

# 基于半导体光放大器的双脉冲激光器

潘洪刚 张爱玲\* 宋殿友 薛玉明

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** 为了得到脉宽可调谐的双脉冲激光器,提出了基于半导体光放大器的8字腔激光器结构。该方案中,将半导体光放大器置于非线性光纤环境的非对称位置,应用半导体光放大器的非线性偏振旋转产生激光脉冲,当半导体光放大器的驱动电流为200 mA时,通过调整腔内的偏振控制器,得到重复频率为10.05 MHz和12.70 MHz,脉冲宽度分别为33.40 ns和30.08 ns的双脉冲,同时改变激光器腔长以及半导体光放大器在非线性放大镜中的位置,应用非线性光纤环境的开关特性,双脉冲的脉宽也做相应的改变。

**关键词** 激光器; 双脉冲; 半导体光放大器; 非线性偏振旋转

中图分类号 TN248.1

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201542.0602012

## Laser of Double-Pulse Based on Semiconductor Optical Amplifier

Pan Honggang Zhang Ailing Song Dianyou Xue Yuming

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

**Abstract** Key Laboratory of Film Electronics and Communication Devices. In order to obtain double-pulse with tunable pulse width, a scheme of laser structure based on semiconductor optical amplifier (SOA) is proposed. In this scheme, the SOA is put asymmetric in the nonlinear optical fiber loop mirror, pulse produced by nonlinear polarization rotation of the SOA. when the drive current of the SOA is up to 200 mA, through adjusting the polarization controller, double-pulses with pulse durations of 33.40 ns and 30.08 ns, with frequency repetitions of 10.05 MHz and 12.70 MHz are achieved, respectively. By changing the cavity length of the laser and the position of the SOA in the nonlinear amplifying loop mirror (NALM), double-pulse width changes accordingly due to the switch characteristics of the NALM.

**Key words** lasers; double-pulse; semiconductor optical amplifier; nonlinear polarization rotation

**OCIS codes** 140.3510; 140.3560; 140.4050

## 1 引 言

光学方法获得脉冲的方法很多,包括锁模技术、调Q技术等<sup>[1-3]</sup>。高相干性双脉冲激光器是随着具有精密触发本领的长相干长度固体激光器研究的深入而发展起来的一种激光器系统。双脉冲激光器应用领域十分广泛,包括大气监测、环境监测、精细加工领域、动态全息成像等<sup>[4-6]</sup>。实践证明,与单脉冲激光相比,应用双脉冲激光打孔,能够提高打孔的工作效率,打孔的质量也能够得到显著改善<sup>[5]</sup>。王晓东等<sup>[7]</sup>采用了一种新颖的双脉冲方法,通过时域脉冲整形得到双脉冲序列,提高纳秒短脉冲激光微孔制备的加工效率。在动态全息检测时,双脉冲能够连续观察事件的发展过程<sup>[6]</sup>。2003年,美国NASA研制成功的Ho:Tm:YLF双脉冲激光振荡器<sup>[8]</sup>,实验中的抽运源是半导体激光阵列,利用调Q技术得到双脉冲,该脉冲激光器最主要的应用是大气探测。2007年,刘文军等<sup>[9]</sup>采用反射式达曼光栅建立了一双脉冲激光器结构,产生了脉冲强度相等、时间宽度相同、不同间隔的双脉冲输出,该脉冲可广泛应用于飞秒激光领域。

收稿日期: 2014-12-19; 收到修改稿日期: 2015-03-04

基金项目: 国家自然科学基金(61377075)

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

\*通信联系人。E-mail: alzhang07@163.com

8字腔激光器通常用来产生被动锁模脉冲<sup>[10-14]</sup>,在Guy等<sup>[13]</sup>报道的文献中,在非线形放大环境(NALM)中,采用铟镱共掺的放大器作为增益介质,产生了脉宽是250 fs的锁模脉冲。在Tsun等<sup>[14]</sup>报道的文献中,应用掺铒光纤为增益介质,产生了能量为0.5 nJ、脉宽为125 fs的锁模脉冲,在这些结构中往往应用掺铒或者掺镱光纤等掺稀土光纤作为NALM的增益和开关介质实现被动锁模。近年来,半导体光放大器(SOA)由于其非均匀展宽特性以及非线性效应而应用在8字腔激光器中,并且发现超短脉冲、暗脉冲和阶梯波等现象<sup>[15-16]</sup>。

