

全息照相记录介质——评论

摘要：早期全息图是记录在照相干板上的，就是现在这种干板仍然是最常用的全息照相记录介质。但是，全息过程的本质，加上高功率相干光源的发展，则要求应用与照相干板不同的介质。结果，在敏化的重铬酸盐明胶，光致抗蚀剂，电光晶体，光致变色薄膜和光致变色玻璃，热塑料，光聚合物，无定形半导体，染料， $MnBi$ ，微泡和重氮基薄膜上都与更为标准的卤化银乳剂一样记录了全息图。在这篇评论里，考察了得到普遍利用的全息照相记录介质〔译注一〕以及它们的若干应用。也研究了一些试验性介质。我们不企图把介质分成等级，因为这篇评论的目地只是使读者为他的特殊应用而选择全息记录介质时，能够熟悉多种选择，认为这种做法是合适的，因为目前能使用的大多数介质都能构成良好的全息图。

I 引 言

在这篇评论中，我们研究全息术对记录介质的基本要求。根据这些要求，我们推导出一种理想介质的特性。可惜的是，没有一种记录介质能单独满足我们所有要求。因此，我们就现有介质做了考察，我们叙述了这些介质并附有它们一些应用，以帮助读者选择介质。我们不尝试对商品介质加以分级，因为使用所有的介质能够得到满意的结果。在全部讨论中，我们假定读者对大部分全息术的基础是熟悉的。

A. 全息术的要求

全息术波前重构包含对照明光的相位或振幅作空间调制。因此，全息图必须由对相位作调制或对振幅作调制，或对两者兼备的介质所组成。在相位调制的介质中，全息干涉条纹是作为厚度或折射率的空间调制而记录下来的，在振幅调制的介质中，则是作为介质的光吸收特性的空间变化而记录的。为记录这些信息，介质必须能分辨全息干涉条纹的间隔。介质应能以线性方式记录条纹，并不能对再现波添加光学噪音。全息图在需

要再现时间内应能保持有效。可擦除性和易于处理，是对全息记录介质的另外要求，我们在下一节中将更深入地研究这些要求。

B. 理想介质

现在，我们来考察能得到理想波前重构的介质的特性。至于更详细的论述，读者可参考 Collier, Burckhardt 及 Lin 的著作“光学全息术”，本节我们将介绍他们的论述。

研究在全息图平面上受到强度为 $I(x, y)$ 的干涉花样照射下的全息记录介质，我们把静态景物的总曝光量定义为

$$E(x, y) = k_1 I(x, y) \tau, \quad (1)$$

式中， k_1 = 比例常数

τ = 曝光时间

注意到在干涉区域内

$$I(x, y) = aa^* + rr^* + ra^* + r^*a \quad (2)$$

式中， $a(x, y)$ = 物波的复振幅

$r(x, y)$ = 参考波的复振幅。

显然，曝了光并经过处理的介质的振幅透过率取决于曝光量 E 。我们把介质的复振幅透过率表示为

译注一：本论文中“Materials 和 medium”经常混用，为了统一，译文一律改为介质。

$$t = t \exp(i\varphi) \quad (3)$$

此处我们考虑通过全息图不但做振幅调制而且还可做相位调制。

现在，当处理过的全息图受到原参考波 r 照明时，所得到的调制光的复振幅为

$$w_0 = rt. \quad (4)$$

正是方程 (2) 的最后一项导致物波的出现，根据文献 1 中由方程 (1-4) 推导出的关系，通常方便地把理想的再现波复振幅定义为

$$w_0(x, y) = 2Sk_1 \tau_r r r^* a \quad (5)$$

式中， $S =$ 复常数。

凡是具有由公式 (5) 给出的复振幅全息再现波的所有介质，可以被认为是理想的。要指出，当 $r r^*$ 对 (x, y) 为常数时，介质为线性，就是说， w_0 正比于物波的复振幅 a 。

现在对任何两个平面波有

$$r = r \exp(i2\pi\xi_r x) \text{ 和}$$

$$a = a \exp(i2\pi\xi_a x)$$

式中， r, a, ξ_r 和 ξ_a 为实常数。

方程 (5) 变为

$$w_0(x) = s_r(2k_1 \tau_r r a) \exp(i2\pi\xi_a x) \\ = S r E_0 V \exp(i2\pi\xi_a x) \quad (6)$$

