

文章编号: 1001-3806(2012)05-0607-05

线性啾啾光纤布喇格光栅反射谱的数值模拟

魏佳菊 梁一平* 戴特力

(重庆师范大学 物理与电子工程学院 重庆市高校光学工程重点实验室 重庆 400047)

摘要: 为了研究线性啾啾光纤布喇格光栅的特性,并进一步把它用于光纤激光器上,介绍了线性啾啾光纤布喇格光栅的耦合模理论,采用4阶Runge-Kutta法和传输矩阵法结合控制变量法,对线性啾啾光纤布喇格光栅反射率与啾啾系数、半峰全宽与光栅长度、反射率与直流纤芯折射率改变量之间的关系进行了数值模拟。结果表明,线性啾啾光纤布喇格光栅可以展宽带宽。基于这个结论,提出了利用线性啾啾光纤布喇格光栅作为光纤激光器腔镜,使输出谱线展宽,从而可作为宽带光源使用的方案。

关键词: 光纤光学; 耦合模方程; 数值模拟; 线性啾啾光纤布喇格光栅; 4阶Runge-Kutta法; 矩阵法

中图分类号: TN253 **文献标识码:** A **doi:** 10.3969/j.issn.1001-3806.2012.05.008

Numerical analysis of reflection spectrum of linearly chirped fiber Bragg gratings

WEI Jia-ju, LIANG Yi-ping, DAI Te-li

(Optical Engineering Key Laboratory of Chongqing City, College of Physics and Electronic Engineering, Chongqing Normal University, Chongqing 400047, China)

Abstract: In order to study the properties of linearly chirped fiber Bragg grating (LCFBG), and further use it in optical fiber lasers, the coupling theory of the LCFBG was introduced. By using four-order Runge-Kutta method, transfer matrix method and the control variable method, the dependence of reflectivity of the LCFBG on chirp coefficient, direct current index change spatially averaged over a grating period, and the dependence of full width at half maximum on the length of the LCFBG were simulated. The results show that linearly chirped fiber Bragg gratings can broaden the bandwidth. Based on this conclusion, the gratings are used as cavity mirrors of fiber lasers can expand the output spectrum, which can be used as a broadband light source.

Key words: fiber optics; coupled-mode equations; numerical analysis; linear chirped fiber Bragg grating; four-order Runge-Kutta method; matrix method

引言

光纤布喇格光栅 (fiber Bragg grating, FBG) 具有与光纤系统兼容性好、较低的传输损耗和插入损耗、抗电磁干扰、灵敏度高、价格低廉、制作简单、易于大批量生产等特点,啾啾光纤布喇格光栅 (chirped fiber Bragg grating, CFBG) 还具有色散补偿量大、能够实现光纤色散和色散斜率的同时补偿等优点^[1-4],因而被广泛用于光纤通信领域和传感器领域。另一方面,由于FBG作

为激光器的反馈与选频腔镜,可以得到稳定的窄线宽激光输出,而且激光器具有更为紧凑、简单的结构,有更高的稳定性以及可调谐性^[5],这对双包层光纤激光器的研制与应用具有重要的意义。

有诸多关于FBG作为光纤激光器腔镜的研究报道,但都是基于把光纤光栅看作具有某个固定反射率值的反射镜^[6-7],而未考虑反射率随波长的变化和带宽的影响等。对线性啾啾光纤布喇格光栅 (linearly chirped fiber Bragg grating, LCFBG) 为腔镜的全光纤激光器的数值模拟的研究^[8]相对较少。本文中根据线性啾啾光纤布喇格光栅的耦合模理论,采用4阶Runge-Kutta法和传输矩阵法模拟了线性啾啾光纤布喇格光栅反射率与啾啾系数、半峰全宽 (full width at half maximum, FWHM) 与光栅长度、反射率与直流 (direct current, DC) 纤芯折射率改变量之间的关系,为进一步以LCFBG作为腔镜的掺Yb³⁺双包层全光纤激光器的数值分析和实验研究作准备。

基金项目: 重庆市自然科学基金资助项目 (cstcjjA40029); 重庆市教育委员会科学技术研究资助项目 (KJ060816); 重庆市高校创新团队资助项目 (201013); 重庆师范大学博士启动基金资助项目 (11XLB014)

