

全息粒子径迹探测器

庄 杰 佳

亲爱的读者,当你看到“全息”二个字时,一定会想到全息照相——主体照片。当你带上特制的眼镜观看全息照片的时候,一定会有一种神奇的感觉,就仿佛进入了一个新的世界,前、后、左、右……,一种身临其境的感觉。我们看到的普通照片,是用照相机把物体表面反射来的光或物体本身发出的光(统称为物光)的强弱变化记录在底片上,再在照相纸上显现出物体的平面像。而全息照相术,不仅要在底片上记录下物光的强弱情况,同时还要把物光的位相也记录下来,也就是把物光的所有信息全部记录下来,并通过一定的手续,“再现”出物体的主体图像,所以称为全息照相术。

“记录全部信息”这是多么令人欢欣的结果啊!而且它具有如下的主要特点:

第一,由于全息照片记录了物光的全部信息,所以再现出来的物体形象,就和原来的物体一模一样,是一个非常逼真的立体像。这种立体像还具有普通的立体照片所没有的一些极为动人的特点:和观察实物完全一样,具有相同的视觉效应。例如,当观察者改变自己的观察位置时,图像的透视情况也和观察原来的景物一样地改变。如果从某一个方向观察时,一物被另一物遮住,那只需把头偏移一下,就可以绕过障碍物,看到被遮住的物体。……。

第二,在拍摄全息照相时,不论胶片的反差特性如何,再现出来的像和原来物体总是非常接近的。实验表明,在全息照相的再现像中,最亮的光强和最小可区别的光强之比,可达一万甚至十万倍,这在普通照相术中是不可能达到的。

第三,全息照片的每一部分,不论有多大,总能再现出原来物体的整个图像,就是说,可以把全息照片分成若干小块,每一块都可以完整再现原来的物像。

第四,全息照片易于复制。

……。

1948年英国科学家丹尼斯-盖伯(Dennis Gabor)为了提高电子显微镜的空间分辨率,提出了不用透镜的新成像原理,称为全息术(Holography)。它实际上是利用干涉原理来记录光波的全部信息。由于Gabor成像原理要求采用相干光源,因此,全息术直到六十年代初激光问世后才获得迅速的发展。任何光波都由它的振幅、偏振、相位和频率的分布唯一确定的,对于单色线偏振的光波,则简化为由振幅和相位分布确定。记录光信号的探测器如照相底片,光二极管等都只对光的振幅分布(光强分布)有反映,而把相位分布的信息丢失了。由物体散射的光波,它的相位分布实际上

是反映物体各点的相对位置的。如由人的鼻子和耳朵散射的光,它们到达照相机的物镜所经历的光程是不同的,这种不同在照相的底片上是得不到反映的。因此,普通照相不能得到立体的逼真像。要获得三维逼真的像就必须把散射的物光所带的全部信息记录下来。由光的干涉原理可知,光程不同的相干光在空间会发生干涉,产生明暗不同的干涉条纹,即外用干涉原理可把相位分布转化为强度分布,这样由照相干板记录下来的强度分布就不仅反映了物散射光的振幅分布,同时亦反映了相位分布,即把物的全部信息记录下来。盖伯全息术正是利用干涉原理的成像术。他利用偏振的相干光源发出的一部份光照明物体,另一部份光直接照到照相干板上构成一个相干背景,它与物体产生的散射光在干板处发生干涉,形成强度变化的复杂的干涉条纹。记录在干板上,经显影后带有复杂干涉条纹的干板称为全息图。在全息术中,直射到干板上的相干光称为参考光。它等效于一个参考坐标系,使经物体散射的光(称为物光)所包含的全部信息(振幅、相位等)在这一坐标系中获得确定的量的关系,并以代码形式(干涉条纹)记录在全息干板上。显然全息图与普通照相底片不同,从它上面不能直接看到物体的像,为了看到物体三维的像,必须再用相干单色光照明(称为再现光),透过全息图的光场中可得到物体的虚像和实像,此过程称为波前再现。因此,全息照相亦称为无透镜二步成像。由于全息图记录的干涉条纹密度很大,盖伯全息图中最大密度每毫米几千条。因此,干板是特制的超微粒干板(现在已有9000条/mm的干板)称为全息干板。图1a, b分别为盖伯全息照相的记录和再现光路示意图。

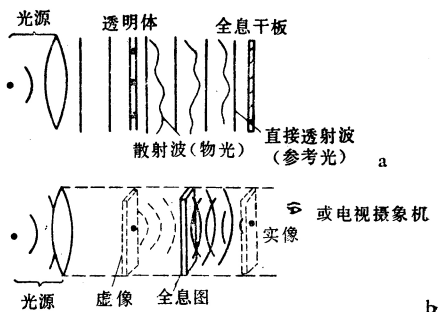


图 1a 盖伯全息照相记录光路的原理图

图 1b 盖伯全息照相再现光路的原理图

全息粒子径迹器就是采用全息术来记录粒子径迹的探测器,它实际上是用全息照相代替径迹探测器的

普通照相,这是一种最直观的探测手段。

全息粒子径迹探测器具有以下三个优点:

1. 超高空间分辨率,采用可见光激光器可达到 $0.3\mu\text{m}$,比通常照相术高1—2个量级;
2. 在保持超高空间分辨率的前提下,可实现大景深(可达几厘米—几十厘米)的探测,适合于探测寿命为 10^{-13} — 10^{-16} 秒的粒子的衰减和产生机理。
3. 具有很高的信息密度,可处理每秒 10^6 个粒子的束通量。

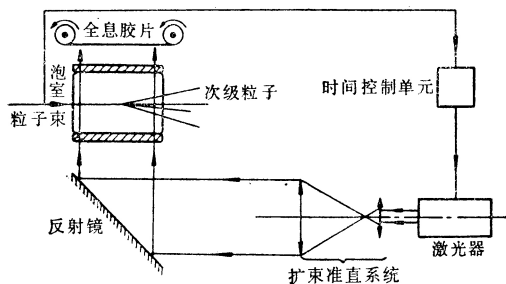


图2 全息泡室装置框图

图2是全息泡室装置的框图^[2]。它与图1a的主要差别是增加了时间控制单元,这是用来控制粒子触发和激光闪光之间的延迟时间的。显然,延迟时间越短,泡的尺寸就越小。再现光路同图1b一样。全息泡室的原理性实验已获得令人满意结果,其空间分辨能力已达到 $4\mu\text{m}$,景深近十厘米。目前在一张全息图上已能记录近300条的粒子径迹。图2是全息流光室的实验装置示意图,它与图2主要差别是采用了单独一参考光,并以一定的倾斜角照射到全息干板(或全息电束影胶片)上,它比盖伯全息图的记录光路稍微复杂。但是,如图1所示,盖伯全息图再现时,出现的虚像和实像,它们的中心都在全息图的轴上,当观察者对实像聚焦时,总是伴随有一个离焦的虚像;同样,对虚像聚焦时也看到离焦的实像。因此,像的质量将下降。采用图3的光路则可避免这一问题,这时实像和虚像是离轴的,提高了成像的质量。如果采用发散光束作为物光,还可使探测的体积大大增大。

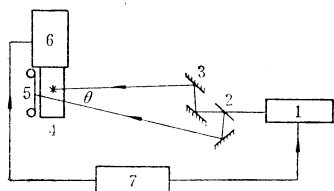


图3 全息流光室装置框图示意图

全息粒子径迹探测器对光学系统和探测器提出的一些特殊要求。

1. 激光器: 为了获得高质量的像,减少背景

噪声,要求激光器工作于基模,以得到光强分布较为均匀的光场。激光器的输出能量和脉冲宽度,主要由全息干板的灵敏度和粒子颗粒的速度所决定。对于Kodak全息干板,其灵敏度约为3尔格/cm²,相当于每

平方厘米接收 10^{12} 个波长为 6943\AA (红宝石激光器的工作波长)的光子。如果要获得颗粒的冻结像,则要求在激光脉冲持续时间内(闪光时间),颗粒的位移量不超过其尺度的几分之一。要获得整个径迹可采用全息摄影的办法解决。此外,为了得到大的景深,希望激光器输出光束的相干长度越长越好,但是,相干长度与脉冲宽度成正比例。因此实际上脉宽选取必须在二者兼顾折衷。至于激光波长的选取,为获得高分辨率和大景深,都要求记录时采用工作波长较短的激光器。但再现时,采用波长较大的激光器,则可使像获得放大,其放大率大致为再现光束波长与记录光束波长之比,这正是目前正在探索的全息显微镜的工作原理。

2. 光路安排: 除前面所讨论的,采用盖伯全息记录适于小径迹室,而双束(亦称离轴)记录适于大径迹室等之外,全息粒子径迹室的信号是由电离离子中心形成微径迹的散射光与相干背景光干涉产生的条纹,其它都归为噪声。噪声来源是多方面的,从光学系统看主要是光路元件缺陷、灰尘等引起的噪声和干板的颗粒噪声。前者可在光路设计中加入低通滤波器如针孔等空间滤波器。后者主要靠选用超微粒的均匀优质的全息干板。

3. 探测器: 粒子径迹探测器的工作物质应选取径迹形成较慢的,以利于粒子触发和激光闪光之间延迟时间的控制,如泡室可选用重液作工作物质。此外,探测器工作物质的光学不均匀性亦会给全息图带来噪声。这亦应尽量设法避免。

通常径迹探测器为了获得粒子的动量等信息,一般都置于外加磁场中,因此光在磁场中的法拉第效应亦是必须考虑的因素。通过合适地选取光束与磁场方向的夹角可把它的影响减少到最低限度。

全息粒子径迹探测器,由于利用了激光全息新技术,而使径迹探测器的主要性能指标得到十分显著地改善。它被认为是新发展起来的光子学,在高能物理和核物理得到应用的主要代表,发展十分迅速。短短两三年已由预先原理性的实验阶段进入工程试验阶段。实际上,由于全息术记录存贮的不仅是光的振幅空间分布,而且亦记录了光的相位分布,即也反映了介质的光学不均匀性。因此,原则上讲,荷电粒子通过介质,电离激发引起的介质光学不均匀性都可由全息术记录下来。随着全息术的发展,特别是真空紫外和X-射线全息术的发展,我们可设想直接把介质的这种光学不均匀性记录下来,这将是一种结构十分简单的新型粒子径迹探测器,它的前景是十分诱人的。