

# 超短光脉冲的超高速照象

高福源 赵继然 陈淑琴

王文耀 江敏华 邱佩华

(中国科学院上海光机所)

**提要:** 我们提出并研制成了一种旋光色散共线光克尔快门, 利用这种新型快门和迭层玻璃堆分束取样技术已成功地将以光速飞行的超短绿光脉冲做了照相记录。

## Ultrahigh speed photography of ultrashort optical pulses

Gao Fuyuan, Zhao Jiran, Chen Shuqin, Wang Wenyao, Jiang Minhua, Qiu Peihua

(Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Academia Sinica)

**Abstract:** We have proposed and developed an optical rotation dispersion collinear optical Kerr shutter. Using this new shutter and the splitting beam sampling technique in combination with a group of glass plates, ultrashort green pulses flying with the velocity of light have been photographed successfully.

### 一、原 理

超高速照像<sup>[1]</sup>和普通照像在基本原理上相同,不同的是超高速照像的快门非常快,开关时间要达到 $10^{-11} \sim 10^{-12}$ 秒。另外,所拍照的是以光速运动的“飞行物体”——光脉冲,所以必须仔细考虑飞行体发光时的时间和位置的关系,也就是要仔细研究光学取样。超高速照像装置可分为四个部分:(1)光克尔快门;(2)信号脉冲的取样;(3)开启脉冲和信号脉冲的同步;(4)照像显示。

#### 1. 旋光色散型共线光克尔快门

一般光克尔快门的原理和装置见[1-3]。

我们所用的是旋光色散型共线光克尔快门。共线使测量精度提高了<sup>[1,3]</sup>,也使信号光和开启光在 $CS_2$ 介质中能很好地重迭。普通共线光克尔快门<sup>[3-5]</sup>,用多层介质膜反射镜把波长为1.06微米和0.53微米的两束光合在一起。光通过多层介质膜时会使线偏振光有些退偏振<sup>[5]</sup>,这显然要使光快门的性能变差。我们用的旋光色散型共线光克尔快门,没有这个缺点,所以它的效能是高的。这种光快门示于图1。其中,检偏器 $P_2$ 的偏振方向是这样调的:在没有1.06微米光时,0.53微米光达到 $P_2$ 时的偏振方向和 $P_2$ 的偏振方向恰好正交。1.06微米的开启光束和0.53微米

收稿日期:1982年4月7日。

的信号光束,用波长选择多层介质膜反射镜  $R_4$  合成一束,然后再经起偏器  $P_1$  起偏。0.53 微米和 1.06 微米的光通过起偏器后在同一方向线偏振,经过右旋石英旋光片  $c$  后,由于旋光色散使这两种波长的光的线偏振方向成  $45^\circ$ 。 $R_5$  是对 1.06 微米全反射镜,  $L_1$  是透镜,  $P_2$  是检偏器。实验表明,这种快门的开关比是很大的,这可从图 4 的照片看出。

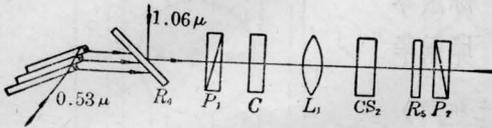


图 1 旋光色散型共线光克尔快门

## 2. 光学取样迭层玻璃堆

我们用的迭层玻璃堆取样法是把多片厚 1 毫米的玻璃平板迭在一起(见图 2),成为玻璃堆,然后胶起来。每片玻璃板的两侧面抛光,而端面是毛的。玻璃堆的角  $BCD$  等于  $60^\circ$ 。使用此迭层玻璃堆时,信号光  $AO$  进入玻璃堆后折射成光线  $OF$ 。让  $OF$  平行于  $BC$ 。光线  $OF$  在每两片玻璃平板之间的界面上反射一小部分光。反射光分别穿过窗口  $G_1H_1, G_2H_2, G_3H_3$  等等射出。这些经反射后射出的光线是  $S_1V_1, S_2V_2, S_3V_3$  等等,每相邻两条光线有一定的光程差。经简单几何计算可得此光程差