式中 $E_0 = k_1 \tau_r (r^2 + a^2) =$ 平均曝光量

$V = 2ra / (r^2 + a^2)$ [对我们的情况] = 条纹能见度

在理想重构条件下，即 $s = s \exp(i\sigma)$ ，从方程 (5) 可看出，此时得到线性记录，并且

$$w_0 = w_0 \exp[i(2\pi\xi_a x + \sigma)] \quad (7)$$

这是一个平面波，其振幅为

$$w_0 = s_r E_0 V. \quad (8)$$

全息灵敏度 s 是理想介质的一个表征，只要 S 与 E_0, V 和 ξ_a 无关。

全息图把光衍射，造成再现波的效率 η 由下式给出

$$\eta = w_0^2 / r^2$$

$$\text{或 } \sqrt{\eta} = S E_0 V. \quad (9)$$

现在我们取 V 做参数，相对 E_0 绘出 $\sqrt{\eta}$ ，或取 E_0 做参数相对 V 绘出 $\sqrt{\eta}$ ，由

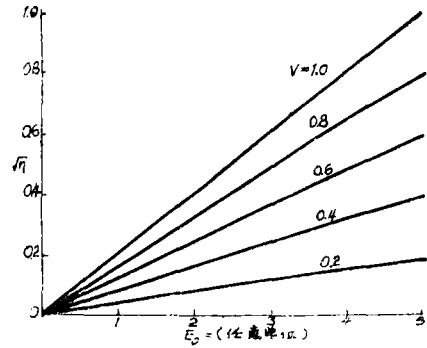


图 1 理想记录介质 $\sqrt{\eta} - E_0$ 特性曲线。 η ，衍射效率； E_0 ，平均曝光量（任意单位）， V ，条纹能见度。（根据参考文献 1）

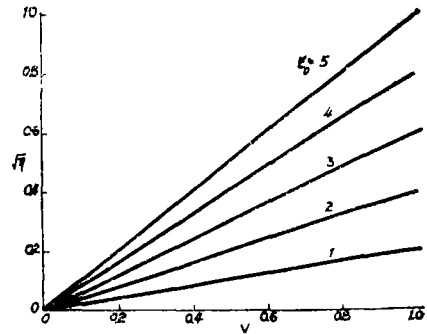


图 2 理想记录介质的 $\sqrt{\eta} - V$ 特性曲线。 η, V ，和 E_0 如图 1 定义（根据参考文献 1）

此获得如图 1 及图 2 的直线族。这些图代表理想的记录介质的曝光特性，可与实际的记录介质的相类似曲线进行比较。

II 介质讨论

我们理想的重构条件，即 $S = S \exp(i\sigma)$ 是常量，在正个 xy 平面上与 E_0, V 及 ξ_a 无关，这在现实世界上是满足不了的。最多，实际介质在参量的有限范围内满足这个条件。结果是再现波前有相位和振幅畸变。大多数介质，除漂白的乳剂外，很少有相位畸变，而由 S 变化导致的振幅畸变就成为再现波前的主要噪音来源。这种噪音通常能减少

到最小，但要损失衍射效率。

实际的介质的更有代表性曲线表示在图3及图4。这些曲线要与理想介质的图1和图2做比较。考察 E_0 。在正常值下相对 V 的 $\sqrt{\eta}$ 曲线的直线部分，我们能确定介质为线性下的能见度 V 或光束比 R 的范围。

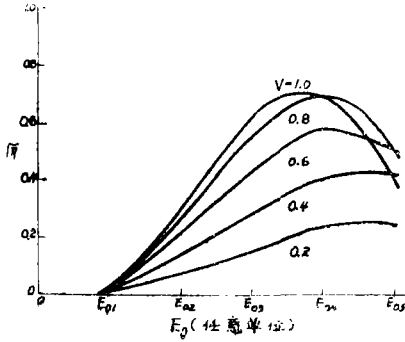


图3 实际的记录介质典型 $\sqrt{\eta} - E_0$ 特性曲线(根据参考文献1)

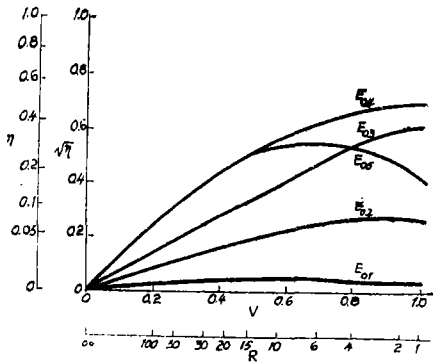


图4 实际的记录介质的典型 $\sqrt{\eta} - V$ 特性曲线。
R 为参考光束对信号光束强度比。(根据参考文献1)

