

光栅取样二次谐波法脉宽实时显示仪*

陈淑琴 高福源

(中国科学院上海光学精密机械研究所, 上海 201800)

提 要

本文描述了用光栅取样二次谐波法研制的脉宽实时显示仪的原理及特点, 给出了测试实例及精度分析。

关键词: 光栅取样。

一、引 言

在非线性光学基础上建立起来的超高速照相术中的一项研究内容是精确捕捉光脉冲的时空关系, 而研究光学取样及脉宽测量是其中重要内容之一。

光学取样最初是采用阶梯板及多片反射镜等方法^[1]。之后有人提出 *ps* 示波器的构想^[2, 3], 但在实际上却难以获得应用。为此, 作者曾提出叠层玻璃堆取样法, 并获得了一些实测结果^[4], 但在实际应用中也并非令人满意。光栅取样法, 由于可连续取样和效率高, 已被成功地应用于超高速照相实验中^[5, 6]。本文在此基础上进一步研制成光栅取样脉宽实时显示仪, 旨在使这一研究工作仪器化、实用化, 并有一定的推广价值。

二、仪器原理

本脉宽显示仪的理论基础是自相关二次谐波法, 关键技术是应用一块平面反射光栅作为取样元件。光栅取样原理在于入射光照射到光栅上后, 在光栅不同位置出射的光彼此产生不同的光程差, 即彼此之间存在一定的延迟。

仪器的光路类似于经典的泰曼-格林(Twyman-Green)干涉系统, 如图1所示, 激光输出波长为 $1.06\ \mu\text{m}$ 的光束, 入射到半透半反分光镜 *R* 后被分成两路: 一路由分光镜 *R* 反射至平面反射光栅 *P* (频率为 $600\ \text{l/mm}$) 上后衍射返回, 经原光路透过分光镜 *R* 入射至倍频晶体 *K* 上; 另一路透过分光镜 *R* 后经全反射镜 *M* 反射沿原路返回至分光镜 *R* 反射后, 光束也通过倍频晶体 *K*。适当调整两束光通过倍频晶体 *K* 时的交角, 同时适当调整倍频晶体 *K* 的方位角, 使得两光束单独通过倍频晶体时, 由于二者分别与晶体不匹配, 并不产生倍频光; 当两束光同时通过倍频晶体, 且合成光束与晶体匹配时, 则产生倍频光。应该指出的是, 如果两束光分别与晶体匹配, 但不同时通过晶体, 即在时间上不重叠, 将失去了光栅取

样的意义。

正如文献[5, 6]所指出的那样, 经光栅 P 衍射的那束光已被光栅取样, 换句话说, 经光栅 P 不同位置衍射的激光引起的延迟 Δt 为

$$\Delta t = \frac{\Delta l}{c} = \lambda N x c^{-1}, \quad (1)$$

式中 c 为光速 ($\mu\text{m/s}$), Δl 为在 x 坐标点光栅取样时, 某一级衍射光的光程差 (μm), N 为光栅条数 ($1/\text{mm}$)。因此, 在倍频晶体 K 中两路光脉冲在不同的横向位置脉冲的重叠情况是有差异的。这就是说, 在倍频晶体 K 中产生的倍频光的光程横向分布与光脉冲宽度有关。正如作者在文献[5]中得出的结论, 倍频光的横向光斑分布是被显示的激光脉冲的自相关函数。若用光栅一级衍射, 其被显示激光脉宽的半宽度 τ (ps) 表示为

$$\tau = \frac{\sqrt{2}}{2} \lambda N c^{-1} \left(\sqrt{1 - \frac{\lambda^2}{d^2}} \right)^{-1} x \approx 1.48x, \quad (2)$$

式中 λ 为被显示的激光波长 (μm); x 为倍频光光斑的横向半宽度 (μm); d 为光栅常数; 其它符号意义同上。若用光栅二级衍射, 被测激光脉冲的半宽度为

$$\tau = \sqrt{2} \lambda N c^{-1} \left(\sqrt{1 - \frac{\lambda^2}{d^2}} \right)^{-1} x \approx 3.6x, \quad (3)$$