提出了一种8字腔结构的激光器,将SOA放于环境的非对称位置,SOA的非线性偏振旋转产生自锁模脉冲,并应用SOA的交叉相位调制(XPM)和交叉增益调制(XGM)特性打开环境的开关窗口,进而产生双脉冲,通过调整SOA在环境中的位置,分别得到了重复频率为10.05 MHz和12.70 MHz,脉冲宽度分别是33.40 ns和30.08 ns的双脉冲。

## 2 实验装置及原理

双脉冲的实现原理主要是应用NALM的开关特性。图1为8字腔型光纤激光器的实验装置图,由一个NALM和一个线性环组成。左侧线性环由掺铒光纤放大器(EDFA)、30:70耦合器(C2)和偏振控制器(PC1)组成,掺铒光纤放大器(EDFA)产生自发辐射光使得激光器起振,其内集成的光隔离器使光单向运转,PC1补偿线性环内偏振态的变化,C2线性环和非线性腔之间通过一个50:50的耦合器(C1)连接,非线性放大镜由SOA、PC2组成。SOA完成以下几个功能:1)为整个激光器提供增益;2)由于SOA结构具有不对称性,纵模(TE)和横模(TM)两个模式导致SOA具有双折射效应,通过调整PC2,可以改变光功率在TE/TM模式上的分布,从而产生非线性偏振旋转作用以产生脉冲;3)将其放于非线性腔的非对称位置提供非线性相移,并通过XPM和XGM影响环形镜的开关状态。C3的port1(30%端口)作为激光器的输出端口接光谱仪、光示波器和频谱仪。为了检验输出脉冲偏振态的情况,在输出端接PC3和一个偏振相关隔离器(PDI),为了补偿PDI的损耗,在PC3之前接一个掺铒光纤放大器(EDFA2),port2作为输出端对光脉冲进行检测。

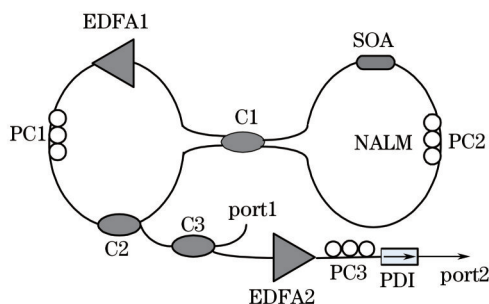


图1 双脉冲激光器原理图

Fig.1 Schematic setup diagram of dual-pulse laser

非线性偏振旋转效应,是指偏振光在光学介质中传播时,由于介质非线性效应中的自相位调制和交叉相位调制效应,偏振光的两正交分量会经历不同的相移,因此合成的偏振态随着光的传播而旋转,而且旋转角度与光的强度有关。在SOA中,偏振旋转由两方面产生:1)由于结构的不对称性,光在SOA中传播时,会在TE/TM两个模式中获得不同的增益,出射光与入射光相比较,偏振态将发生变化;2)SOA自发光还会引入附加双折射,使得光在TE/TM模式中经历的折射率不同,相位变化也相应的不同。相位变化的不同导致偏振态将会发生变化,这就是非线性偏振旋转效应<sup>[17]</sup>。非线性偏振旋转效应的存在,使得8字腔激光器中产生脉冲<sup>[18]</sup>。在图1所示激光器中,当传输的光脉冲经过3 dB耦合器进入非线性环时,将同时产生顺时针信号(CW)和逆时针(CCW)两路信号,其幅度相同,相位也一样。这两路信号在NALM中绕环一周后,回到3 dB耦合器处重新合并成一路信号。假定CW和CCW信号绕环一周经历的增益和相位移分别为 $G_{cw}(t)$ 、 $\Delta\varphi_{cw}(t)$ 和 $G_{ccw}(t)$ 、 $\Delta\varphi_{ccw}(t)$ 。则反射端口功率 $P_R$ 和透射端口 $P_T$ 分别为<sup>[19]</sup>

$$P_R = \frac{1}{4}P_{in}(t)[G_{cw}(t) + G_{ccw}(t) + 2\sqrt{G_{cw}(t)G_{ccw}(t)}\cos[\Delta\varphi_{cw}(t) - \Delta\varphi_{ccw}(t)]], \quad (1)$$

$$P_T = \frac{1}{4}P_{in}(t)[G_{cw}(t) + G_{ccw}(t) - 2\sqrt{G_{cw}(t)G_{ccw}(t)}\cos[\Delta\varphi_{cw}(t) - \Delta\varphi_{ccw}(t)]], \quad (2)$$