作者简介: 魏佳菊 (1987-), 女, 硕士研究生, 现主要从事光纤光栅及光纤激光器的制作研究。

* 通讯联系人。E-mail: liangyipinglyp@yahoo.com.cn

收稿日期: 2011-12-05; 收到修改稿日期: 2011-12-23

1 线性啁啾光纤布喇格光栅理论

啁啾光纤光栅是指光纤的纤芯折射率变化幅度或者折射率变化的周期沿光纤轴向逐渐变化的一种光纤光栅,其中以周期沿长度方向发生线性变化的线性啁啾光纤布喇格光栅最简单。对 LCFBG 的研究一般都是基于由麦克斯韦方程组推导的耦合模方程组,它们描述了系统中任何一个导模的慢变振幅沿传播方向的变化情况,是解各种耦合模问题的基础。根据相位匹配条件,FBG 中的模式耦合主要发生在正、反向传播的两个相同模式之间,若只考虑这两个模式之间的耦合,可得到简化的耦合模方程组^[9]:

$$\frac{dR}{dz} = i\sigma_m R(z) + i\kappa S(z) \quad (1)$$

$$\frac{dS}{dz} = -i\sigma_m S(z) - i\kappa^* R(z) \quad (2)$$

式中, R 和 S 可分别表示为 $R(z) \equiv A(z) \times \exp(i\delta z - \frac{\phi}{2})$ 和 $S(z) \equiv B(z) \exp(-i\delta z + \frac{\phi}{2})$, 其中 $A(z)$ 和 $B(z)$ 分别表示光栅中前向和后向传播模的复振幅, $\delta = 2\pi n_{\text{eff}}(\lambda^{-1} - \lambda_B^{-1})$ 为失谐量, 它是一个与 z 无关的参量, n_{eff} 为纤芯有效折射率, $\lambda_B \equiv 2n_{\text{eff}}\Lambda$ 是周期为 Λ 的弱导光纤(纤芯有效折射率调制深度 $\delta n_{\text{eff}} \rightarrow 0$) 的 Bragg 散射波长, 对于 LCFBG, Λ 是 z 的线性函数, $\sigma_m \equiv \delta + \sigma - \frac{1}{2} \frac{d\phi}{dz}$ 为 DC 自耦合系数, $\phi(z)$ 描述了光栅啁啾, 微分式 $\frac{1}{2} \frac{d\phi}{dz} = -\frac{4\pi n_{\text{eff}} z}{\lambda_B^2} \frac{d\lambda_B}{dz}$ 描述了线性啁啾光栅的相位, 啁啾系数 $C = \frac{d\lambda_B}{dz}$ 是光栅设计波长对位置的变化率, 一般以 nm/cm 为单位; κ 为交流(alternating current, AC)耦合系数, κ^* 是 κ 的复共轭, 对单模布喇格反射光栅, $\sigma = \frac{2\pi}{\lambda} \overline{\delta n_{\text{eff}}}$, $\kappa = \kappa^* = \frac{\pi}{\lambda} \nu \overline{\delta n_{\text{eff}}}$, $\overline{\delta n_{\text{eff}}}$ 为光栅周期空间分布的 DC 纤芯折射率改变量, 即纤芯折射率平均变化量, ν 是折射率变化的条纹可见度。

对于长度为 L 的 LCFBG, 边界条件为 $R(\frac{L}{2}) = 1$ 和 $S(\frac{L}{2}) = 0$, 从 $z = \frac{L}{2}$ 积分到 $z = -\frac{L}{2}$, 可得到

$$F_j = \begin{bmatrix} \cosh(\gamma_B \Delta z) & -i \frac{\sigma_m}{\gamma_B} \sinh(\gamma_B \Delta z) \\ i \frac{\kappa}{\gamma_B} \sinh(\gamma_B \Delta z) & \cosh(\gamma_B \Delta z) \end{bmatrix}$$

