

腔内相位调制全光纤脉冲激光器 I : 实验

王小林 陈子伦 周 朴 许晓军 李 霄 刘泽金

(国防科技大学光电科学与工程学院, 湖南 长沙 410073)

摘要 报道了在低频直接相位调制下, 掺铒光纤激光器的脉冲现象。在光纤激光器谐振腔中插入带尾纤的 LiNbO₃ 相位调制器, 利用低频周期性信号进行相位调制, 能够得到重复频率为几十千赫到几百千赫左右的均匀、稳定的脉冲光输出, 且发现激光光谱变化等现象。分析表明, 这种脉冲现象难以用调 Q、锁模等传统的脉冲光理论进行有效地解释。简要讨论了脉冲光产生的物理机制, 通过对相位调制与“弛豫振荡”关系的研究, 唯象地认为相位调制和“弛豫振荡”是脉冲光产生的原因。

关键词 激光器; 光纤脉冲激光; 腔内相位调制; 弛豫振荡

中图分类号 TH248.1⁺3 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS200828s1.0035

All-Fiber Pulse Laser Based on Intra Cavity Phase Modulation I : Experiments

Wang Xiaolin Chen Zilun Zhou Pu Xu Xiaojun Li Xiao Liu Zejin

(College of Optoelectric Science and Engineering, National University of Defense Technology, Changsha, Hunan 410073, China)

Abstract It is found that the Er³⁺ doped fiber laser is in pulsed state when it is phase modulated at a low frequency. A pigtailed LiNbO₃ phase modulator driven by a commercial signal generator was inserted into the fiber laser cavity, regular pulses were achieved in certain conditions and other phenomena such as the change of the laser spectrum were observed. The pulse had a repetition rate from several tens of kHz to several hundreds of kHz. Analysis results have shown that it is hard to be explained by the traditional theories such as Q-switched and mode-locking theory. The mechanism of these phenomena is discussed briefly. Based on the investigation of the relationship between phase modulation and relaxation oscillation, the phase modulation and relaxation oscillation are phenomenologically considered as the reason of the pulsed laser.

Key words laser; pulse fiber laser; intra cavity phase modulation; relaxation oscillation

1 引 言

光纤脉冲激光器具有体积小、结构紧凑、光束质量好等优点^[1], 在工业制造、材料处理、生物医学、遥感遥测等领域有着广泛的应用^[2~6]。光纤激光器脉冲光技术的研究十分活跃, 在传统的电光声光调 Q、锁模, 倒腔, 抽运电流调制等脉冲技术基础上, 许多新技术诸如 SESAM 锁模技术^[7], 声光调制光纤布拉格(Bragg)光栅调 Q 技术^[3,8], 单电光晶体调 Q 技术^[2], 基于背向拉曼(Raman)散射的脉冲技术^[9], 基于相位调制器和线性啁啾光纤布拉格光栅的脉冲技术^[10]等, 相继提出并实现。

课题组发现在腔内低频直接相位调制下, 掺铒光纤激光器的脉冲现象。根据此现象, 提出了基于腔内直接相位调制的脉冲光产生新方法。在掺铒光纤激光腔中插入 LiNbO₃ 相位调制器, 并利用周期信号进行相位调制, 在一定条件下, 能够得到重复频率为几十千赫到几百千赫左右的均匀、稳定的脉冲光输出。实验还发现诸如相位调制导致光谱变化等许多现象。

由于相位调制本身对于激光器系统的能量没有任何吸收和贡献^[11], 这种腔内相位调制引起的脉冲光现象难以利用调 Q、锁模、抽运电流调制、腔倾倒

作者简介: 王小林(1985—), 男, 博士研究生, 主要从事光纤激光器方面研究。E-mail: chinawxllin@163.com

导师简介: 许晓军(1973—), 男, 副教授, 主要从事固体激光器、大气光学与自适应光学等方面的研究。

E-mail: xuxj@21cn.com (通信联系人)。

等理论进行有效地解释;固体相位调制(FM)激光器理论^[12~15]和相位调制光纤激光器^[16,17]的报道对相位调制(区别于调相锁模)激光器进行了研究,但也不能有效地解释实验中的现象。本文针对实验现象,简要讨论了脉冲光产生的物理机制,分析了相位调制与“弛豫振荡”的特性,唯象地解释了相位调制、“弛豫振荡”与脉冲光产生的关系。

