

# 用双光子荧光法测量六束激光的时间同步

余文炎 谢梓铭 李安民 何兴法  
(中国科学院上海光学精密机械研究所)

## 提 要

在多束激光辐照靶的实验中,时间同步是十分重要的。我们用双光子荧光(TPF)法测量了六束钕玻璃高功率激光系统( $6 \times 10^{11} \text{W}$ )的时间同步。测量时间同步的光源是该激光系统中的主被动锁模 $\text{Nd}^{3+}:\text{YAG}$ 振荡器,脉宽是20 ps。

相对辐照的二束激光的时间同步测量,采用了在靶位处放置一个四面通光的双光子荧光盒,而正交辐照的二束激光的时间同步测量,采用了在靶位处放置一个半透膜板和一个双光子荧光装置。时间同步测量简便、直观。

给出了用双光子荧光法测量时间同步的误差。两束激光相对辐照时,同步误差为4 ps,两束激光正交辐照时,同步误差为5 ps。六束激光时间同步误差为10 ps。

## 一、引 言

在激光聚变实验中,用多束激光从不同方向均匀辐照微球靶。为获得靶的压缩,不仅要求各方向的辐照光束空间上同步(共焦),而且要求所有的照射光束时间同步(等光程)。我们采用双光子荧光(TPF)原理测量激光光路的光程差,使六束钕玻璃高功率( $6 \times 10^{11} \text{W}$ )激光系统的辐照激光束实现了时间同步,误差约为10 ps。

## 二、两种测量方法

在研究锁模激光器输出的超短激光脉冲时,广泛使用 TPF 法测量光脉冲的时间宽度,并观察锁模脉冲是否有卫星脉冲<sup>[1]</sup>。一束超短激光脉冲分成强度相近的两束后,相向地通过若丹明 6G 的丙酮(或 1, 2-二氯乙烷)溶液时,发生非线性效应,产生一个强的 TPF 点。该 TPF 点就是这个超短光脉冲分束后的相碰点,其最大强度点就是分成两束后的等光程点(即时间同步点)。若入射的光脉冲由两个有时间差的超短光脉冲所组成,则分成两束后,由于脉冲两两相碰,产生三个双光子荧光强点,荧光强点间的距离与脉冲间的时间差有关。因此,可以用 TPF 法测量激光光路的程差,实现光脉冲的时间同步。

六束钕玻璃高功率激光系统由  $\text{Nd}^{3+}:\text{YAG}$  主被动锁模振荡器、选脉冲开关、隔离器、空间滤波器以及钕玻璃棒状放大器等元件所组成,经过两次分光(1→2→6)分成六束。六束激光分别沿直角坐标系的三条坐标轴从六个方向对称照射位于坐标原点的微球靶,任两束

激光或是相向照射,或是正交照射,如图 1 所示。

测量时间同步使用的光源就是该激光系统的锁模振荡器,其输出的超短激光脉冲的宽度约为 20 ps。图 2 是该振荡器输出脉冲产生的 TPF 照片。

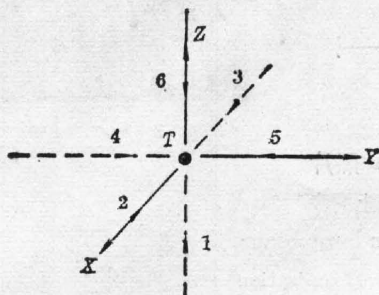


图 1 六束激光照射靶的方式示意图  
(指向原点的箭头代表入射光束)

Fig. 1 Optical arrangement for irradiating the micro-balloon target from the six-beam lasers



图 2 振荡器输出脉冲产生的 TPF 照片(脉宽~20 ps)

Fig. 2 TPF picture for output pulse of oscillator(The pulse width is about 20 ps)