式中  $P_{in}(t)$  为入射功率,通过对(1)式和(2)式分析,如果两路信号经历的增益和相位移是已知的,通过计算就可以得出透射端口的光脉冲的功率。CW 和 CCW 方向传播的脉冲经过 SOA 时,增益变化相同,相位变化也是相同的,此时  $P_r = 0$ ,NALM 中的光脉冲完全从反射端口输出;如果两个方向传播的脉冲同时经过 SOA,由于 SOA 的非线性,两束光将产生 XPM<sup>[20]</sup>和 XGM<sup>[17]</sup>,两个方向传播的脉冲功率、相位变化都会受到影响而值的大小发生变化,假定 CW 和 CCW 信号绕环一周经历的增益和相位移分别为  $G'_{cw}(t)$ 、 $\Delta\phi'_{cw}(t)$  和  $G'_{ccw}(t)$ 、 $\Delta\phi'_{ccw}(t)$ ,则反射端口功率  $P'_R$  和透射端口功率  $P'_T$  将变为

$$P'_R = \frac{1}{4}P_{in}(t)\{G'_{cw}(t) + G'_{ccw}(t) + 2\sqrt{G'_{cw}(t)G'_{ccw}(t)}\cos[\Delta\phi'_{cw}(t) - \Delta\phi'_{ccw}(t)]\}, \quad (3)$$

$$P'_T = \frac{1}{4}P_{in}(t)\{G'_{cw}(t) + G'_{ccw}(t) + 2\sqrt{G'_{cw}(t)G'_{ccw}(t)}\cos[\Delta\phi'_{cw}(t) + \Delta\phi'_{ccw}(t)]\}. \quad (4)$$

由于  $\Delta\phi'_{cw} \neq \Delta\phi'_{ccw}$ 、 $G'_{cw} \neq G'_{ccw}$ ,因此  $P'_T$  很容易不为 0,从而打开开关窗口。

具体的脉冲演化过程如图 2 所示,当脉冲通过线性环进入非线性环以后,将分为两部分,由 CW 传播的脉冲有‘1’和‘2’组成,沿 CCW 传播的脉冲由‘3’和‘4’组成,假设 SOA 左侧的光纤比右侧对应的单模光纤短  $\Delta x$ ,所对应的光延迟时间是  $T_e$ ,当脉冲‘2’通过 SOA 时,脉冲‘1’和脉冲‘3’开始进入 SOA,并且在 SOA 中相遇,进而产生 XPM 和 XGM,这两部分脉冲将产生功率、相位以及偏振态的变化,当它们再次到达 C1 的时候,会有透射光产生,同时,脉冲‘1’和‘2’比较、脉冲‘3’和‘4’比较将会有不同的偏振态。

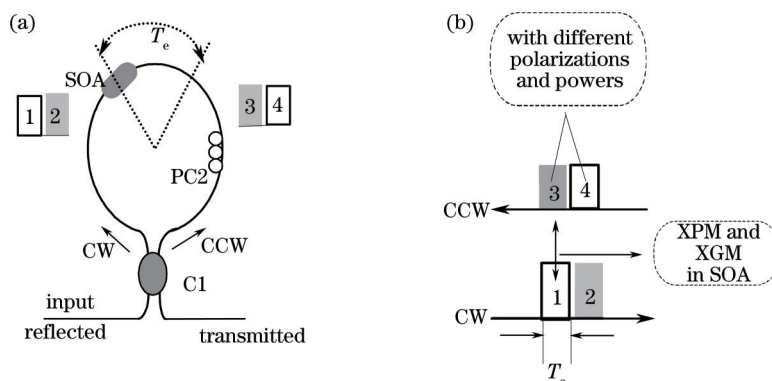


图 2 非线性光纤环境中双脉冲的演化图

Fig.2 Evolution diagram of double pulse in NALM

### 3 实验结果及讨论

实验过程中,不断调整 SOA 驱动电流的大小以及 PC1 和 PC2,观察实验现象,当驱动电流的值是 200 mA 时,从 port1 得到了如图 3(a)所示的双脉冲波形,此时整个激光器的腔长约为 16 m,激光器的腔基频是 12.70 MHz,双脉冲的持续时间均是 30.08 ns,SOA 左右两侧的长度差约为 6 m,图 3(d)和(e)分别是双脉冲的频谱和光谱,从图 3(d)中可以得到脉冲的重复频率是 12.66 MHz;光谱如图 2(d)所示,中心波长是 1585 nm。

