

文章编号: 0253-2239(2005)03-351-5

# 变形镜对千赫兹掺钛蓝宝石飞秒激光频谱相位补偿

朋汉林 林礼煌 唐斌 冷雨欣 李儒新

(中国科学院上海光学精密机械研究所强光光学重点实验室, 上海 201800)

**摘要:** 尝试用光谱展宽的方法从频谱相位(而非时域相位)的角度利用变形反射镜来补偿 1 kHz 飞秒激光系统输出光路的频谱相位畸变,从而提高飞秒激光脉冲的时域强度衬比度,改善其光束质量。频谱相位补偿实验是在一台 1 kHz 掺钛蓝宝石飞秒激光系统输出光路中,针对超短脉冲光束通过传输介质后的频谱相位畸变,引入变形反射镜进行补偿。应用频谱相位干涉直接电场重构(SPIDER)方法和仪器作为测量手段,建立了一套相位测量补偿系统。实验结果表明用变形反射镜可使激光脉冲的相位畸变得得到较好的补偿,脉冲的光束质量得到改善。这种方法的主要思想就是将相位补偿转换为空间的光程控制,控制简单且损耗很低,是自适应光学中具有应用前景的一种补偿方法。

**关键词:** 自适应光学; 变形镜; 光谱相位干涉直接电场重构; 千赫兹飞秒激光

中图分类号: TN715.2 文献标识码: A

## Deformable Mirror Used for Spectral Phase Compensation in 1 kHz Ti:Sapphire Femtosecond Laser

Peng Hanlin Lin Lihuang Tang Bin Leng Yuxin Li Ruxin

(Key Laboratory for High Intensity Optics, Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics,  
The Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800)

**Abstract:** The authors demonstrated the spectral phase aberration compensation of a 1 kHz Ti:sapphire femtosecond laser system using a deformable mirror by stretching the spectrum of the laser beam. The authors set up a set of measurement and compensation system using a deformable mirror and a spectral phase interferometry for direct electric-field reconstruction (SPIDER) instrument in a 1 kHz Ti:sapphire femtosecond laser. The experimental result showed that the spectral phase aberration of the laser was compensated well and the beam quality was improved. It is a simple and efficient method in adaptive optics using the deformable mirror to compensate the spectral phase aberration.

**Key words:** adaptive optics; deformable mirror; SPIDER; kHz femtosecond laser

### 1 引 言

自激光发明以来,对激光束质量的研究一直是激光科学中一个很活跃的领域,并对激光科学和技术的发展起着十分重要的作用。对于宽带激光而言,光束质量改善的一个很重要的方面就是对其脉冲色散的补偿,其基本方法包括被动补偿和自适应光学补偿。被动补偿的方法主要是应用光栅对、棱镜对、啁啾镜或这几类的结合使用<sup>[1]</sup>。但是这种方法的一个普遍的缺陷就是调节太复杂,费用高。近

年来,人们都把目光转向于用变形反射镜(简称变形镜)来进行脉冲压缩和波前补偿<sup>[2,3]</sup>。变形镜是一种低损耗、高集成度的波形控制元件,其最大的优势就在于它的近似零损失和连续变化特性,而且易于控制,费用低。变形镜一般都被应用于对光束波面的补偿<sup>[2~6]</sup>,本文则主要从频谱相位的角度来补偿光束的相位畸变。在中国科学院上海光学精密机械研究所强光光学重点实验室的一台 1 kHz 掺钛蓝宝石飞秒激光器中,引入变形镜进行相位补偿,应用

作者简介: 朋汉林(1977~),男,安徽太湖人,中国科学院上海光学精密机械研究所博士研究生,主要从事太瓦级飞秒激光光束质量的改善和激光器升级方面的理论和实验研究。E-mail: hanlinpeng@mail.siom.ac.cn.

收稿日期: 2003-12-19; 收到修改稿日期: 2004-8-26

光谱相位干涉直接电场重构方法作为测量手段,建立了一套相位测量补偿系统。结果表明,应用变形镜对于激光脉冲的频谱相位畸变能得到较好的补偿,而且简单有效,具有广泛的应用前景。

## 2 变形镜

实验中所用的变形镜为微加工薄膜变形反射镜(Micromachined membrane deformable mirror, MMDM, 以下简称变形镜),其结构如图 1 所示,典型元件是一块以印刷电路板(PCB)为衬底的硅片,硅片上为镀金的氮化硅膜,同时作为反光膜,硅片下有驱动电极阵列。当驱动电极加上控制电压后,电极与膜之间产生静电吸引,从而改变反光膜的形状。由于变形镜表面的变形是连续的,所以它对波面的调制也是连续变化的。膜面的变形量由控制电压决定。每个驱动电极对膜面的变形都有影响,膜面的整体变形可以看成是所有驱动电极影响函数的线性组合。