在曲线的直线部分的中央选取数值，我们能够精选出介质的最佳曝光量，此曝光量兼顾到线性与效率之间的需要。从这些相当有用的曲线还能直接读取其它的知识。

从商业的数据表上最常见到的但没有多大用处的相对曝光量 E 绘出的振幅透过率 t 的曲线。这些曲线比上述的曲线更易于从实验上获得，而且它们容易给出最佳平均曝光

量和条纹能见度的知识。可惜的是，相对曝光量绘出的透射振幅曲线并不给出衍射效率的明显数据，而从这样的曲线不可能知道一种给定的介质是否有足够的分辨率来形成全息图。在本评论中可看到这两类曲线图。

A. 卤化银干板及胶片

卤化银照相乳剂用来制成第一批全息图，而且它仍然是最普通的记录介质。它有高的灵敏度，很易买到。但要求湿的多步骤处理和昂贵的处理设备。这种乳剂适于记录透过或反射全息图，能被漂白，把吸收全息图转变为相位全息图，通常是既得到较高衍射效率又得到较高噪音水平，随之得到较高的信噪比 (SNR)。

目前，下列类型的乳剂是可以买到的，特别适于全息照相：

Agfa-Gevaert Inc: 8E56, 8E70,
8E75, 10E75,
14C75, 39C56.

Eastman Kodak Co: 649F, 649GH,
HRP, HRP11,
S0141, S0173,
S0253, S0285,
S0343, S0410,
S0424, 120-02
型, 125-01型,
高速全息相照干板, 胶片编号
3414, 5096, 5486
和8468。

从有关公司可获得这些乳剂的详细资料。如像我们前面所讨论过的那样的曲线示于图5—8。由 Kisng, Johansson 及 Biedermann 等人独立研究过适用于全息照相的乳剂。

全息照相工作者经常希望改进商品乳剂。Graube⁷, Nishida⁸ 等人列出了详细的漂白方法。这些对于希望制作相位全息图的人是具有兴趣的。从乳胶中除掉残留的染料也常常是众所希望的。例如，从 Kodak S0173

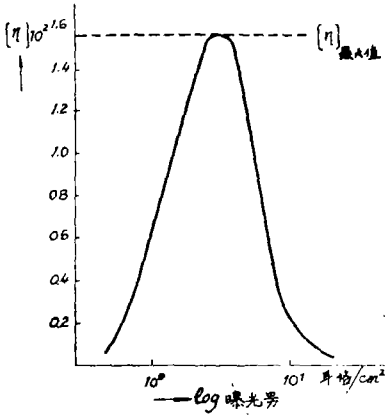


图5 曝光量与衍射效率的依赖关系 (根据参考文献2)

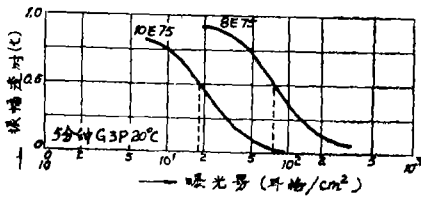


图6 在633nm波段振幅透射率曲线 (根据参考文献2)

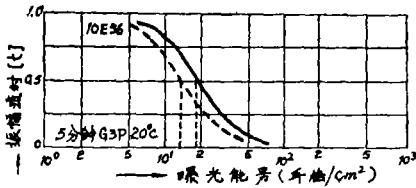


图7 在476nm和521nm波段振幅透射率曲线 (根据参考文献2)

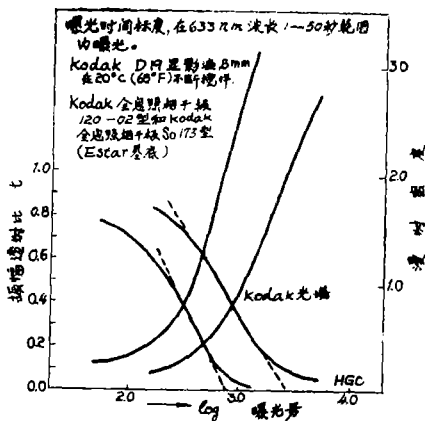


图8 振幅透射率-t-log E曲线 (根据参考文献3)