2 实 验

2.1 实验装置

腔内相位调制的全光纤脉冲激光器实验装置如图1所示。布拉格光栅(FBG在1550 nm处半峰全宽为0.2 nm,反射率大于99%)和单模1550 nm通信光纤的切割端面(菲涅耳反射率为4%)构成激光谐振腔。长度为3 m的掺铒光纤(EDF)通过波分复用器(WDM)利用980 nm的连续半导体激光器(LD)进行抽运;将带尾纤的LiNbO₃相位调制器(1550 nm处半波电压为3.5 V)置于腔内进行相位调制。整个光纤激光器谐振器的腔长为5 m。相位调制器(PM)通过函数发生器(FG)产生的信号驱动,利用光电探测器和相应的检测电路探测激光器输出,并利用示波器TDS7154记录激光波形的时域特性。

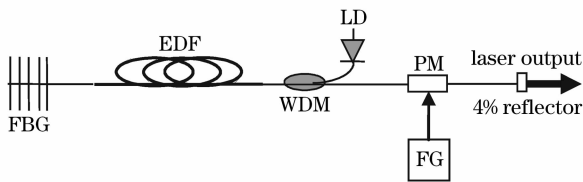


图1 相位调制脉冲激光器实验装置

Fig.1 Experimental setup for the phase-modulation fiber laser

2.2 实验结果与分析

实验发现,当驱动相位调制器的函数发生器开

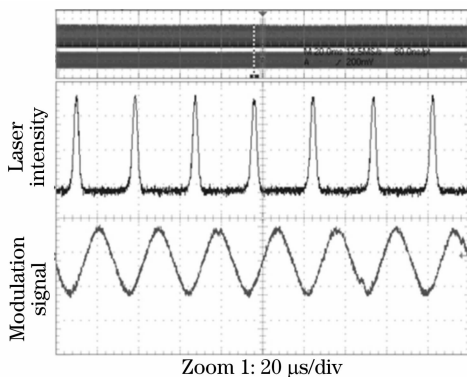


图2 正弦调制下稳定脉冲光输出

Fig.2 Stable pulse laser when sine signal modulated

启时,激光器原来输出的连续光变成脉冲状态;利用不同波形的调制信号进行相位调制,在一定的调制参量(调制波形、调制幅度、调制频率)下都能得到脉冲输出,且脉冲光非常均匀、稳定。如图2所示,根据示波器的区域放大功能,长时间波形(图2上部分)表明脉冲的稳定性好,短时间波形(图2下部分)表明脉冲的均匀性好。

2.2.1 不同调制参量下的稳定脉冲

实验表明,在一定条件下能够得到稳定的脉冲光输出,且稳定脉冲光重复频率可由调制频率决定。表1给出了利用调制信号幅度 A 为1 V的正弦信号调制时,在不同抽运功率 P 下能够得到稳定脉冲输出的调制频率带(简称稳定频带)。需要指出的是,稳定频带的范围和个数不仅与抽运电流有关,还与调制信号的幅度有关。在稳定频带内,输出脉冲均匀稳定;在稳定频带外,输出光脉冲变得不稳定,甚至趋于连续状态。

表1 不同抽运功率下的稳定脉冲频带

Table 1 Stable pulse frequency bands at different pump power

Pump power /mW	Modulation frequency band F_1 /kHz	Modulation frequency band F_2 /kHz	“Relaxation oscillation” frequency ν_R /kHz
37.8	22~30	44~60	28.31
50.5	25~35	53~70	33.96
62.9	28~42	60~80	38.68
75.5	33~45	70~85	42.95
88.0	35~47	70~90	46.80
99.7	37~53	77~103	50.14

分析表明,稳定频带与激光器的“弛豫振荡”频率有关。“弛豫振荡”频率的表达式为^[18]

$$\nu_R = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{\delta(p/p_{th} - 1)}{\tau_c \tau_f}}, \quad (1)$$

其中 p_{th} 、 p 分别为阈值抽运速率和实际抽运速率, $p_{th}=8.8$ mW; δ 为单程损耗系数, $\delta=96\%$; τ_c 为光子在腔内渡越时间, $\tau_c=5 \times 10^{-8}$ s; τ_f 为上能级寿命,在掺铒光纤中可取 $\tau_f=1 \times 10^{-3}$ s。根据(1)式,表1给出了各个抽运功率下的“弛豫振荡”频率。考察实验数据可知,稳定频带以“弛豫振荡”频率(或“弛豫振荡”频率的二倍)为中心。