式中唯 x 取值是二级衍射时的数值与一级衍射时的数值不同。

三、仪器调试及特点

本仪器用二极管阵列 V 作为接收器记录倍频光的横向光强分布, 用普通示波器显示出自相关函数曲线的半宽度, 再由(2)式或(3)式即可得到被测激光脉冲宽度值 τ , 这种测量是实时显示的。

应该指出的是, 在测量快脉冲时, 二极管阵列装置必须控制被测激光器的触发信号, 借以进行外同步。本测量仪的二极管阵列装置可与激光器外同步; 也可不与激光器连接而自行内同步, 只是在捕捉信号时有一定的随机性, 实验表明, 可捕捉信号的几率是很大的。另外, 也可以不用二极管阵列接收, 而采用照相法或直接观测光斑大小也可应用本测量仪, 使仪器成本降低。

本仪器中的倍频晶体的光轴设计在水平平面内, 只要调节水平转动(不同调俯仰)便可以调好倍频晶体与 A 、 B 两路同时满足匹配角的要求, 显然, 该仪器调节简单、方便。

当光路调好后, 若在 M 和 R 之间插入一平板玻璃, 改变该光路的光程, 在二极管阵列 V 前面的 $0.53 \mu\text{m}$ 倍频光光斑会向左移动; 如在 P 和 R 之间插入平板玻璃, V 前面的 $0.53 \mu\text{m}$ 倍频光光斑会向右移动, 可明显地看出光脉冲延迟时间和倍频光斑位置的对应关

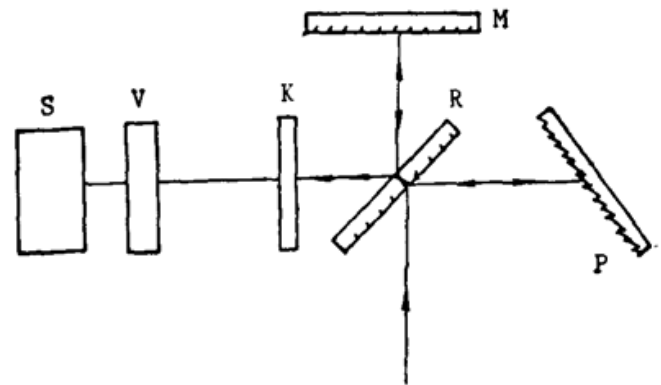


Fig. 1 Schematic of the real-time pulse-width measuring instrument

P—grating, R—beam splitter, M—mirror, K—doubling frequency crystal, V—diode array, S—oscilloscope

系。这种观察方法既是检查光路是否调好的方法,也可作为演示超短光脉冲传播的方法,简单、直观、易调。

该显示器的特点是:仪器外形尺寸小巧紧凑:200×300×200 mm,操作简单,随处可用,仅重1 kg;实时测量,方便直观;可测能量>2 mJ的光脉冲,灵敏度高,可直接测试石榴石锁模激光振荡器输出的激光脉冲宽度;可测试单个激光脉冲或串脉冲;测量范围2~30 ps,时间分辨率为2 ps,适当设计光路或改变仪器中的光栅常数,可扩大测量范围;二极管列阵可不与被测激光器外同步,给某些测量带来很大方便。

此方法的不足之处是被测激光光斑须有一定的均匀性,否则会引进一定的测量误差。

四、测试实例

应用本显示仪为上海科学技术大学测量了一台石榴石被动锁模激光器的激光输出特性,其激光脉冲的自相关函数曲线如图2(a)所示,被测激光脉冲半宽度为 $\tau=21$ ps;图2(b)是用照相机在二极管列阵前摄得的 $0.53\mu\text{m}$ 光的光斑照片。图2(c)、(d)是分别在P、R和M、R之间插入平板玻璃后光斑移动的照片。

