

基于半导体光放大器的脉宽可调谐暗脉冲激光器

潘洪刚^{1,2} 于晋龙¹ 王文睿¹ 刘毅¹ 杨恩泽¹

¹天津大学电子信息工程学院, 天津 300072

²天津理工大学电子信息工程学院, 薄膜电子与通信器件重点实验室, 天津 300384

摘要 利用半导体光放大器(SOA)实现了一种脉宽可调谐的暗脉冲光纤激光器。将基于SOA的光纤激光器的一部分输出反馈注入SOA,由于SOA的非线性偏振旋转效应,输出脉冲经历不同的偏振演化,从而得到暗脉冲输出。通过改变反馈腔长度可以实现暗脉冲的脉宽调谐。分析了半导体光放大器的非线性偏振效应及暗脉冲的产生机理。并在实验中观察到了脉宽可调谐的暗脉冲输出。通过改变反馈腔长,在重复频率不变(11.31 MHz)的条件下,得到了脉宽为5.91~22.34 ns可调的暗脉冲。

关键词 激光器; 半导体光放大器; 暗脉冲; 非线性偏振旋转; 光纤激光器

中图分类号 TN248.1

文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201535.0514003

Pulse Width Tunable Dark Pulse Laser Based on Semiconductor Optical Amplifier

Pan Honggang^{1,2} Yu Jinlong¹ Wang Wenrui¹ Liu Yi¹ Yang Enze¹

¹School of Electronic & Information Engineering, Tianjin University, Tianjin 300372, China

²Key Laboratory of Film Electronics and Communication Devices, School of Electronic Information Engineering, Tianjin University of Technology, Tianjin 300384, China

Abstract A dark pulse optical fiber laser with tunable pulse widths based on semiconductor optical amplifier (SOA) is demonstrated. By injecting a portion of light to the SOA from the output of the optical fiber laser, due to the nonlinear polarization rotation of the SOA, the output pulse experience different polarization evolutions and dark pulse is obtained. By changing the length of the feedback cavity, dark pulses with different widths are obtained. Nonlinear polarization rotation effect of the SOA and the mechanism of the dark pulse production are analyzed. In the experiment, the output of the dark pulse with tunable widths is observed. By changing the length of the feedback cavity, under the condition of fixed repetition frequency(11.31 MHz), dark pulses with tunable widths of 5.91~22.34 ns are obtained.

Key words lasers; semiconductor optical amplifier; dark pulse; nonlinear polarization rotation; optical fiber laser

OCIS codes 140.3510; 140.3560; 140.3600; 140.4480

1 引言

光纤激光器与其他类型激光器相比,具有效率高、体积小、光束质量好等优点,可广泛应用于光纤通信、大气光学、材料加工等领域^[1-2]。脉冲光纤激光器是光纤激光器中比较重要的一类,被广泛应用于高速光纤通信系统^[3-4]。传统意义上的脉冲激光器是稳定连续光波背景下光强的突然显著上升,即所谓的亮脉冲。亮脉冲激光器广泛应用在通信、激光测距、光伏工业、精密加工、美容医疗、科学研究等领域,其理论及设计方

收稿日期: 2014-12-13; 收到修改稿日期: 2015-02-16

基金项目: 国家973计划(2010CB327603、2010CB315704)、国家自然科学基金青年基金(61205061)

作者简介: 潘洪刚(1979—),男,博士研究生,主要从事光纤激光器方面的研究。E-mail: phg022@163.com

导师简介: 于晋龙(1969—),教授,博士生导师,主要从事光纤通信和非线性光纤光学的研究。

E-mail: yujinlong@tju.edu.cn(通信联系人)

案已十分成熟。但亮脉冲在光波导中传输时会存在一些问题,比如说,对传输过程中产生的噪声和损耗过于敏感导致其功率在传输过程中会逐渐降低;暗脉冲是稳定连续光波背景下光强的突然显著降落,它除了可以实现传统亮脉冲相同的功能外,还具有一些亮脉冲无法比拟的优点:噪声更低、损耗更小^[5-6]。

