

·测试、试验与仿真·

## 相位波带片型时间透镜研究

王向凯<sup>1</sup>, 梁生<sup>1</sup>, 盛新志<sup>1</sup>, 娄淑琴<sup>2</sup>, 刘子豪<sup>2</sup>

(1. 北京交通大学 光信息科学与技术研究所教育部发光与光信息技术重点实验室, 北京 100044;

2. 北京交通大学 电子信息工程学院, 北京 100044)

**摘要:** 基于 Opti-System 软件, 对相位波带片型时间透镜进行了深入研究。明确了中心波长对相位波带片型时间透镜焦距色散补偿量的影响机理, 建立了中心波长、色散补偿量与输出光脉冲消光比及脉冲宽度间的关系。研究表明, 相位波带片型时间透镜的焦距色散补偿量, 在 1 310~1 550 nm 波长范围与光信号中心波长呈近似线性关系。通过线性拟合, 得出焦距色散补偿量与中心波长的线性关系公式。对于不同波长的输入光波, 可通过公式确定最佳焦距色散补偿量, 实现最窄脉宽和最优消光比的光脉冲输出。研究结果可为优化相位波带片型时间透镜设计提供理论指导, 进而拓宽相位波带片型时间透镜的应用范围。

**关键词:** 时间透镜; 相位波带片型时间透镜; 时空二元性; 色散补偿; 焦距; 消光比

中图分类号: O435

文献标识码: A

文章编号: 1673-1255(2015)-02-0070-04

## Research on Temporal Phase Zone Plate Lens

WANG Xiang-kai<sup>1</sup>, LIANG Sheng<sup>1</sup>, SHENG Xin-zhi<sup>1</sup>, LOU Shu-qin<sup>2</sup>, LIU Zi-hao<sup>2</sup>

(1. Key Laboratory of Education Ministry on Luminescence and Optical Information Technology, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China; 2. School of Electronic and Information Engineering, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China)

**Abstract:** Based on Opti-System software, temporal phase zone plate lens are deeply researched. The influence mechanism of focal length dispersion compensation of temporal phase zone plate lens from central wavelength is confirmed. The relationships of central wavelength, dispersion compensation, output light pulse extinction ratio (ER) and pulse width are established. Research results show that there is an approximate linear relationship between focal length dispersion compensation of temporal phase zone plate lens and optical signal central wavelength at 1 310~1 550 nm. Through linear fitting, the linear relationship formula of focal length dispersion compensation and center wavelength is obtained. For input light wave with different wavelength, the optimal focal length dispersion compensation can be determined through the formula to realize the light pulse output with the narrowest pulse width and the best ER. Research results can provide theoretical reference for optimization temporal phase zone plate lens design to broaden the application range of temporal phase zone plate lens.

**Key words:** time lens; temporal phase zone plate lens; space-time duality; dispersion compensation; focal length; extinction ratio (ER)

时间透镜, 自 1994 年 B Kolner 等首先提出以来, 已发展出多种类型, 在超快脉冲的产生、处理和检测, 以及消除时间抖动等多方面, 获得广泛应用<sup>[1-8]</sup>。然而, 时间透镜的色散补偿通常需要在前后

端同时进行, 实验系统普遍存在复杂性和成本比较高, 以及时间带宽积受到相位调制深度限制等问题的影响, 限制了时间透镜的推广应用<sup>[9]</sup>。

2013 年, B Li 等提出相位波带片型时间透镜, 只

收稿日期: 2015-01-21

基金项目: 国家自然科学基金(61205074); 教育部博士点基金(20120009120041)

作者简介: 王向凯(1989-), 男, 山东省菏泽市人, 硕士研究生, 主要研究方向为光信号处理。

通过后端色散补偿即可实现时间透镜效应,简化了系统的复杂性,降低了成本<sup>[10]</sup>。B Li 等以连续光进行压缩输出光脉冲实验对其构想进行了验证,但未对该新型时间透镜的性能及影响因素进行进一步的深入研究。

利用 Opti-System 软件系统,针对影响相位波带片型时间透镜性能的主要因素开展研究工作。研究成果将为相位波带片型时间透镜的结构设计和优化提供指导,并可进一步扩大这一新型时间透镜的应用范围。

### 1 相位波带片型时间透镜原理

相位波带片型时间透镜,是基于时空二元性的新型时间透镜器件,通过相位调制和色散补偿实现对连续光波的时域聚焦作用,其工作原理如图 1 所示。理论基础是时间域的窄带色散与空间域的傍轴衍射存在理论相似性,即时空对应性原理<sup>[1-2]</sup>。