$$\Delta l = 1.966 \text{ 毫米} \quad (1)$$

光程差  $\Delta l$  造成的时间延迟

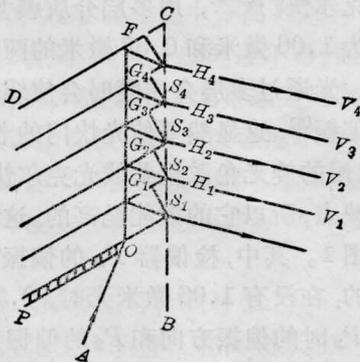


图 2 光学取样迭层玻璃堆

$$\Delta t = \frac{\Delta l}{c} = \frac{1.966 \text{ 毫米}}{3 \times 10^{10} \text{ 厘米/秒}} = 6.55 \text{ 微微秒} \quad (2)$$

为使这个光程差为确定的数,要使得在玻璃堆中部分反射的信号光,从反射面开始只穿过一片玻璃平板就从窗口射出。为此,在玻璃堆前加一片遮光片  $P$ ,防止光线  $AO$  左边的信号光线进入玻璃堆后在玻璃板间界面上部分反射后经过两片玻璃板再由窗口射出。

由上述讨论可知,如一个光脉冲沿光线  $AO$  射进玻璃堆,将会由玻璃堆的每个窗口射出一个和原光脉冲同样形状的光脉冲,而相邻两个窗口的脉冲有时间延迟 6.55 微微秒,这就完成了取样。

光克尔快门的开启脉冲和信号脉冲的时间同步,是用两个光延迟线  $D_1$  和  $D_2$  完成的。照像显示用普通相机即可(见下面实验装置图)。

## 二、实验装置

实验装置示于图 3,共分三部分。 $A$  部分是激光源。被动锁模振荡器的锁模染料是十一甲川-丙酮溶液,用两级放大器放大。脉冲系列包含 40 多个超短脉冲,超短脉冲宽度为 20 微微秒左右(也可以得到脉宽达 80 微微秒的脉冲)。脉冲系列的总能量约为 1 焦耳。

$B$  部分是监测系统。炭斗监测脉冲系列的总能量。双光子荧光脉宽测量仪监测超短脉冲宽度。取样板  $S_a$  和  $S_b$  的透过率分别为 92% 和 75%。

$C$  部分是超高速照相装置。经过波长选择分束器  $R_1$ , 0.53 微米和 1.06 微米光分别进入光延迟线  $D_1$  和  $D_2$ 。 $B'$  是光学取样迭层玻璃堆,由 17 片玻璃板迭合而成。反射镜  $R_4$  对 1.06 微米光全反射,对 0.53 微米光透过。适当调  $D_1$  和  $D_2$  的位置,使 0.53 微米光脉冲和 1.06 微米光脉冲同时到达  $CS_2$  盒,同步精度可达 0.1 微微秒。反射镜  $R_5$  对 1.06 微米光全反射而让 0.53 微米光透过,

