

超快激光抽运-探测中探针光时间延迟量的实时测量原理与光学设计*

贺雪鹏 刘院省 刘世炳[†]

(北京工业大学激光工程研究院, 北京 100124)

(2010年3月3日收到; 2010年4月28日收到修改稿)

为了在飞秒激光抽运-探测(pump-probe)的超快测量中对探针光时间延迟量进行实时检测与有效控制,提出了一种四路同步移相干涉的光学测量系统.应用琼斯理论对该光学测量系统进行了优化设计与计算,推导出同步移相干涉系统各帧干涉图相应点的光强表达式,确定了相邻干涉图之间的相移步长,并给出了相位延迟量测量的解析表达式.最后,对光学系统在检测中可能存在的误差进行了计算分析,结果表明,系统的设计不仅能满足超快 pump-probe 精度的基本要求,而且优于目前同步移相干涉测量的光学设计,对于 800 nm 中心波长的探针光在理论上可达阿秒级的时间分辨率.

关键词: 超快抽运-探测, 时间延迟量, 同步移相干涉, 琼斯矩阵

PACS: 42.65.Re, 42.87.Bg, 64.75.Gh

1. 引言

近 30 年来,随着激光脉冲技术的飞速发展,尤其是飞秒激光技术的日趋成熟,超短激光脉冲被广泛应用于物理、化学、生物、医药等领域,并逐渐形成了飞秒化学、飞秒物理学等诸多交叉学科^[1-5].作为研究超快动力学过程的时间分辨技术,超短脉冲抽运-探测(pump-probe)技术^[6-9]被广泛应用于各种超快过程的瞬时检测与诊断,如原子价电子的电离、化学键的断裂与生成^[10-12]等,已成为诸多超快过程中进行时间分辨测量的重要方法.通常, pump-probe 过程中的时间分辨步长(time delay),即 pump 光与 probe 光之间的时间间隔,是通过精密移动台的空间运动使两束光产生一定的光程差从而导致 probe 光的时间延迟来实现的,实验中基本上是采用商品化的时间延迟线来实现.但是,两束光在测量点的真实的时间延迟量并非由延迟线引起的光程差惟一决定,复杂光路的光学器件及其空间分布造成的光程差常常可与延迟线相比较,所以 pump 光和 probe 光在测量点的实际时间间隔变得无法准确掌握,从而无法保证超快过程的时间分辨精度,更

无法对超快过程进行准确控制.为此,我们提出一种同步移相干涉的测量系统,在紧邻测量点进行实时测量和控制 pump-probe 脉冲的时间延迟量,不仅可实时地准确了解 pump 光与 probe 光到达测量点的时间差,还能进行测量过程中的实时调节控制.

传统的同步移相干涉的测量原理^[13-18]是利用介质偏振分光技术,通过偏振分光在空间产生一组移相步长恒定的干涉图,并由四个相同的 CCD 同步分别采集四帧移相干涉图,实现同步移相干涉测量.由于所有的干涉图都是瞬间采集的,故可弥补干涉系统在进行振动补偿时缺乏实时性的弊端.因此,近几年来应用同步移相干涉技术的测量原理与方法开始受到关注,有可能成为将来抗震光学测量技术的发展趋势.本文根据飞秒激光 pump-probe 方法在超快测量中的需要,设计了一种新颖的可瞬间采集四幅干涉图的同步移相干涉测量系统,应用偏振的琼斯矩阵理论对系统中偏振器件组成的复杂光路进行了计算分析,推导出了各帧干涉图的光强表达式,获得了四幅干涉图之间的移相步长以及相位延迟量测量的解析表达式.与已有的同步移相干涉光路的设计相比,本系统在进行分光的同时可实现移相,避免了进行主动移相引起的测量误差.最

* 国家自然科学基金(批准号:10974010)和北京市教委科技创新平台(批准号:1010005466903)资助的课题.

[†] 通讯联系人. E-mail: sbliu@bjut.edu.cn

后,我们对光学测量系统在检测中可能存在的误差进行了细致的计算分析,结果表明,系统的设计不仅满足超快激光 pump-probe 的误差要求,而且优于目前同步移相干涉测量的光学设计,可用于超快激光 pump-probe 中对探针光时间延迟量的实时测量和有效控制.

