

基于半导体光放大器的暗脉冲的产生

潘洪刚^{1,2} 于晋龙¹ 王文睿¹ 黄 钢¹ 刘 毅¹ 贾 石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 采用基于半导体光放大器(SOA)的“8”字腔激光器结构,当 SOA 的驱动电流是 220 mA 时,通过调整腔内的偏振控制器(PC),产生脉冲宽度分别是 74 ns 和 20 ns,重复频率分别是 9 MHz(基频)和 33.4 MHz(二倍频)的暗脉冲。改变 SOA 在非线性放大环境(NALM)中的位置,暗脉冲的脉宽也有相应的改变。

关键词 激光器;暗脉冲;半导体光放大器;双折射

中图分类号 TN248.1 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201434.0214006

Generation of Dark Pulse Based on Semiconductor Optical Amplifier

Pan Honggang^{1,2} Yu Jinlong² Wang Wenrui¹ Huang Gang¹

Liu Yi¹ Jia Shi¹ Yang Enze¹

¹ School of Electronic and Information Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China

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

Abstract In the experiment of laser based on semiconductor optical amplifier (SOA), when the drive current of the SOA is up to 220 mA, by adjusting the polarization controller (PC), dark pulse is observed. The pulse durations are 74 ns and 20 ns with frequency repetition rates of 9 MHz (fundamental frequency) and 33.4 MHz (double frequency), respectively. By changing the position of the SOA in the nonlinear amplifying loop mirror (NALM), dark pulse width change accordingly.

Key words lasers; dark pulse; semiconductor optical amplifier; birefringence

OCIS codes 140.3510; 140.3560; 140.4050

1 引 言

近些年来,光纤激光器因为能够产生连续波和脉冲,并且能够广泛应用于光通信、光传感而受到研究者的注意^[1-2]。由调 Q 或者锁模产生的脉冲一般都是亮脉冲^[3-4],亮脉冲的理论设计方案已经十分成熟,相关技术已在通信、激光测距、光伏工业等方面得到广泛的应用。暗脉冲是与亮脉冲相对的概念,即在连续光背景下光强突然显著下降。与传统的亮脉冲相比,暗脉冲不仅可以实现相同功能,而且具有噪声低、损耗更小、传输速度更快等优点^[5],在信号处理、长途通信、精密测量等领域都具有广泛的

应用前景。自从 Weiner 等^[6]报道了在空间激光器结构中观察到基频暗孤子,暗脉冲吸引了许多研究者的注意,并且在不同的激光器中观察到了暗脉冲的存在^[7-12]。在锁模激光器中,Feng 等^[7]首先报道了在量子阱二极管激光器中暗脉冲的产生,Abloowitz 等^[8]在理论上研究了锁模激光器中的暗脉冲,Allan 等^[9]在半导体激光中获得了基频暗脉冲;暗脉冲也可以在非锁模激光器中获得,Gao 等^[10]在一个含有亚硝酸盐光纤的环形腔结构中,获得了脉宽为 112 ns 的方波长脉冲,Zhang 等^[11]报道了在一个线性双折射环形激光器中暗脉冲的存在,

收稿日期: 2013-08-15; 收到修改稿日期: 2013-10-23

基金项目: 国家 973 计划(2010CB327603,2010CB315704)、国家杰出青年科学基金(61205061)

作者简介: 潘洪刚(1979—),男,讲师,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—),博士,教授,主要从事光纤通信和非线性光纤光学等方面的研究。

E-mail: yujinlong@tju.edu.cn(通信联系人)

应用一个类似的结构, Wang 等^[12]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。

非线性光纤环境作为快速光开关,在光信号处理和光通信中得到了广泛的应用^[13-15],而且它也可在被动锁模光纤激光器中作为可饱和吸收体,实现激光振荡和脉冲的窄化。非线性环境有两种:1)非线性光学环境(NOLM)^[13];2)非线性光纤放大器(NALM)^[16]。NALM和NOLM最大的不同是在NOLM环中的非对称位置增加了增益介质,比如说掺铒光纤^[17]或者掺铈光纤^[18],顺时针和逆时针方向传输的光,产生的非线性相移不同,影响耦合器处反射口和透射口的光功率。如果NALM中放置的是半导体光放大器(SOA),由于SOA本身体积小,并且具有很强的非线性效应,因此当相向传输的两束光在SOA中相遇时将会发生相互作用,从而影响光学环形镜的开关状态。基于SOA的太赫兹光学非对称解复用器(TOAD)是NOLM和SOA相结合的产物,充分发挥了二者的优势,避免了它们的不足,其开关窗口主要受SOA的注入电流、非对称偏移量以及控制脉冲功率等因素的影响^[19-20]。

