

微 微 秒 光 取 样

周 旋

(中国科学院半导体研究所)

一、问题的提出

在物理学的研究中,我们会遇到各种瞬息变化的现象。为了研究和运用这些短促的物理过程,如能将它们作为时间的函数,直接显示在示波管的屏幕上,无疑是最方便不过的了。在显示高速波形的现有设备中,最常用的是行波示波器和取样示波器。尤其是后者,由于其通频带宽,灵敏度高以及其他一些优点,已成为目前观测高速波形的最有效、最直观的仪器。但是能否利用商品取样示波器直接观测显示微微秒量级的光波信号呢?回答是否定的,主要原因如下:第一,虽然商品取样示波器的最高带宽已达18GHz(相应的上升时间为20ps),但由于激光技术的进展,目前已能产生比现有取样示波器响应时间更短的超短激光脉冲。也就是说,现有取样示波器的带宽对于显示宽度为几十微微秒或更窄的激光脉冲,已嫌不够。第二,现有商品取样示波器只能观测显示电信号。对于任何其他非电信号(包括激光脉冲),如欲用取样示波器观测,首先必须通过变换器转换为电信号。第三,大多数取样示波器仅能显示重复的信号波形,借助实时取样,可以观测单次波形,但仅限于低速波形。最后,现有取样示波器的输入动态范围太小,一般为 $\pm 1\sim 2V$,故不能直接测量幅度较大的功率脉冲。

为了测量超短激光脉冲,已经出现了多种方法,其中普遍应用的是双光子荧光方法和微微秒条纹照相。然而,这些方法都不是对被测信号波形的直接显示,于是问题再次提到了我们的面前:能否将现有取样示波器加以革新,使之也能直接显示光波信号波形呢?近几年来,人们在这方面进行了不少探索研究,终于将激光技术同电信号的取样技术相结合,发展了一种原理新颖的光波测量仪器——微微秒光波取样示波器,这是在波形显示技术方面取得的重大进展。可以预料,随着光波取样示波器性能的日臻完善和普遍应用,必将大大推动对高速物理现象的研究。

二、光取样的基本问题点

从上面的叙述可知,光波取样示波器必须着重解

决以下几个问题:

1. 大大扩展系统通频带(或缩短响应时间),以便显示微微秒量级的超短脉冲。

2. 为避免光电倍增器、光电二极管之类转换器影响系统频宽,直接对光波信号取样。

3. 能显示单次激光脉冲。

但是在技术上解决上述每一个问题都是比较困难的。全面解决这些问题,不可避免地将使测量系统变得十分复杂。正是基于简化测量系统的考虑,在一定的光波取样系统中,总是根据具体观测对象,侧重解决上述有关问题。

从取样示波器的基本理论可知,取样示波器的带宽主要由取样门的响应时间和取样脉冲的宽度所决定。为了展宽取样示波器的通频带,就必须缩小取样脉冲宽度,并且相应地采用响应时间极快的器件作为取样门。对于光取样,情况也是如此。在光波取样系统中,取样脉冲可以仍然是用高速半导体器件产生的窄电脉冲(通常由阶跃恢复二极管对雪崩晶体管产生的电流脉冲整形获得),由此构成电脉冲选通的光波取样系统。这种光波取样系统除了取样门部分外,与普通的电信号取样示波器雷同。当然,若直接采用超短激光脉冲(其宽度要比上述阶跃二极管整形所获得的电脉冲小一至两个数量级)作为取样脉冲,由此构成的光脉冲选通的取样系统将有可能比上述电脉冲选通的取样系统获得更高的时间分辨率。如文献[1,2]介绍的光波取样示波器,便是直接采用由锁模钕玻璃激光器产生的宽度为5ps的红外($\lambda = 1.06\mu\text{m}$)激光脉冲作为光开关脉冲,这些系统能成功地显示宽度为10~30ps的光波信号。在这方面还有潜力,目前已能用钕玻璃锁模加上脉宽压窄技术产生亚微微秒脉冲,如果有相应的光开关,光波取样系统的频宽可望进一步提高。

在普通电信号取样示波器中,用高速半导体二极管(通常为肖特基二极管)构成取样门,其最快响应时间约为20ps。在光波取样示波器中,则采用对某一特定波长的光(即被测对象)直接作出响应的光敏器件作为取样门。如文献[3]介绍了一种掺镉高阻GaAs材料作成的光敏电阻,其暗电阻为45M Ω ,在被特定波长($\lambda = 0.9\mu\text{m}$)的光照射后,电阻迅速降至36k Ω 。电阻值的这种巨大变化等效于开关二极管“通”、“断”两