2. 同步移相干涉测量系统的光学设计

测量系统的光路设计如图 1 所示. 偏振方向与水平轴成 45° 角的超短激光脉冲经分束棱镜 SP1 分为两束(能量比值通过更换 SP1 棱镜进行调节),其中能量较大的一束经全反射镜 HR1 反射后作为 pump 脉冲用于超快物理/化学过程的相互作用;另一束经全反射镜 HR2—5 反射后作为 probe 脉冲在超快过程中起探针作用,探测相关物理量的瞬态变化信息. 全反射镜 HR4, HR5 固定在延迟线上,通过改变延迟线的空间位置(光程)以调节 pump 脉冲与 probe 脉冲之间的时间延迟量,起检测和控制两束脉冲间时间延迟量的作用. 反射镜 HR6, HR7 分别从 probe

光和 pump 光中取出部分能量(通过选取 HR6, HR7 合适的反射率,使取出的 probe 光和 pump 光强度一致),进行脉冲间时间间隔的在线实时测量. 时间延迟的检测单元由全反镜 HR8, $\lambda/4$ 波片 QWP1, 半透半反分束棱镜 SP2, 直角全反镜 RL1—3, 偏振分束棱镜 PBS1—2, 带通滤波片 BF1—4, 面阵光电探测器 DT1—4 组成. HR6, HR7 取出的线偏振 probe 光和 pump 光,分别经快轴方向在水平轴的 $\lambda/4$ 波片 QWP1 和全反镜 HR8 反射后,进入分束棱镜 SP2,被分为能量相等的两束光. 棱镜 SP2 反射的线偏振 pump 光与透射的圆偏振 probe 光进入偏振分束棱镜 PBS1,分别被分为偏振相互垂直的两束线偏振光;棱镜 SP2 透射的 pump 光与反射的 probe 光,经直角全反镜 RL1 反射后,进入偏振分束棱镜 PBS2,也分别被分为偏振相互垂直的两束线偏振光. PBS1 反射的 pump 光和 probe 光,经直角全反镜 RL2 反射后,通过带通滤波片 BF1 形成干涉图像,再由面阵光电探测器 DT1 进行探测和记录;透过 PBS1 的 pump 光和 probe 光,通过带通滤波片 BF2 形成的干涉图像由探测器 DT2 记录. PBS2 反射的 pump 光和

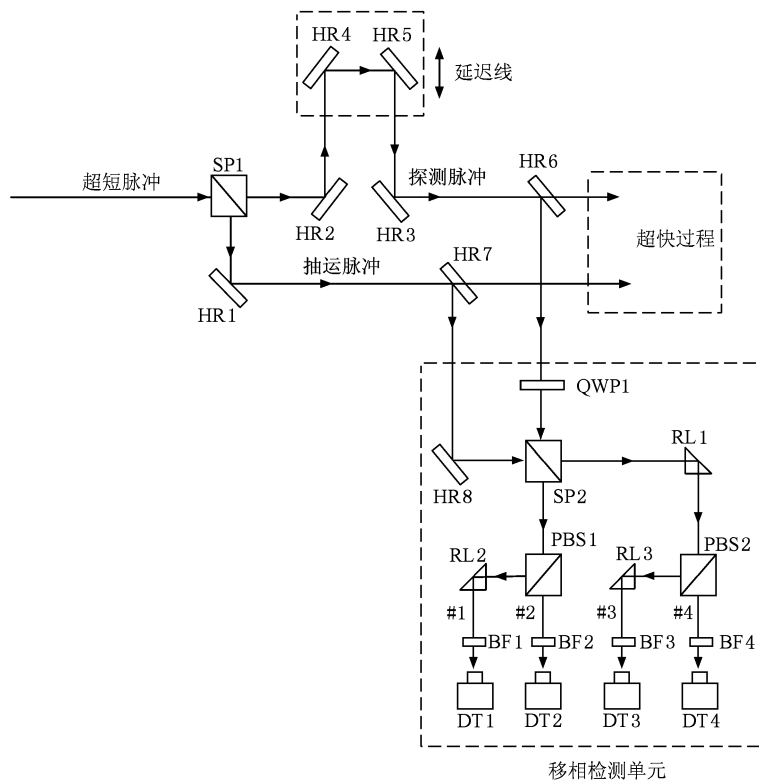


图 1 超快 pump-probe 脉冲间的时间间隔在线测量示意图 SP1, SP2: 分束棱镜; PBS1, PBS2: 偏振分束棱镜; QWP1: $\lambda/4$ 波片; BF1—BF4: 带通滤波片; DT1—DT4: 面阵光电探测器; RL1—RL3: 直角全反镜; HR1—HR5, HR8: 全反镜; HR6, HR7: 部分反射镜

