

光栅取样微微秒超高速照相

高福源 陈淑琴

(中国科学院上海光机所)

提要: 我们提出的光栅取样法,成功地应用到超高速照相实验中。由于该方法效率高和能够连续取样,可望把超高速照相技术推进到应用阶段,做成适用的微微秒示波装置。

Picosecond ultrahigh speed photography using grating as sampler

Gao Fuyuan, Chen Shuqin

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

Abstract: The of grating sampling method have been successfully used in the ultrahigh speed photographic experiments. Since the method has the advantage of efficient and continuous sampling, the ultrahigh speed photography is expected to have practical application as picosecond oscilloscope.

在非线性光学基础上建立起来的超高速照相技术,在1971年^[1]就已开始研究。后来又有人提出了阶梯板取样、多片反射镜取样^[2]等多种方法。文献[3, 4]中还提出了微微秒示波器的构想,并做了实验。这些方法都从取样方面对这种超高速照相法有了一些推进,但是,这些方法都有一些严重的缺点,实际上不能应用^[5]。文献[5]中也给出了一种新的取样法:叠层玻璃堆取样法。此法有优点,它的严重缺点是只能断续取样,真正用于测量也遇到困难。本文在[5]中的基础上提出了光栅取样法,经实验证明,是一种可连续取样的有效方法。

一、光栅取样

如图1所示,一个光脉冲照到光栅上,经光栅衍射(只考虑一级衍射)后,射出一个光脉冲。这时,由光栅不同位置射出的光脉冲在时间上有不同的延迟,如图1的出射光束所示。取与光栅刻条垂直的射线 ox 作为坐标轴,令由零点射出的光经光栅产生的光程差为零,则由光栅上坐标为 x 的点射出的光,经光栅产生的光程差(Δl)为:

$$\Delta l = \lambda N x \quad (1)$$

收稿日期:1983年12月13日。

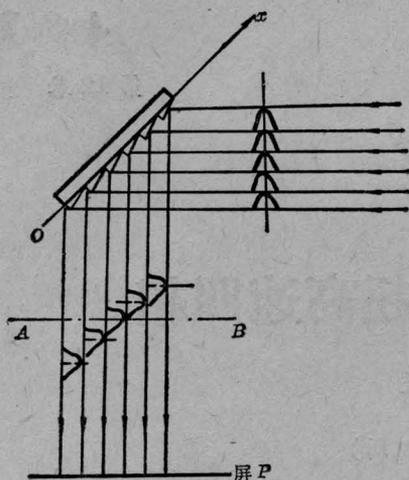


图 1

Δl 单位为 μm ; λ 为波长, 单位为 μm ; N 为光栅每毫米距离上刻线的条数; x 是坐标, 单位为 mm 。由(1)式可求出来自光栅不同位置的光脉冲之间的时间延迟为

$$\Delta t = c\Delta l = c\lambda N x \quad (2)$$

这里已假设来自 O 点的光的时间延迟为零。公式(2)中, Δt 为延迟时间, 单位为 s ; c 为光速, 单位为 $\mu\text{m}/\text{s}$ 。由(2)式可算出来自光栅不同位置的光脉冲的时间延迟。这样, 由一个光脉冲(入射到光栅上的光脉冲)就可取样出有不同时间延迟的好多个同样的脉冲。如果在 AB 位置加一个非常快的快门, 那么, 在屏 P 上的光强分布恰是一个形状和入射到光栅上的光脉冲完全一样的脉冲。对屏 P 上的光斑进行拍照, 就得到了入射到光栅上的光脉冲的像。这就是光栅取样超高速照相的原理。

二、实验装置

实验装置如图 2 所示。用光栅取样, 用旋光色散型共线光克尔快门做光快门, 用普通照相机进行显示。

脉宽为 13ps 的 $1.06\mu\text{m}$ 激光脉冲经 KDP 倍频晶体, 一部分转化为 $0.53\mu\text{m}$ 倍频光, 大部分透过 KDP 晶体。此两种波长的