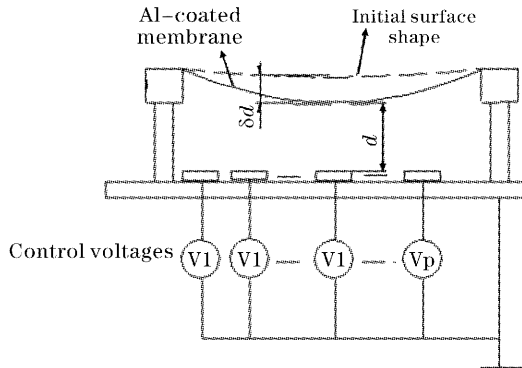


图 1 变形镜的结构示意图

Fig. 1 Structure of deformable mirror

微加工薄膜变形镜表面成一行线性排列着 19 个印刷的驱动电极,相应地将膜面划分为 19 个单元。如图 2 所示<sup>[6]</sup>。每两个驱动电极中心距离约为

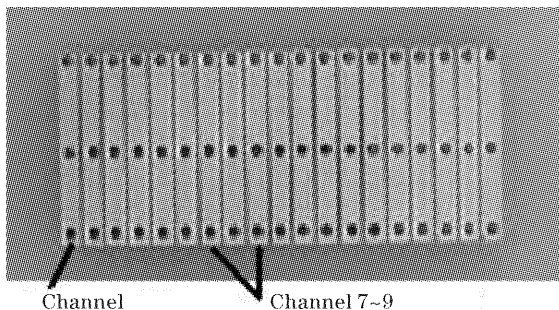


图 2 19 通道变形镜的驱动电极连接阵列

Fig. 2 Array of actuator connections of 19 channel MMDM

1.25 mm。尺寸 8 mm × 24 mm,最大变形量为 8 μm,对应于 40π 的相位变化(对于 800 nm)。这个相位补偿量对于多数的激光系统都是适用的。

## 3 光谱相位干涉直接电场重构方法

光谱相位干涉直接电场重构法(Spectral phase interferometry for direct electric-field reconstruction, SPIDER)原理如图 3 所示<sup>[5]</sup>,待测的脉冲进入装置后,首先被分束器分为两束,一束进入展宽器中展宽为啁啾脉冲,另一束经迈克耳孙干涉仪分为两个具有时间延迟的相同脉冲对。它们与另外一束的啁啾脉冲在 BBO 晶体中进行频率上转换。由于两脉冲在时间上的走离,在和频之后它们的中心频率就出现了微小的差别,这个频率差称为光谱剪裁或频率剪裁(Spectral shear)<sup>[6]</sup>。和频后的脉冲对经过光谱仪记录下光谱相干的干涉条纹,将干涉条纹输入到计算机中并用光谱相位干涉直接电场重构的反演算法处理就可以得到入射脉冲的相位。它克服了数据采集量大的缺点,仅需要一维的数据采集,而且基于傅里叶变换的算法也非常简单,适合进行脉冲相位的实时测量。光谱相位干涉直接电场重构方法能够给出超短脉冲的完整信息,包括脉冲频谱相位和时域强度方面的详细信息,以及脉冲的中心波长和脉冲宽度<sup>[8,9]</sup>。

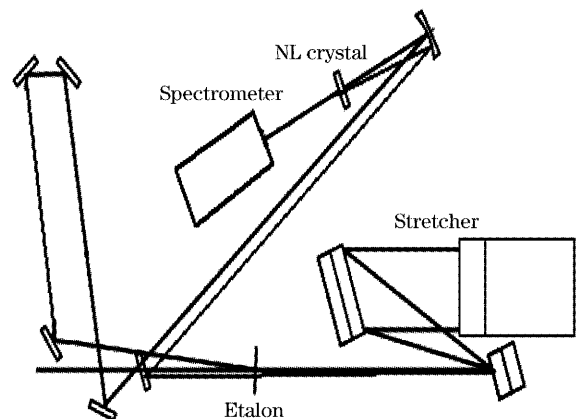


图 3 光谱相位干涉直接电场重构法的原理示意图

(其中展开器包含一对光栅和一个延迟变化的全反镜)

Fig. 3 The schematic of the SPIDER (The stretcher consists of a pair of gratings and a full reflective mirror with variable delay)