probe 光,经直角全反镜 RL3 反射后,通过带通滤波片 BF3 形成的干涉图像由 DT3 采集;而透过 PBS2 的 pump 光和 probe 光,通过带通滤波片 BF4 形成的干涉图像由探测器 DT4 记录.

3. 同步移相测量光路的计算

同步移相测量光路如图 2 所示. 假定激光传播方向为 Z 轴, X - Y 平面垂直于 Z 轴,且 X 轴处于纸平面内,建立直角坐标系 XYZ . 利用琼斯矩阵方法^[19-23],对同步移相测量光路进行计算.

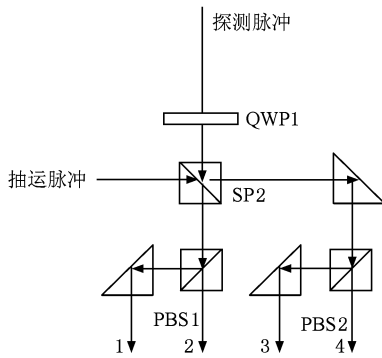


图 2 同步移相干涉测量光路

选取合适反射率的反射镜 HR6,HR7,使得取出的 probe 光和 Pump 光强度相同,设其振幅为常数 A ,且相对于 pump 光,probe 光携带由延迟线引起的移相相位 $\varphi(x,y)$. 考虑到激光的振动方向与 X 轴成 45° 夹角,pump 光和 probe 光可利用琼斯矩阵描述如下:

$$\mathbf{S}_{\text{probe}} = \frac{A}{\sqrt{2}} e^{i\varphi} \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \end{bmatrix}, \quad (1)$$

$$\mathbf{S}_{\text{pump}} = \frac{A}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \end{bmatrix}. \quad (2)$$

由于分束棱镜 SP2 上下界面之间折射率不同,从下界面入射的 pump 光在进行反射时存在半波损失,故分束棱镜 SP2 对 pump 光和 probe 光的反射矩阵不同,但对两束光的透射矩阵一样.

$$\mathbf{R}_{\text{SP2上}} = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix},$$

$$\mathbf{R}_{\text{SP2下}} = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} -1 & 0 \\ 0 & -1 \end{bmatrix}, \quad (3)$$

$$\mathbf{T}_{\text{SP2}} = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}. \quad (4)$$

光路中 $\lambda/4$ 波片的快轴在 X 方向,其对 probe

光的调制矩阵如下

$$\mathbf{G}_{\lambda/4} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & e^{i\pi/2} \end{bmatrix}. \quad (5)$$

偏振分光镜 PBS1 的透射光(电矢量平行于 X 轴)和反射光(电矢量平行于 Y 轴)的琼斯矩阵为

$$\mathbf{T}_{\text{PBS1}} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}, \mathbf{R}_{\text{PBS1}} = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}. \quad (6)$$

Pump 光和 probe 光在光路 1 的叠加场强振幅 E_1 如下

$$\begin{aligned} E_1 &= \mathbf{R}_{\text{PBS1}} \cdot \mathbf{R}_{\text{SP2下}} \cdot \mathbf{S}_{\text{pump}} + \mathbf{R}_{\text{PBS1}} \cdot \mathbf{T}_{\text{SP2}} \cdot \mathbf{G}_{\lambda/4} \cdot \mathbf{S}_{\text{probe}} \\ &= \frac{A}{2} \begin{bmatrix} 0 \\ -1 + e^{i(\frac{\pi}{2} + \varphi)} \end{bmatrix}. \end{aligned} \quad (7)$$

因此,光路 1 中 pump 光和 probe 光的干涉强度 I_1 可表述如下

$$\begin{aligned} I_1 &= E_1^\dagger \cdot E_1 = \frac{A^2}{4} \cdot 2 \cdot \left[1 - \cos\left(\frac{\pi}{2} + \varphi\right) \right] \\ &= \frac{I_0}{2} (1 + \sin\varphi), \end{aligned} \quad (8)$$

其中,常数 $I_0 = A^2$ 为 pump 光和 probe 光干涉强度极大值.

