

基于再生锁模控制的激光器高次谐波研究

叶 苗, 王其华

(黄淮学院, 河南 驻马店 463000)

摘要:针对高次谐波稳定性差的问题,采用再生锁模控制的方法。首先分析锁模脉冲的形成机制,接着对光频率进行合成,经三波瞬态耦合波方程,最后得到高次谐波。在实验装置中得到均衡的脉冲图像且锁模脉冲平滑,获得高信噪比和高稳定性放大的信号光,因此增加光参量啁啾脉冲放大系统的灵活性,本文所采用的分析方法对其他光源的稳定设计也有借鉴作用。

关键词:再生锁模;高次谐波;瞬态耦合波方程

中图分类号:TN248.1

文献标识码:A

Study on high-order harmonic generation based on regenerative mode-locked control

YE Miao, WANG Qi-hua

(Huang Huai College, Zhumadian 463000, China)

Abstract:To improve the stability of the high order harmonic components, regeneration mode locking control is used as a solution. Firstly the formation mechanism of the mode locking pulse is analyzed. Then optical frequency synthesis is made based on three wave transient state coupling equation. Finally the high order harmonic components are obtained. In the experiment, pulse image obtained is balanced and the mode locking pulses are smooth. High signal-to-noise ratio and high stable amplified light is obtained, which increases the quality and flexibility of chirp pulse amplifying system. The analysis method presented can be also applied to the design of other stable light source.

Key words: regeneration mode-locked; high order harmonic; transient coupled wave equations

1 引言

激光技术的广泛应用,需要更加优质高速的超短脉冲激光,有理数谐波锁模光纤激光器是产生超短脉冲的重要方法之一^[1],但是由于光纤激光器腔长较长,且光纤对外界环境十分敏感,使得腔长与调制频率的匹配状态难以持续保持,因此必需采用相应的脉冲稳定措施。

被动锁模技术输出脉宽相对较窄,结构简单,但是输出脉冲重复率受光纤长度的限制不可能很高,不易调整和控制。主动锁模技术使用周期性调制谐振腔参量的方法,但是主动锁模腔内调制器的使用不仅导致了附加损耗,而且也引入了一个非光纤元件。谐波锁模固有的超模噪声引起短期不稳定性;温度的变化引起环长变化,使得调制频率和腔本征

谐波频率之间失配,难以稳定工作。

本文从再生锁模激光系统主方程出发,推出了二阶非线性效应的三波瞬态耦合波方程,利用调制器的调制频率获取高阶锁模脉冲序列,得到的锁模稳定性较好,同时分析了多分子数的高阶有理数谐波锁模脉冲,通过调整偏振控制器更容易达到脉冲均衡,可以长期稳定地输出波长、脉宽可调的高重复率变换脉冲。

2 高阶谐波产生过程

2.1 锁模脉冲的形成机制

假设锁模掺铒光纤激光器的基频^[2]为:

作者简介:叶 苗(1983-),女,讲师,硕士,研究方向为红外光学成像处理。E-mail:w99170071@yahoo.com.cn

收稿日期:2010-02-03;修订日期:2010-08-02

$$\Delta\nu = c/n_0L$$

其中, c 为光速; L 为完全锁定时腔内光纤的总长度; n_0 为光纤折射率, 基频一般不超过 100 MHz, 而掺铒光纤的增益带宽一般大于 30 nm, 远远大于纵模间隔, 因此在激光器工作时同时会有大量的纵模落在增益带宽内。设腔内共有 $M = 2m + 1$ 个纵模, 第 $q=0$ 模的圆频率、初相位为: ω_0, φ_0 , 则第 q 模为:

$$\omega_q = \omega_0 + q\Omega$$

$$\varphi_q = \varphi_0 + q\alpha$$

锁模出现的条件是: 各纵模相位同步, 任意相邻纵模的相位差固定为一常数: $\varphi_n - \varphi_{n-1} = \alpha$, 模式频率 ω_m 可写为:

$$\omega_m = \omega_0 + 2m\pi\Delta\nu$$

第 q 模的光场振幅为:

$$E_q(t) = E_0 e^{i(\omega_q t + \varphi_q)} = E_0 e^{i[(\omega_0 + q\Omega)t + (\varphi_0 + q\alpha)]}$$

