



全息照相

王永昭

(天津大学精密仪器系)

尽管照相技术已有上百年的历史,但在整个发展过程中除了处理方法和照相材料的逐步改进以外,在成像原理上却没有任何根本的变化。二十多年前,加博尔(D. Gabor)曾提出一种“波前再现成像”原理^[1],但由于当时缺乏合适的相干光源,这种革新得不到发展和推广。直到激光出现以后,这一新的照相原理才迅速复兴起来。现将这种波前再现成像原理——全息照相简要地综合介绍如下:

一、基本原理

人眼所以能看到物体,是由于物体被光源照射后,物体上每一个无穷小的点也如同是一个光源,以球面波的形式向四面八方辐射,这些反射波传到人眼里,人们便看到物体。如果采用一种方法使这些反射波保留在空间而把物体拿掉,可以想象,这时人们应该仍然可以看到原来的“物体”。全息照相就是利用这样一种原理来成像的。

全息照相和普通照相虽然都是用感光材料作为记录介质,但二者的原理却截然不同。普通照相在物体和胶片之间必须安放成像系统,在图1上给出了一个最简单的针孔成像的系统。对照相来说不管是复杂的摄影物镜或简单的针孔,其成像原理都是一样的。物体的反射光波只有通过针孔的那一部分才能到达底片上,结果物体上的一点只能投射到底片上某一对应点,因而在感光材料上形成了物体的二维像。

但是,光的传播是具有振幅和位相的波形。而通常用能量检测系统所检测到的光波只是它的强度(振幅的平方),而不是振幅和位相。普通照相底片上记录图像也是这样一种系统,所以只能是物体和底片之间对应点强度的记录,这仅仅记录了与振幅有关的信息,而丢失了位相部分。因此普通照相只记录了光波信息的一半。

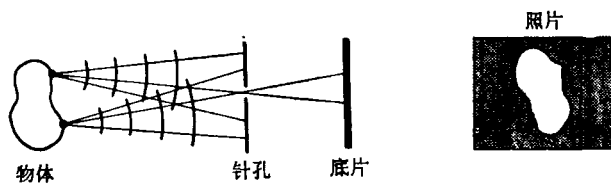


图1 普通照相原理

全息照相是把物体的振幅和位相都记录在感光材料上的,然后通过还原(再现)来看到物体的三维像。它在物体和底片之间不用安置任何成像系统(见图2),所以物体上的每一点所反射的光波将落在底片的整个表面上,也就是底片上的任一点都将接收到由物体表面任一点所反射的光波(当然,这只有那些能到达底片上的光波才有可能),从这里也就可以了解到为什么全息照片的任何一小块都能成完整的像的道理。

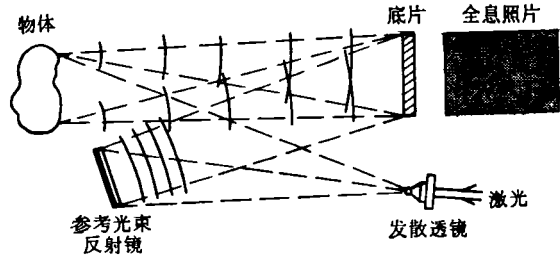


图2 全息照相原理

全息照相利用光的干涉原理^[2],借助一束参考光波使之与物波在底片上产生干涉,把物波的振幅和位相转换成强度的变化记录在感光材料上。

从干涉原理知道,假设有两列相干平面波,以某一倾角投射到屏上(见图3),这时屏上将出现一组均匀的平行的干涉条纹。条纹之间的间隔取决于两列波之间的夹角,条纹的明暗程度则取决于两列波到达屏上某处的位相差,当位相相同时,谓相长干涉,这时相当于屏上的亮条纹。如果两列波以相反的位相到达,假设两列波的振幅相等,则相消干涉,屏上出现暗条纹。在两列波既不同相又不反相的地方,则条纹的明暗程度介于上述两种极限情况之间。