采用基于SOA的8字腔激光器结构,利用SOA光学环境的开关特性,使得SOA光学环境中相向传输的两束光在SOA中产生交叉相位调制(XPM)和交叉增益调制(XGM),打开开关窗口,通过调整腔内的偏振控制器,产生了重复频率分别为9 MHz和33.4 MHz,脉冲宽度分别为37 ns和10 ns的暗脉冲。改变SOA在非对称环中的位置,输出脉冲的宽度会发生相应的变化。

2 实验装置及原理

图1为8字腔型光纤激光器的实验装置图,它由一个NALM和一个线性环组成。线性环中的隔离器(ISO)使光单向运转,偏振控制器PC1调整线性环内的偏振态,它们之间通过一个50:50的耦合器(coupler1)和NALM连接。NALM由SOA(CIP: SOA-XN-OEC-1550),PC2和一个30:70耦合器(coupler2)组成,SOA为整个激光器提供增益,将其放于NALM的非对称位置提供非线性相移,并通过XPM和XGM为脉冲打开开关窗口,以使8字腔激光器产生脉冲,PC2用于补偿由于应力而造成的腔内双折射的变化,并维持激光器的振荡。由于SOA具有TE和TM两个模式,本身结构的不对称性导致SOA具有双折射效应,从而使得非线性效应XPM和XGM在TE/TM模式上的程度不同,

也就是说,NALM中相向传输的两束光,它们之间的相互作用不仅与光功率有关,而且与光在腔内的偏振态有关,这一点不同于掺铒光纤或掺铈光纤作为增益介质的NALM环。调整PC2,能够改变光在TE/EM模式上的功率分配,对于激光器的起振、维持其稳定振荡都起到了十分重要的作用。30:70耦合器的port1(30%端口)作为激光器的输出端口接光谱仪(Anritus MS9710C)、光示波器(Agilent 86100A)和频谱仪(Agilent 86142B)。为了检验输出脉冲偏振态的情况,在输出端接PC3和一个偏振分束器(PBS),其输出端port2也作为输出以监测激光器的频谱、光谱以及波形。

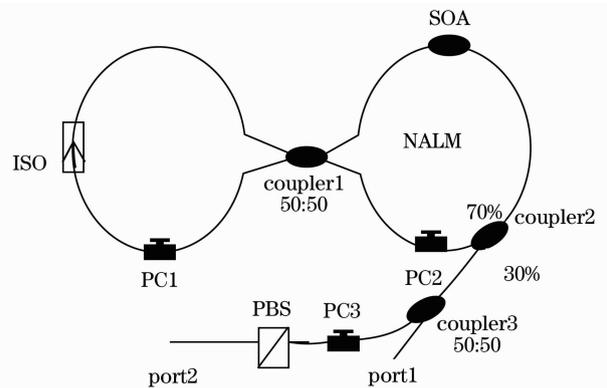


图1 暗脉冲激光器原理图

Fig. 1 Schematic setup of dark pulse laser

3 实验结果和讨论

实验过程中,当SOA的驱动电流达到220 mA时,通过调整PC1和PC2,来改变腔内的损耗、偏振态等参数,使激光器达到自洽,从而形成振荡。实验中从port1得到了如图2(a)所示的暗脉冲波形,此时整个激光器的腔长约为12 m,激光器的腔基频是16.7 MHz,而暗脉冲的持续时间约为20 ns,SOA左右两侧的长度差约为2 m。图2(b)和(c)是其不同范围的频谱,从图2(b)中可以看到脉冲的重复频率是33.4 MHz,实验中得到的是二次谐波脉冲,从图2(c)中看到脉冲频谱30 dB带宽大约为1.4 GHz。光谱如图2(d)所示,中心波长是1560 nm,而其10 dB带宽约是60 nm,虽然谱很宽,但明显不同于普通的锁模光谱。

为了检验暗脉冲的偏振态及组成情况,在port1端口接PC3和PBS,PBS的一个输出端port2,分别接光谱仪、频谱仪和光示波器用于监测激光器的输出。通过调整PC3,改变暗脉冲的偏振态,从port2输出的脉冲的频谱和光谱变化很小,而脉冲波形如

