[19] 中华人民共和国国家知识产权局

[51] Int. Cl.
G03H 1/08 (2006.01)
G03H 1/04 (2006.01)
G03H 1/28 (2006.01)

[12] 发明专利说明书

专利号 ZL 02816330.3

[45] 授权公告日 2009 年 8 月 12 日

[11] 授权公告号 CN 100527018C

[22] 申请日 2002.7.26 [21] 申请号 02816330.3

[30] 优先权

[32] 2001.7.26 [33] DE [31] 10136088.6

[86] 国际申请 PCT/EP2002/008373 2002.7.26

[87] 国际公布 WO2003/014837 德 2003.2.20

[85] 进入国家阶段日期 2004.2.20

[73] 专利权人 特萨斯克里伯斯有限公司

地址 德国海德堡

[72] 发明人 史蒂芬·内特

克里斯托夫·迪特里希

马蒂亚斯·格施帕克

托拜厄斯·克雷斯

斯蒂芬·博格施姆勒

[56] 参考文献

US5568574A 1996.10.22

US5768242A 1998.7.16

Electric – field – switchable stratified volume holograms inphotorefractive polymers. J. J. Stankus, S. M. Silence, W. E. Moerner, G. C. Bjorklund. OPTICS LETTERS, Vol. 19 No. 18. 1994

Stratified volume holographic optical elements. R. V. Johnson, A. R. Tanguay. OPTICS LETTERS, Vol. 13 No. 3. 1988

审查员 任荣东

[74] 专利代理机构 中国国际贸易促进委员会专利商标事务所

代理人 李 勇

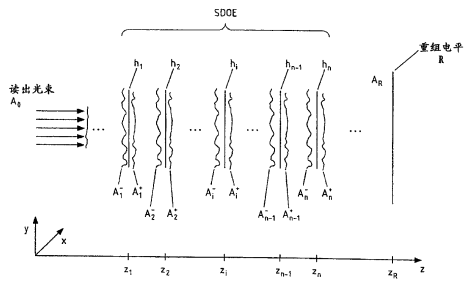
权利要求书 6 页 说明书 19 页 附图 7 页

[54] 发明名称

多层全息图的计算方法、多层全息图的制作方法及具有多层全息图的存储介质

[57] 摘要

本发明涉及一种计算具有多于或等于 2 个全息图的计算机生成多层全息图的方法。将读出光束的场 A_0 和再现面内的场 A_R 预设为数学函数。除要计算的全息图外，也将该层结构的所有其它全息图预设为数学函数。然后，在全息图 h_i 的两侧计算场 A_i^+/A_i^-，从而通过由场 A_i^+/A_i^- 形成商数来计算全息函数 h_i。本发明也涉及一种制作全息图的方法和根据该方法制得的具有多层全息图的全息存储介质。



1. 一种用于计算具有 n 个全息图的计算机生成多层全息图的方法，其中 n 是大于或者等于 2 的整数，其特征在于:

预设一读出光束的光场 A_0 为数学函数;

预设光场 A_R 在再现平面内;

预设 n－1 个全息图 h_k 的数学函数，其中 k 不等于 i 且 k 和 i 假定为 1 至 n 间的值;

计算沿光束方向位于第 i 个全息图 h_i 前的光场 A_i^-，

i >1 时，由读出光束的光场 A_0 与沿光束方向设置在第 i 个全息图前的、具有 k <i 的所有全息图 h_k 的全息函数来计算;

i =1 时，由光场 A_0 来计算;

反过来计算沿光束方向位于第 i 个全息图 h_i 后的光场 A_i^+，

i <n 时，由再现平面内的光场 A_R 与沿光束方向设置在第 i 个全息图后的、具有 k >i 的所有全息图 h_k 的全息函数的组合来计算;

i=n 时，由光场 A_R 来计算;

由光场 A_i^+/A_i^- 来计算全息函数的商数.

2. 依照权利要求 1 的方法，其中如果 A_i^- 的值在此网格点处等于零，则逐点地用任意值来对 h_i 赋值。

3. 依照权利要求 1 或 2 的方法，其中编码地计算要计算的第 i 个全息图 h_i 的全息函数。

4. 依照权利要求 3 的方法，其中量子化地计算要计算的第 i 个全息图 hi 的全息函数。

5. 依照权利要求 4 的方法，其中二位量子化地计算要计算的第 i 个全息图 hi 的全息函数。

6. 依照权利要求 3 的方法，其中在网格点处取计算第 i 个全息图 h_i 的函数并与阈值相比，及当第 i 个全息图 h_i 的函数低于所述阈值时将第 i 个全息图 h_i 的函数的代码值 h_i'设为零，否则设为 1。

7. 依照权利要求 1 的方法，其中保留除 k=j≠i 外的所有全息函数

h_k，重新计算光场 A_j^+和 A_j^-，而且重新计算全息函数 h_j。

8. 依照权利要求 7 的方法，其中还重新计算已经计算过一次的全息函数 h_k。

9. 依照权利要求 7 或 8 的方法，其中当由出现在再现平面内的计算出的光场 A_R'和原来计算中输入的光场 A_R 产生的误差低于误差条件时，结束所述层结构中另外的全息图 h_k 的重复计算。

10. 依照权利要求 1 的方法，其中当 m 是大于或等于 2 的整数时，对于 m 个不同的读出形态，计算全息函数 h_i^j，j=1...m；并且由 m 个全息函数 h_i^j 的总和来计算全息函数 h_i。

11. 依照权利要求 1 的方法，其中当 m 是大于或等于 2 的整数时，对于 m 个不同读出形态中的第一个，计算全息函数 h_i^1，并通过对至少一个另外的全息函数 h_k 的重复计算来最优化全息函数 h_i^1；及

对于每一个其他的读出形态，保留前面 $k\neq i$ 时计算的全息函数 h_k，而计算全息函数 h_i^j，$1<j=m$，并通过对至少一个另外的全息函数 h_k 的重复计算来最优化全息函数 h_i^j。

12. 依照权利要求 1 的方法，其中当 m 是大于或等于 2 的整数时，计算对于 m 个不同读出形态的全息函数 $h_i^1...h_i^m$；其中全息函数 h_i 由单个全息函数 h_i^j 的空间隔开部分组成。

13. 依照权利要求 10 至 12 中任一项的方法，其中对于不同的读出形态，采用不同角度、不同波长、不同振幅分布和／或不同相位的读出光束。

14. 依照权利要求 13 的方法，其中计算全息图 h_k，使得其对沿读出光束不同传播方向的照射，产生不同的再现。

15. 依照权利要求 14 的方法，其中两束读出光束的传播方向相差 91°至 269°。

16. 依照权利要求 1 的方法，其中所述多层全息图两个不同全息图 h_k 间的最小间隔ΔZ_{min} 由下式确定：

$$\Delta z_{min} = \frac{ds}{\tan\alpha}$$

其中 ds 是数字全息图的像素的几何尺寸，α角是一阶衍射的角度，

与波长有关。

17. 依照权利要求 1 的方法，其中所述多层全息图的两个不同全息图 h_k 间的最大间隔 ΔZ_{max} 由下式确定:

$$\Delta z_{max} = \frac{\Delta x}{2\tan\alpha}$$

其中 Δx 是全息元件的几何尺寸，α 角是一阶衍射的角度，与波长有关。

18. 依照权利要求 1 的方法，其中从至少一个单个的已存在的全息函数 h_k 能够再现出可读信息，和

仅从所有全息图组合中的剩余全息图能够再现出可读信息。

19. 依照权利要求 1 的方法，其中随机地选择所述全息函数 h_k，所述全息函数 h_k 不包含任何可以自身再现的信息。

20. 依照权利要求 19 的方法，其中将 n-1 个全息函数 h_k 的每一个都预设为随机选择的相位图，而且将第 i 个全息图计算为 n-1 倍 XOR 编码的全息函数 h_i.