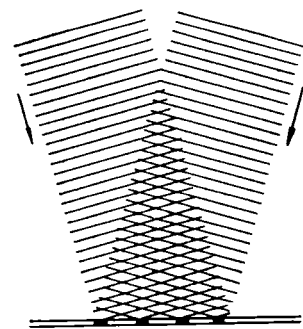


图3 两列相干平面波入射到屏上产生均匀的,平行的干涉条纹

依此类推,如果由复杂的物体反射的波与另一平面波相干时,也会产生相应的干涉条纹,只不过条纹的形状比较复杂罢了。在物波有最大振幅

的地方,干涉条纹反差最大,而在物波振幅小的地方,条纹反差也小。这样,由物体反射的光波振幅的变化,表现为被记录的干涉条纹反差的相应变化。如前所述,底片上某处条纹之间的间隔将取决于在该处发生干涉的物波和参考波之间的夹角。虽然光波的绝对位相不能测量,但两束光之间的位相差是可以精确地测定的。复杂物体反射的物波各点传播方向的不同,与参考波发生干涉的夹角也就不同。夹角大,条纹密;反之,条纹疏。所以物波位相的变化,表现为干涉条纹间隔相应的变化。

因此,无论是物波的振幅和位相,都可分别由记录的干涉条纹的反差和分布间隔的形式保存下来。如果用照相底片来记录这些干涉条纹,冲洗后就得到一张全息照片。当把这张全息照片放回原记录的位置上,并用记录时所用的参考光束来照明它,这时将再现出所记录的物体的像,如果原记录的物体还在的话,似乎不容易区分出那个是再现像,那个是原物。

为了进一步了解全息照片在相干光路中的再现特性,可以作如下简单的分析^[3-4]:

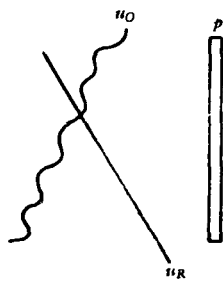


图4 波前记录

即:

$$T_a(x, y) = g[I(x, y)] = g[(U_0 + U_R)(U_0 + U_R)^*], \quad (1)$$

式中“*”号表示共轭复数, $T_a = g[I]$ 是反映了显影后乳剂的透射率与入射光强的关系。在一般情况下这关系是非线性的,但是我们可以适当地选取 U_R/U_0 这个数值,使曝光落在振幅透射率——曝光曲线的直线部分,如图8所示。这样就能实现线性关系,即方程(1)可以写成

$$T_a = k_0 - k_1 I, \\ T_a = k_0 - k_1 [U_R U_0^* + U_0 U_R^* + U_R U_0^* + U_0^* U_0], \quad (2)$$

这里 k_0 和 k_1 是常数。设参考波 $U_R = a_R \exp i \alpha x$ 是平面波, a_R 是常数,它与物波 $U_0 = a_0 \exp i \varphi$ 成一倾角入射到底片上。线性相移 αx 表示入射波在 X 维上是离轴的。分别代入(2)式得:

$$T_a = k_0 - k_1 a_R^2 - k_1 a_0^2 - k_1 a_R a_0 \exp i(\alpha x - \varphi) - k_1 a_R a_0 \exp -i(\alpha x - \varphi). \quad (3)$$

当用与记录时同样条件的参考光束来照明这张全

息照片,也就是将 $U_R = a_R \exp i \alpha x$ 乘于(3)式,结果通过乳剂所透射的光是:前面一、二两项是参考光波,第三项是直射光部分,而第五项和第四项为

$$k_1 a_R^2 a_0 \exp i \varphi, \quad (4)$$

$$k_1 a_R^2 a_0 \exp i(2\alpha x - \varphi), \quad (5)$$

是两个一级衍射波,(4)式就是入射物体波前的再现,方向与原物波一致。(5)式所描写的光波却是沿另一方向前进,与物波是共轭的。由于物体光波是发散的,所以 $\exp i \varphi$ 衍射为物体的一个虚像,而 $\exp i(2\alpha x - \varphi)$ 即是一个会聚波,衍射成物体的一个实像,而且其偏离方向要比原参考光波大,如图5所示。但是实像是个幻视像,里外是颠倒的。上述是一般全息照相过程所产生的特性。