## 4 实验装置和实验原理

实验装置如图 4 所示,用一块 800 lp/mm 的闪

耀光栅和一块焦距为 35 mm 的凸透镜及变形镜建立了一个  $4f$  的零色散展宽器来实现相位整形, 变形镜被放置在透镜的傅里叶平面上。从 1 kHz 掺钛蓝宝石激光系统输出的约 80 fs 超短脉冲光满足光栅的闪耀角入射光栅表面, 被闪耀光栅散开, 发散光束经过凸透镜会聚成平行光, 光谱中不同的频率成分在空间展开, 投射到变形镜上。通过改变控制电极电压改变镜面面形, 使光束截面不同区域经变形镜反射后的光程不同, 进而改变变形区域内的频谱成分的相位。

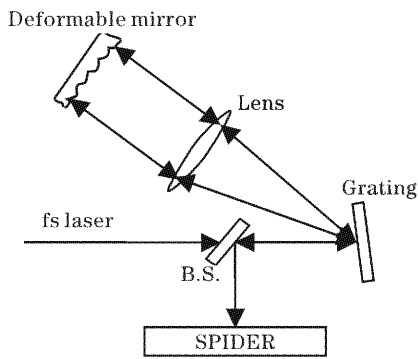


图 4 应用变形镜的实验装置图

Fig. 4 Experimental setup of deformable mirror

为了有效地控制变形镜的镜面变形量, 首先必须建立变形镜镜面变形量对电压的响应函数模型。为简便起见, 我们只研究镜面的第  $n$  单元在施加不同控制电压下的变形函数。根据文献[7], 变形镜镜面的变形量  $\delta d$  正比于施加电压  $V_n$  的平方, 即

$$\delta d \propto V_n^2, \quad (1)$$

镜面变形量对电压的这种二次方关系在我们的实验中也得到验证。我们可将变形镜的第  $n$  个驱动电极的控制信号表示为

$$c_n = V_n^2, \quad (2)$$

此控制信号导致的镜面影响函数因子设为  $\phi_n(x, y)$ , 则总的镜面变形量[即相对于初始镜面  $S_0(x, y)$  的改变量]为所有驱动电极的影响函数的线性组合。即

$$\Delta S(x, y) = \sum_{n=1}^p c_n \phi_n(x, y), \quad (3)$$

这里  $\Delta S(x, y) = S(x, y) - S_0(x, y)$ ,  $S(x, y)$  为施加控制信号后的镜面函数,  $p$  为总的控制电极数。应用泽尼克(Zernike)多项式原理, 我们可以将每一个影响函数  $\phi_n(x, y)$  ( $n = 1, 2, \dots, p$ ) 用泽尼克多项式表示。对于第  $n$  单元:

$$\phi_n(x, y) = \sum_{k=1}^M b_{kn} z_k(x, y), \quad (4)$$

其中  $b_{kn}$  表示在第  $n$  个控制电极施加电压后的  $k$  阶泽

尼克多项式系数。将(4)式代入(3)式, 得到

$$\begin{aligned} \Delta S(x, y) &= \sum_{n=1}^p c_n \left[ \sum_{k=1}^M b_{kn} z_k(x, y) \right] = \\ &= \sum_{k=1}^M \left( \sum_{n=1}^p c_n b_{kn} \right) z_k(x, y) = \\ &= \sum_{k=1}^M \alpha'_k z_k(x, y), \end{aligned} \quad (5)$$

这里我们定义了一个新的泽尼克系数  $\alpha'_k$  为

$$\alpha'_k = \sum_{n=1}^p c_n b_{kn}, \quad (k = 1, 2, \dots, M) \quad (6)$$

系数  $b_{kn}$  可以通过实验数据拟合得到。

镜面的变形量引起传输光程的变化, 进而改变光束截面的空间相位, 相位改变量可以用下式表示:

$$\phi = 4\pi \Delta S / \lambda, \quad (7)$$

对于波长 800 nm 的光来说,  $4 \mu\text{m}$  的变形可以产生最大  $20\pi$  的相位变化。

## 5 结果和讨论

在图 4 所示的实验装置中先用平面镜代替光路中的变形镜, 将光路调整到零色散, 用光谱相位干涉直接电场重构法测量下这时的相位, 作为参考的标准相位。然后在平面镜的位置换上变形镜, 测量各驱动电极电压为零时的相位, 并将其设为本底相位。接着, 依次在每个驱动电极上施加从 0 V 到 200 V 变化的控制电压, 同时保持其余控制电极上的驱动电压为零。每次测到的相位与本底相位之差值即是该驱动电极在该电压下的响应。测得所有 19 个驱动电极在不同控制电压下的响应后, 通过计算就可以得到(6)式中的各系数项  $b_{kn}$ , 进而就能利用这个结果进行相位补偿。