测量时,为避免运转全部放大器,在六条光路的输出端放置长焦距( $f=8\sim 10\text{ m}$ )的会聚透镜以缩小光束口径。选择适当的工作条件运转激光器,使靶区附近的光束直径和强度具有合适的值,以便于激光束调整时准确定位,并保证 TPF 强度在照相底片感光特性的线性范围内,荧光线的粗细适当。

根据 TPF 原理和六束激光照射靶的三维正交方式的特点,我们采用以下两种方法测量六束激光的时间同步。

1. 在靶所在的位置放置一个 TPF 盒,测量相对照射的两束激光的时间同步。光路布置如图 3 所示。

这种方法的关键是如何定出靶在 TPF 盒中的位置。为此将 2、3 两束激光和 4、5 两束激光调整到既要通过靶点又要重合,以保证它们荧光线的交点代表靶球的位置,且有对比度较高的荧光相碰点。图 4(a) 是 2 和 3 两束激光,4 和 5 两束激光时间不同步时的 TPF 照片。4、5 两束激光相碰产生的 TPF 点在两条荧光线交点的左方,而 2、3 两束激光的 TPF 点在交点的上方。交点呈现较强的荧光是由于水平方向和垂直方向的荧光相迭加所致(不等光程)。

以水平方向的 4、5 两束激光为例。该两束光的时间同步差  $\Delta_1$  由下式表示:

$$\Delta_1 = \frac{2n}{c} \cdot \frac{L}{l} \cdot a + \frac{(n-1)}{c} \cdot \frac{L}{l} \cdot \delta, \quad (1)$$

其中  $l=l_1+l_2$ ,  $\delta=l_1-l_2$ 。n 为丙酮的折射率, L 为荧光盒的长度,  $l_1$  为底片上第 5 束激光入口与靶点间的荧光线长度,  $l_2$  为底片上第 4 束激光入口与靶间的荧光线长度, a 为底片上 TPF 强点与靶间的距离, c 为真空中的光速。

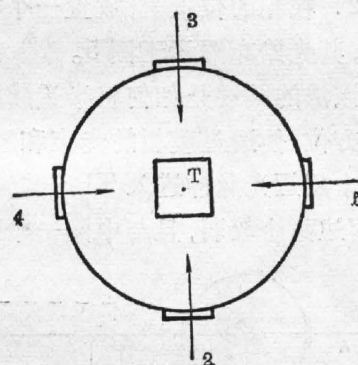


图 3 测量相对照射的两束激光的时间同步的光路布置(T 为靶的位置)

Fig. 3 Optical arrangement for the time-synchronization measurement of two opposite beams (T is the position of target)

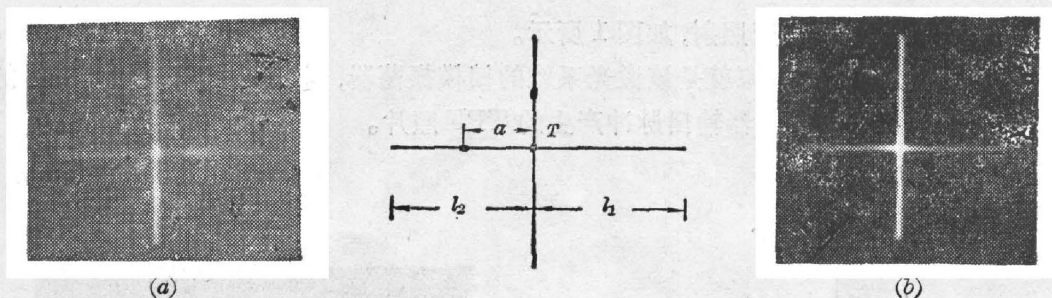


图 4 四束激光产生的 TPF 照片  
 (a) 时间上不同步 (b) 时间上同步  
 Fig. 4 TPF picture of the four laser beams  
 (a) Time difference; (b) Time-synchronization