同理,计算得到光路 2,光路 3,光路 4 的干涉光强 I_2, I_3, I_4 如下:

$$I_2 = \frac{I_0}{2} [1 - \cos\varphi], \quad (9)$$

$$I_3 = \frac{I_0}{2} [1 - \sin\varphi], \quad (10)$$

$$I_4 = \frac{I_0}{2} [1 - \cos\varphi]. \quad (11)$$

利用(8)–(11)式计算得到 pump 光和 probe 光的相位差 $\varphi(x,y)$ 的表达式

$$\varphi = \arctan \frac{I_1 - I_3}{I_4 - I_2}. \quad (12)$$

由以上计算可知,通过测量四幅相差 90° 的干涉图的光强值 I_1, I_2, I_3, I_4 ,便可利用(12)式计算出 pump 光和 probe 光之间的延迟相位 $\varphi(x,y)$. 需要指出的是,由(12)式计算获得的延迟相位值只能是位于主值区间 $[-\pi/2, \pi/2]$ 内,而只在一个主值区间内 probe 光能产生的时间延迟量十分有限,无法满足实际应用的需要. 因此,在实际的测量系统中还需通过相位主值标定 (scaling) 来扩展时间延迟量的测量范围,即确定延迟相位 $\varphi(x,y)$ 在 $[0, \pi/2]$ 内所对应的延迟时间 $\tau_{0,\pi/2}$ 和延迟线长度 $L_{0,\pi/2}$,如图 3. 测量时,通过改变延迟线长度 $L (\propto L_{0,\pi/2})$ 来获得或控制 pump 脉冲与 probe 脉冲之间的时间延迟量.

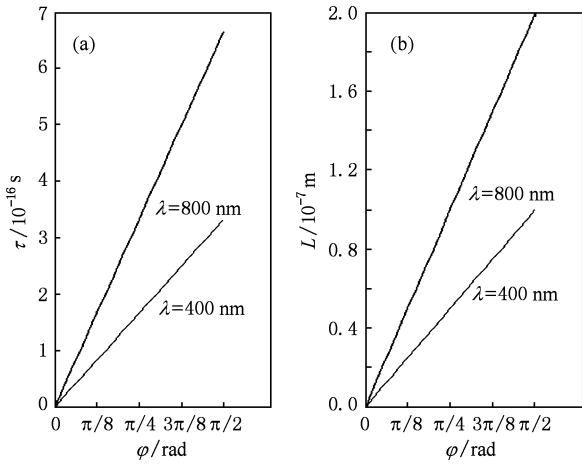


图3 延迟相位 φ 与延迟线延迟时间 τ 和延迟线延迟距离 L 的关系 (a) 延迟时间关系, (b) 延迟距离关系

4. 误差分析

(12) 式是理想情况下的推导结果, 但事实上所有因素都有可能存在误差, 因此有必要对可能造成实验误差的因素进行误差分析^[19]. 实验误差可能来自波片 QWP1 的相位延迟误差、方位角误差, 以及分束棱镜 SP2, PBS1 和 PBS2 的质量误差. 这些误差均能直接影响到光强 I_1, I_2, I_3, I_4 的强度, 并最终影响到 (12) 式计算出的 pump 光和 probe 光间的延迟相位 $\varphi(x, y)$ 的精确度. 因此, 深入分析这些误差对有效消除或减小延迟相位 $\varphi(x, y)$ 的误差是十分必要的.

4.1. $\lambda/4$ 波片的相位延迟误差

理想 $\lambda/4$ 波片的相位延迟量为 $\pi/2$, 但受制于波片的加工精度、镀膜质量等各种因素, 实验中波片会存在一定的相位延迟误差, 假设为 $\delta_{\lambda/4}$, 则 $\lambda/4$ 波片的实际相位延迟量为 $\pi/2 + \delta_{\lambda/4}$. 因此, 实验中 $\lambda/4$ 波片 $G_{\lambda/4}$ 的琼斯矩阵应表述为

$$G_{\lambda/4} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & e^{i(\frac{\pi}{2} + \delta_{\lambda/4})} \end{bmatrix}. \quad (13)$$