为了比较双脉冲的偏振态及其他参数,在 port1 端口接一个 PC3 和 PDI,PDI 的输出端 port2 接光谱仪、示波器、频谱仪等;调整 PC3,使双脉冲的一部分偏振态从 PDI 输出,从 port2 输出的脉冲的频谱和光谱变化很小,在不同的偏振态下形成的脉冲波形如图 3(b),(c)所示,发现组成双脉冲的形状以及两个光电平功率也会改变,形成了功率各自不同的三光电平,说明双脉冲具有不同的偏振态;而功率总和并不一样,说明双脉冲的偏振态不一样但它们并不是完全正交的。

改变整个激光器的腔长和 SOA 在 NALM 中的位置,能够得到不同重复频率和脉冲宽度的双脉冲,调整腔长的大小,当其约为 20.5 m 时,对应腔基频应该约为 10 MHz,如图 4(a)所示,是 port1 的输出,此时 SOA 两端到达 3 dB 耦合器光程差约为 3.4 m,双脉冲的脉宽约为 33.40 ns。从图 4(b),(c)可以看到双脉冲的重复频率是 10.05 MHz,而光谱的中心波长是 1600 nm。用同样的方法来检验双脉冲的组成,在不同偏振态下得到图 4(b),(c)的阶梯波脉冲。

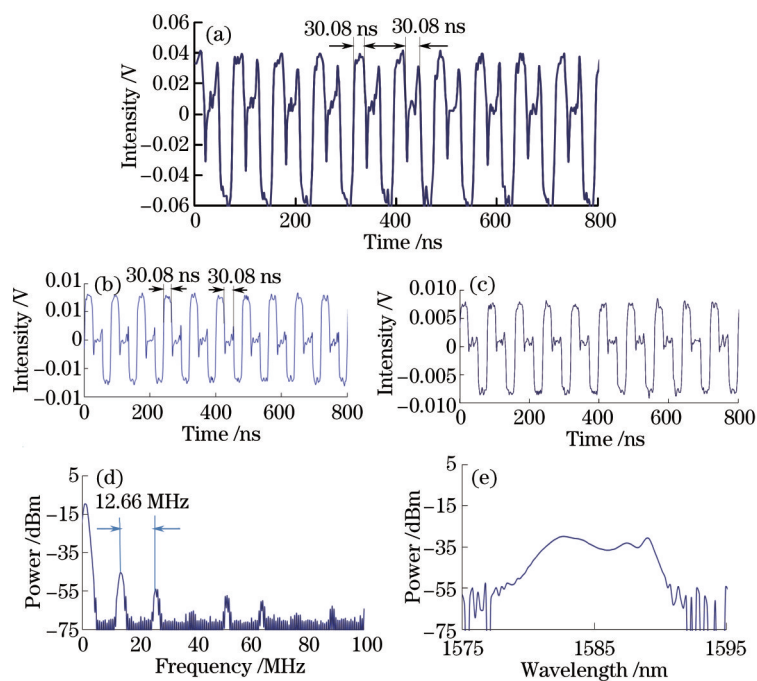


图3 脉冲为 30.08 ns 时, (a) 双脉冲波形图; (b),(c)端口 2 输出的阶梯波; (d) 双脉冲的频谱图; (e) 双脉冲的光谱图  
Fig.3 (a) Oscilloscope of dual-pulse; (b),(c) step wave from port 2; (d) spectrogram of dual-pulse; (e) spectrum of dual-pulse  
when the pulse width is 30.08 ns