合光场为:

$$E(t) = \sum_{q=-n}^n E_q(t) = \sum_{q=-n}^n E_0 e^{i[(\omega_0 + q\Omega)t + (\varphi_0 + q\alpha)]} \\ = A(t) e^{i(\omega_0 t + \varphi_0)}$$

$$A(t) = E_0 \sum_{q=-n}^n e^{iq(\Omega t + \alpha)} = E_0 \sum_{q=-n}^n e^{iqa} = E_0 [e^{-ina} + e^{-i(n-1)a} + \dots + e^{-ia} + e^0 + e^{ia} + \dots + e^{i(n-1)a} + e^{ina}] \\ = E_0 \frac{e^{-ina} [1 - e^{ia(2n+1)}]}{1 - e^{ia}} = E_0 \frac{e^{-i\frac{a}{2}} [e^{-ina} - e^{i(n+1)a}]}{e^{-i\frac{a}{2}} (1 - e^{ia})} \\ = E_0 \frac{e^{-i(n+\frac{1}{2})a} - e^{i(n+\frac{1}{2})a}}{e^{-i\frac{a}{2}} - e^{i\frac{a}{2}}} = E_0 \frac{\sin\left[\left(n + \frac{1}{2}\right)a\right]}{\sin\left(\frac{a}{2}\right)}$$

$$= E_0 \frac{\sin\left(\frac{Na}{2}\right)}{\sin\left(\frac{a}{2}\right)}$$

输出功率为:

$$P(t) = |E(t)|^2 = A^2(t) = P_0 \frac{\sin^2\left(\frac{Na}{2}\right)}{\sin^2\left(\frac{a}{2}\right)}$$

式中, P_0 为 0 阶模场振幅 E_0 的一个纵模输出功率, 锁模激光器的峰值功率增加为未锁模情况的 N_a 倍, 但输出的平均能量并不会因锁模而增加。如果所有模式都独立运转, 其相位间没有确定关系, 则总强度 $|E(t)|^2$ 中干涉项的平均效果为零, 其中: $|E(t)|_{\max}^2 = (2M+1)E_0^2$ 。

锁模激光的峰值功率在 $\alpha = 0, 2\pi, 4\pi \dots$ 时 $P(t)$ 达最大^[3], $\alpha = 2\pi/N, 4\pi/N \dots$ 时 $P(t) = 0$, 光在腔内往返一周所用时间: $T = \frac{2L'}{c}$, c 为光速; L' 为腔长。

$$\text{重复频率: } f = \frac{c}{2L'} = \Delta\nu_q$$

$$\text{脉宽: } \tau = \frac{T}{N} = \frac{1}{\Delta\nu_T}, \text{ 脉冲宽度与能同时运转的}$$

纵模的谱宽成反比关系, 但是不论是纵模振幅呈均匀分布还是高斯分布脉冲宽度与振荡线宽分布, 脉冲宽度与振荡线宽 $\Delta\nu_{\text{osc}}$ 都满足如下关系: $\Delta\tau = k/\Delta\nu_{\text{osc}}$, k 为一常数。

因此, $(2N+1)$ 个振荡模经过锁模后, 总的光场变为频率为 ω_0 的调幅波, 振幅 $A(t)$ 是随时间变化的周期函数, 光强 $I(t)$ 也是时间的函数^[4]。

2.2 再生锁模激光系统方程

再生锁模整个系统工作时完全依靠提取激光器内本征谐波频率成分作为调制信号^[5-6], 可以确保激光器长期不失锁, 而且原则上具备自启动的能力。激光频率转换利用晶体的非线性效应, 将某一种频率光的能量通过能量耦合效应, 转移到另外一种频率的光波上^[7]。利用非线性晶体的二阶非线性极化效应进行频率合成, 假设入射到非线性晶体上的频率 ω_1, ω_2 自我湮灭, 但是产生新的频率 $\omega_3 = \omega_1 + \omega_2$, 同时 ω_3 的幅值正比 ω_1 和 ω_2 幅值的乘积。当脉宽沿 z 方向传播, 小于 100 ps 时, 需要瞬态耦合波方程即包含时间因子 t 的方程^[8], 二阶非线性效应的三波瞬态耦合波方程为:

$$\frac{\partial A_1}{\partial z} + \frac{1}{u_1} \frac{\partial A_1}{\partial t} = IB_1 A_3 A_2 \exp(-i\Delta kz)$$

$$\frac{\partial A_2}{\partial z} + \frac{1}{u_2} \frac{\partial A_2}{\partial t} = IB_2 A_3 A_1 \exp(-i\Delta kz)$$

$$\frac{\partial A_3}{\partial z} + \frac{1}{u_3} \frac{\partial A_3}{\partial t} = IB_3 A_1 A_2 \exp(-i\Delta kz)$$

其中, Δk 为相位失配量, 直接影响参量光的增益和脉冲宽度, 只有 $\Delta k = k_3 - k_2 - k_1 = 0$, 参量增益最大;

$$\frac{1}{u_n} = \frac{\partial K(\omega_n)}{\partial \omega} = \frac{n_n}{c} \left[1 + \frac{\omega_n}{n_n} \frac{\partial n(\omega_n)}{\partial \omega} \right]$$

$$A_3(z) = \int_0^l IB_3 A_1 A_2 \exp(i\Delta kz) dz$$

$$= IB_3 A_1 A_2 l \text{sinc}\left(\frac{\Delta k}{2}\right) \exp\left(i \frac{\Delta k}{2} l\right)$$

$\text{sinc}x = \frac{\sin x}{x}$, 其中, l 是非线性介质长度。

设参与混频的三个电磁波均为平面波, 式中, $n = 1, 2, 3; \omega_3 = \omega_1 + \omega_2$ 。当 $\omega_1 = \omega_2$, 得出 $\omega_3 = 2\omega_1$ 。

当脉冲经过调制器时^[9], 调制器的传输函数为 $T(\omega_m t + \varphi_i)$, 其中 ω_m 为调制器的调制频率, φ_i 为脉冲第 i 次通过调制器时的调制器相位。传输函数为 $T(\omega_m t + \varphi_i)$ 在 t 时刻, 围绕 t_0 (调制器相位 φ_i 对应的时刻展开) 得:

$$T_i(t) = T(\omega_m t + \varphi_i) = J_i \cdot (1 + u_i t + \nu_i t^2)$$

$$J_i = T(t) \Big|_{t=\varphi_i}, u_i = \frac{T'' \Big|_{t=\varphi_i}}{T \Big|_{t=\varphi_i}} \cdot \omega_m,$$

$$\nu_i = \frac{1}{2} \frac{T'' \Big|_{t=\varphi_i}}{T \Big|_{t=\varphi_i}} \cdot \omega_m^2$$

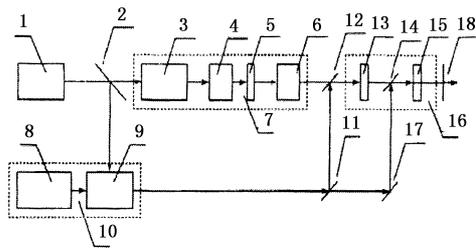
对于 p 次的有理数谐波锁模脉冲来说, 满足:

$$\varphi_i = \varphi_0 + \frac{2\pi i}{p}$$

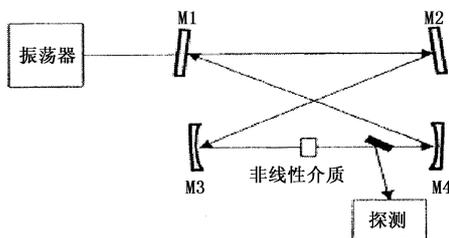
当一个 p 次的谐波环形 p 次后达到了锁模^[11], 应该满足: $f_p(t) = \exp(-\Gamma t^2)$, 这样就得到高次谐波。