光一起射到反射镜 R_1 上。反射镜 R_1 、 R_2 和 R_5 对 $1.06\mu\text{m}$ 光全反射, 对 $0.53\mu\text{m}$ 光全透过。反射镜 R_3 对 $0.53\mu\text{m}$ 光全反, 对 $1.06\mu\text{m}$ 光透过, 反射镜 R_4 对 $1.06\mu\text{m}$ 光全反。所以, $1.06\mu\text{m}$ 光经反射镜 R_1 , 直角棱镜 D 和反射镜 R_2 , 透过 R_3 , 经 R_4 和 R_5 , 再穿过透镜 L_1 进入光快门。 $0.53\mu\text{m}$ 光透过 R_1 和 R_2 , 经 R_3 全反射到光栅上。经光栅取样后再穿过 R_5 和 L_1 进入光快门。由图 2 可知, $1.06\mu\text{m}$ 和 $0.53\mu\text{m}$ 这两束光是共线进入光快门的, 在这种共线光克尔快门中是一直共线传播的。 L_1 的作用是使激光束会聚到 CS_2 盒上, 在 CS_2 中达到足够的强度, 出现明显的光克尔效应。调整 L_1 和 CS_2 的距离, 即调整激光在 CS_2 上的光强, 使之适合实验要求。 P_1 是起偏器, P_2 是检偏器, C 是旋光片。 CS_2 是光克尔快门的光克尔介质。反射镜 R_6 对 $1.06\mu\text{m}$ 光全反射, 对 $0.53\mu\text{m}$ 光透过, 它的作用是防止强的 $1.06\mu\text{m}$ 激光打坏检偏器和相机, 同时也防止作为开启脉冲的 $1.06\mu\text{m}$ 光干扰后面的照相显示。 L_2 和 L_3 是透镜, 它们和 L_1 一起使光栅表面在相机处成像。照相时, 相机的镜头被拿掉, 只用相机的暗盒拍照。实验时 $1.06\mu\text{m}$ 光作为光克尔快门的开启光束, $0.53\mu\text{m}$ 光作为信号光束。用 $0.53\mu\text{m}$ 光照明光栅, 用 $1.06\mu\text{m}$ 光脉冲开启光克尔快门, 给光栅照相。因为照明光栅的 $0.53\mu\text{m}$ 光脉冲被光栅取样, 因此如前一节所述, 此时拍得的光栅上光强分布图形的形状恰和 $0.53\mu\text{m}$ 光脉冲的强度波形一样。所以, 此时给光栅照相也就是给 $0.53\mu\text{m}$ 光脉冲照相。

$1.06\mu\text{m}$ 和 $0.53\mu\text{m}$ 光经起偏器 P_1 被起偏成线偏振光, 偏振方向相同, 经旋光片 C

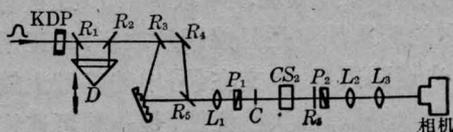


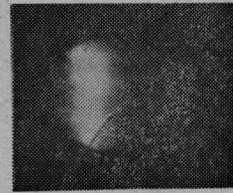
图 2

后,由于旋光色散的作用,此二波长的光的偏振方向交成 45° 角。这样, $1.06\ \mu\text{m}$ 照射 CS_2 介质时,由于光克尔效应产生的双折射性质,能使 $0.53\ \mu\text{m}$ 光的偏振方向发生明显的变化^[5]。 P_2 的偏振方向是这样调整的,当没有 $1.06\ \mu\text{m}$ 光照射 CS_2 介质时, $0.53\ \mu\text{m}$ 光传播到 P_2 处的时候,其偏振方向和 P_2 的偏振方向互相垂直。这样,没有 $1.06\ \mu\text{m}$ 照射 CS_2 介质时,对 $0.53\ \mu\text{m}$ 来说,光快门是关的, $0.53\ \mu\text{m}$ 绿光通不过。调整直角棱镜 D 的位置,改变 $1.06\ \mu\text{m}$ 的光程,使得这两种波长的光脉冲同时到达 CS_2 盒。这时,由于光克尔效应,光快门就开了。此时用相机拍照,按前节所述的原理,就能拍下 $0.53\ \mu\text{m}$ 光脉冲的光强度波形。

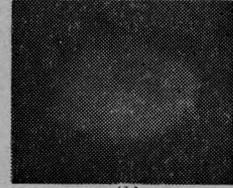
三、实验结果

实验时要调整光栅和各反射镜,使两种波长的光束共线,使它们在 CS_2 盒上的光斑重合。还要调好 D 的位置,使两种波长的光同时到达 CS_2 盒。这时,如果在反射镜 R_4 处把 $1.06\ \mu\text{m}$ 光遮掉,光快门是关的。此时相机处如果放个屏,屏上看不见 $0.53\ \mu\text{m}$ 的绿光光斑。反之,快门就开了,在屏上可看到一窄条绿色光斑,其照片如图 3(a) 所示。若还是把 $1.06\ \mu\text{m}$ 光遮掉,但同时调 P_2 的偏振方向,使光快门不是关的,而是开一些,此时绿光当然会通过光快门。但是,由于这种开门是常开的,不起快门作用,所以在屏上看到的是均匀的整个绿色光斑,与光脉冲强度波形无关。这样的光斑照片如图 3(b) 所示。

图 3(a) 照片所示的横向光强分布,就是绿光脉冲的强度波形。用横向扫描黑度作出的光强分布曲线如图 4 所示。显然,若光快门的开关时间无限短,此曲线描绘的波形就是绿光脉冲的强度波形。我们的实验中,作为开启光束的 $1.06\ \mu\text{m}$ 光脉冲宽度是 $13\ \text{ps}$,和被测的绿色信号光脉冲宽度相差不多,因



(a)



(b)

图 3

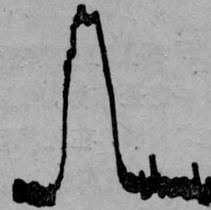


图 4

此开门时间不是无限窄的,所以图 4 的曲线是开启脉冲和信号脉冲的卷积^[5]