21. 依照权利要求 1 的方法，其中确定第一层的全息函数 h_i，使得该层的可视图以明文的形式出现。

22. 依照权利要求 1 的方法，其中将一个至少部分反射的层确定在所述层结构内，将再现 R_1 预设为所述读出光束的反射部分，并考虑所述至少部分反射读出光束来计算全息函数 h_i。

23. 依照权利要求 22 的方法，其中将再现 R_2 预设为所述读出光束的透射部分，并考虑所述读出光束的透射部分来计算全息函数 h_i。

24. 依照权利要求 1 的方法，其中将至少两个不同的全息函数 h_j^1 和 h_j^2 预设为具有 k=j 的选择全息层，及对于所述至少两个不同的全息函数 h_j^1 和 h_j^2，计算所述第 i 个全息函数的计算值并将其叠加。

25. 依照权利要求 1 的方法，其中将振幅全息图、相位全息图或振幅－相位混合全息图用作全息图。

26. 依照权利要求 1 的方法，其中将二位全息图和灰度值全息图用作全息图。

27. 一种由至少两个计算机生成的全息图制作多层全息图的方法，

其中采用依照权利要求 1 至 26 中任一项的方法来计算所述至少两个全息图，

将所述至少两个全息图的各条信息都写进存储介质的光学可变层内，及

至少两个光学可变层形成所述多层全息图的层结构。

28. 依照权利要求 27 的方法，其中将所述全息图写进存储介质的至少两个不同区域内。

29. 依照权利要求 27 的方法，其中将所述全息图写进至少两种不同存储介质内。

30. 依照权利要求 29 的方法，其中所述至少两种不同存储介质结合在一起形成一个整体。

31. 依照权利要求 27 至 30 中任一项的方法，其中将至少一个全息图层写进一个作为存储介质的聚合物膜内。

32. 依照权利要求 31 的方法，其中首先用至少一个全息图层来单个地写至少两个聚合物膜的每一个，然后将至少两个聚合物膜结合在一起形成层结构。

33. 依照权利要求 32 的方法，其中所述至少两个聚合物膜胶合在一起形成层结构。

34. 依照权利要求 31 的方法，其中首先将至少两个聚合物膜结合在一起形成层结构，然后对结合在一起的该至少两个聚合物膜逐层地进行写入。

35. 依照权利要求 34 的方法，其中首先将所述至少两个聚合物膜胶合在一起形成层结构。

36. 依照权利要求 27 的方法，其中对具有可见明文信息的至少一层进行写入。

37. 依照权利要求 27 的方法，其中插入一个至少部分反射的层。

38. 依照权利要求 27 的方法，其中插入具有在时间上可变的光学性质的至少一层。

39. 一种读出多层全息图的方法，其中将具有计算机生成多层全息

图的存储介质设置在读出光束的光路中，其中依照权利要求 27 至 38 中任一项所述的方法来制得该多层全息图，并且依照权利要求 1 至 26 任一项所述的方法来计算该多层全息图，其中预设在该多层全息图计算中的读出光束的边界条件自身地且在读出光束和存储介质间进行调节，并将光学记录体设置在再现平面内。

40. 依照权利要求 39 的方法，其中将所述多层全息图的若干个全息图设置在至少两种不同的存储介质中，及

根据预设在所述全息图计算中的边界条件来彼此相互地定位所述存储介质。

41. 依照权利要求 39 或 40 的方法，其中所述多层全息图的至少一个层显示出在时间上可变的振幅和／或相位信息。

42. 依照权利要求 41 的方法，其中借助于电光元件来产生所述至少一个层的可变振幅和相位信息。

43. 一种用于具有至少两个全息图的计算机生成多层全息图的存储介质，该存储介质借助于依照权利要求 27 至 38 中任一项所述的方法来制得，而且借助于依照权利要求 1 至 26 中任一项所述的方法来计算，所述存储介质具有至少一个光学可变材料层，其中将所述多层全息图的至少两个全息图写进该至少一个光学可变材料层内。

44. 依照权利要求 43 的存储介质，其特征在于设置至少两个单独的材料层，其中所述每个单独的材料层都至少具有一个所述多层全息图的全息图层。

45. 依照权利要求 43 的存储介质，其特征在于提供若干个彼此结合在一起的光学可变材料层。

46. 依照权利要求 43 的存储介质，其特征在于两个单独全息图的最小间距满足条件：

$$\Delta z_{min} = \frac{ds}{\tan\alpha}$$

其中 ds 是数字全息图的像素的几何尺寸，α角是一阶衍射的角度，与波长有关。

47. 依照权利要求 43 的存储介质，其特征在于两个单独全息图的

最大间距Δz_{max}满足条件：

$$\Delta z_{max} = \frac{\Delta x}{2\tan\alpha}$$

其中Δx是全息元件的几何尺寸，α角是一阶衍射的角度，与波长有关。

48. 依照权利要求 **43** 的存储介质，其特征在于至少一个层包含有可见的明文信息。

49. 依照权利要求 **43** 的存储介质，其特征在于提供至少一个层来用于产生在时间上可变的振幅图和／或相位图。

50. 依照权利要求 **49** 的存储介质，其特征在于，提供至少一个电光层来用于产生在时间上可变的振幅图和/或相位图。

多层全息图的计算方法、多层全息图的制作方法及具有多层全息图的存储介质

技术领域

本发明涉及一种计算多层全息图的方法和一种制作多层全息图的方法以及具有依照该方法制作的多层全息图的存储介质．提到多层全息图，特别涉及的是计算机生成多层全息图．后者能显示出特殊的性能，尤其是作为安全特性可用于很多应用中．具体地，这些性能有角度选择性、波长选择性、闪耀性（仅能看到一阶）、相位选择性以及其它．

背景技术

由制作全息图的现有技术可知有各种实验方法．一方面，可以提及实验产生的多层全息图，另一方面，可以提及体全息图．

由光子学报 1986 年第 33 卷第 3 期 255－268 页（Optica Acta,1986,Vol.33,No.3,pp255-268）的文章已知有实验记录（experimentally recoreded）的两层全息图．其中，两层薄感光层（8μm）沉积在一个厚玻璃板（1.34μm）的正反两面．然后，用两束彼此成一定角度的平面波照射该玻璃板．再用角度和波长都可变化的读出波来照射显影全息图．这篇文章建立的理论是基于可将正弦光栅分解成贝塞尔函数，而且该理论与实验吻合的极好．由此制成的两层全息图所显示出的衍射效率比单层全息图理论极限所允许的衍射效率更高．这些全息图显示出了很高的角度和波长选择性，但它们是周期性的．而且这些全息图并未显示出任何闪耀的效果，即正阶和负阶（order）处于相同的强度数量级．作为一种应用，引入的模拟－数字转换器特别依赖于角度选择性．

体全息图显示出可用在各个应用中的很多性能．然而迄今为止，体全息图既不是计算精密的，也不存在任何可能性来将计算体全息图

（calculated volume hologram）曝光成体全息载体材料。由于这个原因，体全息图就不得不被实验地曝光（exposed），从而就包含有实验全息图的所有缺陷。

计算机产生薄全息图能够以已知的方式来进行计算且能够以简单的方式来曝光，然而其并不具有体全息图已知的重要性能。

多层全息图显示出与体全息图非常类似的性能，可以以类似于薄全息图的方式来进行曝光。然而迄今为止还没有一种合适的方法来计算这类全息图。

发明内容

因此，为了能够将写入的多层全息图写入能够由合适的方法读出的存储介质而消除现有技术的缺点，本发明的技术问题就是首先提供一种计算多层全息图的方法，其能解决上述问题，同时能够写入计算机生成多层全息图。

为此，本发明提供了一种用于计算具有 n 个全息图的计算机生成多层全息图的方法，其中 n 是大于或者等于 2 的整数，其中预设一读出光束的光场 A_0 为数学函数；预设光场 A_R 在再现平面内；预设 n－1 个全息图 h_k 的数学函数，其中 k 不等于 i 且 k 和 i 假定为 1 至 n 间的值；计算沿光束方向位于第 i 个全息图 h_i 前的光场 A_i^-，i >1 时，由读出光束的光场 A_0 与沿光束方向设置在第 i 个全息图前的、具有 k <i 的所有全息图 h_k 的全息函数来计算；i =1 时，由光场 A_0 来计算；反过来计算沿光束方向位于第 i 个全息图 h_i 后的光场 A_i^+，i <n 时，由再现平面内的光场 A_R 与沿光束方向设置在第 i 个全息图后的、具有 k >i 的所有全息图 h_k 的全息函数的组合来计算；i=n 时，由光场 A_R 来计算；由光场 A_i^+ / A_i^- 来计算全息函数的商数。

本发明还提供了一种由至少两个计算机生成的全息图制作多层全息图的方法，其中采用上述第一种方法来计算所述至少两个全息图，将所述至少

两个全息图的各条信息都写进存储介质的光学可变层内，及至少两个光学可变层形成所述多层全息图的层结构。

本发明还提供了一种读出多层全息图的方法，其中将具有计算机生成多层全息图的存储介质设置在读出光束的光路中，其中依照上述第二种方法来制得该多层全息图，并且依照上述第一种方法来计算该多层全息图，其中预设在该多层全息图计算中的读出光束的边界条件自身地且在读出光束和存储介质间进行调节，并将光学记录体设置在再现平面内。

本发明还提供了一种用于具有至少两个全息图的计算机生成多层全息图的存储介质，该存储介质借助于依照上述第二种方法来制得，而且借助于上述第一种方法来计算，所述存储介质具有至少一个光学可变材料层，其中将所述多层全息图的至少两个全息图写进该至少一个光学可变材料层内。

在下文中描述的这种计算机生成多层全息图也可以称作计算机产生层状衍射光学元件（SDOE）。这是因为多层全息图不仅可用于信息的复制，而且可用作光束成形光学元件。但是，在下文中将分别参考全息图和多层全息图而不是光学元件这种一般术语。应当强调的是，本发明一般涉及不依赖于全息信息载体的光束成形光学元件。

这些全息图并不限于具有可见光区域内波长的读出波。具有红外区域（IR）内、紫外区域（UV）内、X 射线区域内波长的读出波或者作为电子束的读出波也是可以的。然而为了说明的目的，将在下文中使用“光波”或“光场”这些术语，但这并不应理解为将本发明局限于这种类型的读出波。

