

液晶空间光调制器在飞秒脉冲色散补偿中的应用^{*}

位恒政 张志刚 陈盛华 柴 路 王清月

(天津大学精密仪器与光电子工程学院超快激光研究室,
国家教育部光电子信息技术科学重点实验室,天津 300072)

(2003 年 6 月 13 日收到,2003 年 8 月 22 日收到修改稿)

论述了液晶空间光调制器(SLM)色散补偿的原理,数值模拟了 SLM 的色散补偿结果,并分析了影响 SLM 色散补偿的原因.结果表明 SLM 像素之间的间隙对补偿脉冲的宽度及对比度有很大影响.

关键词:空间光调制器,色散补偿,飞秒脉冲

PACC:4280W,4260F

1. 引 言

获得短脉冲的关键技术就是对啁啾脉冲进行有效的色散补偿.色散补偿的技术很多,其中使用棱镜对进行色散补偿是最为常用的方法,然而棱镜对只能提供对二阶色散的有效补偿,而且棱镜由于自身材料色散的影响,很难补偿脉冲的高阶色散.在脉冲宽度接近亚 10fs 区域时,高阶色散的存在则成为影响脉宽压缩的主要因素^[1].自从 1994 年 Szipocs 提出啁啾镜的概念以来,啁啾镜也被广泛用于色散补偿.使用啁啾镜进行色散补偿的优势在于:可以使整个激光器的腔型结构变得更加简单集成,较好地补偿高阶色散.其缺点就是,制作工艺很严格,否则很难达到设计的要求,而且啁啾镜补偿带宽有限.

随着微电子和光电子集成技术的飞速发展以及两者的紧密结合,空间光调制技术得到了大大的促进和发展.各种新型的空间光调制器件层出不穷,例如,多量子阱、铁电晶体和磁光器件,以及聚合物材料的器件都在朝着实用化方向迈进.各种液晶空间光调制器更是飞速发展.这项技术被广泛应用于光逻辑运算、高速光互连、阈值开关、数据存贮、输出显示、色散补偿等诸多领域.

液晶空间光调制器的基本单元是像素,每个液晶像素在外加电场作用下,其折射率会随之改变.很

多这样的像素排列在一起,并用一组电压在透明电极上进行驱动时,就会形成一定的位相掩膜,对透过液晶像素传播的偏振光,起到相位调制的作用,这就是液晶相位调制方法的基本思想.

目前,用液晶空间光调制器(SLM)进行脉冲整形,已收到令人瞩目的结果,可以得到小 6fs 的短脉冲^[2].用 SLM 进行色散补偿,可以只补偿某一阶色散(如群延迟色散 GDD,三阶色散 TOD,四阶色散 FOD 等),使用起来很灵活,而且还可以利用 SLM 进行实时自适应脉冲整形^[3],自适应技术解决了与飞秒脉冲压缩相关的一个主要困难:需要描述未压缩的脉冲.因此,这种自适应技术几乎可以形成任意的光谱相位滤波器,可以获得有效的脉冲压缩.使用自适应脉冲压缩技术还有其他的好处,这种自适应技术不仅可以用来压缩脉冲,也可以用来纠正激光系统的漂移.

本文简介了 SLM 色散补偿的原理,分析了影响 SLM 色散补偿的因素,并以二阶色散为例,数值模拟了 SLM 色散补偿的结果,分析了 SLM 的像素间隙(gap)对色散补偿的影响.

2. 4-f SLM 光学系统

图 1 是一个典型的零色散脉冲压缩器,SLM 放在傅里叶平面上.一个光栅将入射光衍射展开,使入

^{*} 国家自然科学基金(批准号:60178007),天津市自然科学基金(批准号:003800611),国防预研基金(批准号:03JW1401),国家重点基础研究专项经费(批准号:G1999075201-2)和教育部高等学校骨干教师资助计划资助的课题.