图 3 所示,发现组成暗脉冲的两个电平功率大小会发生变化,变成了三光电平的阶梯波,“1”码和“2”码也会相互转化,说明这两个电平具有不同的偏振态;

而功率总和并不一样,说明它们的偏振态虽然不一样但并不是完全正交的,证明了暗脉冲是由偏振态不同的两个脉冲叠加在一起的。

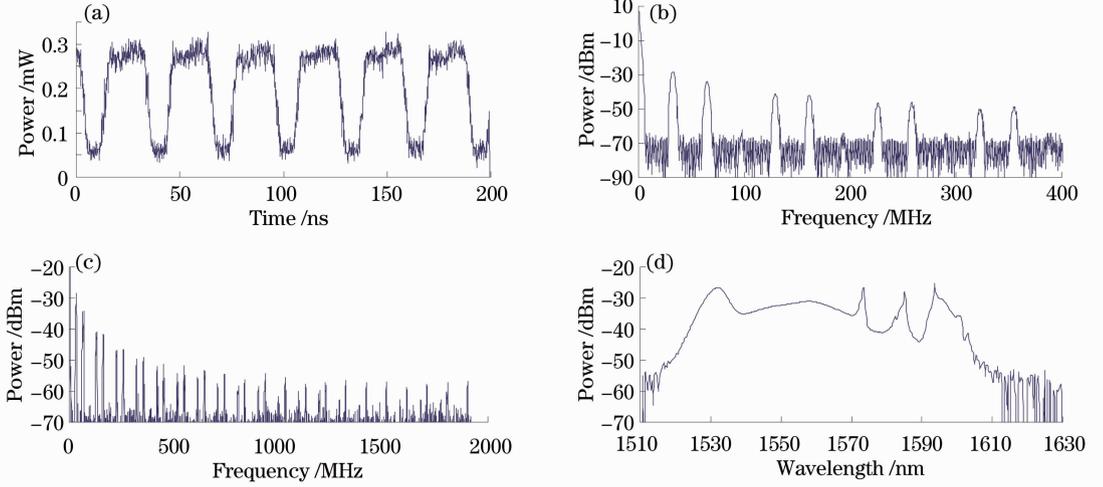


图 2 暗脉冲(a)波形图, (b), (c)不同范围的频谱图以及(d)光谱图

Fig. 2 (a) Time-domain waveform, (b), (c) spectrograms of different ranges and (d) optical spectrum

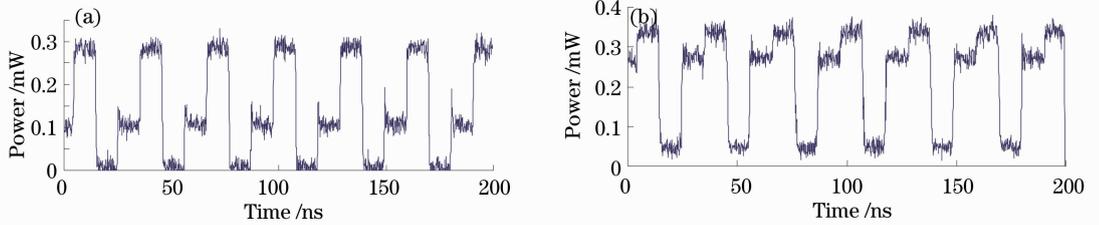


图 3 阶梯状波形图

Fig. 3 Time-domain staircase waveform

在实验过程中,改变激光器的腔长和 SOA 的位置,能够得到不同重复频率和脉冲宽度的暗脉冲。当激光器的腔长约是 22 m 时,其基频应该是 9 MHz。图 4 为 port1 的输出,此时 SOA 两侧单模光纤的长度差是 7.4 m,暗脉冲光电平的持续时间约是 74 ns,从时域波形能够比较明显地看出暗脉冲由两部分组成,这两部分脉宽相同,都是 37 ns。

假定顺时针信号和逆时针信号绕环一周经历的增益和相移分别为 $G_{cw}(t)$ 、 $\Delta\phi_{cw}(t)$ 和 $G_{ccw}(t)$ 、 $\Delta\phi_{ccw}(t)$, 则反射端口功率 P_R 和透射端口的输出信号功率 P_T 分别为^[19]