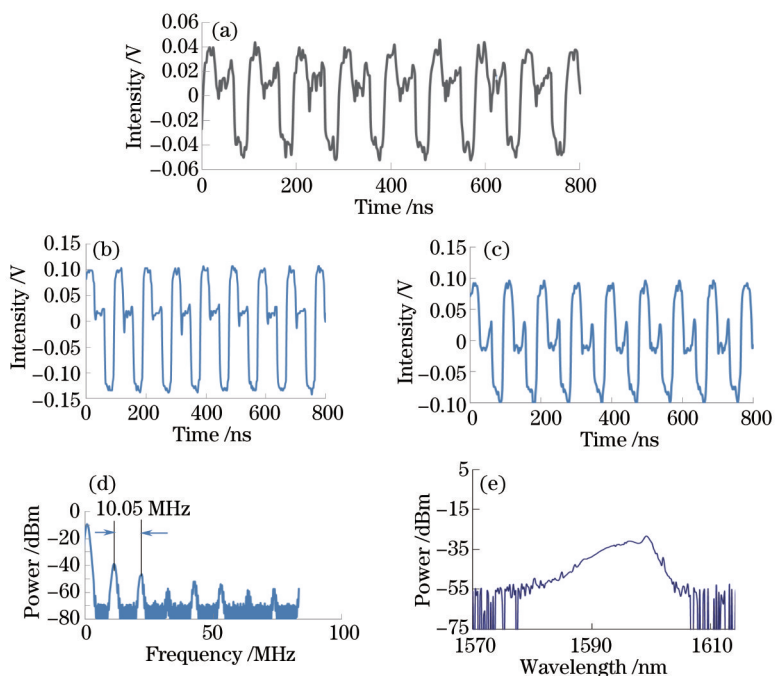


图4 脉宽为 30.40 ns 时, (a) 双脉冲波形图; (b),(c)端口 2 输出的阶梯波; (d) 双脉冲的频谱图; (e) 双脉冲的光谱图  
Fig.4 (a) Oscilloscope of dual-pulse; (b),(c) step wave from port 2; (d) spectrogram of dual-pulse; (e) spectrum of dual-pulse  
when the pulse width is 30.40 ns

## 4 结 论

采用基于 SOA 的 8 字腔激光器结构,当 SOA 的驱动电流到 200 mA 时,通过调整腔内的偏振控制器能够产生双脉冲激光,改变激光器的腔长和 SOA 在非线性腔内的位置能够得到重复频率分别是 10.05 MHz 和 12.70 MHz,脉冲宽度分别是 33.40 ns 和 30.08 ns 的双脉冲。经过理论分析,非线性环中顺时针和逆时针传播

的光在 SOA 中产生 XPM 和 XGM 能够打开 NALM 的开关窗口形成脉宽相同的双脉冲;通过在激光器的输出端口接 PC 和 PDI 能够证明双脉冲是由两个方向的光叠加而成的。实验中得到的双脉冲可以应用在大气监测、精细加工、动态全息成像等领域。