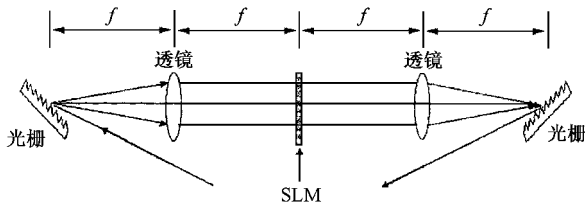


图 1 4-f 波形整形装置

射脉冲的各个频率成分分散在 SLM 上,另一个光栅将分散的频率成分汇聚.如果没有 SLM 的位相调制,其出射脉冲应与入射脉冲是一样的.此装置首先由 Froehly 等人^[4]使用固定的空间光调制器来进行脉冲整形.后来,Weiner 等人^[5,6]将固定的空间光调制器换为可编程的液晶空间光调制器,通过改变加在每个像素上的电压,可以形成任意的位相掩膜,使得脉冲整形更加容易、灵活.

3. SLM 色散补偿原理

调整中心波长的衍射光线垂直于 SLM 表面,并且使其在 SLM 的中心,其衍射位置设为 $x = 0$.其他波长在 SLM 上的位置 x 可以由图 2 得出

$$x = f \tan \Omega, \Omega = \theta_d(\lambda) - \theta_{d0}(\lambda_0), \quad (1)$$

设 θ_i 是入射角, θ_d 是衍射角, d 是光栅常数,由光栅方程可以得到

$$d(\sin \theta_i + \sin \theta_d) = \lambda = \frac{2\pi c}{\omega}. \quad (2)$$

将(2)式代入(1)式,可得

$$x = f \tan \left[\sin^{-1} \left(\frac{2\pi c}{\omega d} - \sin \theta_i \right) - \theta_{d0}(\lambda_0) \right]. \quad (3)$$

所以,角频率 $\omega(x)$ 在 SLM 上的分布

$$\omega(x) = \frac{2\pi c}{d} \left\{ \sin \theta_i + \sin \left[\tan^{-1} \left(\frac{x}{f} \right) + \theta_{d0}(\lambda_0) \right] \right\}^{-1}. \quad (4)$$

由(3)式可得

$$x_{\min} = f \tan \left[\sin^{-1} \left(\frac{2\pi c}{\omega_{\min} d} - \sin \theta_i \right) - \theta_{d0}(\lambda_0) \right]. \quad (5)$$

设 $\delta x = \delta x' + \Delta$,其中 $\delta x'$ 是每个像素的幅度, Δ 是像素间的间隙幅度,如图 3 所示,则每个像素中心的位置可以求得

$$x_j = \delta x \cdot j + x_{\min} - \frac{\delta x}{2}, \quad (6)$$

其中

$$j = \left[\frac{1}{\delta x} (x - x_{\min}) \right] + 1 \quad \text{是取整号.} \quad (7)$$

每个像素中心对应的角频率为

$$\omega(x_j) = \frac{2\pi c}{d} \left\{ \sin \theta_i + \sin \left[\tan^{-1} \left(\frac{x_j}{f} \right) + \theta_{d0}(\lambda_0) \right] \right\}^{-1}. \quad (8)$$

所以,每个像素上的二次位相调制为

$$M_d[\omega(x_j)] = \begin{cases} \frac{1}{2} \phi^2 [\omega(x_j) - \omega_0] & |x - x_i| \leq \frac{1}{2} \delta x' \\ 0 & |x - x_i| > \frac{1}{2} \delta x' \end{cases}, \quad (9)$$

同样可以写出三次、四次位相补偿的表达式,所以 SLM 的位相调制可以写为

$$M[\omega(x)] = \begin{cases} \frac{1}{2} \phi^2 [\omega(x_j) - \omega_0] + \frac{1}{6} \phi^3 [\omega(x_j) - \omega_0] + \frac{1}{24} \phi^4 [\omega(x_j) - \omega_0] & |x - x_i| \leq \frac{1}{2} \delta x' \\ 0 & |x - x_i| > \frac{1}{2} \delta x' \end{cases}, \quad (10)$$