(还有120型)中除掉绿色的残余物的有效方法已由Coblitz及Carney所提出⁹。

B. 光致抗蚀剂

光致抗蚀剂是能用来制作表面浮雕全息图的一种光敏材料。因为这种表面浮雕能转换到另一种材料如软塑料上以构成相位全息图，从而能大量复制，这就成为这种记录介质有吸引力的潜在应用而受到重视。上述的处理过程是干燥的。但是，这种介质的涂层适用期是有限度的。全息工作者最通常采用的光致抗蚀剂为Shipley AZ1350，虽然较新Shipley Az-1350J也具有高分辨率和抗蚀金属溶液，而这种溶液对大量全息照相复制是必需的。Bartolini¹⁰，及Tsujiuchi¹¹，Norman及Singh¹²等研究了光致抗蚀剂的特性。其数据曲线表示在图9。Shipley AZ-1350在340~450nm波段是有用的而且具有大约是Kodak 649F乳剂1/25,000的灵敏度。Horizons Research LHS7光致抗蚀剂波段受到限制和灵敏度低的问题已有了较大程度的克服。这种光致抗蚀剂不仅在所知的光致抗蚀剂中具有最高的曝光灵敏度，而且是宽谱带红光灵敏抗蚀剂的改型。这种光致抗蚀剂改型可以提供在任何光谱区域都具有灵敏性直到1 μ m。¹³ Horizons Research LHS7的数据曲线表示在图10。

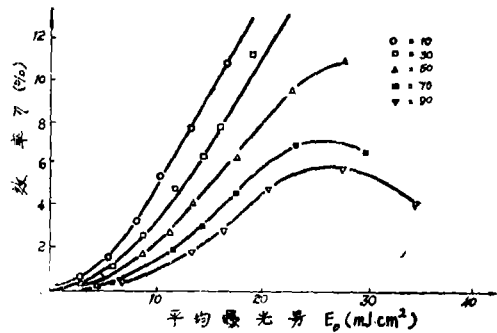


图9 各种参考—物光束比R，效率 η ，对不平均曝光量 E_0 的函数。Shipley AZ-1350 (参考文献10)

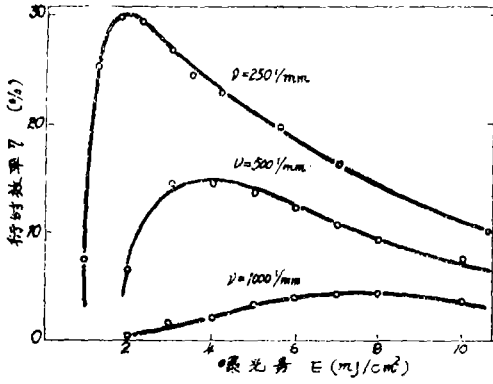


图10 Horizons Research LHS7光致抗蚀剂在空间频率 ν 为记录参数时不冈平均曝光量 E 的衍射效率 (根据参考文献13)

我们在这里应当注意,记录在光致抗蚀剂上的全息图通过化学腐蚀方法已转换为氧化铁薄膜,于是构成薄的相位全息图。对于恶劣的环境条件,这一步骤是有助于保护光致抗蚀剂全息图。¹¹

C. 热塑料 (光塑料)

普通热塑料没有光敏性,热塑料必须冈光电导体相结合形成一个表面体,而这个表面体在不冈光强度下会使此表面体变形。所谓光塑料是在普通玻璃基片上依次涂复透明电极,光电导体和热塑料所构成的。在热塑料上使用电极使其产生静电电荷,这种电荷通过光电导体转换为全息照相干涉花样的静电复制品 (copy)。电流流过电极发热使热塑料软化,作用为显影处理,使全息照相花样被记录下来。增大加热将会消除花样。于是,具有读—写—擦本领的光塑料,对探索能在全息照相存贮系统中的随机存贮介质的研究者们是给予极大的兴趣。可惜的是,目前,这种热塑料在使用数千次之后就发生疲劳,以致限制了这种应用。低空间频率响应和中等信噪比 (SNR) 是热塑料另一个缺点。

热塑料构成相位全息图而因此具有高的衍射效率。光电导体的光灵敏性使光塑料薄膜为最灵敏的非银全息照相记录介质。

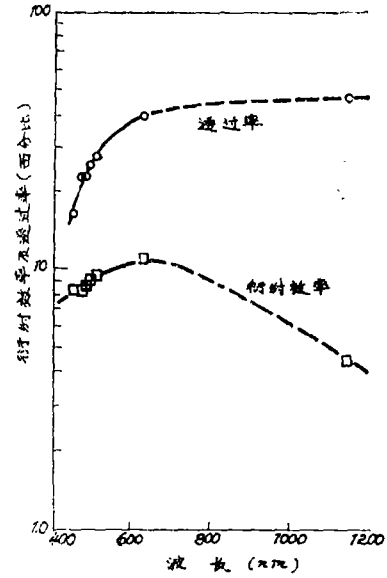


图11 典型的热塑料——光电导体器件衍射效率及透过率的光谱变化 (根据参考文献18)