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

其中 $I_1(t')$ 和 $I_2(t')$ 分别为开启脉冲和信号脉冲的光强, $S(t)$ 是相关函数。由于所用的基频和倍频光脉冲都可看成高斯型脉冲,可算得相关函数的半宽度^[5]

$$\tau^* = \sqrt{b^2 + 1} \tau \quad (4)$$

其中, τ 是 $1.06\ \mu\text{m}$ 光脉冲的半宽度, $b \approx 0.7$ ^[5] 是倍频与基频脉冲宽度之比。

四、测脉宽的有效方法

在相机处,如图 3(a) 所示的绿色光斑是较强的,因此很容易显示。如果把二极管阵列放在相机处,就可实时给出一条连续的相关曲线,这就可以对超短脉冲宽度作实时测量。

设光栅表面的法线和光克尔快门的轴线交角为 α , 光栅面上长 L 的几何线段在光快

门轴线的垂线方向上的投影显然是

$$l = L \cos \alpha \quad (5)$$

线段 l 经透镜 L_1 、 L_2 和 L_3 在相机处成像, 若像长为 l' , 则

$$\frac{l'}{l} = p \quad (6)$$

其中 p 为透镜系统成像的放大倍率。

用 L 代替(1)中的 x , 再把 Δl 代入(2)式得

$$\Delta t = c\lambda N L \quad (7)$$

再用(5)、(6)两式, (7)式可写成

$$\Delta t = \frac{c\lambda N l'}{p \cos \alpha} \quad (8)$$

此式中 c 、 λ 、 N 都是已知常数。实验装置摆定以后, p 和 α 也是常数, 而且在实验中很容易量得。(8)式表明, 在相机照相底片上, 两个几何点间的横向距离和入射在该二点的 $0.53 \mu\text{m}$ 信号光脉冲时间延迟成正比。因此, 量出图 4 所示的曲线的半宽度, 求出此半宽度在照相底片上对应的距离 l_0 , 用 l_0 代替(8)式的 l' 就可算得相关函数 $S(t)$ 的半宽度

$$\tau^* = \frac{c\lambda N l_0}{p \cos \alpha} \quad (9)$$

由此式和(4)式可得

(上接第 184 页)

三、测量误差

虽然氧化镁涂料作为标准样品涂层存在着绝对光谱反射率不稳定、牢固性差等缺点, 但由于它漫反射性能好, 光谱反射率高, 故仍然是测光积分球内壁的一种较好涂料。而用本方法进行绝对光谱散射率的测量则利用了氧化镁等涂料的优点而克服了其缺点, 整个测量过程无需使用标准样品, 可以随时消除 ρ_F 因时间、环境的变化引入的误差。

将(9)式微分可得散射率的测量误差 ΔD

$$\Delta D = \frac{1}{1-f} \left[\frac{I_3 \Delta I_2 - I_2 \Delta I_3}{I_3^2} \right]$$

$$\tau = \frac{\tau^*}{\sqrt{b^2 + 1}} = \frac{c\lambda N l_0}{p \cos \alpha \sqrt{b^2 + 1}} \quad (10)$$

由此可算得 $1.06 \mu\text{m}$ 光脉冲的半宽度 τ 。据图 4 的曲线算得的 $1.06 \mu\text{m}$ 光脉冲半宽度为 $\tau = 13 \text{ ps}$, 和用双光子荧光法测得的脉冲宽度 12 ps 符合得很好。

五、讨 论

本文报导的实验表明, 光栅取样法把非线性光学法超高速照相技术推进到了应用阶段, 它是测微微秒光脉冲宽度的一种好方法。如果使用的开启脉冲比被测信号脉冲窄得多, 由(3)式可知, 图 4 所示的曲线就是信号脉冲的强度波形。这时, 此种超高速照相装置(用二极管列阵实时显示)就是一台微微秒示波器。

参 考 文 献

- [1] M. A. Duguay, A. T. Mattick; *Appl. Opt.*, 1971, **10**, 2162.
- [2] M. R. Toppet *et al.*; *J. Appl. Phys.*, 1971, **42**, 3415.
- [3] G. C. Vogel *et al.*; *IEEE J. Quant. Electr.*, 1974, **QE-10**, 642.
- [4] M. A. Duguay, A. Savage; *Opt. Commun.*, 1973, **9**, 212.
- [5] 高福源等;《中国激光》, 1983, **10**, No. 2, 93.

$$-f \left(\frac{I_1 \Delta I_2 - I_2 \Delta I_1}{I_1^2} \right) \quad (10)$$

设 $f = \frac{1}{400}$, 则 $\frac{1}{1-f} = \frac{400}{399}$ 。

将实验测量值经数据处理, 所得到的 I_1 、 I_2 、 I_3 以及其测量误差 ΔI_1 、 ΔI_2 、 ΔI_3 代入(10)式, 便得到绝对光谱散射率的测量误差。从(10)式可以看出: 由于系数 $\frac{1}{1-f} \approx 1$, 而 $f \ll 1$, 故误差主要由式中的第一项决定。

参 考 文 献

- [1] F. Potrù *et al.*; *Optica Acta*, 1974, **21**, No. 4, 293.
- [2] H. E. Bennett; *Opt. Eng.*, 1978, **17**, No. 5, 480.