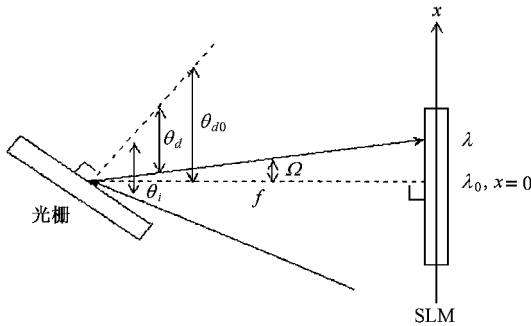


图 2 角频率在 SLM 上的位置分布

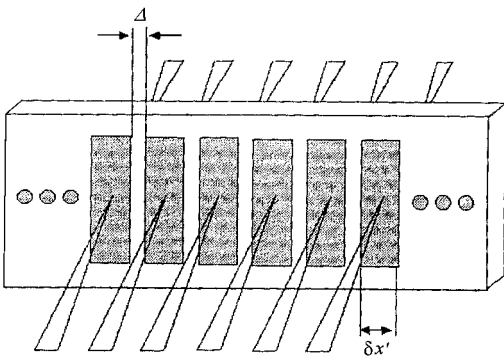


图 3 空间光调制器

N 个像素组成的位相掩模为

$$M_N[\alpha(x)] = \left\{ M[\alpha(x)] \sum_{n=-N/2}^{(N/2)-1} \delta(x - n\delta x) \right\} * \text{rect}\left(\frac{x}{\delta x'}\right), \quad (11)$$

其中 δ 函数为冲击函数, * 号表示卷积,

$$\text{rect}\left(\frac{x}{\delta x'}\right) = \begin{cases} 1 & |x - x_i| \leq \frac{1}{2} \delta x' \\ 0 & |x - x_i| > \frac{1}{2} \delta x' \end{cases}, \quad (12)$$

因此,可以利用控制加在 SLM 各个像素上的电压,产生不同的位相改变,从而形成不同的位相掩模,而且可以单独补偿某一阶色散,使色散补偿变得灵活,易操作.

4. SLM 二阶色散补偿的计算机模拟

假设入射脉冲波形为高斯型,光谱从 200THz 到 800THz(中心波长为 600nm,对应带宽受限脉冲 3fs).假设脉冲含二阶色散 $GDD = 60\text{fs}^2$,其脉宽为 51fs.用像素数 $N = 128$ 的 SLM 进行压缩.

定义脉冲压缩参数为

$$R = \frac{T_{pc} - T_0}{T_0}, \quad (13)$$

其中 T_{pc} 是经 SLM 压缩后的脉冲, T_0 是傅里叶变换极限脉冲脉宽,在这里, $T_0 = 3\text{fs}$.用 FFT 方法,即傅里叶变换方法进行模拟,其程序流程如图 4 所示.

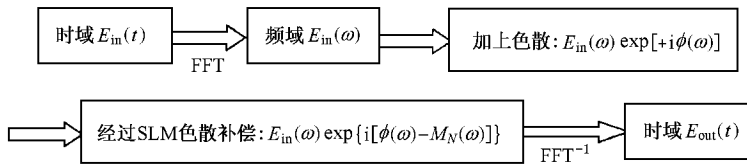


图 4 FFT 方法进行模拟程序流程图

图 5 的横坐标表示间隙占整个宽度(间隙幅 + 像素幅)的比例,从中可以看出,随着间隙的增大,色散补偿的效果越差.当间隙幅为 $3\mu\text{m}$,像素幅为 $97\mu\text{m}$ 时,压缩参数为 15%,可以将 51fs 脉冲压缩到 3.45fs.

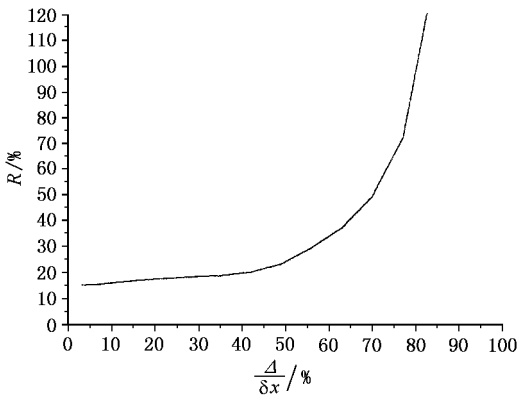


图 5 压缩参数 R 与间隙大小的关系

由于不同像素上对应的中心波长不同,对于相同的 $\Delta\lambda$,对应不同的 $\Delta\omega$,即相同的像素上分布的 $\Delta\omega$ 是不同的.