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

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

由(1)、(2)式可知,只要知道两路信号经历的增益和相移,就可求出透射端口的输出信号。当顺时针和逆时针脉冲不在 SOA 中相遇时,两路脉冲的增益和相移相等, $P_T=0$, 输入信号完全从反射端口输出。如果两部分脉冲在 SOA 中相遇,由于脉冲的功率比较强,两束光将会发生光-光作用,而产生 XPM^[21] 和 XGM^[22], 从而对它们的增益和相位产生影响。假定顺时针信号和逆时针信号绕环一周经历的增益和相移分别为 $G'_{cw}(t)$ 、 $\Delta\phi'_{cw}$ 和 $G'_{ccw}(t)$ 、 $\Delta\phi'_{ccw}$,

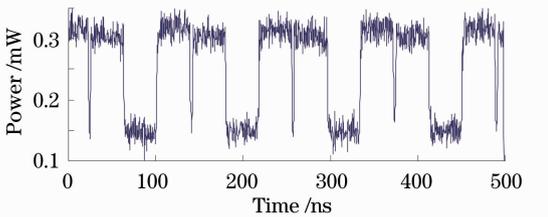


图 4 暗脉冲波形图

Fig. 4 Time-domain waveform of dark pulse

在基于 SOA 的 8 字腔结构的激光器中,当信号注入非线性环时,在 3 dB 耦合器处分成等幅同相的顺时针(CW)信号和逆时针(CCW)信号,这两路信号绕环一周后,在耦合器处重新合并,并发生干涉,

则反射端口功率 P'_R 和透射端口的输出信号功率 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 $\Delta\phi'_{cw} \neq \Delta\phi'_{ccw}$ 且 $G'_{cw} \neq G'_{ccw}$, 因此 P'_T 很容易不为 0, 从而打开开关窗口。

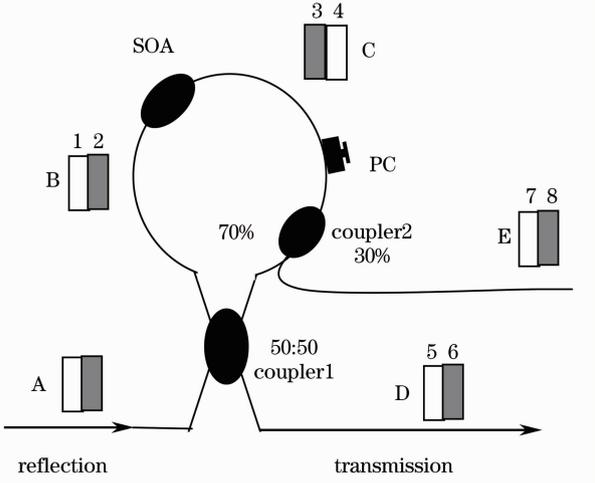


图 5 非线性放大环境中脉冲演化示意图

Fig. 5 Schematic diagram of dark pulse in nonlinear amplifying loop mirror

不考虑暗脉冲形成的瞬态过程, 激光形成稳态振荡后, 暗脉冲演化过程如图 5 所示, 当脉冲 A 从左侧线性环通过 50:50 耦合器进入非线性光纤放大镜后, 将分为两部分脉冲 B 和脉冲 C, 脉冲 B 分为“1”和“2”两部分, 脉冲 C 分为“3”和“4”两部分, 脉冲 B 和 C 分别沿逆时针和顺时针方向传播; 假设 SOA 左侧比右侧单模光纤短 Δx , 当脉冲 B 的“2”部分已经通过 SOA 时, “1”部分刚好经过 SOA, 此时脉冲 C 的“3”部分刚好要经过 SOA, 而“4”部分还没有到达 SOA。这样, “1”、“3”两部分脉冲同时经过 SOA, 这两部分脉冲将产生 XPM^[21] 和 XGM^[22], 使得两路信号经历的增益和相移不同, 此时 $P_T \neq 0$, 透射口的脉冲 D 由“5”、“6”两部分组成, 是由原来的“1”、“3”两部分脉冲经过 coupler1 以后组成的; 脉冲 E 由“7”、“8”两部分组成, 它们是脉冲 B 经过 SOA 作用以后得到的; 组成脉冲 A~E 两部分脉冲的宽度均为

$$\Delta t = \Delta x / v_{loop}, \quad (5)$$

式中 Δt 等于同时经过 SOA 的时间, v_{loop} 为光信号

在环中的速度, 图 5 所示组成暗脉冲的两部分脉冲功率不一定相同, 但是 30:70 耦合器输出端的脉冲, 通过调整腔内或腔外的 PC, 会使这两部分的功率相同, 即输出暗脉冲。