图 5 显示了对第 1 个和第 7~9 个控制电极施加不同控制电压时由光谱相位干涉直接电场重构仪器测得的相位变化。从图中可以明显看出: 在单个电极施加不同控制电压, 相位变化随控制电压增加而增大; 在多个电极施加电压时, 脉冲的频谱相位也有明显的变化, 但由于累积作用, 相对于对单个电极施加电压时要复杂得多。综合这两幅图, 可以得出结论: 此变形镜对脉冲相位有明显的整形作用。而通过实验得到的结果, 结合泽尼克多项式理论, 完全可以求得变形镜膜面变形量与控制电压之间的函数关系, 进而得出脉冲相位与控制电压的函数关系, 这些都是进行相位补偿的依据, 也是为将来利用计算机进行闭环反馈控制所必需的程序参量。

应用变形镜来补偿 1 kHz 飞秒激光通过传输介

质后的频谱相位畸变,可以提高激光束的光束质量。根据光谱相位干涉直接电场重构的测量结果,给变形镜的各个控制电极施加适当的控制电压来补偿频谱相位畸变。图 6(a)和图 6(b)分别从频谱相位和脉冲强度方面给出了脉冲经过变形镜整形前后的效果。如图 6(a)所示,脉冲经过 1 kHz 激光系统的放大器后,由于在光路中经过了许多光学元件,因此可以从频谱相位中看出高阶色散。在时域图 6(b)中,可以明显地看到脉冲主峰附近伴随有旁瓣,其中最强的旁瓣强度接近脉冲主峰的 25%,因此大大降低了脉冲的衬比度。我们给 19 个驱动电极施加适当的控制电压来改变相位,得到了比较平坦的频谱相

位分布。在整个频谱范围内相位的峰-谷值在 1 rad 之内。相比未施加控制电压时的相位,最大的相位变化量超过 4 rad。原来 1 kHz 系统输出脉冲时域强度上的旁瓣被抑制了很多。变形镜对脉冲的整形实际上是重新分布了脉冲的频谱成分,将旁瓣中的能量转移到主瓣中。它不像某些被动整形方法,只是单纯的将不需要或不理想的成分过滤掉,这样的结果往往带来脉冲能量损失和脉冲的衬比度下降。我们可以说,变形镜是一种低损耗的脉冲整形元件。此外,虽然实验是在 1 kHz 飞秒激光系统输出光路中进行的,但变形镜对脉冲的频谱相位补偿对其他频率范围(从几赫兹到几兆赫兹)同样适用。

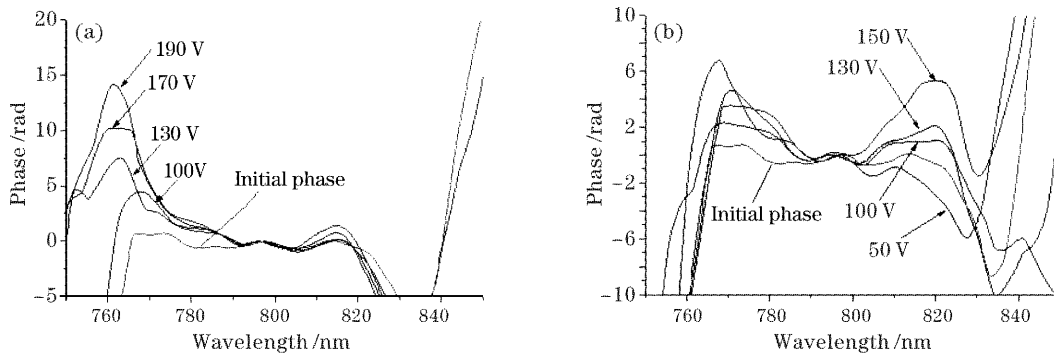


图 5 施加不同电压到变形镜通道 1(a)和通道 7~9(b)引起的相位变化

Fig. 5 Phase change due to different voltages applied to channels 1 (a) and 7~9 (b) of the MMDM