3 实验

本系统如图 1(a) 所示, 其中飞秒锁模脉冲^[12]振荡器(为图 1(a)中的标号(1)、第一分束片(2)、稳定信号脉冲源(7)、同步泵浦源(10)、放大级(16)和压缩器(18), 在该钛宝石飞秒锁模脉冲振荡器的输出光束方向首先通过第一分束片, 第一分束片将激光束分成透射光束和反射光束, 透射光束方向依次经过稳定信号脉冲源、放大级和压缩器, 稳定信号脉冲源由光子晶体光纤(3)、啁啾镜(4)、周期极化钽酸锂晶体(5)和展宽器(6)构成; 放大级由第一双色镜(12)、第一非线性晶体(13)、第二双色镜(14)和第二非线性晶体组成(15); 同步泵浦源由调 Q 倍频 YAG 激光器(8)、窄带钛宝石再生放大器(9)、第二分束片(11)和全反镜(17)组成的。



(a) 系统结构
(a) system structure



(b) 激光探测系统
(b) laser detection system

图 1 实验框图

Fig.1 experimental diagram

M1, M2, M3, M4 四个镜子构成无源腔, 如图 1(b) 所示, 其自由光谱区等同于泵光(来自振荡器)的纵模间隔, 从而泵光在腔内形成谐振通过前后脉冲的电场相干叠加而实现光放大, 其放大倍数取决于谐振腔腔镜的镀膜, 如反射率为 99.9%, 放大倍数为 1000 倍, 反射率为 99.99%, 放大倍数为 10000 倍, 这样通过改变腔镜的反射率就可以得到想要的激光峰值功率, 飞秒激光器技术指标如表 1 所示。

表 1 飞秒激光器技术指标

Tab.1 femtosecond laser technology indicators

激光物质	Nd:Vanadate
波长/nm	1064
脉宽/FWHM	8 ps
最大平均功率/mW	1000
最大脉冲能量/nJ	1000
重复频率/Hz	0.5 ~ 1 MHz
功率稳定性	1% RMS(1 h)
光束质量	TEM ₀₀ , M ² < 1.2
偏振	垂直偏振
电源	100, 115, 230 VAC, 50/60 Hz, 350 W
环境温度	15 ~ 32 °C, 不结露
激光头尺寸	702 mm × 502 mm × 166 mm
出光高度	101.6 mm

经过扩束后的种子光在进入展宽器前必须要经过由格兰棱镜, 半波片和法拉第旋转器组成的隔离系统, 该隔离系统可以使不同偏振方向的光在空间上分开, 这样就可以避免后来放大的光脉冲传回振荡器, 影响锁模脉冲的稳定性。种子光经过隔离系统后进入马丁内兹展宽器, 在展宽器中往复四次后被展宽至 228 ps 左右。经过展宽后的光进入再生放大器。种子光经过再生放大提取一定的能量, 并利用普克尔盒的选单特性将频率降低到 20 Hz 输出经扩束后进入多通放大器, 四次经过多通放大器晶体后完成放大过程。从放大器输出的激光脉冲再经过一个 1:4 的扩束望远系统后进入压缩系统。将脉冲宽度压缩至飞秒量级, 得到放大的飞秒脉冲激光输出。图 2 为种子光注入再生腔时, 利用快响应光电二极管检测的输出信号, 图 3 为注入种子光时再生腔的脉冲, 图 4 为种子光导出再生腔时, 利用快响应光电二极管检测的输出信号, 图 5 种子光导出再生腔时, 利用快响应光电二极管监测的输出单脉冲信号。由于飞秒激光参量啁啾脉冲放大激光器中设置有多脉冲叠加放大器, 不仅可获得高信噪比和高稳定性放大的信号光, 而且可扩大飞秒激光参量啁啾脉冲放大激光器的应用范围。