通过重新计算, 可得到光路 1, 光路 2, 光路 3 和光路 4 新的光强表达式如下:

$$I'_1 = \frac{I_0}{4}(1 + \sin(\varphi + \delta_{\lambda/4})), \quad (14)$$

$$I'_2 = \frac{I_0}{4}(1 + \cos\varphi), \quad (15)$$

$$I'_3 = \frac{I_0}{4}(1 - \sin(\varphi + \delta_{\lambda/4})), \quad (16)$$

$$I'_4 = \frac{I_0}{4}(1 + \cos\varphi). \quad (17)$$

因此, $\lambda/4$ 波片相位延迟导致的测量误差 $\Delta\varphi$ 如下

$$\Delta\varphi = \varphi' - \varphi \approx \tan(\Delta\varphi) = \frac{\sin 2\varphi(\cos\delta_{\lambda/4} - 1) + \cos 2\varphi \cdot \sin\delta_{\lambda/4} + \sin\delta_{\lambda/4}}{\sin 2\varphi \cdot \sin\delta_{\lambda/4} + \cos 2\varphi(1 - \cos\delta_{\lambda/4}) + (1 + \cos\delta_{\lambda/4})}. \quad (18)$$

实验中, $\lambda/4$ 波片的相位延迟误差通常在 2° (即 $\pi/90$) 以下. 图 4 给出了相位延迟误差分别为 1° 和 2° 时, 测量误差 $\Delta\varphi$ 与 φ 的函数关系. 可以看出, 给定相位延迟误差 $\delta_{\lambda/4}$ 时, 测量误差 $\Delta\varphi$ 随 pump 光和 probe 光间延迟相位 φ 呈周期性变化趋势, 且其最大值随 $\delta_{\lambda/4}$ 的增加而变大. 当 $\delta_{\lambda/4}$ 为 2° 时, $\Delta\varphi$ 的最大值为 0.035.

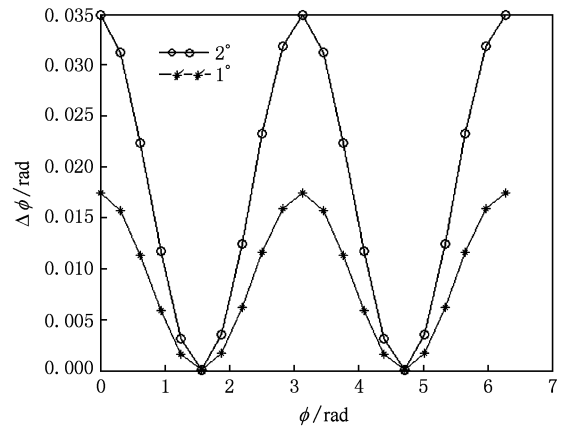


图4 $\lambda/4$ 波片相位延迟 1° 和 2° 时的测量误差

4.2. $\lambda/4$ 波片的方位角误差

理想情况下, $\lambda/4$ 波片的快轴与水平方向应成 0° 角, 但受机械装置调节精度的限制, 实验中其快轴与水平方向会出现小的夹角, 设其为 θ . 因此, 实验中 $\lambda/4$ 波片 $G_{\lambda/4}$ 的琼斯矩阵应重新表述为

$$G_{\lambda/4} = \begin{bmatrix} \cos^2\theta + \sin^2\theta \cdot e^{i\frac{\pi}{2}} & \sin\theta\cos\theta - \sin\theta\cos\theta \cdot e^{i\frac{\pi}{2}} \\ \sin\theta\cos\theta - \sin\theta\cos\theta \cdot e^{i\frac{\pi}{2}} & \sin^2\theta + \cos^2\theta \cdot e^{i\frac{\pi}{2}} \end{bmatrix}. \quad (19)$$

重新计算光路 1, 光路 2, 光路 3 和光路 4 的光强, 得到 $\lambda/4$ 波片方位角偏差导致的测量误差 $\Delta\varphi$ 如下

$$\begin{aligned} \Delta\varphi &= \varphi'' - \varphi \approx \tan(\Delta\varphi) \\ &= \frac{\tan\varphi'' - \tan\varphi}{1 + \tan\varphi''\tan\varphi} \\ &= \frac{\cos 2\varphi(1 - \cos 2\theta)}{\sin 2\varphi(1 - \cos 2\theta) + 1 + \cos 2\theta}. \end{aligned} \quad (20)$$