有关热塑料的一些数据曲线表示在图11。更进一步的资料可以在参考文献1及11—19去查找。敏化的热塑料也曾通过光致降解用来形成全息图¹⁴。

D. 光聚合物

典型的光聚合物由不完全聚合的聚合物组成。当曝光时这种聚合物通过光敏剂的中间体进行激活,引起链型聚合反应,这种反应需要数分钟完成。被光照射的面积有较高的密度,因此比基本材料具有较高的折射率;因此,光聚合物形成的相位全息图的效率是高的。但是,需要曝光能量较高,是这种介质目前的主要缺点。

光聚合物随着曝光而不需要处理就能立即观察到所形成的全息图,这对实时全息照相提供了明显的好处。为了漂白染料和完成剩余单体的聚合作用需要定影过程,但处理是干燥的,能在数分钟内就地完成。光聚合物是十分廉价的。由 Booth 等在 du Pont de Nemours 公司^{20,21,22}研制的,涂复在玻璃或聚酯树脂 (mylar, 译注二) 薄膜基片上的光聚合物,包括丙烯酸酯型可聚合的光聚

合物单体，引发剂和赛璐璐聚合物粘合剂组成。触发剂开始对紫外辐射灵敏；由于添加了染料敏化剂也对光学光谱兰—绿区域的可见辐射灵敏。这种敏化作用可供532及514nm激光线之用。这种介质所需要的典型曝光能量在10及40mJ/cm²之间，可是当曝光期间使用氮槽复盖被曝光的介质膜时就可以减少到1~10mJ/cm²，这种介质的数据曲线表示在图12。

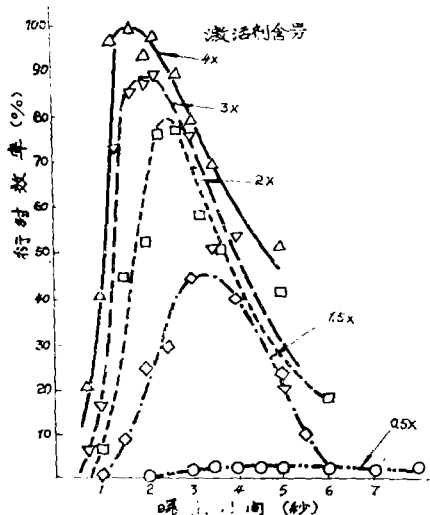


图12 对组成变化和厚度为50μm的介质，在标准条件下曝光时间内最后衍射效率。(杜邦光聚合物。根据参考文献22)

Newport 试验公司等也研究了光聚合物。目前市场上的NRC是由Hughes研究室研制的光聚合物NRC系列H。这种光聚合物是在曝光之前将两部分液体的光聚合物混合和涂复在玻璃基片上。它对两种光谱是敏感的。一个是He-Ne和红宝石激光波长、另一个是488nm氩离子激光。所需要的曝光能量为4—4mJ/cm²。对上述两种光聚合物所需要的曝光量的可观部分，能用以闪光的预曝光形式达到。NRC H光聚合物的数据曲线表示在图13。

E. 重铬酸盐明胶

记录在重铬酸盐明胶上的全息图具有很接近我们理想的光学特性。衍射效率接近100%，噪音水平很低。但是，薄膜的制备过程

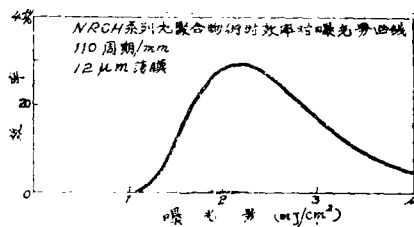


图13a (根据参考文献24)