通过本发明可以发现多层全息图的下面这些优点：

角度选择性：这种角度选择性可以借助于角度多重复用（angular multiplexing）来被使用，即诸多数据页能够被计算入一个多层全息图

中，然后这些数据页在读出光束的不同入射角处再现。

波长选择性：这种波长选择性可以借助于波长多重复用来被使用，即数据页能够被计算入一个多层全息图中，然后这些数据页在读出光束的不同波长处再现。

相位选择性：这种相位选择性可以借助于相位多重复用来被使用，即数据页能够被计算入一个多层全息图中，然后这些数据页在读出光束的不同相位波前处再现。对薄全息图和体全息图，相位选择性都是已知的。

振幅选择性：不同读出光束的振幅分布可以是不同的，并且能引起各个全息图的不同计算。可以采用这个事实来将多重复用功能引入多个全息图中，以获得读出光束的不同振幅分布。例如，不同的空间振幅分布可以是振幅高斯分布或者振幅矩形分布。对于振幅选择性，仅照射多层全息图的单个区域也是可能得到的。

特别是通过使用计算机产生全息图所获得的前述这些效果也可以进行结合，因为此处的这些部分可以任意的混合，或者也可以以分层的方式来进行组合。这就意味着必须满足读出光束的两种性能来实现再现。这些组合尤其可以通过具有最佳计算程序的计算机产生全息图以传统体全息图不可能的方式来使用。

闪耀：多层全息图能显示出闪耀的性能，即仅仅一阶出现在再现中。即使是双多层全息图，这也是适用的。对于薄全息图，具有闪耀性能也是已知的，但这仅是对于薄灰度值相位全息图（开诺全息照片）而言的，对于双层薄全息图，并不知道。

多层全息图能进一步显示出薄全息图和体全息图都不具有的已知性能。

在特定的情形中，在再现中不仅出现有计算再现（calculated reconstruction），还出现有叠置在该计算再现上的、单个层的全息图再现。在这种情形下，存储在单层内的信息就被叠置在由层结构引起的信息上。

若分离这些单层，则在特定情形中由单个全息图引起的信息就不可

用.

多层全息图可以以这种方式来计算，即随着一个层或多个层的分离或去除或者随着一个层或多个层的添加或加入而生成另一个再现.

上述这些性能尤其能够应用于安全全息图／数据全息图／识别全息图的领域.

然而，多层全息图也适合于任何种类的光束成形及薄计算机生成全息图和体全息图这些多种应用领域.

附图简要说明

本发明将借助于具体的实施例在下面描述，并参看所附的附图．在附图中:

图 1 示意性地示出具有引入光场的多层全息图;

图 2 示出图 1 中图表的一部分;

图 3 示意性地示出具有多路复用性质的多层全息图的计算，其由三个单独的空间区域组成;

图 4 示意性地示出多层全息图中两个全息图的几何数量级;

图 5 示出用于图 6 应用中的要再现的图片;

图 6 是多层全息图和多层全息图的单个全息图的再现;

图 7 是编码的多层全息图的应用;

图 8 示意性地示出角度选择性和波长选择性;

图 9 示意性地示出多路复用多层全息图的角度选择性和波长选择性;

图 10 示意性地示出具有部分反射层的多层全息图.

具体实施方式

图 1 示出穿过多层全息图（SDOE）并从而以阶式（stepwise）方式改变的光波的图解表示。需要再次强调的是，本发明并不限于作为读出波的光波，而是波长范围不在可见光区域内的光波都可以使用．然而，为了例示的目的，在下文中将采用波长范围内的光来说明本发明的实施例。

多层全息图具有至少两个全息图 h_k; 概括地，在图 1 中示出有 n 个

全息图 h_1 至 h_n，这些全息图彼此平行地设置且间隔很小的距离．再现（reconstruction）出现在距多层全息图一定距离处的再现面 R 上．Z 表示读出光束的传播方向，由此全息图 h_k 的各个位置表示为 z_k，再现面的位置表示为 z_R．在图 1 中，其它的坐标 x 和 y 与示出的 z 方向成直角．

就传播方向 z 定义的坐标系和全息图成直角的定向并不代表着是对本发明的限制，其仅仅是提供一种对下面数学说明的更好理解．同时，读出光波的传播方向并不必要与各个全息图的表面成直角．类似地，所排列的各个全息图也不必要彼此平行且与 z 向成直角．因为本发明既涵盖有下述的角多路复用也包括有将全息图彼此设置成一定角度的可能性．

现在采用一种专门的命名方法，其中沿传播方向（z 向），光场 A_k^- 或者更精确地，$A_k(x, y, z^-)$ 出现在全息图 hk 之前，而光场 A_k^+ 或者更精确地，$A_k(x, y, z^+)$ 出现在全息图 hk 之后．这在图 2 中更详细地示出．而且，初始光场用 $A_0(x, y, z)$ 表示，再现面内的光场用 $A_R(x, y, z)$ 表示．

借助于精确但费时的近场变换方法（NFT）来计算光路内不同位置处的、例如两个全息图间短距离的光场，同时借助于较少费时的夫琅和费近似或菲涅耳近似来计算较大距离上的光场．

层状结构内的单个全息图 h_k 可以是振幅全息图、相位全息图或混合全息图．它们可以是二进制值或灰度值．从而，每个单个的全息图 h_k 都表示一个复值函数．根据该函数，该单个全息图会影响到达的波阵面或较精确地影响光场 $A_k(x, y, z^-)$．对于在全息图 h_k 后出现的波阵面或较精确地是光场 $A_k(x, y, z^-)$，适应于下式：$A_k(x, y, z^+) = h_k\ A_k(x, y, z^-)$．

这可以如下用公式来数学地表示：

光包含有振幅和相位．振幅决定光的强度，而相位决定光波面在空间中的位置．这用复值函数来数学地表示．空间内点（x，y，z）处的光场 A 是：

（1） $$A(x,y,z) = |A(x,y,z)| \exp(i\Phi_A(x,y,x))$$

此处，A 是振幅，Φ是点（x,y,z）处光的相位，i 是复数的常数（根为－1）. 对光学系统的所有计算法则从该表示式得出。

从而，既受振幅影响又受相位影响的全息图 h_k 可以用复值函数来表示。

（2） $h_k(x,y)=|h_k(x,y)|\exp(i\Phi_k(x,y));k=1\cdots n$

例如，如果光场 $A_k(x,y,z)$ 照射纯振幅全息图 $h_k(x,y)$，则就会被全息图部分吸收，即振幅被减弱。这可以借助于全息函数 $h_k(x,y,z)$ 用乘法来表示，从而给出作为位置函数的增益。由于全息图并不影响相位，因此 $h_k(x,y)$ 是实数，即不存在 $\exp(i\Phi)$ 函数。从而，全息图 $h_k(x,y)$ 之后不远的场 $A_k(x,y,z^+)$ 就与全息图 $h_k(x,y)$ 之前不远的场 $A_k(x,y,z^-)$ 联系起来:

（3） $A_k(x,y,z^+)=(h_k(x,y)|A_k(x,y,z^-)|)\exp(i\Phi_A(x,y,z^-))$

这表明，全息图 $h(x,y,z)$ 仅仅影响振幅 $|A(x,y,z^-)|$，而相位 Φ_A 保持不变。

纯位相位全息图仅“改变”光波 A(x,y,z)的相位，但振幅不变。这也用乘法数据地加以描述:

（4） $A_k(x,y,z^+)=|A(x,y,z^-)|)\exp(i(\Phi_A(x,y,z^-)+\Phi_k(x,y)))$

用 Φ_k 代替光场 $A(x,y,z)$ 的相位，振幅保持不变。

如果光场 $A(x,y,z)$ 照射混合全息图 $h_k(x,y)$，则既会引起振幅改变也会引起相位改变，从而导致:

（5） $A_k(x,y,z^+)=(h_k(x,y)|A(x,y,z^-)|)\exp(i(\Phi_A(x,y,z^-)+\Phi_k(x,y)))$

因此，全息图使振幅衰减并使光场的相位改变。

若想由全息图后面的光场和全息函数计算出全息图前面的光场（“逆向工程”），则将复数分解作为乘法的反演即可:

（6） $A_k(x,y,z^-)=(|A(x,y,z^-)|/h_k(x,y))\exp(i(\Phi_A(x,y,z^+)-\Phi_k(x,y)))$

注意指数中的负号。这样，全息图后面的光场就被全息函数增强，相位被“偏移回（shifted back）”.