式中 i 是虚数单位, Δz 是第 j 段均匀光栅的长度, 相应第 j 段均匀光栅耦合系数可用 κ 和 σ_m 表示为 $\gamma_B =$

$R(-\frac{L}{2})$ 和 $S(-\frac{L}{2})$ 。光栅的振幅反射系数和功率反

射系数分别表示为 $\rho = S \frac{(-\frac{L}{2})}{R(-\frac{L}{2})}$ 和 $r = |\rho|^2$ 。

2 LCFBG 数值模拟

2.1 4 阶 Runge-Kutta 法

求解 1 阶微分方程:

$$\begin{cases} \frac{dy}{dt} = f(t, y) \\ y(t_0) = y_0 \end{cases} \quad (3)$$

(3) 式的解在点列 $t_{k+1} = t_k + h_k$ ($k = 0, 1, \dots$) 上的近似值 y_{k+1} , 其中 h_k 是 t_k 到 t_{k+1} 的步长, 一般略去下标记为 h 。Runge-Kutta 法采用单步法, 在计算 y_{k+1} 时只用到前一步值 t_k , t_{k+1} 和 y_k , 因此, 在有了初值以后就可以逐步往下计算。

对标准的 4 阶 Runge-Kutta 法描述^[10+11] 如下。自初始点 (t_0, y_0) 开始, 利用:

$$y_{k+1} = y_k + \frac{h(f_1 + 2f_2 + 2f_3 + f_4)}{6} \quad (4)$$

生成近似序列值, 其中:

$$\begin{cases} f_1 = f(t_k, y_k) \\ f_2 = f(t_k + \frac{h}{2}, y_k + \frac{h}{2}f_1) \\ f_3 = f(t_k + \frac{h}{2}, y_k + \frac{h}{2}f_2) \\ f_4 = f(t_k + h, y_k + hf_3) \end{cases} \quad (5)$$

2.2 传输矩阵法

把 LCFBG 分为 M 段均匀的光栅, 对于 LCFBG 其边界条件为 $R_0 = R(\frac{L}{2}) = 1$ 和 $S_0 = S(\frac{L}{2}) = 0$, 从 $z = \frac{L}{2}$ 计算到 $z = -\frac{L}{2}$, 可得 $R(-\frac{L}{2}) = R_M$ 和 $S(-\frac{L}{2}) = S_M$ 。光在各段均匀的光栅中传播可用矩阵表示为:

$$\begin{bmatrix} R_j \\ S_j \end{bmatrix} = F_j \begin{bmatrix} R_{j-1} \\ S_{j-1} \end{bmatrix} \quad (6)$$

式中, 每段光栅的传输矩阵 F_j 可表示为:

$$F_j = \begin{bmatrix} \cosh(\gamma_B \Delta z) & -i \frac{\kappa}{\gamma_B} \sinh(\gamma_B \Delta z) \\ i \frac{\sigma_m}{\gamma_B} \sinh(\gamma_B \Delta z) & \cosh(\gamma_B \Delta z) \end{bmatrix} \quad (7)$$

$\sqrt{\kappa^2 - \sigma_m^2}$ 当 $|\sigma_m| > \kappa$ 时 γ_B 为虚数。一旦知道每段均匀光栅的传输矩阵, 可用以下表达式计算输出光的幅度:

$$\begin{bmatrix} R_M \\ S_M \end{bmatrix} = F \begin{bmatrix} R_0 \\ S_0 \end{bmatrix} = F \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix};$$

$$F = F_M \cdot F_{M-1} \cdot \dots \cdot F_j \cdot \dots \cdot F_1 \quad (8)$$

一般要求 $\Delta z \gg \Lambda$, 也就意味着 $M \ll 2n_{\text{eff}} \frac{L}{\lambda_B}$, 对一般的 LCFBG, M 取 100 就足够^[9]。对 (8) 式作数值模拟, 就可以得到相关参量之间的关系图。

3 模拟结果及讨论

3.1 反射率与啁啾系数的关系

图 1a 和图 1b 中分别利用 MATLAB 自带 4 阶 Runge-Kutta 法函数 ode45 和传输矩阵法编程, 对微分方程 (1) 式和 (2) 式作数值模拟所得的反射率 (无单位) 随波长变化关系图。其中, 横坐标为波长, 纵坐标为反射率, 啁啾系数 C 取 $\pm 2.8 \text{ nm/cm}$, $\pm 1.4 \text{ nm/cm}$, $\pm 0.7 \text{ nm/cm}$ 和 0 等几个特定的值, 其它参量取值见表 1。