4 结 论

采用基于 SOA 的 8 字腔激光器结构, 产生了重复频率分别为 9 MHz 和 33.4 MHz, 脉冲宽度分别为 74 ns 和 20 ns 的暗脉冲。通过调整腔内的偏振控制器, 可以改变“1”码、“2”码光电平的功率之比, 通过改变 SOA 在非线形环中的位置, 可以改变输出脉冲的宽度。经过实验证明和理论分析, 两个方向的脉冲在 SOA 中的 XPM 和 XGM 打开 NALM 的开关窗口, 形成两个脉宽相同的脉冲, 两个脉冲的叠加形成暗脉冲。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

- 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.
- Tian Zhen, Liu Shanliang, Zhang Bingyuan, et al.. Graphene mode locked Er³⁺ doped fiber pulse laser [J]. Chinese J Lasers, 2011, 38(3): 0302004.
- 田振, 刘山亮, 张丙元, 等. 石墨烯锁模掺铒光纤脉冲激光器的实验研究 [J]. 中国激光, 2011, 38(3): 0302004.
- Fan Yaxian, Lu Fuyun, Hu Shuling. Tunable high-peak-power, high-energy hybrid Q-switched double-clad fiber laser [J]. Opt Lett, 2004, 29(7): 724-726.
- Zhan Li, Gu Zhaochang, Zhang Jianwen, et al.. Critical behavior of a passively mode-locked laser: rational harmonic mode locking [J]. Opt Lett, 2007, 32(5): 2276-2278.
- A Hasegawa, F Tappert. Transmission of stationary nonlinear optical pulses in dispersive dielectric fibers. II. Normal dispersion [J]. Appl Phys Lett, 1973, 23(4): 171-172.
- 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.
- M Feng, K L Silverman, R P Mirin. Dark pulse quantum dot diode laser [J]. Opt Express, 2010, 18(13): 13385-13395.
- M J Ablowitz, T P Horikis, S D Nixon. Dark solitons in mode-locked lasers [J]. Opt Lett, 2011, 36(6): 793-795.
- G R Allan, S R Skinner, D R Andersen. Observation of fundamental dark solitons in semiconductors using picosecond pulses [J]. Opt Lett, 1991, 16(3): 156-158.
- Weiqing Gao, Meisong Liao, Hiroyasu Kawashima, et al.. Dark-square-pulse generation in a ring cavity with a tellurite single-mode fiber [J]. IEEE Photon Technol Lett, 2013, 25(6): 546-549.
- 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.
- 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 N J Doran, D Wood. Nonlinear-optical loop mirror [J]. *Opt Lett*, 1988, 13(1): 56–58.
- 14 K J Blow, N J Doran, B P Nelson. Demonstration of the nonlinear fibre loop mirror as an ultrafast all-optical demultiplexer [J]. *Electron Lett*, 1990, 26(14): 962–964.
- 15 M Jimo, T Matsumoto. Ultrafast all-optical logic operations in a nonlinear Sagnac interferometer with two control beams [J]. *Opt Lett*, 1991, 16(4): 220–222.
- 16 M E Fermann, F Haberl, M Hofer, *et al.*. Nonlinear amplifying loop mirror [J]. *Opt Lett*, 1990, 15(13): 752–754.
- 17 Ma Haiquan, Liu Chang, Zhao Wei, *et al.*. Figure-of-eight cavity Yb³⁺-doped fiber mode-locked lasers [J]. *Chinese J Lasers*, 2005, 32(9): 1173–1177.
马海全, 刘畅, 赵卫, 等. 8字形腔锁模掺 Yb³⁺ 光纤激光器 [J]. *中国激光*, 2005, 32(9): 1173–1177.
- 18 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.
- 19 Pang Huangang, Zhang Zhiyuan, Yan Senlin. 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. TOAD 的开关特性研究 [J]. *中国激光*, 2001, 28(7): 641–644.
- 20 Leaf A Jiang, Erich P Ippen, Uwe Feiste, *et al.*. Sampling pulse with semiconductor optical amplifiers [J]. *IEEE J Quantum Electron*, 2001, 37(1): 118–125.
- 21 M Usami, R Inohara, K Nishimura. Experimental analysis of cross gain modulation and cross phase modulation in SOA with assist light injection [C]. *LEOS Summer Topi*, 2002. 21–22.
- 22 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