自从Weiner等^[7]报道了在空间激光器结构中观察到基频暗孤子之后,暗脉冲吸引了众多研究者的注意,并且在不同的激光器中观察到了暗脉冲的存在^[8-13]。在锁模激光器中,Feng等^[8]通过数值方程研究了暗脉冲的产生,并在量子阱二极管激光器中产生了暗脉冲,实验结果与仿真结果非常接近。Mark等^[9]应用功率—能量方程,在理论上研究了锁模激光器中的暗脉冲,得出了当激光器中能量足够大,达到增益饱和时会产生暗脉冲的结论。Weiner等^[10]在半导体激光中获得了基频暗脉冲。Zhang等^[11]报道了在一个线性双折射环形激光器中存在矢量暗孤子。应用一个类似的结构,Wang等^[12]应用自脉冲技术,通过调整偏振控制器能够观察到亮脉冲、暗脉冲和亮、暗脉冲对。暗脉冲也可以在非锁模激光器中获得,Gao等^[13]在一个含有亚硝酸盐光纤的环形腔结构中,获得了方波长脉冲,该脉冲是两个不同偏振态脉冲的叠加,并通过调整腔内的偏振控制器,实现了脉冲从24~112 ns可调谐,但是在该结构中,由于腔内的偏振态具有随机性,因此并不能准确地调谐出所需脉宽的暗脉冲。

应用半导体光放大器(SOA)非线性偏振旋转(NPR)效应,应用反馈腔结构实现了脉宽可调谐暗脉冲激光器。该结构中暗脉冲的脉宽由反馈腔与环形谐振腔的长度差决定。可以通过改变反馈腔的腔长,方便而准确地得到确定脉宽的暗脉冲输出。实验中,在11.31 MHz脉冲重复频率的条件下,实现了脉宽从5.91 ns到22.34 ns的暗脉冲。

2 实验装置及原理

实验原理图如图1所示,暗脉冲实现的核心器件是SOA,在激光器中有两个任务,一是作为激光器的增益介质,二是引入非线性偏振旋转^[14];隔离器(ISO)是使激光腔内的光做单向运转;可调高斯型带通滤波器(带宽为1 nm)起到选择波长的作用,并且可以限制激光器起振的模式数量,以避免模式之间争抢载流子。在连接光纤时,为了防止法兰盘连接的地方有光的反射,影响输出激光振荡,将器件的尾纤用熔接机直接焊接在了一起。由于SOA具有横模(TE)和纵模(TM)两个模式,本身结构的不对称性导致SOA具有双折射效应,偏振控制器(PC)放于SOA之前,通过调整输入到SOA的光的偏振态来改变光功率在SOA的TE/TM上的功率分配,进而影响到输入光的非线性偏振旋转。SOA的另一端接环形器(CIR)的2口。通过一个50:50的光耦合器(C1),将部分输出信号经由环形器反馈进入SOA,从而在SOA产生交叉相位调制效应。激光器的腔长是18.04 m,对应的腔基频约是11.31 MHz,将70:30耦合器(C2)的30%端口通过3 dB带宽为150 MHz的光电探测器转换为电信号后,由采样示波器、频谱仪来对信号进行检测。

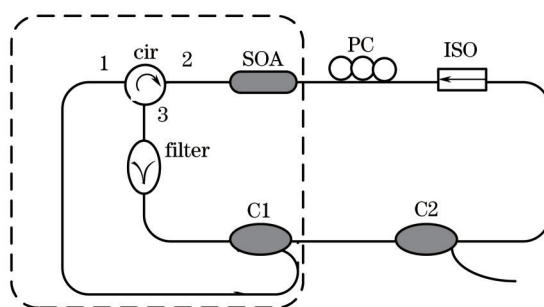


图1 脉宽可调谐暗脉冲激光器实验装置图

Fig.1 Schematic setup of pulse width tunable dark pulse laser

在SOA中,存在TE和TM两种模式,分别将光的TE模式方向和TM模式方向设为与x轴和y轴方向重合,行波方向设为z轴。假设入射到SOA中的光为线偏振态,并且偏振方向与SOA的TM轴,即y轴成 θ 角,输入信号的振幅为E,初始相位为 φ_0 (通常设为0), $\mathbf{u}_{TE/TM}$ 是水平(或垂直)轴的单位矢量,如图2所示。

进入SOA的初始光场表达式为^[15]

$$\mathbf{E}_0 = E \sin \theta \exp(i\varphi_0) \mathbf{u}_{TE} + E \cos \theta \exp(i\varphi_0) \mathbf{u}_{TM}, \quad (1)$$