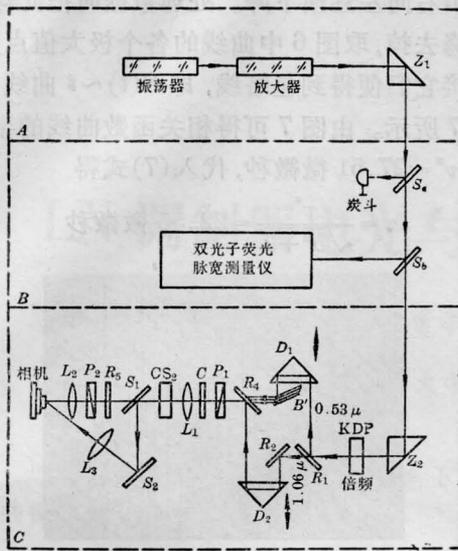


图3 实验装置图

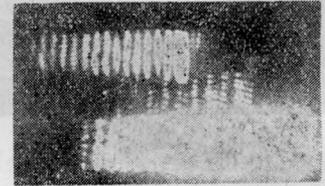
A—激光源；B—监测系统；C—超高速照像装置

这可防止 1.06 微米光打坏检偏器和相机，并消除对信号光的照片的干扰。在反射镜  $R_5$  前，0.53 微米光有一小部分经玻璃取样板  $S_1$  和  $S_2$  及透镜  $L_3$  进入相机中。0.53 微米光的另一部分经  $P_2$  和透镜  $L_2$  射到相机中。适当调整光路中各元件，使光学取样玻璃堆经该二光路分别在相机中成像。这样相机同时可拍下玻璃堆的两个像，如图 4 所示。经过  $L_3$  的是参考像，它没经过光克尔快门，起对比参考作用。经过  $P_2$  的光所成的像可叫信号像，它经过了光克尔快门，包含被测信号光的信息。如果开启光脉冲比信号脉冲短得多，信号像就是被测信号脉冲的照片。

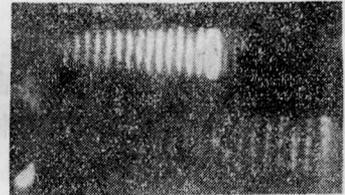
### 三、实验结果

我们曾在超短脉冲宽度为 80 微微秒时，检验过所用的超高速照相装置的性能。先在光延迟线  $D_2$  前遮断 1.06 微米开启光脉冲，此时光克尔快门是关的，拍下照片如图 4(b) 所示。照片中上面较强的条状像是参考像，下面弱的是信号像。而当不遮断开启光脉冲时，快门是开的，此时拍下照片如图 4(a) 所示。图中上面的条状像是参考像，下面强的

条状像是信号像。此时由于激光脉冲宽度太宽，而组成玻璃堆的玻璃片的数量较少，只有 17 片，无法从此照片中看出信号脉冲的像。但是，比较图 4 的 (a) 和 (b)，显而易见，有开启脉冲时的像比无开启脉冲时的像强得多。这表明所用的旋光色散型共线光克尔快门的开关比是很大的，整个超高速照相装置的性能是很好的。



(a)

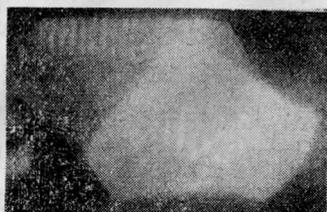


(b)

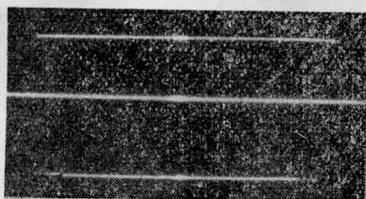
图 4

超短激光脉冲为 20 微微秒左右时所拍的照片如图 5 所示。其中照片 (a) 上方是参考像，下面是信号像，它给出穿过取样玻璃堆的 0.53 微米光脉冲的光强波形的信息。若开启脉冲宽度比信号脉冲宽度小得多，此条状像各条对应黑度的包络线就是 0.53 微米光脉冲的光强波形。也就是说这个包络线就是信号脉冲的像。由于我们所用开启脉冲宽度和信号脉冲同数量级，所以这个包络线还不直接就是信号光脉冲的像，而是信号光脉冲与开启光脉冲的卷积。这可由公式 (3) 一目了然。所以，可粗略地把图 5(a) 所示的照片看成是 0.53 微米超短光脉冲的照片。图 5(b) 所示的照片是与得到照片 (a) 同时监测到的双光子荧光照片。

由图 5(a) 所示照片的黑度曲线及其包络线(见图 6 和图 7)，能更明显地看出，图 5(a) 下面的条状像的包络近似的是信号光脉冲的像。



(a)



(b)