应补偿哪一束,可由  $l_1$  和  $l_2$  的大小及荧光强点偏离交点哪一边来定。

当  $l_1=l_2$  时,式(1)简化为

$$\Delta_1 = \frac{2n}{c} \cdot \frac{L}{l} \cdot a \quad (2)$$

图 4(b)是经过光程补偿后, 2、3 束同步和 4、5 束同步时的 TPF 照片。

2. 在靶的位置上,放置一个半透膜板,利用 TPF 装置测量正交照射的两束激光的时间同步,其光路布置示于图 5。

该法的关键是如何将半透膜板的膜面定准在正交光束的交点上。通过仔细调整半透膜板的方位,使透过膜板的光束和经膜面反射的光束重合。当此两束激光的光路不等光程时,有两个超短光脉冲进入 TPF 装置,产生一条有三个荧光强点的荧光线,中间一个荧光点较强,两边两个较弱,且与中间一个强点等距。图 6 是这种情况下产生的 TPF 照片。

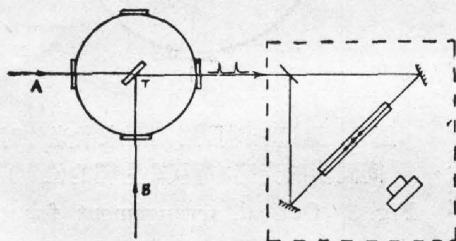


图 5 测量正交照射的两束激光时间同步的光路布置

Fig. 5 Optical arrangement for the time-synchronization measurement of two crossed beams

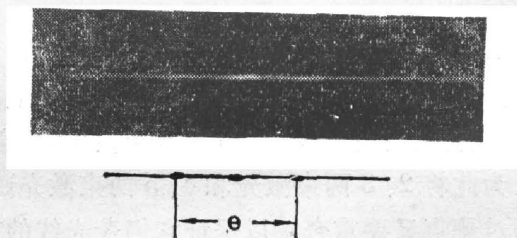


图 6 正交照射的两束激光不同步时的 TPF 照片

Fig. 6 TPF picture for the time difference of two crossed beams

当该两束激光调整到同步时,产生的 TPF 照片和图 2 相同。

设  $e$  表示两侧较弱荧光点间的距离,则该两束激光的时间同步差  $\Delta_2$  为(到达膜面交点)

$$\Delta_2 = \frac{n}{c} \cdot \frac{L}{l} \cdot e \quad (3)$$

此处  $l$ ——照相底片上对应于荧光盒长  $L$  的荧光线长度,  $n$ 、 $c$  的意义同前。

为确定这两束激光到达交点的先后,需增加或减少其中一束的光程(改变量要适当),若



间距  $e$  随着光程的增加而增大, 则表明光程增加的一束激光比另一束落后, 反之则表明比另一束超前。

这种方法由于采用了具有一定厚度  $d$  的半透膜板 (实验中  $d$  为 3 mm), 故最后要对它引进的时间同步差给予修正。取膜板的折射率为 1.5, 经简单计算, 得到透射的一束实际光程比测量的光程短  $0.616d$ , 反射的一束实际光程比测量光程长  $0.33d$ , 在本实验中分别为 1.8 mm 和 1 mm。最后若以透射一束光的光程为基准, 则反射一束光的光程应扣去 2.8 mm。若以反射一束光的光程为基准, 则透射一束光的光程应加上 2.8 mm。

### 三、方法的误差分析

上述测量方法(一)、(二)所用的时间同步差的公式是相似的, 可以用  $\Delta = \frac{n}{c} \cdot \frac{L}{l} \cdot x$  来表示。相向照射时,  $x = 2a$ ; 正交照射时,  $x = e$ 。其误差绝对值为

$$\partial \Delta = \frac{n}{c} \left[ \frac{L}{l} \partial x + \frac{x}{l} \partial L + \frac{xL}{l^2} \partial l \right] \quad (4)$$