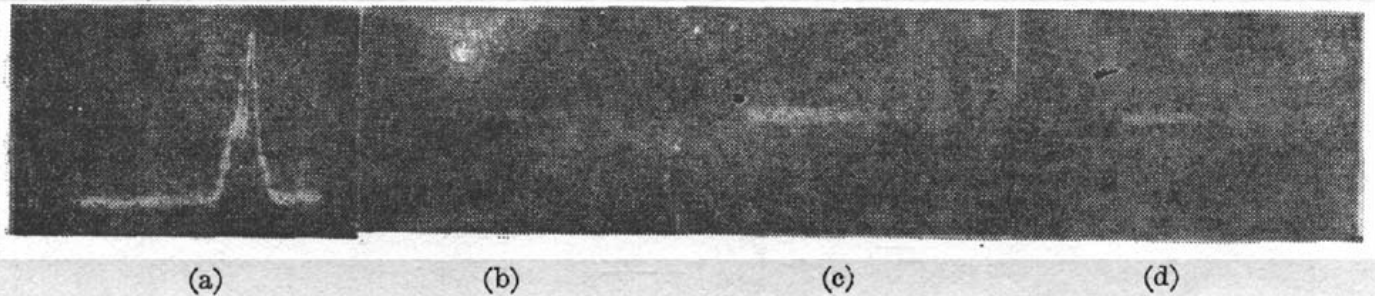


Fig. 2 Output characteristics of a mode-locked Nd:YAG laser

使用此显示仪还为上海光学精密机械研究所光计算测试研究实验室一台碰撞锁模石榴石激光器输出脉宽进行了测量,其输出激光脉冲的自相关函数曲线如图3所示,被测激光脉冲半宽度为 $\tau\approx 8$ ps。其输出能量为3 mJ。

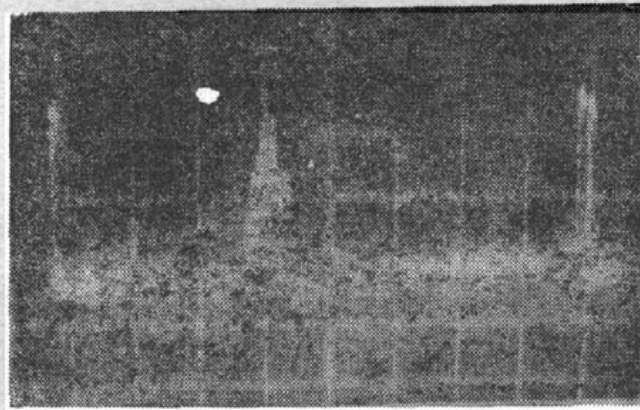


Fig. 3 Self-relative curve of output light pulse from a colliding pulse mode-locked Nd:YAG laser

五、精度分析

影响测量精度的误差源主要有四个方面:(1)关于光栅色散;(2)被测激光束的发散角;

(3) 被测激光束的光斑不均匀; (4) 二极管列阵对倍频光光斑测量的精度。下面分别予以分析。

(1) 钕玻璃锁模激光器输出的激光谱宽约 70 \AA , 光栅刻线 600 l/mm , 光栅到倍频晶体的距离为 150 mm , 因此, 色散角约 4 mrad , 光斑由光栅到倍频晶体扩大 0.6 mm 。实际上, 由于倍频效率对匹配角很灵敏, 光线角度偏离 1 mrad , 倍频效率已明显降低, 偏离 3 mrad , 倍频效率已相当低。所以, 色散角在 2 mrad 以内的光线方能引起测量误差, 所造成的测量误差的光斑扩大 0.3 mm , 脉宽误差为 $\Delta\tau = 1.48 \times 0.3 = 0.45 \text{ ps}$ 。测 YAG 锁模激光器输出的脉冲时, 由于激光谱宽很窄, 色散造成的误差可以忽略。

(2) 被测光束发散角一般不超过 2 mrad , 即使发散角较大, 由于倍频效率对匹配角敏感, 也只有偏角在 2 mrad 以内的光线才能引起误差, 所以, 发散角引起的误差也只能为

$$\Delta\tau = 1.48 \times 0.3 = 0.45 \text{ ps}。$$

(3) 由于光斑不均匀是一种复杂的情况, 故引起的测量误差比较难以计算。但若被测激光是 TEM_{00} 模, 则可以认为光斑中的光强分布是高斯型。对这种光斑不均匀造成的误差分析清楚后, 对其它类型光斑不均匀性造成的误差就会有一个量的概念。高斯型光斑可表示为^[1]:

$$I_{10}(x) \propto \exp[-(4 \ln 2)x^2/\tau_2^2], \quad (4)$$

式中 τ_2 为入射到脉宽仪的被测高斯光束的光斑半宽度。倍频光能量为

$$\begin{aligned} I(x) &\propto \exp\left[-(4 \ln 2)x^2 / \left(\frac{\tau_2}{\sqrt{2}}\right)^2\right] \exp[-(4 \ln 2)x^2/\tau_1^2] \\ &= \exp\left[-(4 \ln 2)x^2 / \left(\frac{\tau_1 \tau_2}{\sqrt{\tau_1^2 + \tau_2^2}}\right)^2\right]。 \end{aligned} \quad (5)$$