光在SOA中传输时,利用琼斯矩阵表示的光场为

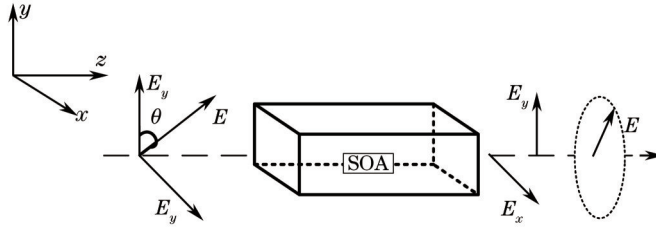


图2 SOA-NPR产生机制示意图

Fig.2 Schematic diagram of SOA-NPR mechanism

$$\mathbf{E} = \exp[i(\omega t - kz + \phi_0)] \begin{bmatrix} E_{TE} \exp(i\Delta\phi_{TE}) \\ E_{TM} \exp(i\Delta\phi_{TM}) \end{bmatrix}, \quad (2)$$

$E_{TE/TM}$ 是在 SOA 中传输光场的 TE/TM 分量, $\phi_{TE/TM}$ 为 TE/TM 模式的相移量。 $E_{TE/TM}$ 的表达式为

$$\begin{cases} E_{TE} = GE \sin \theta \mathbf{u}_{TE} \\ E_{TM} = E \cos \theta \mathbf{u}_{TM} \end{cases}, \quad (3)$$

式中 G 为 TE 模式与 TM 模式的单程增益比。载流子浓度为零时, 设 TE/TM 模式波导折射率分别为 n_r^{TE} 和 n_r^{TM} , 当有源区中载流子的浓度改变 ΔN 时, 将导致有源区折射率发生变化, 进而导致 TE/TM 模式发生变化, 设 Γ 为光场限制因子, $\frac{dn}{dN}$ 为微分折射率, 对应于 TE/TM 模, 其模式折射率分别为

$$\begin{aligned} n^{TE} &= n_r^{TE} + \Gamma^{TE} \times \frac{dn^{TE}}{dN} \times \Delta N \\ n^{TM} &= n_r^{TM} + \Gamma^{TM} \times \frac{dn^{TM}}{dN} \times \Delta N \end{aligned} \quad (4)$$

波导折射率 n_r^{TE} 和 n_r^{TM} 的不同表征了 SOA 的固有双折射, $\Gamma \times \frac{dn}{dN} \times \Delta N$ 则代表了模式折射率随载流子浓度改变而产生的变化, TE/TM 两个模式的相移 $\Delta\phi_{TE/TM}$ 则定义为

$$\begin{cases} \Delta\phi_{TE} = \frac{2\pi L n^{TE}}{\lambda} \\ \Delta\phi_{TM} = \frac{2\pi L n^{TM}}{\lambda} \end{cases}, \quad (5)$$

两个模式间的相移差为

$$\Delta\phi_{TE-TM} = \Delta\phi_{TE} - \Delta\phi_{TM}^{[15]}, \quad (6)$$

式中 L 是 SOA 的有源区长度, λ 是光信号的波长, $n_{TE/TM}$ 是两个模式的有效折射率。

由(2)式和(3)式可知, 输出 SOA 的光场 E_1 可表示为

$$\mathbf{E}_1 = GE \sin \theta e^{i\Delta\phi_{TE}} + E \cos \theta e^{i\Delta\phi_{TM}} = GE \sin \theta [\cos(\Delta\phi_{TE}) + i \sin(\Delta\phi_{TE})] + E \cos \theta [\cos(\Delta\phi_{TM}) + i \sin(\Delta\phi_{TM})]. \quad (7)$$

设输出光场方向和 TM 方向所成角度为 α , 则有

$$\alpha = \arctan \frac{G \sin \theta \cos(\Delta\phi_{TE}) + \cos \theta \cos(\Delta\phi_{TM})}{G \sin \theta \sin(\Delta\phi_{TE}) + \cos \theta \sin(\Delta\phi_{TM})}. \quad (8)$$

由以上分析可知, 在 SOA 中, 偏振旋转由两种原因产生: 1) 光的 TE 模式和 TM 模式在 SOA 中获得的增益不同, TE 模式和 TM 模式之间的增益比值发生变化, 导致出射光的偏振态发生改变; 2) SOA 本身的固有双折射以及 SOA 自身发出的光引入的附加双折射的存在, 导致光的 TE 模式/TM 模式会在 SOA 中经历不同的折射率, 致使 TE/TM 模式的相位变化不同。因此, 当光波经过 SOA 时, 其偏振态会发生改变, 这就是非线性偏振旋转效应^[15]。