本发明用于计算多层全息图的方法在下面说明。

如图 1 中所示，在多层全息图层状结构中有 n 个全息图 h_k。第一步，先任意地选定（fix）n-1 个全息图。然后计算出未选定的全息图

$h_i(x,y)$。接下来，将期望的再现（光场 $A_R(x,y,z_R)$），即对应于或以很小的偏差对应于要从多层全息图再现的信息的强度分布选定在再现面内。最后，得知读出光束的光场 $A_0(x,y,z)$。具体地，该读出光束涉及的是激光束平面波。

接下来，由读出场 $A_0(x,y,z)$ 和全息图 h_1 至 h_i 来进行计算以确定在全息图 h_i 平面前出现的光场（"前向工程"）。

为此，计算在第一个全息图 h_1 平面前的读出波的光场 $A_1(x,y,z^-)$。根据等式 5，将该光场乘以第一个全息图 $h_1(x,y)$ 的复值函数。由此得到第一个全息图 $h_1(x,y)$ 后的光场 $A_1(x,y,z^+)$。

由光场 $A_1(x,y,z^+)$，计算第二个全息图 $h_2(x,y)$ 平面前的光场 $A_2(x,y,z^-)$。根据等式 5，将第二全息图 $h_2(x,y)$ 的复值函数乘以该光场。由此得到第二个全息图 $h_2(x,y)$ 后的光场 $A_2(x,y,z^+)$。

继续这些步骤，直到计算出要计算的全息图 $h_i(x,y)$ 平面前的光场 $A_i(x,y,z^-)$。

如果 $i=1$ 时在第 i 个全息图 $h_i(x,y)$ 前没有其它的全息图 $h(x,y)$，就可以由入射读出光束的光场 $A_0(x,y,z)$ 直接计算出光场 $A_i(x,y,z^-)$。

然后，由期望的再现再反过来计算出光场 $A_n(x,y,z^+)$（"反向工程"），其中，为了使期望的再现能够发生，光场就必须沿传播方向出现在该多层结构最后一个全息图 $h_n(x,y)$ 的平面之后。现在根据等式 6，将光场 $A_n(x,y,z^+)$ 除以全息图 $h_n(x,y)$ 的复值函数。由此得到的函数就是必定出现在该平面前的光场 $A_n(x,y,z^-)$。

现在，由光场 $A_n(x,y,z^-)$，反过来计算必定出现在层状结构倒数第二个全息图 $h_{n-1}(x,y)$ 的平面之后的光场 $A_{n-1}(x,y,z^+)$。再除以全息图 $h_{n-1}(x,y)$，从而得到 $A_{n-1}(x,y,z^-)$。

继续这些步骤，直到计算出要计算的全息图 $h_i(x,y)$ 平面后的光场 $A_i(x,y,z^+)$。

如果 $i=n$ 时在第 i 个全息图 $h_i(x,y)$ 后没有其它的全息图 $h(x,y)$，就可以由期望再现的光场 $A_R(x,y,z)$ 直接计算出光场 $A_i(x,y,z^+)$。

现在进行从再现面直至要计算的全息图 $h_i(x,y)$ 平面后面的计算，同

时为了使期望的图像出现在再现面内，计算必定出现在那里的光场。

因此，一方面，由前面的全息图h_1至h_{i-1}和初始光场$A_0(x,y,z)$，已经计算出在全息图h_i平面之前出现的要计算的光场$A_i(x,y,z^-)$。另一方面，为了使期望的再现$A_R(x,y,z_R)$出现在再现面内，就需要知道必定出现在全息图h_i之后的要计算的光场$A_i(x,y,z^+)$。

根据下式，由两个光场$A_i(x,y,z^+)$和$A_i(x,y,z^-)$相除来得到对全息图$h_i(x,y)$精确地计算:

（7） $$h_i(x,y)=\frac{A_i(x,y,z^+)}{A_i(x,y,z^-)}$$

需要考虑的是，在计算中，如果$A_i(x,y,z^-)$的不连续值等于零，则为了避免除以零，假定$h_i(x,y)$的值为任意值。

综上，多层全息图也可以理解为是一种将入射光场$A_{in}(x,y)=A_1(x,y,z^-)$转化成出射光场$A_{out}(x,y)=A_n(x,y,z^+)$的变换元件。在这里，入射光场和出射光场之间存在着很清楚的关系，可以描述为单个全息图与光场的一系列复数乘法。

如果采用已经被精确计算形式的计算函数能被写进介质（medium）内，那么结果即再现将很完美。然而，这里存在的困难在于找到合适的、能以高分辨率和高精度书写光束振幅和相位的书写器件和伴随介质。而且，分辨率和精度是受限的。在多层全息图（multilayer hologram）的由计算机生成的单个全息图的情形中，可以在例如具有微米分辨率的方格网内生成双点图形，即点被书写或不被书写。

但是全息图h_i的计算函数是非常复杂的。为了将复杂的计算函数转变成可用书写器件写入存储介质的函数，就编码数学函数$h_i(x,y)$。

对于简单的编码，在网格点(x,y)处采取计算函数$h_i(x,y)$并与阈值比较。如果函数$h(x,y)$处于阈值之下，则写入 0，否则，写入 1（简单的二进制）。然而，本发明并不限于这种编码，因为从现有技术可以知道有很多种编码。例如，可以提到误差扩散编码和迭代傅里叶变换算法辅助下的编码。

这种编码出现的误差（error）越大，再现中出现的误差也越大。但即使是在二相位全息图下，也能得到良好的结果。

上面提到的误差可以从出现在再现面内的计算光场 $A'_R(x,y,z_R)$ 和原始输入计算中的光场 $A_R(x,y,z_R)$ 推出。

存在有大量几乎是最优的解，即再现基本上与期望的结果吻合。在多层全息图下，单层彼此匹配的越接近，再现就越接近于完美。由于 n-1 个全息图是随机挑选的，而且仅仅计算的是第 i 个全息图，因此这并不是计算开始时的情形。从而，第 i 个全息图就不得不对其它全息图的随机性进行补偿。

为了减小这种误差，可以选择计算得到的 n 个全息图 h_k 中的任何一个，例如 $h_j, j \neq i$。为了计算 h_j，放弃前面使用的当前函数（current function）h_j 而采用上面描述的程序，其它的全息图 h_k 尤其是前面的计算全息图 h_i 保持不变。这样，整个结构就更接近于理想的解，因为现在采用的是 2 个全息图来解决问题。

随后，挑选、放弃（reject）和重新计算还未最优的其它全息图，直到达到预设的误差条件。可以将误差值低于预设阈值作为一个误差条件，或者将当前误差值与前一迭代步骤中计算的误差值之间的差低于阈值作为一个误差条件，换句话说，就是误差不能再明显地增加。

此过程也可以采用迭代的方式来进行，其中挑选、放弃并重新计算先前已经最优的全息图。这样，为了最小化误差，就要反复地重新计算层状结构的各个全息图。

在先前已经描述、用来最优化多层全息图中各个全息图的程序下，优选的是根据 Gerchber-Saxton 法则来计算这种迭代，在该法则中由衍射元件即全息图引起的边界条件可以用编码算符来表示。从而，可以采用目标对准（targeted）的方式来在由全息图占据的区域内挑选一些带（zone），其中在这些带内，由编码全息图的计算产生的噪音（noise）能够被减小。

而且，重复的或者视情况而定的单个全息图函数 $h(x,y)$ 不仅用于写入要存储在一个全息图内的信息，而且还用于在多层全息图的几个全息图或如果需要的话，在所有的全息图上分配该信息。

在下文中，将说明多层全息图计算中的多路复用（multiplexing）。

多路复用指的是多层全息图显示出具有不同读出形态的各种再现全息图。这些形态可以是读出光束的角度、读出光束的波长、读出光束的相位、读出光束的振幅分布等（参见上文）。

在角度多路复用的情形中，尤其会存在着来自不同方向的读出光束照射多层全息图的可能性。这意味着两个读出光束的传播方向相差至少 91^0 至 269^0，也即它们在 z 向具有相反的分量。

存在着各种程序模式来计算多层全息图的多路复用性质。它包括有复数加法、迭代法则及借助于被读出光束照射的多层全息图区域内的空间隔开部分的全息图函数。

为了借助于复数加法来计算具有多路复用性质的全息图，首先对每种形态单独地进行上面概述的过程。然后，再次将 n-1 个全息图预设为固定的，并且对每种形态分别计算第 i 个全息图 $h_i(x,y)$。由此，对于形态 1，得到函数 $h_i(x,y)$，对于形态 2，得到函数 $h_i(x,y)$，...，对于形态 m，得到函数函数 $h_i(x,y)$。接下来，根据下式计算具有复数函数 $h_i(x,y)$ 的第 i 个全息图，作为所有单个函数的复数总和：

（8） $h_i(x,y)=\sum_{j=1}^{m} h_i^j(x,y)$

这表明，在全息函数 $h_i(x,y)$ 中所有单个全息图的信息都累加有读取等式（equality of access）。

为了用迭代来计算具有多路复用性质的全息图，如上面已经描述的，对于具有光场为 $A_R^1(x,y,z)$ 的第一种再现，在第一步中迭代地进行该过程（procedure）。由此，第一种再现的信息就被传递至多层全息图的几个或所有全息图。

然后保留除第 i 个全息图外的所有全息函数 $h_i(x,y)$，并在光场 $A_R^2(x,y,z)$ 下对第二种再现进行迭代过程。在此，第二种再现的信息叠置在为第一种再现而写入的信息上。