## 参 考 文 献

- 1 Song Rui, Hou Jing, Wang Yanbin, *et al.*. Ytterbium-doped fiber laser passively mode-locked by a semiconductor saturable absorber mirror in linear cavity[J]. Chinese J Lasers, 2014, 41(1): 0102007.  
宋 锐, 侯 静, 王彦斌, 等. 线性腔半导体可饱和吸收镜被动锁模掺镱光纤激光器[J]. 中国激光, 2014, 41(1): 0102007.
- 2 Wang Xiaolong, Sang Mei, Zhu Pan, *et al.*. Passively Q-switched pulse fiber laser based on graphene saturable absorber[J]. Chinese J Lasers, 2013, 40(6): 0602015.  
王晓龙, 桑 梅, 朱 攀, 等. 基于石墨烯可饱和吸收体的被动调 Q 光纤激光器[J]. 中国激光, 2013, 40(6): 0602015.
- 3 Xun Doudou, Yang Sigang, Yin Feifei, *et al.*. Widely tunable mode-locked fiber operating in 1  $\mu\text{m}$  wavelength range[J]. Acta Optica Sinica, 2013, 33(7): 0706013.  
荀斗斗, 杨四刚, 尹飞飞, 等. 1  $\mu\text{m}$  波段宽带可调谐锁模光纤激光器[J]. 光学学报, 2013, 33(7): 0706013.
- 4 G J Koch, B W Barnes, M Petros, *et al.*. Coherent differential absorption lidar measurements of CO<sub>2</sub>[J]. Appl Opt, 2004, 43(26): 5092-5099.
- 5 K Walther, M Brajdic, E W Kreutz. Enhanced processing speed in laser drilling of stainless steel by spatially and temporally superposed pulsed Nd:YAG laser radiation[J]. Int J Adv Manuf Technol, 2008, 35(9-10): 895-899.
- 6 Li Feng, Ni Xuxiang, Wu Bizhen, *et al.*. New method to realize double-pulse laser at high repetition[J]. Acta Photonica Sinica, 1998, 27(4): 342-347.  
李 峰, 倪旭翔, 吴碧珍, 等. 实现高重复率双脉冲激光器的新方法[J]. 光子学报, 1998, 27(4): 342-347.
- 7 Wang Xiaodong, M Andreas, D Friedrich, *et al.*. Double-pulse technique for short pulse laser drilling[J]. Laser Technol, 2009, 33(3): 283-286.  
王晓东, M Andreas, D Friedrich, 等. 短脉冲激光微孔制备的双脉冲方法研究[J]. 激光技术, 2009, 33(3): 283-286.
- 8 J Yu, A Broud, M Petros. 600-mJ, double-pulse 2- $\mu\text{m}$  laser[J]. Opt Lett, 2003, 28(2): 540-542.
- 9 Qu Shiliang, Liu Wenjun, Bai Bing, *et al.*. Generating femtosecond double pulses using Damman reflection gratings[J]. Acta Phys Sin, 2007, 56(6): 3292-3299.  
曲士良, 刘文军, 白 冰, 等. 用反射式达曼光栅产生飞秒激光双脉冲[J]. 物理学报, 2007, 56(6): 3292-3299.
- 10 D J Richardson, R I Laming, D N Payne, *et al.*. Selfstarting, passively mode locked erbium fibre ring laser based on the amplifying Sagnac switch[J]. Electron Lett, 1991, 27(6): 730-732.
- 11 I N Duling. Subpicosecond all-fibre erbium laser[J]. Electron Lett, 1991, 27(6): 544-545.
- 12 I N Duling, C J Chen, P K A Wai, *et al.*. Operation of a nonlinear loop mirror in a laser cavity[J]. IEEE J Quantum Electron, 1994, 30(1): 194-199.
- 13 M J Guy, D U Noske, J R Taylor. Generation of femtosecond soliton pulses by passive mode locking of an ytterbium-erbium figure-eight fiber laser[J]. Opt Lett, 1993, 18(17): 1447-1449.
- 14 T O Tsun, M K Islam, P L Chu. High-energy femtosecond figure-eight fiber laser[J]. Opt Commun, 1997, 141(1-2): 65-68.
- 15 S Min, Y Zhao, S Fleming. Semiconductor optical amplifier based high duty-cycle, self-starting figure-eight 1.7 GHz laser source[J]. Opt Express, 2009, 17(8): 6187-6193.
- 16 J Y Wang, K H Lin, H R Chen. Generation of optical waveforms in 1.3- $\mu\text{m}$  SOA-based fiber lasers[J]. Laser Phys, 2012, 22(1): 216-220.
- 17 M Usami, R Inohara, K Nishimura, *et al.*. Experimental analysis of cross gain modulation and cross phase modulation in SOA with assist light injection[C]. LEOS Summer Topic, 2002: TuK1.
- 18 Pan Honggang, Yu Jinlong, Wang Wenrui, *et al.*. Semiconductor optical amplifier based self-mode locking laser and phenomenon of dimidiate frequency[J]. Chinese J Lasers, 2013, 40(11): 1120006.  
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): 1120006.
- 19 Pang Huanggang, Zhang Zhiyuan, Yan Senlin, *et al.*. Study on the switching characteristics of TOAD[J]. Chinese J Lasers, 2001, 28(7): 641-644.  
逢焕刚, 张志远, 颜森林, 等. TOAD 的开关特性研究[J]. 中国激光, 2001, 28(7): 641-644.
- 20 J M Tang, P S Spencer, P Reeset. Enhanced TOAD performance by negative frequency-detuned signal and control picosecond optical pulses[J]. IEEE J Quantum Electron, 2000, 36(5): 574-581.

栏目编辑: 宋梅梅