此时测得的脉冲宽度

$$\tau_1 = (\lambda N / \sqrt{2} c \cos \alpha) \frac{\tau_1 \tau_2}{\sqrt{\tau_1^2 + \tau_2^2}} = 1.48 \frac{\tau_1 \tau_2}{\sqrt{\tau_1^2 + \tau_2^2}}, \quad (6)$$

而

$$\tau = 1.48\tau', \quad (7)$$

所以误差为

$$\Delta\tau = \tau_1 - \tau = -\tau \left(1 - \frac{\tau_2}{\sqrt{\tau_2^2 + 2\tau_1^2}}\right)。 \quad (8)$$

若 $\tau_2 = \tau_1$, 则 $\Delta\tau = -0.41\tau$ 。

$\tau_2 = \tau_1$ 意味着入射到倍频晶体上的 $1.06 \mu\text{m}$ 光斑宽度和倍频光光斑宽度相同, 若 $\tau_2 = 5\tau_1$, 则 $\Delta\tau = -0.04\tau$, 若 $\tau = 10 \text{ ps}$, 则 $\Delta\tau = -0.4 \text{ ps}$ 。一般地, 使 $\tau_2 = 5\tau_1$ 是容易作到的, 也可以作到 $\tau_2 = 10\tau_1$, 此时 $\Delta\tau = -0.01\tau$, 若 $\tau = 10 \text{ ps}$, $\Delta\tau = -0.1 \text{ ps}$, 可见, 光斑不均匀带来的误差一般不大于 1 ps 。

(4) 二极管列阵对倍频光斑宽度的测量精度和测量结果也有影响。本文所用的列阵结构造成的误差 $\Delta\tau = \pm 1.48 \times 0.07 \approx \pm 0.1 \text{ ps}$ 。

基于以上分析, 本显示器的测量误差约 1 ps , 可认为小于 2 ps 。

总之, 本仪器的基本原理有别于国外已申请的专利^[7]。仪器的测量误差 $< 2 \text{ ps}$ 已满足当前我国激光研究中的超高速照相测量要求, 该仪器将会有一定的推广价值。

本工作曾与邱佩华副教授进行过不少有益的讨论;王文耀同志及上海科技大学杨天龙同志在测试方面给予不少帮助;仪器的机械结构由余志祥同志设计;上海光学仪器研究所提供了平面光栅,在此一并致以谢意。

参 考 文 献

- [1] M. R. Topp *et al.*; *J. Appl. Phys.*, 1971, **42**, No. 9 (Aug), 3415.
- [2] G. C. Vogel *et al.*; *IEEE J. Quant. Electron.*, 1974, **QE-10**, No. 9 (Sep), 642.
- [3] M. A. Dagaay, A. Savage; *Opt. Commun.*, 1973, **9**, No. 2 (Oct), 212.
- [4] 高福源等;《中国激光》, 1983, **10**, No. 2 (Feb), 93.
- [5] 高福源,陈淑琴等;《光学学报》, 1984, **4**, No. 5 (May), 445.
- [6] 高福源,陈淑琴;《中国激光》, 1985, **16**, No. 3 (Mar), 169.
- [7] USP, 1984 (Sept. 18), No. 4472053.

A real-time pulse-width measuring instrument using grating sampling second-harmonic method

CI EN SHUQIN AND GAO FUYUAN

(Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Academia Sinica, Shanghai 201800, China)

(Received 25 June 1990; revised 26 December 1990)

Abstract

Theory, characteristics and precision analysis of a real-time pulse-width measuring instrument using grating sampling second-harmonic method are described in this paper. It is shown that this instrument will have a wide applications.

Key words: grating sampling.