研究使衍射光强集中到所需的再现像上,而使不需要的衍射像及透射光减低为零,这就是位相全息照片^[4]。在拍摄过程中光路的布置应尽量使其只观察到所要求的再现像。

全息照片可以用接触印像法进行拷贝,结果条纹的黑白相反,但再现仍为正像,因为这只不过滞后半个周期而已。

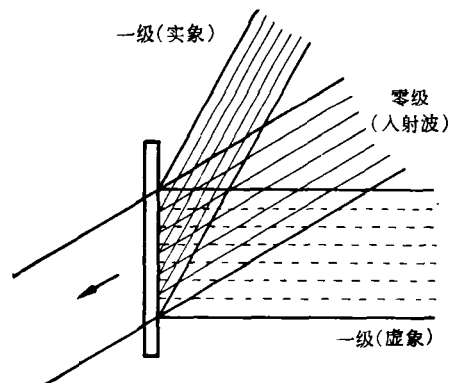


图5 全息照片在相干光路中所产生的衍射

二、全息照片的摄制

1. 摄制系统的稳定性:

由于全息照片的摄制过程就是把精细的干涉条纹记录在感光材料上,如果在记录过程中发生振动,将引起干涉条纹的混叠。结果必然导致像的衍射亮度下降,甚至完全看不到像。然而,要求所有的摄制装置完全保持不动也是不可能的。试验结果表明^[4],在记录时使条纹的移动量小于1/10的条纹间距是允许的。而通常三维物体的全息照片所要求的底片分辨率为800条/mm以上,即条纹间距为1.25μ。因此,在曝光过程中使干涉条纹的移动量保持在0.125μ以内即可。

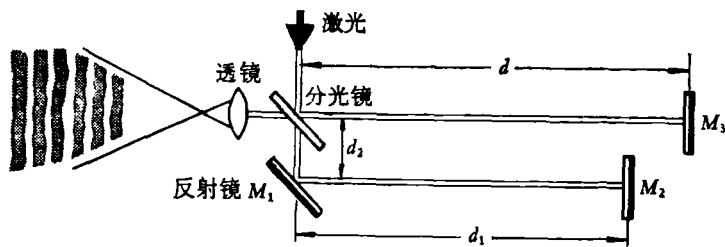


图6 稳定性的测量

这种稳定性的测定装置，可以利用全息照相的设备，把它布置成一个长臂的迈克尔逊干涉仪的结构型式来完成，如图6所示。在屏幕上观察这些干涉条纹，使在预定的曝光时间里，条纹的移动量保证在 0.125μ 以内。

为了使摄制系统的稳定性达到这个要求，工作台的防震、分光镜和反射镜的机械稳定性，工作室空气的流动情况以及温度的变化等因素，都必需加以适当地控制。甚至在曝光过程中如果高声谈话也会使像质恶化。

当然，如果采用脉冲激光器作为摄制光源，稳定性的要求就可大大降低^[6]。

2. 光源的相干性:

低功率的激光器一般有很好的相干性，但在全息照相中总要求有尽可能大的功率，这就必须牺牲一些相干长度。然而一张全息照片所能拍摄的物体的大小，又是被相干长度所限制的。因此，考虑这一因素是必要的。

上述用于测量稳定性的装置(图6)同样可以用来测定激光的轴向相干长度。当两臂的光程相等时，屏上出现最大反差的干涉条纹，然后拉长另一个臂(如 M_2)，直到干涉条纹消失，所移动的距离即为相干长度的一半。

