

# 全息数据存储

G. Goldmann

**提要：**本文以已实现的一种固定存储器实验模型为例，说明板式组织全息存储器的原理，并讨论了数据的存储容量及其可变性的问题。此外谈到具有活动数据载体的位组织全息存储器的一种方法。

## 1. 引言

随着信息的快速增加，对于现代数据处理、资料设备的要求亦在增长，特别对于廉价的能在很短的时间内获得很大数据量的批量存储器的要求越来越大。一般的存储技术由于技术和经济的问题，只能有限的满足。因此，有必要发展一种新的存储方法。因为光学能提高速度平行处理的传递大量数据，此外还能成数量级地超过目前技术所达到的存储密度，所以光学的方法特别是相干光学方法对数据存储和处理来说是为人所感兴趣的。特别是全息照像是一种冗余信息的记录方法，这种方法对数据载体的不均匀性，对尘埃和刮痕极不敏感。如下文所指，全息存储系统可以用非机械方式存取，它对整个数据板能够在微秒的范围内自由选择地存取。不论是模拟信息还是数字化信息，基本上可以全息存储，甚至在数据载体上可能同时安排这两种方式。全息模拟存储相当于一般的微缩图象存储，即含有字母数字内容的原型、线条图等被缩小记录下来。全息存储所达到的存储密度相当于受衍射理论所给定的微缩图象存储的密度，然而通过全息图的叠加，所得到的存储密度可以进一步提高（见下文）。在数字存储过程中信息单位1比特（bit）一般是通过一个光源或是一个光点来表示。光点存在定义为数字“1”，光点不存

在定义为数字“0”，存储器分为二进制“位”组织存储器，“字”组织存储器和“板式”组织存储器。在位组织存储器中，数据的记录与再现是以时间的顺序一位一位地进行的，与目前的磁带和磁盘存储器相仿。字组织存储器是将一个或多个拜特（Byte，1 Byte = 8位 + 1 保险位）并列处理；板式组织存储器是将典型的 $10^3$ 至 $10^6$ 位的数据量并列处理，其中的光点一般被作为位模排列为栅网状（图3），其迅速的平行处理与大型数据板式的存储是没有一种常用技术可以相比，它在数据处理领域内是一重要的革新，所以下文作为重点详述。除了板式组织数字全息存储器之外，本文第三段还要介绍一下具有活动数据载体的位组织全息存储器。

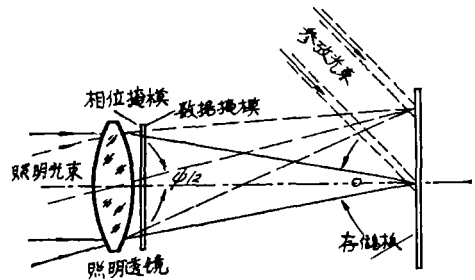


图1 存储板的制作，原理光路

## 2. 板式组织的全息照相存储器

板式组织的全息照相存储器应当追溯到

Vitols<sup>[1]</sup> 和Smits等人<sup>[2]</sup> 发表的建议, 那时候提的是所谓的“单读式存储器”, 即固定存储器。随机式全息照相存储器的设想, 第一次是由 Rajckman<sup>[3]</sup> 发表的。它实质上成为后来所有的关于读写存储器的建议的根源, 其中, 固定全息存储器的模型容量达到  $10^6$  位到  $10^7$  位, 存取时间几乎达到微秒, 这已在不同的实验室里得以实现〔参见 I. II〕, 而且目前可看作技术所达到的水平。与之相比, 在随机全息照相存储器方面, 还未取得全部重要问题都已解决的进展。下文以实现的固定存储器<sup>[4]</sup> 实验模型为例, 详细说明板式组织全息照相存储器的原理, 并讨论一下存在的问题。