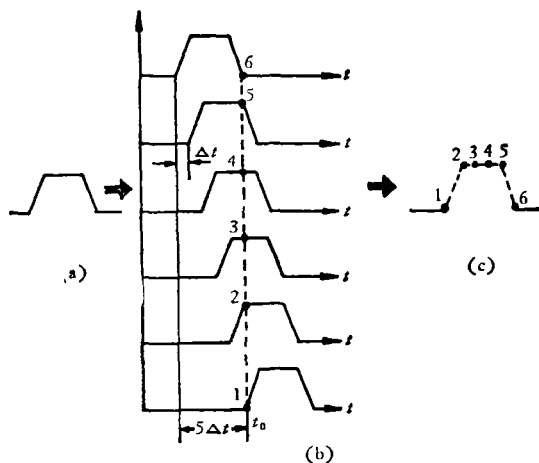


图1 对单次信号的取样

个状态,因此这种光敏电阻可以很方便地直接用作对该光信号作出响应的光取样门,其响应时间取决于所用半导体材料中自由载流子的寿命.文献[1,2]介绍了另一种光取样门,它是由置于两个正交偏振器之间的CS₂盒构成.这种光闸的响应时间更快,主要限制是由CS₂克尔效应引起的弛豫时间(1.8ps).

在光波取样系统中,由于采用具有极快响应时间的光敏器件构成对被测光信号同时进行检测和取样的光取样门,而无须在常规光波测量技术中那样,先通过光电二极管之类变换器对光信号进行转换,然后再通过线路传输把转换成的电信号送入示波器进行取样显示,所以避免了光电转换器和传输线路对整个测量系统响应时间的影响.因而直接光取样系统通常具有更高的带宽.

若被测光信号系重复波形,对这种信号的显示可采用常规的重复信号取样技术;若被测信号为单次瞬变过程,必须设法将单次出现的单个光信号加以变换,使之成为许多个形状相同,但在时间关系上彼此相差一个固定时间 Δt 的一组信号,而后在同一时刻 t_0 对这一组信号进行取样.由于这一组信号是从同一波形获得的“复制品”,它们波形相同,所以在 $t = t_0$ 时刻从各个“复制”波形上取出的幅度“样品”,实际上代表了原单次信号波形上不同部分的幅度.只要取样时间足够短,取样点数(即复制波形个数)足够多,即满足取样定理的要求,则这些幅度“样品”的包络就复演原信号波形形状.对单次信号的取样如图1所示.图1(a)系被测单次波形;图1(b)表示从被测单次波形(a)获得的“复制”波形(为简单起见,图中仅画出6个“复制”波形).这些“复制”波形彼此相差一个固定时间 Δt (称作步进延时).在 $t = t_0$ 时刻同时对这6个“复制”波形取样,取样所得“样品”信号幅度与取样瞬时的信号幅度成比例,它们的包络复演原单次信号波形,如图1(c)示.所以对单次光信号的取样,关键问题是如何

从一次出现的信号波形获得具有步进延时的多个复制波形.关于这个问题,我们将通过实际的光取样系统予以介绍.

三、典型微微秒光波取样系统

已经出现各种程式的光波取样系统,如有电脉冲选通和光脉冲选通的光波取样示波器之分.在电路结构的安排上有自成一体作成一个整机的;也有仅将实现光取样的部分作成探头(如同普通取样示波器的取样头),然后通过软性电缆与商品取样示波器连接运用.下面通过两个典型的微微秒光波取样系统的介绍,进一步阐明光取样的原理.

1. 电脉冲选通的光波取样系统

图2表示电脉冲选通的光波取样系统^[3]的框图,它基本上是一个典型的电信号取样示波器,不过原来的电波形取样门已为光波取样门所代替,仪器的其余部分大致相同.