激光的横向相干性通常可以直接观测激光束的横截面来确定，一般使它在 TEM_{00} 模式下工作。

脉冲激光器相干性的测量需要采用另外一种装置^[7]。

3. 光路系统的布置:

全息照相系统的布置是一个几何问题，考虑到再现时的照明方法和对再现像的不同要求而进行选择。由于系统中任一部分的微小变化都将引起记录中干涉条纹的变化，因此所用的光学元件愈少愈好。

一个三维的全息照相系统如图7所示。在底片分辨率较低的情况下，这种系统更是适用。

物光与参考光之间夹角的选择是光路系统中必需控制的重要因素之一。根据由两个平面波产生相长干涉，底片垂直 θ 角等分线推得的布拉格条件:

$$d = \lambda / 2 \sin \frac{\theta}{2}$$

这里 d : 干涉条纹的间距;

λ : 光波波长;

θ : 两束光波之间夹角。

应使物波与参考波之间的最大夹角控制在照相底片分辨率的极限之内。

为了提高光束发散后的均匀性，在发散透镜的焦点上加一个针孔滤波器，针孔 D 的大

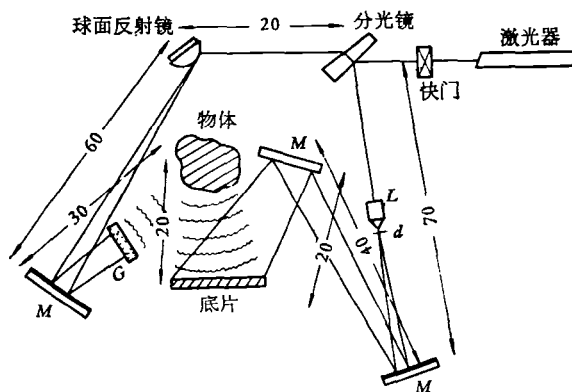


图7 三维全息照相系统示意图

d : 针孔滤波器; M : 平面反射镜; L : 显微物镜;
 G : 毛玻璃

小根据“瑞利准则”，用如下方程决定:

$$D = 2(1.22)\lambda / d \cdot f_i$$

这里 λ : 光源波长;

d : 入射到透镜上光束的直径;

f_i : 透镜的焦距。

使物光束通过一个漫射器(如毛玻璃或半透明的塑料板)，然后照射到物体上，它的作用不但使光束分布均匀，同时使底片上所接收到的物波信息大为丰富起来。结果使衍射场变得更加清晰均匀。

底片装好后，最好稍等2分钟，使整个系统稳定后再进行曝光。

4. 底片的曝光和处理

全息底片的特点是银盐极细、分辨率很高(普通照相底片的分辨率仅有50条/mm左右)，而全息底片则有数百条/mm~3000条/mm，同时希望有足够高的反差和一定的清洁度。大部分的感光剂对蓝、绿光较为敏感，而对氦-氖激光器所发出的红光则较不灵敏。这就需要增感处理。至于底片是否适于自己工作中所选用的光源，可以从了解底片的光谱敏感度的特性曲线来确定。