图 5

#### 四、测量超短脉冲宽度

测超短脉冲宽度是超高速照相最简单的应用。用这种方法测脉宽,除了[3]中所述优点外,最明显的优点是一次测得。

若开启脉冲光强为  $I_1(t')$ , 信号脉冲光强为  $I_2(t'-t)$ , 则由超高速照相得到的相关函数为<sup>[1,3]</sup>

$$S(t) = \int_{-\infty}^{\infty} I_1(t') I_2(t'-t) dt' \quad (3)$$

由于我们所用的倍频光脉冲和基频光脉冲的强度波形都可看成高斯型, 倍频后宽度变窄, 倍频脉冲与基频脉冲宽度之比为  $b \approx 0.7$ <sup>[3]</sup>。所以可写成

$$I_1(t') = I_{10} e^{-\frac{(4 \ln 2)t'^2}{\tau^2}} \quad (4)$$

$$I_2(t'-t) = I_{20} e^{-\frac{(4 \ln 2)(t'-t)^2}{(b\tau)^2}} \quad (5)$$

由(3)、(4)和(5)式可得

$$S(t) \propto e^{-\frac{(4 \ln 2)t^2}{(b^2+1)\tau^2}} \quad (6)$$

由(6)式可知, 对于光强为高斯型的超短光脉冲, 相关函数仍为高斯型, 只是脉冲半极大值点处全宽度  $\tau$  变为

$$\tau^* = \sqrt{b^2+1} \tau \quad (7)$$

图 5(a) 所示的照片下面的条状像, 用黑度计扫出的黑度曲线如图 6 所示。如果没有开启光脉冲, 由于信号光脉冲在玻璃堆中穿行时逐渐衰减, 图 6 的黑度曲线显然要均匀

地由右向左逐渐下降。处理数据时把此均匀下降去掉, 取图 6 中曲线的各个极大值点, 并联接它们便得到包络线, 即  $S(t) \sim t$  曲线, 如图 7 所示。由图 7 可得相关函数曲线的半宽度  $\tau^* = 27.51$  微微秒, 代入(7)式得

$$\tau = \frac{\tau^*}{\sqrt{b^2+1}} = 22.55 \text{ 微微秒} \quad (8)$$

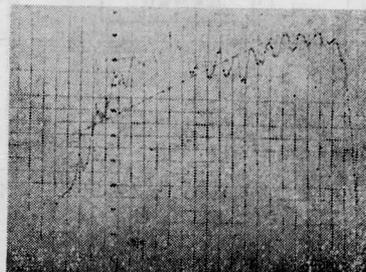
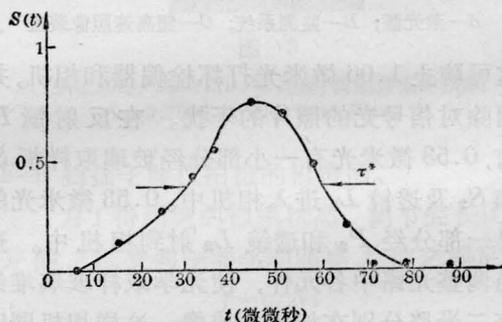


图 6 图 5(a) 条纹象的黑度曲线

图 7  $S(t) \sim t$  曲线

另外, 由图 5(b) 所示的双光子荧光照片, 得到 1.06 微米光脉冲半宽度

$$\tau' = 21.6 \text{ 微微秒} \quad (9)$$

由(8)和(9)式可见, 分别用超高速照相法和双光子荧光法对同一个激光脉冲进行测量得到的脉冲宽度  $\tau$  和  $\tau'$  是一致的。这表明, 前面讨论的测量方法是可靠的。

#### 参 考 文 献

- [1] M. A. Duguay, A. T. Mattick; *Appl. Opt.*, 1971, **10**, 2162.
- [2] M. A. Duguay, J. W. Hansen; *Appl. Phys. Lett.*, 1969, **15**, 192.
- [3] 陈淑琴等; 《光学学报》, 1981, **1**, No. 4, 365.
- [4] G. Mourou, M. M. Mally; *Opt. Commun.*, 1974, **11**, 282.
- [5] W. Yu, R. R. Alfano; *Opt. Electr.*, 1974, **6**, 243.