## 2.1 全息照相固定存储器

### 2.1.1 最佳存储全息图的制作

全息照相方法存储的  $10^4$  位数据板可用一个平面的二维相干辐射光源的网格来表示, 在固定存储器中, 这种网格可以用照相方法制成的可更换的数据掩模, 它用一束会聚激光光束照明(图1)。在照明透镜的后焦面上, 得到该数据掩模的付里叶转换。由于有最大可能的冗余信息和全部数据点均等地记录于最小可能的面上, 付里叶转换平面最合适于数据的存储。显然, 数据点周期排列的付里叶转换其强度分布仍然是具有高强度峰值的周期排列, 这种强度分布对于技术上所需要的存储全息图的记录是不合适的<sup>[5-7]</sup> 为了在所记录的物波场内(Objektwellfeld)达到尽可能均匀的强度分布, 有两种可行的办法。其中一种方法是在付里叶转换平面略微靠前处拍摄全息图, 因为由于每个物波结构上的干涉而产生的强度高峰在此处还未形成, 因此人们称之为散焦的付里叶全息图<sup>[8,9]</sup>, 一般散焦为照明透镜焦距的百分之几。

另外一种方法是利用一种所谓的相位掩模<sup>[10-12]</sup> 附加于数据掩模。这种方法的任务是把每个物波的初始相位这样设计, 使得付里

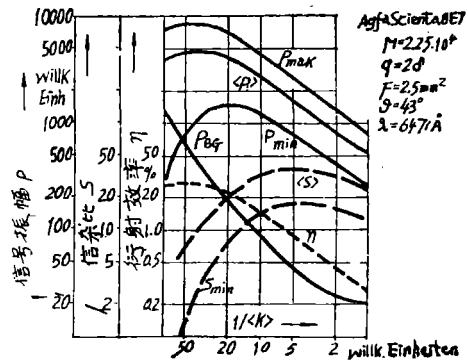


图2 效率, 信号振幅和振幅存储全息图  
的信杂比, 用相位掩模在付里叶平  
面摄得。

叶转换平面上不再能够形成强度高峰。实践中, 半数网格的位置, 利用  $\lambda/2$  层使其初始相位移动  $180^\circ$ , 其中必须注意: 这些位置在数据掩模内部要作统计学上的排列。

Goldmann 将这两种方法中与存储全息图有关量值, 诸如衍射效率  $\eta$  和再现图中的信杂比  $S$  进行了研究<sup>[9,11]</sup>, 并彼此做了比较。结果表明: 用相位掩模的方法, 实际上有效好的结果。这种关于相位掩模的研究结果集中在图2中表示出来。图中  $\langle K \rangle$  代表参考光对平均物光的比, 它是一个控制摄影量。再现光点(比特)的零级衍射盘的直径为  $\delta$ ,  $q$  为其间距,  $F$  为全息图的面积,  $\theta$  为物光与参考光之间的交角,  $\langle P_i \rangle$  是再现光点的平均信号振幅,  $P_{max}$  为其最大值,  $P_{min}$  为其最小值。  $P_{BG}$  为图象中数据掩模无光点位置上最高的测量出的信号振幅。相应地  $\langle S \rangle = \langle P_i \rangle / P_{BG}$  表示平均信杂比, 同时,  $S_{min} = P_{min} / P_{BG}$  为最小的测得出的信杂比, 用以表示已存储数据可靠读出的有关量。作为存储材料用的是 Agfa Scientia 8 F 75 型照相板, 它作为振幅型处理, 由此可以获得信杂比的特性与  $\langle K \rangle$  的关系:

$\langle K \rangle$  值小时, 相应地控制值大时, 信号振幅有强烈的变化和较大的背景, 该背景以所谓的“鬼点”(Geister Punkten)标志, 其中一些可能强于真正的信号点, 这种状态应