重复这一过程，直至所有 m 种再现被全部计算进多层全息图内。

应当注意的是，在迭代计算中，当计算另一再现时，必定会存在前一再现信息的部分损失。因此，对于多层全息图情形中的多路复用函数的计算，迭代法仅适用于一些不同的再现。

为了通过设置由全息图占据的、多层全息图空间区域内的空间隔开区来计算具有多路复用性质的全息图，假定再现信息均匀的分布在全息图的空间区域上。为此，优先选择这样的再现，以使得该重现位于全息图的傅立叶空间内并包括具有随机分布相位的振幅。因而，仅仅全息图的一部分而不是整个全息图$h_i(x,y)$被用来再现信息。

除这种随机分布相位外，其它取决于图案能被最优化的相位分布也是适宜的。这里可以提及的有例如“透镜相位”分布，尤其适于光分布集中在再现中小区域内的全息图。

若分别计算 m 个不同读出形态的全息函数 $h_i^1(x,y)\cdots h_i^m(x,y)$，则通过合成来构建总全息函数$h_i(x,y)$，该总全息函数由单个空间隔开区域的单个全息函数 $h_i^j(x,y)$组成。在图 3 中示出有三种不同的读出形态。

下面的说明适用于用于不止一种读出形态的、已在前面描述的全息函数$h_i(x,y)$的三种计算类型。

如上所述，全息函数$h_i(x,y)$被编码以得到可写的全息函数。从而，除上述的编码误差外还会在多路复用中出现另外的误差，这是由于全息图$h_i(x,y)$不得不携带较多信息的事实。因此，上述的最优化也可以用在多路复用中。

下面给出的说明涉及怎样能够计算出多层全息图两个全息图之间的最小距离。因为在多层全息图的结构中，很重要的是不能使第一个全息图引起的相移分布传递给下面的全息图并在那里再现，避免两种相移叠置在单个全息图中。

此外，可以由 X-Y 平面内计算机生成全息图上各点的离散间隔计算出最佳的最小距离。而且，通过选择预设的再现角度，可以调节各层 Z 位置偏移的容差。

计算机生成全息图具有光栅常数的栅格，该栅格对应于像素几何尺寸 ds 的两倍，参看图 4。作为两个全息图之间最小距离的一个条件，假定来自于第一个全息图 h1 的像素的一阶衍射照射第二个即下一个全息图 h2 的相邻像素。这就确保第一个全息图不会再现在第二个全息图上。由此，对最小间距Δz_{min}，有下式:

（9）$\Delta z_{min} = \frac{ds}{\tan\alpha}$

其中α是一阶衍射的角度，依赖于波长。

另一方面，多层全息图两个不同全息图 h_k 间的最大距离 Δz_{max} 可以由下式确定:

（10） $\Delta z_{max} = \frac{\Delta x}{2\tan\alpha}$

其中Δx 是全息元件的几何尺寸，α是一阶衍射的角度，依赖于波长。这就确保了照射在第一层上的读出光束的至少一半光能也能到达第二层。

前面描述的用来计算多层全息图的方法的各种变量可以用在各种应用中。在这种多层全息图的各个全息图内存在有信息单元的多种组合。

在多层全息图的优选实施例下，能被读出的任何信息都不能被从单个全息图再现出来。这意味着层状结构的单个全息图并不再现，而仅仅是作为整体来再现。

在另一实施例中，能读出的信息可以从当前许多全息图中的至少一个全息图被再现出来，由此，能被读出的信息可以仅从所有全息图仅从所有全息图的一种结合中剩余的全息图再现出来的一种结合中剩余的全息图再现出来。从而，能被自身读出的单个全息图就能单独地用于再现，同时，还可以结合层状结构中其它全息图来再现另外的信息。而且，至少一个单个可再现全息图和多层全息图剩余的全息图可被例如写进不同存储介质内。

在计算机生成多层全息图下，还可进行 XOR 加密，其中第 n-1 个全息图函数 h_k 被预设为随机挑选的相位图，第 i 个全息图被计算作为一个 n-1 倍 XOR 编码全息函数 h_i。本发明方法的这个实施例基于以下的知识: 包含有二进制信息的第 I 条序列例如可以通过一个随机挑选的二进制 Z 序列被编码成 XOR 编码序列。通过下面的例子，这一点将更加清楚:

I: 0 1 1 0 0 1 0 信息

Z: 0 1 0 1 1 0 1 随机序列

XOR:0 0 1 1 1 1 1 XOR 编码序列

接下来，编码沿相反的方 向进行:

XOR: 0011111

Z: 0101101

I: 0110010

上面示出的例子对应于 2 位编码．当然，8 位 XOR 加密也是已知的．

如果在一个二层全息图中，全息函数 h_2 的相位图在 256 个单元中以 0 至 2π的间隔（8 位）来随机挑选，并且计算全息函数 h_1，那么预设的再现信息就作为 8 位 XOR 编码存储在该两层全息图内．

一般地，选择第 n-1 个全息函数 h_k 来作为随机相位图，以使所计算的全息函数 h_1 被 n-1 倍 XOR 编码．

下面将借助于两层全息图来说明各种各样的应用例子．两层全息图的结构很简单，从而很容易进行计算．但尽管如此，两层全息图仍能显示出前述多层全息图的性质，即它们显著地区别于单个的计算机生成全息图．

各个全息图具有相同的尺寸，而且沿 x 和 y 方向在 ds = 1μm 的距离上都包含有例如 512×512 或 1024×1024 个点．该两个全息图的距离是Δz = 58μm，这与等式 9 和 10 相吻合．用具有波长为 632.8μm 的激光束平面波来照射该两层全息图，借助于透镜，再现成像在傅里叶空间内的再现平面上．

选择字母 “A ”的图像作为再现平面内的光场，如图 5 中所示．在设置于再现平面中心外的信号窗口之内，任意地固定相位．接下来，用随机的强度和相位图来预设第二个全息图，并计算该层状结构的第一个全息图．

图 6a 示出两层全息图的再现，其中示出在图 6b 中的信息存储在第一个全息图中．第一个全息图的再现单独地给出+1 阶和-1 阶即与图像中心点点对称的字母 “A ”的图像．对于图 5 的图像，即+1 阶的字母 “A ”，已经计算出该两层全息图．图 6a 中的再现示出了+1 阶字母 “A ”的增强图像，同时出现有比图 6b 中较浅的-1 阶图像．从而，若

两层全息图的第一个全息图携带有可单独再现的信息，那么除实际期望的再现外，由单个全息图产生的图像也可出现在该两层全息图的再现中。

图 6c 示出再现平面内光场的再现，其中仅字母“A”的图像出现，与简单的计算机生成全息图和前述两层全息图的情形相反，没有与再现平面中心点对称的其它图像出现，对应于闪耀效应，如上面已经描述的。第一个全息图的再现示出在图 6d 中。在其中不包含有任何可直接识别的信息。换句话说，再现图像的信息被编码设置并分布在该两个全息图中。图 6e 示出闪耀效应的运用，由此再现平面的整个可用区域能被用于不同信息的再现。

上面描述的这些性质可以由下列事实数学的推出：再现产生于单个再现 $R(h_i)$ 的总和及所有混合项（mixing terms）$R(h_i*h_j)$ 的总和。如果在单个全息图的再现中没有存储任何单个信息，它就不会出现包含单个信息的任何再现。

图 7a 和 7b 示出一种三层全息图的应用。这些层中的两层已经被计算用于数据位图的再现，同时第三层已经与前两层一起被计算用于“O.K.”的再现。如果仅有前两个全息图出现则再现给出图 7a 的数据位图，然而，如果与第三个全息图一起，则就会出现图 7b 所示结合有数据位图“O.K.”的再现。如果第三层存储在一个单个的存储介质，那么后者可被用作一种检验前两层真实性的手段。

两层全息图也显示出显著的角度选择性。在读出光束以大约 0.5^0 的入射角处，再现仍就是可见的。然而在入射角位大约 1^0 处，再现不再可见。这是因为衍射效率η从在 0^0 处的 9.5% 下降到 0.7^0 处的一半，同时在大约 1^0 处衍射效率η下将到噪声限度 3.3% 以下。在相同的间隔内误差率（均方误差 MSE）从 1.5% 上升到超过 18%。

图 8b 示出计算用于 632.8nm 波长的两层全息图的波长选择性，其在大约 520nm 的波长处不能再被读出，因为信号与噪音是不可区别的。

图 9a 和 9b 示出这些效应在角度多路复用和波长多路复用的应用。

两条不同的信息一方面被以不同的角度同时另一方面被计算进一个和相同的两层全息图．依照图 9a 一方面用于 0^0 的连续虚线和另一方面用于 2^0 的虚点线示出两条信息仅能在不重叠的角度范围内被读出．从而，如果其它条的信息不可见的话，仅能读出这两条信息．图 8b 示出关于波长多路复用的相同效应．一条信息仅能在另一条信息不能被识别的波长范围内被识别出，反之亦然．

在另一种实施形式中微明文（micro－plaintext）被写进优选设置在外部的第一层内，所述明文包含有可直接读出的信息，例如名字或者标志．从而，多层全息图具有一个可识别的外部但其并不与可写入的全息信息相互关联．因为即使明文信息是可直接读取的，包含在其内的信息也不能被全息的使用．包含有明文的第一层被包括在计算过程中，作为一个可任选的位图．