图5示出了 θ 为 1° 和 2° 时,测量误差 $\Delta\varphi$ 随测量相位 φ 的变化.对于给定的 $\lambda/4$ 波片方位角偏差,测量误差 $\Delta\varphi$ 随pump光和probe光间延迟相位 φ 也呈周期性变化趋势,且其最大值随 θ 的增加而增加.当偏差角 $\theta = 2^\circ$ 时,测量误差的最大值为0.0015.可见, $\lambda/4$ 波片方位角偏差对测量误差 $\Delta\varphi$ 的影响远远小于 $\lambda/4$ 波片的相位延迟引起的误差.

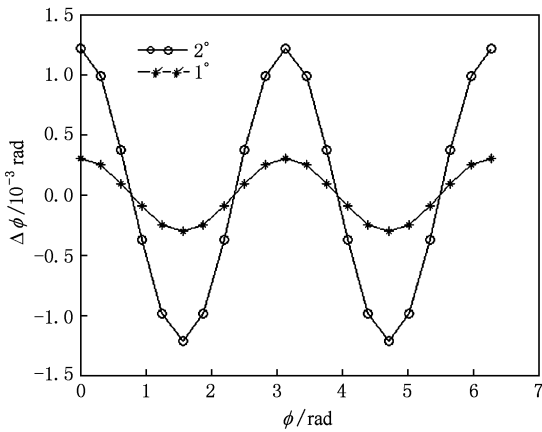


图5 波片方位角为 1° 和 2° 时的测量误差

4.3. 棱镜的质量误差

4.3.1. 分束棱镜 SP2

理想情况下,分束棱镜 SP2 对反射光和透射光分光比例应为 1:1,但受晶体加工精度、镀膜质量的限制,通常反射强度和透射强度之比会是一个常数 α .则分束棱镜 SP2 的透射矩阵重新表述为

$$T_{SP2} = \frac{\alpha}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}. \quad (21)$$

重新计算光路 1,光路 2,光路 3 和光路 4 的光强,得到分束棱镜 SP2 的质量误差导致的测量误差 $\Delta\varphi = 0$.因此,只要保证取出的 pump 光和 probe 光强度相等,分束棱镜 SP2 质量误差就不会对 pump 光和 probe 光间延迟相位 φ 的测量带来影响.

4.3.2. 偏振分光棱镜 PBS1 和 PBS2

理想状态下,偏振分光棱镜 PBS1 和 PBS2 会对 s 光(振动光矢量平行于棱镜镀膜层面)全反射,p 光(振动光矢量垂直于棱镜镀膜层面)全透射.但实际上,由于受晶体加工精度、镀膜质量影响,偏振分

光棱镜会对 s 光和 p 光都有一定的反射和透射.设 PBS1 对 p 光和 s 光的反射和透射系数分别为 $r_{1p}, r_{1s}, t_{1p}, t_{1s}$, PBS2 对 p 光和 s 光的反射和透射系数分别为 $r_{2p}, r_{2s}, t_{2p}, t_{2s}$.则有

$$R_{PBS1} = \begin{bmatrix} r_{1p} & 0 \\ 0 & r_{1s} \end{bmatrix} \quad T_{PBS1} = \begin{bmatrix} t_{1p} & 0 \\ 0 & t_{1s} \end{bmatrix}, \quad (22)$$

$$R_{PBS2} = \begin{bmatrix} r_{2p} & 0 \\ 0 & r_{2s} \end{bmatrix} \quad T_{PBS2} = \begin{bmatrix} t_{2p} & 0 \\ 0 & t_{2s} \end{bmatrix}. \quad (23)$$

通常偏振分光棱镜对 p 光的反射率在 3% 以下,即 $r_p^2 \leq 0.03$,对 s 光的透射率低于 0.5%,即 $t_s^2 \leq 0.005$.对于完全相同的 PBS1, PBS2,其反射系数和透射系数可取的最大值如下: $r_{1p}^2 = r_{2p}^2 = 0.03, t_{1s}^2 = t_{2s}^2 = 0.005$.