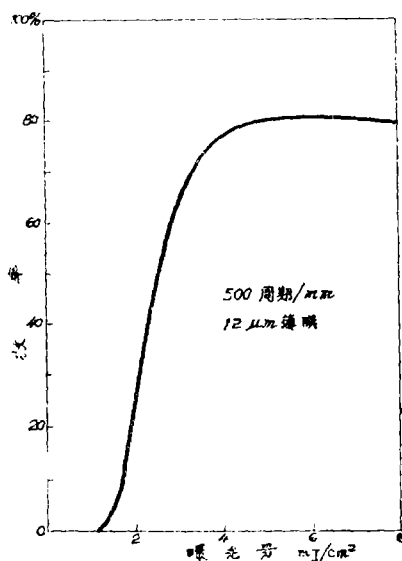


图13b (参考文献24)

却相当复杂，而且必须用心逐一地完成。在文献1、25、26及27中提及的一些制备过程能适用于照相乳剂及其它胶层。这些介质还由于它的有限地光谱响应及它对高湿度敏感而稍微受到限制。

一旦正确敏化后，明胶对曝光就起反应而发生膨胀和改变它的溶解度。然后，有两种可能的处理。第一种，把未曝光的明胶溶解在温水中，得到表面浮影而形成平面相位全息图。第二种处理，把明胶用乙醇迅速脱水；此可减少膨胀，增加应力及引起取向变

译注：Mylar为美国杜邦公司聚酯胶片登记商标。

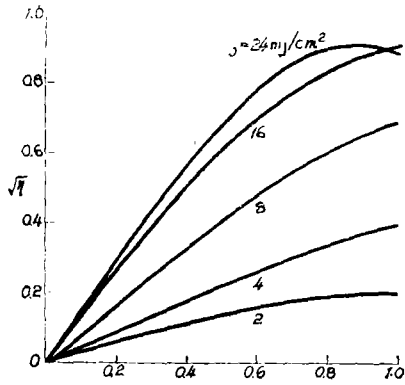


图14 重铬酸盐明胶薄膜的 $\sqrt{\Delta n} - J$ 特性曲线。数据由 488nm 在两平面波各于干板法线成 22° 角和互成 45° 角时所形成的全息图获得的 (根据参考文献 1)

化, 使在明胶体内留有微细裂纹, 形成高效率体相位全息图。一些重铬酸盐明胶的数据曲线见图14。

F. 光变色介质

光变色是一种介质在曝光的时候发生可逆的颜色变化。它是大多数的固体, 液体, 有机晶体和无机化合物所具有的特性。1、27-28、29 记录在这种介质上的全息图没有颗粒, 不需要显影, 而且以热的或光学的任何一种方法消除之后, 还可以重复使用许多周期。但是这种介质是相对不灵敏的而且在记录时必须冷冻以避免由于热弛豫所造成的衰减, 曝光之后继续存在的灵敏性将在读出光束中衰减。它最终也发生疲劳变为无灵敏性。但

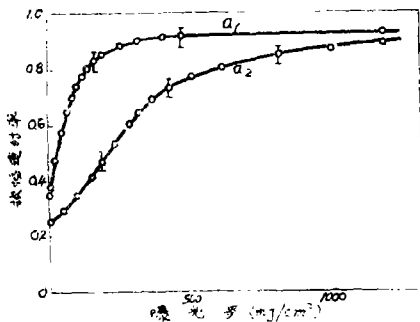


图15 用紫外光予着色到橙色的 a_1 和 a_2 的亚水杨苯胺在 4880 Å 振幅透射比与 4880 Å 曝光量的关系。(根据参考文献 29)。

是, 把介质做成薄膜就能使这些缺点减至最小, 而且显示出有希望做为实时资料存贮介质。数据曲线见图15。

G. 电光晶体

在一些晶体中, 例如铌酸锶钡或铌酸锂, 通过曝光释放的电子在低曝光区域迁移而且被俘获, 它所产生的空间电荷载荷的电场, 调制晶体的折射率而形成相位全息图。电光

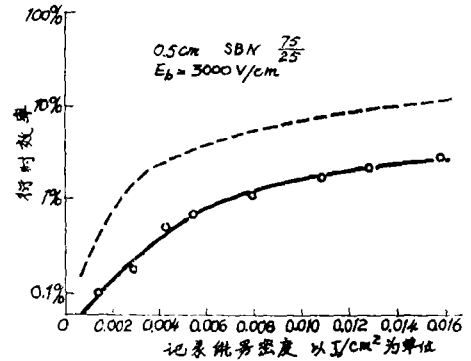


图16 厚度为 0.5cm 未掺杂的 $\frac{75}{25}$ SBN (译注三) 晶体的衍射效率对记录能量密度的曲线。虚线表示当记录和读出应用 3000v/cm 电场时的效率。实线表示仅在记录时应用电场 (根据参考文献 31)