另一种实施形式的多层全息图包括有一个部分或整体反射层．在这一点上，各种变化都是可能的并将在下文中说明．

图 10a 示出一个依照上述过程计算的多层全息图，其中一个部分反射层包含在该层结构中，而且考虑至少部分读出光束来计算全息函数 h_i．在图 10a 所示的层结构具有两个全息图 h_1 和 h_2 及沿读出光束的传播方向设置在该两层全息图后面的半反射层 S．读出光束以预设的角度照射该多层全息图的表面，使得反射部分沿传播的相反方向再次穿过该两个全息图层 h_1 和 h_2，产生再现 R_1，同时穿过全息图层 h_1 和 h_2 而出现的光场又穿过层 S，产生再现 R_2．

从而反射部分两次穿过全息图层 h_1 和 h_2．这就可以采用前述用于计算多路复用性质的方法来进行计算．换句话说，透射应用对应于两层全息图，而反射应用对应于四层全息图．图 10b 示出另一个实施例，其中层 S 设置在两个全息层 h_2 和 h_3 之间，从而读出光束首先穿过 h_1 和 h_2 然后入射层 S．读出光束的透射部分穿过全息图层 h_3 产生再现 R_2，同时如同图 10a 实施例的情形，光束的反射部分再次沿传播的相反方向穿过全息图层 h_1 和 h_2，产生再现 R_1．

此外，对于多个全息图层中的一个至少可以将其设计为是部分反射

的，并且，光学的变化可以是通过透射和反射读出光束表示出来的。例如，这可以通过形成引入有光学信息的表面结构来获得。因此，如果两个全息图层中的一个被设计为例如反射的，则它是一个反射的三层全息图

前述方法的另一个实施例在于确定一种可变全息图层，以由其计算多层全息图，其中由读出光束产生的该多层全息图的再现可以在外部进行修改。这种可变层例如可以借助于 LCD 元件来生成，如下面所述。为此，对一个选择的具有 k=j 的全息图层，预设至少两个不同的全息图函数 h_j^1 和 h_j^2，从而对至少两个不同的全息图函数 h_j^1 和 h_j^2 分别计算第 i 个全息图函数，然而再叠加。

在上文中，已经描述了用来计算多层全息图的方法。下面将描述依照本发明的生产方法的实施方式。

在由至少两个计算机生成全息图来制作多层全息图的方法中，计算至少两个全息图层，由此特别可采用上述方法中的一种。然而，该多层全息图怎样制作或者怎样计算并不是很重要的。仅需要知道的是各个全息层内的各条信息。该至少两个全息图的各条信息都被写进存储介质的光学可变层内，由此该至少两层就形成多层全息图的层状结构。

在这种方法的另一种实施方式中，全息图被写进存储介质的至少两个空间分离的区域内。因此，在信息写入之前，存储介质作为一个单元是可以利用的。从而在写入过程中，必须考虑全息图层彼此间的相对调节。而且，可以将全息图写入至少两种不同的存储介质内，然后将该至少两种不同的存储介质连接在一起形成一个整体。在此，单个全息图层可以不必在写入期间彼此调节来进行制作。

这种制作方法的另一种实施方式在于至少一个全息图层被写入作为存储介质或存储层的聚合物膜内。特别是，双向伸展聚合物膜很适合于计算机生成全息图的写入，从而也适合于多层全息图的制作。

一种可能是，对至少两个全息图膜的每一个都首先用至少一个全息图层来单个地写入，然后将该至少两个全息图膜结合到一起。另一种可能是，将至少两个全息图膜结合尤其是胶合在一起形成一个层状结构，

然后逐层地写入该至少两个结合到一起的全息图膜。这两种可能都具有前述的优点。

另外，具有可见明文信息的全息层至少有一层是可写入的。这样，除实际不能直接可读的信息外，光学上直接可读的一条文本或标志信息可表现在多层全息图上。

此外，可以嵌入一个至少部分反射层，从而就能获得多层全息图的前述性质。

最后，在多层结构制作期间至少可以嵌入一层具有临时可变光学性质的全息层，优选的采用一个 LCD 层。

下面描述一种两层全息图制作的实施方式。两个聚合物膜的叠层用作一种记录介质。如同计算机生成全息图的情形，用聚焦激光束来逐点的在记录介质上进行写入。选择具有大约 17^0 散度的激光束，由此在第二平面内的写入不会对第一平面内的信息写入产生不利影响。这是因为大的散度会使聚焦区域很小，以致在单层内用于信息写入的能量密度足够大，同时在相邻层内能量密度不足以改变记录介质的材料。

除前述的激光光刻术外，其它已知的方法像具有光致还原或电子束光刻的直接印刷法也可被用来制作多层全息图。

下面描述本发明用来读出多层全息图的方法。为此，优先采用前述方法来计算和制作的多层全息图。但计算和制作的具体细节是不重要的。为了能够读出多层全息图，仅需要知道制作的边界条件。为了达到读出的目的，将具有计算机生成多层全息图的存储介质设置在读出光束的光路中，由此调节预设在多层全息图的计算中、介于读出光束和存储介质间的读出光束自身的边界条件，光学记录体设置在再现平面内。这就使出现在再现平面内的图像能够记录和评定。

在这种读出方法的又一种实施方式中，将多层全息图的若干个全息图设置在至少两个不同的存储介质中，并根据预设在这些全息图计算中的边界条件来彼此地定位存储介质。这里，定位指的是相对彼此来调节空间设置，即调节存储介质间的间距、角度位置和方位。

优选地，该多层全息图的至少一个层具有暂时可变的、能从外部例如用电子学方法控制的振幅和／或相位信息。特别是，这可以借助于光

电元件尤其是 LCD 元件来实现，这些元件可在至少一个层内产生根据控制信号可变的振幅或相位信息。因而，在这种结构和借助于光电元件的电子控制对读出光束的调节下，就能够在两条或几条指令间切换再现。

下面描述本发明用于具有至少两个全息图的计算机生成多层全息图的存储介质，所述多层全息图优选是借助于前述用来制作多层全息图的方法制成的。该存储介质具有至少一个光学可变材料层，由此多层全息图的至少两个全息图可写入该至少一层内。

优选地，提供至少两个单独的材料层，由此该两个单独材料层每一层都具有至少一个多层全息图的全息图层。当其中一个单独存储介质被视作另一个的密钥时，该实施方式尤其可用于具有单独密钥的加密。

同时也提供若干个由光学可变材料制成且结合在一起的层。这种层结构特别包含有结合尤其是胶合在一起的聚合物膜。

正如上面已经描述的，可以计算两个不同全息图层间间隔的条件。由此可知两个全息图的最小间距满足下式:

$$\Delta z_{min} = \frac{ds}{\tan\alpha}$$

其中 ds 是计算机生成全息图的像素的几何尺寸，α角是一阶衍射的角度，依赖于波长。

同时可知，两个全息图间的最大间距Δz_{max}满足下式:

$$\Delta z_{max} = \frac{\Delta x}{2\tan\alpha}$$

其中Δx 是全息元件的几何尺寸，α角是一阶衍射的角度，依赖于波长。

优选地，至少一层包含有一条可见明文信息，使得多层全息图的外部携带有直接可读的信息，该可读信息并不必与多层全息图的全息内容相关联。

而且，优选设置至少一层来产生暂时可变的振幅图和／或相位图，尤其是提供一个光电层。因此，可以在其他等同读出条件下在不同的再现间进行切换。对于这类元件，例如可以使用一个 LCD 元件，它能够确保一个足够小的像素分辨率。