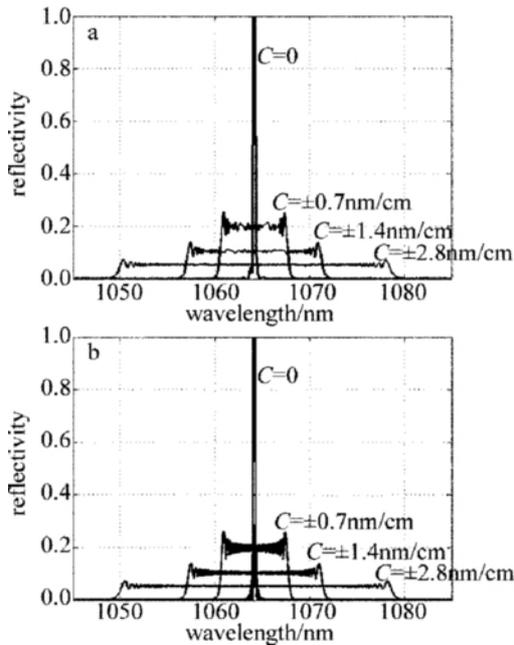


Fig. 1 Reflectivity versus wavelength simulation result
a—Runge-Kutta method b—transfer matrix method

Table 1 The related simulation parameters of LCFBG

parameter	symbol/unit	value
grating length	L/cm	1.2
centre wavelength	λ_0/nm	1064
effective refractive index	n_{eff}	1.46
DC index change spatially averaged over a grating period	$\overline{\delta n_{\text{eff}}}$	0.0002
chirp coefficient	$C/(\text{nm} \cdot \text{cm}^{-1})$	2.8
fringe change visibility of the index change	v	1
nominal period	Λ/nm	$1064/(2 \times 1.46) + Cz$
length of the j th uniform section	$\Delta Z/\text{cm}$	0.01

由图的直观性可以得出 Runge-Kutta 和传输矩阵法模拟的结果, 即传输矩阵法所作图的线条显得较浓密, 造成这个区别的原因可能是在进行模拟时, 两种方法步长不同或是两种方法本身的系统误差所致。除这个区别外, 可以得到两个图基本相同的结论。当所取数据一致时, 反射谱的带宽和反射率大小相等, LCFBG 的反射谱都随着啁啾系数的增加而展宽, 而峰值反射率降低, 表 1 中所给参量下的啁啾光栅只要 C 的绝对值相同, 反射谱也相同; 另一方面, 当 $C=0$ 时, LCFBG 成为均匀 FBG, 此时的反射率达到最大值。

这个结论可以解释为啁啾光纤光栅在不同的位置会反射不同波长的光波, 整个光栅反射的是具有一定带宽的光波。若把啁啾光纤光栅看作是不同周期的均匀周期光纤光栅串联, 每个光栅以不同的反射率反射一定波长的光波, 则啁啾光纤光栅的反射谱就是所有反射波的叠加。因此, 啁啾系数越大, 反射谱带宽越宽。这和参考文献 [8] 中所给解释一致, 所不同的是参考文献 [8] 中反射率随啁啾系数 C 呈线性关系。为直观起见, 本文中采用传输矩阵法模拟了波长在

1064nm 处反射率与啁啾系数 $C = \frac{d\lambda_B}{dz}$ 之间的关系 (由于 Runge-Kutta 法编写的程序需要运行较长时间, 以下所作各图都是基于传输矩阵法), 如图 2 所示, 横坐标为啁啾系数, 纵坐标为反射率, 其它参量取值见表 1, 模拟结果与参考文献 [11] 中所报道的反射率随啁啾系数变化的规律大致一样, 所不同的是, 参考文献 [11] 中模拟的是最大反射率随 $-\frac{4\pi n_{\text{eff}} w^2}{\lambda_B^2} \frac{d\lambda_B}{dz}$ (w 为半峰全宽) 的变化关系图, 二者相差一个系数关系。从图中可以看出反射率与啁啾系数呈非线性关系, 与图 1 所得结果一致。即当 $|C| < 1 \text{ nm/cm}$ 且逐渐增大时, 反射率由最大值迅速减小, 随着 $|C| > 1 \text{ nm/cm}$ 且逐渐增大时, 反射率缓慢减小, 并逐渐趋于 0; 另外, 反射率关于 $C=0$ 对称, 这可解释为光从表 1 中所给参量下的光栅周期逐渐增大或逐渐减小方向入射时, 反射谱线都一样, 即带宽和反射率大小相同。