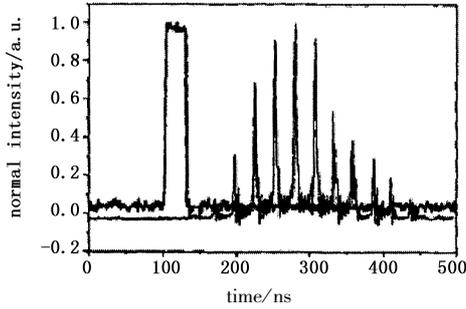


图2 种子光注入再生腔

Fig.2 seed light injected into the regeneration chamber

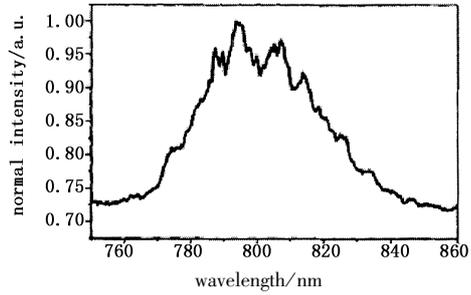


图3 注入种子光时再生腔的脉冲

Fig.3 pulse of seed injected

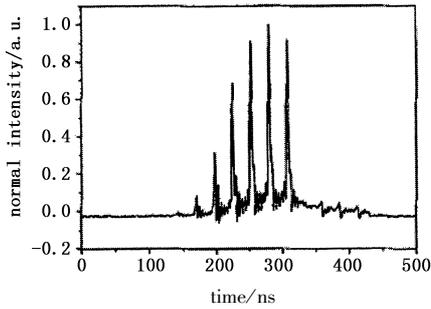


图4 种子光导出再生腔

Fig.4 seed light outjected into the regeneration chamber

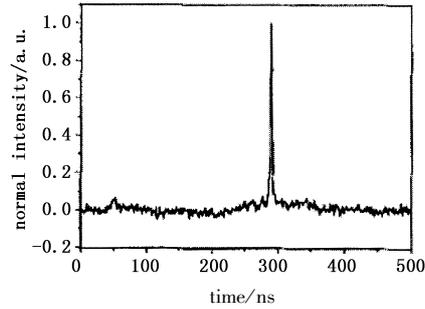
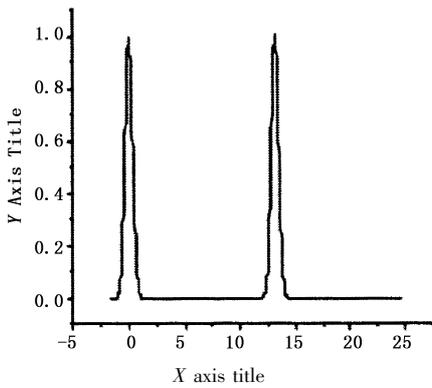


图5 导出种子光时再生腔的脉冲

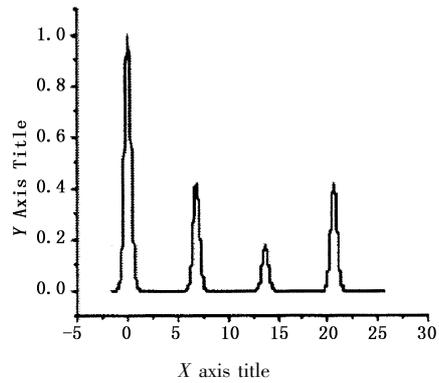
Fig.5 pulse of seed outjected

图6 给出了部分高次谐波,从中可以看出脉冲形状满足中间低两边高的规律,得到的都是比较均衡的脉冲图像,锁模脉冲平滑,有明显的平底,且无

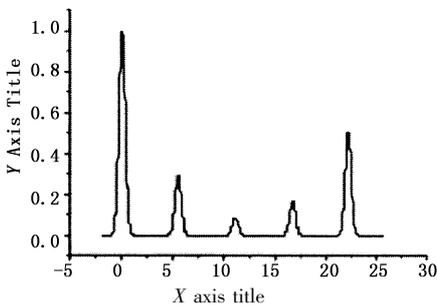
毛刺结构,主要是由于低次的脉冲在偏振控制器的调制下,中间峰值更容易被透过,从而达到脉冲均衡,而当加入一个滤波器由于滤波器的波长选择功



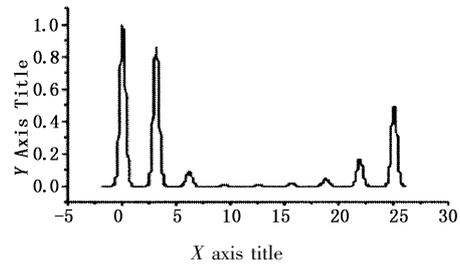
(a)2 阶锁模脉冲波形
(a)2 order mode-locked pulse