实验表明,稳定频带内脉冲光重复频率为调制信号频率的分数或倍数,这取决于调制频率 F 与“弛豫振荡”频率的关系。在以表1的低频带内频率调制时,调制频率处于以“弛豫振荡”频率为中心的

稳定频带内,输出脉冲光重复频率为调制信号频率的二倍如图 3(a)、图 3(c)所示, $P=99.7\text{ mW}$, $A=1\text{ V}$;在以高频带内频率调制时,调制频率处于以

“弛豫振荡”频率二倍为中心的稳定频带内,输出脉冲重复频率与调制频率相等如图 3(b)、图 3(d)所示, $P=99.7\text{ mW}$, $A=1\text{ V}$ 。

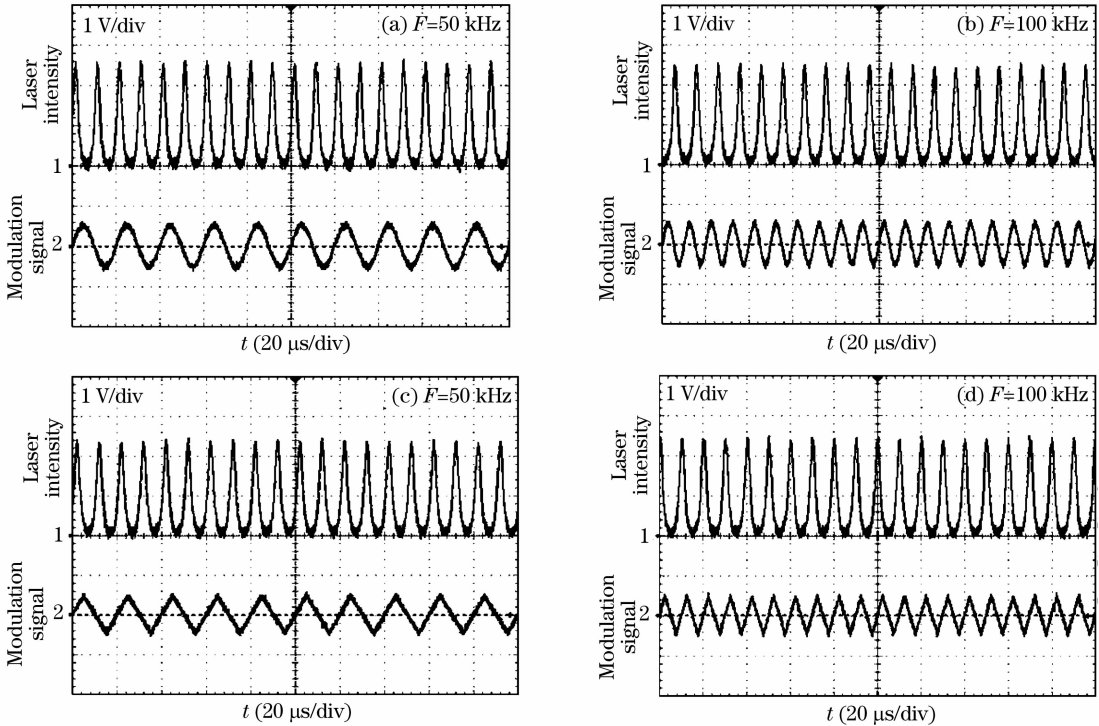


图 3 不同相位调制信号得到的稳定脉冲波形。(a), (b)正弦波调制,(c), (d)三角波调制

Fig. 3 Stable pulse waveform when the phase modulator (LiNbO_3) was driven by different modulation signals.

(a), (b) Sine signal, (c), (d) triangular signal

2.2.2 低频调制时“弛豫振荡”及其规律

实验发现,在较低频(几千赫)调制时,输出激光出现“弛豫振荡”现象。图 4 给出了调制频率为 1 kHz 的正弦波和方波调制时的输出激光的“弛豫振荡”波形, $P=19.8\text{ mW}$, $F=1\text{ kHz}$, $A=1\text{ V}$ ，“弛豫振荡”的频率由(1)式给出。由图可知,方波调制时“弛豫振荡”更明显:在调制信号相位突变时,“弛豫振荡”开始,随后“弛豫”到连续光水平。