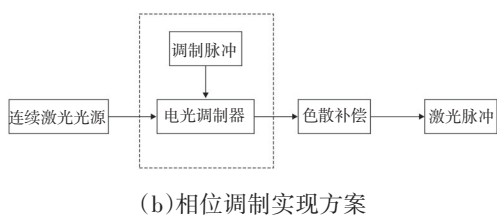
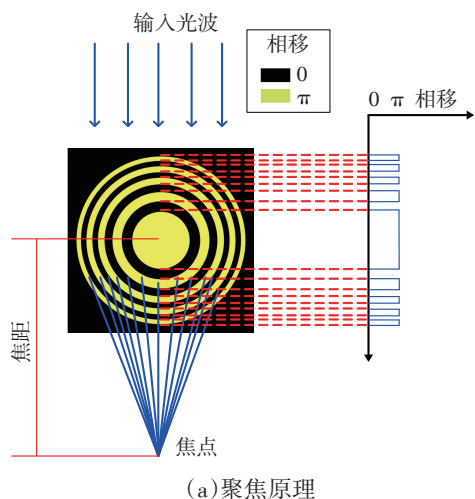


图 1 相位波带片型时间透镜工作原理示意图

相位波带片型时间透镜的相位调制,可有数字或模拟两种调制方式。按照数字相位函数如式(1)  

$$\varphi_1(t) = \pi/2 + \pi/2 \operatorname{sgn}[\cos(at^2)] \quad (1)$$
 模拟调制相位函数如式(2)

$$\varphi_2(t) = \Gamma_0 [\cos(at^2)] \quad (2)$$

其中,  $a$  为常量;  $\operatorname{sgn}(\sim)$  为符号函数;  $\Gamma_0$  为相位调制深度。按照这两种调制方式进行相位调制,即可形成相位波带片型时间透镜。它类似于空间相位波带片对输入的连续光波进行阶跃式的相位调制,对时间上连续光波进行阶跃式的相位调制,再通过等于相位波带片型时间透镜焦距色散补偿量的色散补偿,可实现时域聚焦产生光脉冲输出。

### 2 相位波带片型时间透镜性能研究

对于确定的调制波形,后端色散补偿量的大小直接影响相位波带片型时间透镜的性能。输入光波长不同,相位波带片型时间透镜的焦距会发生改变;明确焦距与光波长的关系,可有效地对输出脉冲宽度和消光比进行优化,且对相位波带片型时间透镜的设计有重要意义。

#### 2.1 分析程序

基于 Opti-System 软件系统,对相位波带片型时间透镜性能进行研究,分析程序如图 2 所示。

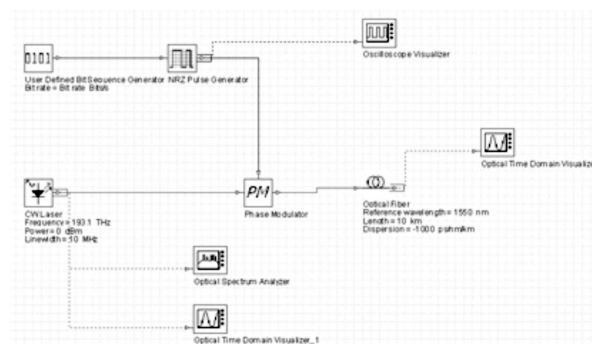


图 2 相位波带片型时间透镜性能分析程序

以电光相位调制器对输入光实现相位调制,光纤进行后端色散补偿,光示波器观察系统输出。输入光采用连续激光,中心波长为 1 552.5 nm,线宽为 10 MHz,输出功率为 1 mW。以 bit 序列发生器通过非归零脉冲发生器生成数字调制脉冲,驱动电光相位调制器,进行相位调制。

#### 2.2 色散补偿量的影响

研究发现,输入连续光波,经过相位波带片作

用,在一定范围的后端色散补偿后,实现了时域聚焦,输出光脉冲。如图3所示。在色散补偿量分别为-7 000 ps/nm、-8 100 ps/nm和-9 000 ps/nm条件下,输出光脉冲,对应脉冲宽度分别为63 ps、59 ps和60 ps,分别具有2.23 dB、4.14 dB和3.36 dB的消光比。