(b)4 阶锁模脉冲波形
(b)4 order mode-locked pulse



(c)5 阶锁模脉冲波形
(c)5 order mode-locked pulse



(d)11 阶锁模脉冲波形
(d)11 order mode-locked pulse

图6 分子光 = 1 高次锁模谐波

Fig.6 light = 1 high molecular harmonic mode-locking

能可以减少环形腔中不同波长的模式竞争,从而增加了光纤环形激光器的稳定性更容易实现锁模现象。由于飞秒激光参量啁啾脉冲放大激光器的泵浦

光与信号光来自于同一光脉冲,通过控制它们之间的光程差,能够实现它们之间目的完全同步,提高泵浦光向信号光的转换效率。

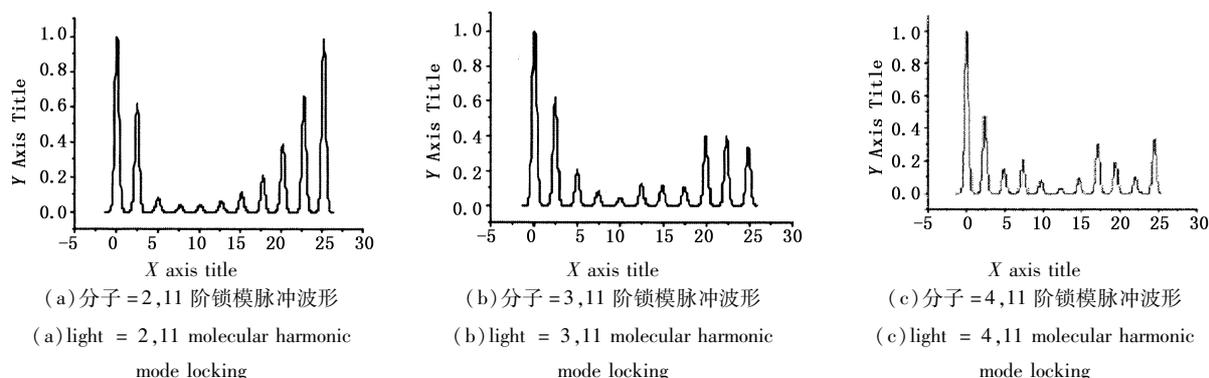


图7 多分子阶锁模波形

Fig.7 more molecular order mode locked waveform

图7所示为多分子数的高阶有理数谐波锁模脉冲,通过调整偏振控制器更容易达到脉冲均衡,可以长期稳定地输出波长、脉宽可调的高重复率变换脉冲,多脉冲叠加放大器对进入的超短脉冲串整形,可得到光谱窄、时恒长度长的平顶泵浦光,此类泵浦光与信号光同时注入非线性晶体,可以获得高信噪比和高稳定性放大的信号光;通过控制进入多脉冲叠加放大器的叠加脉冲个数和脉冲之间在多脉冲叠加器中的相互延迟,可以获得不同时间长度的窄带平顶泵浦光,因而能适应不同物理需求的信号光的放大,增加了光参量啁啾脉冲放大系统的灵活性。

4 总结

实验中观察到非线性晶体条件下形成这种高阶谐波锁模光脉冲,其形成机理主要是高功率抽运下高阶光孤子的分裂与光孤子间的相互作用,实验中在稳定的高阶谐波锁模光脉冲中还观察到明显的孤子边带光谱,高阶有理数谐波锁模脉冲比较容易达到均衡。

参考文献:

- [1] Chen De Ying, Wang Yu Quan, Xia Yuanqin. Recent progress of attosecond XUV and X-ray pulses formed by high-harmonic generation [J]. High Power Laser and Particle Beams, 2008, 20(9): 1409 - 1412. (in Chinese)
陈德应, 王玉铨, 夏元钦. 高次谐波产生阿秒极紫外和 X 光脉冲研究新进展 [J]. 强激光与粒子束, 2008, 20(9): 1409 - 1412.
- [2] Wu Bing, Yang Bo Jun. Active mode-locked erbium-doped fiber ring laser theory and stability [J]. Photon Technology, 2005, 9(3): 124 - 125, 127. (in Chinese)

吴斌, 杨伯君. 主动锁模掺铒光纤环激光器的原理和稳定性研究 [J]. 光子技术, 2005, 9(3): 124 - 125, 127.