当追溯到传递函数的非线性。当 $\langle K \rangle$ 值大的时候，也就是控制值小时，“鬼点”则不再起作用。除了相邻点的较高衍射级之外，然后突出的就是杂光部分，它的形成是由于再现光束在照明膜层的粒状结构上散射的结果。这部分是一个常数，但是因为信号振幅随着 $\langle K \rangle$ 的增长而下降，所以信杂比也随之下降。这其中 $\langle K \rangle$ 值有一范围，在这一范围内能够制成含有足够信杂比的存储全息图，在存储密度为 $10^4$ 位/毫米<sup>2</sup>和在绝对数为 $2.25 \times 10^4$ 位时，在“最坏的情况下”（除少数几个外，全部网点有光（最小信杂比可能达到18:1。信号和杂光背景取平均值的情况下，在图象中产生的对比度约为80:1，相当于19分贝。为了做成大容量的存储器，必须将很

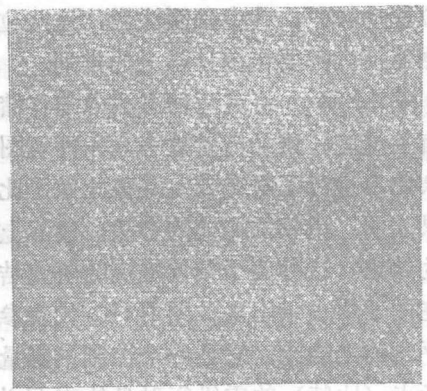


图3 从再现位模截取的一段，存储密度为 $10^4$ 位/毫米<sup>2</sup>

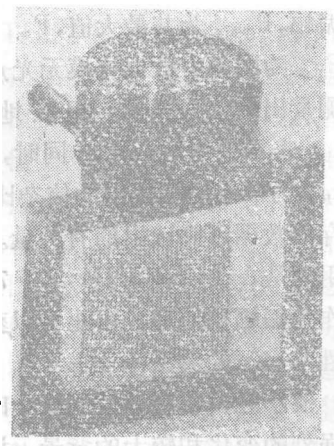


图4 具有 $32 \times 32$ 单元全息图的存储板容量为 $2.10^7$ 位

多数据板记在一块存储板上。为此，须将照明光束锥体转到存储板的上面，并按通常的全息照相方法将数据板记入到所希望的位置〔4〕，图4指出这样制成的存储板： $42 \text{ cm}^2$ 的面积上存储约为 $2.10^7$ 位，板上记有 $32 \times 32$ 个单元全息图，每个包含一个约为 $2 \times 10^4$ 位的数据板。

### 2.1.2 存储数据的读出：

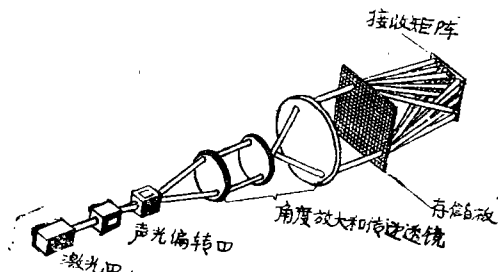


图5 板式组织全息存储器的读出装置

读出时，利用一个非机械的光偏转系统，将与参考光束相逆的再现光束照射到一个单元全息图上（图5），通过这一办法，被存储数据板的实象在与摄影时数据掩模相应的位置上产生。根据拍摄所作的安排，全部单元全息图将在同一位置上产生再现现象，因而为将光学信息重新转换为电的信息，只需要一个接收器矩阵。在这种情况下，存储板与读出平面之间，无需特别的成象系统，因为我们利用了单元全息图的成象性能。然而这要求参考光束准确地回转，否则，全息照相的成象误差会影响位模在读出平面上精确的叠合。有一种光束导向的方案（见第一节），它不用逆转光束，而是用原始的参考光束来读出，为了随后得出实象，必须在存储板的后面以一适当的光学成象系统进行反变换。

### 非机械的光偏转器

光偏转系统必须给出许多分立的偏折位置，其数目与存储板上单元全息图的数目相适应，为此，以利用电光效应或者声光效应的系统为宜（见参考文献〔13〕）。在参考文献〔4〕中所述的实验模型中用的是一种声