在基于反馈腔结构的暗脉冲激光器中, 如果没有反馈腔的存在, 调整输入到 SOA 的光的偏振态产生非线性偏振旋转效应, 则输出自锁模脉冲^[16]。

加入反馈腔以后, 由于 SOA 内同时存在两束光, 通过 SOA 会对激光器谐振腔产生调制作用, SOA 内的载流子方程将发生改变, 使得谐振腔内的脉冲的相位发生变化, 即交叉相位调制(XPM)^[17], 脉冲的作用过程如图 3 所示, 反馈腔的脉冲通过环形器注入到 SOA 中, 定义脉冲功率较强的部分为‘1’码, 而功率较弱的部分为‘0’码。‘1’码作用时间内, 进而对谐振腔的脉冲的相位产生调制, 使得激光器产生较高功率的输出, 而‘1’码

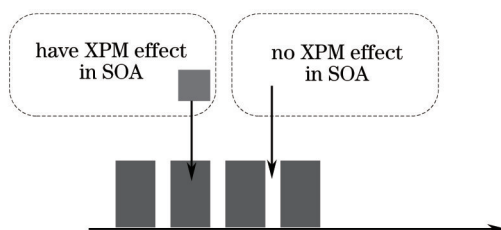


图3 激光器中暗脉冲演化原理图

Fig.3 Schematic diagram of dark pulse evolution in laser

的持续时间对应光在反馈腔的延时时间；‘0’码期间，不会对脉冲产生作用，对应较低功率的输出。在激光器形成振荡以后，‘1’码部分功率不断增大，‘0’码部分由于腔内损耗的存在功率不断减小，反馈腔取不同的长度，将会形成不同脉宽的暗脉冲。

3 实验结果及分析

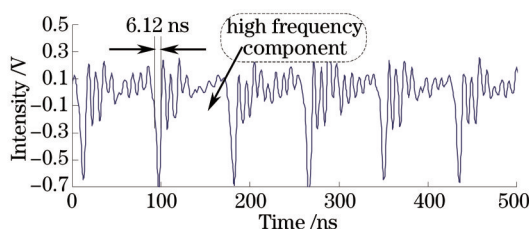


图4 暗脉冲波形图

Fig.4 Waveform of dark pulse

当SOA的抽运电流到达220 mA的时候，调整激光器腔内的偏振控制器(PC)可以获得如图4所示的暗脉冲，此时暗脉冲‘0’码的脉宽约为5.91 ns，而反馈回路比激光器的腔短约1.21m，此差值造成的光延时约等于5.89 ns。与理论分析基本相符。同时，发现‘1’码处有许多高频振荡分量，从波形图上观察到的脉冲“尖峰”判断，高频振荡约是基频的10倍，并不是基频11.31 MHz的整数倍。

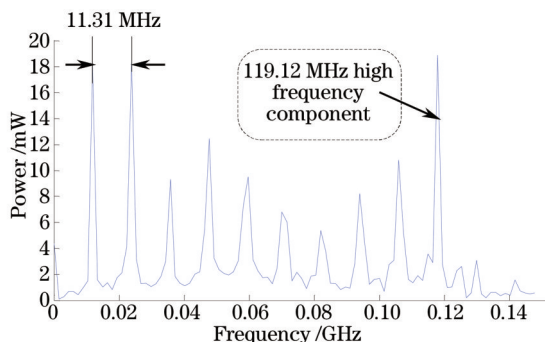


图5 暗脉冲频谱图

Fig.5 Spectrum of dark pulse

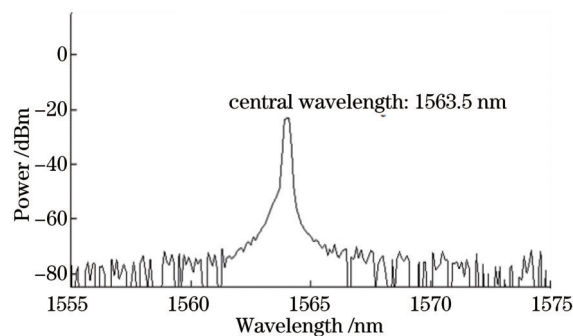


图6 暗脉冲激光器光谱图

Fig.6 Spectrogram of dark pulse laser

把时域的采样数据做了离散傅里叶变换，脉冲的重复频率是11.31 MHz，发现在119.12 MHz处有一个谐波分量且功率比较强，是脉冲基频的10.53倍，初步判断暗脉冲‘1’码的高频振荡可能是由这个高频分量造成的，但并不是由激光振荡引起的，可能是实验中的某些器件造成的。