- [3] Yao Ping Ping, Zhao Xin, Zhang Yi. Detection characteristics of avalanche photodiode in laser altimeter [J]. Laser Technology, 2008, 32(6): 628 - 630, 634. (in Chinese)
姚萍萍, 赵欣, 张毅. 激光测高仪中雪崩光电二极管的探测性能分析 [J]. 激光技术, 2008, 32(6): 628 - 630, 634.
- [4] Jiang Qi Chang, Su Yan Li, Ji Xuan Mang. The characteristics of bright screening-photovoltaic solitons based on different photorefractive model [J]. Laser Journal, 2009, (6): 54 - 55. (in Chinese)
姜其畅, 苏艳丽, 吉选芒. 基于不同光折变模型的亮屏蔽光伏孤子特性 [J]. 激光杂志, 2009, (6): 54 - 55.
- [5] Ma Bo Qin, Ma Dong Li, Li Zhi Yuan, et al. Different-order quasi-phase matching harmonics in quasiperiodic ferroelectric crystals [J]. Acta Optica Sinica, 2009, (12): 3473 - 3476. (in Chinese)
马博琴, 马冬莉, 李志远, 等. 准周期铁电晶体中不同阶次的准相位匹配谐频 [J]. 光学学报, 2009, (12): 3473 - 3476.
- [6] Xu Fan, Zhang Xin Liang, Liu De Ming, et al. Tunable ultra-short optical pulse source based on reflective semiconductor fiber ring laser [J]. Acta Physica Sinica, 2006, 55(1): 211 - 215. (in Chinese)
徐帆, 张新亮, 刘德明, 等. 基于单端半导体光放大器的可调谐超短光脉冲源理论与实验研究 [J]. 物理学报, 2006, 55(1): 211 - 215.
- [7] Wang Feng Li, Chen Rui, Wang Zhan Shan, et al. Design, fabrication and characterization of the chirped Mo/Si multilayer mirrors for subfemtosecond pulses [J]. Acta Photonica Sinica, 2009, 9: 2247 - 2250. (in Chinese)

- 王风丽,陈锐,王占山,等.亚飞秒啁啾 Mo/Si 多层膜反射镜的设计、制作与性能检测[J].光子学报,2009,9:2247-2250.
- [8] Li Xian. BBO generated crystals make femtosecond pulse effective third harmonic [D]. Shanghai: East China Normal University, 2008:43-70. (in Chinese)
李贤. 利用 BBO 晶体产生飞秒脉冲高效三次谐波研究[D]. 上海:华东师范大学,2008:43-70.
- [9] Zhang Jian Wei. Experimental studies of rational harmonic mode-locked fiber lasers [D]. Shanghai: Shanghai Jiaotong University, 2008:43-70. (in Chinese)
章健文. 有理数谐波锁模光纤激光器的实验研究[D]. 上海:上海交通大学,2007:20-80.
- [10] Lu Ming Lie, Chai Lu, Wang Qing Feng. Femtosecond laser pulses in photonic crystal fibers frequency conversion of the experiment [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2005,42(1):10-11. (in Chinese)
胡明列,柴路,王清月. 飞秒激光脉冲在光子晶体光纤中的频率变换实验[J]. 激光与光电子学进展,2005,42(1):10-11.
- [11] Mo Shuang, Qu Yan Chen, Ren De Ming. The experimental research on an active-passive mode-locked Nd:YAG laser[J]. Laser & Infrared, 2007,37(8):722-724. (in Chinese)
莫霜,曲彦臣,任德明,等. 主被动调 Q-锁模 Nd:YAG 激光器的实验研究[J]. 激光与红外,2007,37(8):722-724.
- [12] Jiang Yong Liang, Leng Yu Xin, Chen Xiao Wei, et al. The laser pulse optical parametric amplification system; China [P]. 200710041417. 2. (in Chinese)
姜永亮,冷雨欣,陈晓伟,等. 光学参量啁啾脉冲放大激光系统[P]. 中国,200710041417. 2.