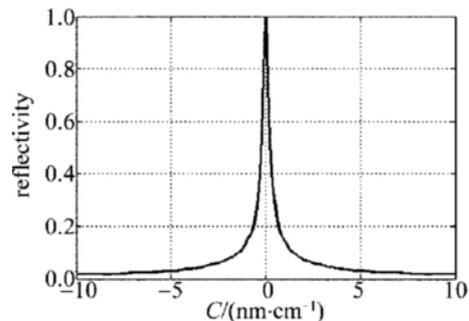


Fig. 2 Reflectivity versus chirp coefficient simulation result

3.2 半峰全宽与光栅长度的关系

如图3所示,横坐标为波长,纵坐标为反射率,LCFBG的长度分别取3mm、6mm和12mm时的反射谱,其它参量取值见表1。从图中可以看出,反射谱的半峰全宽随着光栅长度的增大而展宽,而反射率的大小并未改变。这可以解释为光波在光栅内传播的距离越长时,前后向波耦合程度越充分,光栅的反射带宽也增大。为直观起见,如图4所示,横坐标为光栅长度,纵坐标为FWHM。由图可得FWHM与光栅长度 L 之间成非常好的线性关系,可以推导这种线性关系对制作光纤传感器具有重要的价值。

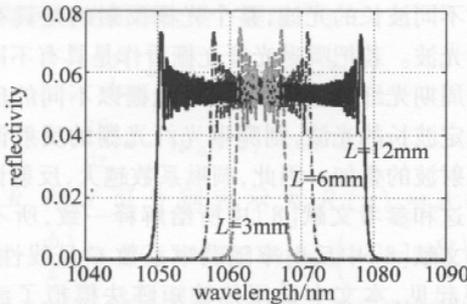


Fig. 3 Reflection spectrum simulation result with grating length some fixed value

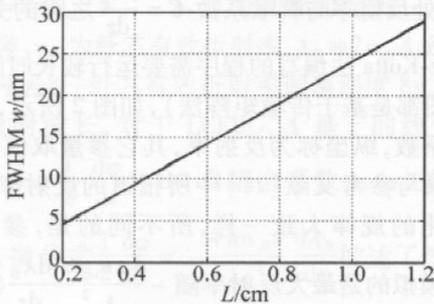


Fig. 4 FWHM versus grating length simulation result

3.3 反射率与DC纤芯折射率改变量的关系

如图5所示,横坐标为波长,纵坐标为反射率,LCFBG的DC纤芯折射率改变量分别取0.0002、0.00035和0.0005时的反射谱,其它参量取值见表1。从图中可以看出,反射谱的反射率随着光栅DC纤芯折射率改变量的增大而增大,而半峰全宽的大小并未改变。如图6所示,给出了波长在1064nm处反射率与光栅DC纤芯折

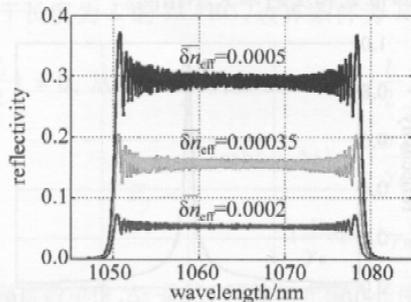


Fig. 5 Reflection spectrum simulation result with DC index change some fixed value

射率改变量的关系图,可以得出反射率随着光栅DC纤芯折射率改变量 $\overline{\delta n_{eff}}$ 的增大而增大的“阶梯”状非线性关系,当 $\overline{\delta n_{eff}} = 0.002$ 时反射率趋近1的结论。这可以解释为随着 $\overline{\delta n_{eff}}$ 增大,使得光栅AC耦合系数 κ 和DC自耦合系数 σ_m 增大,从而前后向波的耦合程度越充分,所以反射率也随着增大,而当 $\overline{\delta n_{eff}}$ 大于某一值时,光纤不再是弱导光纤,耦合模方程组(1)式和(2)式就不再适合该种情况。利用这个结论,可以推导在运用相位掩膜法制作光栅时,紫外光脉冲能量越大、频率越高、曝光时间越长,只要在弱导光栅的范围和光纤损伤阈值内,就可以通过增大 $\overline{\delta n_{eff}}$ 从而提高所制作的光栅的反射率。