因此,偏振分光棱镜 PBS1 和 PBS2 的质量误差导致的测量误差 $\Delta\varphi$ 的表达式如下

$$\Delta\varphi = \frac{4\sin 2\varphi - 6\cos 2\varphi - 4}{194\cos 2\varphi + 4\sin 2\varphi - 4}. \quad (24)$$

图6给出了偏振分光棱镜质量误差导致的测量误差 $\Delta\varphi$ 与测量相位 φ 的关系.可以看出,测量误差 $\Delta\varphi$ 随pump光和probe光间延迟相位 φ 也呈周期性变化趋势,且其最大值为0.035.

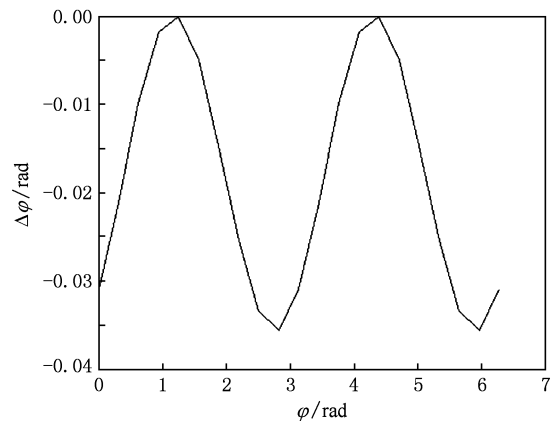


图6 偏振分光棱镜的质量误差对于干涉测量的影响

综上所述,偏振分光棱镜的质量、 $\lambda/4$ 波片的相位延迟、方位角偏差都会给测量结果 φ 带来误差,并且测量误差 $\Delta\varphi$ 与测量相位 φ 都呈周期性变化的关系.偏振分光棱镜的质量给测量结果 φ 带来的影响最大,其误差量可达到0.057; $\lambda/4$ 波片的相位延迟带来的测量误差相对较小,最大误差量为0.035;而 $\lambda/4$ 波片方位角偏差带来的误差几乎可以忽略,最大为0.0015.通常情况下,分束棱镜 SP2 的质量误差不会影响测量结果,因此,测量系统的

整体误差约为 0.04。例如,我们采用的是 Sigma 公司的时间延迟线(型号:SFS-H60XYZ(CL)),其分辨率为 10 nm,对应的时间分辨率为 33 as;目前普遍采用的飞秒激光器其中心波长为 800 nm,而本测量系统计算得出的最小时间分辨约为 16.9 as,远比时间延迟线的分辨率高,所以完全能够满足超快激光 pump-probe 中对探针光时间延迟量的实时精确测量和有效控制。

5. 结 论

本文提出了一种超快激光 pump-probe 中对探针光时间延迟量的在线测量原理,应用同步移相方

法可同时获得相移步长为 $\pi/2$ 的四帧干涉图。利用琼斯矩阵理论计算了四幅干涉图所获得的干涉光强与延迟相位的关系,得出了探针光相位延迟量的测量表达式。最后分析并计算了各种可能的误差源对测量结果的影响,理论上测量系统的时间分辨误差约为 16.9 as。

本文设计的同步移相干涉测量系统的优点在于分光与移相同时进行,避免了分光和移相分离进行所带来的额外测量误差、抗震性能减弱等问题。同时,该系统光学器件数目较同类检测系统少,可有效降低光学器件色散所造成的测量上的附加误差,这对于精度要求很高的飞秒激光 pump-probe 的超快测量是极为有利的。