荧光盒的长度  $L$  用卡尺测量, 其误差小于 0.05 mm。照相底片上对应  $L$  的荧光线条长度  $l$  用读数显微镜测量, 其误差小于 0.02 mm。底片上荧光强点与靶间的距离  $a$  或两较弱荧光强点间的距离  $e$ , 由底片上荧光线的透过率曲线确定。图 7(a)、(b)、(c) 分别对应于图 4(a) 的水平方向、垂直方向和图 6 的透过率曲线。从这三条典型的透过率曲线可以看出, 底片的噪声起伏较大, 在确定透过率最小值的位置时, 需要经过平滑化处理。重复测量表明, 透过率最小值的定位误差小于横坐标刻度的 1/4, 对应底片上的误差小于 0.15 mm。

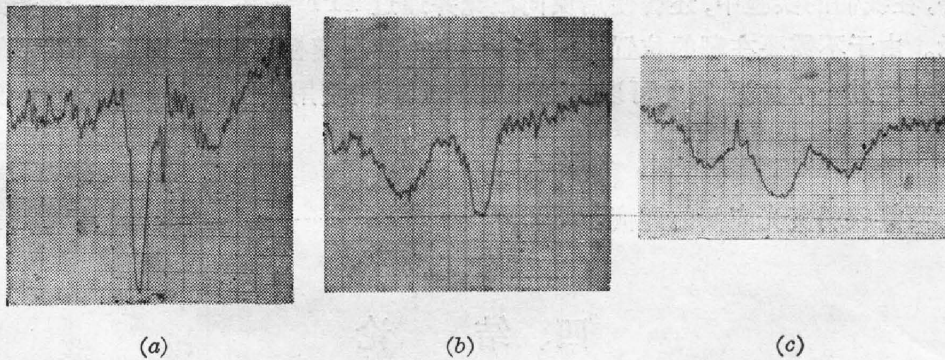


图 7 TPF 底片荧光线的透过率曲线

Fig. 7 Transmission curve of the TPF film

取一组典型的实验数据如下:

在相向照射时

$$\begin{aligned} L &= 45.10 \text{ mm}, & \partial L &= 0.05 \text{ mm}; \\ l &= 14.65 \text{ mm}, & \partial l &= 0.02 \text{ mm}; \\ a &= 2.7 \text{ mm}, & \partial a &= 0.15 \text{ mm}; \\ n &= 1.36; \end{aligned}$$

代入公式(4)得  $\partial \Delta \approx 4 \text{ ps}$ 。

在正交照射时

$$\begin{aligned} L &= 98.55 \text{ mm}, & \partial L &= 0.05 \text{ mm}; \\ l &= 18.53 \text{ mm}, & \partial l &= 0.02 \text{ mm}; \\ e &= 5.3 \text{ mm}, & \partial e &= 0.15 \text{ mm}; \\ n &= 1.36; \end{aligned}$$

代入公式(4)得  $\partial \Delta \approx 3.5 \text{ ps}$ 。

此处,在正交照射时,还要考虑到半透膜板膜面定位在正交两束激光交点上的误差。由于正交的两束调整光 He-Ne 激光在靶点附近有约  $\phi 2 \text{ mm}$  的光斑,因而使半透膜板的定位误差约为  $0.4 \text{ mm}$  (两光斑偏离  $1/5$ ),相应的时间同步误差约为  $1.3 \text{ ps}$ 。这样正交照射的两束激光的时间同步误差约为  $5 \text{ ps}$ 。

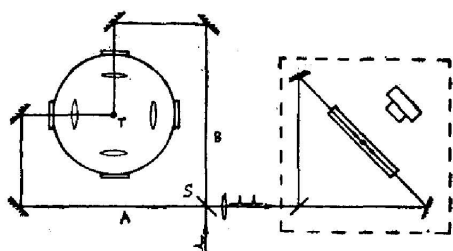


图 8 通过反激光测量光程差  
( $T$  是直径  $500 \mu\text{m}$  的靶球)