光偏转器。这种偏转原理，利用的是早已为人熟知的光在高频超声波上衍射的效应。在一块透明的晶体或玻璃上，利用贴在其上的薄的压电转换器产生声波（图6）声波在晶体内传播，并在那里产生了周期密度和周期折射率变化，它们起到了光学相位光栅的作用，于是，一部分激光光束发生偏折，改变声频就可以改变衍射光束的方向。如果两个偏转级前后排列，其声波彼此垂直，那么就会得到一个二维的偏转位置的栅网。利用碘酸晶体作为声媒，硫酸锂作为转换器，大约每级可达到50%的衍射效率，其中，两个任意方向之间的转换时间约为1微秒，这时声频的变化在50MHz<sub>2</sub>到100MHz<sub>2</sub>之间<sup>[14]</sup>。

### 接收器矩阵

读出单元必须将再现光电转变为电的信号，为此提议使用多重光电二极管矩阵或光电晶体三极管矩阵<sup>[15]</sup>。然而最为适宜的是这样一种接收器矩阵，它不仅能够转变光学信息，而且可以为进一步处理而进行中间存储。有一种触发器矩阵满足了这种要求，正如 Jantsch 等人在参考文献<sup>[16]</sup>中所述那样。图7指出用集成技术制成的具有8×8个存储单元的接收器板，其上存储单元之间的距离为200微米。每个触发器上集成一个约为100微米大小的光电二极管，它与一个存储单元有光学连系。一个完整的矩阵结构必须组合很多这样的部件。该矩阵的灵敏为几个PWs（微微瓦），这样，在目前激光器系统的

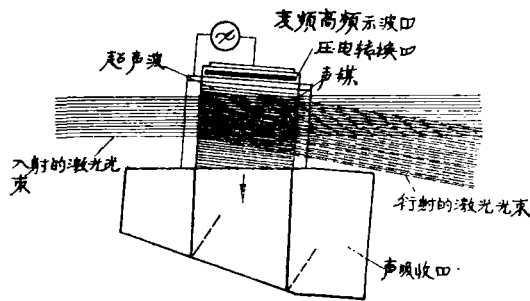


图6 声光偏转级的结构

输出功率为几瓦的情况下(如氢离子激光器)能够达到数量级为10微秒的积分时间。因为激光光束定位实际上更快一些，所以数据可按照这样的时间提供电子学作进一步处理。

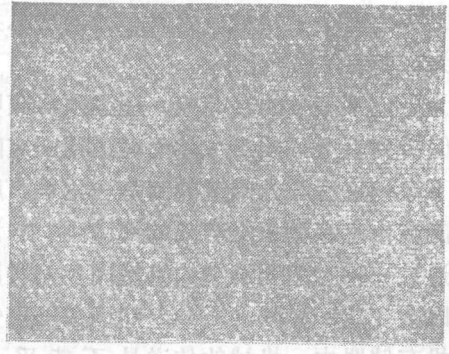


图7 带有8×8单元的接收器板，网格尺寸为200微米

### 2.2 板式组织全息存储器的极限

一个由包含许多单元全息图的存储板构成的系统（利用非机械的光偏转器可对这些全息图作快速存取）以及接收器矩阵的系统，下面应当看作是一个单位，那么，在这样一个单位中能够容纳多大的存储量呢？大家知道存储容量为存储密度与含有信息面的乘积，然而，这两者都不能毫无相关地增大，下面给予详细说明。

我们从一个圆形的单元全息图（它与接收器矩阵或是数据掩模中心相对）来观察写入或是读出。从此单元全息图出发，可以看出矩阵面张角为 $\theta$ ，它就是照明光束锥形孔径角，在给定单元全息图的尺寸后， $\theta$ 角越大，可以存储的点越多，然而，由于制造技术上的缘故，限制了照明透镜的相对孔径，因而也限制了所达到的存储密度 $m$ 。

$$\text{按照Goldmann}^{[17]}\text{之说, } m = \left( \frac{0.327}{\lambda \beta B} \right)^2$$