- [1] Zewail A H 2000 *J. Phys. Chem. A* **104** 5660
- [2] Long Y B, Zhang J, Wang G P 2009 *Acta Phys. Sin.* **58** 7722 (in Chinese) [龙拥兵、张 剑、汪国平 2009 物理学报 **58** 7722]
- [3] Zewail A H 2000 *Pure Appl. Chem.* **72** 2219
- [4] Cheng C F, Wang X F, Lu B 2004 *Acta Phys. Sin.* **53** 1826 (in Chinese) [成纯富、王晓方、鲁 波 2004 物理学报 **53** 1826]
- [5] Zhao X H, Ma F, Wu Y S, Ai X C, Zhang J P 2008 *Acta Phys. Sin.* **57** 298 (in Chinese) [赵晓辉、马 菲、吴义室、艾希成、张建平 2008 物理学报 **57** 298]
- [6] Dantus M, Rosker M J, Zewail A H 1987 *J. Chem. Phys.* **87** 2395
- [7] Wang Y M, Shen H, Hua L Q, Hu C J, Zhang B 2009 *Opt. Express* **17** 10506
- [8] Yang H, Zhang T Q, Wang S F, Gong Q H 2000 *Acta Phys. Sin.* **49** 1292 (in Chinese) [杨 宏、张铁桥、王树峰、龚旗煌 2000 物理学报 **49** 1292]
- [9] Li Z, Zhang J S, Yang J, Gong Q H 2007 *Acta Phys. Sin.* **56** 3630 (in Chinese) [李 智、张家森、杨 景、龚旗煌 2007 物理学报 **56** 3630]
- [10] Yasuki A, Kazuo T, Wang K, Vincent M 2003 *J. Chem. Phys.* **119** 7913
- [11] Zadayan R, Li Z, Martens C C, Apkarian V A 1994 *J. Chem. Phys.* **101** 6648
- [12] Li H Y, Zhao K, Pan R Q, Sun Y H, Wang C K 2005 *Acta Phys. Sin.* **54** 2072 (in Chinese) [李洪玉、赵 珂、潘瑞芹、孙元红、王传奎 2005 物理学报 **54** 2072]
- [13] Koliopoulos C L 1991 *Proc. SPIE* **1531** 119
- [14] Smythe R, Moore R 1984 *Opt. Eng.* **23** 361
- [15] Zhang C M, Zhu L Y 2010 *Acta Phys. Sin.* **59** 989 (in Chinese) [张淳民、朱兰艳 2010 物理学报 **59** 989]
- [16] Hettwer A, Kranz J, Schwider J 2000 *Opt. Eng.* **39** 960
- [17] Kranz J, Lamprecht J, Hettwer A, Johannes S 1998 *Proc. SPIE* **3407** 328
- [18] Jian X H, Zhang C M, Zhao B C 2007 *Acta Phys. Sin.* **56** 824 (in Chinese) [简小华、张淳民、赵葆常 2007 物理学报 **56** 824]
- [19] Zuo F, Chen L, Xu C 2007 *Chin. J. Lasers* **34** 1682 (in Chinese) [左 芬、陈 磊、徐 晨 2007 中国激光 **34** 1682]
- [20] Liang Q T 1986 *Physical Optics* (Beijing: China Machine Press) p323 (in Chinese) [梁铨廷 1986 物理光学(北京:机械工业出版社)第 323 页]
- [21] Su D T 1996 *Optical Testing Technology* (Beijing: Beijing Institute of Technology Press) p188 (in Chinese) [苏大图 1996 光学测试技术(北京:北京理工学院出版社)第 188 页]
- [22] Greco V, Molesini G, Quercioli F 1994 *Rev. Sci. Instrum.* **66** 3729
- [23] Gao P, Yao B L, Han J H, Chen L J, Wang Y L, Lei M 2008 *Acta Phys. Sin.* **57** 2952 (in Chinese) [部 鹏、姚保利、韩俊鹤、陈利菊、王英利、雷 铭 2008 物理学报 **57** 2952]

On-line detecting and controlling conception for time-delay measurement in ultrafast laser pulse pump-probe*

He Xue-Peng Liu Yuan-Xing Liu Shi-Bing[†]

(*Institute of Laser Engineering, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China*)

(Received 3 March 2010; revised manuscript received 28 April 2010)

Abstract

A novel optical system for detecting and controlling the time-delay value of probe light in the femtosecond pulse pump-probe measurements is presented based on the simultaneous phase-shifting interferometry scheme. The intensity distributions of interference pattern are calculated based on the Jones theory to optimize the optical system, by which the analytical expressions for phase-shifting length between the neighboring interferograms and the relevant phase-delay value are derived. To meet the requirement of practical application, possible latent errors in the process of detecting time-delay are analyzed. In particular, a minimum time-resolution with attosecond level at 800 nm wavelength was achieved. The results show that this system satisfies the requirement of femtosecond pulse pump-probe high-precision measurement.

Keywords: femtosecond pump-probe, time-delay, simultaneous phase-shifting interferometry, Jones theory

PACS: 42.65.Re, 42.87.Bg, 64.75.Gh

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 10974010) and the Beijing Technological Innovation Plan, China (Grant No. 1010005466903).

[†] Corresponding author. E-mail: sbliu@bjut.edu.cn