实验发现,调制频率越小,“弛豫振荡”越明显;抽运光功率越大,“弛豫振荡”越明显。根据(1)式,可以很好地解释这两个实验现象。此外,“弛豫振荡”具有特殊的规律:“弛豫振荡”脉冲的峰值功率随调制幅度周期性变化。如图 5 所示,抽运光功率为 81.7 mW,利用频率为 1 kHz 的正弦波调制时,“弛豫振荡”开始,随后“弛豫”到连续光水平。

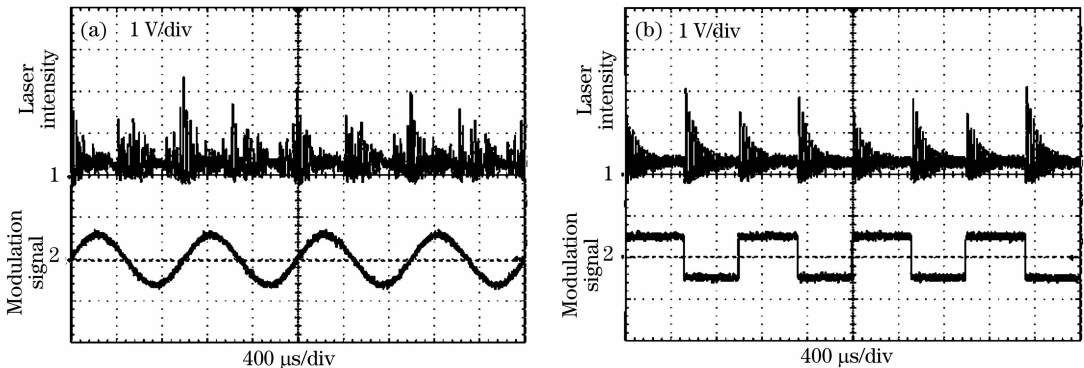


图 4 不同调制信号下的“弛豫振荡”。(a) 正弦波调制, (b) 方波调制

Fig. 4 “Relaxation oscillation” when different modulation signals were used. (a) Sine wave modulated, (b) square wave modulated

豫振荡”脉冲的归一化峰值功率随调制幅度以 $\pi/2$ 为周期变化。在 $\pi/4 + n\pi/2$ 时脉冲幅度有极大值，在 $n\pi/2$ 时脉冲幅度有极小值。

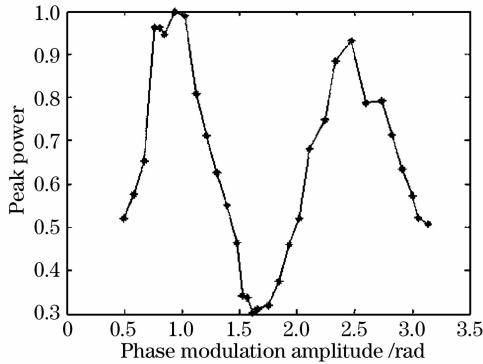


图5 “弛豫振荡”归一化峰值光功率与调制幅度的关系
Fig. 5 Normalized peak power versus phase modulation amplitude of “Relaxation oscillation”

实际上,在一定的调制幅度范围内,稳定脉冲光

峰值功率也随调制幅度周期变化的趋势。但是由于稳定脉冲与调制幅度和调制频率都有关,调制幅度变化太大时,脉冲变得不稳定,因而难以从实验中得到定性的变化规律。但是我们认为,稳定脉冲光峰值功率随调制幅度变化规律应该与“弛豫振荡”峰值功率随调制幅度变化规律相同。

2.2.3 抽运功率与脉冲重复频率和脉宽的关系

在调制参量不变的情况下,增加抽运功率,输出脉冲重复频率 f 增加,稳定脉冲重复频率均为调制频率的分数或倍数。如图 6(a)所示,在正弦调制信号频率为 15 kHz,幅度为 3.5 V,当抽运功率由 11.4 mW 增加到 75.5 mW 时,输出脉冲光重复频率从 7.6 kHz 增加到 60.24 kHz。图 7 给出了三个典型的稳定脉冲,它们的重复频率分别为 15.02 kHz、30.12 kHz、60.24 kHz,在考虑测量误差的情况,这些频率均为调制频率的倍数。