式中 $B$ 为照明透镜的光阑值， $\beta$ 为确定图象分辨率质量的安全系数，应用Rayleigh分辨率判据时， $\beta = 0.5$ 取光阑值为1，在可见光谱范围内，可得到 $10^9$ 位/毫米<sup>2</sup>高的存储密

度，或者还要更高一些。然而，在板式组织存储器中，上面的假设是无法实现的。光阑值为1这一条件，已乎根本办不到。此外，为了保证无干扰地读出，光点宁肯分离更开些，一般安全系数  $\beta = 2$ ，这样，较 Rayleigh 判据比特密度小了16倍！所以存储密度总共大约为  $10^4$  到  $10^5$  位/毫米<sup>2</sup>。

为了记下整个的存储板，还必须将照明锥体偏折到板上（图1），然而在透镜固定的情况下像场直径与光阑值的商是一常数，所以只能在信息存储板上有限的面积内作记录。通过一种对照明透镜的机械同步偏转固然可以改变这一界限〔4〕，然而在一部快速随机存储器中，机械的传递是不能采用的。

但是，偏角度还要受到另一种限制单元全息图按照它在存储板上的位置，对于接收器矩阵有着不同的距离，根据衍射理论，读出平面中的光点将有大小不同，另外还畸变为椭圆形<sup>[18]</sup>。根据要求，光点不应叠加，那么，最大的角  $\psi$  就是从接收器矩阵或者是数据掩摸出发看出存储板的角。按照上边所说，照明锥体的孔径，随之而产生存储密度和偏角  $\varphi$  这两个量值大约是固定的。然而按照图8所示矩阵或者是数据掩摸在照明锥体内的位置，换句话说它们是它们的绝对量是可以自由选择的，显然，存储面积以及系统的整个容量随着接收器矩阵和数据掩摸的量而增长，接收器数目很大的情况下，用集成技术制作矩阵是有利的。接收器矩阵的制作一直

扩大到几个厘米，其容量按参考文献〔18〕说，每块存储板上限在  $10^8$  比特数量级范围。

### 2.3 全息照相数据存储器发展的可能性及目前的方向

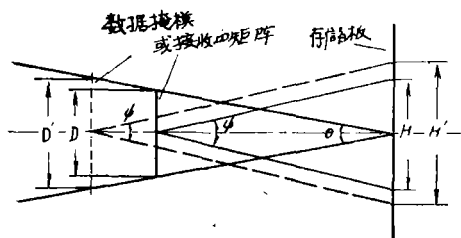
还是在不久前， $10^8$  位的在微秒内可以自由选择地进行存取固定存储器引起人们很大的兴趣，然而，今天人们了解到，即使用其他存储器，例如半导体存储器也能够达到这样的水平，而且还可以是随机的。所以，相干光学必须进入在目前其他技术或是由于物理技术方面的缘故，还是由于经济方面的缘故所达到的范围，例如巨位数（Gigabyte，为  $9 \times 10^9$  位）亦即  $10^{10}$  位以上的容量。存取的时间应当尽可能小于目前磁盘存储器的时间，亦即在微秒范围。进一步要求就是随机性。其中记录的时间一般要求略多于读出的时间。

#### 2.3.1 存储器容量的提高

根据2.2节所谈，容量一类的问题均决定接收器矩阵和数据掩摸的大小。为了达到  $10^{10}$  位的容量，也许可以要求几十厘米直到一米边长的接收器矩阵。应用单个元件时，这一点是完全可以实现的，但是所属的透镜光学系统也必须相应地增大。这在理论上是可能的然而实践中要求解决它却提出极大的问题。

另外一条途径是将多个上述模式的存储器系统（也称存储器模式）并列工作，其中尽可能使存储器的许多元件公用。根据 Kiemle<sup>[19]</sup> 所说，在光偏转系统后面进行一次被动的分光，这样，大量的模式即可同时读出。限制整个存储器中的数量，当然是有意义的，所以必须充分利用每个模式的容量。