在如图6所示的暗脉冲激光器光谱图中，由于窄带高斯滤波器的存在，其中心波长是1563.5 nm，带宽是1 nm。实验过程中，保持激光器的腔长不变，只调整反馈回路的长度，使反馈回路和激光器的腔长之差发生变化(反馈回路的长度始终小于环形腔的长度)，得到了如图7(a)~(f)所示暗脉冲时域波形图，表1列出了两回路长度差与暗脉冲脉宽对照表，从表格中可以看出，两回路之差决定的光延时，约等于暗脉冲的脉宽。并且从波形图和频谱上都能看到119.12 MHz的高频分量，对实验中的器件进行替换重复实验，判断出高频分量是由光电探测器引起的。实验过程中改变激光器的腔长，脉冲的重复频率发生变化，但是暗脉冲的脉宽始终等于两回路之差决定的光延时，2 h内观察脉冲变化，脉冲幅度比较稳定，脉宽大小没有发生变化。

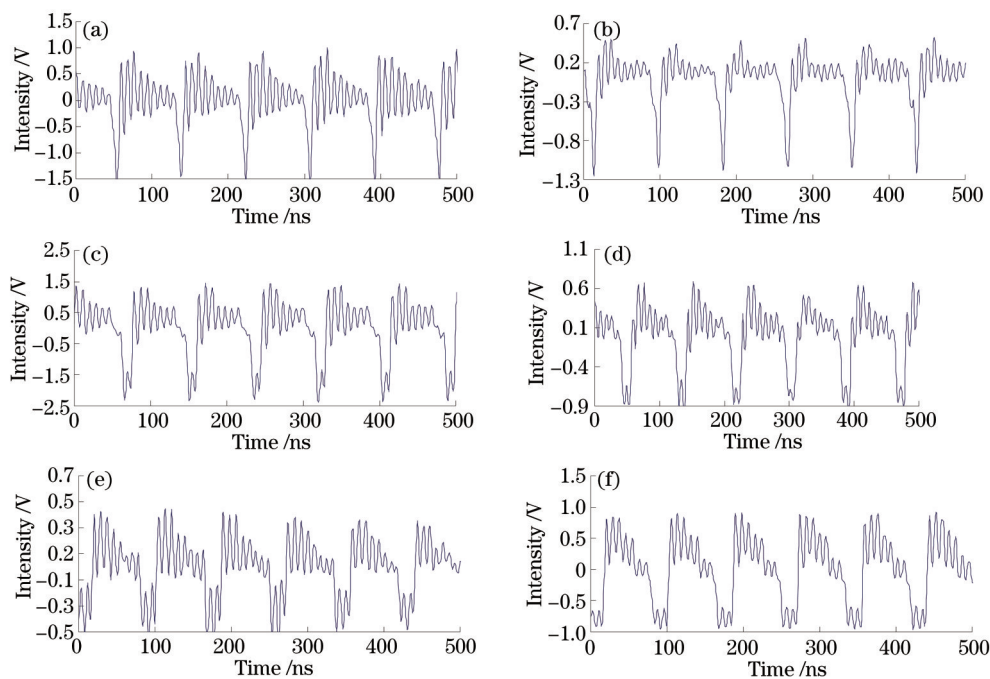


图7 不同脉宽的暗脉冲时域波形图

Fig.7 Time-domain waveform of dark pulse with different pulse widths

表1 两回路长度差与暗脉冲脉宽对照表

Table 1 Comparison table between length difference of two cavities and dark pulse widths

Figure number	a	b	c	c	e	f
Length /m	1.62	2.55	2.85	3.26	4.08	4.57
Delay /ns	7.96	10.07	13.98	15.96	19.97	22.41
Pulse width /ns	7.98	10.12	14.01	16.03	20.05	22.34

4 结 论

对SOA非线性偏振旋转特性进行了分析,并将其应用到了暗脉冲激光器中。在基于SOA的暗脉冲激光器中,获得了中心波长是1563.5 nm、重复频率是11.31 MHz的暗脉冲,由于SOA中交叉相位调制效应的存在,通过改变反馈腔的长度,观察到了5.91~22.34 ns的暗脉冲。暗脉冲可应用于光通信、光逻辑、超快光测量等领域,并为SOA用于光纤激光器的研究提供了参考。