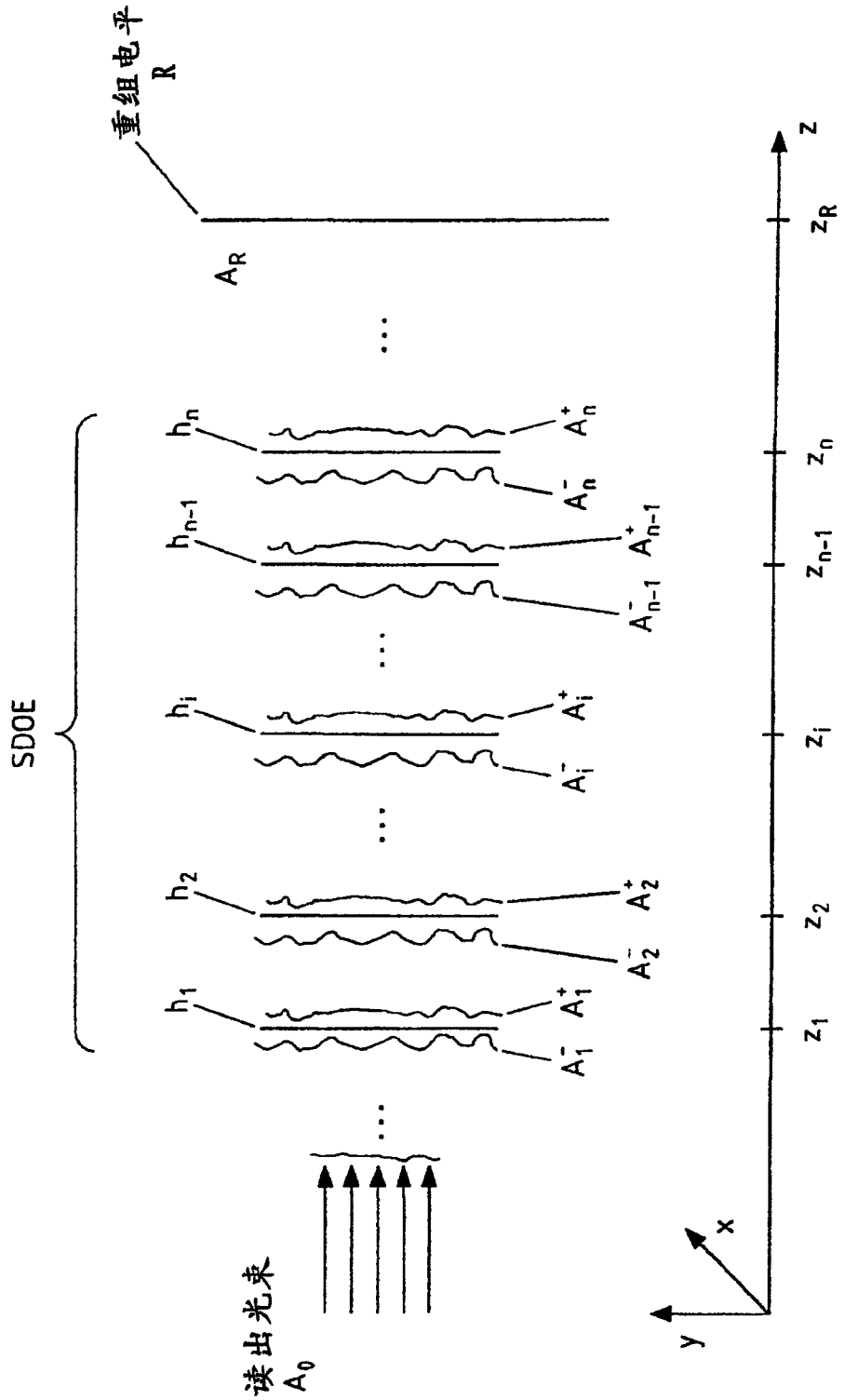

重组电平
R
A_R
SDOE
h_1
h_2
h_i
h_{n-1}
h_n
A_1^- A_1^+
A_2^- A_2^+
A_i^- A_i^+
A_{n-1}^- A_{n-1}^+
A_n^- A_n^+
读出光束
A_0
x
y
z
z_1 z_2 z_i z_{n-1} z_n z_R

图1

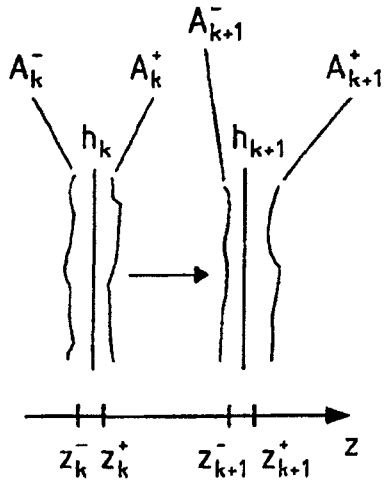


图 2

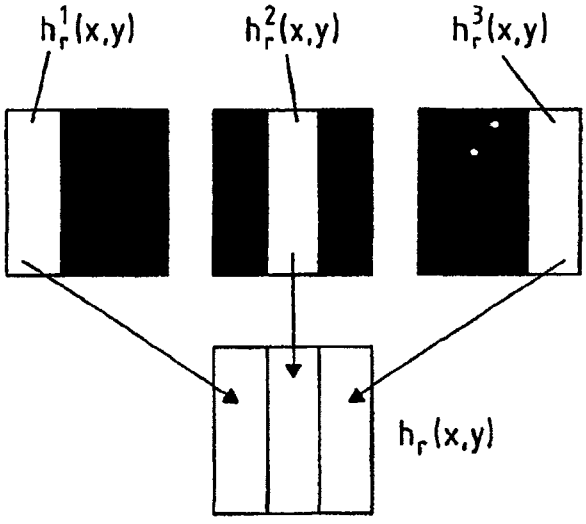


图 3

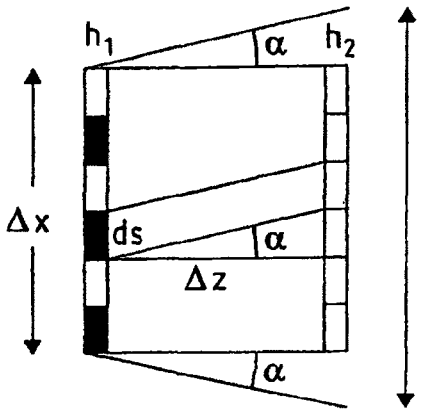


图4

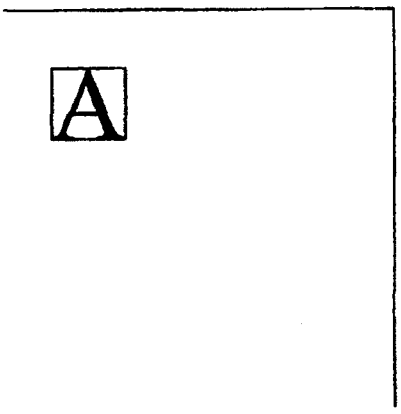
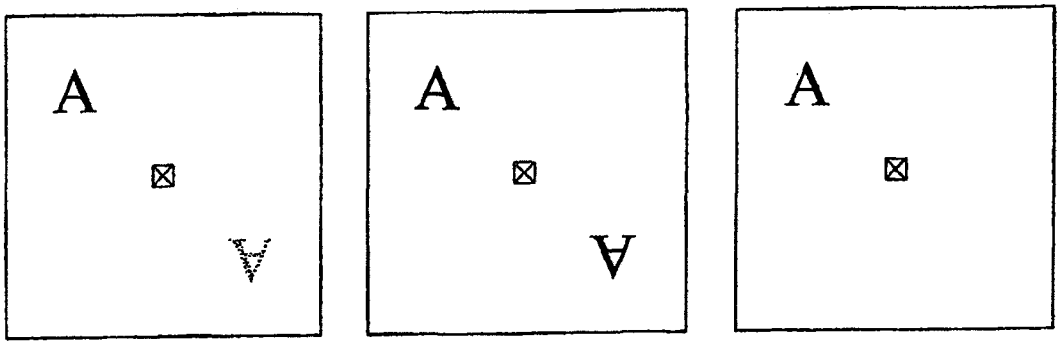
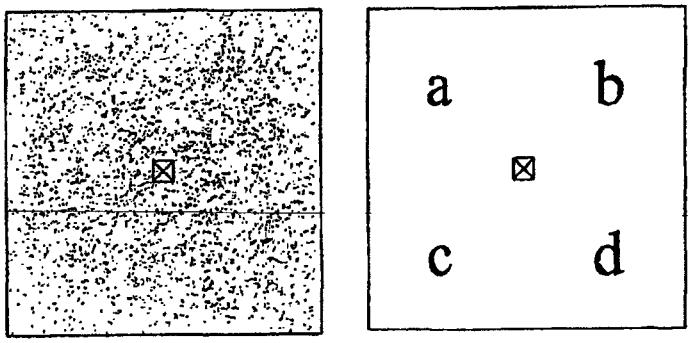


图5

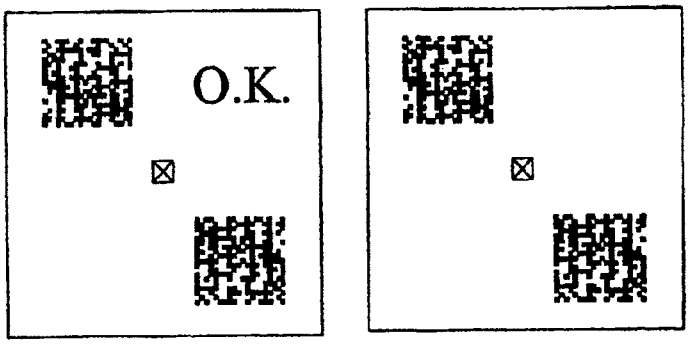


a) b) c)



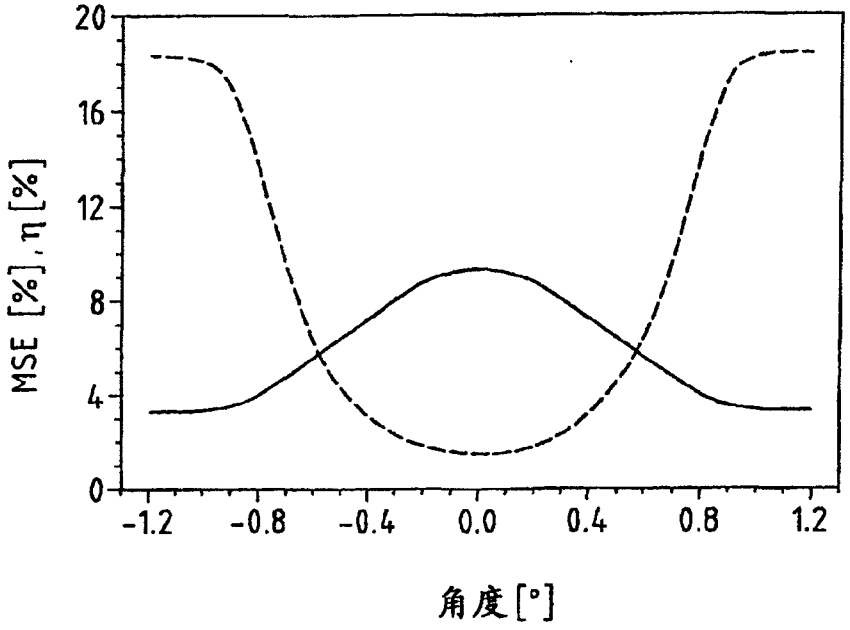
d) e)