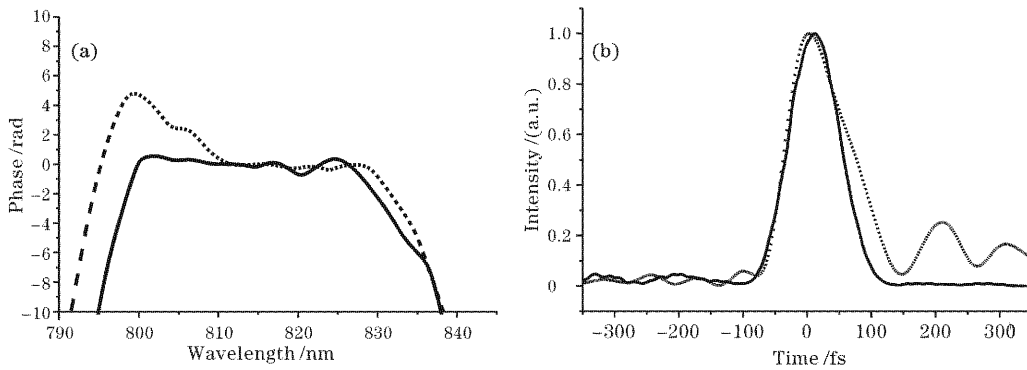


图 6 (a)应用变形镜的频谱相位校正。虚线表示脉冲传输过程中未校正的相位,实线表示校正后的相位,

(b)应用变形镜的时域强度校正。虚线表示脉冲传输过程中未校正的强度,实线表示校正后的强度

Fig. 6 (a) Spectral phase correction by using MMDM. The dashed line is the phase of the pulse propagating through the media, the solid line is the corrected phase, (b) temporal intensity correction by using MMDM. The dashed line is the intensity of the pulse propagating through the media. The solid line is the corrected intensity

在实验中,仍然有很大一部分频谱相位未能补偿。最大的原因是因为我们目前是采用手动补偿,而并没有采用计算机实现闭环反馈控制,关于这点将在今后进一步完善。其次,我们在实验中使用的是薄透镜而非反射镜,也会引入一定的相位畸变。

再者,在非真空的情况下用光谱相位干涉直接电场重构测量,光场的波动也会有一定的影响。

综上所述,我们用一块变形镜进行频谱相位校正的方法,得到了满意的结果。这种方法的主要思想就是将相位补偿转换为空间的光程控制,由于空

间的特性总是比较容易控制些,因此这种方法具有相当的发展前景,变形镜方法将会是自适应光学中补偿频谱相位的一种有效手段。

### 参 考 文 献

- 1 R. L. Fork, C. H. Brito cruz, P. C. Becher *et al.*. Compression of optical pulses to six femtoseconds by using cubic phase compensation[J]. *Opt. Lett.*, 1987, **12**(7): 483~485
- 2 E. Zeek, K. Maginnis, S. Backus *et al.*. Pulse compression by use of deformable mirrors[J]. *Opt. Lett.*, 1999, **24**(7): 493~495
- 3 H. M. Dyson, R. M. Sharples, N. A. Dipper *et al.*. Cryogenic wavefront correction using membrane deformable mirrors [J]. *Opt. Exp.*, 2001, **8**(1): 17~26
- 4 J. Queneuille, F. Druon, A. Maksimchuk *et al.*. Second-harmonic generation and wave-front correction of a terawatt laser system[J]. *Opt. Lett.*, 2000, **25**(7): 508~510
- 5 H. Baumhacker, G. Pretzler, K. J. Witte *et al.*. Correction of streng phaser and amplitude modulations by two deformable mirrors in a multistaged Ti:sapphire laser[J]. *Opt. Lett.*, 2002, **27**(17): 1570~1572
- 6 Lijun Zhu, Pang-chen Sun, Dirk-Uwe Bartsch *et al.*. Adaptive control of a micromachined continuous-membrane deformable mirror for aberration compensation[J]. *Appl. Opt.*, 1999, **38**(1): 168~176
- 7 C. Iaconis, I. A. Walmsley. Spectral phase interferometry for direct electric-field reconstruction of ultrashort optical pulses[J]. *Opt. Lett.*, 1998, **23**(10): 792~794
- 8 Chuan Ye, Wang Xintao, Xu Hongwei *et al.*. Characterization of the output of 15 TW/35 fs intense laser system by using the method of SPIDER[J]. *Chin. J. Lasers*, 2003, **30**(1): 65~67 (in Chinese)  
    钽 晔,王兴涛,徐宏玮等. 用 SPIDER 法测量 15 TW/35 fs 强激光系统的脉冲输出特性[J]. *中国激光*, 2003, **30**(1): 65~67
- 9 Chai Lu, Gao Feng, Wang Qingyue *et al.*. Numerical experiment and analysis for characterizing femtosecond pulses by SPIDER[J]. *Chin. J. Lasers*, 2002, **A29**(8): 739~742 (in Chinese)  
    柴 路,高 峰,王清月等. 飞秒激光光谱位相干涉仪的数值模拟与分析[J]. *中国激光*, 2002, **A29**(8): 739~742