参 考 文 献

- 1 Liu Jiang, Wang Pu. High-power narrow-bandwidth continuous wave thulium-doped all-fiber laser[J]. Chinese J Lasers, 2013, 40(1): 0102001.
刘江,王璞.高功率窄线宽全光纤结构掺铥连续光纤激光器[J].中国激光,2013,40(1):0102001.
- 2 Xun Doudou, Yang Sigang, Yin Feifei, *et al.*. Widely tunable mode-locked fiber operating in 1 μm wavelength range[J]. Acta Optica Sinica, 2013, 33(7): 0706013.
荀斗斗,杨四刚,尹飞飞,等.1 μm 波段宽带可调谐锁模光纤激光器[J].光学学报,2013,33(7):0706013.
- 3 T Morioka, S Kawanishi, H Takara, *et al.*. 100 Gbit/s \times 4 ch, 100 km repeaterless TDM-WDM transmission using a single supercontinuum source[J]. Electron Letter, 1996, 32(5): 468-470.
- 4 Z Ahmed, N Onordera. High repetition rate optical pulse generation by frequency multiplication in active fiber ring lasers[J]. Electreon Lett, 1996, 32(15): 455-457.
- 5 D Krifikel, N J Halas, G Giuliani, *et al.*. Dark-pulse propagation in optical fibers[J]. Phys Rev Lett, 1988, 60(1): 29-32.
- 6 Jin Xiaoxi, Ran Yang, Li Miao, *et al.*. Research progress of dark pulse laser[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2012, 19(9):

090006.
晋晓曦, 冉 阳, 李 森, 等. 暗脉冲激光器的研究进展[J]. 激光与光电子学进展, 2012, 19(9): 090006.
- 7 A M Weiner, J P Heritage, R J Hawkins. Experimental observation of the fundamental dark soliton in optical fibers[J]. Phys Rev Lett, 1988, 61(21): 2445-2448.
- 8 M Feng, K L Silverman, R P Mirin. Dark pulse quantum dot diode laser[J]. Opt Express, 2010, 18(13): 13385-13395.
- 9 M J Ablowitz, T P Horikis, S D Nixon. Dark solitons in mode-locked lasers[J]. Opt Lett, 2011, 36(6): 793-795.
- 10 A M Weiner, J P Heritage, R J Hawkins, *et al.*. Experimental observation of the fundamental dark soliton in optical fibers[J]. Phys Rev Lett, 1988, 61(21): 2445 - 2448.
- 11 H Zhang, D Y Tang, L M Zhao. Vector dark domain wall solitons in a fiber ring laser[J]. Opt Express, 2010, 18(5): 4428-4433.
- 12 H Y Wang, W C Xu, W J Cao. Experimental observation of bright-dark pulse emitting in an all-fiber ring cavity laser[J]. Laser Phys, 2012, 22(1): 282-285.
- 13 W Gao, M Liao, H Kawashima, *et al.*. Dark-square-pulse generation in a ring cavity with a tellurite single-mode fiber[J]. Photonics Technology Lett, 2013, 25(6): 546-549.
- 14 X Yang, Z Li, E Tangdionga, D Lenstra. Sub-picosecond pulse generation employing an SOA based nonlinear polarization switch in a ring cavity[J]. Opt Express, 2004, 12(11): 2448-2453.
- 15 B F Kennedy, S Philippe, P Landais. Experimental investigation of polarization rotation in semiconductor optical amplifiers[J]. Semiconductor Opto-Electronics, 2004, 151(2): 114-118.
- 16 Pan Honggang, Yu Jinlong, Wang Wenrui *et al.*. Semiconductor optical amplifier based self-mode locking laser and phenomenon dimidiate frequency[J]. Chinese J Lasers, 2013, 40(11): 1102006.
潘洪刚, 于晋龙, 王文睿, 等. 基于半导体光放大器的自锁模激光器及重复频率分频现象[J]. 中国激光, 2013, 40(11): 1102006.
- 17 M Usami, R Inohara, K Nishimura, M Tsurusawa. Experimental analysis of cross gain modulation and cross phase modulation in SOA with assist light injection[C]. IEEE, 2002: TuK1.

栏目编辑: 宋梅梅