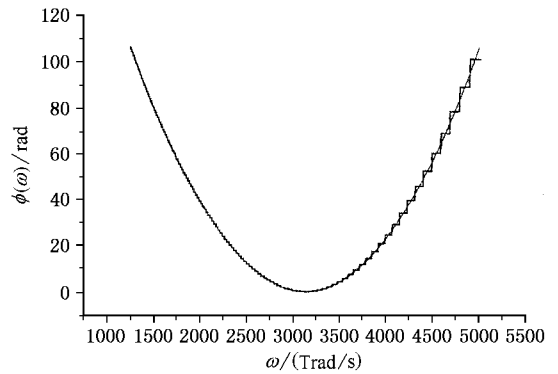


图 6 SLM 的阶梯形位相调制

5. 影响 SLM 色散补偿的原因

1) 角频率分布的不均匀性: 波长在 SLM 上的分布几乎是线性的,即每个像素上分布的波长宽度是一样的,角频率 ω 在 SLM 上的分布却是非线性的,

2) 阶梯形位相调制: 即每个像素上施加一定的电压,分布在同一像素上所有频率成分的位相变化几乎是一样的^[7],因此导致了阶梯状的位相调制.并且由于角频率分布的不均匀性,在短波部分,每个像素上, $\Delta\omega$ 较大,造成在短波长部分色散补偿很差,而在长波部分色散补偿很好,如图 6 所示.平滑曲线是要补偿的位相曲线.实际上,每个像素的最大位相变化量为 2π ,所以加在 SLM 上的位相是折叠后的位

相,即每个像素产生的位相调制可以写为

$$M_{\text{eff}}[\omega(x_j)] = 2n\pi + M'_{\text{eff}}[\omega(x_j)],$$

其中 $M'_{\text{eff}}[\omega(x_j)] \in (0, 2\pi)$, n 为整数.如图 7 所示.

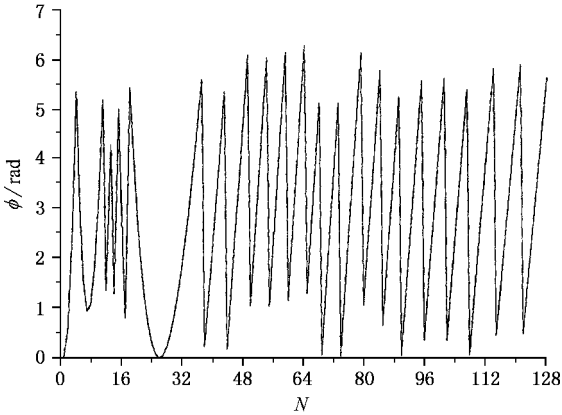


图 7 SLM 上实际的位相分布

6. 像素间隙对脉冲对比度的影响

图 8 (a)(b)(c) 分别对应 $\Delta/\delta x = 7\%$, 49% , 84% .从这三图的比较中可以看出,随着间隙的增加,脉冲的对比度变得越来越差.

7. 改善 SLM 色散补偿的方法

1) 可以将位相的 Taylor 展开式的中心频率偏移.

为了解决短波长部分色散补偿不好的问题,可以将位相的 Taylor 展开式的中心频率适当“蓝移”,从而获得较好的补偿效果^[8].

2) 选用像素数多和间隙小的 SLM 来进行色散补偿.

8. 结 论

由于角频率在 SLM 上分布的不均匀性,以及 SLM 的阶梯形位相调制,影响了色散补偿的结果,但可以通过偏移位相展开式的中心频率,或者选用像素数多和间隙小的 SLM 来改善.数值模拟结果表明,用像素数为 128,像素幅为 $100\mu\text{m}$,像素间隙幅为 $3\mu\text{m}$ 的 SLM 进行色散补偿,可以将脉宽为 51fs(傅里叶极限脉宽为 3fs)的飞秒脉冲压缩到 3.45fs,如图 9 所示.