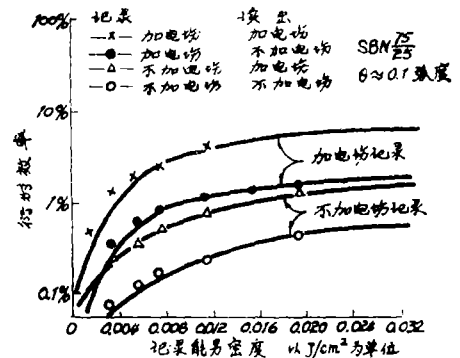


图17 0.5cm 厚未掺杂的 $\frac{75}{25}$ SBN 晶体在不同记录和读出条件下记录能量密度与衍射效率的关系。应用电场为 3000v/cm。(根据参考文献 31)

译注三: SBN 为铌酸锶钡分子式 $Sr_x Ba_{1-x} Nb_2 O_6$ ($x = 0.25$) 之缩写。

晶体的这种效应是可逆的，因此和光变色介质显示的许多优点是同样的。但是，在电光晶体上形成的全息图要比在光变色介质上形成的全息图的效率高一些，能定影，而且并不疲劳。所以它们是被彻底的进行了研究。^{27,30,31}数据曲线见图16和17。

H. 聚苯乙烯自由基薄膜

这种薄膜是由染料形成体，挥发性激活剂和热塑料粘合剂组成的。曝光使开始无色的聚苯乙烯染料变为强烈着色聚苯乙烯染料所形成的振幅全息图，它的机理还没有完全弄清。曝光之后的薄膜被定影。这种介质具有实时显影的特性和曝光放大的可能性，但仍然处在试验阶段。Horizon研究公司¹³正在探索这种方案。数据曲线表示在图18。

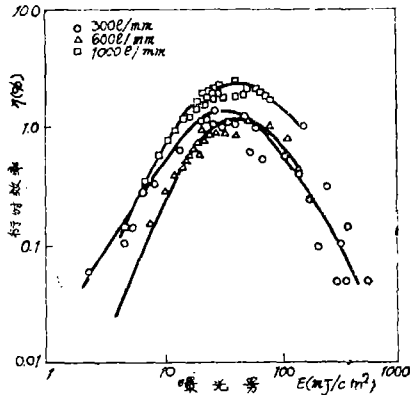


图18 衍射效率 η 对曝光量 E 的函数曲线 (以空间频率 ν 为参数记录在 Horizon Research 聚苯乙烯自由基薄膜上的全息图光栅)。(根据参考文献13)

I. TEP薄膜〔译注四〕

这种薄膜是由基底，导电层和有机光电导顶层组成的。当充电之后，曝光产生静电潜像，然后将此潜像用湿或干的调色剂显影，就形成振幅全息图。通过热熔化调色剂颗粒促使稳定。虽然，现时这种介质在频率响应和存贮容量稍微不足，这两个方面的有效改进是可能的。Scott Graphics xp5-004 是市场上可以得到的这种介质的改型。数据曲线见图19。

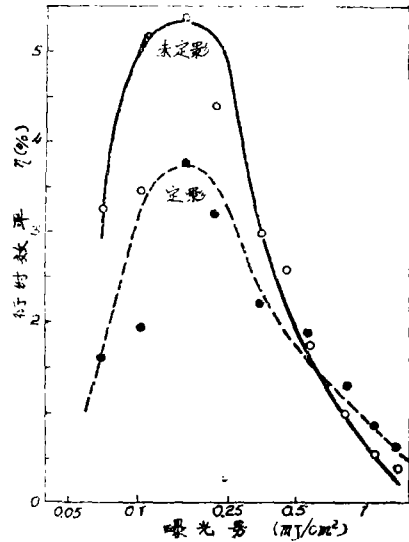


图19 衍射效率 η 对曝光量 E 的函数曲线。(以 $\nu = 166$ l/mm 及 $K = 1$ ，记录在 Scott Graphics TEP xp5-004 薄膜上的平面波光栅。加热定影之前和之后)。(根据参考文献13)。

III 应用

在这一节中，我们提供一个表、意欲帮助对不同应用选择适宜的记录介质。表1按字母顺序列出某些全息照相应用的类别和同时列出我们在这篇论文中所讨论过的全息照相应用介质的适合性。这不是企图做彻底的或完正的介绍。