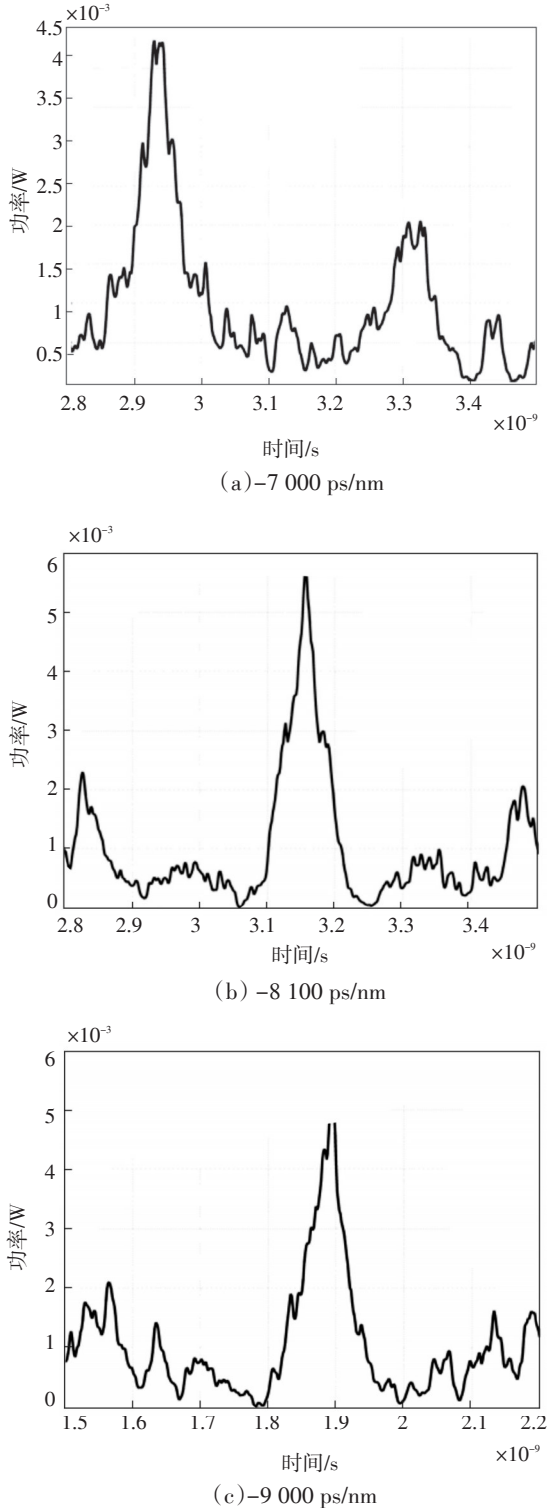


图3 不同色散补偿量时时域聚焦光脉冲

显然,对于相位波带片型时间透镜,后端色散补偿量不同,输出光脉冲的性能指标就不同,后端色散补偿量对输出脉冲的性能指标有很大的影响作用。类似于空间相位波带片因输出位置不同、相位补偿不同所带来的不同聚焦效果。如图4所示。分别为色散补偿量在-5 000~-11 000 ps/nm 范围内时,输出光脉冲宽度与消光比的变化情况。

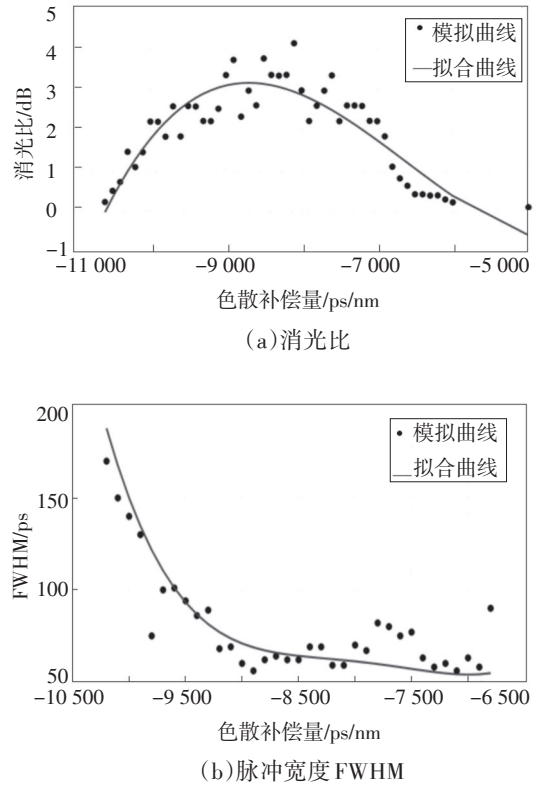


图4 输出光脉冲消光比和脉冲宽度与色散补偿量的关系

可见,消光比随色散补偿量变化显著。综合考虑脉冲宽度和消光比,对于1 552.5 nm 中心波长,色散补偿量为-8 100 ps/nm 时对应最优的消光比(4.14 dB)和脉冲宽度(59 ps)。因此可以认为,色散补偿量-8 100 ps/nm,即为该相位波带片型时间透镜在1 552.5 nm 中心波长时的焦距。

### 2.3 焦距与波长关系

光波长不同,对应不同的相位波带片型时间透镜焦距。色散补偿量取最优值-8 100 ps/nm,在1 300~1 550 μm 范围内改变输入光的中心波长,消光比发生如图5所示的变化。聚焦脉冲的消光比随