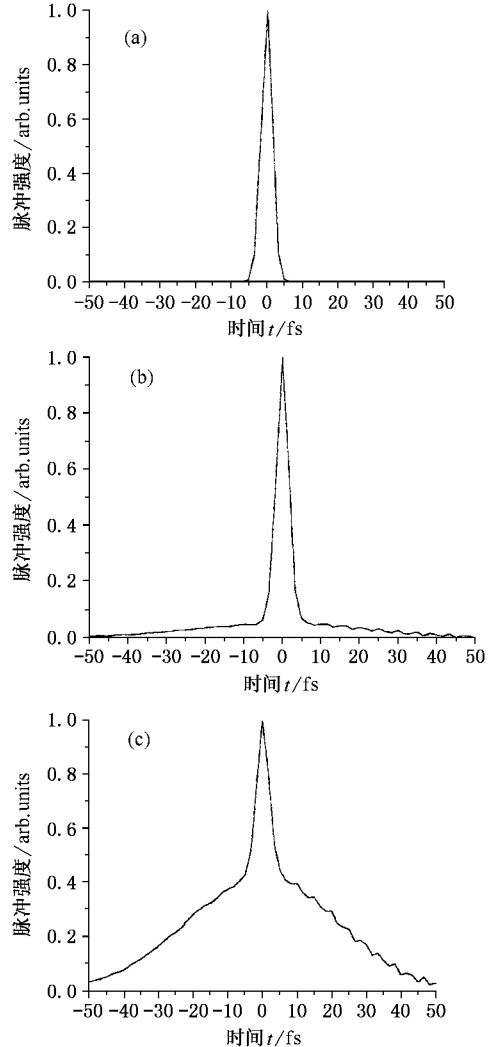


图 8 (a)(b)(c) 分别是对应 $\Delta/\delta x = 7\%$, 49% , 84% 的输出脉冲强度波形

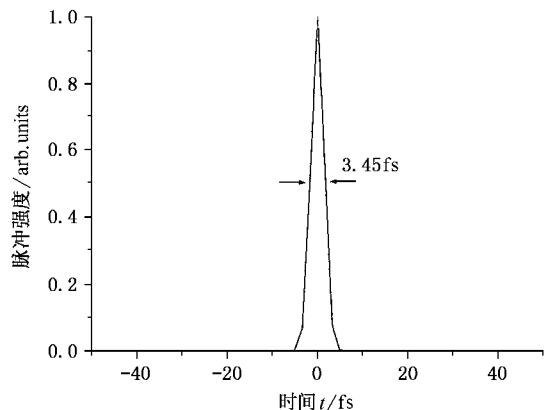


图 9 带宽极限的 3fs 脉冲色散补偿后的强度波形

- [1] Zhang Z G and Sun H 2001 *Acta Phys. Sin.* **50** 1080 (in Chinese)
[张志刚、孙 虹 2001 物理学报 **50** 1080]
- [2] Xu L , Li L , Nakagawa N , Morita R and Yamashita M 2000 *IEEE Photonic. Technol. Lett.* **12** 1540
- [3] Meshulash D , Yelin D and Silberberg Y 1997 *J. Opt. Soc. Am. B* **15** 1615
- [4] Froehly C , Colombeau B and Vampouille M 1983 *Progress in Optics* **20** 65
- [5] Weiner A M , Leaird D E , Patel J S and Wullert J R 1990 *Opt. Lett.* **15** 326
- [6] Weiner A M , Leaird D E , Patel J S and Wullert J R 1992 *IEEE J. Quantum Electron.* **28** 908
- [7] Efimov A , Schaffer C and Reitze D H 1995 *J. Opt. Soc. Am. B* **12** 1968
- [8] Naoki K , Ming L , Akira S and Hiden S 2001 *J. Opt. Am. B* **18** 1742

Chirp compensation of femtosecond pulse by liquid-crystal spatial light modulator^{*}

Wei Heng-Zheng Zhang Zhi-Gang Chen Sheng-Hua Chai Lu Wang Qing-Yue

(*Ultrafast Laser Laboratory , School of Precision Instruments and Optoelectronics Engineering ,*

Key Laboratory of Optoelectronic Information Technical Science , Chinese Ministry of Education , Tianjin University , Tianjin 300072 , China)

(Received 13 June 2003 ; revised manuscript received 22 August 2003)

Abstract

The principle of chirp compensation by liquid-crystal spatial light modulator (SLM) is described. The effects of the SLM structure on chirp compensation are analyzed based on a numerical simulation.

Keywords : spatial light modulator , chirp compensation , femtosecond pulse

PACC : 4280W , 4260F

^{*} Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 60178007) , the Natural Science Foundation of Tianjin (Grant No. 003800611) , the National Defense Foundation of China (Grant No. 03JW1401) , the National Key Basic Research Special Foundation (Grant No. G1999075201-2) , the Foundation of Chinese Ministry of Education for the Key Teachers in Universities.