提高容量的第三种可能性是以特殊的方式利用全息照相的特性。已经知道全息图是可以叠加的，而被存储的图象在读出时彼此不会干扰<sup>[20]</sup>，这点特别是在薄膜上（容积全息图）记录时用得上。但在薄膜上，例如照



D, D', 数据掩摸式接收器矩阵的对角线

H, H' 存储板的对角线

图8 数据掩摸及接收器数量与可写入全息图面积之间的关系

相乳剂或者塑性材料上这一原理也是优越可取。Goldmann<sup>[17]</sup>叙述过一个实验,其中数据掩模约有两千个数字符号(相当于4页DinA)可以在3毫米<sup>2</sup>的面积上叠加。照相膜层Agfa Scientia 8 E 75)可以进行大约十次叠加,而图象中还有足够的信杂比(图9)。所以在数字存储过程中应当尽量利用叠加,可将平面全息图中的存储密度,相对第2.2段所给出的数值提高到10倍。

### 2.3.2 随机式全息照相存储器

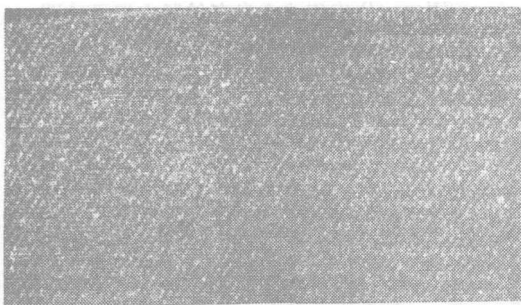
对于目前成为讨论中心的固定存储器,其主要应用在于大量数据的单纯档案保存。然而,与现代电子数据处理设备的联系中,存储器的可变性成为一种必要的先决条件。第一个随机全息照相存储器<sup>[21,22]</sup>的实验模型,最大容量为 $10^6$ 位,但其中只有一部分数据是随机的。所出现的困难表明,人们在这里还一直是处于研究阶段。

目前一般将热塑料作为可销又可再记的材料较为方便。所谓位相全息图是记录与干涉图形强度相对应的薄膜厚度的空间变化。这里热塑料一般是指与光敏材料结合的透明树脂。如果光敏导体均匀溶解或者说均匀分布在热塑料中,人们就得到作为薄膜结构的单一层;如果将本征光导层衬垫在热塑层下面,即称为夹层结构<sup>[23,23a]</sup>(图10),为了摄制全息图,首先将这种材料通过对面的接地导电层电晕充电,使带正电位或负电位,因而使之敏化。经过曝光产生一种与干涉图相

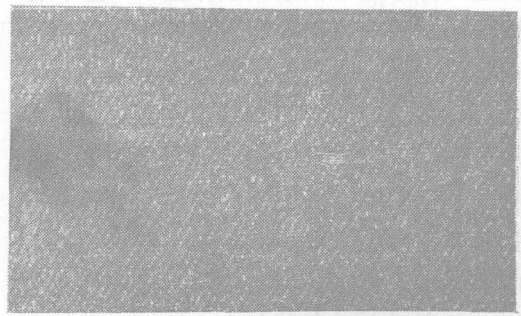
应的电荷分布模式,因为在受光地方由于光电导性面放掉电荷。最后薄膜的显影需加热到 $50^{\circ}$ 到 $80^{\circ}$ 而完成。静电力量使得膜层表面依照当时的电荷分布而发生形变。通过膜层的快速冷却使全息图定影。通过加热到一定温度(该温度高于显影温度)可以使已存储的信息重新消失并开始新的记录循环。因为热塑料层老化的原因,循环次数原则上受到限制,目前成效高的可达几百次循环。

因为在改进热塑料方面很多实验室都进行了工作,估计在这方面将来会取得决定性的进展。热塑料的缺点是仅能记录有限的空间频率带。其中中间频率最大能在约 $10001/\text{mm}$ 的地方。另外,热塑料对可塑材料十分敏感,差不多可以与一般商品中全息照相乳剂相比。其他的可逆材料例如还有铁电的或者光变色晶体,但是它们的研究尚未与数据存储用途联系起来。