光中心波长改变发生变化,表明该相位波带片型时间透镜的焦距与波长相关。

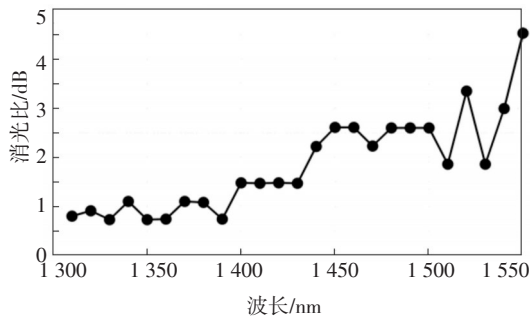


图5 消光比与波长之间的关系(色散补偿量为 $-8\ 100\ \text{ps}/\text{nm}$ )

因此,同样在 $1\ 300\sim 1\ 550\ \mu\text{m}$ 范围内,改变输入光的中心波长,探索焦距发生的变化。不同波长情况下相位波带片型时间透镜的焦距变化如图6所示。

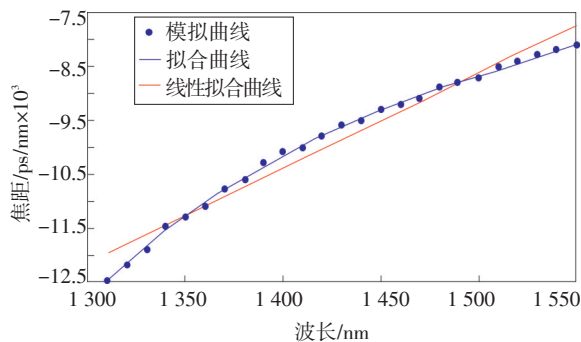


图6 焦距与波长之间的关系

可见,该相位波带片型时间透镜的焦距随波长呈近似线性增加关系。作近似线性拟合,可得焦距与光中心波长之间关系如下式

$$DC_f = 17.66\lambda - 35\ 120 \quad (3)$$

其中, $DC_f$ 为焦距; $\lambda$ 为波长。

可见,在 $1\ 310\sim 1\ 550\ \text{nm}$ 波长范围内,对于不同波长的输入光波,可通过此公式确定最佳焦距色散补偿量,进而实现输出光脉冲在脉宽和消光比的优化。

### 3 结论

基于Opti-System对相位波带片型时间透镜性能进行了深入分析,明确了输出光脉冲宽度、消光比与色散补偿量及输入连续光波中心波长之间的关系。

研究发现,在 $1\ 310\sim 1\ 550\ \text{nm}$ 波长范围内,相位波带片型时间透镜的焦距——最佳色散补偿量,与中心波长呈近似线性关系。并且文中得出了该线性公式。对于不同的输入光波长,通过该公式可以得到焦距色散补偿量以实现最优的光脉冲输出。文中的研究成果可为设计和优化相位波带片型时间透镜提供理论参考和技术指导,对相位波带片型时间透镜应用领域的拓展具有非常重要的现实意义。

### 参考文献

- [1] Kolner B. Space-time duality and the theory of temporal imaging[J]. IEEE Journal of Quantum Electronics, 1994, 30(8):1951-1963.
- [2] James van Howe, Chris Xu. Ultra-fast optical signal processing based upon space-time dualities[J]. Journal of Lightwave Technology, 2006, 24(7):2649-2662.
- [3] Kauffman M T, Banyai W C, Godil A A, et al. Time-to-frequency converter for measuring picosecond optical pulses [J]. Applied Physics Letters, 1994, 64(3):270-272.
- [4] Foster M A, Salem R, Okawachi Y, et al. Ultra-fast waveform compression using a time-domain telescope[J]. Nature Photonics, 2009, 3(10):581-585.
- [5] LI Bo, TAN Zhong-wei, ZHAO Xiao-xing. Simulation and analysis of time lens using cross phase modulation and four-wave mixing[J]. Acta of Physics Sina, 2012, 61(1): 014203.
- [6] Almeida P J, Petropoulos P, Thomsen B C, et al. All-optical packet compression based on time-to-wavelength conversion[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2004, 16(7):1688-1690.
- [7] Salem R, Foster M A, Turner-Foster A C, et al. High-speed optical sampling using a silicon-chip temporal magnifier[J]. Optics Express, 2009, 17(6): 4324-4329.
- [8] Kelkar P, Coppinger F, Bhushan A S, et al. Time-domain optical sensing[J]. Electronics Letters, 1999, 35(19): 1661-1662.
- [9] Enrique Luis Munioz-Camuniez, Victor Torres, Jesús Lancis, et al. Electro-optic time lens with an extended time aperture[J]. Journal of Optical Society of America B, 2010, 27(10):2110-2115.
- [10] LI Bo, LI Ming, LOU Shu-qin, et al. Temporal phase zone plates for linear optical pulse compression[J]. Proceeding of CLEO: QELS\_Fundamental Science, San Jose, California United States, 2013, 21(14): 16814-16830.