IV 总结

在这篇评论中我们研究了大多数主要全息照相记录介质的性质。我们考察了它们的优点和缺点，这将会帮助全息工作者合理的选择特殊应用的记录介质。我们不可能研究所有的已被用于或被提出做为全息照相记录介质或处理方法。像无定形半导体和重氮

译注四：TEP为 Tetraethylenepentamine 之缩写。系四乙撑五胺

基、微泡、干燥银、铋，氧化钒，硫化砷以及化学腐蚀膜等那样的未被广泛采用的介质就没有在这里讨论。一些介质特性方便的总

介绍在表 2。除了参考文献外：还提供了各种介质及其某些应用的额外资料文献目录。

表 1

介质种类	重铬酸盐明胶	电光晶体	光变色介质	光聚合物	光致抗蚀剂	卤化银和胶干板	聚苯乙烯自由基薄膜	TEP 薄膜	热塑料
应用									
生物—医学	×			×					
计算机产生的全息图				×		×			
组合全息图合成	×			×	×	×			
复空间沪光片	×			×		×			
彩色全息摄影	×			×		×			
全息显微术	×			×		×			
全息电影	×			×		×			
全息照相显示器件	×		×	×		×			×
全息照相信息存贮		×	×	×					×
全息照相光学元件	×			×	×	×			
全息照相复制				×	×	×			
全息照相信息处理		×	×	×		×			×
双曝光全息照相干涉术	×			×		×	×		
全息照相微粒分析	×			×		×			
实时全息照相干涉术		×	×	×		×	×	×	×
安全应用	×			×		×			
斑纹全息照相	×			×		×			
视觉技术应用	×			×		×			

译注：以×做标记者表示可做此项应用

表 2

(根据参考文献27) 全息图记录介质

介质	光谱灵敏度 λ (nm)	最高曝光量 (mJ/cm ²)	空间频率 (条/mm)	光栅类型	正弦光栅的最高衍射效率 η (%)	显影	可擦	备考、典型应用
卤化银乳剂	感光： 400~700 (< 1300)	(10 ⁻⁶) 10 ⁻⁴ 10 ⁻¹	(100)—500 —10,000	平面/体。 吸收	5	×(湿)	—	市场上可买到。高灵敏度。全色的。潜像。彩色全息图。反射全息图
卤化银乳剂漂白				平面/体。 相位	20—50	(漂白)	—	

介 质	光谱灵敏度 λ (nm)	最高曝光量 (mJ/cm^2)	空间频率 (条/mm)	光栅类型	正弦光栅 的最高衍射效率 η (%)	显 影	可 擦	备 考。 典型应用
重铬酸盐明胶	350—520 (感官视觉。633)	2—30	1000 3000	平面相位 体相位	30 90	× (湿)	—	高S/N。 只读存储器。漫射。
光致抗蚀剂	441 458 483 488	10 100—300 3000 5	<3000 500	平面相位 闪耀反射 平面相位	30 70—90 15	× (湿) 加热1分钟	—	精密光学, 分光镜, 复制母光栅, 资料存贮。
光塑料 (热塑料) 介质	感光。 全 633	(10^{-3}) 10^{-1}	带通滤波器。 ~400 ~1000	平面相位	6—15	× 加热(秒)	× (页)	可循环的读—写存贮器。全息照相干涉术。
光聚合物	1150 紫外线 458 感光	~500 1 2000 10—40	~500 带通滤波器。 ~200 —1500	平面相位 体相位	~1 10~85	(定影: 光)	—	全息照相干涉术。只读存贮器, 厚光学元件
光致降解聚合物 (聚甲基丙烯酸甲酯, 醋酸纤维素)	紫外线 (灵敏)	1000~ 20,000	<2000	体相位 (厚度 μm ...mm)	50—90	(定影: 紫外线)	—	只读存贮器。厚光学元件
光变色薄膜, 玻璃, 晶体。	激活, 300~450; 漂白。 550—700	200—5,000	1000— 10,000	体吸收	12	—	×	读—写存贮器, 全息照相干涉术
电光晶体 (掺金属 LiNbO_3 , SBN) (不掺杂 LiNbO_3)	(488)	(1—50—) 1000 (10^6)	>1000	体相位	(1...) 60	— (定影)	× (加热, 全体的)	读—写存贮器
磁光介质	(加热) (694)	10—100 (脉冲, < μ 秒)	>1000	磁极的	<0.01	—	× 页	读—写存贮器

译自: [Optical Engineering], Vol. 14/

Number 5 September/October 1975,

p393—403

[韩心得译 刘杏双 顾去吾校]