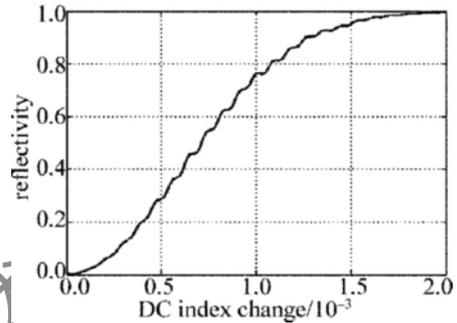


Fig. 6 Reflectivity versus DC index change simulation result

基于LCFBG可以展宽带宽,且选择不同周期的光栅,其反射波段也会相应的改变,若用多个LCFBG串联作为光纤激光器的输出镜,可得到带宽较宽的输出谱线,可以作为宽带光源使用,从而大大降低宽带光源的成本。参考文献[12]中理论分析和实验验证了采用集成级联采样光纤光栅进入激光腔形成稳定的多种波长激光的方法,这和光纤激光器串联LCFBG作为宽带光源有相似之处,说明宽带光源方案是具有可行性的。

4 结论

从耦合模方程组着手,运用控制变量法的思想,采用Runge-Kutta法和传输矩阵法模拟并讨论了中心波长为1064nm的线性啁啾光纤布喇格光栅反射谱与啁啾系数、光栅长度及纤芯折射率平均变化量之间的特性。发现啁啾系数影响光栅的反射率和反射带宽,但二者不可兼得,增加反射率会以降低带宽为代价;光栅长度越长,FWHM越宽,但不影响光栅的反射率;纤芯折射率平均变化量越大,反射率越大,但不影响反射谱的带宽,因而可把腔镜为LCFBG的光纤激光器作为宽带光源。

参考文献

[1] TAN Zh W, NING T G, LIU Y, et al. Application of dispersion compensator based on chirped fiber gratings in ultra long-haul DWDM system[J]. Acta Physica Sinica, 2006, 55(6): 2799-2803 (in Chi-

- nese) .
- [2] PEI L , NING T G , LI T J , *et al.* Studies on the dispersion compensation of fiber Bragg grating in high-speed optical communication system [J]. *Acta Physica Sinica* , 2005 , 54(4) : 1630-1635(in Chinese) .
- [3] PEI L , JIAN Sh Sh , YAN F P , *et al.* Research on the $4 \times 10\text{Gbit/s}$ 400km dispersion compensation by chirped optical fibre grating [J]. *Acta Physica Sinica* , 2003 , 52(3) : 615-619(in Chinese) .
- [4] PEI L , NING T G , QI Ch H , *et al.* Research on PMD compensation of CFBG in high speed optical communication system [J]. *Chinese Journal of Lasers* , 2010 , 37(1) : 142-146(in Chinese) .
- [5] FU Sh G , FAN W D , ZHANG Q , *et al.* Yb^{3+} -doped double-clad fiber laser based on fiber Bragg grating [J]. *Acta Physica Sinica* , 2004 , 53(12) : 4262-4267(in Chinese) .
- [6] BAEK S , SOH D B S , JEONG Y , *et al.* A cladding-pumped fiber laser with pump-reflecting inner-cladding Bragg grating [J]. *IEEE Photonics Technology Letters* , 2004 , 16(2) : 407-409.
- [7] ZHOU D Ch , YU F X , LU J J , *et al.* Design of Yb-doped all-fiber laser device based on optical fiber gratings resonator [J]. *Acta Photonica Sinica* , 2010 , 39(3) : 389-392(in Chinese) .
- [8] HUANG X J , LIU Y Zh , SUI Zh , *et al.* Yb^{3+} -doped fiber laser with chirped fiber grating [J]. *Journal of Applied Optics* , 2005 , 26(4) : 42-45(in Chinese) .
- [9] ERDOGAN T. Fiber grating spectra [J]. *Journal of Lightwave Technology* , 1997 , 15(8) : 1277-1294.
- [10] MATHEWS J H , FINK K D. Numerical methods using MATLAB [M]. 4th ed. Beijing: Publishing House of Electronics Industry , 2005: 376-379(in Chinese) .
- [11] ZHAO J F. An object-oriented simulation program for fiber Bragg gratings [D]. Johannesburg , South Africa: Rand Afrikaans University 2001: 72-73.
- [12] LONG X B , YANG J L. Multi-wavelength actively mode-locked fiber laser with a double-ring configuration and integrated cascaded sampled fiber Bragg gratings [J]. *Laser Technology* , 2010 , 34(2) : 224-226(in Chinese) .

版权所有 © 《激光技术》编辑部