图6



a) b)

图7


20
16
12
8
4
0
MSE [%], η [%]
-1.2
-0.8
-0.4
0.0
0.4
0.8
1.2
角度[°]
a)

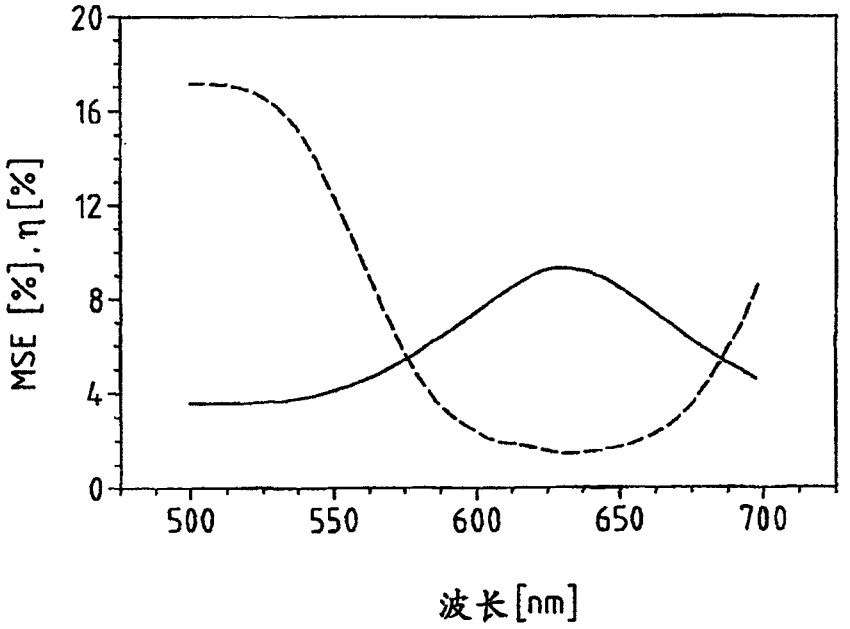
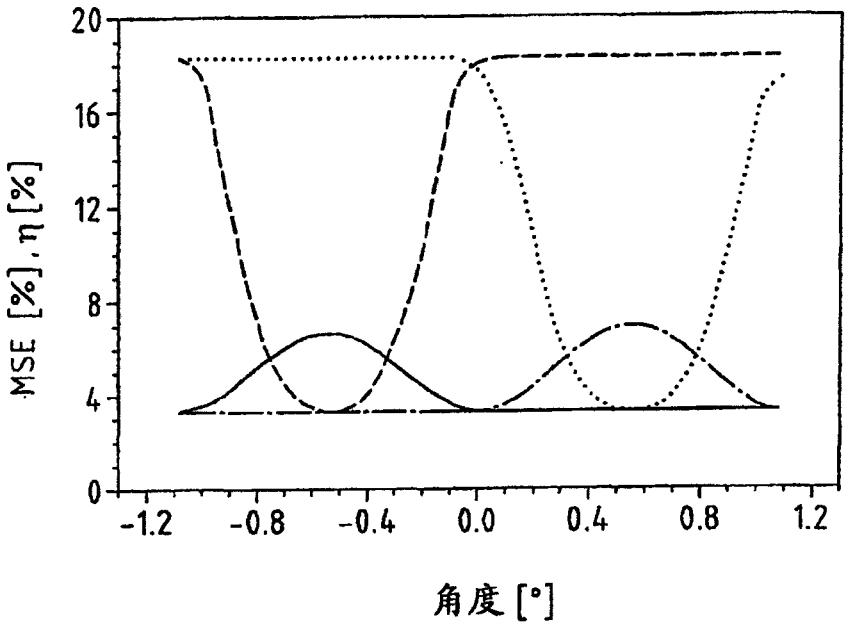
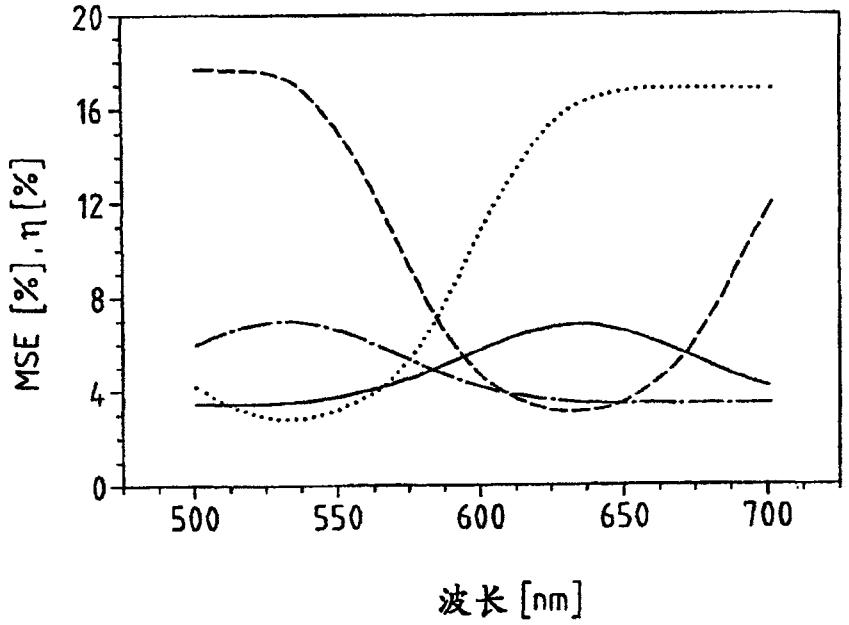

20
16
12
8
4
0
MSE [%], η [%]
500
550
600
650
700
波长[nm]
b)

图8

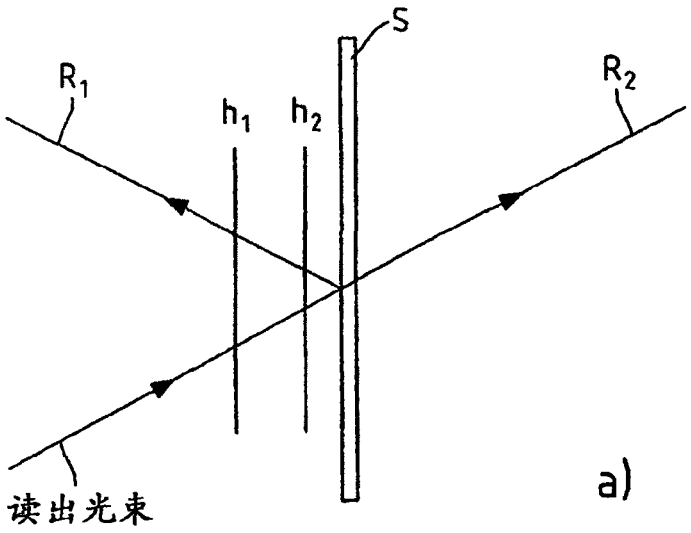

20
16
12
8
4
0
MSE [%], η [%]
-1.2
-0.8
-0.4
0.0
0.4
0.8
1.2
角度 [°]

a)


20
16
12
8
4
0
MSE [%], η [%]
500
550
600
650
700
波长 [nm]

b)

图9



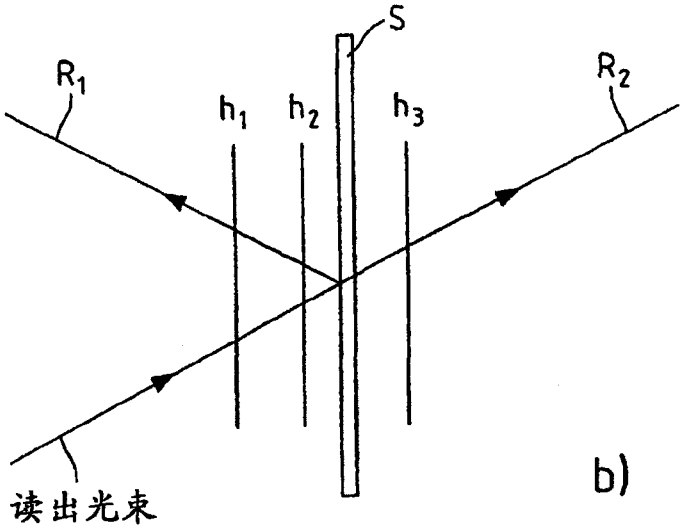


图10