Fig. 8 Optical arrangement for the time-synchronization measurement with retro-laser light ( $T$  is a  $\phi 500 \mu\text{m}$  balloon target)

综上所述,用 TPF 法测量六束激光的时间同步,若以第 4 束为基准,第 5 束与它进行相向照射测量,1、2、3、6 各束与它进行正交照射测量,则此六束激光最大的时间同步误差为  $10 \text{ ps}$ 。

显然,从对公式(4)的分析中可以看出,测量误差主要由  $\frac{n}{c} \cdot \frac{L}{l} \cdot \partial x$  项决定。因此提高测量精度可以通过减小  $\frac{L}{l}$ , 即减小照相系统的缩小倍率而获得。也可以采用更短的激光脉冲作为测量光源,降低底片的噪声,以提高  $x$  的定位精度。

此外,在我们的实验中,还曾使用反向激光并通过 TPF 法来测量光程差,其光路布置如图 8 所示。由于不需要在靶的位置上放置荧光盒或半透膜板,并且进入 TPF 装置的激光脉冲在光路中经过一个往返,因此可以有更高的测量精度。使用该法时,其同步差的计算公式为

$$\Delta_3 = \frac{n}{2c} \cdot \frac{L}{l} \cdot b, \quad (5)$$

此处  $b$  为两侧较弱荧光点间的距离。

## 四、结 论

采用 TPF 法测量多束激光的时间同步具有实验条件简单、操作方便、精度高等优点。特别是影响时间同步的光束传输时的非线性效应、热变形等因素已包含在测量中,测量结果更符合激光系统实际工作时情况。

本工作是在邓锡铭教授的指导下进行的。参加本工作的还有陈绍和、陈时胜、毕无忌、万承国、曹渭楼等同志以及六路器件和靶场的全体同志。

## 参 考 文 献

- [1] P. A. Giordmaine *et al.*; *A. P. L.*, 1967, 11, No. 7 (1 Oct.), 216.

## The measurement of time-synchronization for six-beam laser by making use two-photon fluorescence

YU WENYAN XIE ZIMING LI ANMING AND HE XINGFA  
(Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Academia Sinica)

(Received 7 January 1981)

### Abstract

In the target experiment by multi-beam irradiation time-synchronization is very important. Using a method of two-photon fluorescence (TPF), we have measured the time-synchronization of six beams Nd<sup>3+</sup> glass high power laser system ( $6 \times 10^{11}$  W). The active-passive mode-locked Nd<sup>3+</sup>:YAG oscillator of the time-synchronization was used as the light source for the time-synchronization measurement. The pulse width was 20 ps.

Time-synchronization for two opposite beams was measured using a TPF cell capable of four beam transmission on the position of target. Time-synchronization for two crossed beams was measured by placing a half-transparent film on the target position and a TPF apparatus. The measurement is simple and perceivable.

The error in the measurement of the time-synchronization by two-photon fluorescence is presented. The error is about 4 ps for two opposite beams and 5 ps for two crossed beams. The total error of the time-synchronization for six beams is about 10 ps.

(上接第 192 页)

### 参 考 文 献

- [ 1 ] M. Born, E. Wolf; *Principles of Optics* 2nd ed., (London, Pergamon, 1964).
- [ 2 ] J. F. Nye; *Physical Properties of Crystals*, (Oxford, The Clarendon Press, 1957).
- [ 3 ] Ю. И. Сиротин, М. П. Шаскольская; *Основы Кристалло физики* (Москва, «Наука» Главная Редакция Физико-Математической Литературы, 1979).
- [ 4 ] Н. Н. Бухгольц; *Основной Курс Теоретической Механики*, Изд. 4-е (Государственное Издательство Технично-Теоретической Литературы, Советский Союз, 1939).

(下转第 104 页)