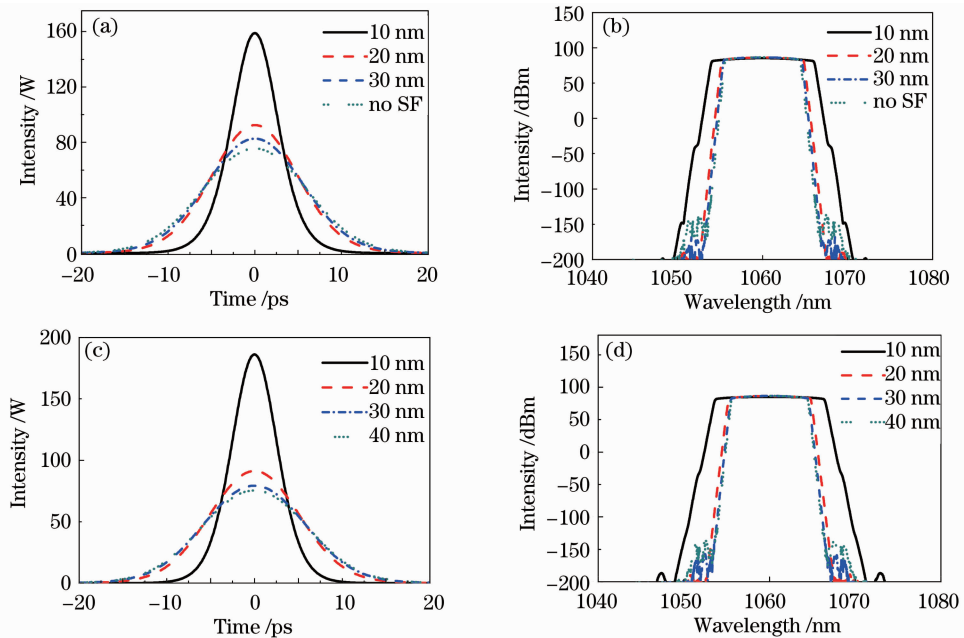


图 3 不加滤波器和滤波器带宽分别为 30,20,10nm 时的(a)输出脉冲时域波形和(b)输出脉冲光谱。激光器增益带宽分别为 40,30,20,10 nm 时的(c)输出脉冲时域波形和(d)输出脉冲光谱

Fig. 3 (a) Output pulses in time domain and (b) spectra in the fiber lasers without filter and with the filter of 30, 20, 10 nm bandwidth, (c) output pulses in time domain, (d) spectra in the fiber lasers with gain bandwidth of 40, 30, 20, 10 nm

进一步对无滤波器和分别有带宽为 30,20 和 10 nm 的滤波器这四种情况下,激光脉冲在激光腔内的动力学进行研究。通过对比这 4 种条件下脉冲和光谱宽度在腔内的演化过程可以看出,在无滤波器的条件下,脉冲宽度在 SMF 和 YDF 中从 13.25~14.68 ps 近乎线性递增,经过饱和吸收体(SA)后脉冲宽度下降到 13.18 ps,对应的光谱带宽在 SMF 和 YDF 中从 6.37 nm 逐步增加到 6.65 nm,经过 SA 后降到 6.35 nm[图 4(a)]。加入不同带宽的滤波器后结果如图 4(b)~(d)所示。

带滤波器和无滤波器全正色散光纤激光器输出脉冲的峰值功率和脉冲能量。通过图 5 可以发现,加入滤波器后脉冲的峰值功率更大,并随着滤波器带宽的减小呈指数式上升。但是脉冲能量则会在滤波器带宽大于 14 nm 的范围内随滤波器带宽的减小而上升,从无滤波器时的 1.136 nJ 增加到带有 15 nm 带宽滤波器的激光器输出的 1.166 nJ,可以明显地看到脉冲能量增长的幅度很小。当滤波器带宽继续减小到 14 nm 以下时,脉冲能量则开始下降,从带宽为 14 nm 时激光器输出的 1.163 nJ 减小到 10 nm 带宽时激光器输出的 1.113 nJ。