全息照片的理想曝光是希望通过全息图的光束具

有最大的衍射, 一般来说也就是由物光和参考光相干所形成的条纹反差, 当用来使底片曝光时, 将落在 T/E 曲线的直线部分的中点附近(如图 8 所示)。

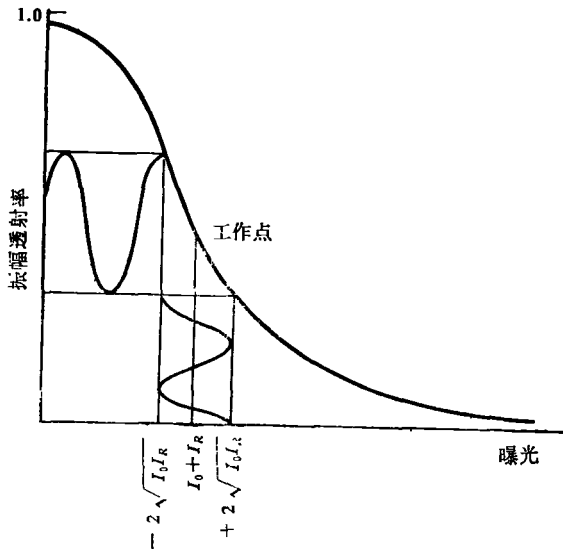


图 8 透射率/曝光曲线

为此, 必须合理地选取物光和参考光的强度比例。设 $U_0 = a_0 \exp i \varphi_0$ 为物波, $U_R = a_R \exp i \varphi_R$ 为参考波。两列波在感光面上发生干涉, 其某一点上的人射光强是:

$$I_F = |U_0 + U_R|^2 = a_0^2 + a_R^2 + 2a_0a_R[\exp i(\varphi_0 - \varphi_R) + \exp i(\varphi_R - \varphi_0)],$$

$$I_F = I_0 + I_R + 2\sqrt{I_0I_R} \cos(\varphi_0 - \varphi_R),$$

I_F 为入射到感光面上的强度。考虑在两种极限情况下即可。所以

$$I_F = I_0 + I_R \pm 2\sqrt{I_0I_R}.$$

假设选取物光强度等于参考光强度:

$$I_0 = I_R, \text{ 即: } I_{F\max} = 4I_0 \text{ 和 } I_{F\min} = 0.$$

可见曝光将落到 T/E 特性曲线的直线部分之外。对于不同底片的特性曲线也是不同的, 为了得到理想的透射率, 可以根据其曝光特性曲线进行实验, 以得到较好的透射率。

全息干版的冲洗配方出厂时都带有说明。关于底片的处理过程已有详细的介绍^[5], 但不完全适用。由于感光速度和分辨率是互相矛盾的, 所以全息干版的感光速度都很慢。为了提高感光速度, 可以在曝光之前将底片放进 5% 的三乙醇胺水溶液中处理十几秒钟, 在暗房凉干后再使用。这也起到一种消除内应力的“时效”作用。处理过程的每一步都必需细心操作, 尽可能不使乳剂承受压力, 以避免乳剂面引起变形, 否则将损失像的衍射亮度和产生畸变。采用漂白处理来得到位相全息照片, 已普遍用来作为提高影像衍射效

率的有效方法。并可以分别采用加厚漂白液或减薄漂白液来校正曝光量或处理的失误。漂白后全部银粒子从乳剂中除去, 乳剂中折射率的变化看来与浮雕的高度有关。不过漂白后底片的噪音相应增大。

底片水洗后应让它自然阴干, 为了提高阴干速度可在 50% 的乙醇水溶液中洗浸一分钟。

三、全息照相的发展近况及其应用

六十年代初期, 利思和厄帕特奈克斯就采用全息照相原理摄制了三维物体的高质量再现像, 取得这一成就除了利用激光器作为光源外, 还由于改用了离轴的参考光束以及在光路中增加了漫射器。与此同时, 也已研制了可以从点光源发出的白光来再现的“体积全息照片”^[9]。

到了 1964 年后, 在世界许多国家中全息照相似乎成了光学领域中最热门的研究课题, 以后的三年中一直都有创新, 并开始转入了应用的基本研究。就在这一期间研究了好几种彩色全息照相技术。我国科学院物理研究所有一个小组就在这期间开始了有关全息照相方面的研究工作。到了 1967 年以后, 多数转入了实际应用的研究和结构的设计。

在实际应用方面的研究范围相当广泛, 它完成了一些用其他一般方法不能完成的工作。由于篇幅所限, 下面就全息照相在几方面可能的应用简介如下:

1. 全息照相在干涉量度学的应用

全息照相的领先应用似乎是各种各样的全息干涉量度学。一般的干涉计量术只能用于测量形状比较简单的, 表面经过精密抛光的零件。而全息干涉法则能对任意形状的三维表面进行量测, 而物体表面毋须作光学抛光, 从而扩大了它的应用范围。

可以列出许多这方面的实际应用, 例如在无损伤方面有蜂窝结构和轮胎的检查^[10], 各种流场的观察和分析, 材料弯矩的研究, 扩音器动态效果, 振幅的测量以及等轮廓线的研究等等^[11]。

全息干涉法对于微应变分析可以分别采用一次曝光、两次曝光和时间平均三种方法, 而以一次曝光法较为困难, 主要是全息照片的重置问题, 然而可以采用“就地”显影^[12], 或利用波带片帮助定位而加以克服。两次曝光法解决了底片的重置问题, 因此较易实现, 也是全息照相在实际应用中最广的一种。当然, 要评价这些干涉条纹也不是一件容易的事。时间平均法主要用来观察振动面和测量振幅。

2. 全息照相在数据存贮方面的应用

信息存贮是全息照相另一个有希望的应用领域。用全息照片作存贮不但信息非常丰富, 而且可以作体

积存贮,因此记录介质的利用率很高,这是普通照相所不能比的。把它用来存贮资料、档案是很有价值的。

数字式电子计算机发展下来,虽然利用集成电路,但数据存贮仍然是个问题,在这里,光存贮器却是最有希望的^[13]。

光存贮器的研究很大一部分工作是在从事新的存贮材料的研究,这些存贮材料目前大概可以分成两大类。一是永久性的,如银盐底片、二色明胶等。我国天津感光胶片厂所研制的这类全息底片其分辨率达3000条/mm,控制一定的使用条件,并经漂白处理其衍射效率达15%。另一类是可变的材料,这类材料有:光导热塑、光色晶体、铁电晶体以及锰铋磁性薄膜等。这些材料彼此有些优缺点,目前尚在研究之中。我国科学院物理研究所和化学研究所的光导热塑材料的研究方面已取得一定的成果。

这类存贮器写入时与制造集成电路的数据掩模相似。全息照片是用重复的傅立叶变换过程形成的^[14],如图9所示。每个掩模能记录1毫米直径的全息照

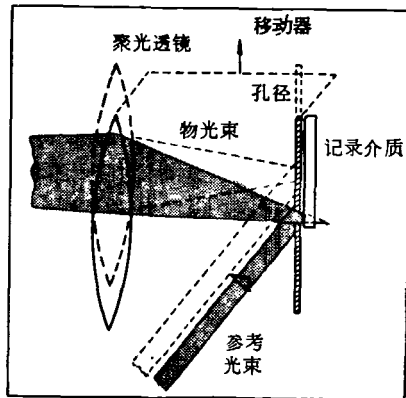


图9 傅立叶变换全息图步进记录结构

片,每块底片能记录 10^4 个数据掩模的照片,每个叫做1页,每页有 10^4 位,每块底片共有 $10^4 \times 10^4 = 10^8$ 位。利用锰铋薄膜代替照相底片,有可能制出一种 10^{10} 位的记忆器。

3. 全息照相在光学信息处理方面的应用

光学信息处理的主要优点是能以极快的速度输入很大的信息量;因为光学处理是以多路方式进行的。实际上,可以把输入胶片上的每一个分辨单元看成一路,因此,处理的过程可以看作是几百万路的信息在同一时间进行。

光学信息处理技术是根据光学空间滤波的概念来

实现的。输入的光学像的空间频谱由空间滤波器进行过滤,以达到某种预定的目的。

光学空间滤波巧妙地利用了透镜的傅立叶变换特性。一般来说,可以把一个复杂的波形分解成傅立叶级数,如果被分解的波形不是周期性的,则必须利用傅立叶变换式。数学上像这样的分解是比较麻烦的,但是,利用一个透镜则能方便地完成这种变换。