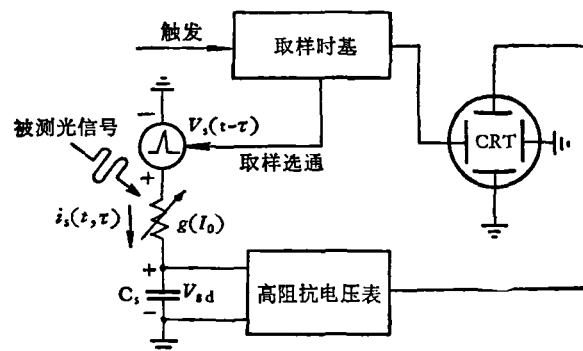


图2 电脉冲选通的光波取样系统

在图2所示光波取样系统中,取样门系由掺镓高阻GaAs材料制作的光敏电阻构成,其电导是光强的函数,写作 $g(I_0)$.未受光照射时,其暗电阻值为45M Ω ;当被0.5W,0.9 μm 的人射光照射时,光电阻降为36k Ω .该光敏电阻直接接受被测入射光信号 $I_0(t)$ 的照明.取样门由短的电取样脉冲 $V_s(t)$ 选通, $V_s(t)$ 受取样时基的控制.仅当取样脉冲选通期间,在取样电阻内才有电流 i_s 流通.电流 i_s 与取样脉冲幅度和入射光的强度成比例.我们用 t 表示实际时间,用 τ 表示取样瞬时.取样电容 C_s 对 i_s 进行积分,于是在电容 C_s 上建立一个与取样瞬时光强度成比例的直流电压 V_{sd} .假定光敏电阻的电导 g 与入射光强 I_0 成比例,即

$$g(t) = kI_0(t), \quad (1)$$

式中 k 为常数,上式未考虑电荷贮存效应和光电导衰减时间效应.令取样脉冲宽度为 t_s ,若 t_s 比最小电路时间常数 C_s/g_{max} 还小得多,即 $t_s \ll C_s/g_{\text{max}}$,那么在取

样时间 t_s 内, C_s 可以考虑作短路。因此, 取样电流 i_s 由下式给出:

$$i_s(t, \tau) = V_s(t - \tau)g(t). \quad (2)$$

或者用入射光强 I_0 表示:

$$i_s(t, \tau) = kV_s(t - \tau)I_0(t). \quad (3)$$

取样电容 C_s 对 i_s 积分, 从 C_s 上得到取样电压 V_{sd} 为

$$V_{sd} = \frac{1}{C_s} \int_{-\infty}^{\infty} i_s(t) dt. \quad (4)$$

设为理想取样门, 当取样脉冲不选通时 $i_s = 0$, 即

$$i_s = 0 \begin{cases} t < \tau, \\ t > \tau + \tau_s. \end{cases} \quad (5)$$

将 (3) 和 (5) 代入 (4), 得到

$$V_{sd} = \frac{k}{C_s} \int_{\tau}^{\tau + \tau_s} I_0(t) V_s(t - \tau) dt. \quad (6)$$

式 (6) 是相关积分, 因此 $V_{sd}(\tau)$ 是 V_s 和 I_0 的互相关函数。在取样系统中, $V_{sd}(\tau)$ 用高输入阻抗的电压表测量, 并以一个亮点的形式显示在示波管的荧光屏上。每取样一次, 得到光波信号的一个幅度“样品”。由于每次取样后, 时基自动增加一个很小的量(步进延时), 这样当光信号重复输入时, 就相继取出信号波形上不同部分的幅度“样品”。原来的光波信号则被转换成等效的电波形 $V_{sd}(\tau)$, 并在等效时间变量 τ 中被充分展宽, 因而可用低频电路处理。

光波取样门的阶跃响应取决于所用光敏电阻光电导的弛豫时间。为了取得快速响应, 所用材料中自由载流子寿命必须短, 迁移率应该高。为此常采用掺铊的高阻 GaAs 材料制作光取样门所用的光敏电阻。

在本取样系统中, 同光敏电阻有关的固有寄生电容被考虑作取样电容 C_s 的一部分。在常规测量中, 必须将光电检测器与同轴电缆连接, 然后将电信号传送到示波器显示。这样作不容易取得很高的带宽。杂散电容、引线电感的存在, 倾向于降低光电检测器的固有带宽。而上述直接光取样, 是将光电检测器与取样门的功能组合在同一器件——光敏电阻中实现, 大大减少了对宽带电路的需求。事实上, 寄生电容 C_s 被有意识地用作执行式 (4) 积分的积分电容。

由阶跃二极管构成的取样脉冲发生器, 由 GaAs 光敏电阻构成的光取样门以及由场效应晶体管和集成运算放大器构成的高输入阻抗和高增益交流放大器, 被共同置于一个探头结构内部, 该探头的馈电以及信号传输通过电缆与一个商品取样示波器连接, 于是便形成了能直接观测光波信号的光波取样系统。实践证明, 这是直接显示微微秒激光脉冲的一种比较简单可行的方法。