综合以上对有无滤波器的全正色散耗散孤子光纤激光的模拟结果,在谐振腔内的带通光谱滤波器相当

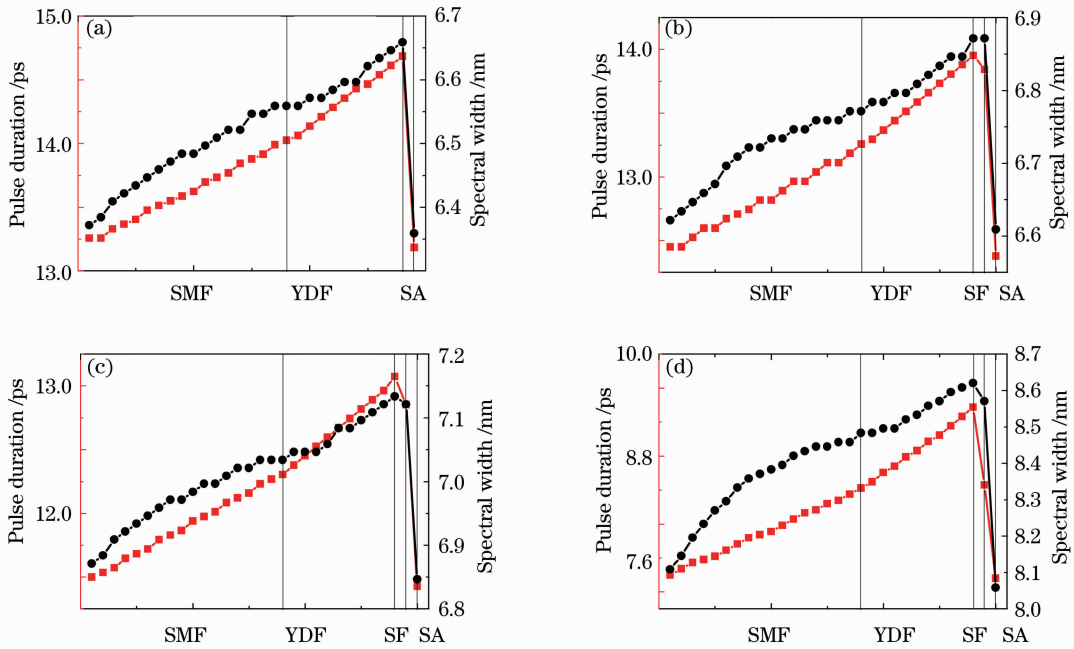


图4 在激光器中各部分中的脉冲宽度(方点线)和光谱半峰全宽(圆点线)演化过程。(a)不带滤波器；(b)带有 30 nm 带宽的滤波器；(c)带有 20 nm 带宽的滤波器；(d)带有 10 nm 带宽的滤波器

Fig. 4 Evolution of pulse duration (square dot line) and full width at half maximum of spectrum (dot line) in all-normal-dispersion Yb-doped mode-locked fiber lasers. (a) Without filter; (b) with filter of 30 nm bandwidth; (c) with filter of 20 nm bandwidth; (d) with filter of 10 nm bandwidth

于增加了一个分布式的损耗,这样就改变了掺杂光纤对脉冲所能提供增益的频谱范围,相当于调整了增益带宽或者增益线形。所以加入滤波器后,脉冲宽度变窄,光谱的半峰全宽变宽。在一定范围内减小滤波器带宽会使得脉冲能量几乎保持不变,同时脉冲的峰值功率得到提高,这是由于带宽变窄的滤波器使得脉冲能量进一步向中间的部分集中,但是带宽过窄的滤波器会带来更大的损耗,所以脉冲能量会减小,不过脉冲中间部分的能量密度依然会增加。

4 结 论

本文理论研究了全正色散锁模耗散孤子光纤激光器中滤波器对激光性能的影响。通过仿真发现,在腔内增加一个光谱带通滤波器,可借由滤波器实现部分饱和吸收与脉冲整形的效果。加入滤波器后输出脉冲的宽度会减小,相应的光谱半峰全宽增大,激光器稳定锁模时间减小,脉冲的峰值功率会随着滤波器带宽的减小而增加,但是带宽过窄的滤波器带来的损耗会使得脉冲能量减小。另外,与调节增益带宽所模拟的结果对比,可以发现滤波器带宽和增益带宽对输出脉冲有相似的影响,但是在实验中增益带宽是不能改变的,所以可以通过加入带通滤波器来实现相同的作用。