可以证明,在某些条件的限制下,一个透镜在它的后焦面上形成它前焦面上的场分布是一个傅立叶变换关系,利用这一特性,在 P_1 面上函数 $f(x, y)$ 的二维空间频谱在 P_2 平面上展开为二维傅立叶变换 $F(u, v)$,如图10所示。

利用透镜来进行傅立叶变换的优越性不仅它可以把输入光学信息的空间频谱展开在平面上,而且可以在这个平面上简单地安放滤波器来处理这些输入频谱的振幅和位相。这是广泛地形成了利用光学空间滤波技术的基础。

经过滤波的输入信息的空间频谱再用第二个透镜 L_2 进行傅立叶反变换,变换结果的光场便显现在 P_3 平面上,并随时可以读出。

利用这一原理,近几年出现了一种新的计算装置,叫做“光学数据处理机”或称“光学计算机”^[15]。这种计算装置与通常所指的数字式电子计算机不同,光学计算机所能做的事虽然多半都可以用电子计算机来完成,而且也很精确,但假如有大量宽频带信息参加运算,电子计算机往往需要很高的费用,而且很慢,因此光学计算机就显出优越性。

光学数据处理机在几秒钟内能使一张模糊的照片变成清晰的照片,而现代的数字式电子计算机以最快的速度进行变换则需几小时(如果它能运算的话)。利用光学相关法仅使用指纹面积的30%就可以精确地加以识别^[16]。诸如识别图谱、数学运算、文字翻译、把英文翻成中文或把中文翻成英文等工作,都可能用光学信息处理机来完成。

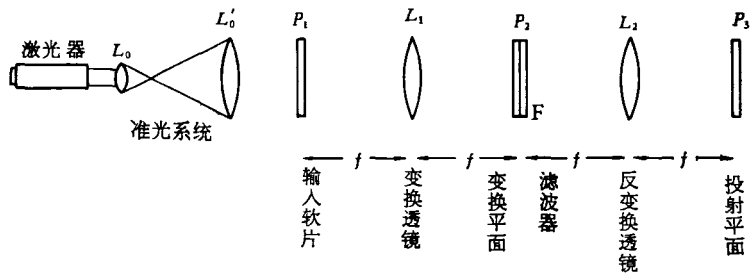


图10 一般光学空间滤波示意图

选择各种不同的滤波器便可以得到不同的运算效果。而这些复合的空间滤波器可以利用全息照相技术来实现。事实上,任何一张空间滤波器就是一张全息照片^[17]。

4. 全息照相在显微术方面的应用

全息显微术可以分为两种形式,一种是利用全息照相和普通显微镜结合,称为“全息显微镜”。另一种是利用全息照片本身的特性来进行放大,称为“全息放大”。

全息显微镜已用来检查集成电路和拍得神经细胞及生物细胞的全息照片^[19-20]。全息显微镜的各种应用结果已有过综合报导^[21]。

值得着重提到的是:廿多年前, D. 加博尔写了第一篇关于全息照相的文章^[1], 他的兴趣是想采用全息照相的方法来改进电子显微镜的成像质量。由于当时缺少一个合适的 X 射线相干光源, 这就阻碍了他的工作。但据最近报导, X 射线激光器已在研究之中^[22], 如果实现, 将为全息照相的应用提供了极为有利的条件, 它能提供物质的电子壳层结构。当然, 这就需要寻找更高分辨率的记录介质。