2. 单次微微秒光波取样系统

G. C. Vogel 等人先后提出了利用光散射介质^[1]

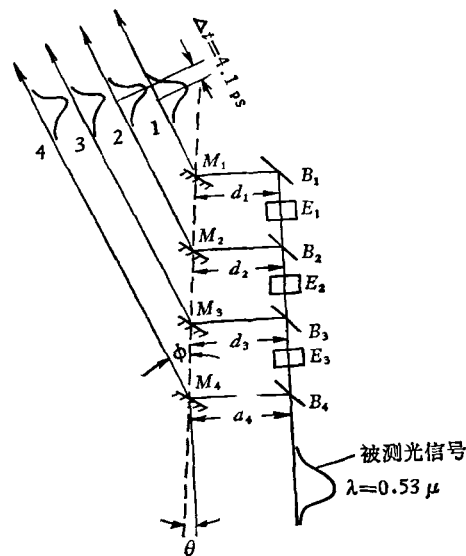


图3 从单次波形获取多个“复制”信号的多道光束分离器装置

和光分束器装置^[2]显示单次微微秒光脉冲的方法。借助光散射介质或光分束器装置, 可从单次光信号获得多个形状相同的“复制”信号。各个“复制”信号的形状与原单次信号波形相似, 只是在时间上彼此被分离开了(相差几个 ps), 如图 3 和图 4 所示。

在图 3 中, 所测单次光信号被定向送入分束器系统。通过适当的光路设计, 从单次信号分离成在时间上相继延迟 4.1 ps 的 N 个(图中 $N=4$)“复制”信号。整个光分束器系统由 N 个均匀配置的分束器 B_i , N 个反射镜 M_i 和 N 个起脉冲固定延时作用的平行度很好的玻璃块 E_i 组成。每个分束器 B_i 的背面敷有极薄(0.25 mm)的抗反射的玻璃层, 未敷镀膜抗反射玻璃层的正面对 45° 入射的垂直偏振光信号的非涅耳反射

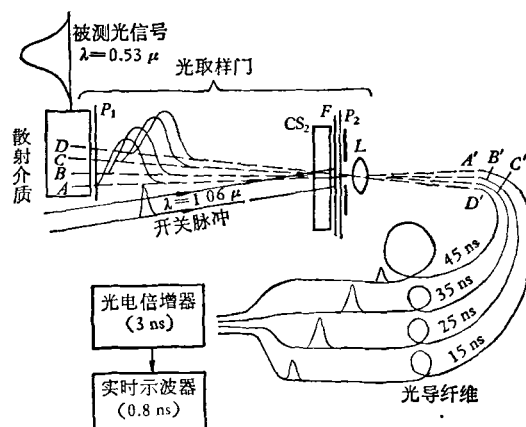


图4 采用散射介质从单次波形获取多个“复制”信号的光取样系统

率约为 5.3%。各个反射镜 M_i 这样安装,使得从分束器 B_i 反射的光线达到 M_i 上的各点呈一条直线,该直线与原入射信号的传播方向构成一个角度 θ 。在没有玻璃块 E_i 并忽略分束器 B_i 的厚度时,通过旋转镜子 M_i ,可以获得同步的“复制”信号,这些信号相继延迟 Δt 。角度 θ 满足下式:

$$\cos \phi = \cos \theta - \sin \theta. \quad (7)$$

改变 ϕ , 就能改变“复制”信号间的延迟 Δt 。如果在分束器 B_i 之间插入厚度为 d 的玻璃块 E_i , E_i 的两面均敷有抗反射层,以减小损耗和不希望的反射,则“复制”信号之间的延迟 Δt 由下式给出:

$$\Delta t = (d + 1.31l)(n_g - 1)/c. \quad (8)$$

式(8)中 l 是分束器 B_i 的厚度, n_g 是入射光在玻璃中群速度折射率。在本系统中选择 d , 使 $\Delta t = 4.1\text{ps}$ 。