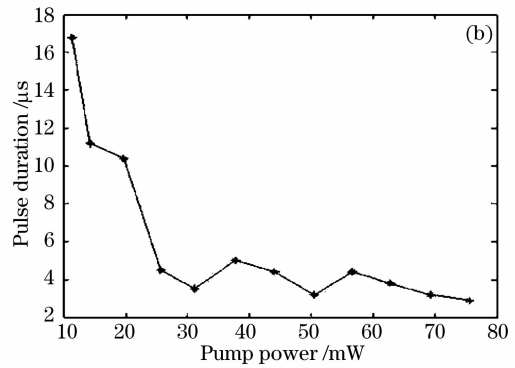
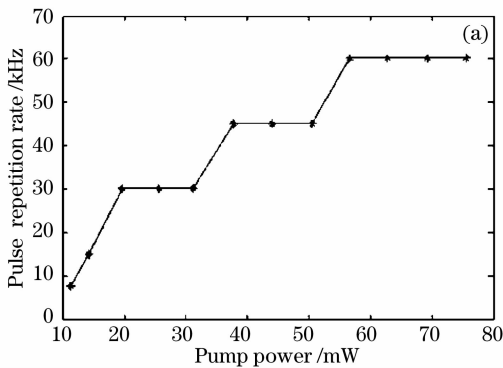


图6 正弦波调制时脉冲重复频率(a)与脉宽(b)随抽运功率的变化关系

Fig. 6 Repetition rate (a) and pulse duration (b) versus pump power for sine signal modulation

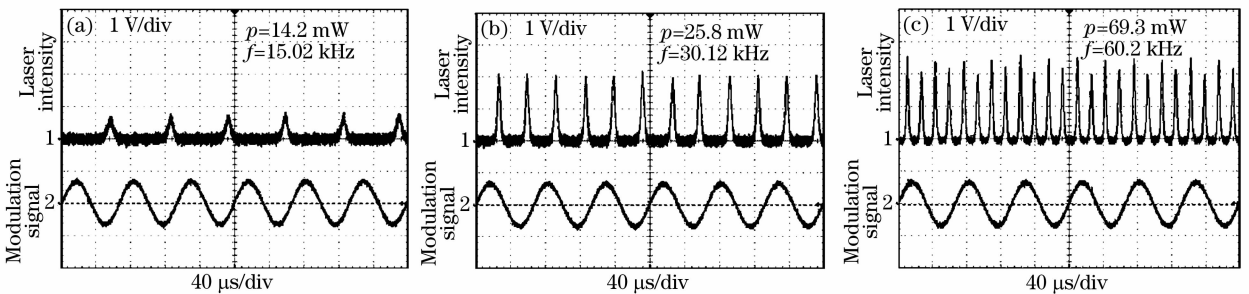


图7 正弦波调制时不同抽运功率下的脉冲

Fig. 7 Pluses profile of different pump power with sine signal modulation

实验还发现抽运功率变化时,脉宽也发生相应变化。如图 6(b)所示,调制参量不变时,在保证输出脉冲重复频率不变的范围内改变抽运功率,脉宽减小;如果脉冲重复频率发生突变,脉宽增加。

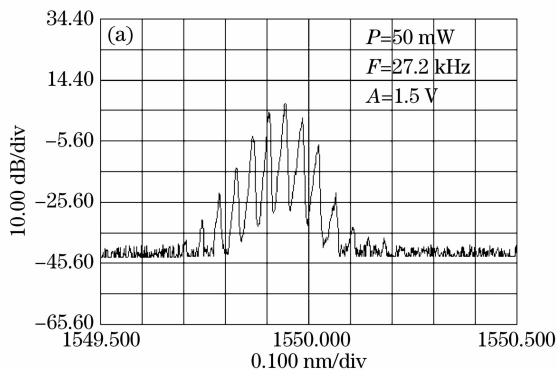
2.2.4 相位调制导致光谱变化

实验发现,在相位调制时,输出光谱也发生了明

显的变化。如图 8 所示,图 8(a)和图 8(b)分别表示占空比 33%的方波调制和无调制时的光谱曲线。在相位调制时,激光腔内可能产生了强烈的模式竞争,使得某些特定频谱的光受到抑制,从而产生了图 8(a)的光谱。