全息显微镜目前的主要障碍仍是激光的斑点效应, 因而影响到它进一步普遍地使用, 虽提出某些克服方案^[23], 但结构太复杂了。

5. 全息照相在电视和电影方面应用的研究

全息电视的实现不但存在着记录问题, 同时还需解决传送和再现的问题。对全息照片信息容量的分析指出^[24]: 产生一场立体画面所应容纳的信息量应为 4.9×10^9 信号, 如果每秒播送 30 帧, 即全息电视频带宽度应为 1.5×10^{11} 赫, 而普通的电视频带宽度仅为 8.4×10^6 赫¹⁾。所以问题是在不损害三维全息像的质量的情况下尽可能减少处理的信息量。根据普通电视压缩后的效果, 全息电视实际可以采取的播送频率为 1.65×10^8 赫。

全息电视的载频将是光波或者更高的频率。全息电视的接收机首先必须能够处理大约 10^8 赫的频率宽度, 其次必须能同时显示 5.5×10^6 信号(因为全息照片不能像普通画片那样一点一点地显示)。用相干光再现虚像, 显像管的分辨率也必须相应地提高。

全息电视虽然还有一些技术问题有待于进一步克服, 但是实现是可能的。

全息电影也试验过几种记录方法^[25], 如利用一块铈酸锂单晶在 1 立方英寸里可以记录 1000 幅以上的全息照片。每次记录时后转过几分之一度。但由于观察全息像必须通过单晶, 这就大大地限制了观众的数量。利用脉冲激光器和电影摄影机(卸下摄影镜头)同步拍摄了一群热带鱼, 但放映场面仍很小, 观众同样受到限制。

为了避免激光对人眼和皮肤的危害, 已采用一种和制作动画片相似的方法, 由普通的二维摄影片来记录出三维的立体像。对于这种二步过程的方法已提出

过若干建议。

6. 其它的应用

根据全息照片产生的原理, 人们已可以用计算机来产生存在于概念而实际不存在的物体的数学全息照片。当确定出所需的形状, 并用计算机的数学语言来表示, 然后计算机再计算假设光波确实被“物体”反射并与参考光束相干后所记录出来的全息图。这样, 就可以省去试制模型, 设计人员可以看到轿车或汽车的车身, 看到立体的建筑物, 尽管这些都还在图纸上。

高衍射效率的全息照片有可能代替光学元件, 也可以用全息照相法来制造光栅。

显然, 全息照相的可能应用远远不止上述这些。同时, 在未来的发展中, 全息照相的应用仍然还有巨大的潜力。

除了光学全息照相取得了较大的进展以外, 在声学全息照相和微波全息照相也在发展。声学全息照相在检查肿瘤和观察胎儿在母体的位置已获得试验结果^[26, 27]。微波全息照相的主要障碍是探测器, 因为它可以透射云、雾, 所以有独特的用处, 例如可以用来拍摄被云遮盖的星体^[28]。并有可能不用参考光波来获得全息照片。

事物是应该一分为二的。通过十几年的研究实践, 全息照相也暴露了另一些缺陷, 例如利用连续波激光器照相时, 物体必须保持不动, 由于非相干光不能成像, 室外照相就受到限制。照相景深也只能局限在激光的相干长度之内。

在目前的发展道路上, 仍然存在一些急待克服的问题, 例如缺乏比照相底片更好的记录介质, 而照相底片本身存在一些缺点, 如感光速度慢, 衍射效率低, 采用漂白技术一般只能使其衍射率达到 15~20%。此外, 激光斑点效应、噪音、畸变等等, 也都有待于进一步克服^[29]。

由于全息照相和普通照相比较起来有许多独特之处, 因此受到世界各国普遍的重视。尽管它离多方应用的现实还很远, 但它将如同普通照相一样, 发展成为一门成熟的技术, 看来是有希望的。

参 考 文 献

- [1] Gabor, D., *A New Microscopic Principle*, *Nature*, 161-4098 (1948), 777.
- [2] Лейт, Э., Упатникс, Ю., *Фотографирование с помощью лазера*, *Успехи Физических Наук*, 87-3 (1965), 521.

(下转第 40 页)

1) 我国为 6.5×10^6 赫。