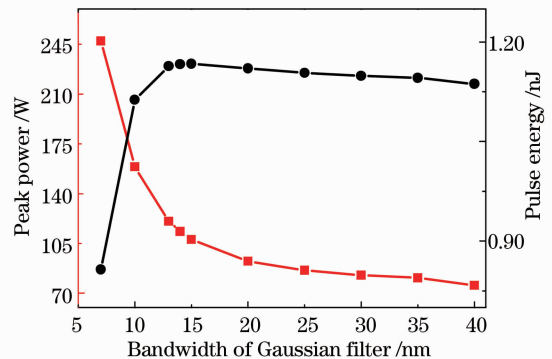


图5 滤波器带宽-脉冲峰值功率关系曲线(方点线)和滤波器带宽-脉冲能量关系曲线(圆点线)
Fig. 5 Peak power of pulse (square dot line) and pulse energy (dot line) versus bandwidth of filter

参 考 文 献

- Zhang Zhigang. Advances in high repetition rate femtosecond fiber lasers[J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, **31**(9): 0900130
张志刚. 高重复频率飞秒光纤激光技术进展[J]. *光学学报*, 2011, **31**(9): 0900130
- I. N. Duling. Sub-picosecond all-fiber erbium laser[J]. *Electron. Lett.*, 1992, **27**(6): 544~545

- 3 Deng Dinghuan, Zhan Li, Gu Zhaochang *et al.*. 50 fs pulse generation from all-fiber stretched-pulse laser[J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(11): 3094~3097
邓定桓, 詹黎, 顾照昶等. 50 fs 输出的全光纤展宽脉冲激光器[J]. *光学学报*, 2009, **29**(11): 3094~3097
- 4 M. E. Fermann, V. I. Kruglov, B. C. Thomsen *et al.*. Self-similar propagation and amplification of parabolic pulses in optical fibers[J]. *Phys. Rev. Lett.*, 2000, **84**(26): 6010~6013
- 5 L. M. Zhao, D. Y. Tang, J. Wu. Gain-guided soliton in a positive group-dispersion fiber laser[J]. *Opt. Lett.*, 2006, **31**(12): 1788~1790
- 6 Oktem Bulent, Ulgudu Coskun, F. O. Ilday. Soliton-similariton fibre laser[J]. *Nature Photon.*, 2010, **4**(5): 307~311
- 7 Zhang Zuxing, Oktem Bulent, F. O. Ilday. All-fiber-integrated soliton-similariton laser with in-line fiber filter[J]. *Opt. Lett.*, 2012, **37**(17): 3489~3491
- 8 L. F. Mollenauer, R. H. Stolen, J. P. Gordon. Experimental observation of picosecond pulse narrowing and solitons in optical fibers[J]. *Phys. Rev. Lett.*, 1980, **45**(13): 1095~1098
- 9 K. Tamura, E. P. Ippen, H. A. Haus *et al.*. 77-fs pulse generation from a stretched-pulse mode-locked all-fiber ring laser [J]. *Opt. Lett.*, 1993, **18**(13): 1080~1082
- 10 F. O. Ilday, J. R. Buckley, W. G. Clark *et al.*. Self-similar evolution of parabolic pulses in a laser[J]. *Phys. Rev. Lett.*, 2004, **92**(21): 213902
- 11 A. Chong, W. H. Renninger, F. W. Wise. All-normal-dispersion femtosecond fiber laser with pulse energy above 20 nJ [J]. *Opt. Lett.*, 2007, **32**(16): 2408~2410
- 12 Zhang Zuxing, Dai Guoxing. All-normal-dispersion dissipative soliton ytterbium-doped fiber laser without additional filter [J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, **31**(2): 0214005
张祖兴, 戴国星. 全正色散耗散孤子掺镱光纤激光器[J]. *光学学报*, 2011, **31**(2): 0214005
- 13 Chunmei Ouyang, Lu Chai, Hui Zhao *et al.*. Position effect of spectral filter on properties of highly chirped pulses in an all-normal-dispersion fiber laser[J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 2009, **45**(10): 1284~1288
- 14 G. P. Agrawal. *Nonlinear Fiber Optics & Applications of Nonlinear Fiber Optics* [M]. Jia Dongfang, Yu Zhenhong Transl.. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2002. 33~36
阿戈沃. 非线性光纤原理及应用[M]. 贾东方, 余震虹, 译. 北京: 电子工业出版社, 2002. 33~36