除了以上实验现象外,还观察到了一定调制参

量下输出脉冲频率跳变、混沌等现象。另外,对调制信号加上任意的直流偏置,得到的脉冲波形无基本无变化;改变调制信号幅度,输出光功率均值基本不



变。实验将绕有光纤的压电陶瓷器环作为相位调制器,也得到了类似的实验结果。

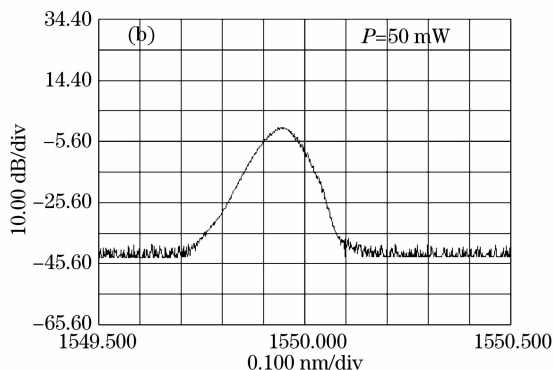


图 8 有相位调制(a)和无相位调制(b)时激光光谱

Fig. 8 Laser spectrum with (a) and without (b) phase modulation

3 简单理论分析

实验发现的这种腔内相位调制的脉冲光现象难以用调 Q、锁模、抽运电流调制、倒腔等理论进行有效地解释。首先,调 Q 技术是对腔内损耗进行周期性调制,以得到同频率脉冲光输出,由于腔内没有损耗机制,而相位调制本身对于激光器系统的能量没有任何吸收和贡献^[11],且实验中稳定脉冲光的重复频率在大多数情况下与调制频率无明显关系,因此不能用调 Q 理论解释。其次,锁模要求相位调制频率与纵模间隔频率相等,而实验中的调制频率为几十千赫量级,远小于锁模频率,不可能达到锁模状态;再次,实验中抽运光功率稳定,不存在抽运电流调制;最后,由于激光腔中不存在倾腔机制,也难以用倒腔理论解释。

在固体激光器领域,相位调制激光器^[12~15]具有与图 8 类似的光谱,但是 FM 激光器理论明确指出“FM 激光器是工作在锁模失调情况下激光器”,在以实验中低频(千赫量级)进行相位调制时,根据 FM 理论,输出光是稳定的连续光,不可能出现脉冲状态。

在光纤激光器领域,除调相锁模激光器外,目前仅见两篇与本文实验类似的相位调制脉冲激光器报道^[16,17],但都利用了外腔耦合将脉冲光产生的原因归因于激光腔与外腔反馈激光耦合引起的。本文调相脉冲激光器装置中并无外腔耦合,因此也不能用它们的提法来解释。

根据实验现象,考虑相位调制与“驰豫振荡”的特性,唯象地认为相位调制和“驰豫振荡”是脉冲光

产生的原因。首先,任何激光器在开启的瞬间都存在“驰豫振荡”现象^[19];其次,根据实验规律,认为相位突变是“启动”“驰豫振荡”的外因。在满足一定调制频率时,“驰豫振荡”形成了稳定的脉冲输出。例如,在方波调制时,在调制频率较低时,表现出明显的“驰豫振荡”现象[图 4(b)];当调制频率较高(几十千赫)时,在前一次“驰豫振荡”还未减小到稳态水平时,下一次相位突变到来,开始了新一次“驰豫振荡”。这样,在调制频率接近“驰豫振荡”频率(或“驰豫振荡”频率的倍数)时,得到了稳定的脉冲输出,在“驰豫振荡”频率(或“驰豫振荡”频率的倍数)中心范围内,存在如表 1 所示的稳定频带。

4 结 论

报道了在腔内低频直接相位调制下,掺铒光纤激光器的脉冲现象。考察了相位调制与“驰豫振荡”关系的研究,唯象地认为相位调制和“驰豫振荡”是脉冲光产生的原因。从脉冲光产生的物理机理考虑,结合光纤激光器的自脉冲理论的偏振态耦合模型,初步认为脉冲光的产生与光纤激光器中两个相位差随调制信号变化的偏振态的耦合有关。根据实验得到的结果,提出了基于腔内相位调制的脉冲光产生方法。系统使用全光纤器件,结构简单,设备的组装和系统的调节容易,在脉冲激光技术领域有着潜在的应用前景。

参 考 文 献

- Shenping Li, Xin Chen, Dmitri V. Kuksenkov *et al.*. Wavelength tunable stretched-pulse mode-locked all-fiber erbium