除了存储器的材料外,数据输入转换器(DEW)在快速随机存储器中是另外一个决定性的组件。就其作为计算设备交点的功能,可引出对数据输入转换器的一定要求。按照板式的大小,它必须由约为 $10^4$ 单元的二维排列而成。这些单元必须是使相干光无损地在空间和时间相干性方面得到调制。所有的单元在全息摄影的时间之内必须保持其状态,必须要求在接通与非接通的状态中间有足够的对比度( $>100:1$ )为了达到例如可与目前磁盘存储器相比拟的转换速度,除了



a) 5次叠加



b) 10次叠加

图9 叠加全息图的再现

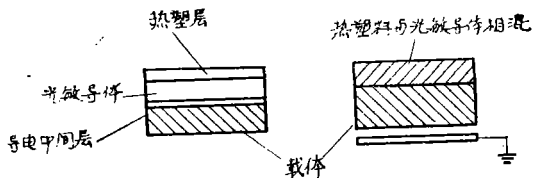


图10 热塑材料的薄膜结构

有高的循环次数之外，循环时间必须在毫秒范围以下。能满足这些要求的数据输入转换器在目前还没有，特别是还不能实现在极短时间内开关的大尺寸的板式。表1列出几种数据输入转换器的设想，给出所用的物理效应、材料的数据以及寻址技术。

### 3. 位组织式全息照相数字存储器

已经提过，位组织光学存储器就是对于磁带，磁盘或磁筒存储器的模拟。最为人熟知的是那种利用聚焦的激光光束将数字数据逐点地记录在一种光敏材料上面<sup>[33,34]</sup>。但是它不仅以将数字数据以逐点方式记录下来，而且还能够顺次地用全息照相记录下来<sup>[35]</sup>。图11和图12说明这种方法的原理。一束脉冲激光如通常一样分为物光束和参考光束，待存储的信号以振幅调制方式传给物光束，在模拟式的输入信号中，物光束就成为一系列具有不同强度的光脉冲，而在数字数据中则是强度分级或光脉冲的有无。用适当的光学系统使这两部分光束在数据载体上产生干涉（图13）。两次照相中间数据载体可能会移动一些，这样，全息图一部分产生重叠。记录是这样来进行的，即全息图在数据载体的运动方向上，较垂直方向上大很多，这样就产生一种窄长的全息图迹。要注意这样选择数据载体速度  $v_H$  和脉冲频率，使全息图尽可能密到可以叠加，而在读出时又能使光点分离。为了避免记录过程中涂抹了干涉条纹，必须调节脉冲持续时间，使数据载体在  $\tau$  的时间内只能够移动比波长小的量  $\Delta x$ 。

$\lambda: \Delta x = v_H \cdot \tau^{[10]}$ 。读出时，数据载体通过位置固定的再现光束，该光束照射着一部分全息图迹。于是，产生出一列光点，这些光点与载体运动同步地在再现存储信号的位置固定的接收器上移动。在图13中以略图说明的物光束—参考光束对称装置上（所谓的源一点对称），全息图迹移动为  $\Delta x$  时，它产生的象点平移为  $2 \Delta x$ ，这对于提高线性的存储密度是有用的。此外，在源点对称装置中，对全息图重垂直于记录平面的移动初步近似地不影响像的再现，这就大大减轻了机械公差的问题。

在首先静态实验室实验中移动 2 微米时，线性存储密度达到500位/毫米。用运动的数据载体作动态实验的结果，集中反映在图14中<sup>[36]</sup>，这时移动量总计为 5 微米，图迹宽度为 3 微米，由此得出  $6.7 \cdot 10^4$  位/毫米<sup>2</sup> 的平面存储密度，每个全息图的长度约为50微米，这样差不多有10个全息图叠加。在速度为 1 厘米/秒情况下，数速率为  $2 \cdot 10^8$  位/秒。由于相对孔径在对狭长椭圆进行读出时会产