另一种采用散射介质获得“复制”信号的光取样系统示于图 4。

整个系统由光散射介质、置于两个正交偏振器 P_1 和 P_2 之间的 CS_2 光闸、光导纤维延迟线、光电倍增器和普通实时示波器构成。被测的单个信号是波长为 $0.53\mu\text{m}$ 的绿光 $I(t)$ 。将被测脉冲送至盛有高度稀释乳剂(即散射介质)的小盒,该小盒每厘米散射绿光的 20%。单次绿光信号经由散射介质传播,在其传输路径的一系列分立点处,即图 4 中的 $A, B, C, D \dots$ 各点处,得到散射信号,它们与入射信号同步并具有与入射信号相似的波形。散射脉冲然后由透镜 L 聚焦并被馈至 N 条光导纤维延迟线的输入端处 $A', B', C', D' \dots$ (图中仅画出 4 条光导纤维)。在乳剂盒与透镜之间是由两个正交偏振器 P_1 和 P_2 以及 1cm 的 CS_2 盒所构成的光取样门。 $A, B, C, D \dots$ 各点间隔这样设计,使得由乳剂散射形成的各个“复制”光脉冲,在进入取样门时在时间上彼此相隔 3.9ps 。上述光取样门由锁模致激光器产生的宽度为 5ps 的红外 ($\lambda = 1.06\mu\text{m}$) 激光脉冲选通。当光闸在红外开关脉冲作用下打开时,图 4 中所示每一个散射绿光脉冲在极短时间内被取样。

由于进入光闸的散射脉冲具有步进增加的延迟,故从原始脉冲的前沿至后沿每隔 3.9ps 被取出一次幅度“样品”,共计 N 个。这 N 个幅度“样品”经透镜聚焦后送入 N 条光导纤维。光导纤维的长度这样设计,使得 N 个幅度“样品”信号经过光导纤维延迟线传输后将分别得到 $15\text{ns}, 25\text{ns}, \dots (10N + 5)\text{ns}$ 的延迟。因此, N 个“样品”信号将按时间顺序先后出现于光导纤维的末端。经过取样所得的“样品”信号频谱已大为压缩,可用响应时间稍慢(约 3ns)的光电倍增器检测,最后显示于上升时间为 0.8ns 的宽带实时示波器屏幕上。只要被测脉冲与光闸打开时间相比更长,满足取样定理要求,“样品”脉冲的包络就复演原始单次光脉冲的波形。

四、结 束 语

光取样示波器初步实现了人们长期追求的目标——直接显示光波信号波形。与普通电信号取样示波器相比,光波取样示波器可以获得较高的时间分辨率、较大的动态范围。并且由于光敏电阻一般具有线性的伏安特性,这就消去了普通二极管取样门由于二极管非线性特性所造成的波形显示畸变。然而必须指出,迄今出现的光波取样系统,只是根据特定测试对象设计的一些专用测量设备,性能尚不完善,远不能作为通用的光波显示仪器使用。但是,光取样示波器作为一种新的仪器概念,是富有生命力的。似乎可以这样说,光取样示波器的日臻完善,将迎来光电子学的全盛时代。

参 考 文 献

- [1] M. A. Duguay, A. Savage, *Opt. Communications*, 9-2 (1973), 212-215.
- [2] G. C. Vogel, A. Savage, M. A. Duguay, *IEEE J. Quantum Electron*, QE-10-9 (1974), 642-646.
- [3] J. R. Andrews, R. A. Lawton, *Rev. Sci. Instrum.*, 47 (1976), 311-313.

全国第一次核物理实验数据自动获取和处理会议在北京召开

我国第一次核物理实验数据自动获取和处理会议,于 1980 年 6 月 19 日至 25 日在北京召开。这次会议是在中国核学会领导和支持下召开的,主办单位是原子能研究所。有 27 个单位 75 位代表参加了会议。

中国核学会理事长、核物理学会筹备组长王淦昌,核物理学会筹备组副组长杨澄中和李寿椿等同志参加了开幕式。他们指出,加速研究和推广计算机技术在实验核物理领域中的应用,对促进核物理实验技术的现代化、赶超世界先进水平具有重大意义。

这次会议收到论文和报告共 54 篇(其中硬件 25 篇,软件 29 篇)。会上作了 43 篇学术报告,介绍了各单位在实验数据自动获取和处理方面所取得的成果和进展。近几年来,我国在某些方面不仅能用好从国外引进来的系统,扩充和改进它们,使之更适应实验的需要,而且还能自行设计和研制一些“在线”系统。有的系统已经鉴定投入使用;有的系统已试制成功正在考验;一些更大的系统正在研制之中。此外,应用软件的

(下转第 381 页)