- ring laser with single polarization fiber[J]. *Optical Express*, 2006, **14**(13): 6098~7102
- 2 C. Cuadrado-Laborde, M. Delgado-Pinar, S. Torres-Peiro *et al.* Q-switched all-fiber laser using a fiber-optic resonant acousto-optic modulator[J]. *Opt. Commun.*, 2007, **274**: 407~411
- 3 Ferdinand Bammer, Rok Petkovsek. Q-switching of a fiber laser with a single crystal photo-elastic modulator [J]. *Opt. Exp.*, 2007, **15**(10): 6177~6182
- 4 Jang Chengyong, Zhou Guoqing, Jiang Xiongwei *et al.*. Effect of irradiation on YAG crystals by femtosecond pulse laser[J]. *Acta Optica Sinica*, 2003, **23**(10): 1273~1276
蒋成勇, 周国清, 姜雄伟 等. 飞秒脉冲激光对 YAG 晶体的辐照作用的研究[J]. *光学学报*, 2003, **23**(10): 1273~1276
- 5 Wang Zhaoyang, Hu Lizhong, Zhao Jie *et al.*. Effect of growth parameters of fabricating ZnO thin films by pulsed laser deposition on light emission characteristics [J]. *Acta Optica Sinica*, 2005, **25**(10): 1371~1374
王兆阳, 胡礼中, 赵 杰 等. 脉冲激光沉积方法制备 ZnO 薄膜生长参量对发光特性的影响[J]. *光学学报*, 2005, **25**(10): 1371~1374
- 6 Zhang Xiaomei, Shen Baifei. Neutron source from thin foil target compressed by shaped laser pulses[J]. *Acta Optica Sinica*, 2006, **26**(10): 1594~1597
张晓梅, 沈百飞. 利用整形激光脉冲压缩薄膜靶得到中子源[J]. *光学学报*, 2006, **26**(10): 1594~1597
- 7 Paschotta, R. Haring, E. Gini *et al.*. Passively Q-switched 0.1mJ fiber laser system at 1.53 μm [J]. *Opt. Lett.*, 1999, **24**: 388~390
- 8 M. Delgado-Pinar, D. Zalvidea, A. Diez *et al.*. Q-switching of an all-fiber laser by acousto-optic modulation of a fiber Bragg grating[J]. *Opt. Exp.*, 2006, **14**: 1106~1112
- 9 Zhenhuan Ye, Qihong Lou, Jingxing Dong *et al.*. Sub-nanosecond strong pulse generated by backward Raman scattering [J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2003, **1**(7): 406~407
- 10 Hao Hu, Jin long Yu, Litai Zhang. Pulse source based on directly modulated laser and phase modulator[J]. *Opt. Exp.*, 2007, **15**(14): 8931~8937
- 11 S. E. Harris, O. P. McDuff. Theory of FM laser oscillation[J]. *IEEE J. Quant. Electron.*, 1965, **QE-1**(6): 245~262
- 12 S. E. Harris, O. P. McDuff. FM laser oscillation-theory[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1964, **5**(5): 205~206
- 13 S. E. Harris, O. P. McDuff. Theory of FM laser oscillation[J]. *IEEE J. Quant. Electron.*, 1965, **QE-1**(6): 245~262
- 14 Stefano Longhi, Paolo Laporta. Time-domain analysis of frequency modulation laser oscillation[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1998, **73**(6): 720~731
- 15 S. Longhi, P. Laporta. Floquet theory of intracavity laser frequency modulation[J]. *Phys. Rev. A*, 1999, **60**(5): 4016~4028
- 16 L. A. Zenteno, H. Po. Frequency-modulated cavity-dumped Nd-doped fiber laser[J]. *Opt. Lett.*, 1991, **16**(5): 315~317
- 17 Dan Ostling, Pranay G. Sinha, Helge E. Engan. Spectral stability and smoothness of a phase-modulated fiber laser[J]. *Opt. Lett.*, 1995, **20**(2): 219~221
- 18 Rajarshi Roy, K. Scott Thornburg, Jr. Experiment synchronization of chaotic lasers[J]. *Phys. Rev. Lett.*, 1994, **72**(13): 2009~2012
- 19 W. Koechner. *Solid-State Laser Engineering* [M]. Sun Wen, Jiang Zewen, Cheng Guoxiang transl., Beijing: Science Press, 2002. 98~100
W. 克希耐尔. 固体激光工程[M]. 孙 文, 江泽文, 程国祥译, 北京: 科学出版社, 2002. 98~100