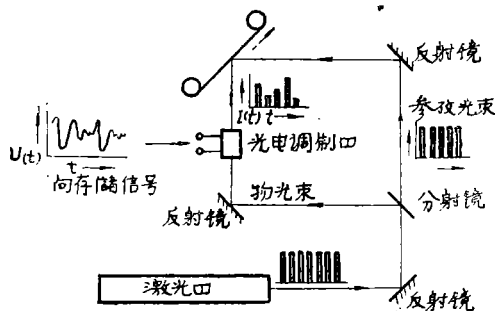


图11 位组织式全息存储器中记录的图示说明

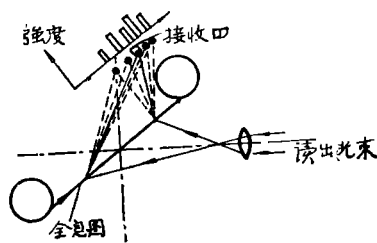


图12 位组织式全息存储器中读出的示意说明

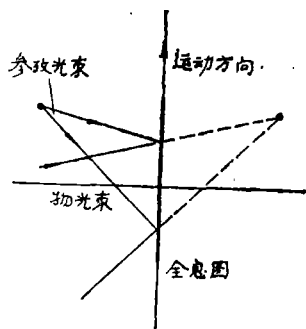


图13 原点对称

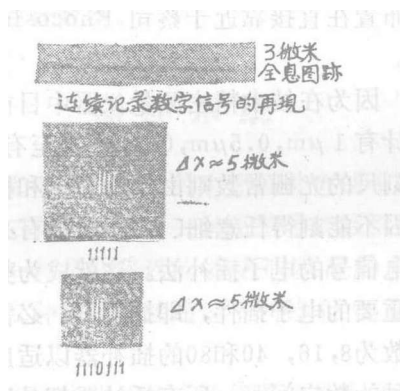


图14 顺次记录数字信号的再现和再现

生损坏的光点，它们与全息图迹相重直。如图14出示的那样，位数甚至还能够堆集得更紧些，这样可达  $10^6$ 位/毫米<sup>2</sup> 的存储密度。因为数据载体在读出头机械移动，所以，位组织式存储器中不存在视场的问题。因此，容量问题由于放弃了快速存取是能够解决的，所以，如果存取时间起了决定性的作用时，这类存储器在大量数据的存档保存中会引起特别的兴趣。

## 4. 总 结

全息照相术用于数据处理一直定为人感兴趣的，虽然最初年代使人欢欣鼓舞，而后特别是涉及到快速存取大容量问题和随机问题，则进入了冷静对待的阶段。为了提高容量，以超过实验模型中达到的数值，已经提供了解决的途径。板式组织存储器，可以抹除的记录材料和数据转入转换器的发展过程中，为了提高技术上的成效，还需进一步研究。展望将来批量存储器方面的需要，进一步发展这项研究工作是有价值的任务。

表 1 数据输入转换器的方案

物 理 效 应	材 料	定 址	参 考 文 献
电子光学效应 (通过敏感性双折射板化的转动)	PLZT-陶瓷	电 报 矩 阵	(24)(25)
	$\text{Bi}_4\text{Ti}_3\text{O}_{12}$ $\text{Gd}_2(\text{MoO}_4)_3$	电 子 射 束 光敏导体光束	和(11)
通过电激发生光散射	液 晶	电 报 矩 阵 光敏导体光束	(26)(30) (31)(32)
通过移动吸收边缘获得光密度变化	CdS	电 报 矩 阵	(27)
通过反射面的压电激发而得相位变化	反 射 压 电 晶 体	特 殊 控 制	(28)
通过构成一种表面体产生相位变化	热 塑 料 光 敏 塑 料 全 属 膜	电 报 矩 阵 电 子 射 束 光束+光敏导体	(29)

参考文献36种（见原文）

泽自“feinwerktechnik + micronic”  
78.1974.Heft 2 S.57—63